

Aerospace Research in Bulgaria  
Volume 15 • Sofia • 1999  
Bulgarian Academy of Sciences

**Редакционна колегия**

Н. Георгиев (главен редактор),  
Г. Мардиросян (зам. гл. редактор),  
П. Велинов, П. Гецов, Т. Иванова,  
Д. Мишев, П. Неновски, Н. Нечев,  
П. Пенев, А. Попов, Х. Спиридонов,  
С. Ставрев, Н. Стойчев, Л. Филипов,  
С. Чапкьнов

**Editorial Board**

N. Georgiev (Editor-in-Chief),  
G. Mardirossian (Secretary),  
P. Velinov, P. Getzov, T. Ivanova,  
D. Mishev, P. Nenovsky, N. Natchev,  
P. Penev, A. Popov, Kh. Spiridonov,  
S. Stavrev, N. Stoitchev, L. Filipov,  
S. Chapkunov

**Адрес**

Аерокосмически изследвания  
в България  
Институт за космически  
изследвания при БАН  
България, София 1000,  
ул. "Московска" № 6

**Address**

Aerospace Research in Bulgaria  
Space Research Institute,  
Bulgarian Academy of Sciences  
6 Moskovska St., Sofia 1000,  
Bulgaria

Водещ редактор  
Н. Евтимова

Технически редактор  
В. Васев

Превод  
Л. Кралева

Предпечатна подготовка  
В. Попова

Формат 70x100/16  
Печ. коли 10

Брайлова печатница  
на Съюза на слепите  
в България,

1115 София,  
ул. "Найчо Цанов" № 127

© БАН, Институт  
за космически изследвания  
1999

# АЕРО- КОСМИЧЕСКИ

## ИЗСЛЕДВАНИЯ В БЪЛГАРИЯ 15

СОФИЯ • 1999

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

### Съдържание

- Мария Димитрова**  
Влияние на вътрешните процеси на енергообмен върху глобалното поведение на акреционното течение / 3
- Димитър Димитров**  
Елиптични акреционни дискове с постоянен ексцентрицитет.  
II. Стандартен модел на а-диск / 21
- Стефан Чалкынов, Николай Банков, Мариана Гушева, Георги Станев, Генадий Гдалевич, Вячеслав Губский**  
Измерение электростатического поля при помощи сферических ионных ловушек / 22
- Иван Христов, Живко Жеков, Гаро Мардиросян, Доротея Иванова**  
Сателитен абсорбционен озонотетър / 32
- Мария Петрунова, Бончо Пеев**  
Повишаване на информационните възможности на сондов експеримент със сферичен йонен уловител / 33
- Венцеслав Рашков, Ангел Христов, Чавдар Пандев**  
Метод на обединената синхронизация при пространствено позициониране на подвижен обект / 45
- Венцеслав Рашков, Ангел Христов, Виктор Маринов**  
Синтез на приемно устройство с обединена синхронизация в спътникови навигационни системи / 54

### Content

- Maria Dimitrova**  
The influence of the inner processes of energy transphere on the global accretion flow behaviour / 10
- Dimitar Dimitrov**  
Elliptical accretion discs with constant eccentricity.  
II. Standard a-disc model / 11
- Stefan Chapkunov, Nikolai Bankov, Mariana Gusheva, Georgi Stanev, Genadiy Gdalevich, Vlachishlav Gubskiy**  
Measurement of the electric field by spherical ion trappers / 26
- Ivan Hristov, Jivko Jekov, Garo Mardirossian, Doroteia Ivanova**  
Satellite absorption ozonometer / 27
- Maria Petrunova, Boncho Peev**  
Extention of the information capability of the probe experiment with the spherical ion probe / 36
- Ventseslav Rashkov, Angel Christov, Chavdar Pandev**  
Multiplex synchronization method at spatial positioning of mobile object / 37
- Ventseslav Rashkov, Angel Christov, Victor Marinov**  
Synthesis of receiver with multiplex synchronization in satellite navigation systems / 46

**Николай Бирюк, Владимир Дамгов**  
Качествен анализ на свободните процеси в обобщен линеен трептящ кръг с периодични параметри. Част 3. Анализ на свободните процеси в интервално-линейна и квази-хармонична трептяща верига / 63

**Никола Георгиев, Гаро Мардиросян, Хернани Спиридонов**  
БАЛКАНПРОБ — космически проект за изследване на динамиката на литосферата на България и Балканите / 74

**Тодор Назърски, Георги Каменов, Чавдар Левчев, Христо Проданов, Николай Банков**  
Контролно-измервателна апаратура към саръхвисокочестотната сканираща дуполаризационна радиометрична система Р-400, работеща на орбитална станция "Мир" / 75

**Николай Банков**  
Един метод за локализиране на зони с повишена мощност на компоненти на магнитното поле с честота 8,3 Нз по данни от ИПМП на борда на "ИНТЕРКОСМОС БЪЛГАРИЯ-1300" / 82

**Никола Георгиев, Румен Недков**  
Ректификация на геометричните деформации при космическите сканерни изображения чрез апроксимиращи функции / 90

**Михаил Михалев, Зоан мин Чунг**  
Метод на нормалните еволюционни криви в СВЧ аерокосмическия мониторинг на надводна растителност / 99

**Владимир Вълчев**  
Растителната покривка като обект за изучаване с дистанционни методи / 108

**Пламен Христов, Петър Гецов, Пламен Ангелов**  
Контрол на работата на компютърни системи за управление и на системи за полунатурно моделиране в реално време чрез протоколен модел на Хоар / 114

**Димитър Йорданов**  
Еволюцията на вътрешните обратни връзки в биомеханичната система "пилот—самолет" / 119

**Юлика Симеонова, Тинка Грозданова, Людмила Динкова**  
Някои особености на процесите триене и износване във вакуум / 125

**Христо Николов**  
Приложение на невронни мрежи при класификация на многоканални изображения, получени при дистанционни изследвания / 135

**Красимир Стоянов**  
Определяне на някои аеродинамични характеристики на въздушно-космически летателен апарат в режимите на кацане чрез моделиране на обтичане с откъсване на потока / 136

**Димитър Данов, Ирен Димитрова**  
Магнитни измервания с въртящ се космически апарат / 150

**Ищан Чеуз**  
Фулерените — същност и приложение / 157

**Nikolai Birjuk, Vladimir Damgov**  
Qualitative analysis of the free processes in a generalized linear oscillating circuit with periodic parameters. Part 3. Analysis of the free processes in piece-wise linear and quasi-harmonic oscillating circuit / 55

**Nikola Georgiev, Garo Mardirossian, Hernani Spiridonov**  
BALKANPROB — Space project for studying the dynamics of the lithosphere of Bulgaria and the Balkans / 64

**Todor Nazarsky, Georgi Kamenov, Chavdar Levchev, Hristo Prodanov, Nikolai Bankov**  
Measurement-control equipment for the superhighfrequency scanning twopolarization radiometric system R-400, working on board of the "Mir" orbital station / 81

**Nikolai Bankov**  
A method to localize the zones with upraised amplitude of the components of magnetic field at a frequency of 8.3Hz, measured by IPMP on board of "INTERCOSMOS BULGARIA 1300" / 89

**Nikola Georgiev, Rumén Nedkov**  
Rectification of the geometric deformations in space scanner images by approximation functions / 98

**Mikhail Mikhalev, Zoan Min Chung**  
The normal evolution signatures method for remote sensing monitoring of vegetation / 107

**Vladimir Vulchev**  
Vegetation cover as the subject of study by remote sensing methods / 113

**Plamen Hristov, Peter Getzov, Plamen Angelov**  
A functional control of computer control systems and real time simulation systems by means of Hoare's trace model / 118

**Dimitar Iordanov**  
Evolution of internal feedbacks / 124

**Yulika Simeonova, Tinka Grozdanova, Lyudmila Dinkova**  
Some peculiarities of the processes friction and wearing out in vacuum / 129

**Hristo Nikolov**  
Neural networks in classification of remotely sensed multichannel images — A case study / 130

**Krassimir Stoianov**  
Determination of some aerodynamic characteristics of an aerospace aircraft in the landing regime by stream-line modelling with flow separation / 149

**Dimitar Danov, Iren Dimitrova**  
Magnetic measurements on board a rotating satellite / 156

**Istvan Cheush**  
Fullerenes — essence and application / 160

## Влияние на вътрешните процеси на енергообмен върху глобалното поведение на акреционното течение

Мария Димитрова

*Институт за космически изследвания, БАН*

### Въведение

Редица рентгенови източници бяха отъждествени с тесни двойни системи, съдържащи компактен обект, нормална звезда и газово течение между тях. Стана твърде актуално да бъдат подробно изяснени процесите, отговорни за формирането на рентгеновото излъчване, а също така — причините за неговата променливост.

Детайлното описание на физичните процеси в газовото течение в тясна двойна система е невъзможно без използването на числени симулации. Дори по този начин описанието никога не отчита влиянието на абсолютно всички процеси, които протичат в газовата среда.

Едно от основните приближения е размерността на разглежданата област. Първоначалните едномерни разглеждания [1, 2] постепенно бяха изместени от двумерни [3–9], а след това и тримерни [10–14] модели. Единодушно е мнението, че газовото течение притежава сложна структура [3, 8, 9, 15], която не е без значение за формирането и поведението на рентгеновата светимост. Въпреки това обаче, поради твърде голямата трудоемкост на сложните тримерни модели, за редица задачи се приема, че двумерното приближение е достатъчно добро [7, 8, 15, 17].

По-интересен от физична гледна точка е въпросът за начина на описание на процесите, отговорни за преразпределението и освобождаването на енергия и момент на движение между газовото течение и околното пространство, както и вътре в самото течение между отделните му части. Основни величини, характеризиращи тези процеси, са вискозитетът и

коэффициентите на непрозрачност, топлопроводност, излъчване и поглъщане на лъчението. От друга страна, от значение е степента на отчитане на влиянието им върху поведението на газа, което се изразява основно във вида на записване на уравненията на състояние и енергетичен баланс.

Докато повечето автори показват, че вискозитетът влияе основно със силата си, но не и чрез аналитичния вид на запис [16, 18], то отчитането на взаимодействието на газа с лъчението е доста по-сложно. Практически всички разглеждания ползват, в зависимост от акцента на симулацията или приближение на оптически много плътен слой, чернотелно или сиво приближение, или оптически много тънък слой. По този начин се избягва решаването на уравнението на пренос на лъчението.

Освен това, много автори не включват газовото налягане в уравнението на състояние [11–13].

От трета страна, уравнението на енергетичния баланс често се записва в непълн вид. При някои модели [11–13], това уравнение включва само един член. При други се отчита още влиянието на вискозното взаимодействие [14]. Трети направо приемат, че количеството погълната енергия се равнява на количеството отделена във всеки един момент и за всеки елемент от течението [1, 15, 17].

Важно е да се обоснове доколко и в кои случаи всяко едно от тези приближения е валидно и да се разбере влиянието на типовете непрозрачност върху енергообмена в течението.

### Постановка на задачата

В досегашните си разглеждания [15, 17] сме се ограничили до приближението на Хайакава (1) за равновесие на количествата погълната и отделена енергия за всеки елемент от газовото течение.

В настоящата работа сме направили опит за по-пълно описание на физичните процеси на енергообмен, като уравнението на енергетичния баланс сме записали във вида

$$(1) \quad \frac{d\varepsilon}{dt} = -p \operatorname{div} \vec{V} + \frac{\eta}{2} (\sigma_{1k})^2 + \operatorname{div} (\lambda \operatorname{grad} T) - \operatorname{div} W.$$

В така разписаното уравнение, ентропията е ентропия на идеален газ, записана във вида

$$(2) \quad \varepsilon = pTS,$$

$$(3) \quad S = S_{\text{gaz}} = C_V \ln p \rho^\gamma.$$

Тук не се отчита ентропията на лъчението, тъй като неговото влияние върху енергообмена е отчетено в дясната страна на уравнението.

Прието е приближение на лъчиста топлопроводност [19]. По този начин последните два члена в (1) могат да се обединят и уравнението добива простия вид

$$(4) \quad \frac{d\varepsilon}{dt} = -p \operatorname{div} \vec{V} + \frac{\eta}{2} (\sigma_{1k})^2 + \operatorname{div} [(\lambda + \chi) \operatorname{grad} T],$$

като  $\chi$  е коэффициентът на лъчиста топлопроводност, а  $\lambda$  — топлопроводността на газа.

Такова приближение е валидно за оптически плътен слой, когато дължината на свободния пробег на фотоните е много малка в сравнение с размерите на разглежданата област. В този случай се записва във вида

$$(5) \quad \chi = 1/l,$$

където  $l$  е усреднената дължина на свободния пробег. Прието е още приближение на сива материя, при което

$$(6) \quad \chi(v, \rho, T) = \chi(\rho, T) = \text{const}(v).$$

Остава да се разпише коефициентът на поглъщане. В най-общия случай той включва Томпсънов ефект, свободно-свободни преходи и др.

По този начин уравнение (4) е достатъчно определено, за да се използва при моделиране поведението на течението.

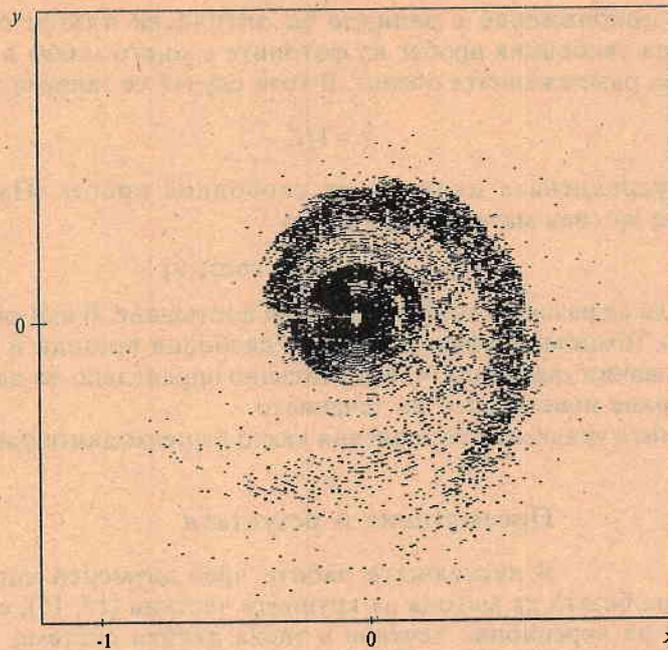
Останалите уравнения са записани както в предходните работи [15, 17].

### Пресмятания и резултати

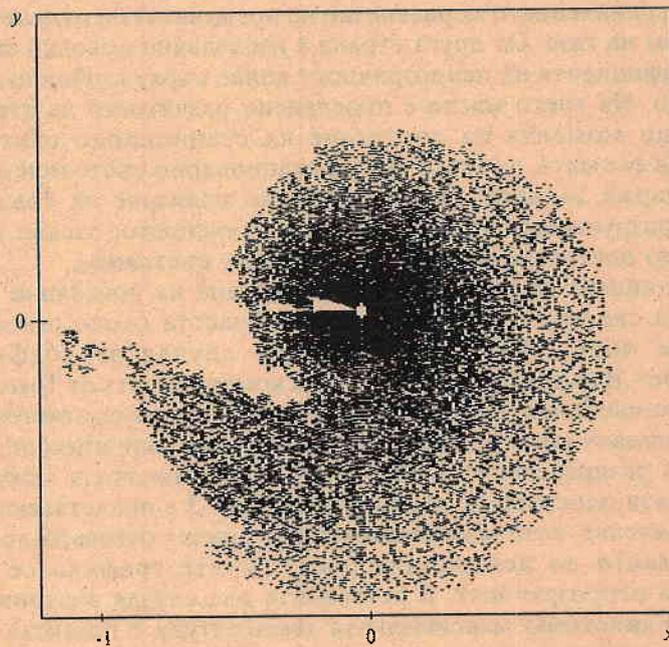
В настоящата работа чрез двумерен числен модел, разработен на базата на метода на крупните частици [15, 17], е изследвано поведението на акреционнo течение в тясна двойна система, съдържаща неутронна звезда с маса  $M_{NS} = 1,5 M_{\odot}$  и червен гигант с маса  $M_2 = 3,5 M_{\odot}$ , запълнила областта си на  $R_{\text{ош}}$ .

Цел на работата е да се провери доколко правомерно е било да се разглежда ограничението за равенство на погълнатата и отделената енергия за всеки обем на газа. От друга страна е изследвано доколко аналитичният запис на коефициента на непрозрачност влияе върху глобалното поведение на течението. На трето място е проследено развитието на структурата на течението до момента на достигане на стационарно състояние. Има основание да се смята, че всяко такова стационарно състояние е нестабилно и не се задържа задълго. При евентуално излизане от това състояние, свързано с разрушаване на структурата на течението, следва тя отново да се изгради до достигане на ново стационарно състояние.

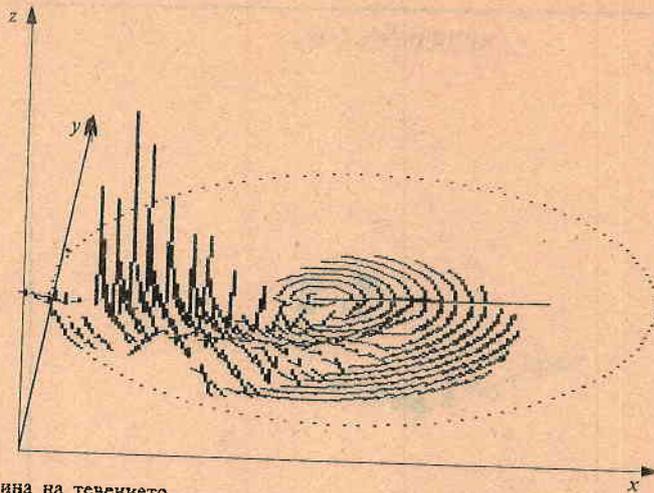
Пресмятанията се извършват до достигане на постоянна стойност на рентгеновата светимост, продуцирана в областта около повърхността на компактния обект. Разгледани са три случая за коефициента на непрозрачност. В първия случай се отчита комбинацията от Томпсънов ефект и от свободно-свободни преходи. Във втория и в третия са отчетени съответно само Томпсъновия ефект и само свободно-свободните преходи. На фиг. 1 и 2 е показано разпределението съответно на плътността и температурата в екваториалната плоскост на течението. На фиг. 3 е представена дебелината му в  $z$  направление, като максималната ѝ стойност отговаря на една десета от разстоянието до централния обект. Трите графики се отнасят за комбинирана непрозрачност. В останалите два случая картините са почти идентични. Единствено максималната температура е по-ниска с 2 и 2,5 % съответно за случая на Томпсънов ефект и от свободно-свободни преходи.



Фиг. 1. Разпределение на повърхнинната плътност в екваториалната равнина на акреционното течение

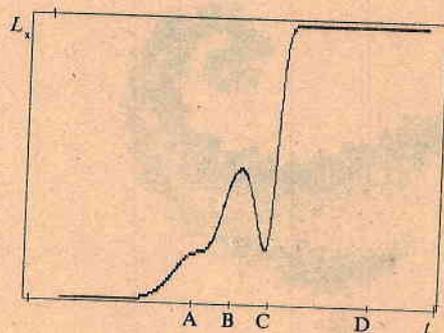


Фиг. 2. Разпределение на температурата в екваториалната равнина на акреционното течение

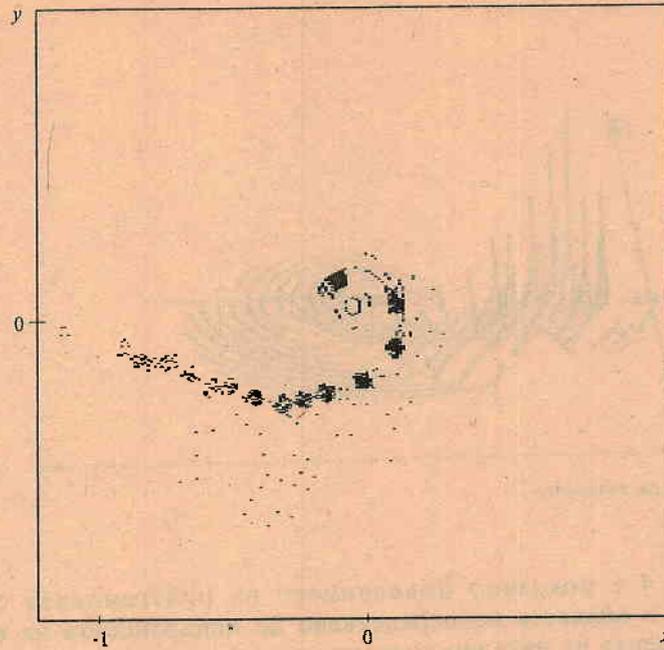


Фиг. 3. Дебелина на течението

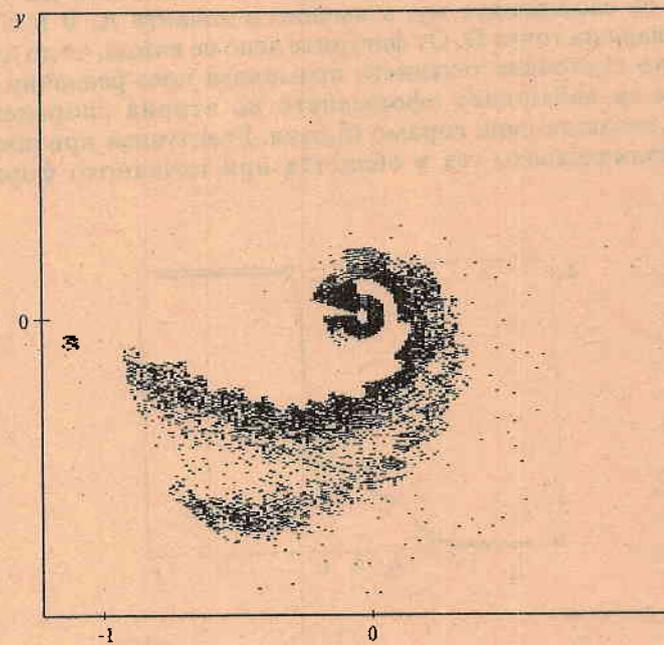
На фиг. 4 е показано поведението на рентгеновата светимост, продуцирана в областта непосредствено до повърхността на компактния обект, от момента на начално постъпване на газ през вътрешната точка на Лагранж, до достигане на стационарната ѝ стойност. На фиг. 5, 6 и 7 е представено разпределението на повърхнинната плътност на течението в три момента от еволюцията му, а именно в точките А, В и С от фиг. 4. Фигура 1 отговаря на точка D. От фигурите ясно се вижда, че до достигането на стационарно състояние течението преминава през различни фази, като може ясно да се наблюдава оформянето на втория спорален фронт и промяната на неговата сила спрямо първия. Евентуална причина за това е промяна на количеството газ в областта при началното формиране на течението.



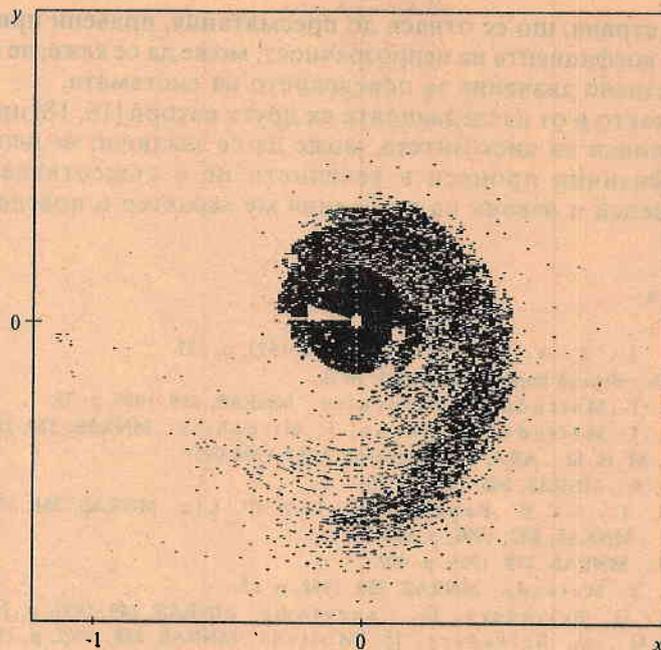
Фиг. 4. Еволюция на рентгеновата светимост до достигане на стационарно състояние



Фиг. 5. Разпределение на повърхнинната плътност в екваториалната равнина на акреционното течение до формирането на втори ударен фронт



Фиг. 6. Разпределение на повърхнинната плътност в екваториалната равнина на акреционното течение при първия максимум на светимостта



Фиг. 7. Разпределение на повърхнинната плътност в екваториалната равнина на акреционното течение при последвалия минимум на светимостта

### Дискусии

Ако се сравнят показаните на фиг. 1, 2 и 3 разпределения на основните параметри на газа с тези от предходните ни изследвания, се вижда, че по характера си структурата на течението при по-пълното отчитане на енергообмена не се променя. Получените стойности за стационарната рентгенова светимост, максималната плътност в екваториалната област и дебелината на течението се отличават с няколко процента. Максималните скорости са по-ниски тук с около 10 %. Разпределението им не е показано, тъй като то е напълно идентично с това от [15, 17]. Температурата е по-висока с няколко процента и с по-плавно разпределение. Ударните фронтове са по-плавни, но и по-ясно изразени.

От казаното дотук може да се заключи, изводите, направени при опростения модел, поне що се отнася до стационарните състояния на течението, могат да се приемат за достоверни.

С голяма доза увереност същото може да се каже и за поведението на течението при нестационарни режими на акреция. Всички резултиращи променливости в рентгеновата светимост в тези случаи [20] сме свързвали със стабилността на спиралните ударни фронтове и разпространението на вълни по тяхната дължина. Няма физически причина премахването на изкуствено наложените преди ограничения в енергообмена да доведе до качествено ново поведение. Все пак при сравнение на моделираните вариации с реални обекти е по-правомерно да се използва този по-реалистичен модел.

От друга страна, що се отнася до пресмятания, правени при различено разписване на коефициента на непрозрачност, може да се каже, че последното не е от съществено значение за поведението на системата.

От това, както и от изследванията на други автори [16, 18] при различни аналитични записи на вискозитета, може да се заключи, че непознаването на точните физични процеси в течението не е съществена пречка за качествени оценки и изводи на глобалния му характер и поведение.

#### Литература

1. Shakura, N. I., R. A. Sunyaev. *A&A*, 24, 1973, p. 337.
2. Hayakawa, S. *Physics Reports*, 121, 1985, № 6.
3. Sawada, K., T. Matsuda, I. Hirochisu. *MNRAS*, 219, 1986, p. 75.
4. Sawada, K., T. Matsuda, M. Inoue, I. Hirochisu. *MNRAS*, 224, 1987, p. 307.
5. Heemskerk, M. H. M. *A&A*, 1994, (preprint AIAP-1994-025).
6. Whitehurst, R. *MNRAS*, 266, 1994, p. 35.
7. Savonije, G. J., J.C.B. Papaloizou, D.N.C. Lin. *MNRAS*, 268, 1994, p. 13.
8. Drimmel, R. *MNRAS*, 282, 1996, p. 982.
9. Murray, J.R. *MNRAS*, 279, 1996, p. 402.
10. Sawada, K., T. Matsuda. *MNRAS*, 255, 1992, p. 17.
11. Molteni, D., G. Belvedere, G. Lanzafame. *MNRAS*, 249, 1991, p. 748.
12. Lanzafame, G., G. Belvedere, D. Molteni. *MNRAS*, 258, 1992, p. 152.
13. Lanzafame, G., G. Belvedere, D. Molteni. *MNRAS*, 263, 1993, p. 839.
14. Meglicki, Z., D. Wickremasinghe, G. V. Backnell. *MNRAS*, 264, 1993, p. 691.
15. Dimitrova, M. M., L. G. Filipov. *ESA SP-311*, 1990, p. 255.
16. Milson, I. A., P. Таам. *MNRAS*, 283, 1996, p. 919.
17. Dimitrova, M.M. *Аерокосмически изследвания в България*, 1997, кн. 13, p. 18.
18. Chakrabarti, S. K., D. Molteni. *MNRAS*, 272, 1995, p. 80.
19. Четверушкин, Б. Н. *Москва, Наука*, 1985.
20. Dimitrova, M. M. *Аерокосмически изследвания в България*, 1997, кн. 13, p. 25.

Постъпила на 6.VI.1997г.

### The influence of the inner processes of energy transphere on the global accretion flow behaviour

*Maria Dimitrova*

(Summary)

It is presented a two dimension numerical simulation of the accretion flow behaviour in a close binary sistem. It is discussed the influence of the analitical writing of the energy transphere equation and opacity on the global accretion flow behaviour.

## Elliptical accretion discs with constant eccentricity. II. Standard $\alpha$ -disc model

*Dimitar Dimitrov*

*Space Research Institute, Bulgarian Academy of Sciences*

### I. Introduction

In 1970's Shakura' and Sunyaev [1] have developed a stationary accretion disc model widely known as a "standard  $\alpha$ -disc". They have introduced a parameter  $\alpha$  which simultaneously describes the efficiency of two of the most important angular momentum transport mechanisms. Namely, the turbulent viscosity and the magnetic field viscosity. The parameter  $\alpha$  gives the proportionality relation between the shear stress  $w_{r\phi}$  and  $\rho v_s^2$ , where  $\rho$  is the gas density and  $v_s$  is the sound speed. Values of  $\alpha$  under an astrophysical interest lie in the range  $10^{-3} \leq \alpha \leq 1$ . It should be noted that during the type I and type II X-ray burst events the intensive flow of low angular momentum X-ray photons from the neutron star surface is able to increase strongly mass accretion rate  $\dot{M}_*$ , although the radiation pressure is acting to push out the infalling matter [2-4]. Such an obviously nonstationary mechanism of angular momentum release from the inner disc matter is not included in the standard  $\alpha$ -disc model, where the radiative and molecular viscosities are neglected [1]. The importance of radiative viscosity is also mentioned by Arav and Begelman [5], but these cases include considerations of very hot innermost disc regions and jets arising from supercritical accretion regime. Pringle [6] has recently discussed the present status of the angular momentum transport problem in accretion discs. It should be expected that changing of the physical conditions naturally leads to different values of  $\alpha$ . For example, the radially moving thermal instability front can delimit the accretion disc into relatively "cool" region with  $\alpha = \alpha_c$  and "hot" part with  $\alpha = \alpha_h$  [7, 8]. We shall not consider in this paper such a possible type of instability and shall neglect the radial dependence of  $\alpha$  at all. We shall also neglect the vertical disc structure (the  $z$ -coordinate dependence), using disc-height averaged quantities (temperature  $T$ , density  $\rho$ , etc.).

The standard  $\alpha$ -model is described by Shakura and Sunyaev [1] for steady-state circular discs. Recently Syer and Clarke have derived solutions for stationary discs with constant eccentricities in the form of the two-dimensional analogues of the  $\alpha$ -model ([9], Appendix B). This generalization of the standard  $\alpha$ -disc model was related with the observational and theoretical evidences that the tidal interaction in some close binary stellar systems may cause elongation of the accretion discs (mostly of their outer parts) [10–12].

## II. Accretion disc model

Lyubarskij et al. [13] have investigated analytically and numerically viscous accretion discs consisting of series of nested elliptical streamlines. For every streamline with a major semi-axes  $a$ , eccentricity  $e$  and focal parameter  $p=a(1-e^2)$ , the viscosity coefficient  $\eta$ , temperature  $T$ , pressure  $P$  and volume density  $\rho$  were averaged over the disc thickness  $H$ . Lyubarskij et al. [13] confirmed Syer and Clarke's [9,14] conclusion about the longevity of eccentric discs in a Keplerian gravitational potential also in the case of variable eccentricity  $e=e(p)$ . It should be noted that these inferences are not influenced by the initial conditions which describe the accretion disc bearing. Throughout this paper we shall investigate the problem of the accretion disc radial structure only in the particular case of constant eccentricity  $e$  (i.e.,  $\partial e/\partial p \equiv e_p = 0$ ).

Following Lyubarskij et al. [13], instead of the usual polar coordinates  $(r, \varphi)$ , we shall use the nonorthogonal curvilinear Eulerian coordinates  $(p, \varphi)$ . The transformation between them can easily be performed by means of the relation

$$(1) \quad p = r(1 + e \cos \varphi),$$

where  $\varphi$  is measured with respect to the direction of pericentre, which is assumed to be the same for all particle streamlines. According to above expression, if any quantity (e.g., disc surface density  $\Sigma$ ) is a constant around the streamline, but depends on the focal parameter  $p$ , a transition to the radial coordinate  $r$  (i.e., the distance from the centre of the compact object) recovers the angular dependence on the azimuthal angle  $\varphi$ . The considered model uses the approximation of "pressure-free" fluid in the sense that the pressure does not play direct role in the dynamics of the flow, except that it controls the local viscosity. This allows a quasi-Keplerian motion of the gas particles, which spiral inward with a low radial drift velocity  $v^r$ . The latter is connected to the local accretion rate  $\dot{M}$  ([13], eq. (30)), assumed to be a constant with respect to  $p$  and time  $t$ , as we deal *ab initio* with the stationary accretion problem. Our consideration includes the assumption that both  $H$  and  $T$  are in local equilibrium (case C from the model of Syer and Clarke [9, 14]), which means that these quantities change fast enough along the streamlines in order to attain a correspondence with the other local physical conditions. On the other hand, neglecting the radial heat transfer, we shall assume that the heat losses are slow. This enables us to accept an adiabatic motion of the gas during its nearly Keplerian orbiting along the streamlines:

$$(2) \quad P(p, \varphi) = K(p, \varphi) \rho^\gamma(p, \varphi),$$

where  $K$  is the specific gas entropy. The power  $\gamma$  is the adiabatic index and assumes values  $5/3$ ,  $7/5$  and  $4/3$  for an ideal gas consisting of one, two or more than two kinds of particles, correspondingly. By analogy with the standard  $\alpha$ -disc model [1], the eccentric accretion disc can also be divided into three different zones [13]:

(i) innermost zone A with a radiation dominated plasma ( $\gamma = 4/3$ ) and opacity  $k$  determined by Thomson scattering

$$(3) \quad k = k_T = \sigma_T / m_p,$$

where  $\sigma_T$  is the Thomson cross-section and  $m_p$  is the proton mass. The equation of state is given by

$$(4) \quad P = \frac{4\sigma_B}{3c} T^4,$$

where  $c$  is the light speed and  $\sigma_B$  is the Stefan-Boltzmann constant;

(ii) middle zone B with an ideal gas dominated plasma with equation of state

$$(5) \quad P = \frac{R}{\mu} \rho T,$$

where  $R$  is the universal gas constant and  $\mu$  is the mean molecular weight. If the plasma is fully ionized, then  $\mu = 1/2$  (pure hydrogen composition),  $\mu = 4/3$  (pure helium composition), and  $\mu \approx 2$  if only heavier elements present. For cosmic abundance  $\mu \approx 0.6$ . For the adiabatic index we assume value  $\gamma = 5/3$ . The opacity law for this zone is Thomson scattering;

(iii) outermost zone C with an ideal gas dominated plasma (equation of state (5)) and free-free absorption

$$(6) \quad k = k_{ff} = \zeta \rho T^{-7/2} \approx 6.273 \times 10^{22} \rho T^{-7/2},$$

where  $\zeta$  is a numerical constant, which value depends on the mean Gaunt factor ( $\bar{g} \approx 1$ ) and the chemical composition [15]. The adiabatic index is accepted to be equal to  $\gamma = 5/3$ .

Everywhere in this paper we shall use lower indices A, B and C to label quantities which are referred to one of the above mentioned zones, respectively. We shall also describe briefly the following four equations, giving an additional information which is enough to specify the structure of the constant eccentricity elliptical  $\alpha$ -disc model. More details about these relations may be found in ([9], Appendix B) and in [13]. Note that the form of these expressions is independent of what of the three disc zones is under investigation, except the values of the integration constants  $D_A(e)$ ,  $D_B(e)$  and  $D_C(e)$  which must be evaluated from the corresponding boundary conditions.

The equation for angular momentum balance may be written as

$$(7) \quad \int_0^{2\pi} \eta(p, \varphi, e) Y(e, \varphi) d\varphi = \frac{2}{3} \left( \dot{M} - \frac{D(e)}{\sqrt{GM\rho}} \right),$$

where  $D(e) = D_A(e), D_B(e)$  or  $D_C(e)$ ;  $G$  is the gravitational constant,  $M$  is the mass of the compact object in the disc centre and

$$(8) \quad Y(e, \varphi) = \frac{1}{3(1+e \cos \varphi)^3} \left[ (3+e^2) + (7e+e^3) \cos \varphi + 4e^2 \cos^2 \varphi \right],$$

(for  $e_p = 0$ ) is an auxiliary function [13, 16]. Taking into account that the vertically averaged volume density is  $\rho = \Sigma/H$  and the Keplerian angular frequency is  $\omega_K = \sqrt{GM/r^3} = \sqrt{GM/p^3(1+e \cos \varphi)^{3/2}}$ , we can express the condition of hydrostatic equilibrium in the  $z$ -direction of the disc as

$$(9) \quad \frac{P(z=0)}{\rho H} = \frac{P(z=0)}{\Sigma} = \frac{1}{8} \omega_K^2 H.$$

In the third place, the heat removal by radiation from the accretion disc is described by the thermal balance equation. According to Shakura and Sunyaev ([1], eq. (2.7)), if  $Q$  is the energy flux radiated from unit disc surface per unit time, then it is related to the energy density of radiation  $\varepsilon_r$  by

$$(10) \quad \frac{3}{4} \frac{Q}{c} k \Sigma = \varepsilon_r = \frac{4\sigma_B}{c} T^4.$$

Therefore, the radiation losses from the two boundaries (upper and lower) of the disc contour per unit time are

$$(11) \quad \int_0^{2\pi} \frac{32\sigma_B T^4}{3k\rho H} \sqrt{g} d\varphi dp.$$

In accordance with our adiabatic approach, we shall neglect the work done over the contour by the outer forces and shall retain only the term describing the heat generation inside the contour by the viscous forces ([13], eq. (16)). Consequently, supposing the validity of the diffusion approximation, the thermal balance equation becomes

$$(12) \quad \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \eta \sigma_{ik} \sigma^{ik} \sqrt{g} d\varphi = \int_0^{2\pi} \frac{32\sigma_B T^4}{3k\rho H} \sqrt{g} d\varphi,$$

where  $\sigma^{ik}$  is the shear tensor, related to the viscous stress tensor  $w^{ik}$  by means of the viscosity coefficient  $\eta$  ( $w^{ik} = \eta \sigma^{ik}$ ;  $i, k = p, \varphi$ ) and  $\sqrt{g} = p(1+e \cos \varphi)^{-2}$  ([13], eq. (A.5)) is the Jacobian of the transformation from Cartesian coordinates  $(x, y)$  to curvilinear coordinates  $(p, \varphi)$ . Finally, from the continuity equation for pure Keplerian motion Lyubarskij et al. [13] have derived the useful result that the surface density  $\Sigma$  factorizes into some unspecified function  $f(p, e)$  and a known dependence on  $\varphi$ :

$$(13) \quad \Sigma(p, \varphi, e) = \frac{f(p, e)}{\sqrt{g} V^\varphi},$$

where  $V^\varphi = \sqrt{GM/p^3(1+e \cos \varphi)^2}$  is the contravariant  $\varphi$ -component of the Keplerian velocity ([13], eq. (A.11)). As mentioned in [16], in the case of constant eccentricity disc  $\sqrt{g} V^\varphi = \sqrt{GM/p}$ , i.e., in curvilinear coordinates  $(p, \varphi)$   $\Sigma$  depends explicitly only on  $p$  and  $e$  but not on  $\varphi$  [9, 13, 14]. It should be also noted that the energy balance equation is not required to be written in order to close our set of equations because it is already identically fulfilled [13]. Our

purpose in this paper is to obtain in an explicit form analytical expressions for  $f(p, e)$  and the other accretion disc characteristics (averaged over the disc thickness): temperature  $T$ , density  $\rho$ , viscosity  $\eta$ , etc. Generally speaking, for a given mass accretion rate  $\dot{M}$  and mass of the compact object  $M$ , they are expected to be functions of  $p$ ,  $\varphi$  and  $e$ .

### III. Solutions to the accretion disc structure equations

The standard  $\alpha$ -disc model [1] deals with vertically averaged astrophysical quantities and this approximation is also retained in the considered here viscous elliptical discs [9, 13, 14]. The difference between these two cases is that in the later all quantities are allowed to depend not only on  $r$ , but also on  $\varphi$ . As concerns to the  $\alpha$ -parameter, we assume the simplest possibility  $\alpha = \text{constant}$  throughout the disc. Taking into account (9), the ratio  $\Sigma/H = \rho(z=0)$  and (2), we obtain

$$(14) \quad K\rho^{\gamma-1} = \frac{1}{8}\omega_K^2 H^2.$$

On the other hand, from (13) follows

$$(15) \quad \rho^{\gamma-1} = (\Sigma/H)^{\gamma-1} = \left[ f / (H\sqrt{g}V^\varphi) \right]^{\gamma-1}.$$

Combining (14) and (15), and having in mind that  $\sqrt{g}V^\varphi = \sqrt{GM/p}$ , we can express the disc thickness  $H$ , volume density  $\rho$  and pressure  $P$  by means of the unknown yet functions  $K$  (specifying the gas entropy) and  $f$  (specifying the disc surface density  $\Sigma$ ):

$$(16) \quad H(p, \varphi, e, K, f) = \frac{1}{\sqrt{GM}} \left[ 8Kf^{\gamma-1} p^{(\gamma+5)/2} (1+e\cos\varphi)^{-3} \right]^{1/(\gamma+1)},$$

$$(17) \quad \rho(p, \varphi, e, K, f) = \frac{\Sigma}{H} = \left[ \frac{f^2(1+e\cos\varphi)^3}{8Kp^2} \right]^{1/(\gamma+1)},$$

$$(18) \quad P(p, \varphi, e, K, f) = K^{1/(\gamma+1)} \left[ \frac{f^2(1+e\cos\varphi)^3}{8p^2} \right]^{\gamma/(\gamma+1)}.$$

With the above results it is easy to find the viscosity coefficient, integrated over the disc thickness ([13], eq. (48)):

$$(19) \quad \eta(p, \varphi, e, K, f) = \alpha \Sigma v_s H \\ = \sqrt{\frac{\gamma}{8}} g^{2/(\gamma+1)} \frac{\alpha}{GM} \left[ K^2 f^{(3\gamma-1)} p^4 (1+e\cos\varphi)^{(3\gamma-9)/2} \right]^{1/(\gamma+1)},$$

where the first equality follows from (9) and  $P = \gamma^{-1} \rho v_s^2$  (with  $v_s$  the adiabatic speed of sound), analogously to the derivation of eq. (52) in [13]. In the case of elliptical discs with a constant eccentricity (i.e.,  $e = 0$ ), the convolution of the shear tensor  $\sigma_{ik} = \sigma^{ik}$  may be computed from eq. (A.16) given by Lyubarskij

et al. [13]. Note that an additional multiplier  $(1 + e \cos \varphi)$  may be extracted from the expression in the curly brackets:

$$(20) \quad \sigma^2 \equiv \sigma_{ik} \sigma^{ik} = (GM/2p^3)(1 + e \cos \varphi)^{-1} [9 - 2e^2 + e^4 + (33e - 2e^3 + e^5) \cos \varphi + 48e^2 \cos^2 \varphi + 32e^3 \cos^3 \varphi + 8e^4 \cos^4 \varphi] \\ = (GM/2p^3) [(1 - e^2)^2 + 8(1 + e \cos \varphi)^3], \quad (\text{for } e_p = 0).$$

According to (19) and (20), the left hand side of thermal balance equation (12) becomes

$$(21) \quad \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \eta \sigma^2 \sqrt{g} d\varphi \\ = \left\{ \begin{array}{l} \frac{2^{1/4}}{\sqrt{3}} \alpha K^{6/7} f^{9/7} p^{-2/7} \left[ (1 - e^2)^2 \int_0^{2\pi} \frac{d\varphi}{(1 + e \cos \varphi)^{43/14}} + \int_0^{2\pi} \frac{8 d\varphi}{(1 + e \cos \varphi)^{1/14}} \right], \\ \frac{\sqrt{5}}{\sqrt{3}} \alpha 2^{5/4} K^{3/4} f^{3/2} p^{-1/2} \left[ (1 - e^2)^2 \int_0^{2\pi} \frac{d\varphi}{(1 + e \cos \varphi)^{11/14}} + \int_0^{2\pi} 8 (1 + e \cos \varphi)^{1/4} d\varphi \right], \end{array} \right.$$

where the upper expression holds for  $\gamma=4/3$  and the lower refers to  $\gamma=5/3$ , respectively. Let us now compute the right hand side of (12) for each of the three zones A, B and C. According to (4), valid for a radiation-dominated plasma (zone A :  $\gamma=4/3$ ;  $k=k_r$ ):

$$(22) \quad \int_0^{2\pi} \frac{32 \sigma_B T^4}{3k\rho H} \sqrt{g} d\varphi = \frac{8c}{k_T} \int_0^{2\pi} \frac{P}{\Sigma} \sqrt{g} d\varphi \\ = 2^{9/7} \frac{c\sqrt{GM}}{k_T} K^{3/7} f^{1/7} p^{-9/14} \int_0^{2\pi} \frac{d\varphi}{(1 + e \cos \varphi)^{2/7}}.$$

For zone B (ideal gas,  $\gamma=5/3$ ;  $k=k_r$ ), instead of equation (4), now we must use equation (5), which signifies that  $T^4 = (\mu P/R\rho)^4$  and, correspondingly:

$$(23) \quad \int_0^{2\pi} \frac{32 \sigma_B T^4}{3k\rho H} \sqrt{g} d\varphi = \frac{32 \sigma_B \mu^4}{3k_T R^4} \int_0^{2\pi} \frac{P^4}{\rho^4 \Sigma} \sqrt{g} d\varphi \\ = \frac{8\pi \sigma_B \mu^4 \sqrt{GM}}{3k_T R^4} K^3 f p^{-3/2}.$$

Finally, for the outermost zone C (ideal gas,  $\gamma=5/3$ ;  $k=k_p$ ) we shall take into account (5) and (6) to obtain

$$(24) \quad \int_0^{2\pi} \frac{32 \sigma_B T^4}{3k\rho H} \sqrt{g} d\varphi = \frac{32 \sigma_B}{3\zeta} \int_0^{2\pi} \frac{T^{15/2}}{\rho \Sigma} \sqrt{g} d\varphi \\ = \frac{\sqrt{2} \sigma_B \mu^{15/2} \sqrt{GM}}{3\zeta R^{15/2}} K^6 f^2 p^{-5/2} \int_0^{2\pi} (1 + e \cos \varphi)^{5/2} d\varphi.$$

In the derivation of (22) - (24) we have again used the representations (13), (16) - (18) for  $\Sigma$ ,  $H$ ,  $\rho$  and  $P$ , respectively.

The integrals over the angular variable  $\varphi$  can be evaluated by means of the hypergeometric function  $F(a, b, c; z)$  [17, 18]:

$$(25) \quad \int_0^{2\pi} \frac{d\varphi}{(1+e \cos \varphi)^x} = 2\pi F\left(\frac{x}{2}, \frac{x}{2} + \frac{1}{2}, 1; e^2\right).$$

The above expression is a converged series, because the eccentricity  $e$  of the ellipse is always less than unity (i.e.,  $e^2 < 1$ ). For integer  $x=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , the integrals in the left hand side of (25) can be expressed through Legendre polynomials [18]. In view of the results (21) - (24), thermal balance equation (12) enables us to eliminate the unknown function  $K(p, \varphi, e)$ :

$$(26) \quad K_A^{6/7} = A(e) f^{-16/7} p^{-5/7}, \quad (\text{for zone A}),$$

$$A(e) \equiv \left( \frac{\sqrt{3} 2^{17/4} c \sqrt{GM}}{\alpha k_T} \right)^2 \left[ \frac{F\left(\frac{1}{7}, \frac{9}{14}, 1; e^2\right)}{(1-e^2)^2 F\left(\frac{43}{28}, \frac{57}{28}, 1; e^2\right) + 8F\left(\frac{1}{28}, \frac{15}{28}, 1; e^2\right)} \right]^2,$$

$$(27) \quad K_B^{3/4} = B(e) f^{1/6} p^{1/3}, \quad (\text{for zone B}),$$

$$B(e) \equiv \left( \frac{\sqrt{15} \alpha k_T R^4}{2^{13/4} \sqrt{GM} \sigma_B \mu^4} \right)^{1/3} \left[ (1-e^2)^2 F\left(\frac{11}{8}, \frac{15}{8}, 1; e^2\right) + 8F\left(-\frac{1}{8}, \frac{3}{8}, 1; e^2\right) \right]^{1/3},$$

$$(28) \quad K_C^{3/4} = C(e) f^{-1/14} p^{2/7}, \quad (\text{for zone C}),$$

$$C(e) \equiv \left( \frac{\sqrt{15} \alpha \zeta R^{15/2}}{2^{7/4} \sqrt{GM} \sigma_B \mu^2} \right)^{1/7} \left[ \frac{(1-e^2)^2 F\left(\frac{11}{8}, \frac{15}{8}, 1; e^2\right) + 8F\left(-\frac{1}{8}, \frac{3}{8}, 1; e^2\right)}{F\left(-\frac{5}{4}, -\frac{3}{4}, 1; e^2\right)} \right]^{1/7},$$

where  $A(e)$ ,  $B(e)$  and  $C(e)$  are known functions of the constant (over the whole accretion disc) eccentricity  $e$ . With the above results, we can now return to the expression (19) for the viscosity coefficient  $\eta(p, \varphi, e, f)$  in which we set appropriate values for  $\gamma$  ( $\gamma=4/3$  in zone A;  $\gamma=5/3$  in zones B and C):

$$(29) \quad \eta(p, \varphi, e, f) = \begin{cases} 2^{29/14} \frac{\alpha A(e)}{\sqrt{3} GM} f^{-1} p (1+e \cos \varphi)^{-15/14}, & (\text{zone A}), \\ 2^{3/4} \frac{\sqrt{5} \alpha B(e)}{\sqrt{3} GM} f^{5/3} p^{11/6} (1+e \cos \varphi)^{-3/4}, & (\text{zone B}), \\ 2^{3/4} \frac{\sqrt{5} \alpha C(e)}{\sqrt{3} GM} f^{10/7} p^{25/14} (1+e \cos \varphi)^{-3/4}, & (\text{zone C}). \end{cases}$$

The auxiliary function  $Y(e, \varphi)$  is already computed for constant eccentricity discs (8). Consequently, we are now in a position to evaluate the left hand side  $\int_0^{2\pi} \eta Y d\varphi$  of the angular momentum balance (7). The latter becomes an equation only for one unknown function  $f(p, e)$  which can easily be solved, using again hypergeometric functions (25). We stress that the integration constants  $D_A(e)$ ,  $D_B(e)$  and  $D_C(e)$  (for each zone A, B and C) in (7) may be, generally speaking, different for these three distinct regions. This situation arises from the possibility to choose specific boundary conditions (determining  $D(e)$ ) for every zone. How to select these conditions, in order to have a self-consistent global structure of the accretion disc, is beyond the scope of this paper. We assume a priori that our investigation concerns only with such gas particles which streamlines fall well inside the considered zone and do not approach very close its boundaries. Solving the equation of angular momentum balance (7), we have:

$$(30) \quad f_A(p, e) = \tilde{A}(e) \frac{p}{M - D_A(e) / \sqrt{GMp}} = \frac{\tilde{A}(e)}{M} p, \quad (\text{zone A}),$$

$$\tilde{A}(e) = \frac{2^{29} \pi \alpha A(e)}{\sqrt{3 GM (1 - e^2)^{11/7}}} \left[ 4F \left( -\frac{1}{28}, -\frac{15}{28}, 1; e^2 \right) - F \left( -\frac{15}{28}, -\frac{29}{28}, 1; e^2 \right) \right]$$

$$(31) \quad f_B(p, e) = \frac{1}{\tilde{B}(e)} \left[ M - \frac{D_B(e)}{\sqrt{GMp}} \right]^5 p^{-\frac{11}{10}} = \frac{M}{\tilde{B}(e)} p^{-\frac{11}{10}}, \quad (\text{zone B}),$$

$$\tilde{B}(e) = \left[ 2^{\frac{3}{4}} \frac{\sqrt{5} \pi \alpha B(e)}{\sqrt{3 GM}} (1 - e^2)^{-\frac{3}{4}} \left[ 4F \left( \frac{1}{8}, -\frac{3}{8}, 1; e^2 \right) - F \left( -\frac{3}{8}, -\frac{7}{8}, 1; e^2 \right) \right] \right]^{\frac{3}{5}},$$

$$(32) \quad f_C(p, e) = \frac{1}{\tilde{C}(e)} \left[ M - \frac{D_C(e)}{\sqrt{GMp}} \right]^{\frac{7}{10}} p^{-\frac{5}{4}} = \frac{M}{\tilde{C}(e)} p^{-\frac{5}{4}}, \quad (\text{zone C}),$$

$$\tilde{C}(e) = \left[ 2^{\frac{3}{4}} \frac{\sqrt{5} \pi \alpha C(e)}{\sqrt{3 GM}} (1 - e^2)^{-\frac{7}{8}} \left[ 4F \left( \frac{1}{8}, -\frac{3}{8}, 1; e^2 \right) - F \left( -\frac{3}{8}, -\frac{7}{8}, 1; e^2 \right) \right] \right]^{\frac{7}{10}},$$

where the approximate equalities are referenced to the conditions  $p \gg D_i^2 / GMM^2, i = A, B, C$ .

#### IV. Discussion and conclusions

The last three relations (30) - (32) close the solution of the problem, because the coefficients  $A(e), \tilde{A}(e), \dots, \tilde{C}(e)$  are known functions of the eccentricity  $e$ . For computational reasons, it is preferable hypergeometric functions  $F(a, b, c; z)$  to have arguments which are less or at least of order of unity (i.e., in our case we want  $|a| \leq 1, |b| \leq 1$ ). This condition insures their high accuracy computation even with mini-calculators [19]. It is useful to apply the linear transformation [18, 20]

$$(33) \quad F(a, b, c; z) = (1-z)^{c-a-b} F(c-a, c-b, c; z).$$

For example, computing  $A(e)$  (26), we may set  $(1-e^2)^{-4/7} \times F\left(-\frac{15}{28}, -\frac{29}{28}, 1; e^2\right)$  instead of  $(1-e^2)^2 F\left(\frac{43}{28}, \frac{57}{28}, 1; e^2\right)$ , etc.

