

**Редакционна колегия**

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

**Editorial Board**

N. Georgiev (Editor-in-Chief),  
G. Mardirossian (Secretary),  
P. Velinov, P. Getzov, T. Ivanova,  
D. Mishev, R. Nenovsky, N. Netchev,  
R. 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. Краleva

Предпечатна подготовка  
В. Попова

Формат 70x100/16  
Печ. коли 7

Брайлова печатница  
на Съюза на слепите  
в България  
ул. "Найчо Цанов" 172  
Пор. № 697

© БАН, Институт  
за космически изследвания  
1998

ISSN 0861-1432

Българска академия на науките  
Институт по космическа  
наука и техника  
Българският космически център

# АЕРО- КОСМИЧЕСКИ

## ИЗСЛЕДВАНИЯ В БЪЛГАРИЯ

14

София • 1998

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

### Съдържание

Димитър Димитров

Елиптични акреционни дискове с  
постоянен ексцентрициитет.

I. Случай  $\eta = \beta \Sigma^*$  / 9

Мария Димитрова

Ефективност на енергоотделянето  
в тясна двойна система като функция  
от параметрите на системата / 11

Деян Гочев

Енерго-структурен инвариант  
в космическата плазма / 16

Николай Д. Бирюк, Владимир Н. Дамгов

Качествен анализ на свободните процеси  
в обобщен линеен трептящ кръг с  
периодични параметри  
Част 2. Стабилност на каноничните  
системи и на обобщена линейна  
резонансна верига / 30

Симеон Денков, Христо Христов

Едно приложение на степенчатите  
функции при изследване на  
последователни процеси / 31

### Content

Dimitar Dimitrov

Elliptical accretion discs with  
constant eccentricity.

I. Case  $\eta = \beta \Sigma^*$  / 3

Maria Dimitrova

The efficiency of the energy production  
in a close binary system as a function  
of the system's parameters / 11

Dejan Gotchev

An energy-structural invariant in space  
plasma / 16

Nikolai D. Birjuk, Vladimir 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 / 20

Simeon Denkov, Christo Christov

A case of an application of step  
functions in the study of  
consecutive processes / 34

|   |  |
|---|--|
| <b>Антонио Андонов, Зоя Хубенова</b>  | <b>Antonio Andonov, Zoja Hubenova</b>  |
| Моделиране и оценка на<br>безопасността на функциониране<br>на системи за управление / 35   | Modelling and evaluation of the safety of<br>the functioning of an electronics system<br>for a moving objects control / 40   |
| <b>Румен Недков</b>   | <b>Roumen Nedkov</b>   |
| Приложение на модели за сравнение по<br>двойки при обработка и интерпретация<br>на данни, получени от аерокосмически<br>експерименти / 46   | Application of models<br>for comparison in aerospace<br>experiments data<br>processing and interpretation / 41   |
| <b>Никола Георгиев, Хернани Спиридонов</b>  | <b>Nicola Georgiev, Khernani Spiridonov</b>  |
| Програмата<br>“КОРИН-ЗЕМНО ПОКРИТИЕ”,<br>приложена за територията на България / 47  | The CORINE - LANDCOVER<br>programme applied<br>for the territory of Bulgaria / 52  |
| <b>Владимир Вълчев</b>  | <b>Vladimir Vulchev</b>  |
| Приложение на дистанционни<br>методи при изследване на<br>смесено дълбоко съобщество / 57   | Application of remote sensing<br>for investigation<br>of a mixed oak community / 61  |
| <b>Тодор Тагарев</b>  | <b>Todor Tagarev</b>   |
| Оптимално управление на бездвигателен<br>полет във вертикална равнина / 70  | Optimal control of unpowered flight in<br>vertical plane / 62  |
| <b>Тания Иванова, Пламен Костов,<br/>Светлана Сапунова, Гейл Бингхам,<br/>Стивън Браун</b>  | <b>Tania Ivanova, Plamen Kostov,<br/>Svetlana Sapunova, G. Bingham,<br/>S. Brown</b>   |
| Анаратура за проекта<br>“ОРАНИЖЕРИЯ СВЕТ” през 1995 г.,<br>и някои оптимизации за бъдещи<br>експерименти на борда на орбитална<br>станция МИР / 77  | Equipment for the<br>Greenhouse SVET'95 project and<br>some optimisations<br>for future experiments on board<br>the MIR orbital complex / 71   |
| <b>Франк Салисбъри, Гейл Бингхам,<br/>Уилям Кампбел, Джон Карман,<br/>Стивън Браун, Линда Гилеспи,<br/>Пам Хол, Владимир Сычев,<br/>Игор Подолски, Маргарита Левински,<br/>Дейвид Бубенхайм, Борис Ендлер</b> | <b>Frank B. Salisbury, Gail E Bingham,<br/>William F. Campbell, John G. Carman,<br/>Steven Brown, Linda Gillespie, Pam Hole,<br/>Vladimir N. Sytchev, Igor B. Podolsky,<br/>Margarita Levinskikh, David Bubenheim,<br/>Boris Yendler</b> |
| Отглеждане на пшеница сорт<br>“Супер-джудже” на руската орбитална<br>станция “МИР” (Проект “Оранжерия”) / 88  | Growing super-dwarf wheat<br>on the Russian space station Mir<br>(Project “Greenhouse”) / 78   |
| <b>Камен Вълчев, Живко Жеков,<br/>Гаро Мардиросян, Иван Христов</b>   | <b>Kamen Valchev, Jivko Jekov,<br/>Garo Mardirossian, Ivan Hristov</b>   |
| Фотоелектричен преобразувател<br>с използване на ефекта на Муаров / 91  | Photoelectric transducer based<br>on the use of Mouarov's effect / 89  |
| <b>Бойчо Бойчев</b>   | <b>Boicho Boichev</b>  |
| Малки двуканални фотометри<br>по проекти “Активен” и “АПЕКС” / 92   | Small two-channel photometers under<br>the “Aktiven” and “Apex” projects / 101   |
| <b>Живко Жеков</b>  | <b>Jivko Jekov</b>   |
| Ефективност на визирни оптични уреди<br>при наблюдение на отдалечени обекти / 102   | Efficiency of visor optic devices in<br>the monitoring of remote objects / 104   |
| <b>Пламен Христов, Петър Гецов,<br/>Пламен Ангелов</b>  | <b>Plamen Christov, Peter Getzov,<br/>Plamen Angelov</b>   |
| Верификация на програмното осигуряване<br>на компютърни системи за управление и<br>системи за полунатурно моделиране чрез<br>модели на Хоар / 105   | A software verification<br>of computer control systems<br>and real time simulation systems<br>using Hoare's models / 112   |