Of course, the integration constants  $D_A(e)$ ,  $D_B(e)$ , and  $D_C(e)$ , still remain undetermined (if their values cannot be neglected in the limit of large  $p$ ). They may be utilized as additional degrees of freedom to glue more flexibly the three zones of the considered  $\alpha$ -disc model. In particular, it is possible to impose the condition of continuity of the surface density  $\Sigma(p, \varphi, e)$  and its derivative  $\frac{\partial}{\partial p} \Sigma(p, \varphi, e)$  during the transition from one zone to another neighbouring one.

We shall write in an explicit form the final analytical expressions for the entropy parameter  $K$  and disc surface density  $\Sigma$  (in which it is evident that the angular dependence on  $\varphi$  is absent, i.e.,  $K$  and  $\Sigma$  are streamline functions only):

$$(34) \quad K(p, e) = \begin{cases} A^{7/6}(e) \tilde{A}^{-8/3}(e) \left[ \dot{M} - \frac{D_A(e)}{\sqrt{GMp}} \right]^{8/3} p^{-7/2}, & \text{(zone A),} \\ B^{4/3}(e) \tilde{B}^{-2/9}(e) \left[ \dot{M} - \frac{D_B(e)}{\sqrt{GMp}} \right]^{2/15} p^{1/5}, & \text{(zone B),} \\ C^{4/3}(e) \tilde{C}^{-2/21}(e) \left[ \dot{M} - \frac{D_C(e)}{\sqrt{GMp}} \right]^{-1/15} p^{1/2}, & \text{(zone C),} \end{cases}$$

$$(35) \quad \Sigma(p, e) = \begin{cases} \frac{\tilde{A}(e)}{\sqrt{GM}} \frac{p^{3/2}}{\dot{M} - D_A(e)/\sqrt{GMp}}, & \text{(zone A),} \\ \frac{1}{\tilde{B}(e)\sqrt{GM}} \left[ \dot{M} - \frac{D_B(e)}{\sqrt{GMp}} \right]^{3/5} p^{-3/5}, & \text{(zone B),} \\ \frac{1}{\tilde{C}(e)\sqrt{GM}} \left[ \dot{M} - \frac{D_C(e)}{\sqrt{GMp}} \right]^{7/10} p^{-3/4}, & \text{(zone C).} \end{cases}$$

The other structure parameters of the accretion disc may be found by substituting (30) - (32) and (34) into (16) - (19).

## References

1. Shakura, N. I., R. A. Sunyaev. Black Holes in Binary Systems. Observational Appearance. - *Astron. Astrophys.*, 24, 1973, № 3, 337-355.
2. Walker, M. A. Radiation Dynamics in X-Ray Binaries. I. Type I Bursts. - *Astrophys. J.*, 385, 1992, № 2, 642-650.

3. Walker, M. A. Radiation Dynamics in X-Ray Binaries. II. Type 2 Bursts. — *Astrophys. J.*, **385**, 1992, № 2, 651–660.
4. Walker, M. A. Radiation Dynamics in X-Ray Binaries. III. Extremely Compact Objects. — *Astrophys. J.*, **385**, 1992, № 2, 661–664.
5. Arav, N., M. C. Begelman. Radiation-Viscous Boundary Layers. — *Astrophys. J.*, **401**, 1992, № 1, 125–136.
6. Pringle, J. E. Recent Work on Angular Momentum Transport in Accretion Disks. — In: *Theory of Accretion Disks — 2* (Edited by W. J. Duschl et al.), NATO ASI Series, Garching, Germany, March 22–26, 1993, **417**, 357–362.
7. Huang, M., J. C. Wheeler. Thermal Instability Accretion Disk Model for the X-Ray Transient A 0620-00. — *Astrophys. J.*, **343**, 1989, № 1, 229–240.
8. Mineshige, S., J. C. Wheeler. Disk-Instability Model for Soft X-Ray Transients Containing Black Holes. — *Astrophys. J.*, **343**, 1989, № 1, 241–253.
9. Syer, D., C. J. Clarke. The Viscous Evolution of Elliptical Accretion Disks. — *Monthly Not. Royal Astron. Soc.*, **255**, 1992, № 1, 92–104.
10. Osaki, Y. A Model for the Superoutburst Phenomenon of SU Ursae Majoris Stars. — *Publ. Astron. Soc. Japan*, **41**, 1989, № 5, 1005–1033.
11. Osaki, Y. Disk Instability Model for SU UMa Stars: SU UMa/WZ Sge Connection. — In: *Theory of Accretion Disks — 2* (Edited by W. J. Duschl et al.), NATO ASI Series, Garching, Germany March 22–26, 1993, **417**, 93–108.
12. Lubow, S. H. Eccentric Disk Instabilities and their Relation to Superhump Binaries. — In: *Theory of Accretion Disks — 2* (Edited by W. J. Duschl et al.), NATO ASI Series, Garching, Germany March 22–26, 1993, **417**, 109–123.
13. Lyubarskij, Yu. E., K. A. Postnov, M. E. Prokhorov. Eccentric Accretion Disks. — *Monthly Not. Royal Astron. Soc.*, **266**, 1994, № 3, 583–596.
14. Syer, D., C. J. Clarke. Erratum and Addendum: The Viscous Evolution of Elliptical Accretion Disks. — *Monthly Not. Royal Astron. Soc.*, **260**, 1993, № 2, 463–464.
15. Sobolev, V. V. *Course of Theoretical Astrophysics*. Moscow, Nauka, 1975, 460–476.
16. Dimitrov, D. V. Elliptical Accretion Disks with Constant Eccentricity. I. Case  $\eta = \beta \Sigma^2$ . — *Aerospace Res. Bulgaria*, 1998, № 14, 3–10.
17. Dwight, H. B. *Tables of Integrals and other Mathematical Data*. Moscow, Nauka, 1973, p. 189.
18. Gradshteyn, I. S., I. M. Ryzhik. *Tables of Integrals, Sums, Series and Products*. Moscow, Nauka, 1971, 397–398, 1033.
19. Dyakonov, V. P. *Handbook of Algorithms and Programs on BASIC Language for Personal Calculators*. Moscow, Nauka, 1987, p. 156.
20. Abramowitz, M., I. A. Stegun. *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables*. Moscow, Nauka, 1979, 370–376.

*Received 23.II.1997*

Елиптични акреционни дискове с постоянен  
ексцентрицитет. II. Стандартен модел на  $\alpha$ -диск

Димитър Димитров

(Резюме)

Получени са аналитични изрази за физическите условия (налягане, температура, плътност и т.н.), характеризиращи вертикално усреднената структура на акреционни дискове с постоянен ексцентрицитет. Решената система от уравнения включва уравнението на непрекъснатостта, баланса на ъгловия момент, хидростатичното равновесие и топлинния баланс. Тези решения са получени за всяка една от трите зони (вътрешна, средна и външна) на стандартния модел на  $\alpha$ -диск, обобщен от Сиер и Кларк и от Любарски и др. Нашето изследване третира само стационарна акреция и не установява граничните условия, определящи константите на интегриране. Показано е, че ако последните са пренебрежими, то повърхностната плътност и коефициентът на ентропия в уравнението на адиабатата се разлагат на произведение от известни функции, зависещи поотделно от фокалния параметър  $p$  и ексцентрицитета  $e$ . Отбелязано е сходството в поведението по дължината на радиуса между решенията за елиптични и кръгови дискове.

## Измерение электростатического поля при помощи сферических ионных ловушек<sup>1</sup>

Стефан Чапкынов\*, Николай Банков\*,  
Мариана Гушева\*, Георги Станев\*,  
Генадий Гдалевич\*\*, Вячеслав Губский\*\*

\*Институт космических исследований, БАН

\*\*Институт космических исследований, РАН

### 1. Введение

В космических исследованиях широко применяется метод непосредственного измерения электрического поля, который состоит в определении потенциальной разницы между двумя проводящими сферами, находящимися в космической плазме.

Поле связывается с измеренной потенциальной разницей следующим образом [1]:

$$(1) \quad \Delta U = \frac{Ed + (V_1 - V_2) + (WF_1 - WF_2)}{1 + (R_1/R_2) + (R_2/R)}$$

где:

$V_{1,2}$  — потенциальные разницы между поверхностями сфер и окружающей плазмы,

$WF_{1,2}$  — работа выхода электрона для соответствующей поверхности,

$R_{1,2}$  — сопротивление сфера — плазма,

$R$  — сопротивление измерительного устройства,

$d$  — расстояние между проводящими поверхностями.

Из (1) следует что при:

$$R_{1,2}/R = 0 (R \rightarrow \infty), WF_1 = WF_2, V_1 = V_2$$

<sup>1</sup> Публикация является результатом исследований, связанными с договором ТН515/95 с НФНИ.

(2)

$$E = \frac{\Delta V}{d}$$

Для выполнения вышеупомянутых условий принимаются специальные меры: высокая степень идентичности сфер, применение специальных покрытий и т.д.

## 2. Предпосылки для проведения измерений

Составная часть разрабатываемых в ИКИ-БАН зондовых диагностических комплексов является измеритель ионных параметров: две сферические ловушки, работающие в режиме исследования неоднородностей плотности ионной компонентой космической плазмы. Это осуществляется при плавающем потенциале внешних сеток ловушек.

Традиционно применяемые с 1957г. ионные ловушки [2] состоятся из металлического коллектора с расположенной вокруг него антифотоэлектронной сетки (к ней прилагается относительно высокое по отношению к коллектору отрицательное напряжение) и из внешней оболочки (перфорированная металлическая сфера). В режиме исследования неоднородностей внешняя сетка „плавает“ и измеряется значения протекающего через коллектора ток, обусловленной положительными ионами, достигшими до коллектора. „Плавающий“ потенциал находящегося в плазме металлического тела является равновесным потенциалом, до которого заряжается тело. Обычно этот потенциал слегка отрицательный по отношению к квазинейтральной плазме. Большему по размерам телу соответствует более высокий, по сравнению с малым телом, отрицательный потенциал.

Применение двух ионных ловушек для определения электрического поля предполагает невыполнения условия для уменьшения вторичных электрических токов, текущих из поверхностей ловушек из-за влияния солнечного излучения.

С другой стороны существует явная связь: при одинаковых остальных условиях одинаковые коллекторные токи соответствуют одинаковым потенциалам оболочек обеих ловушек.

Высказанное следствие вытекает из формулы для коллекторного тока ловушек:

$$(3) \quad I_k = \alpha n e V_0 \pi r^2 \left(1 - \frac{2e\phi}{mV_0^2}\right),$$

где:

$I_k$  — коллекторный ток,

$\alpha$  — коэффициент прозрачности оболочки ловушек,

$n$  — плотность положительных однозарядных ионов,

$V_0$  — скорость движения ловушки,

$m$  — масса одиночного иона,

$e$  — заряд электрона,

$\phi$  — потенциал оболочки ловушки.

### 3. Описание проведенных экспериментов

Во время проведения эксперимента „Интеркосмос Болгария - 1300“ (1981—1983г.) измерялись трех компонент электростатического поля при помощи 4-х стеклоглеродных сфер. Плотность ионной компоненты измерялась при помощи три- и четырехэлектронных сферических ловушек. Внешние оболочки обеих ловушек были изолированными по отношению к корпусу объекта и их потенциалы измерялись. К антифотоэлектронных сетках подавалось напряжение „-45V“, а к коллекторам „-25V“. К анализирующей сетке 4-х электродной ловушке прилагалось пилообразное напряжение с амплитудой  $+10V \div -2V$  (с периодом 2 s) и  $+5V \div -1V$  (через период). Диапазон измеряемого потенциала ( $-5V \div +15V$ ) передается по двум телеметрическим каналам в диапазоне  $0 \div 6V$ . Во время эксперимента по каналу потенциала внешней оболочки 3-электродной ловушки передавался непрерывно сигнал  $0V$  (соответствующий минус  $5V$ ), а по каналу 4-электродной ловушки — сигнал около  $2V$  ( $+1V$  по отношению к корпусу объекта). По нашему мнению причина для такого поведения является проникание антифотоэлектронного напряжения к внешним оболочкам датчикам. При этом, для 4-электродной ловушки антифотоэлектронное напряжение экранировалось междинной анализирующей сеткой.

Анализ одновременных записей значения 3-х компонент электростатического поля и ток ловушек указывает на независимость обеих измерений — поле не влияет на измерения тока. Более того, компонент электростатического поле с направленностью зонд—спутник (в основном обуславливающий влияние поле на коллекторный ток ловушки), имеет базу в нескольких  $10^{-3}M$ . Этот вывод является основным и дает основание проводить (в будущих экспериментов) одновременные измерения поля и плотности, применяя одни и те же измерительные приборы — в случае ловушки.

### 4. Описание методики и устройстве для измерение электростатического поля при помощи сферических ионных ловушек

Формулу (1) можно записать в виде:

$$(4) \quad \Delta V = \frac{Ed + (\sum \varphi_{i1} - \sum \varphi_{i2})}{1 + (R_1/R) + (R_2/R)},$$

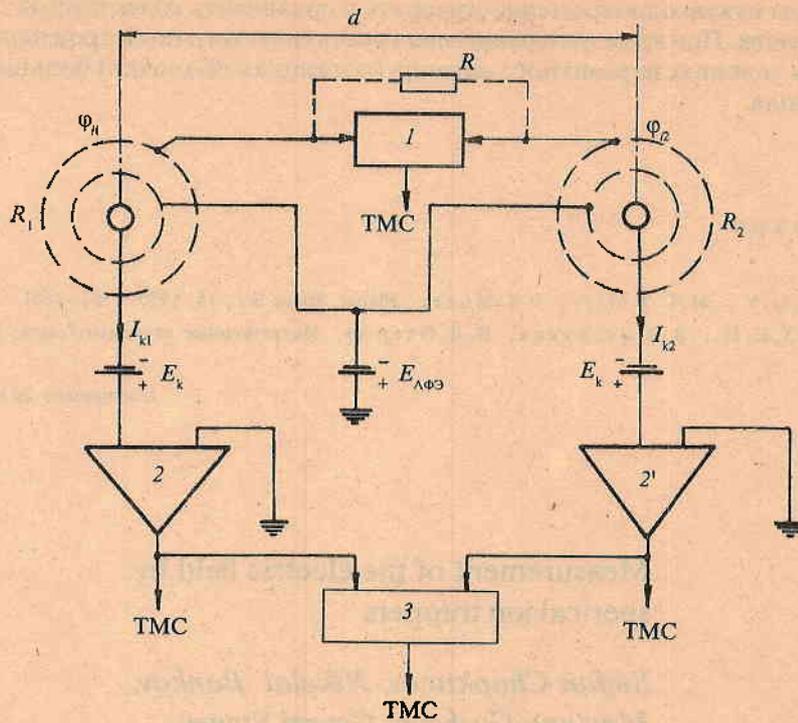
где  $\sum \varphi_{i1,2}$  — потенциал оболочки соответствующей ловушки, состоящий из суммы: плавающего потенциала обеих оболочек, потенциалы в результате воздействия солнечного излучения, потенциалы в результате проникновения внутренних полей (антифотоэлектронных сеток) и т.д.

Из (4) видно, что при измерении коллекторных токов обеих ловушек и при условии

$$I_{k1} = I_{k2} \rightarrow \sum \varphi_{i1} = \sum \varphi_{i2}, (R_{1,2}/R = 0),$$

то

$$\Delta V = Ed.$$



Фиг.1

На фиг.1

$\varphi_{H,2}$  — потенциал соответствующей внешней поверхности ловушек,

$R_{1,2}$  — сопротивление поверхность—плазма,

$R$  — сопротивление измерителя поля  $I$ ,

$2, 2'$  — измерители коллекторных токов,

$3$  — коллектор,

$E_k$  — источники напряжения на входах измерителей токов,

$E_{\Lambda\Phi\Xi}$  — источник антифотоэлектронного напряжения,

TMC — телеметрическая система,

$d$  — расстояние между ловушками.

На фиг. 1 видно, что одновременно измеряются: потенциальная разность  $\Delta V$  между оболочками обеих ловушек, коллекторные токи. Когда  $I_{k1} = I_{k2}$  компонент электростатического поля  $E = \frac{\Delta V}{d}$ .

### 5. Итоги

Сферические ионные ловушки можно успешно применять для измерения компонента электростатического поля, действующего по направлению прямой, соединяющей центров обеих ловушек. Для измерения электрического поля с точностью измерительной

аппаратуры нужно одновременно измерять и сравнивать коллекторных токов обеих ловушек. При этом измерение электростатического поля производится успешно в условиях паразитного сигнала (потенциал оболочки) больше чем сигнала поля.

#### Литература

1. Faleson, U. V., M. C. Kelley, F. S. Mozer. Planet. Space Sci., 18, 1970, 1551—1561.
2. Грингауз, К. И., В. В. Безруких, В. Д. Озеров. Искусственные спутники Земли, 1961.

Поступила 20.V.1997г.

### Measurement of the electric field by spherical ion trappers

*Stefan Chapkunov, Nikolai Bankov,  
Mariana Gusheva, Georgi Stanev,  
Genadiy Gdalevich, Viachishlav Gubskiy*

(Summary)

The paper refers to a method and device for measurement of the electrostatic field in the ionosphere. Based on the performed experiments (satellite "Intercosmos Bulgaria-1300") for measurement of the electric field and the ion component of space plasma, the conclusion is made that, by the use of two spherical ion trappers, both the electric field and the ion concentration can be measured simultaneously and independently on one another. The measurement of the electric field is representative provided the collector currents of the two trappers are equal.

## Satellite absorption ozonometer

*Ivan Hristov, Jivko Jekov, Garo Mardirossian,  
Doroteia Ivanova*

*Space Research Institute, Bulgarian Academy of Sciences*

The study of atmospheric ozone and the determination of the total ozone content (TOC), and the restoration of its vertical distribution in particular, is a topical problem whose solution calls for a continuous increase in the effectiveness of satellite ozonometric experiments [1, 2]. At present, the most suitable methods for the purpose seem to be the optic (spectrometric) ones which are based on the absorption principle, i.e. ozone ability to absorb emission in some parts of the UV region of the optic spectrum.

Recently, ozonometers, based on some disperse element — a prism or a diffraction grid (HIRS, LIMS, TOMS, TOVS, grid ozone spectro-photometer, BUFS-1, BUFS-2, SUFS-M etc. [3–7]), have been widely used. Notwithstanding their exploitational advantages or shortcomings, a common shortcoming shared by all of them is the insufficient quickness of their operation.

The present paper is dedicated to the satellite absorption ozonometer SAO-2, designed and implemented in the Space Research Institute of the Bulgarian Academy of Sciences, and intended for exploitation on board of the METEOR satellite under the Meteor-Ozone Space Project [8].

Following the requirements of the Technical Mission [9], four block-scheme versions of the ozonometer [10] were worked out. As a result of the comparative analysis, version 2 was chosen. In Fig.1, the global block-scheme of the satellite absorption ozonometer is shown, which consists of the following major blocks: 1—light-protective blind, 2—input scanning system, 3—optic deviator, 4—reflective element, 5—object-glass, 6—interference filter, 7—photoreceiver, 8—signal-processing device, 9—object-glass, 10—dispersion system, 11—photoreceiver, 12—signal-processing device, 13—microprocessor system, 14—electromechanical system, 15—low-voltage power supply, 16—light-protective device, 17—high-voltage power supply, 18—thermostatic system.

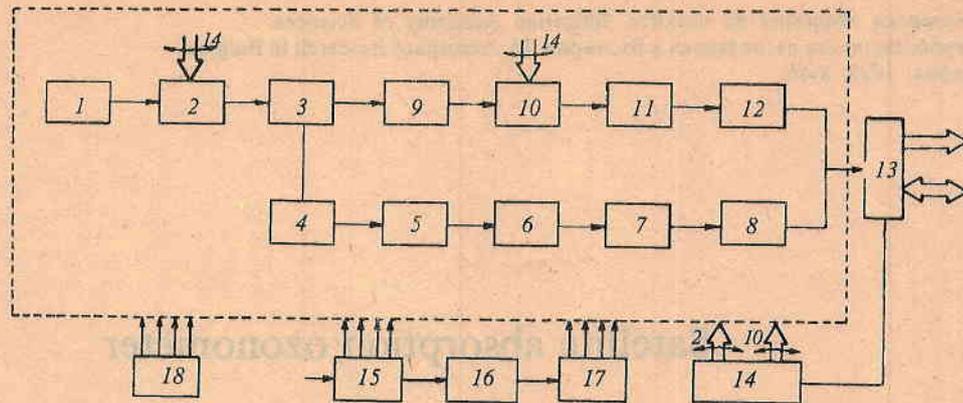


Fig. 1

On Fig.2, the functional scheme of the SAO-2 ozonometer is shown. The light-protective blind located in front of the flat scanning glass 2 with reference source 3, servicing the photometric and the spectrometric channels, represent the input scanning system. In front of the concave glass 5, the reflective prism 4 is immovably mounted which directs part of the optic signal to the photometric channel. By the flat glass 6, the input slit 7, and the concave glass 4, concave glass 5 is optically connected with diffraction grid 9, and furtheron, through the camera object-glass 11 and the output slit 12 — with the photocatode of photoreceiver 13. The input scanning system is activated by the step electric motor 28 and the gear-drive 29, whose feedback is effected by an angle-to-code photoelectric transducer. The reflective prism 4 is optically connected with the photo-receiver 18 through the flat glass 14, object-glass 15, interference filter 16 and the optic lens 17. Photoelectric multipliers 13 and 16 are electrically connected through the amplifier and the analogue-to-digital converters 21 and 22 with microprocessor system 20, to which thermostatic system 19 is connected, as well.

The step electric motor 32 is mechanically connected through the coupled gear-drive 31, the forked shaft 33 and the arm 34 to diffraction grid porter 10. The angle-to-code photoelectric transducer 35 is also connected to forked shaft 33.

The low-voltage power supply 23 is connected, on one hand, to microprocessor system 20, and on the other hand, through the light-protective device 24, to the high-voltage power supply 25.

The glass of monitoring system 27 is shifted to  $180^\circ$  with respect to the direction of the incoming rays of the input scanning system at a positioning angle.

The ozonometer operates in the following way:

The flat scanning glass 2, activated by the step electric motor 28 and the gear-drive 29, performs scanning within the angular range  $\beta = \pm 45^\circ$ , which is regulated by the feedback, provided by the angle-to-code photoelectric transducer 26. From concave glass 6, through input slit 7, the optic signal falls onto concave glass 8 and the parallel bunch of beams, generated in it, is then passed to

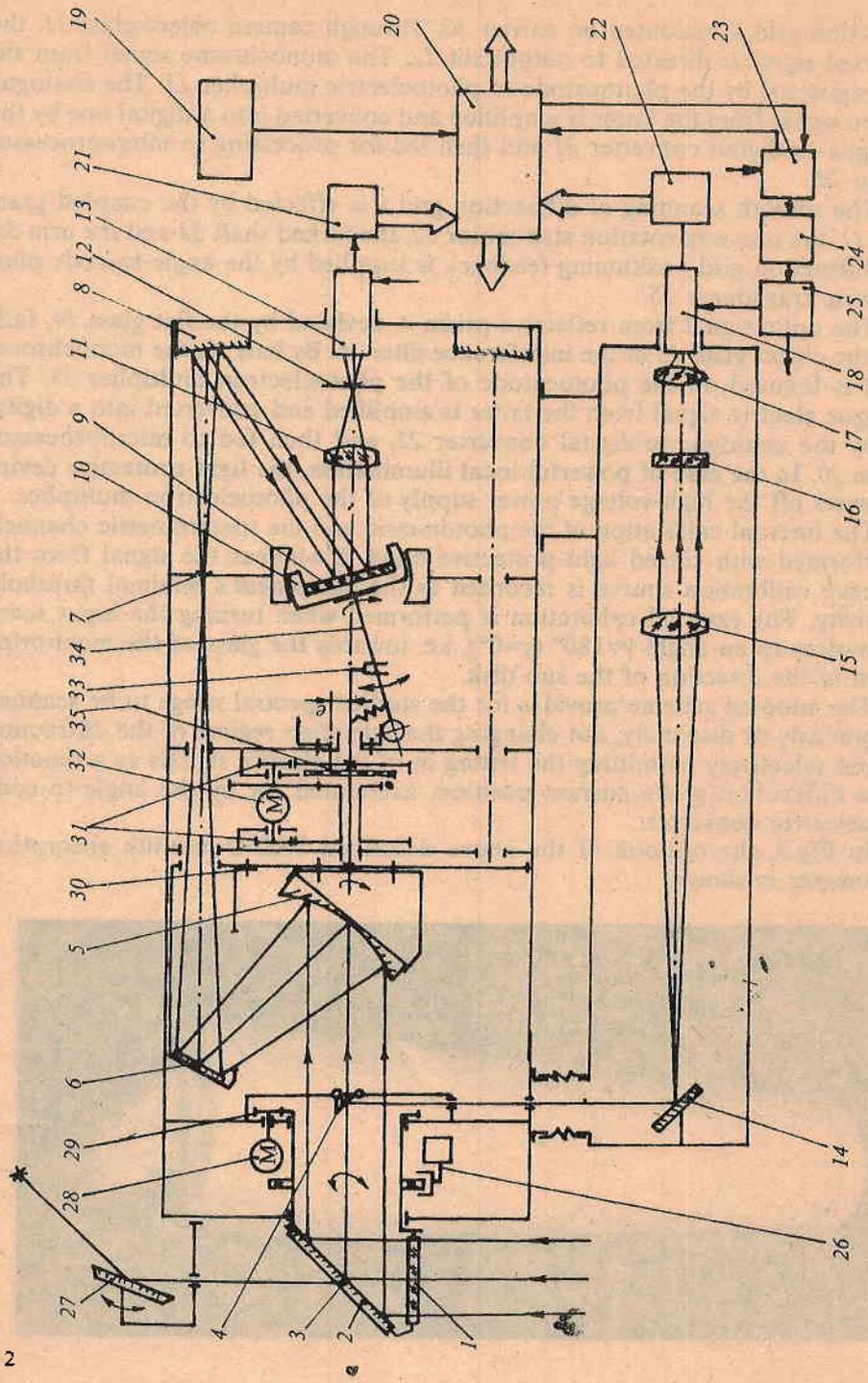


Fig. 2

diffraction grid 9, mounted on carrier 10. Through camera object-glass 11, the dispersed signal is directed to output slit 12. The monochrome signal from slit 12 is registered by the photocatode of photoelectric multiplier 13. The analogue electric signal from the latter is amplified and converted into a digital one by the analogue-to-digital converter 21 and then fed for processing to microprocessor system 20.

The smooth scanning of diffraction grid 9 is effected by the coupled gear-drive 31, the one-way-rotation step motor 32, the forked shaft 33 and the arm 34. The diffraction grid positioning feedback is supplied by the angle-to-code photoelectric transducer 35.

The optic signal from reflective prism 4, deviated by the flat glass 14, falls onto the object glass 15 of the interference filter 16. By lens 17, the monochrome signal is focused on the photocatode of the photoelectron multiplier 18. The analogue electric signal from the latter is amplified and converted into a digital one by the analogue-to-digital converter 22, and then fed to microprocessor system 20. In the case of powerful local illumination, the light-protective device 24 powers off the high-voltage power supply of the photoelectron multiplier.

The internal calibration of the photometric and the spectrometric channels is performed with closed light-protective blind 2, whereas the signal from the reference calibration source is recorded as the equipment's minimal threshold sensitivity. The external calibration is performed when turning the input scanning system to an angle  $\gamma=180^\circ$  ( $\gamma=0^\circ$ ), i.e. towards the glass of the monitoring system in the direction of the sun disk.

The adopted scheme provides for the studied spectral range to be scanned continuously or discretely, not changing the activation regime of the diffraction grid but selectively permitting the letting in of the electric signals as a function of the diffraction grid's current position, accounted for by the angle-to-code photoelectric converter.

In Fig.3, the outlook of the above described SAO-2 satellite absorption ozonometer is shown.

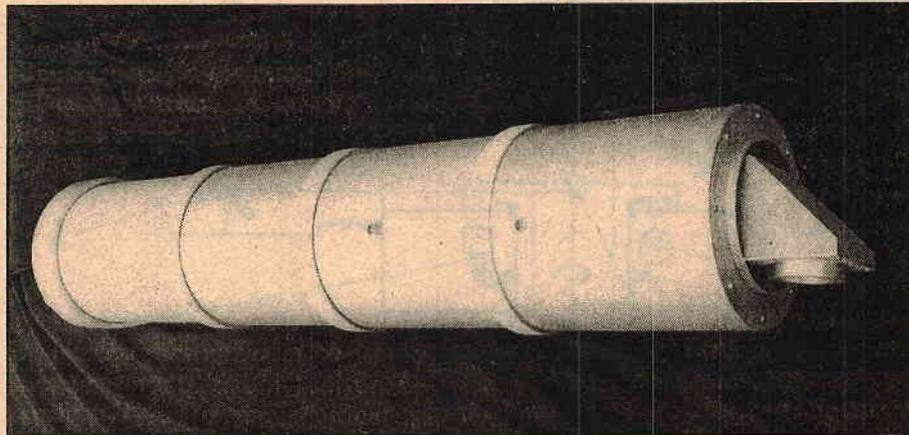


Fig. 3

The laboratory tests confirmed the results from the theoretical analyses. The designed ozonometer has the following advantages:

1. Its functional scheme is characterized by high lightpower, compact input scanning system, and unified blocks.
2. It can work as a pseudopolichromator without changing the operational regime of the dispersion system electric motor.
3. The mechanism of the dispersion diffraction grid lacks dead stroke which provides for great precision of the measured wavelength.
4. On determination of the total ozone content and restoration of its vertical distribution, data for the aerosol reduction spectrum is also obtained.

The shortcomings of the device are as follows:

1. Relatively great size and mass.
2. A lot of reflective planes.
3. Long period of by-spectrum scanning.

Except on board of aerospace aircraft, the described ozonometer SAO-2 can be also used in ground measurements, where its major shortcoming — relatively great size and mass — becomes negligible.

#### Major technicoexploitation features of SAO-2

1. Precision of the determination of:	
— total ozone content	$\geq 10\%$
— vertical distribution of ozone in the height range starting from the ozone layer with maximum concentration up to 45 km with height resolution $H=10$ km	$> 15\%$
2. Width of the viewing band	2000 km
3. Spectral range	160—400 nm
4. Number of spectral subranges with discrete scanning	12
5. Spectral resolution	$1 \pm 0,2$ nm
6. Viewing field	$0,5 \times 1,5^\circ$
7. Spectrum measurement interval	0,16 s
8. Consumed electric power	$\leq 50$ VA
9. Mass	42 kg

#### References

1. Kondratiev, K., K. Varotsos, P. Fedchenko. Globalnaia dinamika obshchego sodержaniia ozona, ego vliianie na izmenchivost solnechoi ultrafioletovoi radiatsii i vozdeistviia na ekosistem. — *Issled. Zemli is kosmosa*, 1995, №4, 105—107 (in Russian).
2. Iozanes, V. Opredelenie vertikalnogo razpredeleniia ozona. — *Izv. AN SSSR, FAO*, X, 1974, №4 (in Russian).
3. Kuznetsov, G. Mnogovolnovaia metodika i apparatura dlia issledovaniia atmosferного ozona i aerologia. — *Izv. AN SSSR, FAJO*, XI, 1975, №6 (in Russian).
4. Hrgiian, A. Fizika atmosferного ozona. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1972 (in Russian).

5. Krueger, A., D. Heat, C. Mateer. Satellite ozone measurements. — Phil. Trans. Roy. Soc., London, A, 296, 1980, №1418.
6. Mateer, C., D. Heat, A. Krueger. Total ozone from satellite measurements of backscattered UV-earth radiance. — J. Atm. Sci., 86, 1977, №7.
7. Kramer, H. Observation of the Earth and its Environment - Survey of Missions and Sensors. Berlin, Springer-Verlag, 1996.
8. Entsiklopediia kosmonavtika. Moskva, Sovetskaiia entsiklopediia, 1985 (in Russian).
9. Sputnikovaiia apparatura dlia issledovaniia obshchego sodержaniia atmosfernogo ozona i vosstanovleniia vertikalnogo raspredeleniia. Moskva, 1985 (in Russian).
10. Report on Contract KN-573, SRI-BAS.

Received 11.III.1997

### Сателитен абсорбционен озонOMETЪР

*Иван Христов, Живко Жеков,  
Гаро Мардиросян, Доротея Иванова*

(Резюме)

Статията е посветена на разработения в Института за космически изследвания при Българска академия на науките сателитен абсорбционен озонOMETЪР SAO-2, предназначен за измерване на общото съдържание и вертикалното разпределение на атмосферния озон от борда на сателит от серията МЕТЕОР.

Показани са блоковата и функционалната схема, действието, начинът на вътрешна и външна калибровка и някои основни техникоексплоатационни характеристики на озонOMETЪРА.

## Повишаване на информационните възможности на сондов експеримент със сферичен йонен уловител

Мария Петрунова, Бончо Пеев\*

Институт за космически изследвания, БАН

\* Лаборатория по слънчево-земни въздействия, БАН

Допълването на космофизическия анализ и създаването на комплексен модел на околоземното пространство има голямо практическо приложение за много области на науката. Сондовите методи за изследване на йоносферната плазма продължават да се използват, като съпътстващи, при определянето на параметрите и структурните особености на околоземната плазма. Изучаването на сложните явления в локален и глобален аспект изисква създаването на прибори с повишена функционална и информационна възможност.

Йонните структурни параметри се изучават при експерименти със сферичен йонен уловител. Триелектродният сферичен йонен уловител (СИУ) в режим, когато на анализиращата решетка е приложен изменящ се потенциал, позволява селекция на регистрираните частици по полярност на заряда и по енергия. В сондата се създава електрическо поле, с подаване на колектора на постоянно напрежение, което осигурява пълно събиране на заредените частици. Потенциалът на сондата относно външната среда  $U$  е равен на сумата на изменящото се напрежение  $U_0$  и потенциала на корпуса на спътника  $U_s$  [1]. Колекторният ток на СИУ се определя от изменението на този потенциал и има следния теоретичен израз [1-3]:

$$(1) \quad I = \frac{I_{i0}}{2Q} \left\{ \left( \frac{1}{2} + Q^2 - P^2 \right) [erf(P+Q) - erf(P-Q)] \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left[ (P+Q) \exp-(P-Q)^2 - (P-Q) \exp-(P+Q)^2 \right] \right\},$$

където

$$(2) \quad I_{i0} = N_i e S \alpha V_0,$$

$V_0$  — скорост на спътника,  $\alpha$  — коефициент на прозрачност на СИУ,  $S$  — повърхност на колектора на сондата,  $e$  — заряд на електрона.

$$(3) \quad P = \left( \frac{eU}{KT_i} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$K$  — константа на Болдман,  $U$  — потенциал на сондата спрямо средата.

$$(4) \quad Q = V_0 \left( \frac{M_i}{2KT_i} \right)^{\frac{1}{2}}$$

и интеграл на грешката:

$$(5) \quad \text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx.$$

При спътникови измервания получаването на концентрацията на йоните с помощта на цитираните изрази е неудобно и неточно, тъй като зависи от потенциала на спътника. Потенциалът на спътника се определя трудно и с голяма грешка. За избягване на тази зависимост се използва първата производна на тока спрямо напрежението, при допускане, че потенциалът на спътника не се изменя по време на измерването [1]:

$$(6) \quad \frac{dI}{dU} = \frac{I_{i0}}{2Q^2} \frac{e}{KT_i} [\text{erf}(P+Q) - \text{erf}(P-Q)]$$

за йонната концентрация се получава изразът:

$$(7) \quad N_i = K_1 \frac{dI}{dU},$$

$K_1$  е константа, която зависи от параметрите на датчика и скоростта на спътника.

От (7) следва, че при определена маса на йоните и скорост на спътника, йонната концентрация се явява функция само на първата производна на тока по отношение на напрежението  $\frac{dI}{dU} = \text{ctg} \beta$ , където  $\beta$  е ъгълът между праволинейния участък на характеристиката и оста на тока.

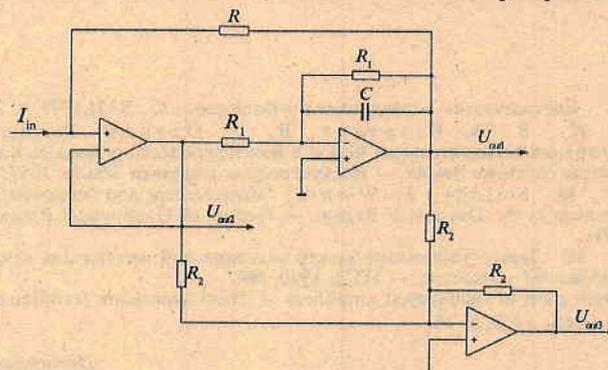
При интерпретация върху експерименталната волт-амперна характеристика могат да се определят няколко праволинейни участъка, което показва, че са регистрирани едновременно йони с различна маса. Съществуват трудности при определянето на различните праволинейни участъци върху експерименталните криви, поради сравнително ниската разделителна способност на СИУ и дискретизацията на характеристиките при предаването им от спътника, което увеличава вероятността от грешка. Непосредственото получаване на волт-амперната характеристика и нейната първа производна на борда на спътника в реално време, като непрекъснати функции, повишава възможностите и точността на експеримента, и намалява грешките при измерване на йонната компонента на плазмата със СИУ.

Схемата на сондов експеримент със сферичен йонен уловител включва: преобразувател ток-напрежение с основен усилвател, свързан с колектора

на сондата, включващ елементи, чрез които се изменя усилването и блок за автоматично регулиране на усилването; източник на спиращо за електроните напрежение, който е свързан с антифотоелектронната решетка; генератор на линейноизменящо се напрежение, който е свързан с външната анализираща решетка; телеметрична система.

В настоящата статия се предлага развитие на едно решение на основния усилвател [4], който се включва в преобразувателя ток-напрежение с многодиапазомен усилвател, който е основният блок в сондов експеримент със сферичен йонен уловител. Предлаганото решение дава възможност за едновременно получаване на волт-амперната характеристика и нейната първа производна, като непрекъснати функции на времето.

На фиг. 1 е показана схемата на основния усилвател. Схемата представлява входно стъпало с операционен усилвател с високо входно съпротивление, включен по неинвертираща схема и инвертиращ интегратор, обхванати с верига за обратна връзка. С използването на инвертиращ интегратор се постига подобряване на дрейфовите характеристики на усилвателя, в сравнение със схемата на входен усилвател по инвертираща схема.



Фиг. 1. Схемата на основния усилвател

Основен проблем, с който се характеризират диференциращите схеми, са високото ниво на шума и нестабилният режим на работа. За избягване на тези недостатъци в [5] е предложен метод за намаляване на шума чрез индиректното изчисляване на производната. В случая производната на сигнала се получава от сигнала и неговия интеграл. След анализ на схемата се получава следният израз за преходната характеристика:

$$(8) \quad e_0 = \frac{-R_1 C s}{1 + R_1 C s} e_i.$$

Тази преходна характеристика има същият вид, както тази на проста диференцираща схема със съпротивление за ограничаване на усилването  $R_1$ , равно на съпротивлението в обратната връзка. Изразът в знаменателя ограничава апроксимацията на диференциална характеристика, но при условие  $f \ll \frac{1}{2\pi R_1 C}$  следва:

$$(9) \quad e_0(s) = -R_1 C s e_i, \quad e_0(t) = -R_1 C \frac{de_i}{dt}.$$

Условието удовлетворява дискутираното приложение. Теоретичните изводи са използвани при съставянето на схемата на фиг. 1. Схемата има три изхода, като на  $U_{out1}$  се получава напрежение, пропорционално на входния ток, на  $U_{out2}$  — напрежение, пропорционално на интеграла на входния ток, а на  $U_{out3}$  — напрежение, пропорционално на производната на входния ток.

Предавателните характеристики на схемата бяха изследвани при различни тестови напрежения, при което се наблюдава добра линейност. Разширяването на обхвата на работа на основния усилвател се осъществява чрез съпротивления във веригата на обратната връзка.

Предлаганото решение дава възможност за непосредственото получаване в реално време на волт-амперната характеристика и нейната производна, като непрекъснати функции, което дава директна информация за йонната концентрация на средата. Съчетаването на двете характеристики в реално време повишава точността и информационните възможности на сондовия експеримент със сферичен йонен уловител и същевременно опростява техниката на предаване.

#### Литература

1. Серафимов, К. Космические исследования в Болгарии. С., БАН, 1979, с. 247.
2. Грингауз, К. И., В. В. Безруких, В. Д. Озеров. Результаты измерения концентрации положительных ионов в ионосфере метода ионных ловушек на третьем советском спутнике Земли. — Искусственные спутники Земли, 1963, №6, с. 63.
3. Sagalyn, R. C., M. Smiddy, J. Wisnia. Measurement and Interpretation of Ion Density Distribution in the Daytime F Region. — Journal of Geophysical Research, 68, 1963, №1, 199—211.
4. Антоненко, В. И. Термостабильный электрометрический измеритель постоянного тока на операционном усилителе. — ПТЭ, 1990, №6.
5. Graeme, J. Application of operational amplifiers — Third generation techniques. Burr-Brown Research Corp., 1973, p. 78.

Постъпила на 18.XI.1997г.

### Extention of the information capability of the probe experiment with the spherical ion probe

*Maria Petrunova, Boncho Peev*

(Summary)

In the report is proposed the current-voltage converter for the probe experiment with spherical ion probe based on noninverting amplifier with high impedance input stage and inverting integrator. As a result is achieved the voltage current characteristic and it's derivative as a real time continuous functions combined with improved performance. Thus the experiment capacity is extended and the measurement technique is simplified.

## Multiplex synchronization method at spatial positioning of mobile object

*Ventseslav Rashkov,  
Angel Christov\*, Chavdar Pandev\**

*"Georgi Benkovski" Higher Air Force Academy, Dolna Mitropolia  
\*Space Research Institute, Bulgarian Academy of Sciences*

### 1. Problem formulation

Multi-position radio-technical space-based navigation systems are of great interest lately. However, at present not all the stages of the flight can be provided with the help of these systems, including the landing of the aircraft where too great an accuracy is required.

This determines the extraordinary topical of the problem of developing algorithms for optimum navigation information processing, in which higher accuracy is achieved in comparison with the standard ones owing to the more complete extracting of information which is contained in the signals received from the emission sources. Such is the algorithm that makes use of the time delays separation method, which is also known as the method of additional variable [1].

The frame of reference  $O_0XYZ$  that is used here has origin  $O_0$ . The origin is fixed with respect to the Earth and it is attached to some point. The axis  $O_0Y$  is oriented upward in local vertical line, the axis  $O_0X$  is oriented toward the motion direction of the mobile object, and  $O_0Z$  is perpendicular to the plane  $XO_0Y$ . It is oriented toward the right side of the motion direction of the mobile object.

The signals emitted from four emission sources are observed on board the mobile object. The coordinates of the emission sources are known  $X_k(t) = (x_k(t), y_k(t), z_k(t))$ ,  $k = \overline{1,4}$ .

The state vector  $\lambda^T = (x, V_x, y, V_y, z, V_z, \Delta, V_\Delta)$  includes: the coordinates of the mobile object —  $x, y, z$ ;  $\Delta$  — the scale disagreement of the mobile object with respect to the system time;  $V_x, V_y, V_z, V_\Delta$  — the respective velocities of  $x, y, z$  and  $\Delta$ .

$\xi(t)$  is observed at the receiver's input on board the mobile object

$$(1) \quad \xi(t) = s(t, \lambda(t)) + n(t)$$

where  $s(t, \lambda(t)) = \sum_{k=1}^4 s_k(t - T_k(\lambda))$  is an useful signal, which represents the sum of the signals  $s_k(t - T_k(\lambda))$  from each emission source;  $s_k(t - T_k(\lambda)) = f_k(t - T_k(\lambda)) \cos[\omega_0(t - T_k(\lambda))]$ ;  $f_k(t - T_k(\lambda))$  is a radio-signal envelope from the  $k$ -th emission source;  $\omega_0 = 2\pi f_0$  is a circular frequency of the high-frequency filling;  $T_k(\lambda) = \tau_k(\mathbf{X}) + \Delta$  is the arrival time of the signal from the  $k$ -th emission source;  $\tau_k(\mathbf{X}) = c^{-1}[(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 + (z - z_k)^2]^{1/2}$  is the real time of the signal delay from the  $k$ -th emission source;  $c$  is the light velocity;  $n(t)$  is a white Gaussian noise with zero mean and the correlation function given by  $M\{n(t)n(t + \tau)\} = \frac{N}{2}\delta(\tau)$ ;  $N$  is a one-sided spectral density of  $n(t)$ ;  $\delta(\tau)$  is the delta function.

The amplitudes of received signals from the different emission sources in the zone of radio-visibility are assumed to be equal.

The state vector  $\lambda$  can be described through Gaussian diffusion Markov process which satisfies the system of stochastic differential equations

$$(2) \quad \dot{\lambda} = F\lambda + n_\lambda(t)$$

or

$$(3) \quad \begin{cases} \dot{x} = V_x \\ \dot{V}_x = -\alpha_x V_x + n_x(t) \\ \dot{y} = V_y \\ \dot{V}_y = -\alpha_y V_y + n_y(t) \\ \dot{z} = V_z \\ \dot{V}_z = -\alpha_z V_z + n_z(t) \\ \dot{\Delta} = V_\Delta \\ \dot{V}_\Delta = -\alpha_\Delta V_\Delta + n_\Delta(t) \end{cases}$$

where  $n_x(t)$ ,  $n_y(t)$ ,  $n_z(t)$  and  $n_\Delta(t)$  are independent white Gaussian noises with one-sided spectral densities  $N_x, N_y, N_z, N_\Delta$  and with zero means

$$M\{n_x(t)\} = M\{n_y(t)\} = M\{n_z(t)\} = M\{n_\Delta(t)\} = 0.$$

The matrices of the drift coefficients and the diffusion coefficients are

$$F = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\alpha_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\alpha_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\alpha_\Delta \end{vmatrix}$$

$$N_\lambda = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{N_x}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{N_y}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{N_z}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{N_\Delta}{2} \end{vmatrix}$$

The noise vector is  $n_\lambda^T(t) = [0, n_x(t), 0, n_y(t), 0, n_z(t), 0, n_\Delta(t)]$  with correlation matrix  $M\{n_\lambda(t)n_\lambda^T(t-\tau)\} = N_\lambda \delta(\tau)$ .

The essence of the multiplex synchronization method (MSM) is displayed in [1-4].

## 2. Optimal filtration algorithm based upon a multiplex synchronization

An additional variables vector  $T_d^T = (T_{d1}, T_{d2}, T_{d3}, T_{d4})$  is introduced for the signals from the four emission sources.  $T_{d1}, T_{d2}, T_{d3}$  and  $T_{d4}$  are the time delays of the high frequency filling of the received signals from the separate emission sources respectively.  $T$  is a transposition symbol. Then the state vector  $\lambda$  is expanded to the new state vector  $\lambda_d^T = \{\lambda^T, T_d^T\}$  [1].

The filtration with grouping of observations at the step-function approximation is a very suitable algorithm. In this case the dependence of the signal  $s_k(t - T_k(\lambda))$  on the comparatively slowly varying processes  $x(t), y(t), z(t)$  and  $\Delta(t)$  must be considered. These processes are approximately invariable for the

sampling interval ( $T$ ). Therefore, we can approximate the observation in the frame of each sampling interval  $(t_v, t_{v+1})$  by the equation

$$\xi(t) = s(t, \lambda_v) + n(t), \quad t \in (t_v, t_{v+1}), \quad v = 1, 2, 3, \dots$$

where  $\lambda_v = \lambda(t_v)$  is a value of the parameter in the supporting points  $t_v = vT$ .

The sequence  $\lambda_v$  satisfies the recursion equation

$$(4) \quad \lambda_{v+1} = \Phi \lambda_v + n_{\lambda_v}$$

where  $\Phi = \exp\{FT\}$  is the state transition matrix for sampling interval ( $T$ );  $n_{\lambda_v}$  is a sequence of independent Gaussian random vectors with zero mean  $M\{n_{\lambda_v}\} = 0$  and correlation matrix  $\Psi = M\{n_{\lambda_v} n_{\lambda_v}^T\}$ .

When the method of additional variable is used, the observation equation is given by equations [1-4]

$$(5) \quad \xi(t) = s(t, \lambda_{dv}) + n(t), \quad t \in (t_v, t_{v+1}),$$

$$(6) \quad s(t, \lambda_v, T_{dv}) = \sum_{k=1}^4 f_k [t - T_k(\lambda_v)] \cos [\omega_0 (t - T_{dkv})]$$

where  $\lambda_{dv}^T = \{\lambda_v^T, T_{dv}^T\}$ ,  $T_{dv} = T_d(t_v)$ ;  $t_v = vT$ .

The equation that expresses the dynamic behaviour of the system has the form

$$(7) \quad \lambda_{d(v+1)} = \Phi_d \lambda_{dv} + n_{\lambda_{dv}}$$

where  $\Phi_d = \exp\{F_d T\}$  is the state transition matrix for sampling interval ( $T$ ), when the state vector is expanded with  $T_d^T = (T_{d1}, T_{d2}, T_{d3}, T_{d4})$ ;  $F_d$  is a matrix of the drift coefficients;  $n_{\lambda_{dv}}$  is a sequence of independent Gaussian random vectors with zero mean  $M\{n_{\lambda_{dv}}\} = 0$  and correlation matrix

$$\Psi_d = M\{n_{\lambda_{dv}} n_{\lambda_{dv}}^T\} = \int_0^T \exp\{F_d(T-\tau)\} N_{\lambda_d} \exp\{F_d^T(T-\tau)\} d\tau.$$

The matrices of the drift coefficients and the diffusion coefficients for expanding the state vector are given by [1]:

$$F_d = \begin{vmatrix} F & O_{(8 \times 4)} \\ F_{T_d} & O_{(4 \times 4)} \end{vmatrix}; \quad N_{\lambda_d} = \begin{vmatrix} N_{\lambda} & O_{(8 \times 4)} \\ O_{(4 \times 8)} & O_{(4 \times 4)} \end{vmatrix},$$

where  $O_{(m \times n)}$  is a zero matrix with dimension  $m \times n$ ;

$$F_{T_d} = \begin{vmatrix} 0 & c^{-1} \cos \alpha_1 & 0 & c^{-1} \cos \beta_1 & 0 & c^{-1} \cos \gamma_1 & 0 & 1 \\ 0 & c^{-1} \cos \alpha_2 & 0 & c^{-1} \cos \beta_2 & 0 & c^{-1} \cos \gamma_2 & 0 & 1 \\ 0 & c^{-1} \cos \alpha_3 & 0 & c^{-1} \cos \beta_3 & 0 & c^{-1} \cos \gamma_3 & 0 & 1 \\ 0 & c^{-1} \cos \alpha_4 & 0 & c^{-1} \cos \beta_4 & 0 & c^{-1} \cos \gamma_4 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$\cos \alpha_k, \cos \beta_k, \cos \gamma_k$  are direction cosines of the  $k$ -th emission source.

The expressions of the matrices and may be represented as follows

$$(8) \quad \Phi_d = \begin{vmatrix} 1 & \Phi_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Phi_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Phi_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Phi_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \Phi_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Phi_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \Phi_{78} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Phi_{88} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Phi_{9,2} & 0 & \Phi_{9,4} & 0 & \Phi_{9,6} & 0 & \Phi_{9,8} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Phi_{10,2} & 0 & \Phi_{10,4} & 0 & \Phi_{10,6} & 0 & \Phi_{10,8} & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \Phi_{11,2} & 0 & \Phi_{11,4} & 0 & \Phi_{11,6} & 0 & \Phi_{11,8} & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \Phi_{12,2} & 0 & \Phi_{12,4} & 0 & \Phi_{12,6} & 0 & \Phi_{12,8} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

where

$$\Phi_{12} = \frac{1 - e^{-\alpha_x T}}{\alpha_x}; \quad \Phi_{34} = \frac{1 - e^{-\alpha_y T}}{\alpha_y}; \quad \Phi_{56} = \frac{1 - e^{-\alpha_z T}}{\alpha_z}; \quad \Phi_{78} = \frac{1 - e^{-\alpha_\Delta T}}{\alpha_\Delta};$$

$$\Phi_{22} = e^{-\alpha_x T}; \quad \Phi_{44} = e^{-\alpha_y T}; \quad \Phi_{66} = e^{-\alpha_z T}; \quad \Phi_{88} = e^{-\alpha_\Delta T};$$

$$\Phi_{9,2} = \frac{\cos \alpha_1}{c} \Phi_{12}; \quad \Phi_{9,4} = \frac{\cos \beta_1}{c} \Phi_{34}; \quad \Phi_{9,6} = \frac{\cos \gamma_1}{c} \Phi_{56}; \quad \Phi_{9,8} = \Phi_{78};$$

$$\Phi_{10,2} = \frac{\cos \alpha_2}{c} \Phi_{12}; \quad \Phi_{10,4} = \frac{\cos \beta_2}{c} \Phi_{34}; \quad \Phi_{10,6} = \frac{\cos \gamma_2}{c} \Phi_{56}; \quad \Phi_{10,8} = \Phi_{78};$$

$$\Phi_{11,2} = \frac{\cos \alpha_3}{c} \Phi_{12}; \quad \Phi_{11,4} = \frac{\cos \beta_3}{c} \Phi_{34}; \quad \Phi_{11,6} = \frac{\cos \gamma_3}{c} \Phi_{56}; \quad \Phi_{11,8} = \Phi_{78};$$

$$\Phi_{12,2} = \frac{\cos \alpha_4}{c} \Phi_{12}; \quad \Phi_{12,4} = \frac{\cos \beta_4}{c} \Phi_{34}; \quad \Phi_{12,6} = \frac{\cos \gamma_4}{c} \Phi_{56}; \quad \Phi_{12,8} = \Phi_{78};$$

(9)

$$\Psi_d = \begin{pmatrix} \Psi_{11} & \Psi_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Psi_{1,9} & \Psi_{1,10} & \Psi_{1,11} & \Psi_{1,12} \\ \Psi_{21} & \Psi_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Psi_{2,9} & \Psi_{2,10} & \Psi_{2,11} & \Psi_{2,12} \\ 0 & 0 & \Psi_{33} & \Psi_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & \Psi_{3,9} & \Psi_{3,10} & \Psi_{3,11} & \Psi_{3,12} \\ 0 & 0 & \Psi_{43} & \Psi_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & \Psi_{4,9} & \Psi_{4,10} & \Psi_{4,11} & \Psi_{4,12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Psi_{55} & \Psi_{56} & 0 & 0 & \Psi_{5,9} & \Psi_{5,10} & \Psi_{5,11} & \Psi_{5,12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Psi_{65} & \Psi_{66} & 0 & 0 & \Psi_{6,9} & \Psi_{6,10} & \Psi_{6,11} & \Psi_{6,12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Psi_{77} & \Psi_{78} & \Psi_{7,9} & \Psi_{7,10} & \Psi_{7,11} & \Psi_{7,12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Psi_{87} & \Psi_{88} & \Psi_{8,9} & \Psi_{8,10} & \Psi_{8,11} & \Psi_{8,12} \\ \Psi_{9,1} & \Psi_{9,2} & \Psi_{9,3} & \Psi_{9,4} & \Psi_{9,5} & \Psi_{9,6} & \Psi_{9,7} & \Psi_{9,8} & \Psi_{9,9} & \Psi_{9,10} & \Psi_{9,11} & \Psi_{9,12} \\ \Psi_{10,1} & \Psi_{10,2} & \Psi_{10,3} & \Psi_{10,4} & \Psi_{10,5} & \Psi_{10,6} & \Psi_{10,7} & \Psi_{10,8} & \Psi_{10,9} & \Psi_{10,10} & \Psi_{10,11} & \Psi_{10,12} \\ \Psi_{11,1} & \Psi_{11,2} & \Psi_{11,3} & \Psi_{11,4} & \Psi_{11,5} & \Psi_{11,6} & \Psi_{11,7} & \Psi_{11,8} & \Psi_{11,9} & \Psi_{11,10} & \Psi_{11,11} & \Psi_{11,12} \\ \Psi_{12,1} & \Psi_{12,2} & \Psi_{12,3} & \Psi_{12,4} & \Psi_{12,5} & \Psi_{12,6} & \Psi_{12,7} & \Psi_{12,8} & \Psi_{12,9} & \Psi_{12,10} & \Psi_{12,11} & \Psi_{12,12} \end{pmatrix},$$

where

$$\Psi_{11} = \frac{N_x}{4\alpha_x^3} (4e^{-\alpha_x T} - e^{-2\alpha_x T} + 2\alpha_x T - 3); \quad \Psi_{12} = \frac{N_x}{4\alpha_x^2} (e^{-2\alpha_x T} - 2e^{-\alpha_x T} + 1);$$

$$\Psi_{22} = \frac{N_x}{4\alpha_x} (1 - e^{-2\alpha_x T}); \quad \Psi_{33} = \frac{N_y}{4\alpha_y^3} (4e^{-\alpha_y T} - e^{-2\alpha_y T} + 2\alpha_y T - 3);$$

$$\Psi_{34} = \frac{N_y}{4\alpha_y^2} (e^{-2\alpha_y T} - 2e^{-\alpha_y T} + 1); \quad \Psi_{44} = \frac{N_y}{4\alpha_y} (1 - e^{-2\alpha_y T});$$

$$\Psi_{55} = \frac{N_z}{4\alpha_z^3} (4e^{-\alpha_z T} - e^{-2\alpha_z T} + 2\alpha_z T - 3); \quad \Psi_{56} = \frac{N_z}{4\alpha_z^2} (e^{-2\alpha_z T} - 2e^{-\alpha_z T} + 1);$$

$$\Psi_{66} = \frac{N_z}{4\alpha_z} (1 - e^{-2\alpha_z T}); \quad \Psi_{77} = \frac{N_\Delta}{4\alpha_\Delta^3} (4e^{-\alpha_\Delta T} - e^{-2\alpha_\Delta T} + 2\alpha_\Delta T - 3);$$

$$\Psi_{78} = \frac{N_\Delta}{4\alpha_\Delta^2} (e^{-2\alpha_\Delta T} - 2e^{-\alpha_\Delta T} + 1); \quad \Psi_{88} = \frac{N_\Delta}{4\alpha_\Delta} (1 - e^{-2\alpha_\Delta T});$$

$$\Psi_{1(k+8)} = \frac{\cos \alpha_k}{c} \Psi_{11}; \quad \Psi_{2(k+8)} = \frac{\cos \alpha_k}{c} \Psi_{12}; \quad \Psi_{3(k+8)} = \frac{\cos \beta_k}{c} \Psi_{33};$$

$$\Psi_{4(k+8)} = \frac{\cos \beta_k}{c} \Psi_{34}; \quad \Psi_{5(k+8)} = \frac{\cos \gamma_k}{c} \Psi_{55}; \quad \Psi_{6(k+8)} = \frac{\cos \gamma_k}{c} \Psi_{56};$$

$$\Psi_{7(k+8)} = \Psi_{77}; \quad \Psi_{8(k+8)} = \Psi_{78};$$

$$\Psi_{(k+8)(l+8)} = \frac{\cos \alpha_k}{c} \frac{\cos \alpha_l}{c} \Psi_{11} + \frac{\cos \beta_k}{c} \frac{\cos \beta_l}{c} \Psi_{33} + \frac{\cos \gamma_k}{c} \frac{\cos \gamma_l}{c} \Psi_{55} + \Psi_{77};$$

$$\Psi_{ij} = \Psi_{ji}; \quad (k, l = \overline{1,4}); \quad (i, j = \overline{1,12}).$$

When the fact, that  $\lambda_d$  is a vector of non-power parameters, is taken into account, the expanded Kalman filter state equation and the equation of covariance matrix of the filtered errors  $R_v$ , can be represented by following equation [1, 4]

$$(10) \quad \hat{\lambda}_{d(v+1)} = \tilde{\lambda}_{d(v+1)} + \frac{2}{N} R_{v+1} \int_{t_v}^{t_{v+1}} \xi(t) \frac{\partial s(t, \tilde{\lambda}_{d(v+1)})}{\partial \lambda_d} dt;$$

$$(11) \quad R_{v+1}^{-1} = \hat{R}_{v+1}^{-1} + \frac{2}{N} \int_{t_v}^{t_{v+1}} \left[ \frac{\partial s(t, \tilde{\lambda}_{d(v+1)})}{\partial \lambda_d^T} \right]^T \left[ \frac{\partial s(t, \tilde{\lambda}_{d(v+1)})}{\partial \lambda_d^T} \right] dt,$$

where

$$\tilde{\lambda}_{d(v+1)} = \Phi_d \hat{\lambda}_{dv} \text{ is a vector of the state prediction;}$$

$$\tilde{R}_{v+1} = \Phi_d R_v \Phi_d^T + \Psi_{dv} \text{ is a prediction-error covariance matrix;}$$

$$\hat{\lambda}_{dv}^T = \{ \hat{\lambda}_{dv}^T, \hat{T}_{dv}^T \}; \quad \hat{\lambda}_v^T = \{ \hat{x}_v, \hat{V}_{xv}, \hat{y}_v, \hat{V}_{yv}, \hat{z}_v, \hat{V}_{zv}, \hat{\Delta}_v, \hat{V}_{\Delta v} \};$$

$$\hat{T}_{dv}^T = \{ \hat{T}_{d1v}, \hat{T}_{d2v}, \hat{T}_{d3v}, \hat{T}_{d4v} \}; \quad R_v = \begin{vmatrix} R_{\lambda_v} & R_{\lambda T_{dv}} \\ R_{T_{d\lambda_v}} & R_{T_{dv}} \end{vmatrix}; \quad R_{\lambda T_{dv}} = R_{T_{d\lambda_v}}^T.$$

The maximum likelihood estimate of the vector of the corrected time delays of the signals from the separate emission sources is [1]

$$(12) \quad T_v^* = \min_k \left| \hat{T}_{dv} + k_v T_0 - T(t, \hat{x}_v, \hat{y}_v, \hat{z}_v, \hat{\Delta}_v) \right| = \hat{T}_{dv} + k_v^* T_0,$$

where  $(k_v^*)^T = [k_{1v}^*, k_{2v}^*, k_{3v}^*, k_{4v}^*]$  is a vector of values of  $(k_v)^T = [k_{1v}, k_{2v}, k_{3v}, k_{4v}]$ ,

at which an extremum is reached;  $k_{iv} = 1, 2, 3, \dots; i = \overline{1,4}; (T_v^*)^T = [T_{1v}^*, T_{2v}^*, T_{3v}^*, T_{4v}^*]$  is a corrected time delays vector of the signals from the separate emission sources.

So, the problem is reduced to new one supposing resolving the following equation system

$$(13) \quad \begin{cases} T_{1v}^* = \hat{T}_{d1v} + k_{1v}^* T_0 = c^{-1} \left[ (x_v^* - x_1)^2 + (y_v^* - y_1)^2 + (z_v^* - z_1)^2 \right]^{1/2} + \Delta_v^* \\ T_{2v}^* = \hat{T}_{d2v} + k_{2v}^* T_0 = c^{-1} \left[ (x_v^* - x_2)^2 + (y_v^* - y_2)^2 + (z_v^* - z_2)^2 \right]^{1/2} + \Delta_v^* \\ T_{3v}^* = \hat{T}_{d3v} + k_{3v}^* T_0 = c^{-1} \left[ (x_v^* - x_3)^2 + (y_v^* - y_3)^2 + (z_v^* - z_3)^2 \right]^{1/2} + \Delta_v^* \\ T_{4v}^* = \hat{T}_{d4v} + k_{4v}^* T_0 = c^{-1} \left[ (x_v^* - x_4)^2 + (y_v^* - y_4)^2 + (z_v^* - z_4)^2 \right]^{1/2} + \Delta_v^* \end{cases}$$

at which the maximum likelihood estimates  $x_v^*, y_v^*, z_v^*$  and  $\Delta_v^*$  are determined.

### 3. Algorithm accuracy

Fig. 1 represents results of the research of the accuracy characteristics when positioning a mobile object both with and without making use of the multiplex synchronization. The research has been carried out for the NAVSTAR satellite navigation system for Geometric Dilution of Precision GDOP=4 for C/A- and P-code. The computations have been carried out for typical values of the parameters: signal noise ratio  $q=1+100$ ; sampling interval  $T = 0,1$  s; standard deviation of velocity  $\sigma_V = 1$  m/s; frequency band of the noise in the motion model of the mobile object  $\alpha = 0,1$  Hz; parameters of the signal (1): carrier frequency  $f_0 = \omega_0/2\pi = 1575,42$  MHz; continuance of one element of the range-finder code: for C/A-code  $\tau_e = 980$  ns; for P-code  $\tau_e = 98$  ns; initial values of the standard deviation of the estimate parameters:  $\sigma_{x0} = 300$  m;  $\sigma_{Vx0} = 300$  m/s.

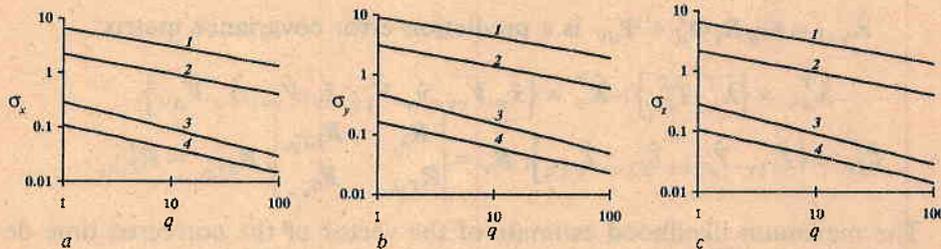


Fig. 1. Standard deviation when determining the coordinates of the mobile object

a - for  $x$ ; b - for  $y$ ; c - for  $z$ ; 1 - without using MSM for C/A-code; 2 - without using MSM for P-code; 3 - using MSM for C/A-code; 4 - using MSM for P-code

The displayed diagrams represent the standard deviation when determining the coordinates 1 hour after the beginning of the work of the algorithm. When applying the multiplex synchronization method for this time the fluctuation error, using the C/A-code turns out to be 40-45 times smaller compared with the standard algorithm one, whereas using the P-code it is 25-30 times smaller.

Table 1 represents the horizontal and vertical mean square error of a mobile object positioning for the signal noise ratio  $q=100$  when applying the multiplex synchronization method and using C/A-code. The displayed data show the superiority of the multiplex synchronization method in the accuracy characteristics in comparison with the standard method for filtration.

Table 1

Time, h	1	6	12	18	24	36	Stationary mode
Horizontal error, mm	29	14	11	10	9	9	8
Vertical error, mm	48	22	17	16	15	14	12

## References

1. Рашков, В., А. Христов. Метод на допълнителната променлива в задачата за филтрация на пространствените координати и параметрите на движение на подвижни обекти. — Аерокосмически изследвания в България, 1993, №10, 71—83.
2. Тихонов, В. И., В. Н. Харисов. Объединенная синхронизация в оптимальных радиотехнических системах. — Научн. тр. ВУЗ, Лит.ССР, Радиотехника, 1983, 56—63.
3. Тихонов, В. И., В. Н. Харисов. Объединенная синхронизация в радиотехнических системах. — Радиотехника, 39, 1984, № 4, 3—10.
4. Тихонов, В. И., В. Н. Харисов. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: Учеб. пособие для вузов. М., Радио и связь, 1991. 608с., ил.

Received 27.VI.1997

## Метод на обединената синхронизация при пространствено позициониране на подвижен обект

Венцеслав Рашков, Ангел Христов,  
Чавдар Пандев

(Резюме)

Приложен е методът на обединената синхронизация в задачата за трикоординатно позициониране на подвижен обект (ПО) чрез използване на многопозиционна радионавигационна система. При този метод се следят времезакъсненията на далекомерния код и високочестотното запълнение. След това по тези данни се извършва оценка на времезакъснението на приетия сигнал по метода на максималното правдоподобие. На базата на получените резултати се изчисляват координатите на ПО. Рекурентният алгоритъм за обработка на приетите радионавигационни сигнали е разработен на основата на оптималната филтрация. Определянето на местоположението на ПО се извършва по квазидалекомерен метод, при който се отчита разсъгласуването на еталонния генератор на борда на ПО спрямо системното време.

## Synthesis of receiver with multiplex synchronization in satellite navigation systems

Ventseslav Rashkov,  
Angel Christov\*, Victor Marinov\*

"Georgi Benkovski" Higher Air Force Academy, Dolna Mitropolia  
\*Space Research Institute, Bulgarian Academy of Sciences

User apparatuses and used algorithm for processing of received navigation signal proves to be important for accurate positioning of the satellite navigation systems. The receiver based upon an algorithm of Kalman filtration with multiplex synchronization [1] provides higher accuracy characteristics in comparison with one which carries out measurement of time delays only by "envelope" (range-finder code). The increase of accuracy is achieved owing to the more complete use of information contained in the received radio-signal.

For synthesis of such receiving set a frame of reference  $O_0XYZ$  is chosen with origin  $O_0$  which is fixed with respect to the Earth. This coordinate system is described in [1]. On board a mobile object the signals emitted from four emission sources are observed. The coordinates of the emission sources are known  $X_k(t) = (x_k(t), y_k(t), z_k(t))$ ,  $k = \overline{1,4}$ .

The state vector  $\lambda^T = (x, V_x, y, V_y, z, V_z, \Delta, V_\Delta)$  includes: the coordinates of the mobile object —  $x, y, z$ ;  $\Delta$  — the scale disagreement of the mobile object with respect to the system time;  $V_x, V_y, V_z, V_\Delta$  — the respective velocities of  $x, y, z$  and  $\Delta$ .

For using the multiplex synchronization method (the method of additional variable) an additional variables vector  $T_d^T = (T_{d1}, T_{d2}, T_{d3}, T_{d4})$  is introduced for the signals from the four emission sources.  $T_{d1}, T_{d2}, T_{d3}$  and  $T_{d4}$  are the time delays of high frequency filling of received signals from the separate emission sources respectively. Then the vector state  $\lambda$  is expanded to the new state vector  $\lambda_d^T = \{\lambda^T, T_d^T\}$  [1, 2].

The observation equation is given by [1–3]

$$(1) \quad \xi(t) = s(t, \lambda_{dv}) + n(t), \quad t \in (t_v, t_{v+1});$$

$$(2) \quad s(t, \lambda_v, T_{dv}) = \sum_{k=1}^4 f_k [t - T_k(\lambda_v)] \cos[\omega_0(t - T_{dkv})]$$

where  $\lambda_{dv}^T = \{\lambda_v^T, T_{dv}^T\}$ ;  $T_{dv} = T_d(t_v)$ ;  $t_v = vT$ ;  $f_k(t - T_k(\lambda))$  is a radio-signal envelope from the  $k$ -th emission source;  $\omega_0 = 2\pi f_0$  is the circular frequency of the high-frequency filling;  $T_k(\lambda) = \tau_k(X) + \Delta$  is the arrival time of the signal from the  $k$ -th emission source;  $\tau_k(X)$  is the real time of the signal delay from the  $k$ -th emission source [1];  $n(t)$  is a white Gaussian noise whose characteristics are described in [1].

The amplitudes of received signals from the different emission sources in the zone of radio-visibility are assumed to be equal. The state vector  $\lambda$  can be described through Gaussian diffusion Markov process which satisfies the system of stochastic differential equations that is shown in [1]. The matrices of the drift coefficients and the diffusion coefficients and the noise vector are also shown in [1].

The expanded Kalman filter state equation is given by [1-3]

$$(3) \quad \hat{\lambda}_{d(v+1)} = \tilde{\lambda}_{d(v+1)} + \frac{2}{N} R_{v+1} \int_{t_v}^{t_{v+1}} \xi(t) \frac{\partial s(t, \tilde{\lambda}_{d(v+1)})}{\partial \lambda_d} dt$$

where  $\tilde{\lambda}_{d(v+1)} = \Phi_d \hat{\lambda}_{dv}$  is a vector of the state prediction;  $\Phi_d$  is the state transition matrix for sampling interval ( $T$ ) [1];

$$\hat{\lambda}_{dv}^T = \{\hat{\lambda}_v^T, \hat{T}_{dv}^T\}; \quad \hat{\lambda}_v^T = \{\hat{x}_v, \hat{y}_{xv}, \hat{y}_v, \hat{y}_{yv}, \hat{z}_v, \hat{y}_{zv}, \hat{\Delta}_v, \hat{y}_{\Delta v}\};$$

$$\hat{T}_{dv}^T = \{\hat{T}_{d1v}, \hat{T}_{d2v}, \hat{T}_{d3v}, \hat{T}_{d4v}\};$$

$$R_v = \begin{vmatrix} R_{\lambda_v} & R_{\lambda T_{dv}} \\ R_{T_d \lambda_v} & R_{T_d T_{dv}} \end{vmatrix}; \quad R_{\lambda T_{dv}} = R_{T_d \lambda_v}^T$$

The above equation describes the algorithm of expanded Kalman filter which gives optimum receiving of signals and filtration of the parameters. An optimum system for processing of the received signals will be synthesized with the help of this equation.

From (2) for  $\frac{\partial s(t, \tilde{\lambda}_{d(v+1)})}{\partial \lambda}$  and  $\frac{\partial s(t, \tilde{\lambda}_{d(v+1)})}{\partial T_d}$  it is obtained

$$\frac{\partial s(t, \tilde{\lambda}_{d(v+1)})}{\partial \lambda} = \left| \frac{\partial s_1(t, \tilde{\lambda}, \tilde{T}_{d1})}{\partial \lambda}; \frac{\partial s_2(t, \tilde{\lambda}, \tilde{T}_{d2})}{\partial \lambda}; \frac{\partial s_3(t, \tilde{\lambda}, \tilde{T}_{d3})}{\partial \lambda}; \frac{\partial s_4(t, \tilde{\lambda}, \tilde{T}_{d4})}{\partial \lambda} \right|;$$

$$\frac{\partial s(t, \tilde{\lambda}_{d(v+1)})}{\partial T_d} = \left| \frac{\partial s_1(t, \tilde{\lambda}, \tilde{T}_{d1})}{\partial T_d}; \frac{\partial s_2(t, \tilde{\lambda}, \tilde{T}_{d2})}{\partial T_d}; \frac{\partial s_3(t, \tilde{\lambda}, \tilde{T}_{d3})}{\partial T_d}; \frac{\partial s_4(t, \tilde{\lambda}, \tilde{T}_{d4})}{\partial T_d} \right|;$$

where

$$(4) \quad \frac{\partial s_k(t, \tilde{\lambda}_{v+1}, \tilde{T}_{dk(v+1)})}{\partial \lambda} = \frac{\partial s_k(t, \tilde{\lambda}_{v+1}, \tilde{T}_{dk(v+1)})}{\partial T_k(\lambda)} \frac{dT_k(\tilde{\lambda}_{v+1})}{d\lambda} \\ = - \frac{\partial f_k(t - T_k(\tilde{\lambda}_{v+1}))}{\partial t} \cos[\omega_0(t - \tilde{T}_{dk(v+1)})] \frac{dT_k(\tilde{\lambda}_{v+1})}{d\lambda};$$

$$(5) \quad \frac{\partial s_k(t, \tilde{\lambda}_{v+1}, \tilde{T}_{dk(v+1)})}{\partial T_d} = \frac{\partial s_k(t, \tilde{\lambda}_{v+1}, \tilde{T}_{dk(v+1)})}{\partial T_{dk}} \frac{d\tilde{T}_{dk(v+1)}}{dT_d} \\ = \omega_0 f_k[t - T_k(\tilde{\lambda}_{v+1})] \sin[\omega_0(t - \tilde{T}_{dk(v+1)})] \frac{d\tilde{T}_{dk(v+1)}}{dT_d}.$$

The state equation takes the form

$$(6) \quad \hat{\lambda}_{v+1} = \tilde{\lambda}_{v+1} + \frac{2}{N} \int_{t_v}^{t_{v+1}} \left[ R_{\lambda(v+1)} \frac{\partial s(t, \tilde{\lambda}_{d(v+1)})}{\partial \lambda} + R_{\lambda T_d(v+1)} \frac{\partial s(t, \tilde{\lambda}_{d(v+1)})}{\partial T_d} \right] \xi(t) dt;$$

$$(7) \quad \hat{T}_{d(v+1)} = \tilde{T}_{d(v+1)} + \frac{2}{N} \int_{t_v}^{t_{v+1}} \left[ R_{T_d \lambda(v+1)} \frac{\partial s(t, \tilde{\lambda}_{d(v+1)})}{\partial \lambda} + R_{T_d(v+1)} \frac{\partial s(t, \tilde{\lambda}_{d(v+1)})}{\partial T_d} \right] \xi(t) dt.$$

From (4 + 7) it follows

$$(8) \quad \hat{\lambda}_{v+1} = \tilde{\lambda}_{v+1} + \sum_{k=1}^4 \frac{2}{N} \left\{ - R_{\lambda(v+1)} \frac{\partial T_k(\tilde{\lambda}_{v+1})}{\partial \lambda} \right. \\ \times \int_{t_v}^{t_{v+1}} \frac{\partial f_k(t - T_k(\tilde{\lambda}_{v+1}))}{\partial t} \cos[\omega_0(t - \tilde{T}_{dk(v+1)})] \xi(t) dt \\ \left. + R_{\lambda T_d(v+1)} \frac{\partial \tilde{T}_{dk(v+1)}}{\partial T_d} \omega_0 \int_{t_v}^{t_{v+1}} f_k(t - T_k(\tilde{\lambda}_{v+1})) \sin[\omega_0(t - \tilde{T}_{dk(v+1)})] \xi(t) dt \right\};$$

$$(9) \quad \hat{T}_d^{(v+1)} = \tilde{T}_d^{(v+1)} + \sum_{k=1}^4 \frac{2}{N} \left\{ -R_{T_d \lambda}^{(v+1)} \frac{\partial T_k(\tilde{\lambda}_{v+1})}{\partial \lambda} \right. \\ \times \int_{t_v}^{t_{v+1}} \frac{\partial f_k(t - T_k(\tilde{\lambda}_{v+1}))}{\partial t} \cos[\omega_0(t - \tilde{T}_{dk}^{(v+1)})] \xi(t) dt \\ \left. + R_{T_d}^{(v+1)} \frac{\partial \tilde{T}_{dk}^{(v+1)}}{\partial T_d} \omega_0 \int_{t_v}^{t_{v+1}} f_k(t - T_k(\tilde{\lambda}_{v+1})) \sin[\omega_0(t - \tilde{T}_{dk}^{(v+1)})] \xi(t) dt \right\}.$$

The algorithm of expanded Kalman filter (3) can be represented in the following form

$$(10) \quad \begin{cases} \hat{\lambda}_{v+1} = \tilde{\lambda}_{v+1} + \sum_{k=1}^4 (\Gamma_{\lambda_k} B_k + \Gamma_{\lambda T_{dk}} B_{dk}) \\ \hat{T}_d^{(v+1)} = \tilde{T}_d^{(v+1)} + \sum_{k=1}^4 (\Gamma_{T_d \lambda_k} B_k + \Gamma_{T_{dk}} B_{dk}), \end{cases}$$

where

$$(11) \quad \Gamma_{\lambda_k} = R_{\lambda}^{(v+1)} \frac{\partial T_k(\tilde{\lambda}_{v+1})}{\partial \lambda};$$

$$(12) \quad \Gamma_{\lambda T_{dk}} = R_{\lambda T_d}^{(v+1)} \frac{\partial \tilde{T}_{dk}^{(v+1)}}{\partial T_d};$$

$$(13) \quad \Gamma_{T_d \lambda_k} = R_{T_d \lambda}^{(v+1)} \frac{\partial T_k(\tilde{\lambda}_{v+1})}{\partial \lambda};$$

$$(14) \quad \Gamma_{T_{dk}} = R_{T_d}^{(v+1)} \frac{\partial \tilde{T}_{dk}^{(v+1)}}{\partial T_d};$$

$$(15) \quad B_k = -\frac{2}{N} \int_{t_v}^{t_{v+1}} \xi(t) \frac{\partial f_k(t - T_k(\tilde{\lambda}_{v+1}))}{\partial t} \cos[\omega_0(t - \tilde{T}_{dk}^{(v+1)})] dt;$$

$$(16) \quad B_{dk} = \omega_0 \frac{2}{N} \int_{t_v}^{t_{v+1}} \xi(t) f_k(t - T_k(\tilde{\lambda}_{v+1})) \sin[\omega_0(t - \tilde{T}_{dk}^{(v+1)})] dt.$$

The analytical expressions of the correlation integrals  $B_k$  and  $B_{dk}$  of the signals received from NAVSTAR system at multiplex synchronization are represented in [4, 5].

The following recursion algorithm is obtained by passing from the vector equations (10) to scalar ones.

$$\begin{aligned}
 \hat{x}_{v+1} &= \hat{x}_v + \Phi_{12} \hat{V}_{xv} + \sum_{k=1}^4 (\Gamma_{\lambda_{1k}} B_k + \Gamma_{\lambda T_{d1k}} B_{dk}); \\
 \hat{V}_{x(v+1)} &= \Phi_{12} \hat{V}_{xv} + \sum_{k=1}^4 (\Gamma_{\lambda_{2k}} B_k + \Gamma_{\lambda T_{d2k}} B_{dk}); \\
 \hat{y}_{v+1} &= \hat{y}_v + \Phi_{34} \hat{V}_{yv} + \sum_{k=1}^4 (\Gamma_{\lambda_{3k}} B_k + \Gamma_{\lambda T_{d3k}} B_{dk}); \\
 \hat{V}_{y(v+1)} &= \Phi_{44} \hat{V}_{yv} + \sum_{k=1}^4 (\Gamma_{\lambda_{4k}} B_k + \Gamma_{\lambda T_{d4k}} B_{dk}); \\
 \hat{z}_{v+1} &= \hat{z}_v + \Phi_{56} \hat{V}_{zv} + \sum_{k=1}^4 (\Gamma_{\lambda_{5k}} B_k + \Gamma_{\lambda T_{d5k}} B_{dk}); \\
 \hat{V}_{z(v+1)} &= \Phi_{66} \hat{V}_{zv} + \sum_{k=1}^4 (\Gamma_{\lambda_{6k}} B_k + \Gamma_{\lambda T_{d6k}} B_{dk}); \\
 \hat{\Delta}_{v+1} &= \hat{\Delta}_v + \Phi_{78} \hat{V}_{\Delta v} + \sum_{k=1}^4 (\Gamma_{\lambda_{7k}} B_k + \Gamma_{\lambda T_{d7k}} B_{dk}); \\
 \hat{V}_{\Delta(v+1)} &= \Phi_{88} \hat{V}_{\Delta v} + \sum_{k=1}^4 (\Gamma_{\lambda_{8k}} B_k + \Gamma_{\lambda T_{d8k}} B_{dk}); \\
 \hat{T}_{d1(v+1)} &= \hat{T}_{d1v} + \Phi_{92} \hat{V}_{xv} + \Phi_{94} \hat{V}_{yv} + \Phi_{96} \hat{V}_{zv} + \Phi_{98} \hat{V}_{\Delta v} + \sum_{k=1}^4 (\Gamma_{T_d \lambda_{1k}} B_k + \Gamma_{T_{d1k}} B_{dk}); \\
 \hat{T}_{d2(v+1)} &= \hat{T}_{d2v} + \Phi_{10,2} \hat{V}_{xv} + \Phi_{10,4} \hat{V}_{yv} + \Phi_{10,6} \hat{V}_{zv} + \Phi_{10,8} \hat{V}_{\Delta v} + \sum_{k=1}^4 (\Gamma_{T_d \lambda_{2k}} B_k + \Gamma_{T_{d2k}} B_{dk}); \\
 \hat{T}_{d3(v+1)} &= \hat{T}_{d3v} + \Phi_{11,2} \hat{V}_{xv} + \Phi_{11,4} \hat{V}_{yv} + \Phi_{11,6} \hat{V}_{zv} + \Phi_{11,8} \hat{V}_{\Delta v} + \sum_{k=1}^4 (\Gamma_{T_d \lambda_{3k}} B_k + \Gamma_{T_{d3k}} B_{dk}); \\
 \hat{T}_{d4(v+1)} &= \hat{T}_{d4v} + \Phi_{12,2} \hat{V}_{xv} + \Phi_{12,4} \hat{V}_{yv} + \Phi_{12,6} \hat{V}_{zv} + \Phi_{12,8} \hat{V}_{\Delta v} + \sum_{k=1}^4 (\Gamma_{T_d \lambda_{4k}} B_k + \Gamma_{T_{d4k}} B_{dk}),
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

where  $\Gamma_{\lambda_{ik}}$  is computed from (11),  $\Gamma_{\lambda T_{d1k}}$  — from (12) ( $i = \overline{1,8}; k = \overline{1,4}$ ),  $\Gamma_{T_d \lambda_{jk}}$  — from (13),  $\Gamma_{T_{djk}}$  — from (14) ( $j = \overline{1,4}$ ).

Having found the filtered estimate vectors  $\hat{\lambda}_{v+1}, \hat{T}_{d(v+1)}$  on every step  $(v+1)$ , the time delays of the envelopes of the signals from the separate emission sources are computed

$$T(\hat{x}_{v+1}, \hat{y}_{v+1}, \hat{z}_{v+1}, \hat{\Delta}_{v+1}) = \begin{pmatrix} T_1(\hat{x}_{v+1}, \hat{y}_{v+1}, \hat{z}_{v+1}, \hat{\Delta}_{v+1}) \\ T_2(\hat{x}_{v+1}, \hat{y}_{v+1}, \hat{z}_{v+1}, \hat{\Delta}_{v+1}) \\ T_3(\hat{x}_{v+1}, \hat{y}_{v+1}, \hat{z}_{v+1}, \hat{\Delta}_{v+1}) \\ T_4(\hat{x}_{v+1}, \hat{y}_{v+1}, \hat{z}_{v+1}, \hat{\Delta}_{v+1}) \end{pmatrix},$$

by using the following interrelations

$$(18) \begin{cases} T_1(\hat{x}_{v+1}, \hat{y}_{v+1}, \hat{z}_{v+1}, \hat{\Delta}_{v+1}) = c^{-1} \left[ (\hat{x}_{v+1} - x_1)^2 + (\hat{y}_{v+1} - y_1)^2 + (\hat{z}_{v+1} - z_1)^2 \right]^{1/2} + \hat{\Delta}_{v+1} \\ T_2(\hat{x}_{v+1}, \hat{y}_{v+1}, \hat{z}_{v+1}, \hat{\Delta}_{v+1}) = c^{-1} \left[ (\hat{x}_{v+1} - x_2)^2 + (\hat{y}_{v+1} - y_2)^2 + (\hat{z}_{v+1} - z_2)^2 \right]^{1/2} + \hat{\Delta}_{v+1} \\ T_3(\hat{x}_{v+1}, \hat{y}_{v+1}, \hat{z}_{v+1}, \hat{\Delta}_{v+1}) = c^{-1} \left[ (\hat{x}_{v+1} - x_3)^2 + (\hat{y}_{v+1} - y_3)^2 + (\hat{z}_{v+1} - z_3)^2 \right]^{1/2} + \hat{\Delta}_{v+1} \\ T_4(\hat{x}_{v+1}, \hat{y}_{v+1}, \hat{z}_{v+1}, \hat{\Delta}_{v+1}) = c^{-1} \left[ (\hat{x}_{v+1} - x_4)^2 + (\hat{y}_{v+1} - y_4)^2 + (\hat{z}_{v+1} - z_4)^2 \right]^{1/2} + \hat{\Delta}_{v+1} \end{cases}$$

After the estimates  $T_r(\hat{x}_{v+1}, \hat{y}_{v+1}, \hat{z}_{v+1}, \hat{\Delta}_{v+1})$ ,  $(r=1,4)$  are obtained, an operation is carried out aiming at finding how many whole periods  $k_{r(v+1)}^*$  of the carrier frequency with period  $T_0 = 1/f_0$  are necessary to minimize the expression  $\left\{ \hat{T}_{dr(v+1)} + k_{r(v+1)} T_0 - T_r(\hat{x}_{v+1}, \hat{y}_{v+1}, \hat{z}_{v+1}, \hat{\Delta}_{v+1}) \right\}$ , i.e. the estimate  $k_{r(v+1)}^*$  is found by the rule

$$(19) \quad k_{r(v+1)}^* = \min_k^{-1} \left\{ \hat{T}_{dr(v+1)} + k_{r(v+1)} T_0 - T_r(\hat{x}_{v+1}, \hat{y}_{v+1}, \hat{z}_{v+1}, \hat{\Delta}_{v+1}) \right\}.$$

So a decision is taken that the time delay of the signal from the  $r$ -th emission source is

$$(20) \quad T_{r(v+1)}^* = \hat{T}_{dr(v+1)} + k_{r(v+1)}^* T_0.$$

In this way the lack of uniqueness in measuring the time delay by the high frequency filling is removed. On the other side the higher accuracy of these measurements is used. This concept is a typical one for the systems with multiplex synchronization (SMS) [3-8].

A final step of the recursion algorithm is the determining of the corrected estimates  $x_{v+1}^*, y_{v+1}^*, z_{v+1}^*, \Delta_{v+1}^*$  of the coordinates of the mobile object and disagreement of its scale with respect to the system time. For this purpose the system of nonlinear equations (sphere equations) must be solved

$$\begin{aligned}
 T_{1(v+1)}^* &= c^{-1} \left[ (x_{v+1}^* - x_1)^2 + (y_{v+1}^* - y_1)^2 + (z_{v+1}^* - z_1)^2 \right]^{1/2} + \Delta_{v+1}^* \\
 T_{2(v+1)}^* &= c^{-1} \left[ (x_{v+1}^* - x_2)^2 + (y_{v+1}^* - y_2)^2 + (z_{v+1}^* - z_2)^2 \right]^{1/2} + \Delta_{v+1}^* \\
 T_{3(v+1)}^* &= c^{-1} \left[ (x_{v+1}^* - x_3)^2 + (y_{v+1}^* - y_3)^2 + (z_{v+1}^* - z_3)^2 \right]^{1/2} + \Delta_{v+1}^* \\
 T_{4(v+1)}^* &= c^{-1} \left[ (x_{v+1}^* - x_4)^2 + (y_{v+1}^* - y_4)^2 + (z_{v+1}^* - z_4)^2 \right]^{1/2} + \Delta_{v+1}^*
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

Fig. 1 represents the structural scheme of this recursion algorithm (11 + 21). The receiving set is composed of four (number of the emission sources) **time discriminators** and **processor** for forming estimates of the parameters  $\lambda_{v+1}^*$ . On the base of the results of the estimate of the parameters  $\lambda$  and the known coordinates of the emission sources —  $x_k, y_k, z_k, (k=1,4)$  the current values of the time delays of the supporting signals are formed in the **discriminators**: by range-finder code  $T_k(\tilde{\lambda}_{v+1})$  and by carrier frequency —  $\tilde{T}_{dk(v+1)}$ . A mixture  $\xi(t)$  of an useful signal and noise is received at the input of the **discriminators**. From each **discriminator** two digital signals  $B'_k$  and  $B'_{dk}$  enter the **processor**. These signals are associated with  $B_k$  and  $B_{dk}$  through the following interrelations

$$B_k = -\frac{2}{N} B'_k; B_{dk} = \frac{2}{N} \omega_0 B'_{dk}.$$

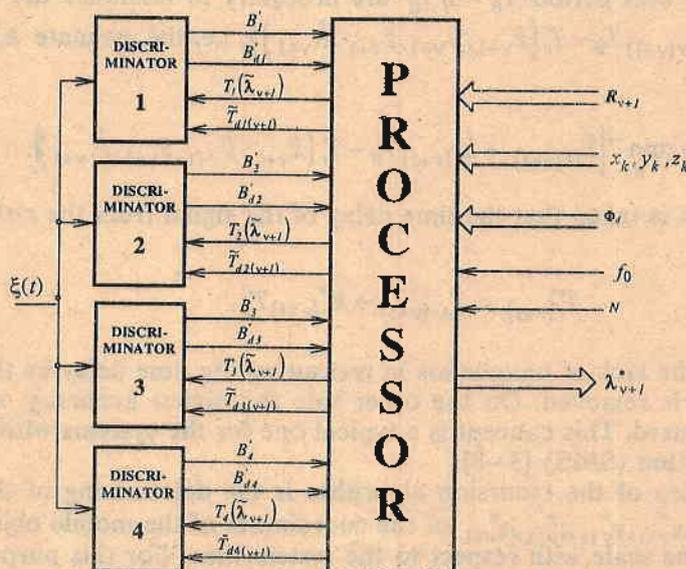


Fig. 1. Structural scheme of the synthesized SMS

The discriminators are analog devices. The initial analog signals  $B'_k$  and  $B'_{dk}$  by means of analog to digital converter are transformed in digital and enter the processor where they are processed by means of the represented recursion algorithm.

For carrying out the computing procedures in the processor the following data are passed: components of the matrix  $R_{v+1}$ ; coordinates of the  $k$ -th emission source —  $x_k, y_k, z_k, (k = 1, 4)$ ; components of the state transition matrix  $\Phi_d$ ; carrier frequency  $f_0$  of the signal at which the optimum processing is carried out; spectral density  $N$  of the noise at the receiver's input.

The synthesized receiver represents an optimal system with multiplex synchronization. It is constructed on the base of nonlinear filter with four inputs.

In the receiver an estimate of the time disagreement  $\hat{\Delta}(t)$  is done, which is used for filtration of the error obtained owing to the instability of the frequency of the supporting generator in receiver of the satellite navigation system. This completely corresponds to the concept of quasi-ranging method [3, 9]. With high stability of the supporting generator the time of disagreement  $\Delta(t_v)$  is slowly varying value in comparison with the errors of the coordinates estimate of the mobile object —  $x_v, y_v, z_v$ . Therefore, it could be determined with higher accuracy owing to the accumulation of the observations. Thus the accuracy of the system is expected to be close to the accuracy of the ranging system [3], i.e. when  $\Delta(t_v) = 0$ . It is researched and it is proved, that the concept of the quasi-ranging method is optimum one for whatever deviations  $\Delta(t_v)$ , and not only for very small ones or very slow ones [3]. The structure of the synthesized receiver (Fig. 1) has some differences from the known devices which using quasi-ranging method. Usually availability of autonomous systems for tracking the arrival moment of the signals from the different emission sources is supposed. The estimates of the time delays of the signals (by range-finder code —  $\hat{T}_{k(v+1)}$  and by carrier frequency —  $\hat{T}_{dk(v+1)}$ ) are used by the systems for tracking  $\lambda$ . In the synthesized receiving set (Fig. 1) there are no separate systems for tracking the time delays of the signals. An integrated closed system exists for tracking of the parameters  $\lambda$  by which the time delays of the signals from the corresponding emission sources by envelope and by carrier are computed.

The synthesized navigation system with multiplex synchronization allows normal working and unessential decreasing of the accuracy when there is loss of signal from one emission source for determinate time. The positioning error will be increased owing to the lack of observation of the disagreement  $\Delta$  of the supporting generator. In this case three-coordinate navigation will be carried out by means of ranging method with receiving of signals from three emission sources.

## References

1. Rashkov, V., A. Christov, C. Pandev. Multiplex synchronization method at spatial positioning of mobile object. — Аерокосмически изследвания в България, 1999, № 15.
2. Рашков, В., А. Христов. Метод на допълнителната променлива и задачата за филтрация на пространствените координати и параметрите на движение на подвижни обекти. — Аерокосмически изследвания в България, 1993, №10, 71—83.

3. Тихонов, В. И., В. Н. Харисов. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: Учеб. пособие для вузов. М., Радио и связь, 1991. 608с., ил.
4. Рашков, В. Л. Аналитични решения на сигналната съставна на корелационния интеграл на сигнали, приети от GPS при синхронизиране на времезакъсненията. — Научно тематичен сборник - ЮНС - 22-23 май 1996 г., ВВВУ „Георги Бенковски“, Долна Митрополия, том 2, 1996, 241—249.
5. Рашков, В. Л. Аналитични решения на флукуационната съставна на корелационния интеграл на GPS-сигнали при синхронизиране на времезакъсненията. — Научно тематичен сборник - ЮНС - 22-23 май 1996 г., ВВВУ „Георги Бенковски“, Долна Митрополия, том 2, 1996, 250—255.
6. Тихонов, В. И., В. Н. Харисов. Объединенная синхронизация в оптимальных радиотехнических системах. — Научн. тр. ВУЗ, Лит.ССР, Радиоэлектроника, 1983, 56—63.
7. Тихонов, В. И., В. Н. Харисов. Объединенная синхронизация в радиотехнических системах. — Радиотехника, 39, 1984, № 4, 3—10.
8. Харисов, В. Н. Синтез и исследование характеристик объединенной системы синхронизации методом разделения задержек. — Тез. докл. Всес. НТК Проблемы повышения эффективности и качества систем синхронизации. Каунас, 1982.
9. Харисов, В. Н., А. И. Яковлев, А. Г. Глушченко. Оптимальная фильтрация координат подвижного объекта. — Радиотехника и электроника, 29, 1984, №10, 1939—1947.

Received 27.VI.1997

### Синтез на приемно устройство с обединена синхронизация в спътникови навигационни системи

*Венцеслав Рашков, Ангел Христов,  
Виктор Маринов*

(Резюме)

Синтезирано е оптимално устройство за приемане и обработка на спътникови навигационни сигнали. С негова помощ се определят координатите и параметрите на движение на подвижен обект (ПО) по квазидалекомерен метод. Синтезираният навигационен приемник представлява система с обединена синхронизация. Обработката на радионавигационните сигнали се извършва по алгоритъм на оптимална филтрация. В синтезираното устройство, прилагащо метода на обединена синхронизация, се използва информацията за времезакъсненията на далекомерния код и високочестотното запълнение. Квазидалекомерното радионавигационно устройство отчита разсъгласуването на еталонния генератор на борда на ПО спрямо системното време.

## Qualitative analysis of the free processes in a generalized linear oscillating circuit with periodic parameters. Part 3. Analysis of the free processes in piece-wise linear and quasi-harmonic oscillating circuit<sup>1</sup>

*Nikolai Birjuk, Vladimir Damgov\**

*Voronej State University, Department of Physics,  
394 693 Voronej, Russia*

*\* Space Research Institute, Bulgarian Academy of Science*

### Introduction

The general analysis of the stationary modes of oscillating systems with periodic parameters is of great theoretical and practical significance. Similar obstacles crop up in connection with many problems related to the Theory of oscillations in particular when investigating parametric amplification and generation of oscillations, frequency modulation, detection and conversion, suppression of undesired oscillations and intermodulation distortions, etc.

In the Part 1 of the paper [1], the possible transformations of the equations of an oscillating circuit with periodic and almost periodic parameters have been given and the expedience of using different equations forms has been analyzed. A qualitative picture of the free processes in an oscillating circuit has been presented on the basis of the mathematical theory of Hamiltonian systems.

The Part 2 of the paper [2] has been focused on the problems of the stability of the canonical systems in a general form. Criteria for the stability or instability of a general linear resonance circuit have been formed.

<sup>1</sup> An investigation, supported by the "Scientific Research" Bulgarian National Fund under Contract No TH - 549/95.

Present Part 3 of the paper provides an analysis of the free processes, in piece-wise linear and quasi-harmonic oscillating circuits, from the point of view of their bounded or unbounded nature. In other words, it studies issue of the stability and instability of the oscillating circuit.

### Stability of an oscillating circuit with a piece-wise linear volt-coulomb characteristic

In linear approach the concept of stability coincides with the concept boundedness of all solutions of the respective differential equation with a zero right-hand part and bounded initial conditions. Having lost its stability, the parametric amplifier is converted into a parametric oscillator.

The equation of a series oscillating circuit containing capacitance  $C(t_r)$ , periodically changing in time, acquires the following form with respect to the charge  $q$

$$(1) \quad \frac{d^2 q}{dt_r^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt_r} + \frac{1}{LC(t_r)} q = 0,$$

where  $R$  and  $L$  are the constant resistance and the inductance of the oscillating circuits.

We use the following substitution  $q_1 = q \exp(-\frac{1}{2} \frac{R}{L} t_r)$  to reduce Eq. (1) to the form:

$$(2) \quad \frac{d^2 q_1}{dt_r^2} + \left[ \frac{1}{LC(t_r)} - \frac{1}{4} \frac{R^2}{L^2} \right] q_1 = 0,$$

which contains no explicit dissipative term.

The capacitance  $C(t_r)$  is regarded as a piece-wise linear time function,

$$C = C_1 \text{ for } t_r \in (0, t_{r1}), \text{ and } C = C_2 \text{ for } t_r \in (t_{r1}, T_r),$$

where  $T_r$  is the capacitance change-period. Thus the capacitance changes twice in one period: when  $t_r = t_{r1}$ , it leaps from  $C_1$  to  $C_2$ , and when  $t_r = T_r$ , from  $C_2$  to  $C_1$ .

Equation (2) can be written in the following dimensionless form:

$$(3) \quad \frac{d^2 y}{dt^2} + a(t)y = 0,$$

where

$$t = \frac{t_r}{t_{00}}, \quad t_{00} = \sqrt{L} \sqrt[4]{C_1 C_2}, \quad a(t) = \alpha^2 = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}$$

$$\text{at } t \in (0, t_1), \text{ and } a(t) = \frac{1}{\alpha^2} = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \text{ at } t \in (t_1, T), \quad t_1 = \frac{t_{r1}}{t_{00}}, \quad T = \frac{T_r}{t_{00}}.$$

Equation (3) has constant coefficients in the interval  $(0, t_1)$  and its solution is a cosine curve. The same can be established for the interval  $(t_1, T)$ . At moment  $t_1$  the amplitude, the frequency and the initial phase of the cosinusoid change in a leap-like way, yet so that the function turns out to be continuous and sufficiently smooth (with continuous first-order derivative). Equation (3) is

a particular case of Hill's equation. It follows from the latter's theory that it cannot be asymptotically stable, i.e. if  $y(t)$  is a solution of the equation,  $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) \neq 0$ .

Therefore, the stability problem boils down to specifying one of the two cases: a) the case of stability, when the above-mentioned boundary is a finite number; b) the case of instability, when the module of the boundary is equal to infinity.

The solution of Eq. (3) is determined in the following way:

$$(4) \quad \begin{aligned} y(t) &= y_{01} \cos(\alpha t + \varphi_1) & \text{for } t \in (0, t_1), \\ y(t) &= y_{02} \cos\left(\frac{1}{\alpha} t + \varphi_2\right) & \text{for } t \in (t_1, T), \end{aligned}$$

$y_{01}$  and  $\varphi_1$  are determined by the initial conditions,  $y_{02}$  and  $\varphi_2$  are specified by the condition of continuousness of the function  $y(t)$  and its derivative at the moment  $t_1$ , when the capacitance changes in a leap-like manner.

$$\begin{aligned} \varphi_2 &= \arctg\left[\alpha^2 \operatorname{tg}(\alpha t_1 + \varphi_1) - \frac{1}{\alpha} t_1\right], \\ y_{02} &= \alpha^2 y_{01} \frac{\sin(\alpha t_1 + \varphi_1)}{\sin\left(\frac{1}{\alpha} t_2 + \varphi_2\right)}. \end{aligned}$$

Equation (3) can be presented in a matrix form:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a(t) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}, \quad y_1 = y, \quad y_2 = \frac{dy}{dt}$$

or in short :

$$(5) \quad \frac{d}{dt} \mathbf{Y} = \mathbf{A}(t) \mathbf{Y}.$$

According to Flocker's theory, the fundamental matrix of the solution satisfies the condition:

$$(6) \quad \mathbf{Y}(t+T) = \mathbf{Y}(t) \mathbf{Y}(T),$$

where  $\mathbf{Y}(T)$  is a constant matrix, called monodromy matrix. This matrix allows of obtaining Lyapounov's constant  $a = \operatorname{Sp} \mathbf{Y}(T)$ , where  $\operatorname{Sp}$  is the sum of the elements of the principal diagonal of the matrix.

In accordance with Lyapounov's first method, the following three cases are distinguished for Eq. (3): 1)  $|a| > 2$ , 2)  $|a| < 2$ , 3)  $|a| = 2$ .

In the first case the equation is unstable, in the second one it is stable, and in the third case it is determined by the boundary between the stable and unstable ranges.

Using solution (5), which can serve for construction the monodromy matrix, whose elements are obtained in the form:

$$\begin{aligned}
 y_{11} &= \cos \alpha t_1 \cos \frac{1}{\alpha}(T-t_1) - \alpha^2 \sin \alpha t_1 \sin \frac{1}{\alpha}(T-t_1), \\
 y_{12} &= \frac{1}{\alpha} \sin \alpha t_1 \cos \frac{1}{\alpha}(T-t_1) + \alpha \cos \alpha t_1 \sin \frac{1}{\alpha}(T-t_1), \\
 y_{21} &= -\alpha \cos \alpha t_1 \sin \frac{1}{\alpha}(T-t_1) - \frac{1}{\alpha} \sin \alpha t_1 \cos \frac{1}{\alpha}(T-t_1), \\
 y_{22} &= -\frac{1}{\alpha^2} \sin \alpha t_1 \sin \frac{1}{\alpha}(T-t_1) + \cos \alpha t_1 \cos \frac{1}{\alpha}(T-t_1).
 \end{aligned}$$

This helps derive an expression for Lyapounov's constant :

$$\begin{aligned}
 (7) \quad a = \text{Sp}Y(T) = y_{11} + y_{22} &= 2 \cos \alpha t_1 \cos \frac{1}{\alpha}(T-t_1) \\
 &\quad - (\alpha^2 + \frac{1}{\alpha^2}) \sin \alpha t_1 \sin \frac{1}{\alpha}(T-t_1).
 \end{aligned}$$

This expression allows of identifying which of the above-listed three cases the system refers to in each specific occurrence and in what way the stability problem is to be solved. The areas of stability or instability are determined by three parameters —  $\alpha$ ,  $t_1$  and  $T$ , i.e. in the general case they can be plotted in a three-dimensional space.

Fig.1 shows the areas of stability and instability (hatched) on the plane  $\left(\alpha, \frac{t_1}{2\pi}\right)$  for the particular case of  $T = 2\pi$ . Parameter  $\alpha$  changes within the range  $1 \leq \alpha \leq 10$ . It can be obtained from the case for  $\alpha > 1$ , given above, by carrying out the following substitution of the parameters:  $\beta = \frac{1}{\alpha}$ ,  $\tau_1 = T - t_1$ .

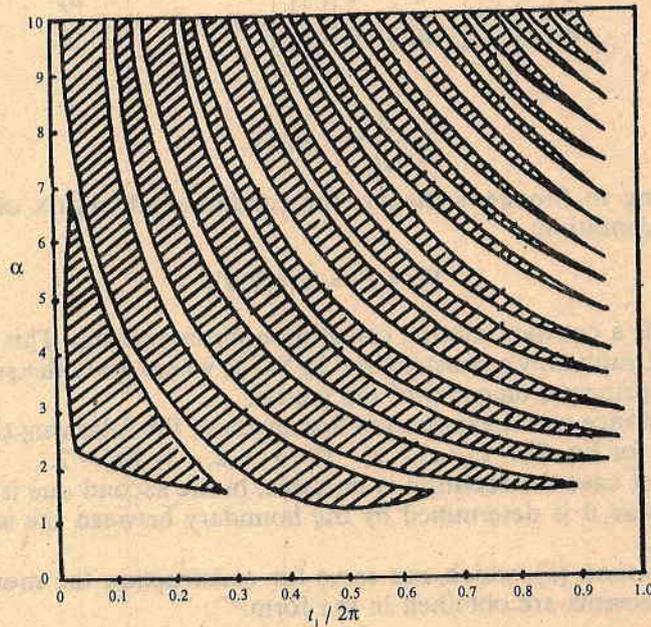


Fig.1

## Analysis of the free processes in a linear quasi-harmonic oscillating circuit

Object of the analysis in this section is a linear quasi-harmonic oscillating circuit, whose free processes are described by a quasi-harmonic time function, i.e. by a sine function with amplitude slowly changing in time and first derivative of the phase by time. The major application area of such oscillating circuits is that of harmonic signal modulators.

Let us consider the general case of a series resonance circuit, where the inductance  $L$ , capacitance  $C$  and resistance  $R$  are time-dependent. The free process in such a circuit is described by the equation

$$(8) \quad \frac{d^2 x}{dt^2} + 2\alpha(t) \frac{dx}{dt} + \omega_o^2(t)x = 0,$$

where  $x = \frac{q}{q_{oo}}$ ,  $t = \frac{t_r}{t_{oo}}$  — normalized capacitor charge and normalized time re-

spectively,  $\alpha = \frac{dL}{dt} + t_{oo}R$ ,  $\omega_o(t) = \frac{t_{oo}}{\sqrt{LC}}$ .

The general solution of Eq. (8) can be presented in the form

$$(9) \quad x = A(t, \tau) \sin \varphi(t, \tau),$$

where

$$(10) \quad A(t, \tau) = \frac{1}{\sqrt{\omega_o(t)}} \frac{1}{\sqrt{\omega_o(\tau)}} e^{-\beta(t, \tau)},$$

$$\beta(t, \tau) = \int_{\tau}^t \left[ \alpha + \left( \alpha + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \ln \omega_o \right) \cos 2\varphi(t, \tau) \right] dt,$$

$$\varphi(t, \tau) = \int_{\tau}^t \left[ \omega_o + \left( \alpha + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \ln \omega_o \right) \sin 2\varphi(t, \tau) \right] dt.$$

Here the constant  $\tau$  determines an arbitrary initial point of time.

Equation (10) given above yields an indicator of the integrability of Eq. (8) in quadratures —

$$\alpha(t) + \frac{d}{dt} \ln \omega_o(t) = 0.$$

The first and second equations of (10) can be produce an indicator of the asymptotic stability of the oscillating circuit —  $\frac{d\omega_o(t)}{dt} < 0$  for  $t > t'$ ,  $t'$  — an arbitrary moment.

So far we did not impose any limitations on the laws of time-dependent oscillating circuit parameters.

Let us suppose that the oscillating circuit satisfies the quasi-harmonic condition, i.e. we assume that the first co-multiplier in the right-hand part of (9) is a slowly changing time-dependent function. Under these conditions the approximate extremums of the solution are

$$\varphi(t_k, \tau) = (2k+1)\frac{\pi}{2}, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

respectively the zeroes of the solution are  $\varphi(t_k^0, \tau) = k\pi$ .

The logarithmic damping decrement is determined by using two adjacent extremums of the solution

$$v(t_k) = \ln \frac{A(t_{k-1}, \tau)}{A(t_k, \tau)} = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \left( \alpha + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \ln \omega_0 \right) \cos^2 \varphi dt.$$

The non-negativity of the logarithmic damping decrement for any  $t_k$  is an evidence of stability, and its positiveness is an evidence of asymptotic stability of the quasi-harmonic oscillating circuit.

The last expression can yield an analytical indicator of stability of the quasi-harmonic oscillating circuit:

$$(11) \quad \alpha = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \ln \omega_0 \geq 0.$$

If we introduce the parameter instantaneous characteristic resistance of the oscillating circuit  $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ , (11) can be used to obtain a simple criterion of asymptotic stability —  $\rho = \text{const}$ .

We introduce the concept instantaneous quality factor of the oscillating circuit  $Q = \frac{\rho}{R}$ , and as a result the formula of the logarithmic damping decrement acquires the form

$$v(t_k) = \int_{k\pi - \frac{\pi}{2}}^{k\pi + \frac{\pi}{2}} \frac{\cos^2 \varphi}{Q + 0,5 \sin 2\varphi} (d\varphi + Q d \ln \rho).$$

Let  $Q = \text{const}$ . Then

$$v(t_k) = \int_{k\pi - \frac{\pi}{2}}^{k\pi + \frac{\pi}{2}} \frac{\cos^2 \varphi d\varphi}{Q + 0,5 \sin 2\varphi} + \int_{\ln \rho(t_{k-1})}^{\ln \rho(t_k)} \frac{Q \cos^2 \varphi}{Q + 0,5 \sin 2\varphi} d(\ln \rho).$$

The first integral is equal to  $\pi(4Q^2 - 1)^{-1/2}$ . Hence, the stability criterion can be written as follows:

$$\int_{\ln \rho(t_{k-1})}^{\ln \rho(t_k)} \frac{Q \cos^2 \varphi}{Q + 0,5 \sin 2\varphi} d(\ln \rho) < \frac{\pi}{\sqrt{4Q^2 - 1}}.$$

Since  $\max_{\varphi} \frac{Q \cos^2 \varphi}{2Q + \sin 2\varphi} = \frac{2Q^2}{4Q^2 - 1}$ , after substituting the sub-integral expression for its maximum value, we obtain

$$\frac{4Q^2}{4Q^2 - 1} \ln \frac{\rho(t_k)}{\rho(t_{k-1})} < \frac{\pi}{\sqrt{4Q^2 - 1}}.$$

This inequality allows of obtaining the following simple stability expression at  $Q = \text{const}$ .

$$\ln \frac{\rho_{\max}}{\rho_{\min}} < \frac{\pi}{2Q}.$$

For a more detailed investigation of the free processes in an oscillating circuit with slowly changing parameters it is desirable to obtain an approximate solution of the last integral equation in (10). It is presented in the following way:

$$\varphi = \gamma + \varepsilon, \quad \gamma = \int_{\tau}^t \omega_o dt, \quad \varepsilon = \int_{\tau}^t \left( \alpha + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \ln \omega_o \right) \sin 2\varphi dt.$$

The inequality  $\gamma \gg \varepsilon$  is valid for many cases of practical importance, since the sub-integral function of the first integral has a constant sign, while that of the second one is quickly oscillating. After differentiating the last equation in (10), we obtain

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \left( \alpha + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \ln \omega_o \right) (\sin 2\gamma \cos 2\varepsilon \alpha \cos 2\gamma \sin 2\varepsilon).$$

In linear approximation ( $\cos 2\varepsilon \cong 1, \sin 2\varepsilon \cong 2\varepsilon$ ) this equation is solved in quadratures

$$\varepsilon = \left[ 2 \int_{\tau}^t \mu \cos 2\gamma dt \right] \int_{\tau}^t \mu \sin 2\gamma \exp \left[ -2 \int_{\tau}^t \mu \cos 2\gamma \right] dt.$$

After obtaining  $\varepsilon$  equations (10) can be computed in quadratures and in this way the problem is completely solved.

### Conclusion

The phenomenon "resonance" occupies peculiar position in natural and other sciences, in technology, in civil engineering subjects, in medicine, in the theory of musical instruments, in aeronautics theory, in rocket technics and astronautics, etc. Resonance is often manifested in the world that surrounds us either as a highly useful phenomenon or as an extremely harmful one. Radio communications, radio broadcasting, television and the other radio engineering systems would be absolutely inconceivable without resonance. Resonance is quite multiaspectual and multiform even in oscillating circuits with constant parameters. Resonance phenomena in nonlinear oscillating systems are virtually boundless.

Linear systems are quite frequently identified as systems with constant parameters not only in textbooks and other teaching aids but in scientific works as well. This approach reduced drastically the class of linear systems since it excludes linear systems with time-dependent parameters. The principle of linear connection, formulated relatively recently, has boosted the significance of linear systems with variable parameters, since it follows from this principle that if the whole set of linear systems can be studied, this will automatically lead to the establishment of the necessary scientific basis for investigating the processes occurring in nonlinear systems.

Oscillating circuits with periodic parameters can be divided into two groups. One of them includes oscillating circuits where given arbitrary initial conditions, free processes are limited. The other group, respectively, encompasses oscillating circuits, whose initial conditions can be selected in such a way as to ensure unlimited free processes. Each group of oscillating circuits, in its turn, is characterized by a set of stability and instability area. It is particularly important to develop analytical approaches for determining the area of stability or instability to which the specific oscillating circuit belongs.

The paper contains formulations of general theorems on systems with positive elements concerning the relation between the parameters of the system and the matrix elements of the respective differential vector equation. Infinitive systems of algebraic equations for some typical systems with periodic parameters are obtained; the properties of these systems of equations are explored, the general case relation between the complication of the radio-physical systems and the respective alteration of the systems of equations describing them is identified. The multitude of free processes occurring in an oscillating circuit with periodic and almost periodic parameters is visualized in a dynamic picture. Theorems concerning the conditions that would be sufficient for the stability or instability of an oscillating circuit with periodic parameters are formulated.

Qualitative analysis assumes considerable importance in the investigation of complex oscillating systems, since it allows of identifying the most general features of systems behaviour. Such a general perspective of the approach makes it interesting from a practical point of view, since the oscillating circuit with periodical parameters is quite rich in particular cases.

## References

1. Birjuk, N. D., V. N. Damgov. Qualitative Analysis of the Free Processes in a Generalized Linear Oscillating Circuit With Periodic Parameters. Part 1. Structure of the Differential Equations and Classification of the Free Processes in Hamiltonian Oscillating Circuits. — *Aerospace Research in Bulgaria*, 13, 1996.
2. Birjuk, N. D., V. N. Damgov. Qualitative Analysis of the Free Processes in a Generalized Linear Oscillating Circuit With Periodic Parameters. Part 2. Stability Of The Canonical Systems and a Generalized Linear Resonance Circuit. — *Aerospace Research in Bulgaria*, 14, 1997.

*Received 6.XI.1996*

Качествен анализ на свободните процеси в  
обобщен линеен трептящ кръг с  
периодични параметри. Част 3. Анализ на  
свободните процеси в интервално-линейна и  
квази-хармонична трептяща верига

*Николай Бирюк, Владимир Дамгов*

(Резюме)

В част първа и в част втора на статията бе доказана необходимостта от изследване на трептящите резонансни системи с периодични и почти периодични параметри в общ вид с оглед цялостно обхващане на огромното разнообразие от режими, закономерности и свойства. Разработен бе общ метод за анализ на такива системи, които бяха групирани и класифицирани в тримерно цилиндрично пространство на параметрите по техния най-важен признак — устойчивостта или неустойчивостта по Ляпунов. Проблемите на устойчивостта бяха изследвани както в най-общ вид с използване на канонична система уравнения, така и при определена конкретизация на трептящата резонансна система с периодични параметри.

Трета част на работата продължава излагането на методите за използване разработения аналитичен подход към достатъчно конкретизирани резонансни системи с периодични и почти периодични параметри. Изследват се свободните трептящи процеси в интервално-линейна резонансна система, в която конкретно капацитетът приема две определени стойности със зададен период във времето. Друга конкретизирана задача е изследване на свободните процеси в линейна квазихармонична трептяща система, в която движението се описва с квазихармонична функция (използвана е синусна функция с бавноизменяща се амплитуда). И в двата случая са формулирани общи теореми относно съотношението на положителните параметри на системата и елементите на матрицата на съответното векторно диференциално уравнение. Изведени са условията за устойчивост и неустойчивост на разглежданите системи.

## **BALKANPROB — Space project for studying the dynamics of the lithosphere of Bulgaria and the Balkans**

*Nikola Georgiev, Garo Mardirossian,  
Hernani Spiridonov*

*Space Research Institute, Bulgarian Academy of Sciences*

### **I. Introduction**

The present state of the space methods and instrumentation provides great potentialities for the study of the global, regional and local dynamics of the lithospheric plates [1,2]. The geodynamic processes are one of the essential precursors of natural phenomena — earthquakes, volcano eruptions, tsunami etc. resulting in the devastation of vast regions and taking a lot of human victims [3,4].

The achieved millimeter accurateness in determining the position of the points from the Earth's surface in the horizontal and vertical direction by laser location of Artificial Earth Satellites (AES), radiointerferometry with very long bases (RIFVLB), and global positioning systems (GPS) provide great potentialities for the study of geodynamic processes, and the study of the correlation of these processes with natural phenomena. This made it possible in the recent years to develop a number of international space projects aimed at the study of the regional shift of the lithospheric plates. Some of these projects are: "WEGENER-MEDLAS" of the West Space Agency (WSA) [6] and "IDEAL" (Study of the Dynamics of Euro-Asian Lithosphere) of the East Space Association (ESA) [7,8]. Later, the two committees concluded a contract for joint measurements, processing and interpretation of the results obtained under these two projects.

### **II. The IDEAL Space project — concept, theoretical provision, and model studies**

The development of the project started in 1983 [7—15]. Later, INTERKOSMOS and KAPG adopted it for collaboration between the Eastern

European academies of sciences in the field of global geophysics and space study of the dynamics of the Euro-Asian lithosphere. To this end, the following observatories were appointed on the stable parts of the lithospheric plates of the Alpo-Himalayan orogene: Zvenigorod, Kiev, Riga and Potsdam — for the European zone, and Hart, Heluan and Fort Lami — for the African zone, as well as four stations — Plana, Erevan, Simeiz and Pents — in the mobile belt between the two stable plates (Fig. 1). By measurement, the vectors between the observatories from the mobile and the stable lithospheric plates and their respective yearly modifications with time and space by which the shifts of the mobile plate are characterised.

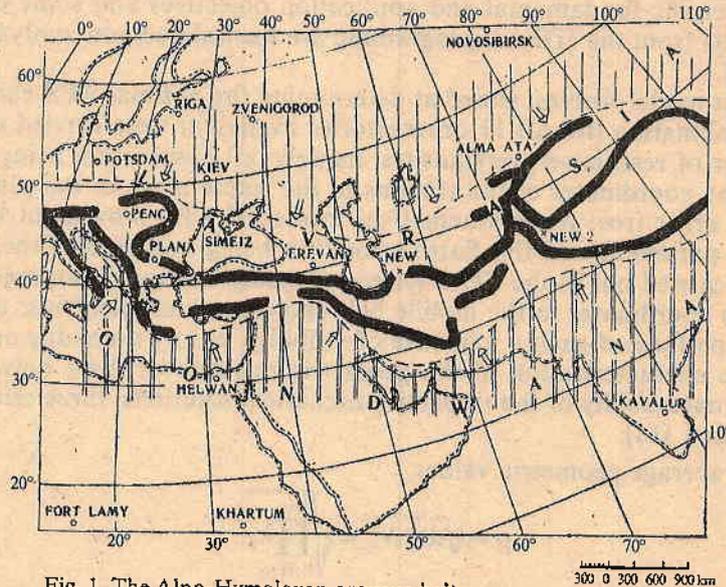


Fig. 1. The Alpo-Himalayan orogenic belt

The region, suggested for studying, comprises part of the Mediterranean Transasian mobile belt which is very interesting in the scientific and practical respect. According to the concept of the new global tectonics, the differential shifts, the significant deformations related with them, and the great tectonic and seismic activity in the Alpo-Himalayan orogene belt result from the complex structural interaction of several big lithospheric plates: the Eurasian — to the north, the African, Arabian, and Indonesian — to the south, and Tibet and Iran — to the east. The shift of the mobile belt thus outlined (Fig.1) is about 5cm/year while to the west, in the region of Gibraltar and the Azores, the shift is 1–1,5cm/year. The greatest shift is the shift of the Turkish lithospheric plate, bordered to the north by the Anadol fault which progresses at the rate of 11cm/year. The whole area is characterized by great deep-focus seismic activity centered concentrated around its northern and southern boundary [16]. The latter fact provides grounds to forward the hypothesis for the availability of two active modern subduction processes in South-Eastern Europe, namely:

i) Gondwan below Laurasia where deep-focus seismic and modern genetic activity is generated in Italy, along the south-west border of the Balkan peninsula, and in the region of the Aegian Sea.

ii) the East-European platform below the northern boundary of the Alpo-Himalayan orogene, generating deep-focus earthquakes.

Having in mind the great distance between the stable parts of the lithospheric plates around the mobile belt (about 2000 km), the belt's width (about 1000 km in the region of the Eastern Mediterranean), the availability of significant sea and mountain obstacles, as well as the modern means for high-precision laser location of AES, the IDEAL project was developed based on the laser observatories, located on the mobile and stable lithospheric plates of the Alpo-Himalayan orogene belt (Fig.1).

The scientific-fundamental and application objectives and some of the expected results from the IDEAL programme are formulated and analyzed in detail in [7-15].

The first model studies, aimed at determining the optimal AES-earth observatories combination (for all 11 observatories available) were carried out based on a number of restrictive prerequisites, namely: all observation being of equal precision; the coordinates of the stations in the stable areas of the plates being known and error-free; the mathematical model of AES movement being adequate; the parameters of the Earth's rotation being known and the observations being carried out in the TU 1 system; the only unknown parameters being the station's coordinates in the mobile belt and the orbital elements; the observations are performed each 4 s in case of visibility, at any time, day or night.

For the characterization of the geometric qualities of these networks and for the internal stability of the respective numerical solutions, three criteria have been suggested [14]:

1. The average geometric value:

$$(1) \quad \rho = \sqrt[r]{\det N_r} = \sqrt[r]{\prod_{i=1}^{i=r} \lambda_i}$$

of the matrix's characteristic  $\lambda_i$  numbers

$$(2) \quad N_r = \| \| a_{ij} \| \|; i, j = 1, 2, \dots, r$$

of the normal equations.

2. Tod's number

$$(3) \quad P = \lambda_{\max} / \lambda_{\min}$$

for the Matrices'  $N_r$  substantiation

$$(4) \quad N_r^{-1} = \| \| b_{ij} \| \|; i, j = 1, 2, \dots, r$$

3. Turing's number

$$(5) \quad M = M(N_r) \cdot M(N_r^{-1}) / r$$

for the matrices'  $N_r$  and  $N_r^{-1}$  provision, where the so-called  $M$ -normes are represented:

$$(6) \quad M(N_r) = r \cdot \max_{i,j} |a_{ij}|$$

$$M(N_r^{-1}) = r \cdot \max_{i,j} |b_{ij}|$$

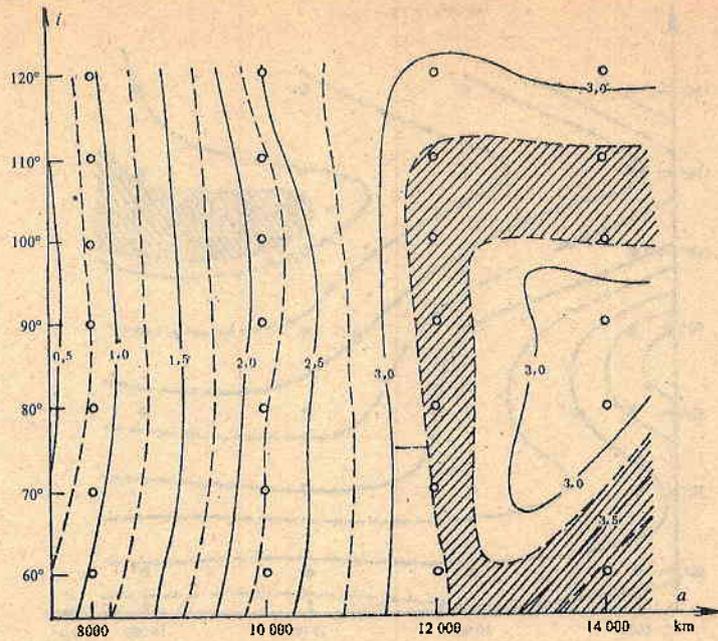


Fig. 2. Map of the values  $\rho \cdot 10^2$  for the mean-geometric estimate  $\rho$  of the eigenvalues of the matrix  $N$  of coefficients of the normal equations

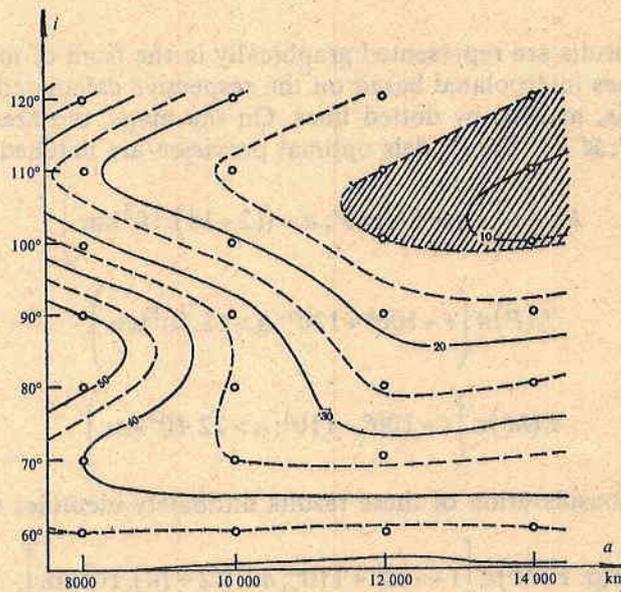


Fig. 3. Map of the values  $M \cdot 10^{-7}$  for the Turing's  $M$ -condition number of the matrix  $N$  of coefficients of the normal equations

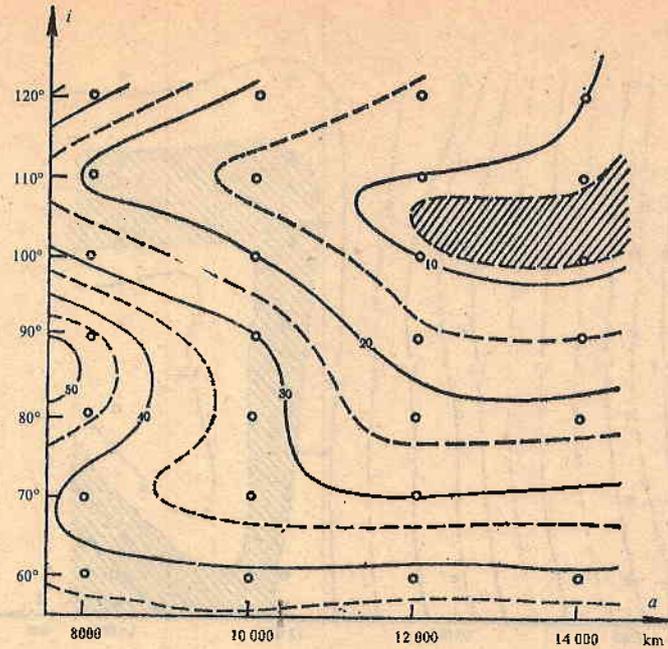


Fig. 4. Map of the values  $P \cdot 10^{-6}$  for the Tod's  $P$ -condition number of the matrix  $N$  of coefficients of the normal equations

The obtained results are represented graphically in the form of maps (Figs 2, 3, and 4) by isolines interpolated based on the respective calculated values of the variant solutions, marked by dotted lines. On the maps, the areas  $E(k)$  of the criteria  $k = \rho, P, M$  for the models optimal provision are hatched, namely:

$$(7) \quad E(\rho) \in \left[ i \sim 60^\circ + 110^\circ; a \sim (12 + 14) \cdot 10^3 \text{ km} \right],$$

$$(8) \quad E(P) \in \left[ i \sim 100^\circ + 120^\circ; a > 12 \cdot 10^3 \text{ km} \right],$$

$$(9) \quad E(M) \in \left[ i \sim 100^\circ + 110^\circ; a > 12 \cdot 10^3 \text{ km} \right].$$

The joint consideration of these results ultimately identifies the area:

$$(10) \quad E(\rho, P, M) \in \left[ i \sim 100^\circ + 110^\circ; a \sim (12 + 14) \cdot 10^3 \text{ km} \right],$$

where:  $i$  and  $a$  are the orbit's slope and big semi-axis, respectively.

Without going into any further details, we shall mention, that more than 70 more graphs, maps and tables [7–15] allowing to determine the amount of observations, optimal conditions and precision, needed to be provided by the laser distancemeters for the average quadratic error to be  $m_k \leq 3,5$  cm.

Based on the results, obtained by the model studies, the conclusion was made that, if 1,5–2 month-long observation sessions be made, in 3–4 years it will be possible to determine platform shifts of the order of 1 cm. These were the grounds for the preparation of joint observations between the West Space Agency (the WEGENER-MEDLAS project) and the East Space Association (the IDEAL project) Unfortunately, notwithstanding the theoretical and model studies, the available laserlocation equipment and the undertakings of the two committees, for a number of economic and technical reasons, the initiated experiments for studying the dynamics of the Alpo-Himalayan orogene belt were interrupted.

### III. The BALKANPROB Space project — objectives and prospects in studying the dynamics of Bulgaria and the Balkans

It should be noted that, in the development of the BALKANPROB project in 1991–1992, the authors [17–20] were not only concerned about the major fundamental-scientific and application-scientific objectives but they also accounted for the prospects and economic potentialities for the project's implementation, in relation with which the features of the supportive geodetic networks were analysed.

The vertical shifts of the earth's crust in our country are studied best, their greatest velocity (reaching up to 5,9 mm/year) being recorded in the thick Tectonic zones (the Rhodopes and the Serbian-Macedonian massif). Moderate shift values (up to 2 mm/year) were recorded in large areas of the Moesian platform in the fore-Balkan, Sredna Gora, Kraishte and Strandja [1, 17, 21].

Accounting for the considerations stated above, it was decided that the efforts during the first stage be directed at the design and implementation of four traverses for identification of the vertical shifts of the earth's crust on the territory of Bulgaria, a 150–200 m wide polygon, starting at the Danube and reaching as far as the Greek boundary to the south. This allows for the polygon's extension furthermore to the south — on Greek territory, and to the north — on Roumanian territory.

The worked out neo-Tectonic map (Fig.5) allows for increase of the available geologic information, since the materials already known were supplemented with newly-revealed space-lineaments and ring arch-block structures, unknown so far.

In parallel with the polygons' design, the velocity of the vertical shifts along the traverses was calculated, including references of the 1-st and 2-nd class in such a way that the meridional paces of Nos 1, 2, 3, and 4 (Fig.5), crossing the outlined thrusts be outlined. In the selected levelling paces, 2 to 4 measurements are included, performed in the years 1924–1929, 1956–1960, 1975–1976, and 1987. The number of measurements is greatest along paces Nos 1 and 2, the essential fact about them being that traverse No 2 crosses regions with the greatest number of thrusts and highest seismic activity.

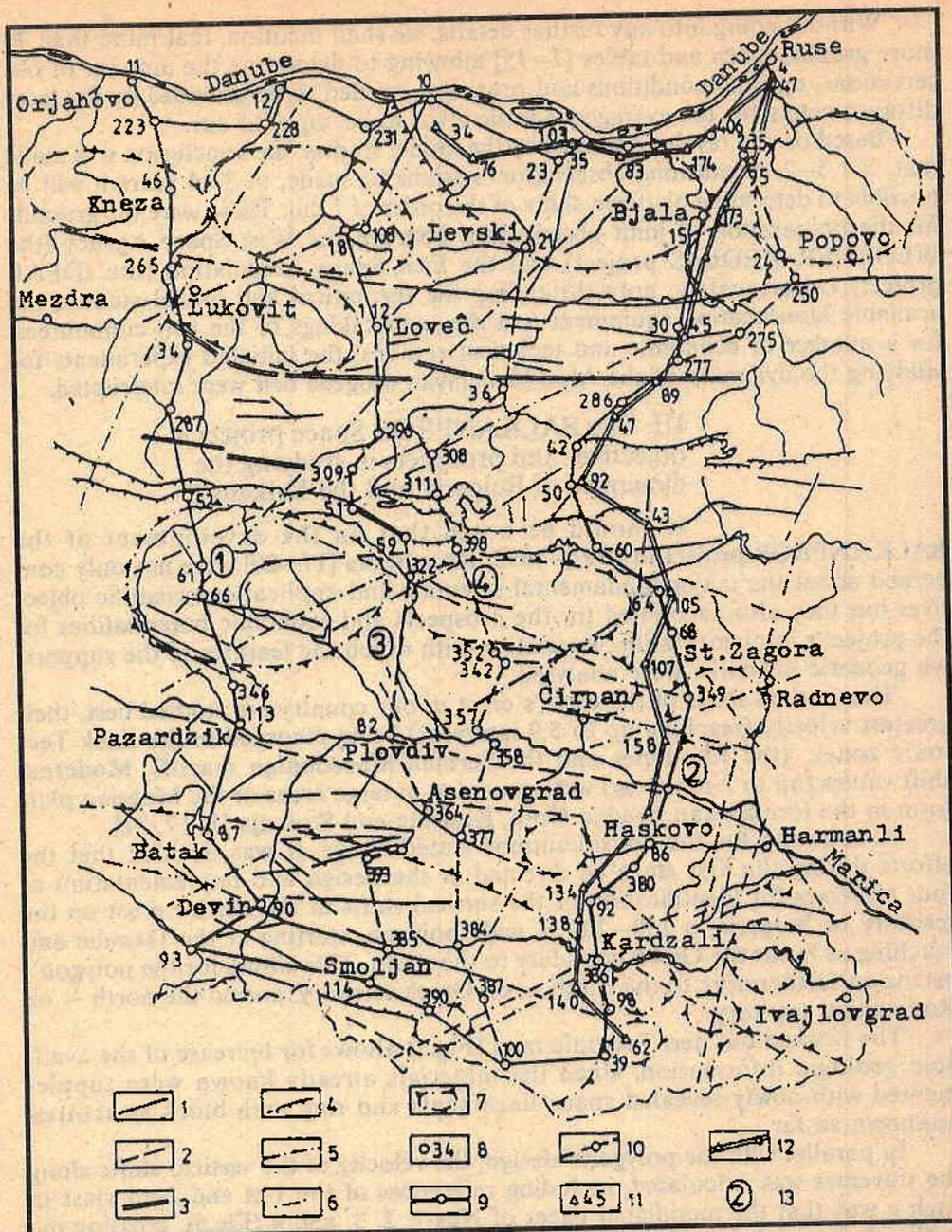


Fig.5. Neotectonic sketch with plotted levelling lines  
 Faults: 1 – proven fault, 2 – suggested fault, 3 – flexures, 4 – overthrust, 5 – space lineament, 6 – suggested space lineament, 7 – ring, oval and arch block structures, 8 – levelling point with number, 9 – first class levelling line, 10 – levelling line, 11 – triangular point with number, 12 – triangular line, 13 – number of levelling line

From the analysis of the supportive (triangular) network, identifying the points in the lateral respects, it was established that the measurements performed during the initial stages of its design cannot satisfy the precision needed for determination of the horizontal shifts. Reliable results are possible to be obtained only recently, by the classical universal instruments which determine with great precision the horizontal angles and the distances between the supportive points. In the proposed traverse, points from the available state supportive network are also included [21].

A number of experiments have been made for studying the horizontal shifts by immediate measurements for at least two epochs. One of them is the Chirpan region with measurements in 1921–1935 and 1950, and another one — the Strajitsa region with more than one measurement. Naturally, these preliminary studies, based on information obtained by classic measurements are regarded only as an approximate estimation of the horizontal shifts of the earth's crust in the respective region.

In studying the geodynamic processes along the traverse, data for the seismicity was used, which was obtained by the network of seismologic observatories [22, 23]. Of particular interest for the suggested project are the Plovdiv and the Gorno Oriahovo seismic regions.

The major considerations underlying the suggestion of BALKANPROB are:

1. The chosen polygons cross major thrusts on the territory of Bulgaria, namely: the South-Moesian, Bresnik-Pre Slav, Stara Planina Over-Balkan, and Maritsa ones.

2. The implementation of the project needs minimum finance since all identification works are planned to be carried out by classical technical means or by GPS measurements, if possible.

3. The traverses are outlined in such a way so as to use the available stable references from the state levelling network and the precisely determined triangular points from the supportive network since the measurements made in a particular epoch can be adopted as initial "zero" epochs.

It might be expected that the BALKANPROB project, suggested according to the frame contract, concluded in 1991 between the Space Research Institute at the Bulgarian Academy of Sciences and the Military Topographic Office at the Ministry of Defense of the Republic of Bulgaria will be accomplished successfully since, during the analyses performed with the participation of both institutions, it was decided to perform as well GPS measurements along the traverse with relative error of the order  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  [24].

In the recent years, a number of institutions and private companies in Bulgaria bought some of the most modern and high-precision GPS equipment of the type of "Wild System 200" — 15 pieces, "Trimble" — 6 pieces, etc. These technical means undoubtedly revealed great potentialities for the implementation of diverse scientific and application problems in the field of the study of geodynamic process. This provided grounds for an international team of Bulgarian and German experts to carry out a GPS campaign in 1992 [25] for measurements by the established through the assistance of WTS supportive network of 15 points, covering uniformly the territory of Bulgaria. The aim was to develop a modern supportive network in the country and to reveal prospects for local

geodynamic measurements under the EUREF-BUL'92 project [25]. This was really a very good initiative since it provided the first actual results from GPS measurements under a definite project.

The results from the carried out GPS campaigns were suggested and accomplished not only by the EUREF-BUL'92 project but also by BULREF'93 and BULREF'95. Based on the information obtained by remote sensing aerospace methods about lineaments and ring arch-block structures, unknown so far [26], a supplementation and further development of the above-mentioned projects can be proposed, namely the BALKANPROB project where new supportive points are added. We believe that it will provide for a more detailed study of the velocities of the vertical and horizontal shifts in typical Tectonic regions with clearly outlined thrusts, namely: the Rhodope and the Serbo-Macedonian massives, remote from the Stara Planina segment, large regions of the Moesian platform, the fore-Balkan, the Sredna Gora region, Kraishite and Strandja. In contrast to the prevailing total uplift of the Balkan peninsula, some relatively lowered regions can be outlined, comprising parts of the Moesian platform, the Sredna Gora region and the Eastern Rhodopes.

If the results from this GPS network prove to be reliable, the network will be enlarged to encompass other regions of the Balkan peninsula, accounting for their Tectonic and geodynamic features.

In conclusion, we shall formulate the fundamental scientific problems that we expect to be solved by the accomplishment of the BALKANPROB project:

- identification of the modern mutual shifts of the local and microlocal blocks along the traverse and on the whole territory of Bulgaria and the Balkans, namely: between the heterogeneous geostructural elements on the Balkans — the Dynarides and the Balkanides, the Serbo-Macedonian massif, and the Rhodope massif, delimited from each other by thrust faults;

- study of the neo-Tectonic structures and geodynamic processes on the territory of the Balkans which comprise large areas from the Alpo-Himalayan orogene and the territory of Bulgaria along the traverse crossing successively the Tectonic zones of the Moesian platform, the fore-Balkan, the Sredna Gora region and the Rhodope massif.

- control of the internal stability of the regional and local lithospheric blocks in Bulgaria;

- determination of the peripheral deformations on the territory of Bulgaria, the Serbo-Macedonian and the Rhodope massives, the fore-Balkan, the Sredna Gora region, Kraishite and Strandja;

- contribution to the study of the dynamic processes in the Alpo-Himalayan orogene.

The scientific-application objectives comprise the following problems:

- evaluation of the seismic risk and forecasting of the deep-focus earthquakes, using seismicity's subduction and slip-collision models by empiric kinematic verification;

- determination of the relative shifts of large blocks of the earth's crust in big rift or thrust zones of the orogene belt, of interest to the forecast of low-focus earthquakes, as well as to the design, construction and operation of important engineering equipment.

## References

1. Тотоманов, И., Б. Връбянски. Съвременните вертикални движения на земната кора в България и прилежащите земи. — В: Геодинамика на Балканите, С., ДИ „Техника“, 1980.
2. Георгиев, Н. Възможностите на космическите методи за изследване на динамиката на Евро-Азиатската литосфера. — Списание на БАН, 1988, № 2.
3. Рикитакс, Д. Прогноз землетрясений. М., Мир, 1986.
4. Мардиросян, Г. Екокатастрофи. С., ИК „Ванеса“, 1995.
5. Мардиросян, Г. От Космоса срещу екологичните катастрофи. С., Изд. на БАН, 1993.
6. Reinhart, E., P. Wilson et al. The WEGENER Mediterranean Laser Tracking Project WEGENER-MEDLAS. — CSTG Bulletin Nr. 8: Future Missions, Systems and Projects. Munich, 1985.
7. Totomanov, I., N. Georgiev. Potentialities of the Geodetic Methods and Data for Earthquake Prediction in Bulgaria. — In: XVII Congres de la Federation Internationale des Geometres, Sofia, juin 1983 — Exposes, Papers, Berichte, vol. 10.
8. Georgiev, N., I. Totomanov. Status, prospects and model studies related to the international project IDEAL. — Българско геофизично списание, XII, 1986.
9. Georgiev, N., I. Totomanov. An optimum network of laser satellite observatories of project IDEAL for studying the recent crustal kinematics of the central sector of the Alpid-Himalayan orogenic belt. — In: IUGG XIX General Assembly, Vancouver, Canada, August, 1987.
10. Georgiev, N., I. Totomanov. Comparative analysis of satellite laser positioning within Carpatho-Balkan and Ponto-Caspian regions according to the programme of the international project IDEAL. — Compt. rendus de L'Academie bulgare des Sciences, 41, 1988, No 4.
11. Georgiev, N., I. Totomanov, A. Hadjiyski. Project for investigation on the dynamics of the European-Asian lithosphere IDEAL. — CSTG Bulletin, No 8: Future missions, systems and projects. IAG Commission VIII, Munich, 1985.
12. Георгиев, Н., И. Тотоманов, А. Хаджийски. Некоторые возможности геодезических методов для изучения современной динамики Евро-Азиатской литосферы. XVIII Совещание КАПГ — Симпозиум по комплексу Б „Исследования литосферы“, Сочи, апрель 1985.
13. Georgiev, N., I. Totomanov, A. Hadjiyski. Scientific-experimental programme IDEAL — Objectives, Means and Expected Results. — Висша геодезия, 1986, № 12.
14. Георгиев, Н., И. Тотоманов, А. Хаджийски. Моделни изследвания за регионални геодинамичен проект ИДЕАЛ. — Геодезия, картография, земеустройство, 1986, №6.
15. Тотоманов, И., Н. Георгиев, А. Хаджийски. Оптимизация на лазерната космическа геодезическа мрежа на проекта ИДЕАЛ за изследване на регионалната геодинамика на Балканите. — Геодезия, картография, земеустройство, 1989, №5.
16. Boncev, E., V. Vunc, L. Christoskov et al. A method for compilation of seismic zoning prognostic maps for the territory of Bulgaria. — Geologica Balcanica, 12, 1982, №2, 3—48.
17. Георгиев, Н., Г. Мардиросян, М. Младеновски, Х. Спиридонов. Цели, методи и перспективи при изследване на движението на литосферата на Балканите и България в рамките на ЕВРОПРОБ. — Геодезия, картография, земеустройство, XXXII, 1992, № 1.
18. Georgiev, N., G. Mardirossian, M. Mladenovsky, H. Spiridonov. Space, ground-based and model investigations of lithospheric movements of Balkan peninsula and Bulgaria within the framework of the EUROPROBE project. — Aerospace Research in Bulgaria, 1993, №10, 3—12.
19. Спиридонов, Х., Н. Георгиев. Анализ на дистанционните и земни изследвания на неотектониката и геодинамиката на Мизийската платформа. FIG International Federation of Surveyors — Commission 5 and 6. Sofia, Sept., 1993.
20. Spiridonov, H., N. Georgiev. Observation of the Neotectonics and Geodynamics of Bulgaria Using Remote Sensing Methods and Data. Remote Sensing for Monitoring the Changing Environment of Europe. A. A. Balkema (Rotterdam) Brookfield, Netherlands, 1993.

21. Младеновски, М. Отново върху опорните геодезически и гравиметрични мрежи. — Геодезия, картография, земеустройство, 1990, №3.
22. Mardirossian, G., B. Grigorov. Characteristics of New Seismological Observatories in Bulgaria. — Compt. rend. Acad. Bulg. Sci., 33, 1980, №12, 1643—1646.
23. Самарджиев, Д., Л. Христосков, П. Данев и др. Национална оперативна телеметрична система за сеизмологична информация (НОТССИ). — Бълг. геофиз. сп., VI, 1980, №3.
24. Минчев, М., Т. Таков, П. Гъбенски, Ц. Цолев. GPS-измервания — първи резултати у нас. — Геодезия, картография, земеустройство, 1990, №2.
25. Seeger, H., G. Milev, Y. Altiner, M. Minchev, I. Yovev, N. Ivanov, K. Vassileva. GPS Campaign 1992 in Bulgaria Related to Euref and Local Geodynamics. Първа геодезическа конференция в памет на акад. Вл. Христов, София, окт., 1992.
26. Спиридонов, Х. Кръгови морфоструктури в Средногорието. С., Акад. изд. „Проф. М. Дринов“, 1999.

Received 28.XI.1998

## БАЛКАНПРОБ — космически проект за изследване на динамиката на литосферата на България и Балканите

*Никола Георгиев, Гаро Мардиросян,  
Хернани Спиридонов*

(Резюме)

Съвременното ниво на космическите методи и техническите средства дава големи възможности при изследването на глобалната, регионалната и локалната динамика на литосферните плочи. Геодинамичните процеси са едни от съществените предвестници на природни феномени като земетресения, изригвания на вулкани и др.

На базата на анализа на резултатите и опита от редица регионални и локални геодинамични проекти — и преди всичко на проекта ИДЕАЛ, в статията се мотивират целите, фундаменталните и научно-приложните задачи, очакваните резултати, както и перспективите на предложения проект БАЛКАНПРОБ за територията на България и Балканите с помощта на GPS-измервания.

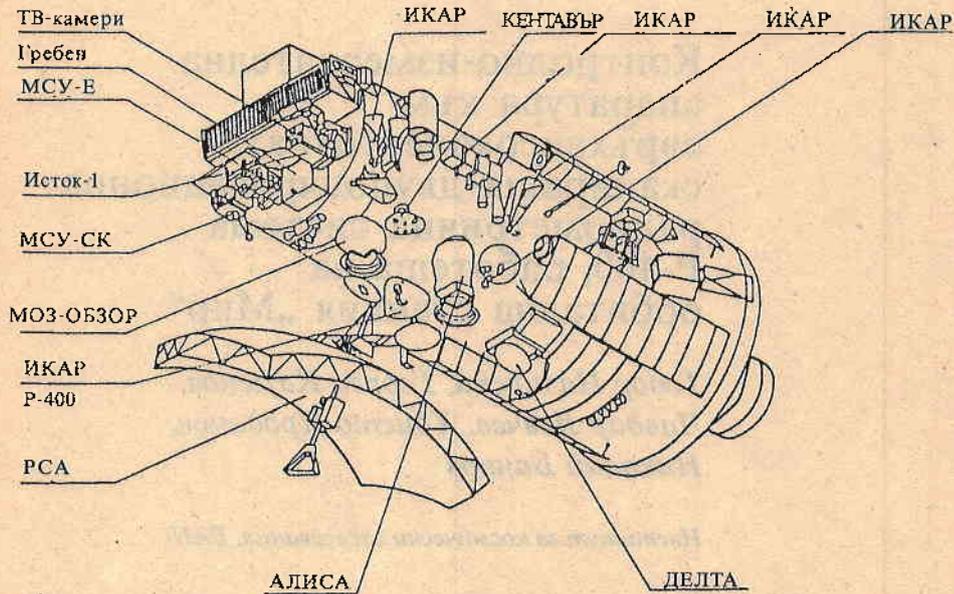
**Контролно-измервателна  
апаратура към  
свръхвисокочестотната  
сканираща двуполяризационна  
радиометрична система  
P-400, работеща на  
орбитална станция „Мир“**

*Тодор Назърски, Георги Каменов,  
Чавдар Левчев, Христо Проданов,  
Николай Банков*

*Институт за космически изследвания, БАН*

В Института за космически изследвания при БАН са получени първите резултати от измервания, проведени с разработената свръхвисокочестотна сканираща двуполяризационна радиометрична система P-400 [1]. Тя е предназначена за измерване на амплитудното и пространственото разпределение на собственото радиотоплинно излъчване на земната повърхност в микровълновия диапазон. Данните, получени от системата, позволяват решаването на следните основни задачи [2]: определяне на температурата на водни басейни, на влажността на повърхностния почвен слой, зоната на валежи, възрастта на ледниците в полярните области, разпределянето на плаващите ледове в полярните райони и т.п. Съвместната обработка на данните от системата P-400 и от другите системи от Комплекса научна апаратура (КНА) „Природа“, позволяват решаването на ред научноприложни задачи, свързани с глобалния екологичен мониторинг на Земята, в това число и за ставащото все по-актуално изучаване на екологичните катастрофи [3, 4]. Системата е част от този уникален комплекс, работещ на орбитална станция „Мир“ за изпълнение на научната програма на проект „Природа“ [5]. В разработката на този най-голям и авторитетен международен проект в областта на

дистанционните изследвания на Земята от Космоса участват учени и специалисти от Армения, България, Германия, Италия, Полша, Русия, САЩ, Украйна, Франция и Швейцария. Специализираният модул „Природа“, на който е монтиран КНА, е изведен в орбита на 24.04.1996 г. и скачен със станцията „Мир“ в началото на май същата година (фиг.1). Модулът включва 17 различни системи за дистанционно изследване на Земята от Космоса във видимия, инфрачервения и в микровълновия диапазон на електромагнитния спектър.



Фиг. 1

За да се гарантира надеждността и нормалната работа на апаратурата в условията на космическото пространство около Земята, в лабораторни условия се провеждат различни изпитания и тестове, доказващи функционалността на системите. Част от тези измервания за системата Р-400 се извършва с автономна контролно-измервателна апаратура (КИА) [6], разработена от екипа – създател на системата.

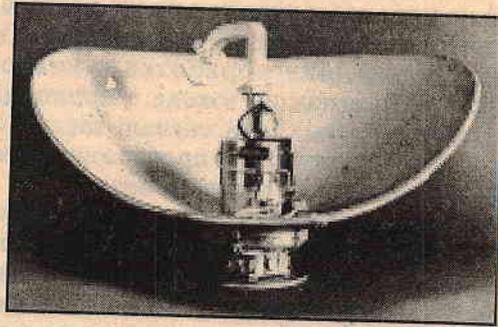
За да се илюстрират функциите и начинът на работа на контролно-измервателната апаратура, е необходимо да се обясни в най-общи линии принципът на действие на радиометричната система Р-400. Тя се състои от:

- блок сканираща двуполяризационна антена;
- блок електроника.

#### I. Блок сканираща двуполяризационна антена

Сканиращата двуполяризационна антена (СА) осъществява реверсивно конично сканиране на диаграмата на насоченост (ДН) за сметка на въртене на облъчвателя на ъгъл  $\varphi = \pm 35^\circ$  с помощта на специален сканиращ електродвигател (СД). За запазване на постоянна

форма на ДН в целия диапазон на сканиране се използва сферично огледало. Превключването на хоризонталната и вертикалната поляризация се осъществява в края на всеки ред от сканирането с помощта на електронен комутатор (ЕК). Блокът е монтиран на външната повърхност на модула „Природа“ и работи в условията на космическото пространство. Общият вид на сканиращата двуполяризационна антена е показан на фиг. 2.

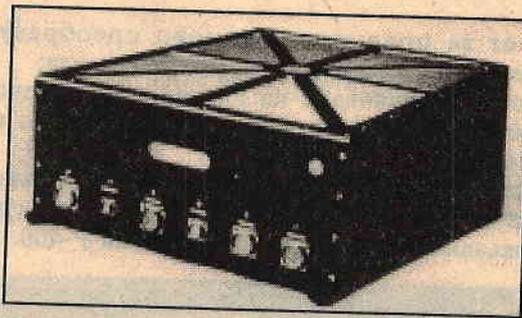


Фиг. 2

По повърхността на СА са разположени пет полупроводникови датчика за измерване на температурата. Измерените температури влизат в алгоритъма за преобразуване на постъпващите от радиометъра данни в съответните физични величини.

### II. Блок електроника

Общият външен вид на блок електроника (БЕ) е показан на фиг. 3. В него се намират всички свръхвисокочестотни и електронни възли на системата.



Фиг. 3

Свръхвисокочестотният сигнал на изхода на сканиращата антена съответства на приетите хоризонтална и вертикална съставяща на измерваното радиотоплинно поле. От БЕ с ниска честота  $F_n$  се модулира измерваният сигнал в ЕК. На входа на радиометричния приемник (БЕ) последователно постъпват приетите от СА хоризонтална и вертикална съставяща на радиотоплинното поле. Те се редуват на всеки 4 s, времето на един скан. В смесителя на приемника се извършва честотно преобразуване на приетите сигнали. После те се усилват по междинна честота, квадратично се детектират и се усилват от предварителен

нискочестотен усилвател. След това сигналите постъпват в нискочестотен блок, където се филтрират синхронно, усилват се и синхронно се детектират. Информационният сигнал на изхода на приемника е пропорционален на хоризонталната и вертикалната съставяща на измерваното радиотоплинно излъчване.

За отчитане на флукуацията на коефициента на усилване на приемника е предвиден еталонен калибровъчен тракт. Сигнал с подходящо ниво от еталонен генератор на шум се модулира с ниска честота  $2F_{\text{н}}$  и се подава на входа на смесителя на приемника, където се извършва честотно преобразуване и по-нататъшна обработка в нискочестотния тракт. Еталонният калибровъчен сигнал на изхода е пропорционален на нивото на еталонния генератор на шум. Този сигнал, заедно с информационния сигнал на изхода, влиза в алгоритъма за преобразуване на постъпващите от радиометъра данни в съответните физични величини.

В БЕ се формира циклограмата на работа на системата Р-400 и командите за управление на сканиращия електродвигател.

БЕ е монтиран в херметизирания модул на станцията „Мир“.

От начина на действие на системата Р-400 се вижда, че КИА трябва да обезпечи проверката на нейната функционалност и да даде възможност за експресна обработка и визуализация на получената информация. В този смисъл КИА Р-400 трябва да осигурява:

— захранващо електрическо напрежение от източник на постоянен ток с номинал 27 V в диапазона от 22 до 34 V;

— формиране и подаване на шумов свръхвисокочестотен сигнал с неравномерно разпределение по ъгъла на сканиране;

— контрол на сигналите, подавани на телеметричната система на космическия носител;

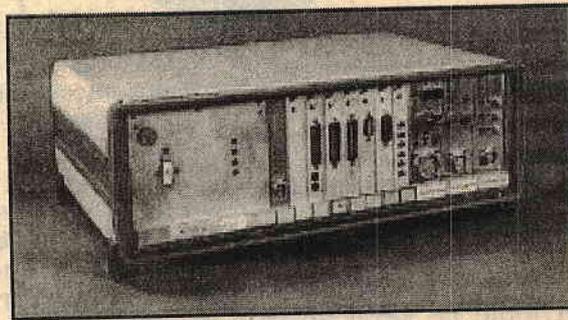
— всички команди, които се подават за управление и сигнализация на системата Р-400;

— възможност за приемане, цифрово преобразуване и запис на информационните и служебните канали на системата;

— възможност за получаване на цветно изображение на монитор на компютър на основни данни, получени в цифров вид от информационните и служебните канали;

— възможност за контрол на служебната информация на системата Р-400, която може да бъде представена в табличен и в графичен вид.

На фиг.4 е показан външният вид на КИА на Р-400.



Фиг. 4

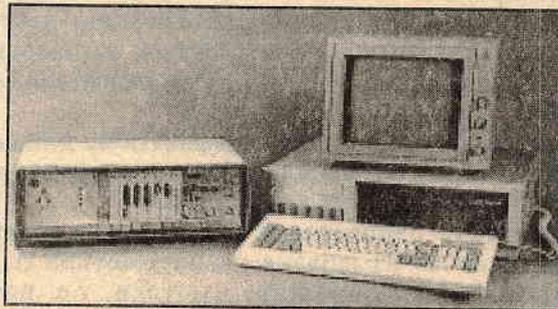
Захранващото напрежение се осигурява от блок захранване (БЗ). На лицевия панел на блока са разположени три бутона за превключване на напреженията 24, 27 и 32 V и три светодиода за индикация на посочените напрежения: жълт — 24 V, зелен — 27 V, и червен — 32 V.

Блокът за управление на двата вторични източника на напрежение (БУН) на системата Р-400 с помощта на два бутона при необходимост превключва този източник, като това се индицира с два светодиода — съответно зелен и червен.

Блокът за телеметричен контрол (БТК) проверява всички данни, транспирани по телеметричния канал на станцията „Мир“. Това са сигналите, получавани от температурните датчици на системата Р-400, състоянието на облъчвателя на АС след подаване от Земята на сигнал за включване на системата за работа и кой от двата вторични токоизточника работи в момента на телеметричния контрол, като първият се индицира със зелен светодиод, а вторият — с червен.

Блокът за имитиране на сигнала (БИС) формира шумов свръх-високочестотен сигнал с неравномерно разпределение на нивото по ъгъла на сканиране, което позволява да се имитира радиотоплинен сигнал.

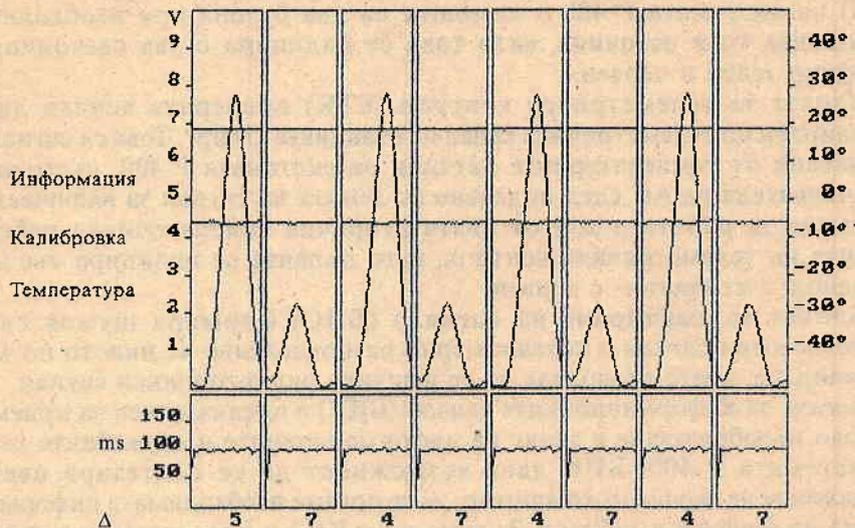
Блокът за информационните канали (БИК) е предназначен за приемане, цифрово преобразуване и запис на информационните и служебните канали на системата Р-400. БИК дава възможност да се синтезира цветово изображение на екрана на компютър, да се покаже необходимата информация във вид на графики и таблици. За тази цел в КИА е предвидена възможност за връзка с компютър и непосредствен запис и обработка на получената информация (фиг.5). Сама за себе си, контролно-измервателната апаратура на системата Р-400 представлява система за събиране на информация и при подходящ софтуер може да бъде използвана и за други цели.



Фиг. 5

На фиг.6 са демонстрирани част от възможностите на КИА на Р-400. На най-горния ред са изписани номерата на поредните сканове, които се сменят на всеки 4s. На втория ред е показан видът поляризация, като условно е прието вертикалната да се отбелязва с 1, а хоризонталната — с 0. На третия ред е изписано времето, необходимо за смяна на посоката на сканиране на облъчвателя (време за реверс). На четвъртия ред е показано времето на всеки скан. На петия ред е изписана температурата на съответните датчици на системата.

Блок №	34	35	36	37	38	39	40	41
H/V	0	1	0	1	0	1	0	1
t реверс	179	192	179	192	178	192	178	191
t h/v	3932	3927	3932	3927	3934	3923	3934	3926
T, °C	18°	17°	39°	17°	17°	20°	18°	17°
ADC	+/-4	+/-5	+/-0	+/-1	+/-2	+/-3	+/-4	+/-5



Фиг. 6

В средната част на фиг.6 графично са показани информационният и калибровъчният сигнал за двете поляризации, а така също и температурата на двигателя на сканиращата антена. В показаната илюстрация се забелязва разлика около 5 V на информационния сигнал между двете поляризации. Нивото на калибровъчния сигнал е права линия, отговаряща на 7 V през цялото време на сканиране, а температурата на двигателя се мени с десети от градуса.

В долната част на фиг.6 е показана графиката на динамичната грешка на двигателя на сканиращата антена или времето между два последователни стробиращи импулса, което трябва да е 100 ms.

За да се контролира работата на сканиращия двигател, в КИА е предвидена възможност за измерване на параметъра  $\Delta$ , който показва абсолютната грешка на стробиращите импулси, т.е. разликата между максималното и минималното време, измерено в рамките на един скан.

Получените резултати от проведените сеанси на орбита показват, че системата Р-400 работи нормално, без отклонение от техническите си параметри и с необходимата точност на измерване, което в голяма степен е резултат и от приетата правилна идеология за разработката на автономната контролно-измервателна апаратура.

Системата Р-400 и нейната контролно-измервателна апаратура са разработени със средства, опуснати от МОНТ — фонд „Научни изследвания — науки за Земята“.

## Литература

1. Nazarsky, T., G. Dimitrov, Ch. Levchev, G. Mardirossian, Hr. Prodanov. Superhighfrequency twopolarization radiometric system "R-400" on board of the "Priroda" module constituting a part of the "Mir" orbital complex. Aerospace Research in Bulgaria, 1994, №11.
2. Сверхвысокочастотная двухполяризационная радиометрическая система Р-400. Техническое описание КИ.К03.001.ТО. ИКИ — БАН, 1993, 6—7.
3. Мардиросян, Г. От Космоса срещу екологичните катастрофи. С., БАН, 1992, 190 с.
4. Mardirossian, G. Aerospace study of some parameters of seismic precursors. — Bulg. Geoph. Journal, XXIII, 1997, №1—2.
5. Международны целевой комплексны проект ПРИРОДА. Научная программа экспериментов. Москва, 1993.
6. Контрольно-испытательная аппаратура сверхвысокочастотной сканирующей двухполяризационной радиометрической системы. Техническое описание КИ.К04.001 ТО и Инструкция по эксплуатации КИ.К04.001 ИЭ. ИКИ—БАН, 1993.

Постъпила на 23.VI.1997г.

### Measurement-control equipment for the superhighfrequency scanning twopolarization radiometric system R-400, working on board of the "Mir" orbital station

*Todor Nazarsky, Georgi Kamenov,  
Chavdar Levchev, Hristo Prodanov,  
Nikolai Bankov*

(Summary)

The paper contains the description of the control-measurement equipment (CME), designed at the Space Research Institute — BAS for the purpose of controlling the operation of the superhighfrequency twopolarization radiometric system R-400, constituting a part of the „Priroda“ scientific equipment complex (SEC), working on board of the „Mir“ orbital station.

## Един метод за локализиране на зони с повишена мощност на компоненти на магнитното поле с честота 8,3 Hz по данни от ИПМП на борда на „ИНТЕРКОСМОС БЪЛГАРИЯ-1300“

*Николай Банков*

*Институт за космически изследвания, БАН*

Повишение на амплитудата на компонентите на вектора на магнитното поле с честота  $f \geq 8\text{Hz}$  по данни от прибора ИПМП са описани в [1], където забелязаните случаи се интерпретират като възможни предвестници на земетресения. Основната теза на цитираната работа е: в йоносферата, на височини 800–900 km над зоната на земетресение, няколко часа до началото и по време на основния тряс, могат да се наблюдават смущения на магнитното поле на въпросните честоти, като размерите на зоната на регистриране на пулсациите е 40–100 km по траекторията на спътника, с максимум на интензивността върху L-обвивката, съответстваща на проекцията на епицентъра на височина 100 km. Пак там са посочени изследвания [2,3], в които подобни данни са интерпретирани като идентификатори на цунами, ядрени взривове, преминаване на тайфуни, торнадо. Значението на тези събития за съдбата на определени райони и тяхното население естествено повишава интереса към подобен род изследвания, независимо от това каква е вероятността на възможността за използване на наблюдаваните ефекти като средство за йоносферен мониторинг на сеизмичната активност. В този смисъл интерес представляват и опитите да се използват различни алгоритми за обработка на информацията от прибора с надежда за евентуално прецизиране на резултатите и предоставяне на по-добри възможности и основания за интерпретирането им, каквато е целта на тази работа.

Естествено е за онагледяване на предлаганите тук методи за обработка да се използва същата първична информация, т.е.  $V_x$  и  $V_y$  компонентите на

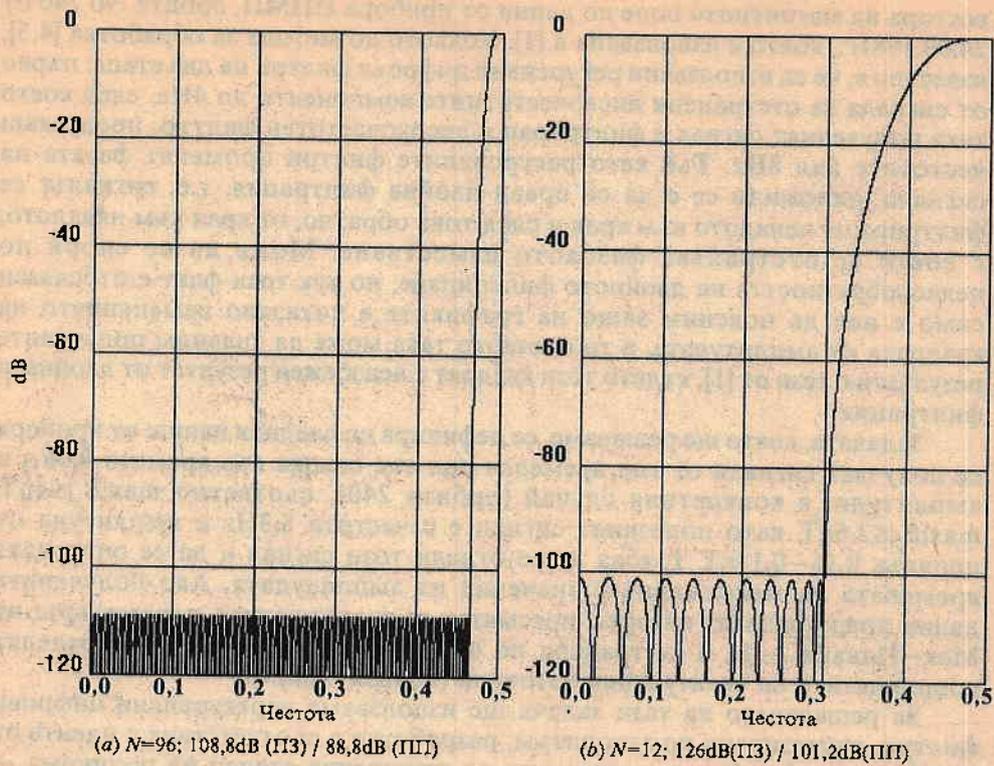
вектора на магнитното поле по данни от прибора ИПМП, орбита No 240 от 24.08.1981г., която е използвана в [1]. Колкото до метода за обработка [4,5], известно е, че са използвани рекурсивни цифрови филтри на два етапа: първо от сигнала са отстранени нискочестотните компоненти до 4Hz, след което така полученият сигнал е филтриран с високочестотен филтър, пропускащ честотите над 8Hz. Тъй като рекурсивните филтри променят фазата на сигнала, наложило се е да се прави двойна филтрация, т.е. сигналът се филтрира от началото към края и след това обратно, от края към началото, с което се отстранява фазовото изместване. Може да се спори по целесъобразността на двойното филтриране, но тук този факт е отбелязан само с цел да поясним защо на графиките е показано изменението на квадрата от амплитудата, а то е защото така може да сравним получените резултати с тези от [1], където този квадрат е неизбежен резултат от двойната филтрация.

Задачата, която ще решаваме, се дефинира по следния начин: от прибора се получават сигнали от тип временен ред със стъпка във времето 0,06 s и амплитуди, в конкретния случай (орбита 240), съответно  $\max\{B_x\} \leq 4nT$ ,  $\max\{B_y\} \leq 2.6nT$ , като полезният сигнал е с честота 8,3Hz и амплитуда от порядък 0,16—0,18nT. Трябва да се отдели този сигнал и да се определят времената на максималните значения на амплитудата. Ако получените данни представляват интерес, пресмятат се координатите, параметърът на Мак—Илвайн — L, и се трасира по силовата линия, за да се определят координатите на евентуалния източник (еписцентъра).

За решаването на тази задача ще използваме нерекурсивни цифрови филтри, синтезирани по алгоритъм, разработен в съответствие с идеите от [6]. Този тип филтри са оптимални по отношение степен на полинома — грешка от апроксимация на честотната характеристика. Освен това, процедурата за пресмятане позволява използването на теглова функция, посредством която може да се получи предварително зададено съотношение между точността в полосите на пропускане и задържане, без да се нарушава линейността (фиг.1).

Възможността да управляваме точността в отделните полоси ни позволява да компенсирате разликата в амплитудите на основния и полезния сигнал, тъй като широчината на полосата на пропускане, в която искаме по-добро приближение, е съществено по-малка от тази на полосата на задържане, в резултат на което се получават незначителни загуби на точност в последната. Например на фиг.1b е показана фазо-честотната характеристика на филтър, за който грешката от апроксимация на предавателната функция в [0,48; 0,50]-пропускане е 25 пъти по-малка от тази в [0,0; 0,3]-задържане. Ако бяхме поискали еднакви тегла в двете полоси, то в полосата на задържане щяхме да спечелим само 0,5dB. Въздействието на показаните на фиг.1 филтри върху сигнала ще бъде показано по-долу, а тук се демонстрира преди всичко абсолютната линейност на характеристиката, т.е. отсъствие на ефекта на Гибс, което е трудно постижимо при алгоритми за синтез на филтри с използване на прозорци.

Преди да продължим, да обърнем внимание на една важна особеност на данните за конкретната орбита. В резултат от работата на друг прибор,

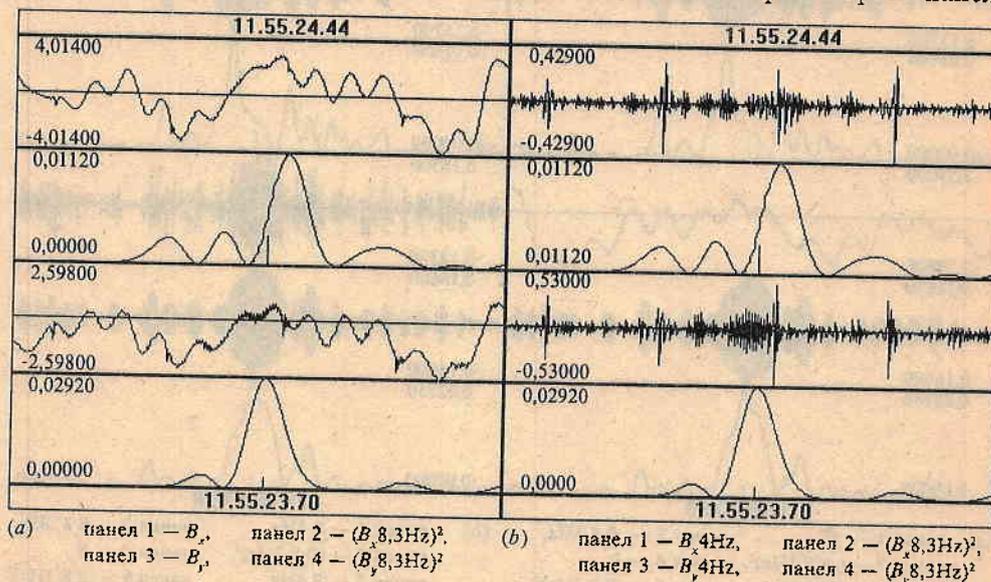


Фиг. 1

върху първичния сигнал, на интервали от  $\approx 4,50$  s, се наслагват импулси с продължителност един-два отчета и амплитуда около  $0,5nT$ , т.е. превишаващи полезния сигнал около три пъти. В [1], както лесно се установява визуално, нивото на тези смущения е намалено на  $0,25nT$ . Един неприятен резултат от наличието на такива импулси или остатъци от тях е евентуалното изместване на максимума на амплитудата или появата на фалшив максимум в полезния сигнал. В работата, която цитираме, въпросът за съществуването на разлики във времената на максимумите (които не са посочени директно) не се коментира, като отсъствието на такава разлика по-скоро се подразбира, тъй като в явен вид противното не се твърди. Но разминаването в двата максимума лесно се забелязва при едно повнимателно изучаване на графиките на  $B_x$  и  $B_y$ . Естествено е да предположим, че коментар за разминаване на въпросните максимуми няма, тъй като такова не е установено, което пък е следствие от влиянието на паразитния сигнал, недостатъчно добре почистен. Още повече, че импулс на паразитния сигнал ( $UT=11.55.24.36$ ), както ще се убедим по-долу, попада между максимумите и вероятно ги променя.

Филтри, устойчиви на смущения от описания тип, в смисъл на стабилно определяне на координатите във времето на максимумите на амплитудата на полезния сигнал, може да се синтезират по използвания алгоритъм (напр.

филтъра от фиг. 1а е такъв), но тази възможност не омаловажава въпроса за отстраняване на шума от първичния сигнал. Тук се предлага едно решение на този проблем, но преди това да отбележим, следвайки желанието за сравнение на резултатите, че паралелно с представянето на предлаганите методи за обработка на изходния сигнал ще покажем и тяхното въздействие върху сигнал, от който са отстранени честотите под 4Hz. Резултатът от такава филтрация на първичния сигнал е показан на фиг. 2b, в първи и трети панел.

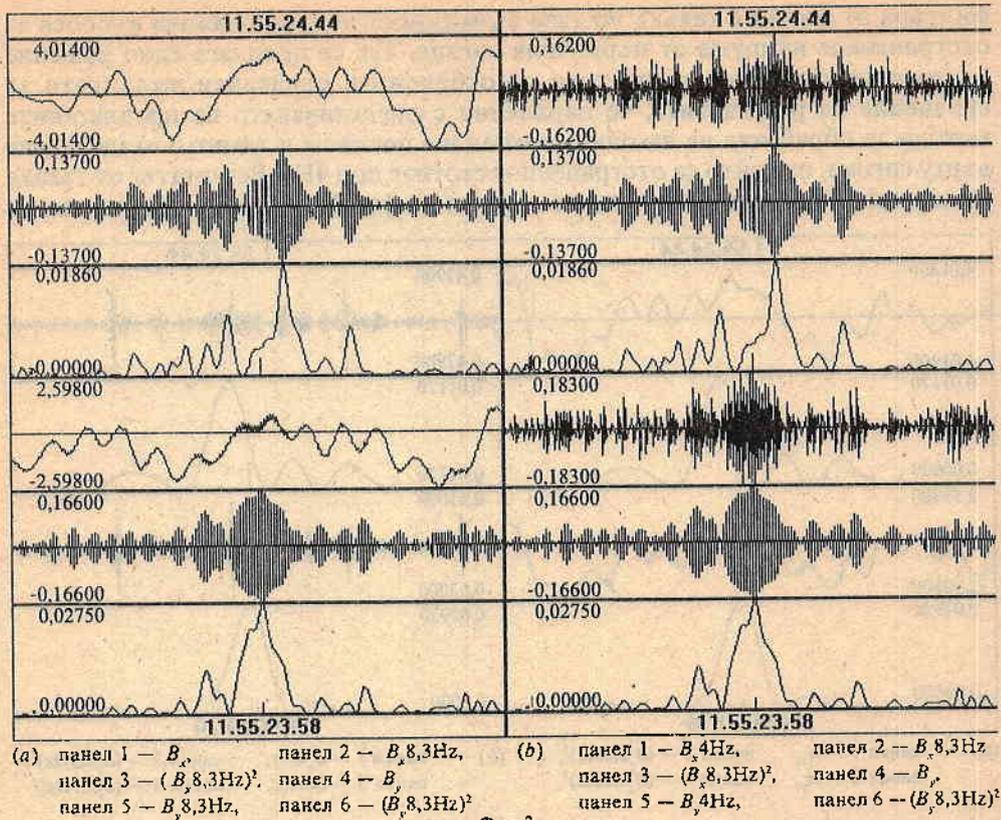


Фиг. 2

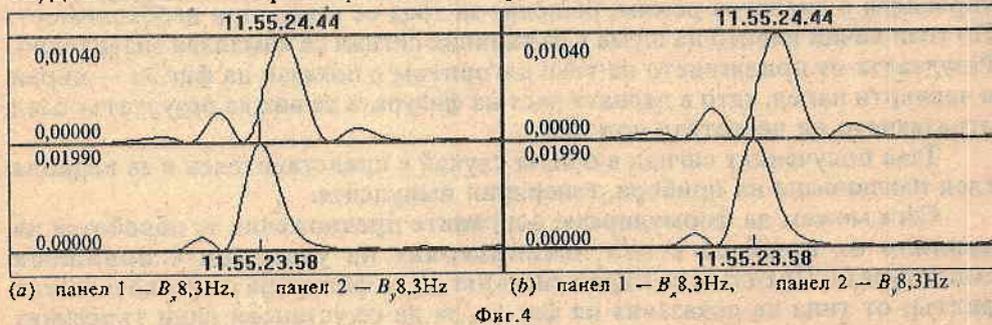
Веднага се вижда, че локализирането на екстремалните стойности на сигнала не е проблем. Знаейки позицията на импулса (точка с номер  $i_0$ ), върху основния сигнал прилагаме следната процедура: избираме няколко точки от някаква симетрична околност (с дължина  $n$ ) на въпросния импулс, в която апроксимираме сигнала с функция от вида  $f(x_i) = a + bx_i + cx_i^2 + d(-1)^i$ ,  $i = i_0 - n, i_0 + n$ ,  $i \neq i_0$ , след което зашуменото значение се заменя с изчислено по формулата. Естествено, може да се наложи да се елиминират повече от една точки, но тъй като този процес се управлява в диалогов режим, решение за това се взема при необходимост. По този начин нивото на шума в първичния сигнал се намалява значително. Резултатът от прилагането на този алгоритъм е показан на фиг. 3а — първи и четвърти панел, като в дясната част на фигурата се вижда резултатът след отрязването на честотите под 4Hz.

Така полученият сигнал в общия случай е представителен и за периода след изключване на прибора, генерирал импулсите.

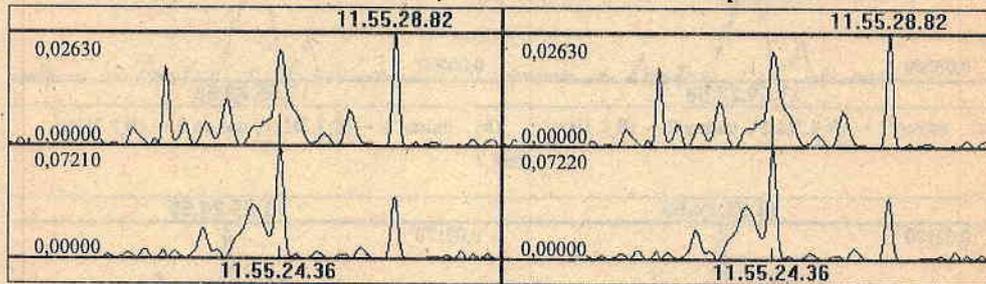
Сега можем да формулираме основните предложения за обработка на данните от прибора с цел локализиране на участъци с повишена амплитудата. Предлага се първо сигналът да се филтрира с високочестотен филтър от типа на показания на фиг. 1а, за да се установи дали търсеният



ефект съществува. Този филтър е с голяма дължина (96 елемента), така че практически покрива с излишък предполагаемата максимална дължина на зона с повишение на сигнала. Дължината предопределя едно значително изглаждане на сигнала на изхода на филтъра, но съчетано с устойчиво определяне на максимума, което е целта ни. На фиг. 4 е показан резултатът при филтриране на незашумения сигнал от фиг. 3. Лесно се вижда, сравнявайки фиг. 2 с фиг. 4, че разликите във времената на максималните значения на сигнала са незначителни. Да отбележим, че поради гладкостта си, данните от този филтър са малко пригодни за физическа интерпретация.



За получаване на данни, използвани за изследване на причините за наблюдавания ефект, е по-добре да се филтрира с филтър от типа на показания на фиг.1b. Този филтър е с малка дължина (12 елемента), достатъчно добре възстановява реалното поведение на сигнала и, при незапумен първичен сигнал, може да се използва самостоятелно. Резултатът от филтриране на първичния сигнал е показан на фиг.3. В същото време, използването на този филтър за непочистени от шум данни (виж фиг.2), води до определяне на фалшиви максимуми, което е показано на фиг.5. Вижда се, особено в случая на  $B_x$  компонентата, че максимумът се е изместил и съвпада с позицията на импулса — шум, за който стана дума по-горе, докато при  $B_y$  компонентата този максимум се е изместил на указаните вече 4,50 s приблизително.



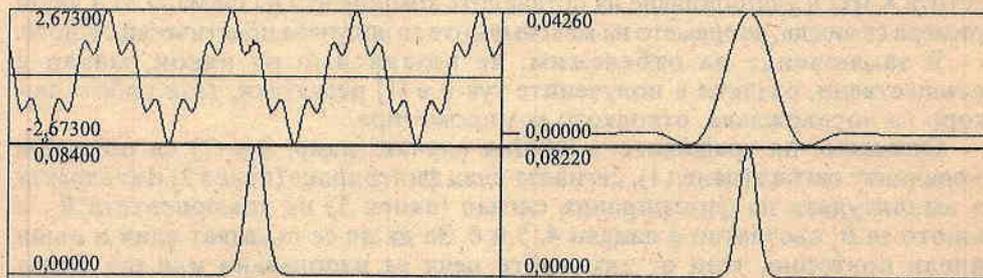
(а) панел 1 —  $(B_x, 8,3\text{Hz})^2$ , панел 2 —  $(B_y, 8,3\text{Hz})^2$  (б) панел 1 —  $(B_x, 8,3\text{Hz})^2$ , панел 2 —  $(B_y, 8,3\text{Hz})^2$   
Фиг.5

За контрол на качеството на възпроизвеждане на полезния сигнал е използван методът на изчислителния експеримент, т.е. генериран е временен ред с амплитуди и честоти, приблизително еднакви с тези на полезния и носещия сигнал. За целта използваме формулата

$$y_i = c_1 \cos(f_1 i) + c_2 \cos(f_2 i) + c_3 \cos(f_3 i) \left[ \exp\left(-\frac{(i-i_0)^2}{sf}\right) + 0,05 \right],$$

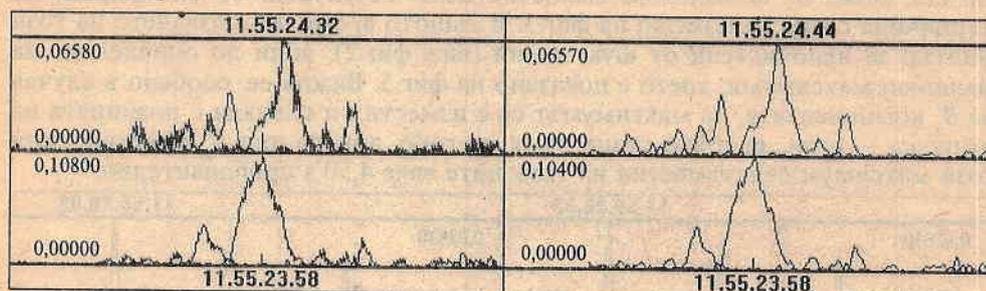
където  $c_1=2$ ,  $c_2=c_1/3$ ,  $c_3=c_1/25$ ,  $f_1=\pi/40$ ,  $f_2=\pi/8$ ,  $f_3=\pi$ ,  $i=i_0-n, \dots, i_0+n$ ,  $sf$  — управлява широчината на камбаната, в случая  $sf=45$ .

Резултатите от филтрирането на този сигнал с филтрите от фиг.1, (а и б) е показан на фиг.6 — дясно. Очевидно филтърът от (б) възпроизвежда полезния сигнал от моделния експеримент достатъчно точно (грешка около 2% в максималното значение), както се твърдеше.



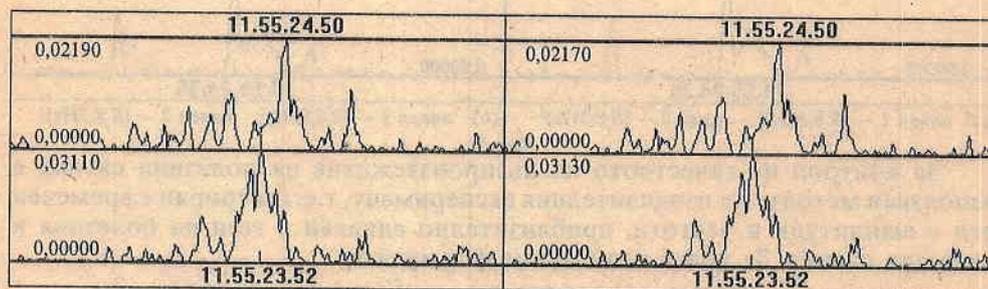
(а) панел 1 —  $y$ , панел 2 — полезен сигнал (б) панел 1 — филтър а, панел 2 — филтър б  
Фиг.6

Накрая може да сравним ефикасността на предлаганите средства с някои традиционни такива, например с алгоритъм на базата на плаващо БПФ, както и с някой по-екзотичен метод, какъвто е методът за изглаждане с квазиполиноми [7]. Резултатите от прилагането на тези методи са показани на фиг.7 и фиг.8, съответно.



(a) панел 1 —  $(B_x 8,3\text{Hz})^2$ , панел 2 —  $(B_y 8,3\text{Hz})^2$  (b) панел 1 —  $(B_x 8,3\text{Hz})^2$ , панел 2 —  $(B_y 8,3\text{Hz})^2$

Фиг.7



(a) панел 1 —  $(B_x 8,3\text{Hz})^2$ , панел 2 —  $(B_y 8,3\text{Hz})^2$  (b) панел 1 —  $(B_x 8,3\text{Hz})^2$ , панел 2 —  $(B_y 8,3\text{Hz})^2$

Фиг.8

Тук е показан резултатът от използване на плаващо БПФ по 17 точки, като на всеки панел са показани две спектрални компоненти — на най-високата и на съседната и честота, която по амплитуда е 30—40 пъти по слаба (което би трябвало да бъде нивото на естествения фон), поради което почти не се забелязва.

На фиг.8 е показан резултатът от изглаждане на сигнала с квазиполином от вида  $l_k(t) = t^{n_k} (\cos \zeta_k t + i \sin \zeta_k t) e^{i\omega_k t}$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ , в режим на запазване на честота 8,3Hz и унищожаване на останалите компоненти на сигнала. И в двата примера се вижда, че времето на максимумите се получава практически същото.

В заключение да отбележим, че независимо от някои, макар и несъществени, разлики в получените тук и в [1] резултати, тази работа по-скоро ги потвърждава, отколкото компрометира.

Описание на графиките: в общия случай (напр. фиг.3) са показани първичният сигнал (панел 1), сигналът след филтриране (панел 2) и квадратът на амплитудата на филтрирания сигнал (панел 3) на компонентата  $B_x$ , и същото за  $B_y$ , съответно в панели 4, 5 и 6. За да не се показват едни и същи панели повторно, тези от тях, които вече са използвани или ще бъдат показани на по-подходящо място, са пропуснати, като под съответната графика е посочено кои от описаните по-горе панели са показани.

## Литература

1. Бяличевко, С.В., А.Инцин, Э.Ким, О.Похотелов, П.Пуцаев, Г.Станев, А.Стрельцов, В.Чмырев. УНЧ-отклик ионосферы на процессы подготовки землетрясений. — ДАН СССР 311, 1990, №5, 1077—1081.
2. Щепетнов, Р.В., В.А.Троицкая, Б.В.Довбня. ДАН СССР, 290, 1986, №3, 582—585.
3. Jacobson, A.R., R.C. Jarlos. Preprint Los Alamos Nat. Lab., 1987, vol. LA-CP-87-89.
4. Инцин, А.С., А.В.Стрельцов. Кратковременный спектральный анализ спутниковых ОНЧ измерений над сейсмоактивными районами. Препр. №73(689), ИЗМИРР АН СССР, 1986.
5. Ларкина, В.И., В.В.Мигулин, О.А.Молчанов, В.Б.Шевцова, А.С.Инцин, И.А.Пименов, И.П.Харьков. Статистические особенности возбуждения низкочастотных излучений в верхней ионосфере над районами землетрясений. Препр. № 16(705), ИЗМИРР АН СССР, 1987.
6. Bankov, N.V. Hausdorff polynomials and digital filter design. — Comp. Rep. de l'Acad. Bul. des Sciences, 33, 1980, №3, 301—304.
7. Василенко, В.А., М.В.Зюзин. О применении осредняющих функций в задачах обработки экспериментальных данных. Препр. № 59 СО АН СССР, Новосибирск, 1979.

Поступила на 27.1.1998г.

A method to localize the zones whit  
upraised amplitude of the components of  
magnetic field at a frequency of 8.3Hz,  
measured by IPMP on board of  
“INTERCOSMOS BULGARIA 1300”

*Nikolai Bankov*

(Summary)

In this work a method for processing of the data, detected on board of the satellite “IKB-1300” by IPMP, when the amplitude of 8.3Hz's component of the signal is rising up, recognized by some authors [1] as possible evidence of earthquakes, is considered. Some special types of digital filters, optimal by means of “order of polynomial / error of the approximation” ratio, were used to separate the corresponding frequencies from the measured magnetic field components.

## Ректификация на геометричните деформации при космическите сканерни изображения чрез апроксимиращи функции

*Никола Георгиев, Румен Недков*

*Институт за космически изследвания, БАН*

### 1. Въведение

Геометричните деформации при космическите сканерни изображения са един от най-съществените въпроси и отстраняването им е извънредно актуален и сложен процес. Те са функция на редица фактори [1–6], а именно:

— космическите летателни апарати (КЛА), носители на сканерната апаратура, се движат с големи скорости по дадена орбита. Освен това Земята има голямо околоосно въртене, поради което може да се получат застъпвания или прекъсване на изображенията;

— голямата височина на космическите носители над Земята и дребният мащаб на изображенията са причина за обхващането на големи области от Земята;

— кривината на Земята е един от факторите, оказващи влияние върху деформациите при сканерните изображения;

— значителните геометрични деформации се дължат на стабилизацията на носителя, големите ъгли на наклон на апаратурата, нецентричността на сканираното изображение и др.

Интерпретационната обработка на снимките, получени от космическите носители, зависи от точността, разделителната възможност на изображението и целите на използването им. В редица случаи, при които се изисква малка точност, може да се ползват коригирани изображения с приблизителни параметри [2,9,10]. Но сега, когато разделителната възможност на сканерните изображения стана изключително висока и достига 0,8–1,5 mm при панохроматичния и 3–5 mm при мултиспектралния режим, точности близки до самолетните снимки, налага се ректификацията на геометричните деформации да се увеличи многократно.

В настоящия етап изображенията на земната повърхност се реализират по два начина: със сканерни изображения в оптичния диапазон на електромагнитния спектър и чрез ортофотоизображения с фотокамери от типа на КВР-1000 с фокусно разстояние 1000 mm, КТ-350 с фокусно разстояние 350 mm и други камери [7]. Първите изображения са централна проекция с подвижен проекционен център  $S$ , а ортофотоизображенията са централна проекция с неподвижен оптичен център. Трябва да се има предвид, че при сканерните изображения геометричните деформации са функция освен на всички фактори, които оказват влияние при ортофотоизображенията, но и съществено зависят от подвижния проекционен център, водещ също до специфични и значителни геометрични деформации. По наше виждане, това налага да се използват конкретните методи за ректификацията на тези два вида изображения, които трябва да се разглеждат като:

- дистанционни сканерни изображения и
- космически ортофотоизображения.

## 2. Използване на апроксимиращи полиноми при коригиране на геометричните деформации

Ще разгледаме използването на апроксимиращи полиноми, които и понастоящем намират големи приложения при ректификацията на геометричните деформации при космическите сканерни изображения [1,3-5,11,12].

Ще приемем, че разполагаме със сканерно изображение със запис на яркост  $F_p(X_p, Y_p)$  на магнитна лента на неголеми области от земната повърхност (пиксели), подредени в матрица с редове и стълбове. Тук няма да бъде предмет на разглеждане възстановяването на изображението, при което са необходими отчети с достатъчна честота и съответно реализирането на възстановяващите филтри. Ще разгледаме математическата обосновка за възстановяването на геометричните качества и съответно привързването на изображението към земната повърхност. Този проблем може да се разреши като се използват два модела: двумерни (равнинни) и пространствени. При равнинния модел на пиксела  $P(x,y)$  от сканерното изображение съответства идентична точка  $P(X,Y)$  от проекционната равнина и обратното, при което  $X$  и  $Y$  са правоъгълните координати в съответната картографска проекция. При пространствения модел на пиксела  $P(x,y)$  съответства точка от повърхността на референтния елипсоид  $P(X_p, Y_p, Z_p)$ , за който след това се намира съответната точка в проекционната равнина. Пространствените модели са предмет на анализи и теоретични доказателства в [1,3,4,6] и др., където са разгледани възможностите за определяне зависимостта между положението на космическия посетел, ориентацията на апаратурата, регистрирането на пикселите и координатите на точките от земната повърхност в пространствена декартова координатна система. Ще отбележим, че при всички тези модели до преди 3-4 години и най-вече при равнинните модели не са определяни елипсоидните височини, а положението на точката се свързва със съответната точка от повърхността на елипсоида [3]. Това се е диктувало от факта, че при космическите изображения, тези деформации са пренебрежимо малки в сравнение с

аерокосмическите, както се отбелязва и в [10]. При аерофотоснимката с височина на летене  $H=5\text{ km}$  в края на снимката с формат  $18\text{ cm} \times 18\text{ cm}$  и височина на терена  $h=100\text{ m}$  изместването е  $2\text{ mm}$ , при  $h=1000\text{ m}$  е  $2\text{ cm}$ . При космическите фотоснимки, направени от  $H=200\text{ km}$ , тези деформации са 40 пъти по-малки, т.е. за превисение  $h=200\text{ m}$  имаме  $0,05\text{ mm}$ , а за  $h=1000\text{ m}$  —  $0,5\text{ mm}$ .

По-долу ще дадем резултатите от изследванията, които се проведеха за коригирането на геометричните деформации и привързването на дистанционните изображения към картната проекция при равнинния модел [1,5,12]. В качеството на апроксимиращи функции обикновено се използват степенни редове, интерполационни формули, сплайн-функции и други [1,5,11,12].

Тук ще използваме полиноми по степените на двете променливи  $x$  и  $y$ , а именно:

$$(1) \quad \begin{aligned} X_j &= a_0 + a_1 x_j + a_2 y_j + \dots + a_{27} y_j^6, \\ Y_j &= b_0 + b_1 x_j + b_2 y_j + \dots + b_{27} y_j^6, \end{aligned}$$

където  $j = 1, 2, \dots, n$  е броят на идентифицираните точки,  $x_j, y_j$  са координатите на пиксела в деформируемото изображение,  $X_j, Y_j$  са координатите на съответната точка от проекционната (картна) равнина,  $a_i$  и  $b_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, 27$ ) се получават с помощта на съответните идентифицирани опорни точки от картата. Обикновено броят на идентичните точки е по-голям от параметрите на приетия модел и определянето на неизвестните  $a_i$  и  $b_i$  се извършва чрез изравнение по метода на най-малките квадрати (МНК), при което има възможност за бракуване на грешните данни и съответно оценка на определяемите параметри.

Ще отбележим, че точността на идентифицираните опорни точки от картната равнина зависи от: мащаба, картографската проекция, деформируемостта на картния лист, средствата и методите за отчитане на координатите и др.

За да се избегнат затрудненията от изчислителен характер при определяне на коефициентите  $a_i$  и  $b_i$ , т.е. да се работи с по-малки стойности на координатните разлики, е подходящо да се използва методът от астрометрията, явяващ се много подходящ при такива изчисления и особено когато се налага да се използва част от изображението. В случая се приемат равнинните координатни системи  $x, y$  и  $X, Y$ , които да съвпадат с центъра на тежестта на избраните опорни точки и се изменят в интервала  $[-1, 1]$ . Нека  $(G'_x, G'_y)$  и  $(G_x, G_y)$  са координатите на центъра на тежестта на избраната конфигурация от опорни точки, които са определени по изразите

$$(2) \quad \begin{aligned} G'_x &= \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} & G_x &= \frac{\sum_{j=1}^n X_j}{n} \\ G'_y &= \frac{\sum_{j=1}^n y_j}{n} & G_y &= \frac{\sum_{j=1}^n Y_j}{n} \end{aligned}$$

След трансляцията на координатните системи  $X, Y$  и  $x, y$  в центъра на тежестта, чието начало се дава с (2) се получават новите стойности на координатите

$$(3) \quad \begin{aligned} x'_j &= x_j - G'_x & X'_j &= X_j - G_X \\ y'_j &= y_j - G'_y & Y'_j &= Y_j - G_Y \end{aligned}$$

Избират се още мащабиращи множители, които да са обратно пропорционални на координатите на опорните точки, имащи максимални стойности:

$$(4) \quad M'_{xy} = \frac{1}{\max_j (x'_j, y'_j)}, \quad M'_{XY} = \frac{1}{\max_j (X'_j, Y'_j)}$$

Ако значенията  $X'_j, Y'_j$  и  $x'_j, y'_j$  са от еднакъв порядък, то може да приемем, че  $M'_{xy} = M'_{XY} = M$ .

Прилагайки трансформацията (3) за (1) се получава

$$(5) \quad \begin{aligned} \bar{X}_j &= a_0 + a_1 \bar{x}_j + a_2 \bar{y}_j + \dots + a_{27} \bar{y}_j^6, \\ \bar{Y}_j &= b_0 + b_1 \bar{x}_j + b_2 \bar{y}_j + \dots + b_{27} \bar{y}_j^6, \end{aligned}$$

където

$$(6) \quad \begin{aligned} \bar{X}_j &= MX'_j & \bar{x}_j &= Mx'_j \\ \bar{Y}_j &= MY'_j & \bar{y}_j &= My'_j \end{aligned}$$

За определяне на коефициентите  $a$ , и  $b$ , е използван апроксимационният метод по МНМК посредством координатите  $\bar{x}_j, \bar{y}_j$  на идентифицираните опорни точки от изображението, а координатите  $X'_j, Y'_j$ , определени от картата, се приемат за твърди точки. Нека означим координатите на опорните точки от картата с:

$$(7) \quad \begin{aligned} \bar{X}_j &= (\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_{n-1}, \bar{X}_n)^T, \\ \bar{Y}_j &= (\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \dots, \bar{Y}_{n-1}, \bar{Y}_n)^T, \end{aligned}$$

а координатите от деформираното изображение с:

$$(8) \quad \begin{aligned} \bar{x}_j &= (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{n-1}, \bar{x}_n)^T, \\ \bar{y}_j &= (\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_{n-1}, \bar{y}_n)^T. \end{aligned}$$

Уравненията на поправките имат вида

$$(9) \quad \begin{aligned} \bar{x}_j + V_{\bar{x}_j} &= A_{ij} \bar{a}_i, \\ \bar{y}_j + V_{\bar{y}_j} &= A_{ij} \bar{b}_i, \end{aligned}$$

където

$$(10) \quad \begin{aligned} \bar{a}_i &= (\bar{a}_0, \bar{a}_1, \dots, \bar{a}_{27})^T, \\ \bar{b}_i &= (\bar{b}_0, \bar{b}_1, \dots, \bar{b}_{27})^T, \\ \bar{V}_{\bar{x}_j} &= (\bar{V}_{\bar{x}_1}, \bar{V}_{\bar{x}_2}, \dots, \bar{V}_{\bar{x}_{27}})^T, \\ \bar{V}_{\bar{y}_j} &= (\bar{V}_{\bar{y}_1}, \bar{V}_{\bar{y}_2}, \dots, \bar{V}_{\bar{y}_{27}})^T. \end{aligned}$$

Матрицата  $A$  в (9) има вида

$$(11) \quad A_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & \bar{X}_{1j} & \bar{Y}_{1j} & \bar{X}_{1j}^2 & \bar{X}_{1j}\bar{Y}_{1j} & \dots & \bar{Y}_{1j}^6 \\ 1 & \bar{X}_{2j} & \bar{Y}_{2j} & \bar{X}_{2j}^2 & \bar{X}_{2j}\bar{Y}_{2j} & \dots & \bar{Y}_{2j}^6 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \bar{X}_{nj} & \bar{Y}_{nj} & \bar{X}_{nj}^2 & \bar{X}_{nj}\bar{Y}_{nj} & \dots & \bar{Y}_{nj}^6 \end{bmatrix}.$$

За векторите  $a$  и  $b$  са в сила уравненията

$$(12) \quad \begin{aligned} (A^T P_x A) \bar{a} &= A^T P_x \bar{X}, \\ (A^T P_y A) \bar{b} &= A^T P_y \bar{Y}. \end{aligned}$$

В случая трябва да се приеме, че координатите на определените опорни точки са с еднакви тежести. Следователно тежестната матрица  $P$  е единична:

$$(13) \quad P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

в резултат от (12) се получава за  $a_i$  и  $b_i$  изразът:

$$(14) \quad \begin{aligned} \bar{a} &= (A^T P_x A)^{-1} (A^T P_x \bar{X}), \\ \bar{b} &= (A^T P_y A)^{-1} (A^T P_y \bar{Y}). \end{aligned}$$

Средните квадратични грешки  $m_{\bar{a}_i}$  и  $m_{\bar{b}_i}$ , с които са определени коефициентите  $a_i$  и  $b_i$  се дават с формулите

$$(15) \quad \begin{aligned} m_{\bar{a}_i} &= \mu_{\bar{x}}^2 q_{ij}, \\ m_{\bar{b}_i} &= \mu_{\bar{y}}^2 q_{ij}, \end{aligned}$$

където  $\mu_{\bar{x}}$  и  $\mu_{\bar{y}}$  са средните квадратични грешки за единица тежест:

$$(16) \quad \begin{aligned} \mu_{\bar{x}}^2 &= V_{\bar{x}}^T P V_{\bar{x}} \frac{1}{n-k}, \\ \mu_{\bar{y}}^2 &= V_{\bar{y}}^T P V_{\bar{y}} \frac{1}{n-k}, \\ q_{ij} &= (A^T P A)^{-1}, \end{aligned}$$

където  $n$  е броят точки,  $k$  — броят на коефициентите, а  $q_{ij}$  е матрицата на диагоналните елементи на  $(A^T P A)^{-1}$ .

Ако определените по (12) средни квадратни грешки са по-големи от коефициентите  $a_i$  и  $b_i$ , определени от (14), е целесъобразно да се проведе още ново изравнение за определяне на коефициентите, докато се удовлетворят условията

$$(17) \quad \begin{aligned} m_{\bar{a}_i} &\leq \chi |\bar{a}_i|, \\ m_{\bar{b}_i} &\leq \chi |\bar{b}_i|. \end{aligned}$$

$\chi$  е множител, с чиято помощ се определят коефициентите, които имат стойности, по-големи от средните квадратични грешки (12). Препоръчва се  $> 2$ .

Голямото число на неизвестните (до 28) обикновено води до лоша обусловеност на матрицата. За оценка на избора на максималното число коефициенти е подходящо да се използва числото на Тод [12]

$$(18) \quad T = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}},$$

където  $\lambda_{\max}$  и  $\lambda_{\min}$  са максималното и минималното характеристично число на нормалната матрица.

За определянето на оптималните числа на членовете в полинома (5) се изчисляват разликите  $\Delta X_k$  и  $\Delta Y_k$  за достатъчно контролни точки, които са разположени върху изображението, а именно:

$$(19) \quad \begin{aligned} \Delta \bar{X}_k &= \bar{X}_k - \bar{x}_k, \\ \Delta \bar{Y}_k &= \bar{Y}_k - \bar{y}_k, \end{aligned}$$

където  $\bar{x}_k$  и  $\bar{y}_k$  са координатите на контролните точки в изходното сканерно изображение,  $\bar{X}_k$  и  $\bar{Y}_k$  са картните координати,  $n$  е броят на контролните точки. За избор на оптималния брой членове в полинома е подходящо да се използват средноквадратичните отклонения за  $\Delta X$  и  $\Delta Y$  на контролните точки:

$$(20) \quad \begin{aligned} \Delta \bar{X}_k &= \left( \sum^k \frac{\Delta \bar{X}_k}{N_k} \right)^{\frac{1}{2}}, \\ \Delta \bar{Y}_k &= \left( \sum^k \frac{\Delta \bar{Y}_k}{N_k} \right)^{\frac{1}{2}}, \end{aligned}$$

където  $N_k$  е броят на контролните точки.

Изборът на оптималния брой членове в полинома може да се направи също с помощта на средно квадратичната грешка  $m_{\bar{x}}$  и  $m_{\bar{y}}$  на контролните точки в полинома.

$$(21) \quad m_{\bar{X}_k}^2 = \frac{\mu_{\bar{X}_k}^2}{P_{\bar{X}_k}}, \quad m_{\bar{Y}_k}^2 = \frac{\mu_{\bar{Y}_k}^2}{P_{\bar{Y}_k}}$$

$P_x, P_y$  се определят по изразите

$$(22) \quad \frac{1}{P_{\bar{X}_k}} = \frac{\partial \bar{X}_k}{\partial \bar{a}} Q \frac{\partial \bar{X}_k}{\partial \bar{a}}, \quad \frac{1}{P_{\bar{Y}_k}} = \frac{\partial \bar{Y}_k}{\partial \bar{b}} Q \frac{\partial \bar{Y}_k}{\partial \bar{b}},$$

където  $\frac{\partial \bar{X}_k}{\partial \bar{a}}$  и  $\frac{\partial \bar{Y}_k}{\partial \bar{b}}$  са векторите на частните производни на получените коефициенти  $\bar{a}_i$  и  $\bar{b}_i$  в полинома, а  $Q$  е корелационната матрица. Средноквадратните грешки  $m_{\bar{x}}, m_{\bar{y}}$  също може да се използват за определяне на оптималния брой членове, но тук няма да привеждаме математическите изрази на тези формули, които са дадени в [5].

Освен горните величини се определят и мащабите  $M_{\bar{x}}$  и  $M_{\bar{y}}$  за трансформираните изображения

$$(23) \quad M_{\bar{x}} = \left[ \left( \frac{\partial \bar{X}}{\partial \bar{x}} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{Y}}{\partial \bar{x}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad M_{\bar{y}} = \left[ \left( \frac{\partial \bar{X}}{\partial \bar{y}} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{Y}}{\partial \bar{y}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

За определяне на най-добрите полиноми за трансформациите и корекциите на сканерните изображения в [1] е дадена програма POLISKAN, с която се извършиха експерименти по определяне на коефициентите на полинома при максимален брой членове от 3 до 28, като са използвани равномерно разположени 81 точки, определени с точност 0,1 пиксела, от които около 50 точки са опорни, а останалите контролни. Началото на координатните системи  $X, Y$  и  $x$  и  $y$  съвпадат с центъра на тежестта, а координатите са мащабирани в интервала (-10, 10). Използваните от 20 до 50 опорни точки показват задоволителни резултати за точността при определяне на корекцията на полинома. Изчислените отклонения по формула (19) между контролните точки показват, че увеличаването на степента на полинома до пета степен, води до намаляване на отклоненията. Когато полиномът е до шеста степен, се наблюдават някои незадоволителни резултати. Оптималното число членове на полинома, обезпечаващ точност един пиксел, е необходимо по  $Y - 7$ , а по  $X - 12$ . Трябва да отбележим, че за коригиране участък до 1/4 от изображението са достатъчни 15 опорни точки и 6-7 коефициента, което потвърждава извода за степента на полинома.

Неравномерното разположение на опорните точки и техните сравнително големи грешки не позволяват да се постигнат достатъчно големи точности при използване на апроксимиращи полиноми и много често се стига до незадоволителни резултати, особено когато степента на полинома надвишава пета степен. Когато числото на коефициентите е по-голямо от 20, грешката за единица тежест се намалява, а отклонението на контролните точки нараства скокообразно. Това може да се обясни с

факта, че четири от контролните точки обикновено се избират в краищата на изображението.

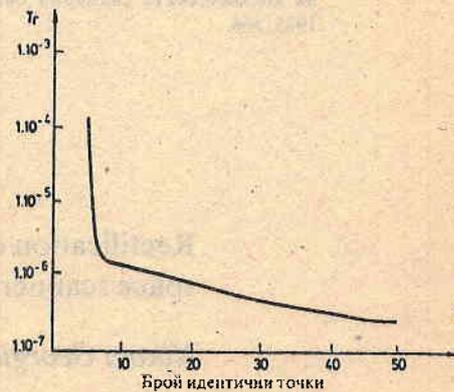
Получените резултати дават основание да се отбележи, че оптималното число на членовете в полинома (1), за коригирането на  $X$  е необходимо да бъде до 20—21, а за  $Y$  до 6—9 члена. От моделните изследвания в [1] следват изводите:

1. За получаване на оптимален коригирац полином са необходими 35—45 идентични опорни точки, разположени равномерно в изображението.
2. Най-бързо повишаване на точността става след 10—15 точки до 45.
3. Оптималното число членове в полинома следва да се избира на основата на минималните стойности в отклонения на избраните контролни точки, разположени в краищата на изображението.
4. Най-подходящи са полиномите до пета степен.

За оптималното количество идентични точки и най-подходящите места за тяхното разположение върху сканерното изображение в [13] са получени резултати, които са представени на фиг. 1 и фиг. 2.

Ред	Колона										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0			43	9	7	14	50			0
2	16				18	13	24				15
3	19				32	26	34				20
4	31				46	38	48				30
5	41					49					40
6	45					0					47
7	37										39
8	29					42					28
9	22				33	27	35				23
10	12				21	17	25				11
11	0			36	8	6	10	44			0

Фиг. 1. Разположение на най-информативните идентични точки



Фиг. 2. Следа на корелационната матрица

## Литература

1. Тема по ИИС - ВИАС. Автоматизиране на геодезичните изчислителни методи на космическото сканиране (Рък. колектив на кат. „Висша геодезия“ проф. д-р М. Даскалова, на колектив на ЦЛВГ - БАН — проф. д-р ф.м.н. Н. Георгиев), С., 1984.
2. Larsson, J. Rectification of Digital Images for Remot Sensing Analysis. Stockholm Meddelande report 2, 43, 1980.
3. Даскалова, М. Върху обработката на сканерни изображения в приета картографска проекция. — Год. на ВИАС, С., XXXIII, 1987—1988.
4. Пейчев, С. Моделно изследване на геометричните деформации при космическите сканерни снимки. — Геод., картогр. и земеустр., 6, 1984.
5. Георгиев, Н. Изследване на деформациите при дистанционното сканиране на Земята от ИСЗ и тяхното значение върху изображенията. Отчет на тема при секция „Дистанционни изследвания на Земята от космоса“, ИКИ - БАН, 1996/98.

6. Georgiev, N., R. Nedkov. Space Scanner Images Processing Using GPS Measuring and Definite Reference Ellipsoid, Pecora 14, The Fourteenth William T. Pecora Memorial Remote Sensing Symposium, The Land Satellite Information in the Next Decade, 1999, Denver, Colorado USA (in orss).
7. Стоименов, А. Ново поколение спътникови изображения за целите на картографията. Техн. бюлет. Военно топ. служба, С., МО, 1998.
8. Хижииченко, В. И. Оценка геометрических искажений сканерных телевизионных систем. — Геодезия и картография, М., 1979, кн. 11.
9. Чапанов, Я. Коригиране на геометрическите деформации в сканерните изображения чрез полиноми до шеста степен. — Висша геодезия, 1985, №11.
10. Зиман, Л., В. Баратов. Трансформирование снимков в заднюю картографическую проекцию с помощью ЭФМ. — Геодезия и картография, 1975, №6.
11. Даскалова, М., Нгуен Тхан. Приложение на сплайн-функциите при обработка на сканерни изображения. — Геодезия, картография и земеустройство, 1986.
12. Цаков, Д., П. Димитров. Цифрови данни за местността — информационна основа за нови технологични решения. Технически бюлетин „Геодезия, Фотограмметрия, картография“, Военно топ. служба, С., МО, 1998.
13. Пейчев, С. Оптимизация на разположението и броя на идентичните точки при ректификацията на космическите сканерни снимки. — Геодезия, картография, земеустройство, 1985, №6.

Постъпила на 10.V.1999г.

## Rectification of the geometric deformations in space scanner images by approximation functions

*Nikola Georgiev, Rumen Nedkov*

(Summary)

The problems related with geometric deformations in space scanner images are considered and analyzed.

In the paper, a precise mathematical method for rectification of scanner images by the use of polynoms with the plane model is presented. The formulae derived and calculations made provide for the processing to be made by the Least Square Method (LSM), determining the values (standards) of the quantities obtained.

Based on the mathematical expressions derived, calculations are made for determination of the optimal number of polynom members and the number of control points for correction of the geometric deformations.

## Метод на нормалните еволюционни криви в СВЧ аерокосмическия мониторинг на надводна растителност

*Михаил Михалев, Зоан мин Чунг\**

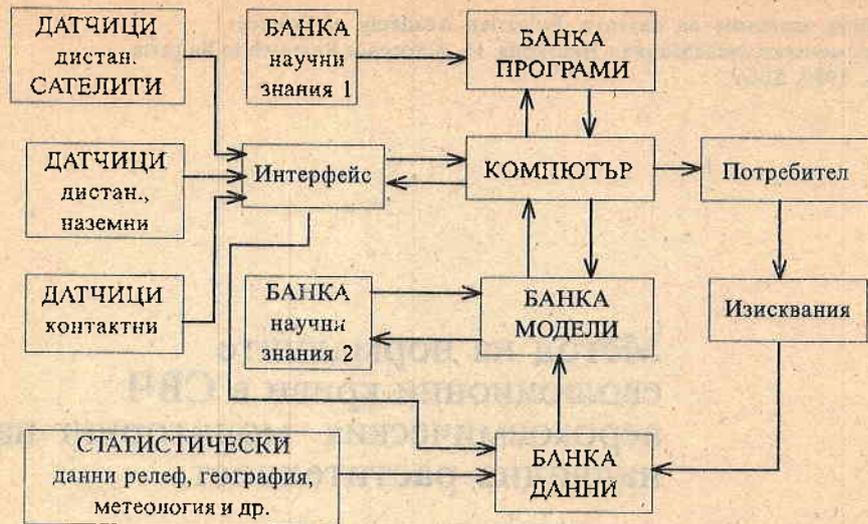
*Институт по електроника, БАН*

*\* Институт по Физика, Виетнамски национален  
център за природните науки и технологии,  
Нгхиадо - Тълием - Ханой*

Растителните системи са изключително важна компонента на биосферата — източник на биомаса, най-важно звено в създаването на органични вещества. За подобряване и значително усъвършенстване на изучаването, използването, възпроизводството и охраната на растителните системи (култивирани или диви) е необходимо да се създават ефективни системи за контрол на растителните ресурси, почиващи върху обективни оценки на биологическите и екологическите параметри на растителните системи в конкретни географски райони. Съвременната практика за такава система включва локална геоинформационна система (ГИС) с непрекъснато обновявана и допълвана банка данни с използване на контактни и дистанционни средства[1].

Предмет на тази работа е изследването на възможността и алгоритъма за създаване на система (или на по-високо равнище ГИС) за мониторинг на надводна растителност на примера на селскостопански и природно диви екосистеми. На фиг.1 е показана в най-общ вид функционалната схема на система тип ГИС за мониторинг на локализиран обект. Анализът на такива системи [1] показва техните основни съставни части и съответно етапите и последователността на изграждане на такава система:

— Модел на системата и идентификационна характеристика, по която да става мониторингът и заключенията. Моделът се изгражда на базата на съществуващи и непрекъснато обновявани с нови измервания и теоретични



Фиг.1. Най-общ вид на функционалната схема на система тип ГИС за мониторинг на локализиран обект

обобщения знания и данни за изследвания природен обект — в частност екосистема от надводна растителност. Идентификационната характеристика е в най-добрия случай еднозначна функция от лесно и добре измеряем параметър на екосистемата дори без пряко използване на модела и без дълга обработка на текущите сигнали за получаване на текущата оценка на състоянието и на краткосрочната прогноза.

— Система от измерители за получаване на текуща измерителна информация за моментното състояние на екосистемата и достъп до измерителна информация за всички параметри на екосистемата и нейното функциониране.

— Банка данни за екосистемата като основа за моделите и тяхното обновление и като основа на прогнозите.

— Компютърна система.

— Банка програми за обработка на данни и знания.

На основните въпроси, свързани с тези съставни части на системата за мониторинг тук се търсят отговори както следва :

— Изгражда се модел на системата от еволюционен тип като се разделят случаите на еволюция във времето и в пространството. За два типа растителни екосистеми (оризова нива и мангрова гора) общото е, че са растителни системи над вода. Съществената разлика е в това, че системата орис интензивно се развива във времето (от посева до жетвата) при относително постоянство в пространството във всеки момент от времето, докато системата мангрова гора е разположена в пространство (от морския бряг до растителност надалече от водата и типична сухоземна) при относително постоянство във времето на отделните съставни части в пространството. По този начин се формират за едната система еволюционен модел по времето, а за другата — еволюционен модел в пространството.

— Моделите се изграждат на базата на статистически данни за съставните части на екосистемата — растителност, релеф, вода, метеорология и т.н., като водят до модели на излъчване и разсейване в СВЧ обхват като основа за непрекъснато наблюдение и изграждане на подходяща идентификационна характеристика.

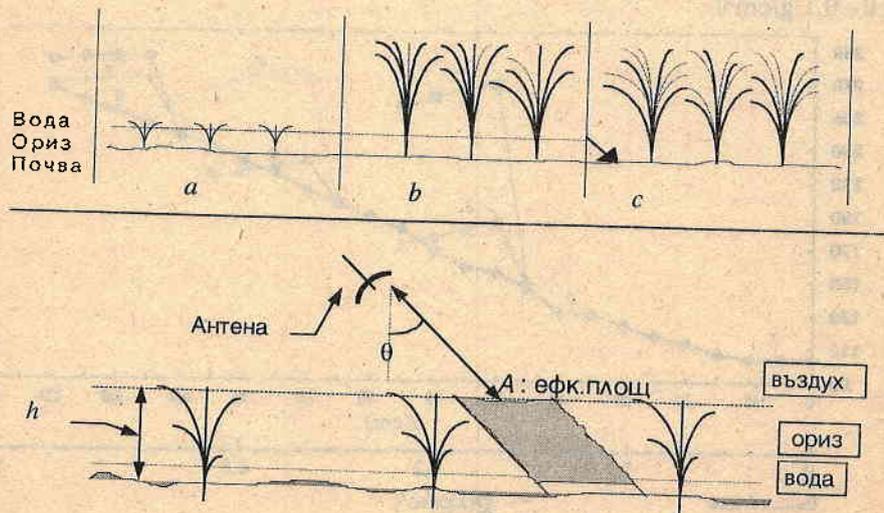
— Въвежда се идентификационна характеристика, наречена „крива (или криви) на нормалното развитие“ на екосистемата, която по същество е кривата (кривите) на излъчване и разсейване в СВЧ обхват, изведена за конкретната екосистема в условия на „нормално“ развитие според съществуващите данни за съответната растителна система.

— За всяка от растителните системи се създава семейство от идентификационни криви, в което около нормалната се разполагат кривите на нарушени основни параметри (метеорология, воден режим и т.н.).

— Създава се алгоритъм на мониторинг, който включва методика на наблюдение със СВЧ средства върху отделните етапи на еволюцията и програми за оценка на „нормалността“ на получените от измерителните данни резултати.

Методът на нормалните еволюционни криви е приложен за разработване на методика за СВЧ дистанционен мониторинг на екосистемите надводно оризово поле и мангрова гора в условията на Виетнам.

За моделиране на СВЧ излъчване и разсейване на оризово поле, по еволюционен цикъл го разделяме на 3 основни етапа както се вижда на фиг.2: открита вода, ориз над вода, ориз над почва. Съгласно с разделянето на етапите, електродинамичните модели за СВЧ излъчване и разсейване също са предложени според характерните особености на всеки етап:



Фиг. 2. Етапите на оризово поле : *a* — открита вода; *b* — ориз над вода; *c* — ориз над почва, и съответно трислойният модел на РП от Улаби и др.[3]

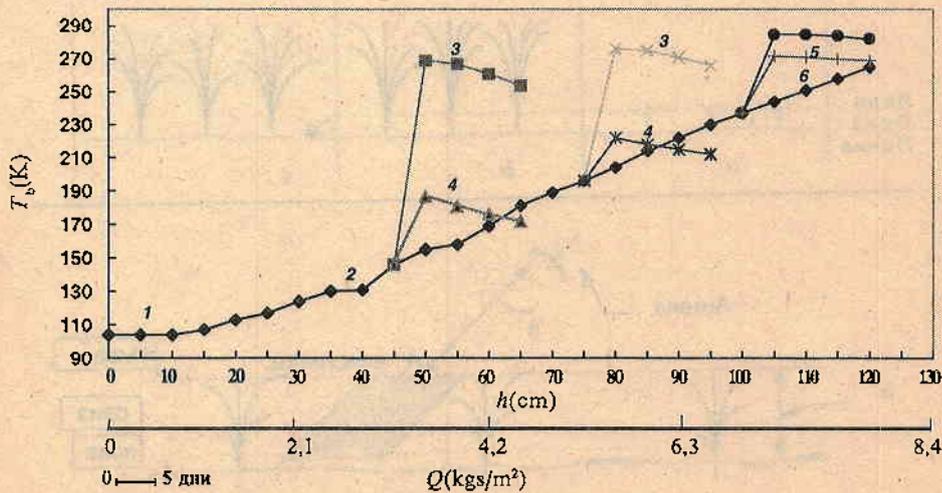
— В 1-ия етап оризът е много нисък. Неговите СВЧ излъчване и разсейване са предложени като от открита водна повърхност и се пресмятат по хомогенния двуслоен модел на Шутко [5]: въздух—вода, чиято граница се предполага гладка.

— Във 2-ия етап оризът много бързо нараства с гъсти листи, и после класове. Оризовата покривка може да се приеме за непрекъсната. Използваме хомогенния трислоен модел на Улаби и др. [3]: въздух—ориз—вода като предполагаме, че оризовите растения са еднакви по височина, водосъдържание и геометрия и са независими по между си.

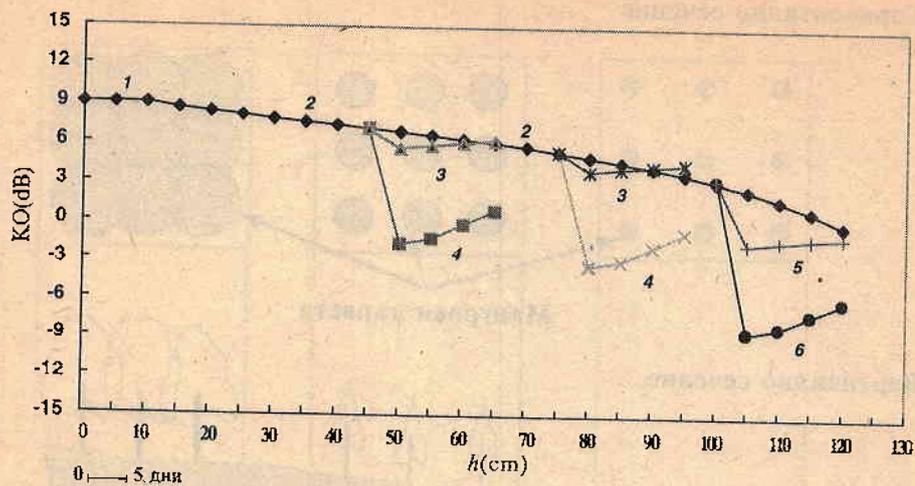
— В 3-ия етап оризовото поле е пред реколта. За да има по-хубави зърна водата е източена. Използваме хомогенния трислоен модел на Улаби и др. [3]: въздух—ориз—почва (влажна и суха).

За определяне диелектричната проникваемост на почвата (в 3-ия етап) използваме модела на Уанг—Шмаге [6], докато за определяне ефективната диелектрична проникваемост на хомогенната среда растителност (оризова покривка) използваме формулата на Френел, показана в книгата на Шутко [5]. Като е определена диелектричната проникваемост на оризовия слой, с известни други входни параметри (физическа температура на растителна покривка— $T_0$ , гъстота  $N$  (брой растения/ $m^2$ ) на растителна покривка (РП), височината на РП— $h$ , биомасата— $Q$ , и т.н.) са определени радиояркостната температура  $T_b(h, Q)$  и коефициентът на обратното разсейване  $KO(h, Q)$  на оризово поле [3, 5].

Въз основа на показаните по-горе модели с използване на статистически данни за оризови полета във Виетнам, в работата са пресметнати „нормалните криви“ за СВЧ излъчване и разсейване на оризово поле, които са показани на фиг. 3 и фиг. 4 ( $T_b(h, Q), KO(h, Q)$ ), в които се включва и аварийна ситуация (през 2-ия етап водата нежелателно липсва, остава влажна или суха подстиляща почва със съответните влажности на почвата  $m_s = 0,4-0,6 g/cm^3$  или  $0-0,1 g/cm^3$ ).



Фиг.3. Зависимост на яркостната температура на надводното оризово поле от височината  $h$  (или биомасата  $Q$ ) със семействата на кривите за аварийни ситуации  $T_0=288K$ ,  $N=500$  растения/ $m^2$ , „бушно развитие“, Хорл.поляр.—НН (1—открита вода; 2—ориз над вода; 3,4—ориз над суха почва с влажност на почвата  $m_s=0-0,1g/cm^3$ ; 5,6—ориз над влажна почва с  $m_s=0,4-0,6 g/cm^3$ );  $\lambda=18cm$



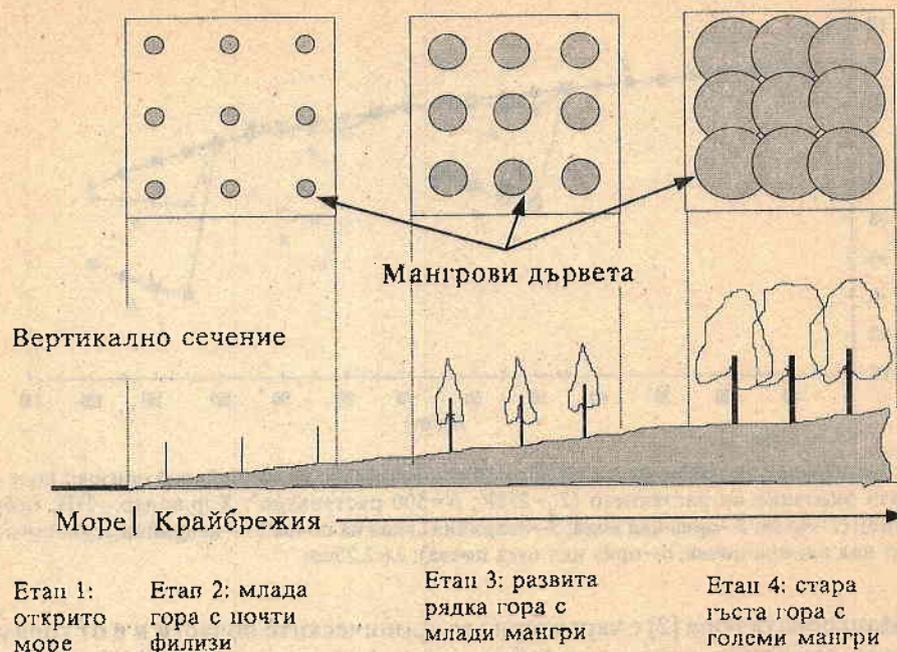
Фиг.4. Зависимост на коефициента на обратното разсейване на надводното оризово поле от средната височина на растението ( $T_0=288\text{K}$ ;  $N=500$  растения/ $\text{m}^2$ ; Хор.поляр.—НН; буйно развитие). (1—вода; 2—ориз над вода; 3—аварийна „влажна почва“; 4—аварийна „суха почва“; 5—ориз над влажна почва; 6—ориз над суха почва);  $\lambda=2,25\text{cm}$

Мангровата гора [2] е характерна за тропическите области и е от голямо локално значение като средообразуващ фактор — разположена като екосистема с еволюция в пространството по посоката море—суша — тя не само укрепва брега, но и напредва, пълзи към морето, завювайки нови пространства за сушата от морето.

Пресметнати са „нормални“ криви за излъчване и разсейване в СВЧ диапазон за крайбрежия с мангрови гори според тяхното пространствено развитие и разпределение в посоката море—суша, състояща се последователно от море—млади филизи—млада гора—сухоземна растителност. Основните ботанически, географски и морфологически данни за пресмятането са данни за мангровите екосистеми във Виетнам.

Типичната картина на двата мангри *Rhizophora mangle* и *Aricennia officinalis* [2], разпространени във Виетнам, и тяхното разположение по оста суша—море са дадени на фиг.5. Моделът на пространственото разпределение на екосистемата мангрова гора, който възприемаме, е онагледен на фиг. 5. Добре се очертават ивиците на морето, младите филизи, младата гора, нормалната мангрова гора. Измерванията на собственото излъчване (радиояркостната температура) и разсейването в СВЧ диапазона са направени с дължини на вълните  $\lambda=18\text{cm}$  и  $l=2,25\text{cm}$  [3]. Данните за излъчването и разсейването от морската повърхност са възприети според най-разпространените и използвани стойности. Случаят за филизите се разглежда по дискретен модел с отчитане на тяхната геометрия и диелектрична проницаемост според данните в [4]. За младата и нормоизрастналата мангрова гора се приемат разположението и размерите, характерни за развитието им във Виетнам, като по-нататък се използва

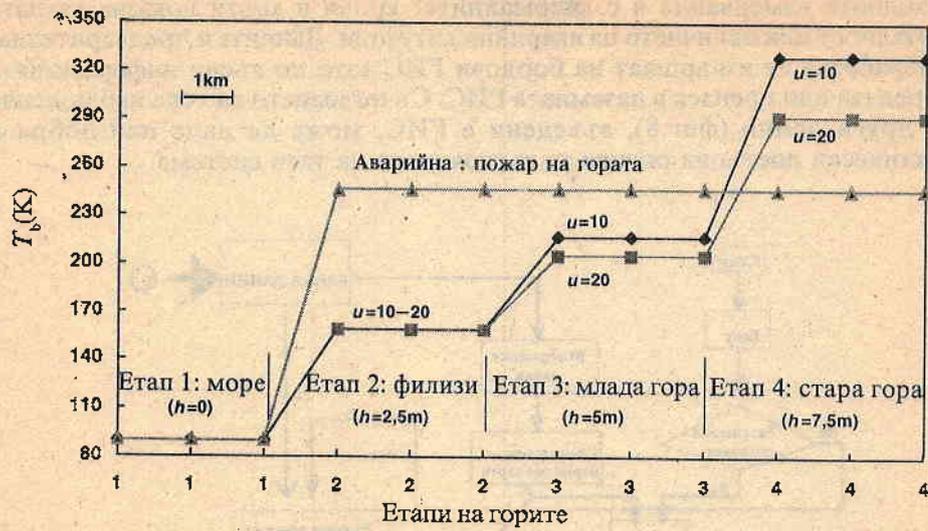
## Хоризонтално сечение



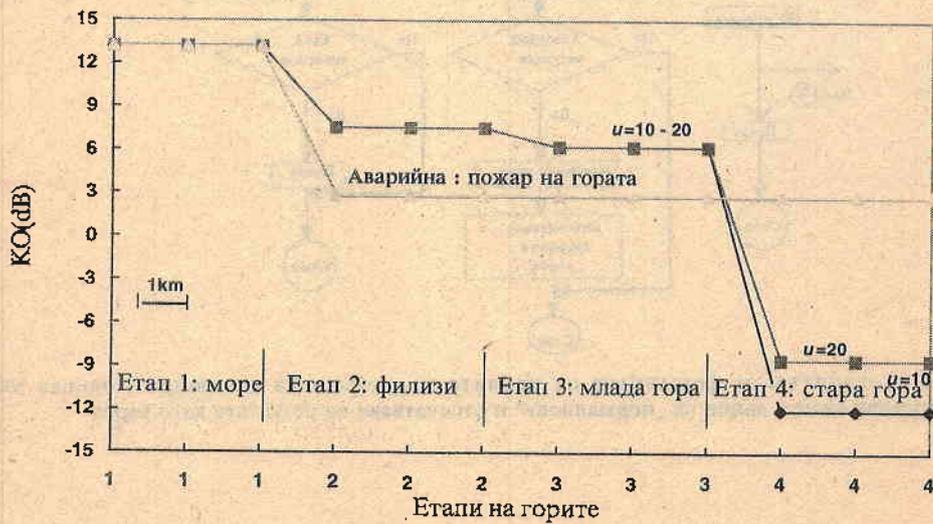
Фиг.5. Представяне на мангрови гори в развитие, пресметнато по пространственото разпределение на горския пояс в сравнение с море

трислоеният модел на Улаби [3], с пресмятане на диелектричната константа според данните за мангрови растения като разпределение листа—стъбла, и моделът на Уанг—Шмаге [6] и данните за почвите във Виетнам при оценка на диелектричната константа на подстилащата повърхност (влажна почва). На фиг.6 е показана графика на изменение на радиояркостната температура на мангрова гора тип *Rhizophora mangle* [2] по трасето море—филизи—млада (рядка) гора—стара гора, а на фиг.7 е показано изменението на коефициента на отражение. И в двете фигури е показано поведението на параметрите при аварийна ситуация — обезлистяване.

Намерените (пресметнатите) криви заемат очаквания строго монотонен ход и в отделни свои части качествено съвпадат с резултати на други автори (които обикновено измерват величините само за стари гори)[2,4]. Тези криви имат устойчив характер и висока идентификационна способност — те могат да се използват като нормални криви за СВЧ дистанционен мониторинг на мангрови екосистеми. Алгоритъмът е както следва — с обикновена СВЧ апаратура на борда (напр. както в [2]) самолет прелита по трасето море—суша в паралелни полети според географското разположение на екосистемата. По-нататък от тези измерени стойности се определят

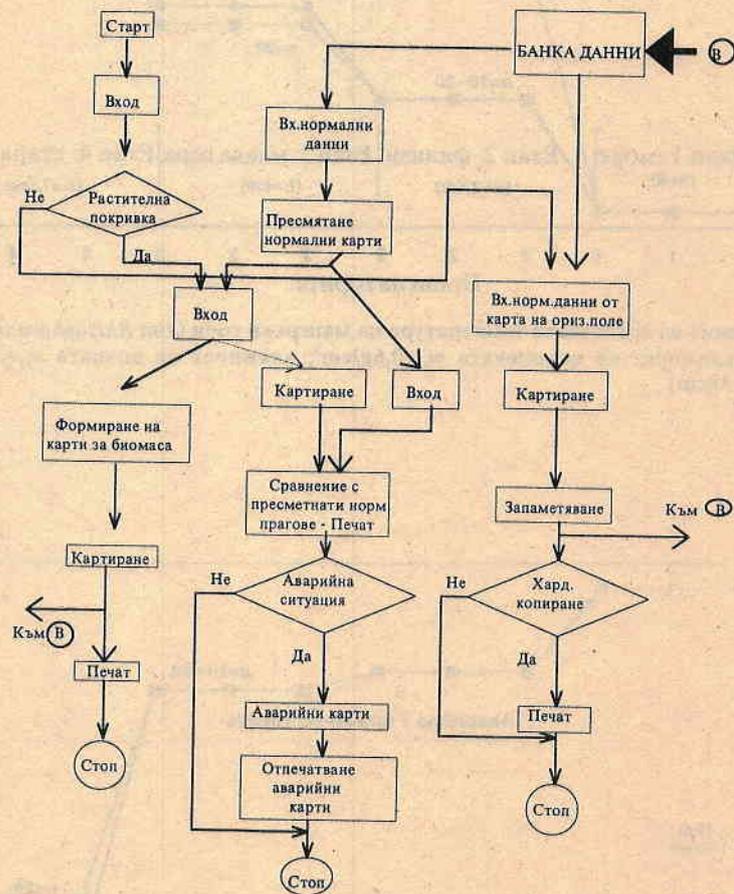


Фиг.6. Изменение на яркостната температура на мангрови гори (тип *Rhizophora mangle* [5]) по трасето (влажност на покривката  $m_v=0,6\text{g/cm}^3$ ; влажност на почвата  $m_s=0,4\text{g/cm}^3$ ;  $T_0=288\text{K}$ ;  $\lambda=18\text{cm}$ )



Фиг.7. Изменение на коефициента на обратното разсейване на мангрови гори (тип *Rhizophora mangle* [5]) по трасето на поясите с  $\lambda=2,25\text{cm}$

пространствените профили и картите на величините. Сравнението им с преходните измервания и с „нормалните“ криви и карти показва тяхната нормалност или наличието на аварийни ситуации. Данните и предварителната обработка се извършват на бордови ГИС като по-късно информацията се предава или пренася в наземната ГИС. Съчетаването на това наблюдение със други данни (фиг.8), въведени в ГИС, може да даде най-добра и практически достъпна оценка за състоянието на тази система.



Фиг.8. Алгоритъм за формиране на кривите на „нормална еволюция“, оценка на експерименталните данни на „нормалност“ и отпечатване на резултата като карта

## Литература

1. Seidel, K., M. Keller. Development of a geographic information system with the aid of digital image processing techniques. — Proc. of IGRASS 88 Symposium, Edinburgh, Scotland, 13—16 Sept. 1988. Ref. ESA SP-284 (IEEE 88CH2497-6) - ESA Publications Division, August 1988.
2. Nguyen thuong Hung, Pham trung Luong. Report of the pilot project on coastal zone studies in Vietnam. — Report on Appl. of Remote Sens. Tech. to Coastal Studies and Envir. Monitor. in Vietnam. 1989, 23—29.
3. Ulaby, F. T., R. K. Moore, A. K. Fung. Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Vol. 1. Addison Wesley, Reading Mass - Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry - Radiometer System, 1981.
4. Chauhan, N. S., R. S. Lang. Microwave modelling of orchard canopy. IGRASS'88, Edinburgh, Scotland, 13—16 Sept. 1988. Ref. ESA SP-284 (IEEE 88 CHC2497-6) - p. 1757—1759 - ESA publication division, August 1988.
5. Шутко, А. М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М., Наука, 1986.
6. Wang, J. R., T. J. Schmugge. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soil as a function of water content. — IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-18, № 4, October 1980.

Поступила на 26.VI.1997г.

### The normal evolution signatures method for remote sensing monitoring of vegetation

*Mikhail Mikhalev, Zoan Min Chung*

(Summary)

A new signature method for Remote Sensing Monitoring of the vegetation on evolution cycle is proposed. The signature is named evolution curve and is calculated as a microwave radiation or scattering coefficient of the object under observation versus the evolution parameters. The method consists of the comparison and evaluation of the difference between the measured signature with the established normal one. The normal evolution curves are calculated for rice fields and mangroves as a vegetation canopy on water with typical evolution cycle. The possibilities to use those signatures for remote sensing monitoring in normal or emergency cases are discussed.

## Растителната покривка като обект за изучаване с дистанционни методи

*Владимир Вълчев*

*Институт по ботаника, БАН*

Проблемът за изучаването на естествените растителни ресурси съдържа в себе си два основни аспекта — изучаване продуктивността на фитocenозите и определяне количеството на биомасата в тях. Важността на тези задачи и тяхното решаване е естествена, тъй като растителните съобщества са основен и определящ елемент в екосистемите на Земята. Обект на изследване са основните естествени растителни съобщества — гори, ливади, пасища, като най-голямо внимание се отделя на горските фитocenози, защото по количество на органично вещество и по производителност (годишен прираст) те са на първо място.

В процеса на решаването на тези важни за човешкото общество задачи, се обръща особено внимание на двата основни типа растителност на Земята — дървесна (Lignosa) и тревиста (Herbosa).

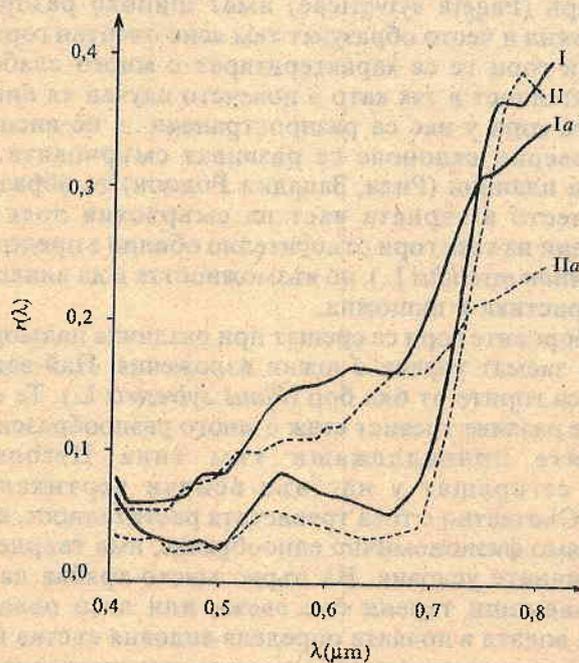
Горската растителност се изгражда от съобществата на различни дървесни видове и в различните райони на земното кълбо претърпява промени под въздействието на екологичните условия и измененията, настъпили под тяхно влияние. За нашата географска ширина най-характерна е горската растителност, формирана от летнозелени дървесни видове (Aestilignosa), и по местата с по-голяма надморска височина — дървесни съобщества на иглолистни видове (Aciculilignosa). Първостепенно значение от широколистните летнозелени дървесни съобщества имат буквите и дъбовите, а от иглолистните — съобществата на смърча и белия бор.

Не по-маловажна е ролята на другия основен тип растителност — тревистата. Тя е източник на растителни белтъчини, въглехидрати и мазнини, които са важна съставка на храната на човека и продуцент на хранителни вещества за консументите от първи порядък (тревопасните животни). Тревистите растения са основа на хранителни вериги, от които започва

транспортът на органични вещества и енергия в общия кръговрат на веществата и енергията в биосферата на Земята. Главна роля сред тази растителност играят представителите на сем. Житни (Gramineae) и сем. Бобови (Leguminosae). Към тях принадлежат и най-използваните от човека тревисти растения, които същевременно са основни градивни елементи на естествените тревисти, вторично образувани растителни съобщества — ливадите и пасищата.

Особено важни са площите, които са заети от културфитоценози (аграрфитоценози). Същественото при тях е, че те са създадени съзнателно и по предварително зададени параметри — площ, гъстота, проективно покритие, етажност и т.н. Те съществуват през период със строго определени граници във времето и на тях се влияе планомерно с различни видове обработка (хидромелиорация, механична и химична обработка). Главната цел е от тях да бъдат получени максимални количества фитомаса (под различна форма — надземна, подземна, листна, плодове, семена и пр.). Всички тези техни характеристични признаци облекчават изучаването им, като едновременно с това стават предпоставка за възникване на нови проблеми, които трябва да бъдат решени.

Съществен момент при изучаването на изкуствените фитоценози с дистанционни методи е внимателният анализ и съоставяне на получените данни с достигнатия етап от тяхното развитие. Това се налага от бързата промяна на оптичните им параметри, обусловена от фенологичните промени на популациите, които ги формират [1] (фиг.1).



Фиг. 1. Спектрална отражателна характеристика на ориз (I, Ia) и пшеница (II, IIa) във фаза изкласяване (I, II) и зрялост (Ia, IIa)

Изучаването на естествената растителна покривка с дистанционни методи представлява труден процес. Това се обуславя от малката по площ територия на страната ни и относително голямото флористично, фитоценоотично богатство и фитогеографско разнообразие на нейната естествена флора и растителност.

Основната растителност, която вероятно е господствала по нашите земи преди появата на човека, е горската. Под влияние на човешката дейност горите не само са били унищожени, но също на големи територии са деградирали до храсталаци. Най-характерни горски съобщества за низините и предпланините на България представляват листопадните дъбови гори (*Querceta*). Дъбови гори се развиват най-вече в хълмисти райони и по южните склонове в ниските части на планините, като леката им сянка позволява добро развитие на тревна покривка, запазваща се през целия вегетационен сезон. Уместно е да се отбележи, че при изследване оптичните характеристиките на тези обекти е необходимо да се имат предвид методичните указания относно индикатрисата на отражението [2], защото това са горски екосистеми, чиито дървесен етаж има разреждана хоризонтална структура. Това обстоятелство позволява техният тревист етаж да взема активно участие във формиране на интегралния оптичен образ на изследвания обект. Като правило дъбовите гори в цялата страна са силно нарушени и често само фрагменти от тях или отделни дървета свидетелстват за някогашното им разпространение [3].

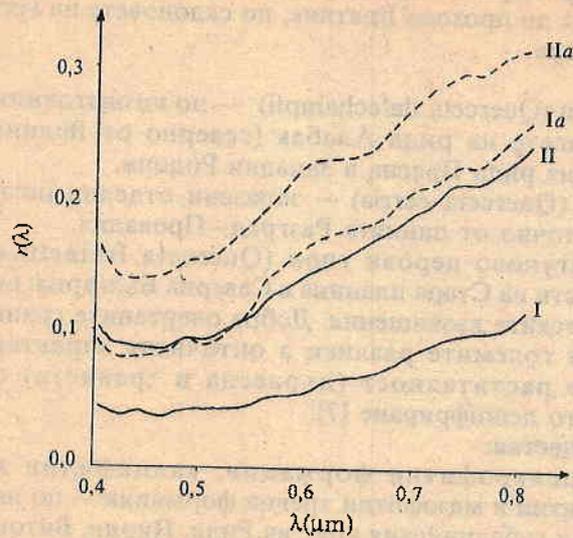
Буковите гори (*Fageta sylvatica*) имат широко разпространение в българските планини и често образуват там ясно очертан горски пояс. Като типично сенчести гори те се характеризират с много слабо развитие на тревистата растителност в тях като в повечето случаи тя липсва.

Иглолистните гори у нас са разпространени в по-високите планини. Предимно по северни склонове се развиват смърчовите гори (*Piceeta excelsae*). В някои планини (Рила, Западни Родопи) те образуват цялостен пояс. Особено често в горната част на смърчовия пояс в състава на приземните синузии на тези гори относително обилно е представена черната боровинка (*Vaccinium myrtillus* L.), но възможността ѝ да влияе върху тяхната оптична характеристика е нищожна.

В България боровите гори се срещат при различна надморска височина, като обикновено заемат терени с южни изложения. Най-важни и широко разпространени са горите от бял бор (*Pinus sylvestris* L.). Те са хелиофилни и в тях активно се развива тревист етаж с много разнообразен видов състав.

Фитоценозите принадлежащи към типа *Herbosa* (тревиста растителност) се срещат у нас във всички вертикални пояси на растителността. Съответно с това тревистата растителност, въпреки своето относително голямо физиономично еднообразие, има твърде разнообразен състав при различните условия. На първо място трябва да се отбележат съобществата, заемащи терени със свежи или леко овлажнени почви. Количеството на водата в почвата определя видовия състав на фитоценоза. То влияе силно и върху спектралната отражателна характеристика на самата почва, а оттам и на комплекса „почва—растителност“. По-високите данни за отражението са показател за по-ниска влажност на почвата [4], която от

своя страна определя видовия състав и структурата на растителната покривка, а оттам и нейните оптични характеристики (фиг.2).



Фиг. 2. Спектрална отражателна характеристика на два типа почви в сухо (I, II) и овлажнено (Ia, IIa) състояние

Площите, заемани от тревистите съобщества са силно редуцирани и техният видов състав е много повлиян от непрекъснатото усвояване на нови обработваеми земи, увеличаването на човешката намеса и последствията, които тя води след себе си.

Изложеното дотук по отношение основните типове растителност, характерни за територията на нашата страна, показва, че разнообразието на растителната покривка във физиономично отношение е голямо. Фитоценози, принадлежащи към една и съща асоциация или формация, имащи сходни строеж, хабитус, продуктивност и пр., обикновено заемат относително малки територии. Дял за това несъмнено има и човешката дейност по нашите земи. Съвкупността от тези факти създава определени трудности при изучаване на растителната покривка с дистанционни методи. Това, съчетано с натрупаната информация по отношение оптичните характеристики на определени обекти от земната повърхност [4—6], насочва към най-удобните места за прилагане на тези методи на територията на нашата страна:

#### Иглолистни гори:

Смърчови гори (*Piceeta excelsae*) — северните, източните и южните склонове на източния дял на Рила; ридовете Сюткя и Баташка планина в Западни Родопи; смърчовите гори в триъгълника Девин—Чепеларе—Смолян.

Бялборови гори (*Pineta sylvestris*) — южните склонове на Рила; в Родопите — западно от коритото на р. Въча, на запад до р. Места.

### Широколистни гори:

Букови гори (*Fageta sylvaticae*) — по склоновете на Стара планина — от Белоградчик на изток до прохода Вратник; по склоновете на Ихтиманска и Същинска Средна гора.

### Дъбови гори:

горунови гори (*Querceta dalechampii*) — по югоизточните склонове на Рила; по склоновете на рида Алабак (северно от Велинград) и по северните склонове на рида Преспа в Западни Родопи.

церови гори (*Querceta cerris*) — запазени отделни петна от тях в Добруджа, североизточно от линията Разград—Провадия.

смесени благуново-церови гори (*Querceta frainetti-cerris*) — в предпланинските части на Стара планина в Северна България; по северните склонове на Девентските възвишения. Добре очертаните граници на тези остатъци от гора и големите разлики в оптичните характеристики на различните типове растителност (дървесна и тревиста) облекчават чувствително тяхното дешифриране [7]:

### Тревисти съобщества:

Ацидофилни психрофитни формации, калцифилни криофитни формации, психрофитни и мезофитни тревни формации — по най-високите части на алпийския и субалпийския пояс на Рила, Пирин, Витоша, Западни Родопи и Стара планина.

Тревни степни и ксеротермни формации — по черноморското крайбрежие между Балчик и Шабла.

Ксеротермни тревни формации — северозападно от Шабла; западно от Нови пазар; в триъгълника Банкя—Драгоман—Трън — западно от София.

Цитираните по-горе райони от нашата национална територия са удобни преди всичко поради това, че предлагат едни относително по-големи участъци, заети от сравнително хомогенни структури на растителната покривка на България, отнасящи се към различни биологични типове растителност. Удобството се допълва от обстоятелството, че на някои места указаните територии са повече или по-малко засегнати от антропогенното въздействие. В конкретния случай този факт играе положителна роля от научно-изследователска гледна точка. Точно там са местата, където могат да се наблюдават различните степени на деградация на естествената растителна покривка под въздействие на човешката намеса. Внимателният анализ на тези случаи, както и съпоставянето им със съседните, незасегнати участъци, съдържа в себе си оптималния подход за възстановяване на първичното състояние на растителността.

### Литература

1. Спиридонов, Х., Р. Кънчева. Наземные исследования свойств отражения растительности. — В: Сборник статей 2 „Методические вопросы дистанционного зондирования в интересах географии, сельского и водного хозяйства, а также охраны окружающей среды“, Брно, 1984, 70—74.

2. Мардиросян, Г., Р. Кънчева. Устройство' для измерения индикатрисы отражения. — Аэрокосмически изследвания в България, 1993, № 9, 21—28.
3. Бондев, И. Карта на растителната покривка на България в М 1:600 000 с обяснителен текст. УИ „Св. Климент Охридски“, С., 1991. 189 с.
4. Спиридонов, Х., Р. Кънчева. Основные факторы динамики свойств отражения почвенного покрова. — В: Сборник статей 2 „Методические вопросы дистанционного зондирования в интересах географии, сельского и водного хозяйств, а также охраны окружающей среды“, Брно, 1984, 75—79.
5. Руменина, Е., В. Великов, М. Кънчев. Аэрокосмические и ландшафтно-геохимические исследования антропогенного воздействия на окружающую среду. — В: Сборник статей 2 „Методические вопросы дистанционного зондирования в интересах географии, сельского и водного хозяйств, а также охраны окружающей среды“, Брно, 1984, 52—56.
6. Спиридонов, Х., Е. Руменина, В. Вълчев. Исследование оптических свойств системы ячмень - коричнево-лесная почва. — В: Сборник статей 2 „Методические вопросы дистанционного зондирования в интересах географии, сельского и водного хозяйств, а также охраны окружающей среды“, Брно, 1984, 66—69.
7. Вълчев, В. Приложение на дистанционни методи при изучаване на смесено дъбово съобщество. — Аэрокосмически изследвания в България, № 14, 1998, 57—63.

Постъпила на 26.III.1997г.

## Vegetation cover as the subject of study by remote sensing methods

*Vladimir Vulchev*

(Summary)

The study analyses the main types of vegetation as an object for studing by remote sensing. Regions of Bulgaria where recent vegeta-tion offers the best conditions for application of this methods, are determined.

## Контрол на работата на компютърни системи за управление и на системи за полунатурно моделиране в реално време чрез протоколен модел на Хоар<sup>1</sup>

Пламен Христов, Петър Гецов, Пламен Ангелов

Институт за космически изследвания, БАН

Съществуват различни методи за контрол на работата на една компютърна система за управление — методи на техническата диагностика, идентификация и оценка на качеството на управление в реално време и др. Тези методи контролират апаратната част на системата или общо нейното качество. Основната част на компютърните системи обаче е програмното осигуряване и то изисква по-специални методи за контрол. Когато системата е разработена на базата на CSP-модела, подходящо е приложението на протоколния модел на Хоар за контрол на работата на системата (изчислителните процеси в нея).

Този модел се основава на предварителна спецификация (спецификации и азбуки) на структурата и функциите на системата и процесите в нея и контрол (наблюдение) на работата чрез наблюдение на протоколите.

### Същност на протоколния модел на Хоар

Протокол на поведението на процеса се нарича крайна последователност от символи, фиксиращи събития, в които процесът е участвал до определен момент от време. В CSP-нотацията протоколът се означава с последователност от символи, разделени със запетая —  $\langle x, y \rangle$  — протокол, състоящ се от две събития,  $x$  и след него  $y$ ;  $\langle x \rangle$  — протокол, състоящ се от едно събитие;  $\langle \rangle$  — празен протокол [1].

#### Примери:

Протокол на контурен процес:

$\text{prot}(\text{LoopProcess}[i]) = \langle \text{Adder}[0], \text{Prop}[0.5], \text{Stat1}[0.2, 0.1], \text{SepPoint}[3], \dots \rangle$   
 $= \text{trace}_x; \text{trace}_y = s^n \text{tr}_x$

<sup>1</sup> Изследванията се финансират от НФ „Научни изследвания“ — дог. И-305/93.

Протоколите на процесите се представят чрез последователността от агрегати (звена), които при текущата спецификация участват в процеса. Допустимостта на протокола се определя от това, дали съответният агрегат е включен в азбуката на процеса.

Протокол на агрегат — апериодично звено от първи ред:

$$AAZ1[i] = \sum p_i n_i'; n_i = n_{i-1}'; n_i' = y_k; y_k = -a_1 y_{k-1} + b_1 u_{k-1},$$

където  $n_i$  и  $n_i'$  са числови значения на входа и изхода на агрегата,  $n_{i-1}'$  — числови значения на изхода на предходния агрегат,  $y_k$  — реакция на звеното на произволен входен сигнал,  $a_1$  и  $b_1$  — коефициенти на характеристичното уравнение на звеното,  $u$  — входен сигнал на звеното.

### Операции над протоколите

- **Конкатенация** —  $s \wedge t$ , където  $s$  и  $t$  са протоколи. В резултат на конкатенацията на базата на два протокола се получава нов протокол, в който те са съединени в указания ред.

- **Свиване** —  $(t \setminus A)$  — означава протоколът  $t$ , свит върху множеството  $A$ , което обикновено е азбука на процес. Новият протокол се построява от  $t$  чрез отхвърляне на всички символи, които не принадлежат на  $A$ .

- **Глава и опашка** —  $s_0, s'$  — ако протоколът  $s$  е непразна последователност, то неговият пръв елемент се означава с  $s_0$ , а резултатът, получен след неговото изваждане, с  $s'$ .

- **Звезда** —  $A^*$  — множество, представляващо набор от всички крайни протоколи, съставени от елементи на  $A$ .

$$A^* = \{s \mid s \setminus A = s\}$$

- **Дължина на протокола** —  $\#$  — брой на елементите на протокола.

- **Повторение** —  $s^n$  — протоколът  $s$ , повторен  $n$ -пъти.

### Основни параметри на предлагания метод

- Методът е основан на протоколния модел на Хоар.
- Обединява контрол на работата на системата и верификация в реално време.

- Методът е предназначен за работата в средата на блоково-модулни системи с известен набор системни обекти, за които предварително могат да се изчислят протоколите на Хоар.

### Същност на предлагания метод

Методът може да се представи като няколко последователни стъпки:

1. Формулира се спецификацията на програмното осигуряване на системата, която включва набора от системни обекти (процеси, агрегати, канали);

2. Реализира се програмната система и се доказва нейната коректност (метод за доказване на коректността на спецификации на Хоар).

3. Определят се всички възможни протоколи на специфицираната система с процедурата  $trace(P)$ .

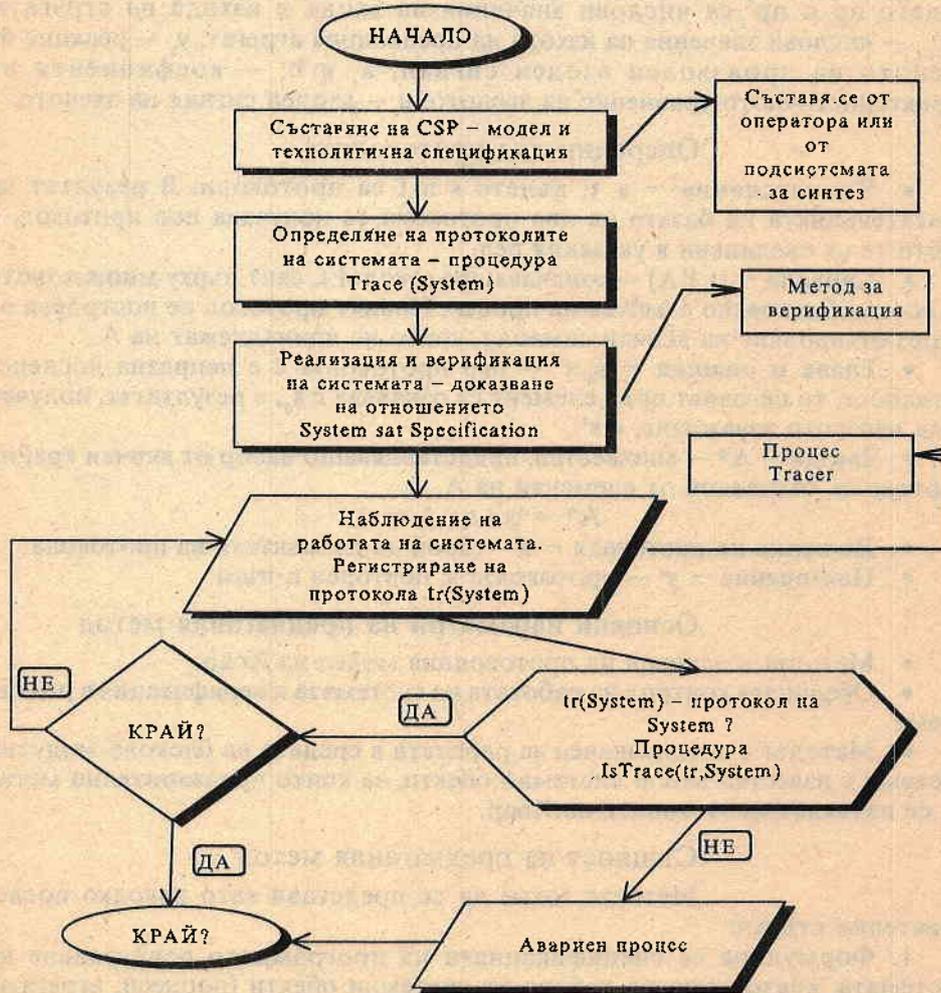
4. Стартира се системата.

5. Специален процес — протоколчик ( $tracer$ ), следи и регистрира протоколите в системата и определя дали са валидни, т. е. — дали се явяват

подмножество на множеството предварително определени протоколи. Това се прави чрез процедурата  $IsTrace(s,P)$ .

6. При регистриране на невалиден протокол се предприемат съответните действия за аварийна ситуация.

Блок - схемата на метода е представена на фиг. 1.



Фиг. 1

#### Основни проблеми при реализация на метода

- Как протоколчикът да получава информация за протоколите в системата? Процесът Tracer трябва да е разпределен между отделните компютри. Във всеки компютър диспечерът, след като управлението се върне към него, трябва да го предава на Tracer. Това решава

проблема с последователността от процеси, но не и с протоколите на всеки отделен процес. Тук трябва да се припомни, че обектът „конгурен процес“ играе ролята на диспечер на списъка от агрегати. В този смисъл той може след изпълнението на всеки агрегат да връща управлението на главния диспечер или директно да го предава на Tracег. Така Tracег ще може да следи всяко действие на системата чрез проверка на активните обекти в базата данни.

• Как освен структурната коректност на изпълнението (последователността от процеси, агрегати и канали) да се контролира и функционалната коректност (коректното задаване на параметрите на обектите)? Този проблем се отнася преди всичко за агрегатите. Решението се получава от това, че протоколите на агрегата се изчисляват по неговата спецификация, в която от своя страна участват неговите параметри.

Скелетът на функцията trace(P) е показан по-долу. Тя работи по типовите конструкции на Хоар (алтернативни процеси, паралелни процеси, рекурсивно определени процеси, процеси с избор и др.), протоколите на които са изведени в [1].

```

trace(P) = (R)* &
  if P = (STOPp) then trace(P) = <>;
  elsif P = (c → P) then trace(P) = <> U <c> ∧ t | t ∈ trace(P);
  elsif P = (c → P | d → Q) then trace(P) = <t | t = <> V (t0 = c & t' ∈ trace(P) V
(t0 = d & t' ∈ trace(Q))>;
  elsif P = (x:B → P(x)) = <t | t = <> V (t0 ∈ B & t' ∈ trace(P(t0)))>;
  elsif P = (mX : A.F(x)) = U trace(Fn(STOPA));
  n ≥ 0

  elsif P = (P || Q) then trace(P) = trace(P) ∩ trace(Q);
  else t = trace(P || Q) then
trace(P || Q) = <t | (t | R) ∈ trace(P) & (t | Q) ∈ trace(Q) & t ∈ (αR ∪ αQ)* > \
..... други конструкции на Хоар .....
  else
end.

```

По-долу е показан скелетът на процедурата IsTrace, определяща дали даден протокол е валиден за процеса.

```

IsTrace(s,P) =
  if s = NIL then TRUE;
  elsif P(s0) = BLEEP then FALSE;
  else IsTrace(s', P(s0));
end.

```

BLEEP е специален символ, използван в случай (само в този случай), че символът не може да бъде начално събитие на процеса.

### Програмно осигуряване на метода

Програмното осигуряване на метода е реализирано на Modula-2 като отделен модул Tracег. Модулът се свързва по стандартни информационни канали с другите обекти на системата.

## Изчислителни експерименти

Експериментите включват симулация на некоректни ситуации, при които може да възникне грешен протокол — повреди в датчиците, водещи до грешни сигнали, неправилна работа на диспечера, програмното осигуряване като цяло и др.

## Изводи

Предлаганият метод дава възможност за контрол на работата на програмни системи на базата на строга математична теория (CSP).

Интерес представлява самият подход за контрол на работата на програмни системи в реално време чрез протоколи на Хоар, тъй като такъв подход не се прилага в известните системи. Методът е предназначен за работа с блоково-модулни системи и използва предварително изчислените протоколи на системните обекти.

## Литература

1. Hoare, C.A.R. Communicating Sequential Processes. PRENTICE-HALL International, UK, LTD, 1985.
2. Concurrent Systems: Formal Development in CSP by Michael G.Hinchey (University of Cambridge) and Stephen A.Jarvis (University of Durham). McGraw-Hill International Series in Software Engineering published 12th January 1995. McGraw-Hill Book Company.

Постъпила на 21.IV.1997г.

## A functional control of computer control systems and real time simulation systems by means of Hoare's trace model

*Plamen Hristov, Peter Getzov, Plamen Angelov*

(Summary)

Some possibilities of using Hoare's trace models for a software functional control of moving objects computer control systems and real time simulation systems are considered. A general description of the trace models is presented. A possibility for the main system objects trace calculation is inspected, and the main problems of the method implementation and the ways and means of their resolving too. The method algorithm and the main procedures of the method are presented.

## Еволюцията на вътрешните обратни връзки в биомеханичната система „пилот—самолет“

*Димитър Йорданов*

*Институт за космически изследвания, БАН*

Същност и роля на вътрешните обратни връзки  
в контура за управление на самолета

Основата, върху която функционира системата „пилот—самолет“, е затвореният контур за управление. В него протичат процесите на адаптация на пилота към променящите се свойства на самолета в скоростно-височинния му диапазон.

Вложената психофизиологична енергия от летеца при работа на борда на самолета се разпределя главно за две функции: за непосредствено управление на обекта (поддържане и изменение на режима на полета) и за друга дейност по конкретната задача на полета (например наблюдение, откриване на ориентири, взаимодействие с група летящи обекти и наземни пунктове за управление, бойно използване). При добри динамични свойства на самолета и съответна подготовка пилотът има възможност да сведе разпределението на енергията между управление и целево използване до съотношение 1:4 в полза на последното. Добре адаптираният се летец към свойствата на самолета го управлява с автоматизирани движения. Установено е, че в сигнала от летеца винаги присъстват малки, непрекъснати движения на командния лост с честота около 1 Hz и амплитуда, предизвикваща ответна реакция на самолета около индивидуалния праг на чувствителност на всеки пилот. Това е тест, с който летецът, образно казано, „опипва“ обекта за управление и получава ценна информация за собствената си адаптация към променящите се свойства на апарата, неговата изправност и отсъствие на аномалии. Тези движения са особено характерни при кацане [4].

Изучаването на механизмите на адаптация и възможностите на пилота да осигури устойчив режим на управление в нормални и аварийни обстоятелства е постоянна задача на изследователите. Главният резултат от тази дейност е преразпределение на функциите между човека и системата за управление при гарантирана ефективност и безопасност на полетите и приемлива стойност на промените и въвеждането на нови технологии. Тази дейност се извършва главно на тренажори [1, 3, 4, 7]. През последното десетилетие, поради развитието на изчислителната техника, се забелязва тенденция за опростяване на моторната компонента в дейността на пилота по управлението на самолета (движения с командните лостове за запазване или изменение на режима на полета). На развитието на тези проблеми в контура за управление е посветен настоящият обзор.

Процесите на адаптация протичат както на входа на пилота, така и на изхода от него. От съвършенството на информационното осигуряване на реалния или на визуализирания модел на полета зависи главно закъснението при приемане на информацията, нейните параметри на дискретизация и формирането на екстраполационния механизъм, който позволява на пилота правилно да разпределя вниманието си в кабината и на пространството извън нея. В другата точка — на изхода от пилота се формират адаптационни механизми, които осигуряват устойчивост на контура за управление и играят главна роля за самочувствието му като командно звено в контура за управление. С особен приоритет за летеца са усещанията за прилагани усилия и преместване на лоста за управление и резултата от тези въздействия. Усилията и преместванията на командните лостове се разглеждат като случайни величини, а при моделиране на контура се представят от коефициента на усилване в предавателната функция на пилота с установен от изследователски задачи закон на разпределение. В системата за управление преместванията и усилията на командните лостове се разглеждат като детерминирани величини (характеристики на статична управляемост) и са нормативно регламентирани. Процесът на адаптация по характеристики на управляемост може да се смята в най-простия случай за завършен, когато случайните величини на коефициента на усилване на пилота са групирани около статичната характеристика на управляемост и разсейването му е в границите на допустимите изменения.

За да може да настрои своя коефициент на усилване към статичните характеристики на управляемост, у пилота в процеса на управление се формират въгрешни обратни връзки — от чувствителните органи (на ръката, например) до централната нервна система. В съвременните системи за управление с хидроусилватели тези усещания за т.нар. „коравина“ на органите за управление се формират изкуствено чрез натоваарващи механизми най-често с пружини, работещи на натиск. Тези механизми имитират усилие при преместване на лостовете дори при нулева скорост. За характеризиране на това свойство се използва понятието „приведена коравина на натоарващия механизъм към ръкохватката на пилота“. При леки дозвукови самолети с управление без хидроусилватели необходимото усилие за преместване на командните лостове в кабината се получава естествено от шарнирния момент на органите за управление и се усеща от пилота само след като самолетът набере определена скорост. С увеличаване

на скоростта необходимото усилие от летеца за едно и също отклонение на кормилата нараства.

В резултат на прилагане на сила на изхода от лоста за управление се получава преместване, което системата за управление превръща в отклонение на кормилото. Тази преобразуваща функция на системата за управление се характеризира от предавателното ѝ число. При изкуствено формирано усилие в системата за управление предавателните числа и коравината на натоварващите механизми в различните канали за управление трябва да са функции на режима на полета и практическата реализация на тези зависимости е една от най-важните задачи на синтеза на системите за управление — от нея зависи устойчивостта на затворения контур за управление с пилот като командно звено. Усещането за изменения в податливостта на командните органи за управление активира у пилота вътрешната обратна връзка по усилие, която му спомага да се адаптира към свойствата на самолета и да го управлява адекватно на неговата реакция.

Ролята на вътрешните обратни връзки в пилота и механизмите, които ги активират от системата за управление, най-добре се илюстрира от изследване на контура за определяне границата на устойчивост при постоянни значения на предавателните числа и коравината на натоварващите механизми. С помощта на удобен аналитичен метод [2] може да бъде получен пределният от условията на устойчивост коефициент на усилване на летеца — това е усилието за движение на командните органи, което предизвиква напълно определени изменения на параметрите на полета (например, претоварване), но контурът за управление при тези усилия е на границата на устойчивост, а това се изразява в невъзможност да се стабилизира самолета. При по-големи усилия от летеца амплитудата на колебанията на параметрите нараства. По резултати от проведено изследване на контура за управление за маневрен самолет могат да се получат необходимите изводи за потребните изменения в системата за непряко управление, за да се осигури устойчивост на затворения контур.

Общите изводи от моделирането и аналитичното изследване се свеждат до следното:

1. При постоянни значения на коравината на натоварващия механизъм и предавателното число от командния лост до кормилото с увеличаване на скоростта на полета се намалява пределният коефициент на усилване на пилота. Той пресича на дозвукови скорости зоната на нормативния (работния) диапазон по усилия, който е формиран от системата за управление.

2. За да запази устойчивостта на контура за управление пилотът трябва непрекъснато с увеличаване на скоростта да прилага все по-малки усилия и да отклонява по-малко кормилата, което не може да бъде дозирано правилно, ако необходимите усилия са под някакъв психофизиологичен праг, индивидуален за всеки пилот. Трудността идва и от обстоятелството, че самолетът става много чувствителен в нормативния диапазон по усилия, който е съобразен с реалните възможности на човека и е характерен с най-голяма точност на движенията. При такова съвпадение на пределния коефициент на усилване и нормативните характеристики на статична управляемост се получават явления, които в авиационната практика се

наричат „преуправляемост“ („разкачка“, „overkontrol“). Подобни режими са регистрирани в началния етап на приложение на хидроусилватели, когато имитацията на усилия в контура за управление е била недостатъчно прецизна. Среща се и при откази на системата за имитация на усилия върху командните лостове. Незатихващите колебания се прекратяват при пускане на лоста за управление, т.е. след прекъсване на затворения контур на управление.

3. Ако системата за управление не активира полезна вътрешна двигателна обратна връзка, пилотът достига т.нар. „предел на управляемост“, поради изчерпване на адаптивните си способности. Необходимо е с увеличаване на скоростта, както при механичното управление, „коравината на управлението“ да нараства. Ако това е осигурено от специални автомати, летецът чрез лоста за управление усеща промяната на режима на полета, а пределният коефициент на усилване е разположен извън диапазона на статичните характеристики на управляемост. Благодарение на големия резерв по коефициент на усилване колебателната неустойчивост е изключена при нормални функции на летеца.

Същественото предимство на тази двигателна (кинестетична) информация е, че тя е защитена от смущения и заедно с останалите усещания (вибрации, шум, посока на претоварването) спомага на летеца да управлява с автоматизирани движения. На някои режими (големи ъгли на атака) даже умишлено се създава полезно тресене на лоста за управление като предупреждение за доближаване на пределен режим. Игнорирането на този вид информация, което се получава реално при някои опростени тренажори, е основната причина за чувството на летеца, че тренажорът не е самолет. При такива симулатори се ограничава процесът на изграждане на верен концептуален модел на полета само чрез тренировки на земята в моделирани условия.

Ситуацията започна да се променя през 70-те години, когато внедряването на бордови изчислителни комплекси и електродистанционни системи за управление стана масово явление.

#### Тенденции в ролята на вътрешните двигателни обратни връзки

След 70-те години започна тенденция за опростяване на натоварващите механизми и централния лост за управление. Появиха се странични ръчки с много малък ход, върху ръкохватките на които се разполагат множество бутони за въвеждане на команди на летеца и превключване на различни режими от системата за управление. С такива ръчки обикновено се използват пружинно-натоварващи механизми, които не променят коравината си по режима на полета. Задачата за устойчивост на контура за управление в такъв случай се решава от бордовата ЕИМ. Пилотът и неговите команди се контролират и доработват непрекъснато. Съществуват експериментални странични лостове за управление, при които балансирувщото положение не се променя с изменение на центровката и скоростта на самолета, а се променя само положението на кормилото, което е грижа на електродистанционната система за управление (ЕДСУ) и ЕИМ. Летците на самолети с подобни системи за управление могат да усетят, че в управлението „някой непрекъснато се намесва и коригира командите“, защото се променя

съществено установилата се практика на ръчно пилотиране. Тази тенденция не среща подкрепа от повечето пилоти и затова в по-нататъшното развитие на системите с ЕДСУ в паметта на ЕИМ се залага зависимост между балансиращото положение на лоста и скоростта на полета. Споменатото опростяване на ролята на вътрешните обратни връзки по усилие на съвременните самолети се придружава и от нова дисплейна технология за изобразяване на положението на самолета в пространството. На централния дисплей чрез компютърна визуализация се представя модел на полета, създаден по принципа „гледане на самолета от наблюдател“ — на фона на изображение на земната повърхност. Тази информация е особено полезна за военните пилоти, които изпълняват разузнаване, поддържане на сухопътните войски от въздуха и унищожават цели върху земната повърхност. Тя подпомага пилота при пълно отсъствие на видимост, когато, например, преднамерено се затваря със специални щори остъкленето на кабината при използване на ядрено оръжие (Б-52) и при кацане в сложни условия. Този сравнително нов информационен елемент в пилотирането по прибори е опит да се реши почти полувековния спор за формиране на адекватен образ на полета чрез приборната информация. Психологическото предимство на изображението от типа „гледане на самолета от наблюдател“ е доказано в експерименти и се обяснява плавно от обстоятелството, че при отсъствие на естествен хоризонт център за ориентация в пространството става самолетът. Модерните технологии променят характера на работа на пилота — завишават се изискванията за операторски умения и това оправдава двучленния екипаж при маневрените военни самолети. Новите технологии са в състояние да осигурят управлението и на маневрен безпилотен самолет при изпълнение на реална задача по бойно използване (например, проект Х-36 на Боинг). С роботизацията на бойните самолети се цели да се запази най-трудно възпроизводимото във военната авиация — човекът и натрупания от него опит.

### Изводи

Основният и най-важен извод от споменатите тенденции в управлението на съвременните самолети е, че пилотът все повече се намира в моделиран контур за управление — най-подходящ от психофизиологична гледна точка. Свойствата на самолета, променящи се в широк диапазон, чрез системата за управление (ЕДСУ и ЕИМ) се свеждат до най-удобния за пилота динамичен модел.

Опитът от авиацията и особено от космонавтиката определя в бъдеще все по-значителна роля на моделираните условия на полета при формиране на пилота. Съотношението между времето за работа на тренажор и реален полет зависи от етапа на подготовка и от характера на полетните задания. При изпитателни полети на въздушнокосмически апарати това съотношение може да бъде 30:1 в полза на тренажорите. Себестойността на един час „полет“ на тренажор е от 10 до 100 пъти по-ниска от същото време при реален полет като ефективността на обучението е практически една и съща. По мнението на специалисти по инженерна психология [7] времето за подготовка на летци чрез тренажор се намалява три пъти, а това време при традиционни методи на подготовка е 25% от общия летателен стаж.

Ролята на пилота като основно звено в контура за управление вероятно ще се запази за транспортните самолети, малката авиация и ще се променя за тактическата авиация в посока — увеличаване на операторските функции.

В бъдеще ще се стеснява полето за адаптация на пилота към свойствата на самолета. Тези функции ще поеме системата за управление. Практически безпроблемната еволюция от централен щурвал към странична ръчка за управление разкрива възможности за използване на много от съществуващите идеи в компютърните игри за създаване на специализирани опростени тренажори. Общата психологична структура на летателната дейност е заложена като основа в създаването на такива компютърни модели на полета, а това е най-важното изискване за съответствие между биомеханичните системи „пилот—самолет“ и „пилот—тренажор“.

## Литература

1. Авиационно. Експрес-информация. — ВИНТИ, Москва, 1984, № 47, с. 18; 1985, № 36, с. 25; № 47, с. 38.
2. Йорданов, Д. В. Летателни апарати — системи за управление. С., Изд. Мадара-Принт, 1999.
3. Береговой, Г. Т., А. А. Тищенко, Г. П. Шибанов, В. И. Ярополов. Безопасность космических полетов. М., Машиностроение, 1977, 97—106, 219—231.
4. Бюнгенс, Г. С., Р. В. Студнев. Динамика продольного и бокового движения. М., Машиностроение, 1979, 106—107.
5. Делчев, О. Пилотите днес — продукт на една нова философия. — Авиофорум, 1993, бр. 5, издание на авиокомпания „Балкан“.
6. Делчев, О. Компютрите не са емоционални. — Авиофорум, 1991, бр. 6, издание на авиокомпания „Балкан“.
7. Денисов, В. Г., В. Ф. Онищенко. Инженерная психология в авиации и космонавтике. М., Машиностроение, 1972, 59—74, 125—133.
8. Aviation magazin international, 1987, No 941. Cockpits nouveaux.

Постъпила на 7.IV.1997г.

## Evolution of internal feedbacks

*Dimitar Jordanov*

(Summary)

In the review, the engineering-psychological aspects of airplane control circuits are considered. The fundamental role of the kinesthetic (motor) internal feedbacks is discussed based on the results from a stability study of a modelled control circuit. The tendencies for modification of the control lever in the cabin, and simplification of the motor component of the pilot's action are shown.

## Някои особености на процесите триене и износване във вакуум

*Юлика Симеонова, Тинка Грозданова,  
Людмила Динкова*

*Институт за космически изследвания, БАН*

Научният прогрес е неразривно свързан с потребностите на практиката и това в пълна степен се отнася за изследването на процесите триене и смазване във вакуум.

Първите изследвания на триенето във вакуум са свързани с името на Шарлоте Якоб (1912 г.), а първата техническа задача в тази област — с експлоатацията на рентгеновите тръби с въртящ се анод (1936 г.).

През 1930 г. Шоу и Леви провеждат експерименти за определяне на коефициента на триене във вакуум при различни трибодвойки от едноименни и разноименни метали [1]. Кофин развива идеята, че способността на металите да образуват сплави тук е от решаващо значение, а Мак-Лин прави класификация на някои материали по тяхната склонност към образуване на студена заварка при триенето във вакуум. През 1965 г. Бакли и Джонсън изучават фрикционните и адхезионните свойства на някои материали в свръхвисок вакуум [2].

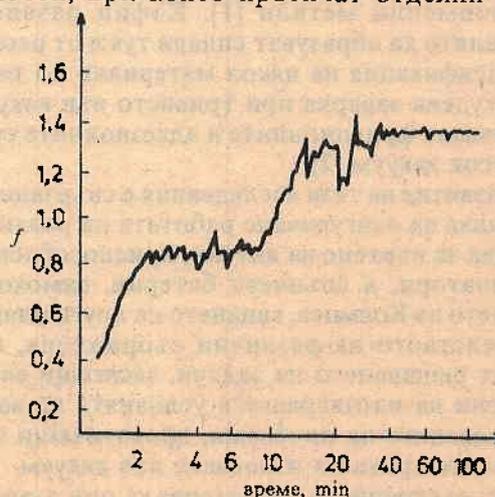
Същественото развитие на тези изследвания е свързано с потребностите на космическата техника за осигуряване работата на различни задвижващи механизми, устройства за въртене на антени, приспособления за отваряне и затваряне на илюминатори, и слънчеви батерии, самоходни космически обекти и др. Усвояването на Космоса, кацането на други планети, придвижването по тях, строителството на различни съоразения, изследването на грунта и др. изискват решаването на задачи, засягащи експлоатацията на трибовъзли, подложени на натоварване в условията на вакуум [3]. Всички те са свързани с решаването на проблеми, произтичащи от специфичните особености на процесите триене и износване във вакуум.

Както е известно, състоянието на материала при взаимодействието на повърхностите се определя от сложна съвкупност от механични, физико-

химични и други процеси, протичащи в тънкия повърхностен слой. Една от съществените особености на триенето във вакуум е, че процесите засягат не само микрогеометрията на повърхността, а и нейното физикохимическо състояние, определяно от присъствието на защитни окисни слоеве и адсорбционни структури, или от състоянието ѝ като изчистена, химически активна повърхност. Затова процесите на взаимодействие във вакуум се разглеждат в два етапа: 1) разрушаване и премахване на окисните слоеве и 2) работа при непосредствен (ювенилен) контакт. По тази причина от значение е степента на разреденост на работната среда (вакуума) и особено частното налягане на активните компоненти на остатъчния газ в нея, а налягането в системата се разглежда като параметър, оказващ влияние върху състоянието в контакта.

За оценка на вакуумните условия А.Силин въвежда като параметър отношението между времето на единичния контакт и времето, необходимо за изменение на състоянието на повърхността под влияние на средата [4]. Първото се определя от режима на трибопроцеса и в частност от скоростта на триене, а второто — от времето, необходимо за образуване на окисни и други вторични структури. Според Силин вакуумните условия настъпват тогава, когато това отношение стане по-малко от единица.

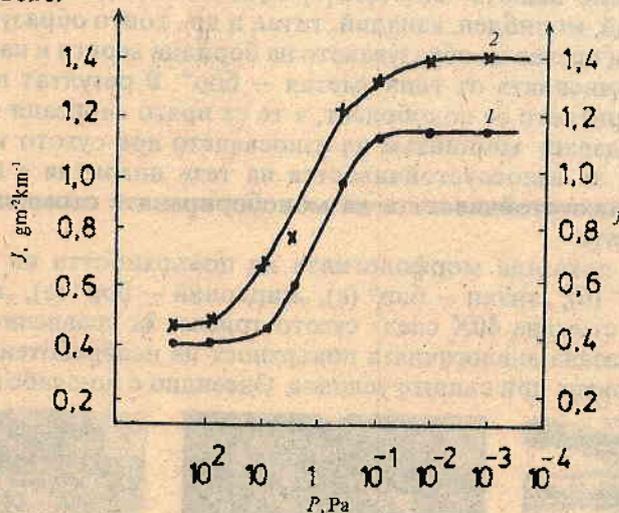
Зависимостта на коефициента на триене от времетраенето на процеса дава известна представа за настъпващите промени върху повърхността при триенето във вакуум. На фиг.1 е показана тази зависимост, получена при сухо триене във вакуум  $10^{-4}$  Pa със скорост 0,25 m/s с трибодвойка, съставена от „образец“ — стомана 40X (ГОСТ), и индентор от закалена стомана 45 (HRC 50), по методиката, описана в [5]. Нейният начален етап се характеризира със сравнително ниска стойност на коефициента на триене, докато не бъде разрушен повърхностният окисен слой. След това той нараства, съответствайки на етапа на взаимодействие между изчистените метални повърхности, при които протичат отделни процеси на микро-



Фиг.1. Зависимост на коефициента на триене от времетраенето на процеса при триене във висок вакуум

зацепване и процеси на локални структурни промени. След този етап настъпва т.нар. претриване в контакта, при което коефициентът на триене относително се стабилизира. Времето, необходимо за стабилизация, зависи от множество фактори и се определя експериментално.

Друга характерна особеност на триенето и износването във вакуум е свързана с т.нар. прагов интервал на налягането, предизвикан от изменението на количеството на кислорода в остатъчния газ, при което се променя кинетиката на окислителните и адсорбционните процеси. На фиг.2 е показана зависимостта на интензитета на износване  $J$  от налягането (степената на вакуума) — кривата 1 при горната трибодвойка и при указания триборежим. Праговият интервал на налягането —  $10-10^{-1}$  Pa е добре изразен с характерното стръмно нарастване на износването. Разположението на този интервал зависи от скоростта на триене и при по-малките скорости се измества към по-високите стойности на налягането. Влиянието на скоростта на триене върху износването е свързано с температурата в контакта, определяща химическата активност на повърхностите, дифузията, образуването на нови фази, десорбцията, състоянието и дебелината на окисните слоеве.



Фиг.2. Зависимост на интензитета на износване (1) и на коефициента на триене (2) от степента на вакуума

Характерът на изменението на коефициента на триене в зависимост от налягането е сходен с характера на изменение на износването, но преходният интервал на налягането тук е по-слабо изразен — фиг.2, крива 2. При по-високите скорости на триене стабилизацията на коефициента настъпва при по-висок вакуум в сравнение с кривата на износване. Тук, разбира се, от съществено значение са свойствата на самите материали и настъпващите структурни изменения на повърхностния слой, а също така и неговото газоотделяне в условията на вакуума.

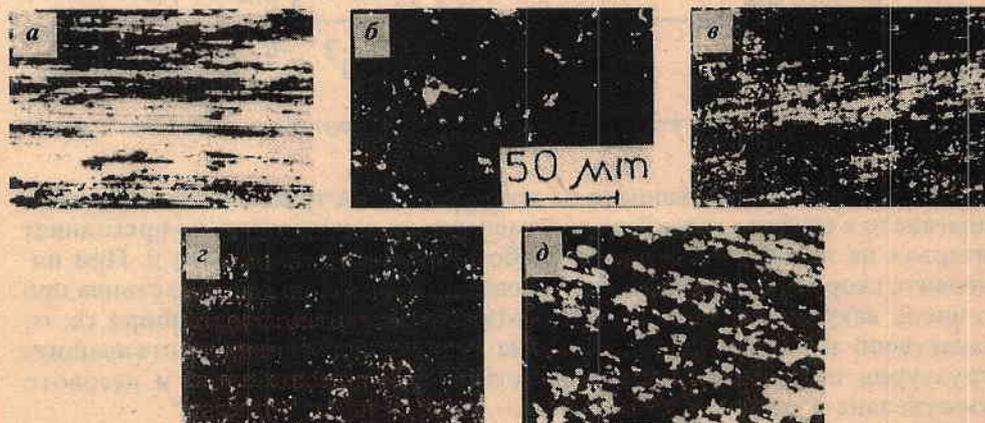
Въглеродните стомани в изследвания вид не представляват интерес за непосредствено приложение в Космоса, поради тяхната склонност към

образуване на студена заварка при сухото триене във вакуум. Но между различните хетерогенни сплави те са най-удобни за подобни изследвания [3]. Поради сравнително простия си химически състав не затрудняват интерпретацията на опитните резултати, а техните закономерности и особености при триенето, и износването във вакуум в голяма степен могат да бъдат отнесени към широк кръг легирани стомани.

За космически приложения перспективни са въглеродните стомани, подложени на термохимическа обработка за създаване на подходящи покрития [6]. Чрез тях съществено се подобряват антифрикционните свойства на повърхността. Много подходящо за целта е термодифузионното борирание на ниско- и средновъглеродните стомани, чрез което се повишават микротвърдостта, термичната, антикорозионната и противозадиращата устойчивост. Боридните слоеве върху стоманата не образуват студена заварка в контакта, затова са подходящи за сухото триене във висок вакуум.

Нашият опит показва, че износоустойчивостта на борираните стомани може съществено да се подобри чрез въвеждане на междинен метал с предварителна дифузионна обработка на стоманата преди нейното борирание. Съгласно нашата хипотеза [7], за целта са подходящи преходните метали: цирконий, молибден, ванадий, титан и др., които образуват металоподобни връзки и пречат на образуването на боридни вериги и на ковалентни връзки при съединенията от типа „метал — бор“. В резултат пластичните свойства на покритието се подобряват, а те са пряко свързани с адхезията, която е преобладаващ механизъм на износването при сухото триене. Това обяснява факта, че износоустойчивостта на тези покрития е по-голяма в сравнение с износоустойчивостта на моноборираните стомани и особено на необработените.

На фиг.3 е показана морфологията на повърхността на покритията „ванадий — бор“ (б), „титан — бор“ (в), „цирконий — бор“ (г), „молибден — бор“ (д) върху стомана 40X след сухото триене. За сравнение на същата фигура (а) е показана аналогичната повърхност на необработената стомана 40X след сухо триене при същите условия. Очевидно е по-слабото износване



Фиг.3. Микрофотографии на триещата повърхност след сухо триене на стомана 40X преди нейната обработка и след термодифузионното и борирание с различни междинни преходни метали

(светлите участъци) при комбинираните боридни покрития в сравнение с необработената повърхност, както и зависимостта на вида на износването от междинния метал. При съпоставяне площта на следите от износване най-благоприятни са покритията „цирконий — бор“ и „ванадий — бор“. Макар и малко по-неблагоприятни по този показател, покритията „титан — бор“ и „молибден — бор“ по своите трибологични параметри са подходящи за сухо триене [8]. Тази особеност при сухото триене на въздух е в сила и при сухото триене във вакуум. Трибологичните изпитания на тези материали показват тяхната приложимост в условията на висок вакуум и респективно в Космоса.

#### Литература

1. Shaw, P., E. Leavy. Friction of dry solids in Vacuo. — Phil Mag., 10, 1930.
2. Buckley, D. H., R. L. Johnson. Influence of crystal structure on friction characteristics of rare-earth and related metals in vacuum to  $10^{-10}$  mm of Hg. — ASLE Trans., 8, 1965, No 2.
3. Крагельский, И. В. и др. Трение и износ в вакууме. М., Машиностроение, 1973.
4. Силин, А. А. Метод оценки влияния окружающей среды на процессы внешнего трения и износа. — В: „Научные принципы и новые методы испытания материалов для узлов трения“. М., Наука, 1968.
5. Simeonova, Ju., K. Danev, E. Assenova. Method of tribological parameters study under dry friction and high vacuum conditions. — J.Balkan Trib.Assoc., 1, 1995, No 2, p. 161.
6. Войнов, Б. А. Износостойкие сплавы и покрытия. М., Машиностроение, 1980.
7. Gidikova, N., Ju. Simeonova, D. Petkova. Antifriction coatings produced by high temperature diffusion treatment. — Mat. Sci. Eng., Let. A 184, 1994, L1.
8. Gidikova, N., R. Kovacheva, Ju. Simeonova. Titanium- and Molybdenum-boride composite coatings on steels. — Pract.Metallogr., 33, 1996, No 3, p. 154.

Постъпила на 25.III.1997г.

### Some peculiarities of the processes friction and wearing out in vacuum

*Yulika Simeonova, Tinka Grozdanova,  
Lyudmila Dinkova*

#### (Summary)

The peculiarities of the processes friction and wearing out in vacuum in carbon steels and their antifriction covers have been studied. The dependence of the friction coefficient on duration of process, and vacuum intensity, as well as the dependence of wear out intensity on vacuum intensity have been established. A threshold pressure interval has been observed where friction and wear out coefficient increase greatly has been observed. The morphology of the friction surface of non-processed lowcarbon-content steel, and its cover, following thermodiffusive saturation with borium and metallization with different transitive metals has been shown. The obvious favorable effect of the cover on the wear out resistance of the friction surface has been verified.

## Neural networks in classification of remotely sensed multichannel images— A case study

*Hristo Nikolov*

*Solar Terrestrial Influences Laboratory (STIL),  
Bulgarian Academy of Sciences*

In this paper are presented recently obtained results concerning the classification of remotely sensed multichannel data using neural networks. A structure of the neural network is proposed and it is chosen a training method among the well known methods. Moreover, the procedure applied for preparation of the training data is described as well as the initial conditions under which the training was performed. Also several configurations of the neural network with different number of neurons in the hidden layers ranging from three to eight are compared. The results obtained after classifying an image containing more classes than those included in training set are reported.

### 1. Introduction

A final stage in the classification of multichannel data obtained by remote sensing techniques is creation of "a digital image, a map of classified pixels" (Remote Sensing). Using statistical methods, as maximum likelihood, it is possible to aggregate each pixel from an image to some of the previously formed clusters based on its spectral signatures in the  $n$ -dimensional wavelength space. Following the statistical approach to achieve high accuracy first large sets of data have to be analyzed to find out statistically confident and significant features for each cluster. Afterwards, in the real data processing, it is necessary to compute the degrees of probability for belonging for each of the pixels to every one of the formed clusters and then to make the final decision. It is obvious that this procedure is a computationally hard and time consuming. In the following sections of this paper a neural network based classifier is proposed, which overcomes the above mentioned disadvantages in resolving the classification task. The advantages of the neural networks approach over the

statistical one in resolving problems where *a priori* knowledge of the data processed is not available are discussed by many investigators [1]. Here should be outlined that "the neural network classifications are not the best possible, but probably no worse than typical ones" [2].

## 2. Theoretical background

In the recent years the development in the theory and practical implementation of the neural networks has proved their capabilities in pattern recognition, which could be "regarded as extension of the conventional techniques" in this field [3]. They offer very powerful general framework for representing non-linear mappings between multidimensional input and output. This mapping is accomplished by set of functions  $Y_k(X, W)$ , where  $X$  are the input parameters and  $W$  are parameters of the network called weights. In order to achieve particular mapping between an arbitrary input and its corresponding output a non-linear basis functions, called activation functions, which have to be differentiable, must be applied. The last property is extremely important for the network training, because it is the necessary condition which allows for conjugate gradient-based methods to be used in the training phase. In many cases a sigmoidal function, which has the form:

$$F(k) = \frac{1}{(1 + \exp(-k))}$$

is utilized as activation function, because it fulfills the mentioned requirement. In some investigations the hyperbolic tangent has been used as activation function, but here only sigmoidal functions will be regarded.

Let's consider a neural network structure with two processing layers, called multi-layer perceptron (MLP) (Fig. 1), which is mathematically represented by the equation:

$$Y_k(X) = \sum_j^M W_{kj} F\left(\sum_i^I W_{ji} X_i\right)$$

This structure can approximate any continuous mapping with accuracy compared with or higher than this achieved by other methods, if the number of hidden units  $M$  is large enough. One thing that must be outlined here is that this structure has generalization capabilities i.e. it can give reasonable output to the input not included in the set of patterns used during training. This means that it not only can interpolate the input data, but also to extrapolate them. This quality is essential when dealing with remotely sensed data, because the data used for training the network are only representative samples derived from a real scene and, as rule of the thumb, the spectral signatures of the land cover types vary between scenes even acquired by one the same sensor due to changes in atmospheric conditions, illumination etc.

## 3. Method and data

In this case study the main aim is to introduce the manner how a neural network was applied as a classification engine for several basic types of land cover based on their multispectral signatures received by remote

sensing techniques. The procedure of training data preparation, network training and classification was divided in the following steps as shown on Fig. 1.

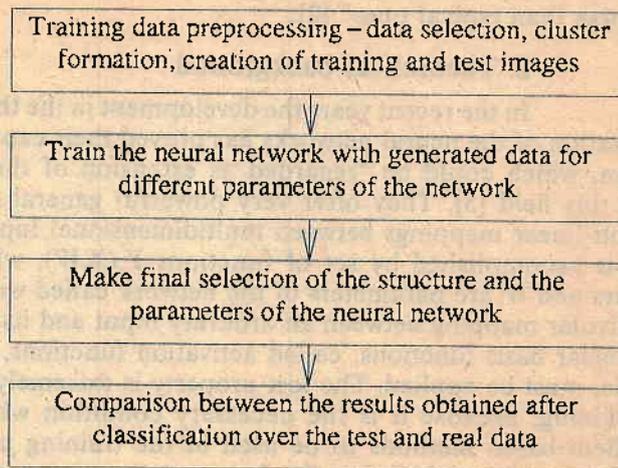


Fig.1. Major steps used during the neural network training and classification

The main processing structure was chosen to be a multi-layer perceptron (MLP) with two hidden layers (Fig.2), with sigmoidal activation functions for processing elements, trained by backpropagation. This number of layers was considered to be sufficient since with this number of hidden layers a mapping with accuracy more than 95% between the inputs and the output was achieved [4].

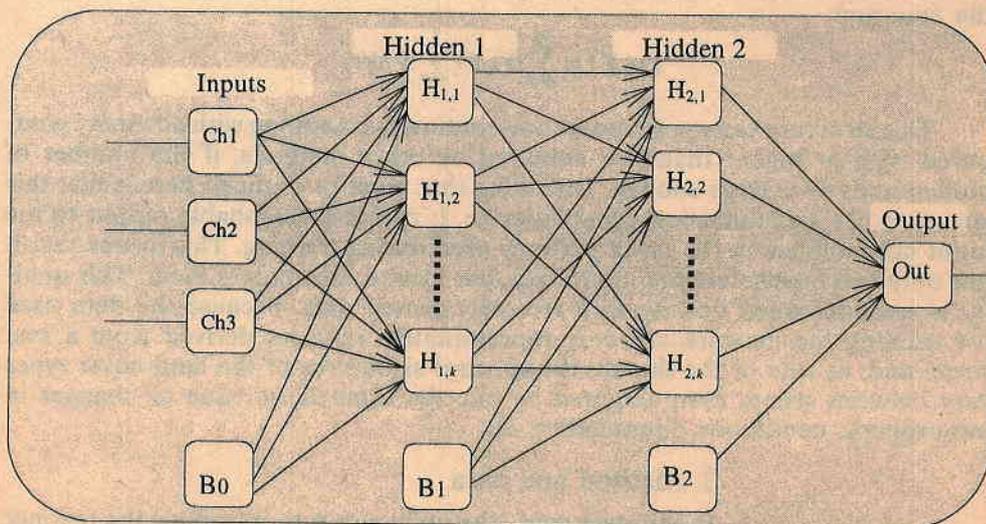


Fig. 2. Proposed neural network structure: input layer with three inputs for each of the spectral channels, two hidden layers with varying number of neurons ( $k=3, \dots, 8$ ), one output

The structure of the neural network and training method was selected according to the following criteria:

- convenient structure corresponding to the classification (pattern recognition) task;
- accuracy of the results after classification;
- adequate behaviour when data not included in the training set are presented for classification ;
- good speed of training;
- simplicity in software realization.

It has been reported that some other training methods (cf. LVQ) suit better for classification purposes than backpropagation, but this holds true only if all possible input patterns have been included in the training set.

One of the keys to successful implementation of neural networks is the selection of the training data i.e. to extract a set of representative feature vectors within the problem domain. In this case the training and the test data were taken from a pre-processed subscene with dimensions 512x512 pixels representing the North-West part of Bulgaria. This subscene is from the French satellite SPOT (instrument High Resolution Visible — HRV) in three spectral channels. Those training data were used to form the feature vectors during the training of the neural network, which had to perform the classification procedure. The training input patterns consists of a 4-tuple where the first three values are digital numbers (DN) representing the reflected by the Earth's surface solar radiation in the corresponding spectral channel and the last one is the number of the class to which this type belongs to.

In the subscene the following four types of land cover were present (bare soil, vegetation, water, limestone). The spectral signatures for this basic classes were obtained from a catalogue of SPOT imagery [5] and visual observations of the subscenes. After applying statistical methods for cluster formation on the data available for the three spectral channels four clusters were formed (Fig. 3).

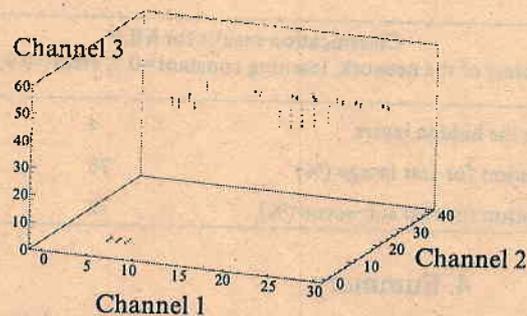


Fig. 3. Clusters used for training data creation (the values are percentage of the real DN, which vary from 0 to 255)

Using this spectral signatures one training and one test artificial images were created. They consist of arbitrary distributed non-overlapping rectangulars with random dimensions [4].

A comparison between the number of iterations for training and the speed of execution during the training phase both as a function of number neurons in the hidden layers, achieving one and the same accuracy, is presented on the Fig. 4. This picture clearly shows the reasons why we considered six to be the satisfactory number (in sense of above defined criteria) of neurons in every one of the hidden layers.

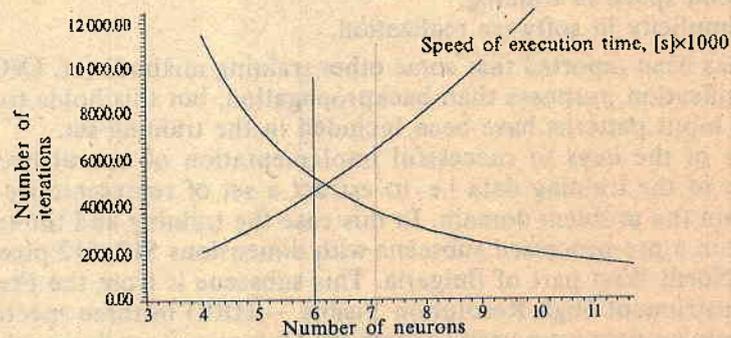


Fig. 4. Selection of the sufficient number of neurons based on iterations needed for training and execution time during training

In Table 1 the results of the performance of the neural network over the test and the real image are presented. In this table also are given the learning parameters used in the training phase.

Table 1. Comparison of the results after classification performed over the test and the real images

Classification results for MLP			
Training parameters of the network: learning constant=0.5; error=0.9; momentum=0.5			
Number of neurons in the hidden layers	4	6	10
Accuracy in classification for test image (%)	78	88	94
Accuracy in classification for real sub-scene (%)	72	83	88

#### 4. Summary

In this paper have been presented the results from a recently completed project. An attempt has been made to introduce, step by step, the methodology applied to solve a real problem, namely classification, in remote sensing technology.

**Acknowledgement.** This work has been financially supported by the National Scientific Foundation, Ministry of Education, Science and Technology under grant No My-17/In.

## References

1. Bischof, H., W. Schneider, B. A. Pinz. Multispectral classification of Landsat-image using neural network. — IEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 30, 1992, No 3, 482–490.
2. Furby, S. A Comparison of Neural Network and Maximum Likelihood Classification. Technical Note No.I.96.11, Jan 1996, JRC, Ispra, Italy.
3. Bishop, C. M. Neural Networks: A Pattern Recognition Perspective. Technical Report: NCRG/96/001, Jan 1996.
4. Nikolov, H. et al. Final report of the grant number grant No My-17/In, Sofia 1996, Bulgaria.
5. SPOT IMAGE, The Catalogue of SPOT Products and Services. Toulouse Cedex - France, 1990.
6. Remote Sensing: Quantitative Approach. Swain, P. H., Davis, L.S., N.Y., 1980.

Received 18.VII.1997

### Приложение на невронни мрежи при класификация на многоканални изображения, получени при дистанционни изследвания

*Христо Николов*

(Резюме)

В настоящата работа са представени резултати, получени при класификация на многоканални изображения от дистанционни изследвания на Земята, използвайки невронни мрежи. Предложена е топологична структура на невронната мрежа (НМ) и е обоснован изборът на метод за обучението ѝ между известни методи за обучение по дефинирани в статията критерии. Описани са също така процедурите за подготовка на множеството обучаващи данни и за избора на началните условия, при които е извършено обучението на НМ. Извършен е сравнителен анализ относно поведението и получаваните върху тестови данни резултати след обучение на НМ при различен брой (от 1 до 8) неврони (обработващи елементи) в скритите слоеве на НМ. Систематизирани са получените след класификация резултати, като в подлежащото на класификация изображение се съдържат по-голям брой класове от тези, включени в обучаващото множество.

## Определяне на някои аеродинамични характеристики на въздушно-космически летателен апарат в режимите на кацане чрез моделиране на обтичане с откъсване на потока

*Красимир Стоянов*

*Институт за космически изследвания, БАН*

Съвременното ускорено развитие на аерокосмическите техника и технологии е обусловено от последните постижения на фундаменталните науки. Новите научни резултати в теоретичната и експерименталната аеродинамика, развитието на ефективни методи за получаване и обработката на големи масиви експериментални данни дават възможност да се определят рационални аеродинамични форми и да се създават летателни апарати с необходимите аеродинамични свойства.

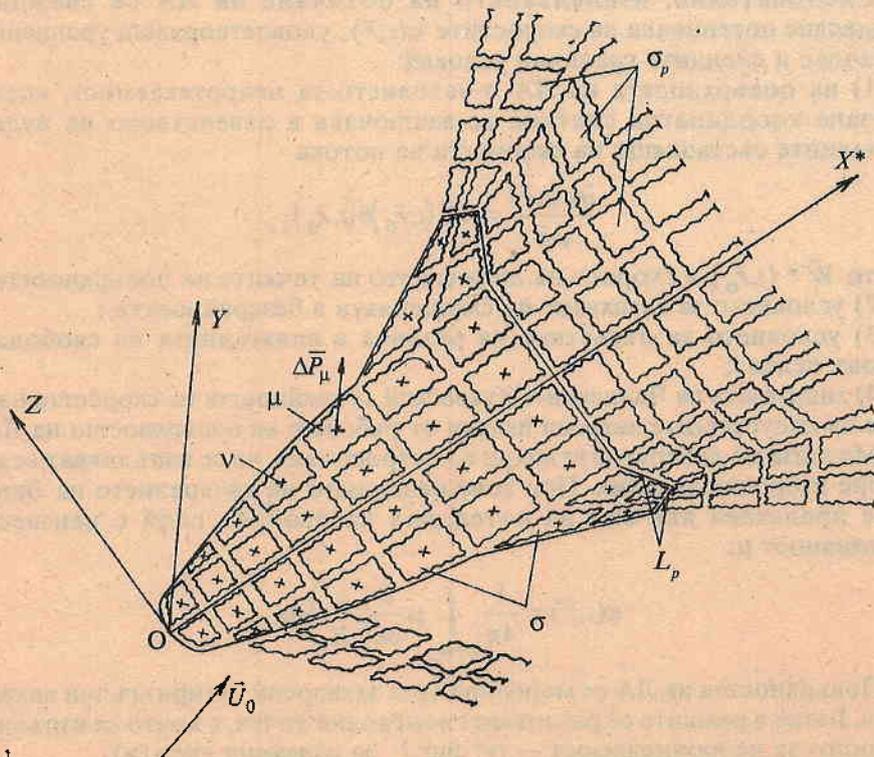
В процеса на създаване на съвременни летателни апарати и особено на такива, каквито са въздушно-космическите се налага да се удовлетворяват много, като правило, противоречиви изисквания. Паралелно с това трябва да се решават и изискванията, заключаващи се в осигуряването на надеждна топлиназащита и устойчивост [1]. Широкият експлоатационен диапазон от скорости и височини на полета и необходимостта от добри аеродинамични характеристики в значителна степен предопределят външния облик на летателния апарат (ЛА). Аеродинамичната форма на ЛА удовлетворява изискването за получаването на разнообразни аеродинамични характеристики. Много от тези характеристики е невъзможно или трудно да се получат по експериментален път. Провеждането на летателни изпитания и извършването на множество експерименти в аеродинамични тръби е съпроводено със значителни загуби на време и материални разходи. Ето защо стават актуални проблемите, свързани с разработването на достоверни и ефективни математически модели на аеродинамиката. Появи се възможност достатъчно бързо и с минимални загуби да се изследват

аеродинамичните характеристики и сложните процеси на обтичане на ЛА, в това число и на такива важни режими, каквито са излитането и кацането.

Предмет на настоящата статия е да представи особеностите на моделирането и получените резултати от него на въздушно-космически летателен апарат.

Полетът на ЛА в режимите на излитане и особено на кацане се извършва на значителни ъгли на атака и е съпроводен с проявяването на нелинейни аеродинамични ефекти. В основата на моделирането на обтичане с откъсване на потока са положени предположението за идеална несвиваема течност и метода на дискретните вихри [2] в неговата модификация — метода на вихровите рамки [3]. Определянето на аеродинамичните характеристики се провежда в стационарна и в нестационарна нелинейна постановка в диапазон от ъгли на атака  $\alpha$  от 0 до  $40^\circ$ . Моделирането на въздушно-космическия ЛА е осъществено с помощта на плоско-пространствени вихрови схеми. Приведено е сравнение между резултатите от определянето на аеродинамичните характеристики и експерименталните данни, получени в аеродинамична тръба на малки дозвукови скорости на потока ( $0 \leq M \leq 1$ ) и отразени в [4].

Допуска се, че ЛА се движи в несвиваема среда без триене с постоянна плътност  $\rho$ . Нека повърхността на ЛА в неподвижна координатна система се описва с уравнението  $\sigma_p(r, t) = 0$ . Зад ЛА има вихрова следа от повърхностите на тангенциалния разрыв на скоростта  $\sigma_p$ ,  $p=1, 2, \dots, k$  (фиг. 1). Местата на напускане на вихровите пелени  $L_p$ ,  $p=1, 2, \dots, k$  от повърхността на ЛА и (или) ръбовете са фиксирани и предварително известни.



Фиг. 1

Допуска се, че полето на смутените скорости  $\vec{v}(t, \vec{r})$  е потенциално навсякъде извън повърхността  $\sigma$  и вихровата следа  $\sigma_p$ , сходяща от ЛА:

$$(1) \quad \vec{v}(t, \vec{r}) = \vec{\nabla}\varphi(t, \vec{r}).$$

Потенциалът на смутените скорости  $\varphi(t, \vec{r})$  се явява хармонична функция, т.е. удовлетворява уравнението на Лаплас [5, 6]

$$(2) \quad \Delta\varphi(t, \vec{r}) = 0.$$

Тогава полето на налягането в произволна точка на пространството ще се определя от интеграла на Коши—Лагранж

$$(3) \quad p(t, \vec{r}) = f(t) - \rho \left[ \frac{\partial\varphi(t, \vec{r})}{\partial t} + \frac{v^2(t, \vec{r})}{2} \right],$$

където  $f(t)$  е функция, определяща се от началните условия на безкрайната отдалеченост.

Знаейки величината на налягането във всяка точка на повърхността  $\sigma$ , може да се намери силата, действаща от страната на течността върху тялото:

$$(4) \quad \vec{R} = - \int p(t, \vec{r}) \vec{n}(t, \vec{r}_\sigma) d\sigma,$$

където  $\vec{n}(t, \vec{r}_\sigma)$  е орта на външната нормала към повърхността  $\sigma$ .

Следователно, изследването на обтичане на ЛА се свежда до определяне потенциала на скоростите  $\varphi(t, \vec{r})$ , удовлетворяващ уравнението на Лаплас и следните гранични условия:

1) на повърхността на ЛА  $\sigma$ -условието за непротекаемост, което в свързана координатна система се заключава в равенството на нула на нормалните съставлящи на скоростта на потока

$$(5) \quad \frac{\partial\varphi(t, \vec{r})}{\partial \vec{n}} = \vec{W}^*(t, \vec{r}_\sigma) \vec{n}(t, \vec{r}_\sigma),$$

където  $\vec{W}^*(t, \vec{r}_\sigma)$  е скорост на движението на точките на повърхността  $\sigma$ ;

2) условието за затихване на смущенията в безкрайността;

3) условието за отсъствие на разлика в наляганията на свободната вихрова пелена;

4) хипотезата на Чаплигин—Жуковский за крайността на скоростта на линиите на напускащите вихрови пелени от ръбовете на повърхността на ЛА  $\sigma$ .

Методът на дискретните вихри е построен така, че се изпълняват всички по-горе изброени условия. При това решението на уравнението на Лаплас (2) се представя във вид на потенциал на двойния слой с неизвестна интензивност  $\mu$ :

$$(6) \quad \varphi(t, \vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_{\sigma+\sigma_p} \mu \frac{\partial}{\partial \vec{n}} \left( \frac{1}{R} \right) d\sigma.$$

Повърхността на ЛА се моделира чрез затворени четириъгълни вихрови рамки. Вътре в рамките се разполагат контролни точки, в които се изпълнява условието за непроницаемост — на фиг.1 са означени чрез (x).

Нека  $N_\sigma$  и  $N_p$  бъдат общо число на вихровите рамки на  $\sigma$  и  $\sigma_p$ , съответно. Векторът на скоростта  $\vec{V}(t, \vec{r})$  се определя чрез сумирането на скоростите от всички тези рамки [3].

Граничното условие за непроницаемост (5) се записва за контролните точки  $\mu$  с радиус-вектори  $\vec{r}_{\sigma v}$  ( $v = 1, 2, \dots, N_\sigma$ ) както следва:

$$(7) \quad \sum_{\mu=1}^{N_\sigma} a_{v\mu}(t, \vec{r}_{\sigma v}) \Gamma_\mu + \sum_{p=1}^k \sum_{i=1}^{N_p} a_{p_i}(t, \vec{r}_{\sigma v}) \delta_{p_i} = -4\pi \vec{V}_{\sigma v}(t, \vec{r}_{\sigma v}),$$

където  $\mu$  е номер на присъединената вихрова рамка;  $a_{v\mu}$  и  $a_{p_i}$  — коефициенти, изчисляващи се като нормални съставляващи в контролните точки;  $V_{\sigma v}$  — нормални съставляващи на безразмерната скорост на несмутения поток в контролните точки.

По такъв начин, при изпълнение на всички гранични условия, решението на задачата на обтичане на ЛА се свежда до намиране на циркулациите на вихровите рамки, моделиращи повърхността  $\sigma$ .

Тези неизвестни циркулации на всяка стъпка от изчислението се определят от решението на системата уравнения (7). Необходимо е да се отбележи, че в дадения случай отпада необходимостта да се включва в системата уравнения условието за постоянство на циркулацията по затворен контур, обхващащ обтекаемия обект и вихровата следа. Това условие се удовлетворява автоматично по силата на способа на схематизация с помощта на затворените вихрови рамки.

Определянето на аеродинамичните характеристики и картината на обтичане на ЛА са реализирани в нелинейна стационарна и в нестационарна постановка при фиксирани значения на ъгъла на атака  $\alpha$ , без плъзгане на малки дозвукови скорости.

Следва да се отбележи, че интересът към изследване на ЛА в режимите на кацане е свързан с редица причини. Характерни особености се явяват зависимостите на коефициентите на подемната сила и на момента на тангажа от ъгъла на атака —  $C_{y_\alpha}(\alpha)$  и  $m_2(\alpha)$  съответно, и тяхното отражение върху летателните свойства на ЛА (аномалии в устойчивостта и управлението), които носят нелинеен характер. Освен това се изследва възможността, използвайки моделирането на ЛА с помощта на плоско-пространствени схематизации, да се получат аеродинамични характеристики, съответстващи на данните от тръбния експеримент.

В процеса на математическото моделиране, един от принципните, се явява въпросът за схематизацията на ЛА, осигуряващ приемлива точност при минимални загуби на машинно време.

В тези случаи, когато нелинейността на аеродинамичните характеристики основно е обусловена от наличието на интензивни вихрови шнурове, образуващи се на различни участъци от краищата на носещите повърхности, се използва следният способ на схематизация. Обемният ЛА се заменя с тънки носещи повърхности, на които се разполагат хидродинамически особености. Такава схематизация позволява детайлно да се моделира вихровата следа, включително и вихровата пелена, образуваща се при откъсване на потока от страничните краища (ръбове) на тялото на ЛА.

Задачата се решава с използването на огледално изображение [2], при това ЛА се моделира с помощта на 68 хидродинамични особености (четириъгълни вихрови рамки). Местата на откъсване на потока от ръбовете на крилото и тялото са постулирани.

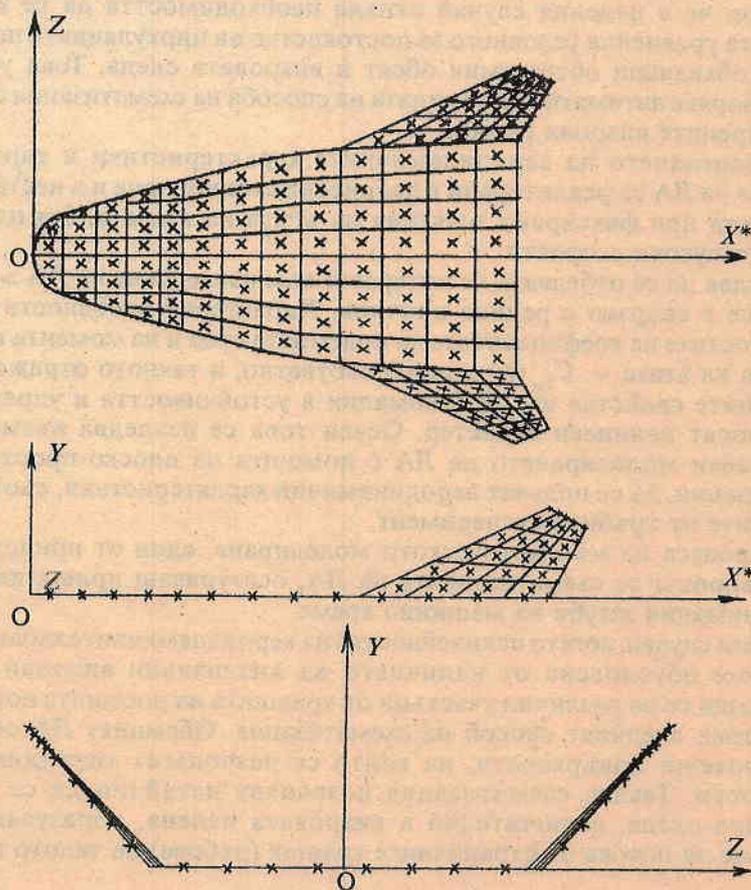
Изследвани са три режима на обтичане на ЛА:

а) с частично откъсване на потока (откъсване на потока от страничния и задния изходящ ръб на крилото и задния край на тялото);

б) с частично откъсване на потока (случай а) с добавяне на откъсване на потока от страничния край на тялото;

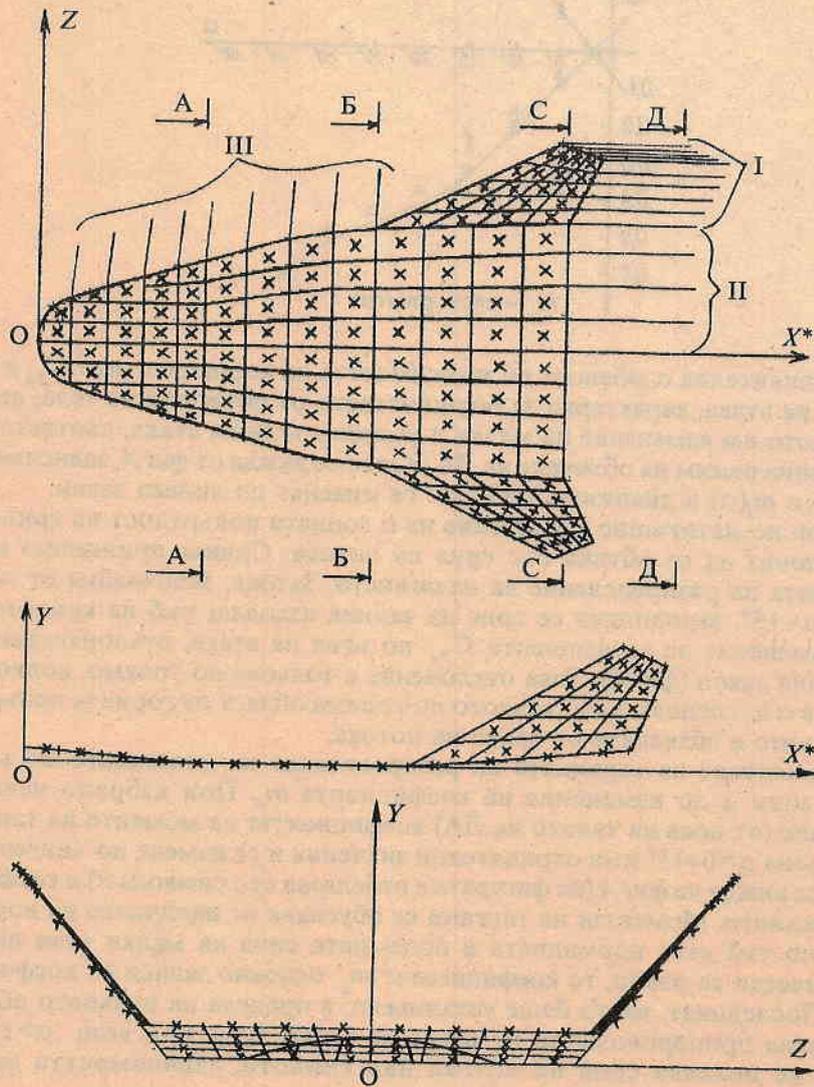
в) с пълно откъсване на потока (откъсване на потока от всички ръбове и краища на крилото и тялото).

За определяне на аеродинамичните характеристики на ЛА на малки и умерени ъгли на атака задачата се решава в нелинейна стационарна постановка чрез моделиране на обтичане с частично откъсване на потока (случай а). Използваната вихрова схема е показана на фиг.2. Трябва да се отбележи, че в процеса на изследванията не се отчита влиянието на дебелината на тялото на ЛА върху аеродинамичните характеристики (тялото се заменя с тънки пластини).

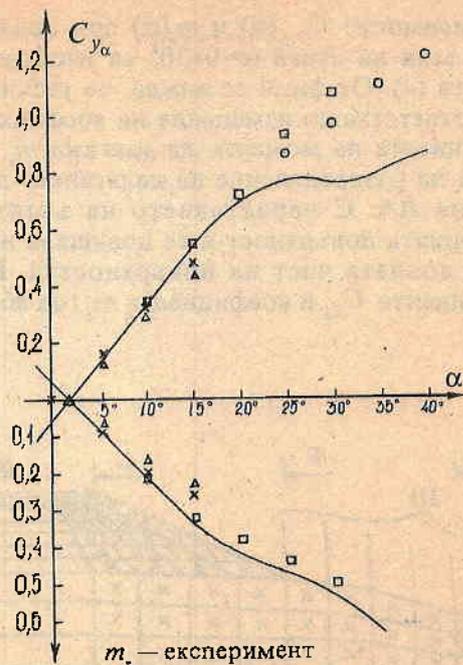


Фиг. 2

Получените зависимости  $C_{y_\alpha}(\alpha)$  и  $m_z(\alpha)$  при надлъжно движение на ЛА в диапазона от ъгли на атака  $\alpha=0+20^\circ$  са изобразени на фиг.4 и са отбелязани с кръсчета (x). От фиг.4 се вижда, че увеличаването на ъглите на атака води до съответстващо изменение на коефициента на подъемната сила  $C_{y_\alpha}$  и на коефициента на момента на тангажа  $m_z$ . Това е свързано с изменение картината на разпределение на налягането по повърхността на крилото и тялото на ЛА. С нарастването на ъглите  $\alpha$  се увеличава разреждането над горната повърхност и се повишава налягането (потокът се затормозява) на долната част на повърхността. Вследствие на това значенията на коефициента  $C_{y_\alpha}$  и коефициента  $m_z$  (по абсолютна стойност) се увеличават.



Фиг. 3



Фиг. 4

Отличителна особеност на зависимостта на коефициентите  $C_{y\alpha}$  и  $m_z$  от ъглите на атака, характерна за болшинството от обтекаемите тела, се явява линейното им изменение на малки и умерени ъгли на атака, съответстващи на плавния режим на обтичане на ЛА. Както се вижда от фиг.4, зависимостите  $C_{y\alpha}(\alpha)$  и  $m_z(\alpha)$  в диапазона  $\alpha=0+15^\circ$  се изменят по линейен закон.

При по-нататъшно увеличение на  $\alpha$  горната повърхност на крилото на ЛА започва да се обтича със свив на потока. Свивът принципно изменя картината на разпределение на налягането. Затова, започвайки от ъгъл на атака  $\alpha=15^\circ$ , зародилният се свив на задния изходящ ръб на крилото води към изменение на коефициента  $C_{y\alpha}$  по ъгъл на атака, отклонявайки го от линейния закон (фиг.4). Това отклонение е толкова по-голямо, колкото по-голям е  $\alpha$  и, следователно, колкото по-голяма област от горната повърхност на крилото е обхваната от свива на потока.

Изменение на картината на разпределение на налягането по ъгли на атака води и до изменение на коефициента  $m_z$ . При избрано начало на отчитане (от носа на тялото на ЛА) коефициентът на момента на тангажа в диапазона  $\alpha=0+15^\circ$  има отрицателни значения и се изменя по линейен закон, което се вижда на фиг.4 (на фигурата е отбелязан със символа  $\times$ ) и се обяснява със следното. Моментът на тангажа се обуславя от наличието на нормална сила, но тъй като нормалната и подемната сила на малки ъгли на атака практически са равни, то коефициентът  $m_z$  основно зависи от коефициента  $C_{y\alpha}$ . Последният, както беше установено, в предела на плавното обтичане се изменя пропорционално на ъгъла на атака. Едва при ъгли  $\alpha>15^\circ$ , при които се появява свив на потока над крилото, зависимостта  $m_z(\alpha)$  се

отклонява от линейния закон. При по-нататъшно увеличение на  $\alpha$  се появява характерно изменение на моментната характеристика  $m_z(\alpha)$  (вж. фиг.4).

Трябва да се отбележи, че характерните зависимости  $C_{y_\alpha}(\alpha)$  и  $m_z(\alpha)$ , получени при моделирането на ЛА чрез плоска схематизация (тялото се моделира с тънки носещи повърхности, лежащи в плоскостта  $OXZ$ ), преминават през началото на координатната система (фиг.4). Значенията на коефициентите на подемната сила и надлъжния момент при нулев ъгъл на атака са равни на нула, а на реалния(обемния) ЛА, като правило, ще се отличават от нула, тъй като те зависят от профила и усукването на крилото, формата на тялото и от други геометрични параметри на компоновката.

За получаване на аеродинамичните характеристики на умерени и големи ъгли на атака са проведени изследвания в нелинейна стационарна и в нестационарна постановка, при моделиране на частично откъсване на потока — случай б.

Възникването на откъсване на потока от страничния ръб на тялото и неговото влияние върху повърхността на тялото и крилото води до съответни изменения на аеродинамичните натоварвания на ЛА. Затова, отчитайки тази особеност и сложната форма на тялото на ЛА, при моделирането се използва нов вихрови модел, показан на фиг.3. ЛА се моделира с помощта на 68 хидродинамични особености. В случая е използван способа на схематизация с помощта на набор от носещи повърхности-модули. При това тялото се състои от 6 модула, а крилото от един — 7-и по ред модул. Характерна особеност се явява това, че първите три модула и шести модул на тялото са завъртени по отношение на оста  $OZ$  под ъгъл  $-5,1^\circ$  и  $+5,5^\circ$ , съответно. Крилото (седмият модул) е присъединено към шестия модул на тялото така, че да се обезпечи зададената положителна напречна  $V$ -образност. Получената вихрова схема е приета за основна в следващите изследвания.

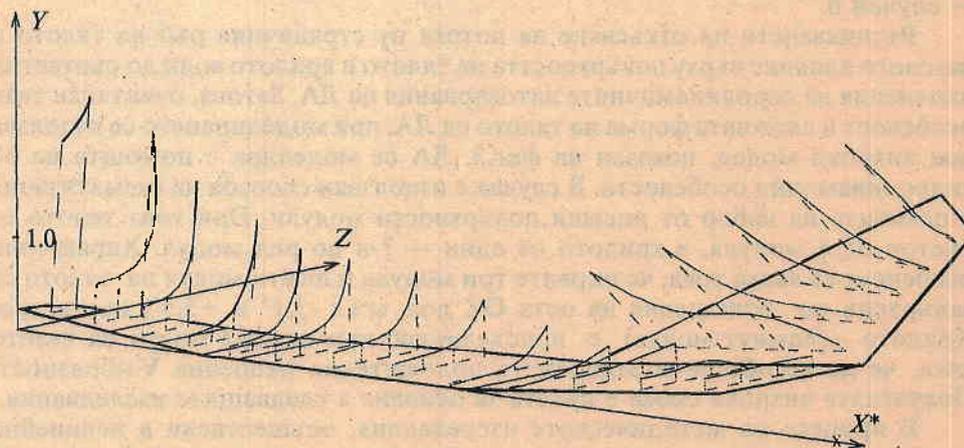
В процеса на методическите изследвания, осъществени в нелинейна стационарна постановка при моделиране на частично откъсване на потока (случай а) в диапазона от ъгли на атака  $\alpha=0+15^\circ$ , е разкрита особеност в зависимостите  $C_{y_\alpha}(\alpha)$  и  $m_z(\alpha)$  при зададената схематизация на ЛА. Установено е, че кривите на зависимостите  $C_{y_\alpha}(\alpha)$  и  $m_z(\alpha)$  не преминават през началото на координатната система. Получените нулеви значения на коефициентите  $C_{y_\alpha}(\alpha)$  и  $m_z(\alpha)$  съответстват на ъгъл на атака  $\alpha \approx 2^\circ$  (на фиг.4 отбелязани с  $\Delta$ ). При това зависимостите  $C_{y_\alpha}(\alpha)$  и  $m_z(\alpha)$  имат линеен характер. Изместени са в дясно и преминават еквиливантно относно същите зависимости, получени при моделиране на ЛА с помощта на вихрова разчетна схема (фиг.2). Причината на описаната особеност следва да се търси в използваната плоско-пространствена схематизация. Крилото, присъединено към завъртения шести модул на тялото, се оказва под неголям отрицателен ъгъл на атака по отношение на насрещния поток при нулев ъгъл на атака на ЛА.

За изследване на аеродинамичните характеристики на ЛА в диапазона  $\alpha=10+35^\circ$  задачата се решава в нелинейна нестационарна обстановка при моделиране на частично откъсване на потока (случай б).

Характерните зависимости  $C_{y_\alpha}(\alpha)$  и  $m_z(\alpha)$ , получени в указания диапазон  $\alpha=10+35^\circ$  при надлъжно движение на ЛА са изобразени на фиг.4 и отбелязани с квадратчета.

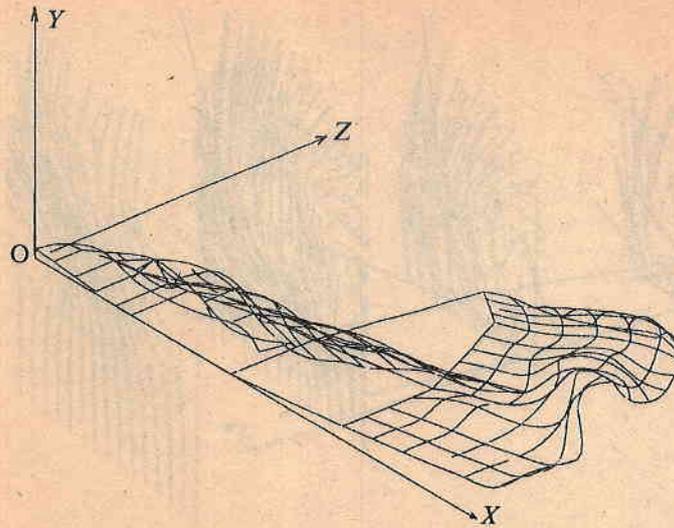
Забелязва се, че възникналото откъсване на потока от страничния край на тялото води до увеличаване на носещите свойства на ЛА. На фиг.4 се наблюдава увеличение на коефициента  $C_{y_{\alpha}}$  и ъгъла на наклона на допирателната към зависимостта  $C_{y_{\alpha}}(\alpha)$  с нарастването на ъглите на атака. Обяснението на това се заключава в откъснатата се вихрова пелена от страничния край на тялото, завъртаща се в устойчиви вихрови шнурове, които създават допълнително разреждане над тялото и крилото на ЛА.

Характерът на зависимостта на разпределението на налягането по повърхността на ЛА на малки и умерени ъгли на атака (на фиг.5 е изобразена зависимостта, получена при  $\alpha=15^{\circ}$ ) показва, че най-натоварени елементи на ЛА при пластинчатото моделиране се явяват крилото и носовата част.



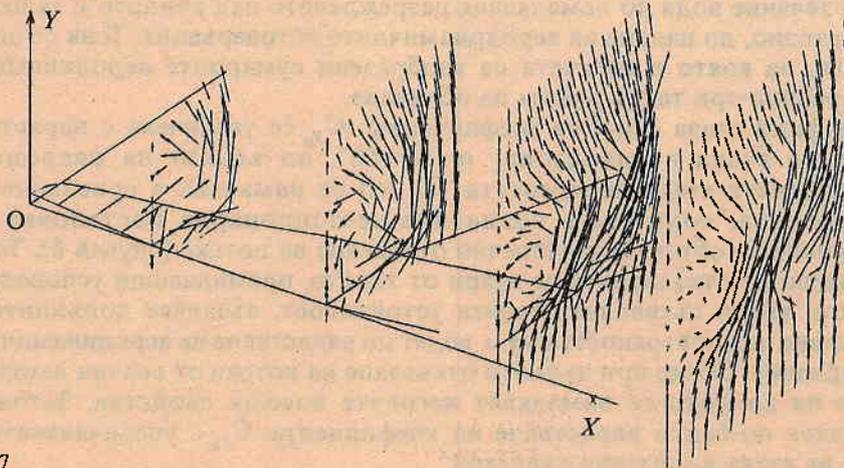
Фиг. 5

На фиг.6 е представена вихровата структура на ЛА, получена при ъгъл на атака  $\alpha=15^{\circ}$ . Вижда се, че тя се състои от три вихрови пелени: I—странична и задна на крилото, II—задна, и III—странична на тялото (фиг.3). Анализът на картината на течението показва, че като цяло вихровата структура е сформирана. Пелената III от страничния край на тялото е устойчива, за което свидетелстват съответните линии на тока близо до задния изходящ ръб на крилото и тялото. С увеличаване ъгъла на атака интензивността на вихровите шнурове на пелена III нараства. Това води до увеличаване разреждането в района на опасната част на тялото. В изследвания диапазон от ъгли на атака е установено, че вихрите от тялото не си взаимодействат с вихрите от крилото и преминават успоредно на тялото, без да се разрушават. Ясно е, че в резултат на разреждането, създавано на горната повърхност на тялото от тези вихри, се получава увеличаване на коефициента  $C_{y_{\alpha}}(\alpha)$  и коефициента  $m_z$  по абсолютна величина в диапазона от ъгли на атака  $\alpha=10+30^{\circ}$ , което се вижда на фиг.4.

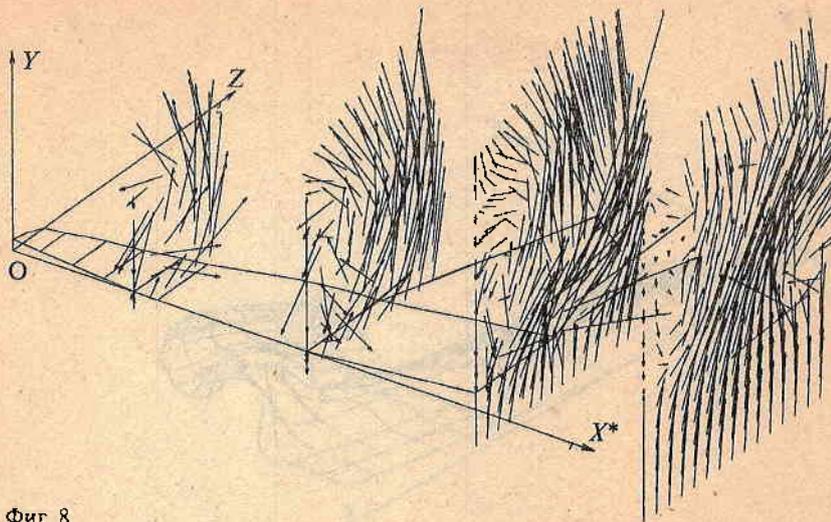


Фиг. 6

За по-пълнен детайлен анализ са били определени параметрите на потока над и зад тялото и крилото в сеченията, положението на които е показано на фиг.3. Получените полета на скоростите при обтичане на ЛА при ъгъл на атака  $\alpha=20^\circ$  са показани на фиг.7(сечения А-А, Б-Б, С-С, Д-Д). Както се вижда от фигурата, над тялото в района на сечението А-А едва започва да се формира вихрово течение. Над тялото, в района на мястото на присъединяване на крилото, в сеченията Б-Б и С-С (фиг.7) може да се отдели формирането на вихрови шнур, т.е. над ЛА в района на кърмовата част се формират два вихрови шнура, вследствие на напускащите вихрови пелени от двата странични края на тялото. Интензивността на тези вихрови шнура нараства с увеличаването на ъглите на атака, за което може да се съди по фиг.8, където в районите на сеченията Б-Б, С-С са изобразени разчетните полета на скоростите, получени при обтичане на ЛА при ъгъл на атака  $\alpha=30^\circ$ .



Фиг. 7



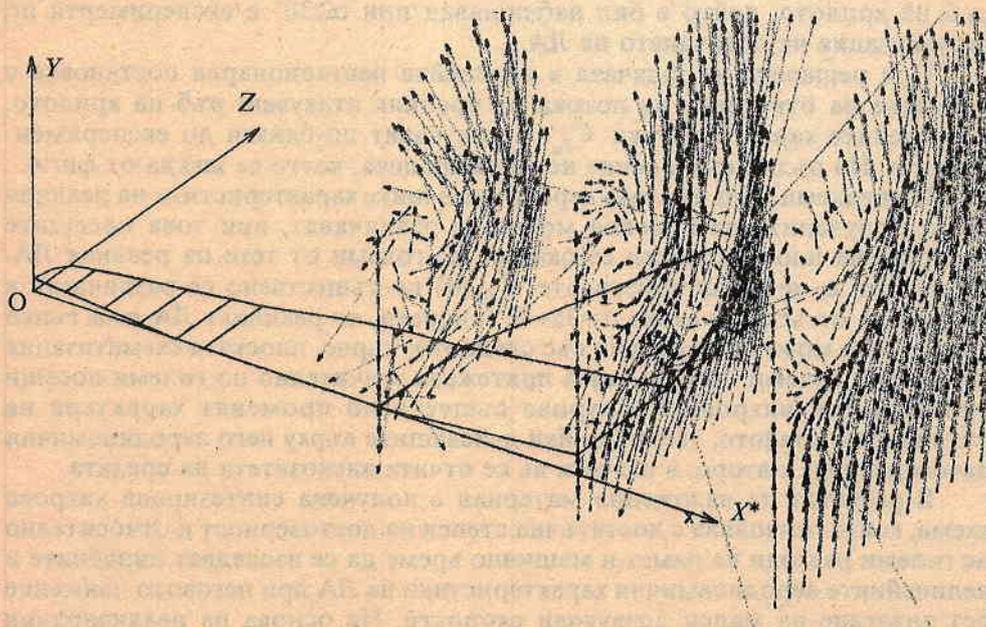
Фиг. 8

На практика невинаги е възможно да се реализира частично откъсване на потока при обтичане на крилото, особено на големи ъгли на атака. Като правило, обтичането на ЛА на такива ъгли се съпровожда с откъсване на потока от всички изходящи ръбове и страни на крилото и тялото. Ето защо, за определяне на аеродинамичните характеристики на ЛА в нелинейна нестационарна постановка при ъгли на атака  $\alpha \geq 30^\circ$  се моделира обтичане с пълно откъсване на потока (случай в).

Анализът на получените резултати показва основно, че не се формира устойчиво вихрово течение при реализация на пълно откъсване на потока от всички ръбове и страни на крилото и тялото на големи ъгли на атака. Такова течение води до намаляване разреждането над крилото и тялото и, следователно, до падане на аеродинамичните натоварвания. Това се вижда на фиг.4, на която с кръгчета са изобразени сумарните аеродинамични натоварвания при такъв режим на обтичане.

От фиг.4 става ясно, че коефициентът  $C_{y_\alpha}$  се увеличава с нарастване ъглите на атака в диапазона  $\alpha = 30-40^\circ$ , но ъгълът на наклона на допирателната към зависимостта  $C_{y_\alpha}(\alpha)$  се намалява в сравнение със зависимостта, получена в нелинейна нестационарна постановка при моделиране на обтичане с частично откъсване на потока (случай б). Това е обусловено от откъснатите се вихри от тялото, преминаващи успоредно и над него, които съхраняват своята устойчивост, създават допълнително разреждане над повърхността му и водят до нарастване на аеродинамичните натоварвания. Обаче при пълното откъсване на потока от всички изходящи ръбове на крилото се намаляват неговите носещи свойства. Затова се наблюдава по-бавно нарастване на коефициента  $C_{y_\alpha}$  с увеличаването на ъглите на атака в указания диапазон.

За да анализираме течението над и зад ЛА нека разгледаме полето на скоростите, получено при неговото обтичане на ъгъл на атака  $\alpha=40^\circ$ . Както и при обтичането на ЛА на  $\alpha=20^\circ$ , в района на сечението А-А започва формирането на вихрово течение, което се наблюдава на фиг.9. Но в района на мястото, където е присъединено крилото към тялото (сечение Б-Б), може да се отдели формирането на вихрови шнур (фиг.9). По степента на приближаване към задния ръб (сечение С-С) и отделянето от него надолу по потока (сечение Д-Д) течение става неустойчиво и вихровия шнур в ясно изразен вид отсъства. Определените в следващия момент от време полета на скоростите в сеченията С-С и Д-Д показват, че с течението на времето структурата на течението се съхранява.



Фиг. 9

За проверка на достоверността на изчислените аеродинамични характеристики на ЛА по описаната методика чрез моделиране на обтичане с откъсване на потока е извършено сравнение с наличните експериментални данни, получени в аеродинамичната тръба на малки дозвукови скорости [4].

На фиг.4 са приведени експерименталните данни и резултатите от изследването, получени при моделиране на ЛА с помощта на тънки носещи повърхности. От фигурата се вижда, че получените резултати, при решаване на задачата в стационарната постановка, добре се съгласуват с данните от тръбния експеримент в диапазона от ъгли на атака  $\alpha=0-15^\circ$ . Обаче по-нататъшното увеличение на ъгъла на атака, започвайки от  $\alpha>15^\circ$ , довежда до значително разминаване между изчислените и експерименталните зависимости  $C_{y_\alpha}(\alpha)$  и  $m_z(\alpha)$ , което се потвърждава от фиг.4. Основната причина за появилото се разминаване се заключава в това, че при обтичане на реалния ЛА възниква

откъсване на потока от двете страни на тялото, водещо до подобряване на носещите свойства на ЛА, но то не е моделирано при решаване на задачата.

Резултатите от проведените изследвания, получени в нелинейна нестационарна постановка при добавяне откъсването на потока от страничните краища на тялото удовлетворително се съгласуват с експерименталните данни в диапазона от ъгли на атака  $\alpha=10+25^\circ$  (фиг.4). Обаче, започвайки от ъгли  $\alpha=25^\circ$ , при увеличаването на  $\alpha$  се наблюдава незначително превишение на коефициента на подемната сила над значенията, получени в експеримента. Обяснението на което се заключава в това, че не се отчитат всички реални свойства (вискозитет, триене и др.) на въздуха при откъсване на потока от повърхността на ЛА и от предния ръб на крилото, който е бил наблюдаван при  $\alpha \geq 30^\circ$  в експеримента по визуализация на обтичането на ЛА.

При решаване на задачата в нелинейна нестационарна постановка с добавяне на откъсване на потока от предния атакуващ ръб на крилото, изчислените характеристики  $C_{y_a}$  се получават по-близки до експерименталните. Но пълно съвпадение не се наблюдава, което се вижда от фиг.4.

При големи ъгли на атака аеродинамичните характеристики на реалния ЛА и получените на плоския модел се различават, при това носещите свойства на плоския модел се оказват по-големи от тези на реалния ЛА. Интересно е, че характеристиките  $C_{y_a}(\alpha)$  по-съществено се различават в диапазона от ъгли на атака  $\alpha=35+40^\circ$  въпреки, че реалният ЛА има тънко крило. Това може да се обясни със следното: първо, плоската схематизация на ЛА при големи ъгли на атака притежава значително по-големи носещи способности, вихровите шнури съществено променят характера на обтичане на крилото, увеличавайки действащите върху него аеродинамични натоварвания; и второ, в разчета не се отчита вискозитета на средата.

В резултат на изложения материал е получена синтезирана вихрова схема, която позволява с достатъчна степен на достоверност и относително не големи разходи на памет и машинно време да се изследват линейните и нелинейните аеродинамични характеристики на ЛА при неговото движение без плъзгане на малки дозвукови скорости. На основа на реализирания математически модел, използвайки плоско-пространствената схематизация на ЛА и моделиране на обтичане с частично или пълно откъсване на потока, за различни фиксирани значения на ъгъла на атака, са получени картината на разпределение на налягането, вихровата структура и полето на скоростите. Тяхното изследване и анализ допринасят по-точно да се разкриват особеностите, свързани с нелинейните аеродинамични ефекти, проявяващи се при полет на ЛА на умерени и големи ъгли на атака в режимите на кацане.

## Литература

1. Швец, А. И. Сверхзвуковые летательные аппараты. М., МГУ, 1989.
2. Белоцерковский, С. М., М. И. Ништ. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью. М., Наука, 1978.
3. Апариров, В. А., А. В. Дворак. Метод дискретных вихрей с замкнутыми вихревыми рамками. Применение ЭВМ для исследования аэродинамических характеристик летательных аппаратов. М., ВВИА, 1986.
4. Стоянов, К. М. Моделирование отрывного обтекания воздушно-космического летательного аппарата на дозвуковых скоростях. М., ВВИА, 1991.
5. Кочин, Н. Б., И. А. Кибель, Н. В. Розе. Теоретическая гидромеханика. М., Физматгиз, 1963.
6. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа. М., Наука, 1978.

Поступила на 15.VI.1997г.

### Determination of some aerodynamic characteristics of an aerospace aircraft in the landing regime by stream-line modelling with flow separation

*Krassimir Stoianov*

(Summary)

The paper studies the aerodynamic characteristics of an aerospace aircraft in the landing regime, using the discrete vortex method and its modification, the vortex frame method. In this method, the aircraft is substituted by flat-space vortex schemes, and the stream-line is modelled by partial or complete separation of the flow. A calculation vortex scheme is synthesized, and a study is made under mathematical model with non-linear stationary and non-stationary settings. The obtained linear and non-linear aerodynamic characteristics are shown for an aerospace aircraft, moving without sliding at small subsonic velocities. A comparison of the obtained results and the available experimental data from aerodynamic tube is made. Based on the obtained picture for the pressure distribution, vortex picture and velocity field, their study, and analysis, the peculiarities related with the non-linear aerodynamic effects, and manifested when the aircraft is flying at moderate or great attack angles in the landing regime are revealed. The significant influence of the non-linear vortex structures formed in stream-line with separation of the flow from the aircraft's bearing elements on its aerodynamic characteristics at great attack angles is shown.

## Магнитни измервания с въртящ се космически апарат

Димитър Данов, Ирен Димитрова\*

Централна лаборатория по слънчево-земни въздействия, БАН  
\*Институт за космически изследвания, БАН

Магнитометърът ИМАП-3, включен в състава на апаратурата по проект Интербол — аврорална сонда, измерва едновременно три перпендикулярни компоненти на магнитното поле (МП). Приборът се върти заедно с ИСЗ около ос, почти паралелна на направлението към слънцето, като оста  $Ox$  на прибора съвпада с оста на въртене,  $Oy$  е радиална от оста,  $Oz$  — допълва до дясна координатна система (КС). Периодът на завъртане е около 120s.

Един прост модел на измерванията можем да получим така:

Нека МП има компоненти:  $B_x$  — по оста на въртене, и  $B_p$  — перпендикулярната и. В координатна система  $KcO$ , чиято ос  $Ox$  съвпада с оста на въртене, МП се представя от  $\vec{B} = [B_x, B_p \cos(\omega t), B_p \sin(\omega t)]$ . Това е идеалната приборна КС. Преходът към КС, в която векторът на МП не се върти, става посредством матрицата  $A_\omega$  с елементи:

$$A_\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega t + \delta) & \sin(\omega t + \delta) \\ 0 & -\sin(\omega t + \delta) & \cos(\omega t + \delta) \end{bmatrix}$$

където  $\omega = 2\pi/T$ ,  $T=120s$  (цитирано по-долу като „период“),  $t$  — времето от началото на измерването,  $\delta$  — ъгълът на завъртане при  $t=0$  (този ъгъл се определя на борда).

Компонентите  $B_x$  и  $B_p$  зависят по сложен начин от времето, свързан с изменение положението на ИСЗ, изменение физическите характеристики на околната среда, но не и с периода на завъртане ( $T=120s$ ). Ако  $B_p = \text{const}$  за време по-голямо от  $T$  ( $B_p$  се изменя бавно), то средното по време (за интервали кратни на един период) на  $Y$  и  $Z$  компонентите на МП в  $KcO$  е нула. Ако и  $B_x = \text{const}$ , то модулът на МП ( $\sqrt{B_x^2 + B_p^2}$ ) не зависи

от времето. Дори МП да се изменя силно, едва ли можем да очакваме периодичност в компонентата  $B_x$  и модула, кратна на периода на завъртане.

**Какъв е проблемът?** В необработените данни се наблюдават особености, които са в противоречие с горе казаното. В [1] са разгледани част от тях: а) периодични ( $\sim 120s$  и  $\sim 60s$ ) съставки в  $B_x$ , б) средното на  $B_y$  и  $B_z$  (за време кратно на периода) не е нула. Ние прибавяме още една в) модульг на измереното МП е модулиран с период  $120s$  (вж. фиг.1а и фиг.2а).

Ние смятаме, че причина за а) и б) е отклонение на датчика по  $B_x$  от оста на въртене. Авторите на [1] търсят причината за ненулевото средно другаде и не обсъждат (явно) модуляцията в модула.

Според нас, причините за измененията в модула може да са три: А) неортогоналност между осите на датчиците, Б) наличие на смущаващо МП от обекта (ИСЗ), В) бавни изменения в „нулите“ на прибора. Не изключваме и едновременното действие на всички тях.

### Математичен модел за обясняване на наблюдаваните особености

Датчиците са ортогонални, но оста на въртене не съвпада с  $Ox$  на прибора.

Преходът към приборната координатна система ( $KcП$ ) може да стане с две последователни завъртания (около  $Oy$  на  $\varphi_y$  и около  $Oz$  на  $\varphi_z$ ). Матрицата на прехода означаваме с  $A$ :

$$A = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_y)\cos(\varphi_z) & \cos(\varphi_y)\sin(\varphi_z) & \sin(\varphi_y) \\ -\sin(\varphi_z) & \cos(\varphi_z) & 0 \\ -\sin(\varphi_y)\cos(\varphi_z) & -\sin(\varphi_y)\sin(\varphi_z) & \cos(\varphi_y) \end{bmatrix}$$

Векторът на МП в  $KcП$  е

$$(1) \quad \vec{B}^i = A \cdot \vec{B}.$$

В  $x$ -компонентата на измереното поле:

$$B_x^i = \cos(\varphi_y)\cos(\varphi_z)B_x + B_p [\cos(\varphi_y)\sin(\varphi_z)\cos(\omega t) + \sin(\varphi_y)\sin(\omega t)]$$

се появява периодична зависимост от времето (период  $T$ ), която е пропорционална на  $B_p$ . В модула му  $\sqrt{B_x^2 + B_p^2}$  няма такава периодичност.

Ако допуснем, че мереното МП се изменя много бавно и усредним, получаваме:  $\int_0^T B_y dt / T = -\sin(\varphi_z)B_x \neq 0$  и  $\int_0^T B_z dt / T = -\sin(\varphi_y)\cos(\varphi_z)B_x \neq 0$  (виж по-горе особеност б).

При същите условия (постоянно МП) да пресметнем интеграла:  $\int_0^T B_y B_z dt = T \sin(\varphi_y)\sin(\varphi_z)\cos(\varphi_z)(B_x^2 - B_p^2)$ . Той е различен от нула и не може да бъде използван за определяне ортогоналността между датчиците [1](стр.110).

Да разгледаме възможните причини за модулация на модула и начините за тяхното количествено определяне. Според нас те са три: А) датчиците не са ортогонални; Б) обектът има собствено магнитно поле; или В) има изменение в „нулите“ на прибора.

А) Датчиците не са ортогонални: Добро приближение е, ако приемем, че всеки датчик измерва проекцията на вектора на МП върху оста си. Без ограничение на общността, можем да приемем, че X-датчика е по  $Ox$  в  $Kc\Pi$ , Y-датчика сключва ъгъл  $\beta_1$  с оста  $Oy(Kc\Pi)$ , а неговата проекция в  $xOz$  — ъгъл  $\beta_2$  с  $Ox(Kc\Pi)$ . За Z-датчика съответните ъгли на отклонение от  $Oz(Kc\Pi)$  означаваме с  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ . В този случай, показанията на прибора могат да се запишат в следната векторна форма:

$$(2) \quad \vec{B}^p = A^p \cdot \vec{B}^i,$$

където  $A^p$  е матрицата

$$A^p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \sin(\beta_1)\cos(\beta_2) & \cos(\beta_1) & \sin(\beta_1)\sin(\beta_2) \\ \sin(\gamma_1)\cos(\gamma_2) & \sin(\gamma_1)\sin(\gamma_2) & \cos(\gamma_1) \end{bmatrix}.$$

Очевидно, ако  $\beta_1 = \gamma_1 = 0$ , ще имаме  $\vec{B}^p = \vec{B}^i$ . В приближението за малки ъгли, можем да положим  $\cos(\beta_1) = \cos(\gamma_1) = 1$ ,  $\sin(\beta_1) = \beta_1$ ,  $\sin(\gamma_1) = \gamma_1$ . Матрицата  $A^p$  можем да запишем така:

$$A^p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \beta_1 \cos(\beta_2) & 1 & \beta_1 \sin(\beta_2) \\ \gamma_1 \cos(\gamma_2) & \gamma_1 \sin(\gamma_2) & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \alpha_{21} & 1 & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & 1 \end{bmatrix}.$$

Модулът на  $\vec{B}^p$  зависи от времето, като се появява характерна честота  $2\omega$ . Пълният израз е твърде комплициран и не е възможно да се представи тук. За илюстрация, ако приемем, че няма отклонение от оста на въртене ( $\varphi_y = \varphi_z = 0$ ),  $\beta_2 \approx 90^\circ$  и  $\gamma_2 \approx 90^\circ$  получаваме

$$B^p = \sqrt{[(\gamma_1^2 - \beta_1^2)\cos^2(\omega t) + 2(\gamma_1 + \beta_1)\sin(\omega t)\cos(\omega t)]B_p^2 + C_1 \cos(\omega t + \theta) + C_2},$$

$C_1$ ,  $C_2$  и  $\theta$  са константи независещи от времето. Първият член има честота  $2\omega$ .

От тук следва, че наблюдаваните изменения в модула на получените данни не се дължат на неортогоналност на датчиците, защото: 1) няма изменения с честота  $2\omega$ , 2) няма причина ъгълът между датчиците да се изменя в сравнение с наземните калибровъчни данни.

**Количествено определяне:** Елементите на матрицата  $A^p$  са определени при наземни изпитания. Те се съгласуват с наблюденията.

Б) Обектът има собствено магнитно поле; или В) има изменение в „нулите“ на прибора. За съжаление тези две причини не могат да се разделят, защото и двете водят до прибавяне на неизвестен вектор към измерваното МП.

Да означим този вектор с  $\vec{e}_0$ . Тогава ИМАП-3 ще мери поле  $\vec{B}^e = \vec{B}^i + \vec{e}_0$ . Модулът му е равен на

$$(3) \quad B^e = \sqrt{(\vec{B}^i + \vec{e}_0)^2} = \sqrt{B_x^2 + B_p^2 + e_0^2 + 2\vec{B}^i\vec{e}_0}.$$

Първите три члена под знака на радикала са инвариантни — не зависят от избора на КС и от нейното положение във времето. Четвъртият не е инвариантен (в този смисъл) — зависи посредством променливия ъгъл между векторите ( $B^i$  и  $e_0$ ). Очевидно, максимум и минимум има по веднъж за времето на един период. Може да се докаже, че честотата на изменение на модула е  $\omega$ .

*Количествено определяне:* Ако  $\vec{e}$  е произволен вектор и пресметнем скаларните произведения  $\vec{B}^e \cdot (\vec{B}^e \pm \vec{e}) = (\vec{B}^i + \vec{e}_0) \cdot (\vec{B}^i + \vec{e}_0 \pm \vec{e})$  и от тяхната разлика извадим  $\vec{B}^e \vec{B}^e$  получаваме

$$(4) \quad B^{i2} + e_0^2 - 2\vec{e}_0\vec{e} + 2\vec{B}^i(\vec{e}_0 - \vec{e}).$$

Първите три члена не зависят от времето. Ако изберем  $\vec{e}$  така, че да минимизираме вариацията в (4), то ще сме определили  $\vec{e}_0$ .

Предлаганият по-горе метод за количествено определяне е устойчив само за период, по-голям от един период на ротация. При анализ на обработените данни забелязахме, че компонентите на вектора на грешката  $\vec{e}_0$  не се изменят значително в рамките на период от няколко часа (вариация не повече от 2—3 нТ). Има значителни изменения за различните дни (Табл.1).

Таблица 1

Год./ден	$e_x$	$\Delta e_x$	$e_y$	$\Delta e_y$	$e_z$	$\Delta e_z$
96/262	35,2	1,5	17,0	1,5	87,5	1,5
96/264	-87,0	0,2	13	1,5	84	2,5
96/274	99,9	0,1	19,8	2,4	91	2,2
96/295	-90,0	0,1	17,5	5,1	96,8	2,7

### Защо предлагаме друг начин за пресмятане на матрицата за ротация?

В [1] като пример е посочена матрица за корекция на ъгъла между оста на въртене и X-датчика, която не запазва дължината на вектора на МП (стр.111 (3)).

Ние пресмятаме ъглите на ротация  $\varphi_y$  и  $\varphi_z$ , по следния начин:

При интегриране по компоненти (1) за един период  $T$ , получаваме следните уравнения за  $\varphi_y$  и  $\varphi_z$ :

$$(5) \quad \begin{aligned} -\operatorname{tg}(\varphi_y) &= \int_t^{t+T} B_z^i dt / \int_t^{t+T} B_x^i dt = a, \\ -\operatorname{tg}(\varphi_z) / \cos(\varphi_y) &= \int_t^{t+T} B_y^i dt / \int_t^{t+T} B_z^i dt = b. \end{aligned}$$

Ако знаем (измерим) параметрите  $a$  и  $b$ , тази система има следните решения:

$$(6) \quad \begin{aligned} \varphi_y &= \arctan(a) \\ \varphi_z &= \begin{cases} 2 \arctan[(\sqrt{1+a^2} + \sqrt{1+a^2+b^2})/b] \\ 2 \arctan[(\sqrt{1+a^2} - \sqrt{1+a^2+b^2})/b] \end{cases} \end{aligned}$$

От двете решения за  $\varphi_z$  избираме това, за което осите  $Ox_{(КсО)}$  и  $Ox_{(КсП)}$  сключват по-малък ъгъл  $\alpha = \arccos(\cos(\varphi_z)\cos(\varphi_y))$ .

*Алгоритъмът за трансформация* на компонентите на МП към неротационна координатна система:

1. Преобразуване от телеметрични към физични величини.
2. Корекция за ортогоналност с матрица  $A^p$ , чиито елементи са определени на Земята.
3. Определяне на собственото МП на обекта.
4. Изваждане на МП на обекта от полученото при 1).
5. Пресмятане на  $\varphi_y$  и  $\varphi_z$  (за прекриващи се интервали).
6. Трансформация по  $A^{-1}$  — оста на ротация съвпада с оста  $Ox$ .
7. Отстраняване на ротацията.

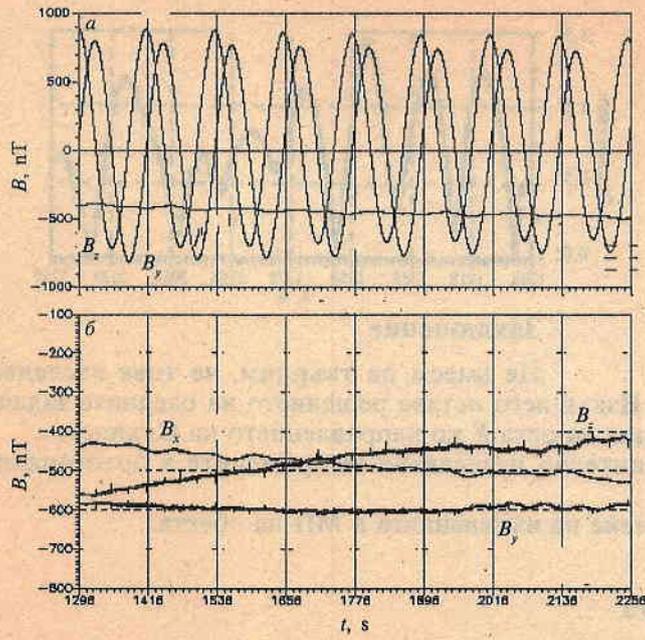
### Резултати

На фиг. 1а са показани данни от магнитни измервания преди, а на фиг. 1б — след прилагане на описания алгоритъм. По хоризонталната ос е нанесено времето в секунди, а по вертикалната — магнитното поле в пТ.

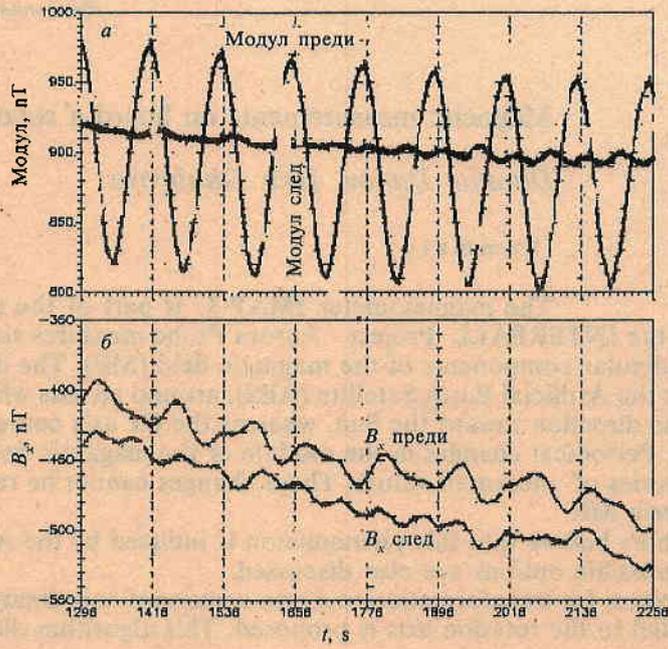
Фигура 2 илюстрира измененията в модула на измереното поле (фиг. 2а) и в  $B_x$  — компонентата (фиг. 2б), преди и след преобразуване. Фиг. 2а демонстрира предимствата на предлагания от нас метод. Фиг. 2б показва, че методът ни не е съвършен — периодичните пулсации в  $B_x$  намаляват повече от два пъти, но не изчезват. Причината за това може да е изменение в компонентите на измерената на земята матрица  $A^p$ . (Забелязва се модулация на сигнала с период около 60s.)

На фиг. 3 е показано изменението с времето на ъгъла между приборната ос  $Ox$  и оста на въртене. Виждаме как ъгълът се изменя периодично в граници до  $1,5^\circ$ , следва успокояване при  $0,5^\circ$  и отново разлюляване. Това може да се дължи на люлеене на шангата. При други данни сме забелязали, че амплитудата на ъгъла може да достигне до  $2^\circ$ , като успокояването отново е около  $0,5-0,7^\circ$ .

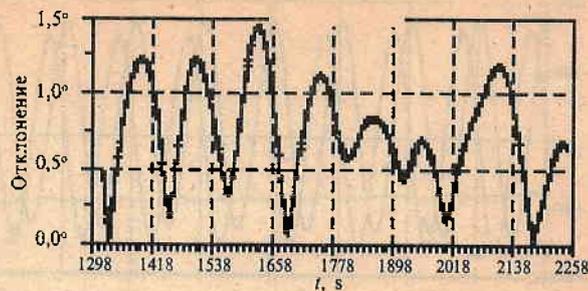
Не е възможно да покажем всички получени резултати, но показаните фигури са достатъчно представителни.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

### Заклучение

Не смеем да твърдим, че това изследване изчерпва проблемите. Извън него остава решението на следните задачи:

1. Корекция на оста  $X$  по направлението на Слънцето.
2. Допълнително изследване за промените в ортогоналността между датчиците.
3. Обяснение на измененията в МП на обекта.

### Литература

1. Стяжкин, В. А., Б. Г. Петров, Н. А. Ейсмонт, А. Бочев. Магнитни измерения в проектe ИНТЕРБОЛ - АВРОРАЛНЫ ЗОНД. — Косм. изследвания, 36, 1998, №1, 108-112.
2. Arshinkov, I.S., L.N. Zhyzgov, A.Z. Bochev et al. Magnetic field experiment in the INTERBALL project (experiment IMAF). Interball, 1995, 222-227.

Постъпила на 16.IV.1999г.

## Magnetic measurements on board a rotating satellite

*Dimitar Danov, Iren Dimitrova*

(Summary)

The magnetometer IMAF-3 is part of the equipment in the frame of the INTERBALL Project - Aurora Probe measures simultaneously three perpendicular components of the magnetic field (MF). The device rotates together with the Artificial Earth Satellite (AES), around an axis which is almost parallel to the direction toward the Sun, whereas the  $Ox$  axis coincides with the rotation axis. Periodical changes in the module of the magnetic field were identified in the series of measured values. These changes cannot be referred to the magnetospheric MF.

The authors believe that this phenomenon is induced by the AES magnetic field. Other possible options are also discussed.

An algorithm for transformation to a non-rotational coordinate system with  $Ox$  axis parallel to the rotation axis is proposed. This algorithm differs from all published algorithms up to now.

## Фулерените — същност и приложение

*Ицван Чеуз*

*Институт за космически изследвания, БАН*

Фулерените предизвикват голям интерес като възможност за нови научни изследвания и за нови практически приложения. Затова не е случайно, че Нобелова награда за 1996 г. беше присъдена на трима учени за техните постижения в областта на фулерените.

### Исторически бележки

Историята на фулерените започва през 1971 г., когато английският физико-химик Харолд Крото изследва молекулите  $\text{HC}_3\text{N}$ , открити в междузвездното пространство. Целта му е откриване на молекули от по-висок ред — полини. През 1983 г. той провежда своите изследвания съвместно с Ричард Кърл. И двамата обръщат внимание върху резултатите на Ричард Смейли, който с лазерно-плазмени устройства създава силициево-карбидни клъстери. Тримата учени предполагат, че в междузвездното пространство има възможност за образуване на карбидни гроздове. През септември 1985 г. тримата провеждат съвместни експерименти и в течение на десет дни успяват да докажат съществуването на молекула  $\text{C}_{60}$ . Определят нейната структура и я назовават на името на американския архитект Фулер, който построил на Световното изложение в Монреал през 1967 г. американския павилион с подобна конструкция, която е била нарисувана още от Леонардо да Винчи.

Молекулата  $\text{C}_{60}$  по своята форма много прилича на футболна топка, направена от 12 петъгълни и 20 шестоъгълни парчета. Любопитно е, че размерът на молекулата  $\text{C}_{60}$ , който е 0,7 nm, е  $1/10^7$  част от футболната топка, която от своя страна е  $1/10^7$  част от земното кълбо [1].

Трябва да се отбележи и фактът, че преди знаменателните десет дни независими изследвания са проведени в лаборатория на нефтената компания ЕКСОН в Ню Джърси под ръководството на Ендрю Калдор. При

образуването на плазмен графит още през 1984 г. там получават молекули  $C_{60}$  и  $C_{70}$ , но не успяват да ги отделят като пикове на спектрограмата и по тази причина голямото откритие им се използва.

Волфганг Кречмер в Института по астрофизика „Макс Планк“ в Хайделберг и Доналд Хофман в Университета в Аризона провеждат експерименти за получаване на плазма от графит чрез електрическа дъга в среда на хелий (1990 г.). В саждите присъстват  $C_{60}$ ,  $C_{70}$  и по-големи молекули [2].

### Същност на фулерените

Откритата от групата на Крото молекула  $C_{60}$  е чист въглерод. Неговата структура се различава от структурата на графита и на диаманта. Тя е нова алотропна модификация на въглерода. Следователно, въглеродът има три кристални модификации: графит, диамант и фулерен. Те притежават различни физични свойства.

При графита и диаманта има външни частично наситени връзки. Шестоъгълните пластини при графита могат лесно да се плъзгат една върху друга. При диаманта, поради свободните връзки, повърхността му е покрита с водород. На повърхността на фулерена няма такива връзки, те всички са наситени.

При определяне на структурата на графитния въглерод се използват шестоъгълни конструкции. По-късно става ясно, че ако по определен начин се отрежат върховете на икоситетраедъра, се получава пресечен икоситетраедър, състоящ се от 12 петъгълника и 20 шестоъгълника. Точно такава е структурата на  $C_{60}$ .

В саждите, получени от електрическа дъга, част от сферичните структури на  $C_{60}$  се удължават и придобиват формата на „топка за ръग्би“. Такава е структурата на  $C_{70}$ .

Освен тях са известни и хиперфулерени с молекули  $C_{960}$  на външната обвивка, по-навътре са  $C_{540}$ , още по-навътре  $C_{240}$ , а в центъра е  $C_{60}$ , която е най-стабилна. Такава структура се създава сравнително лесно и това открива нова ера в развитието на физико-химията. Електрическата дъга между въглеродни електроди се създава без особени затруднения в лабораторни условия и в това е една от причините за изключително високия интерес на учените в тази област. По метода на електрическата дъга дневно могат да се получават няколко грама от материала и ако през 1991 г. един грам фулерени струваше 4000–5000 долара, то сега цената е около 40 долара за грам [1].

Структурата на  $C_{60}$  се характеризира с вакуумна кухня със сферична симетрия, в която могат да се включат и различни атоми и йони. Най-често се срещат атоми на хелий, но размерите на пространството позволяват да се поместват атоми на почти всички химически елементи. Въпросът е как да бъдат поставяни там.

Провеждани са опити, при които към графитовите електроди е добавен калиев нитрат. По този начин присъстващите в плазмата калиеви атоми могат да попаднат вътре в  $C_{60}$ . В резултат се получава ново съединение, наричано „ $K@C_{60}$ “, при което връзката не е йонна, нито ковалентна, а чисто механична и се нарича ендохедриална [3].

Докато енергията на ковалентната химична връзка е 1–2 eV, за освобождаване на вътрешен атом от  $C_{60}$  е необходимо разкъсване на връзката C-C в петогълната, или шесто̀гълната структура, за което е необходима енергия минимум 9 eV, или 200 kcal/mol. Такова въздействие върху молекулата  $C_{60}$  не е осъществимо само с енергията на химична реакция. По тази причина добива значение неутронното въздействие, като една възможност за „отваряне“ на фулерените. При неутронното облъчване възникват дефекти, позволяващи по-лесното проникване в структурата на  $C_{60}$ .

Унгарските учени са едни от първите, използващи този метод, докато американски учени за целта използват нагряване до 500–600°C и налягане 3000–4000 atm, като метод за вграждане на чуждите атоми.

Унгарците чрез механо-химическа енергия в топкови мелници смилат химически чист  $C_{60}$  и въздействайки с гама-циклодекстрин получават „ $C_{60}$  гама-циклодекстрин“. Това съединение за разлика от  $C_{60}$  се разтваря във вода и дава възможност за изследване на фулерените в биологични системи [4].

Известно е, че при неутронното въздействие въглеродните атоми не стават радиоактивни. Когато, за разлика от очакваното, при тях се регистрира висока радиоактивност, оказва се, че  $C_{60}$  не е чист и в ядрото му присъстват атоми на други химични елементи. Те, в изключително малки количества, се намират в центъра на фулерена, образуват частичносмесени кристали, благодарение на което се оказва възможно получаването на свръхпроводимост и на други свойства за различни приложения.

### Възможности за приложения

Една от възможните области за приложение на фулерените е свързана с т.нар. нанотръби. Оказва се, че шесто̀гълната плоска графитна структура може да се навие по различен начин и да образува тръбичка с диаметър от порядъка на нанометри. В нея чрез капилярните процеси могат да бъдат засмукани метали, като олово и др. и по този начин чрез тръбичките да бъдат формирани метални нишки с наноразмери [5].

Известно е, че върху бензолния пръстен е изградена органичната химия. Чрез свързване на атоми, или атомни групи на основата на  $C_{60}$  и  $C_{70}$  по подобен начин могат да бъдат получени нови видове горива, катализатори, лекарства, високоякостни влакна, молекулярни мембрани, антифрикционни покрития и диаманти.

Фулерените поради своите електрични и оптични свойства са много перспективни. Те позволяват да се получат полупроводници, свръхпроводници, оптични и електронно-оптични материали, акустични датчици и др. [6,7].

Този нов тип материал открива много широки възможности за нетрадиционни приложения, както и за нови търсения. Неговото получаване и изследването му са по силите и на малките страни и в това отношение много насърчителен е примерът на унгарските учени [8].

Изучаването на фулерените е тясно свързано с изучаването на космическото пространство. Изследвайки въглерода в Космоса, учените публикуваха съобщения за фулерени с извънземен произход. Фулерени са открити при изследването на метеорити [9], както и в следи от ударите им върху обшивката на космически апарати. И в двата случая количествата са

много малки. Може да се предположи, че са получени чрез механизма на Кречмер—Хофман от въглеродни хондрити. Необходими са нови научни доказателства за тяхното присъствие в междузвездното пространство.

Фулерените като трета модификация на въглерода представляват интерес и за учените и за специалистите в Института за космически изследвания — БАН, където има известен изследователски опит в областта на диамантите.

## Литература

1. Fodor, L.I. A.Fullerének. Élet es tudomány, 51–52, 1966, p. 1620.
2. Kratschmer, W. et al. Dusty Objects in the Universe. Kluwer, Dordrecht, 1990, p. 89.
3. Weiss, F.D. et al. J.Am.Chem.Soc., 110, 1988, p. 4464.
4. Szejtli, J. Cyclodextrins and Their Inclusions Complexes. Acad. Kiadó, Budapest, 1982.
5. Ebbesen, T.W., P.M. Ajayan. Nature, 358, 1992, p. 2200.
6. Patent Jap. 5-142597.
7. Patent Jap. 5-82132.
8. Braun, T. A káprázatos C<sub>60</sub> molekula. Acad.Kiadó, Budapest, 1996.
9. Buseck, P.R. et al. Science, 257, 1992, p. 215.

Постъпила на 20.VI.1997г.

## Fulerenes — essence and application

*Istvan Cheush*

(Summary)

The essence of fulerenes as a new allotropic carbon modification, and their structural features are considered. A brief historical review of the first scientific researches in this field initiated in relation with space studies is made. The directions for their practical application in some new areas are outlined, as well as some potentialities for the development of multicomponent fullerene configurations with specific properties. The paper is an overview one.

## INSTRUCTIONS TO AUTHORS

The *Aerospace Research in Bulgaria* series publishes original articles in the theoretical or applied fields of the space and aviation science and practice.

### Submission:

- The articles should be submitted in duplicate in English language. The Bulgarian authors should also supply a Bulgarian version for verification of the translation.
- Manuscripts (including the tables and references) should not exceed 15 standard pages (30 lines per page, 60 strokes per line) typed on white non-transparent paper in standard office format (210×297).
- Each article should be accompanied with a summary (up to 30 lines).

### Conditions:

- The articles should not be published, neither submitted for publication elsewhere.
- All manuscripts are subject to editorial review.

### Arrangement:

- **Title page.** The first page of each article should indicate the title, the authors' names and the Institute where the article was conducted.
- **Tables and illustrations.** Tables and captions to illustrations should be submitted on separate sheets. The proper place of each figure in the text should be indicated in the left margin of the corresponding page. All illustrations (photos, graphs and diagrams) should be referred to as "figures" and given in abbreviation "Fig." The author's name, the number of the figure with indication of its proper orientation (top, bottom) should be slightly marked on the back on each figure. All illustrations should be submitted in duplicate too.
- **References.** They should be indicated in the text by giving the corresponding number in parentheses. The references should be typed on a separate sheet, arranged chronologically by numbers figuring in the text. The name of the first author should be given with inversion. The title of the article is followed by that of the journal (collection), volume, year of publication, issue number and the pages cited. The titles of the monographs should be followed by the city, publisher, year of publication and the cited page.

### Example:

1. B u l a r d, E., I. C o o p e r. The determination of the masses necessary to produce a given gravitational field. — Proc. Royal Soc., London, 194, 1948, 332-347.
2. Y a n o v s k a y a, T., L. P o r o k h o v a. Inverse Geophysical Problems. Leningrad, Leningr. Univ. Publ., 1983.

### Further details:

- Units of measurement should be used only according to SI.
- Authors have to accomplish one proof-reading within a specified by the publishers term. Only type-setting errors are subject to correction.

**Address.** The authors may submit articles in person or send them to the following address:

Editorial Board of  
*Aerospace Research in Bulgaria*,  
Space Research Institute  
Bulgarian Academy of Sciences,  
6 Moskovska St., Sofia 1000, Bulgaria

## УКАЗАНИЯ ЗА АВТОРИТЕ

В тематичната поредица „Аерокосмически изследвания в България“ се отпечатват оригинални научни статии от областта на космическата наука и практика.

### Условия:

• Статиите трябва да бъдат представени в 2 екземпляра на английски език. Българските автори трябва да представят статиите си и на български език.

• Обемът на статията (включително таблиците и литературата) не трябва да превишава 15 стандартни машинописни страници (30 реда на страница, 60 знака на ред) с формат 210x297 mm.

• Всяка статия трябва да бъде придружена от резюме (до 1 стандартна страница) на български и на английски език.

• Материали, приети за печат или публикувани в други издания, не се приемат.

### Подреждане:

• На първата страница на всяка статия трябва да бъдат написани заглавието, имената на авторите и адресът на местоработата.

• Таблиците и илюстрациите. Таблиците и текстът към илюстрациите трябва да се представят на отделни страници. Мястото им в текста да се посочи в полето на съответната страница. На гърба на илюстрациите (фотоси, чертежи, графики и др.) с молив да се напишат заглавието на статията, имената на авторите, номерът на фигурата и да се укаже ориентацията.

• Литература. Цитираната литература се представя на отделен лист по номерация, появяваща се хронологично в текста. Името на първия автор се дава с инверсия. Следват заглавието на статията, заглавието на списанието (сборника), том, година, книжка, страница, а при монографиите — град, издателство, година, страница.

### Пример:

1. Кръстанов, Л., К. Серафимов. — Сп. на БАН, XX, 1974, №2, с. 29.
2. Несторов, Г. Физика на ниската йоносфера. С., БАН, 1969, с. 63.

### Други изисквания:

• Мерните единици задължително да бъдат по СИ.  
• Авторите преглеждат една коректура в определен срок. Допускат се само поправки на грешки, направени при набора.

Адрес. Авторите могат да представят лично материалите си или да ги изпратят на адрес:

София 1000  
ул. „Московска“ № 6  
Институт за космически изследвания — БАН  
Редакционна колегия на „Аерокосмически изследвания в България“