Българска академия на науките. Bulgarian Academy of Sciences  
 Аерокосмически изследвания в България. 14. Aerospace Research in Bulgaria  
 София, 1998. Sofia

## Elliptical accretion discs with constant eccentricity. I. Case $\eta = \beta \Sigma^n$

*Dimitar Dimitrov*

*Space Research Institute, Bulgarian Academy of Sciences*

### 1. Introduction

In the majority of papers which deal with the accretion discs, it is a priori assumed that the disc particles are moving around the primary star on circular orbits [1, 2]. Nevertheless, there have been performed theoretical investigations, indicating that the circular motion is not the only possibility for description of the disc dynamics. Numerical simulations of Whitehurst and King [3, 4] have shown development of stable eccentric accretion discs in the close binary systems as a result of the tidal influence of the secondary star. As indicate their researches, the outer parts of the discs are more elongated than the inner regions. This is naturally explained by the greater value of the tidal force at large disc radii. Analytical searches of Syer and Clarke [5, 6] and Lyubarskij et al. [7] are concentrated over the discs for which eccentricity  $e$  does not depend on the disc radius  $r$ . In particular, Lyubarskij et al. [7] prove that the case  $e=\text{const}$  may be realized under quite general dependence of the viscosity law on the azimuthal angle  $\varphi$ . It should also be noted that in the later paper stability analysis of the circular nonstationary accretion discs leads to the conclusion that for some viscosity laws (e.g., for  $\alpha$ -viscosity) these discs are unstable with respect to the growth of the eccentricity. Consequently, from theoretical grounds, it is not unreasonable to include into our considerations accretion discs with constant eccentricity  $e$ .

Observational data from some binary systems also support the possibility that the noncircular accretion discs are really existing objects in the nature. In particular, tidally distorted eccentric discs with time-dependent sizes are an useful tool for explanation of the superhump period of the light-curves of SU UMa, VW Hyi, TU Men and some other binary stars [8, 9]. Although a nonviscous accretion also may produce discs with nonaxisymmetric surface density distribution  $\Sigma$  [10, 11], throughout this paper we shall limit us to viscosity governed accretion discs.

### II. Accretion disc model

Let us consider a geometrically thin Keplerian accretion disc. The trajectories of the fluid elements (i.e., streamlines) are assumed to be cofocal

ellipses which are described by two quantities: the eccentricity  $e$  and the focal parameter  $p$ . The origin of the coordinate system coincides with the centre of the primary star around which the disc particles slowly spiral in by nearly Keplerian orbits. We restrict our treatment of the problem to the simple case in which the apse lines of all orbits are in line with each other, i.e., the semimajor axis of the ellipses lie on the abscissa. Consequently, in polar coordinates  $(r, \varphi)$  the position of any particle is given by

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

The evolution of the accretion disc may be determined from the energy and angular momentum exchange between adjacent fluid contours caused by the viscosity. It should be emphasized that unlike the elliptical orbits in celestial mechanics, self-intersecting adjacent Keplerian orbits in gaseous discs are excluded from considerations. Another important feature is that the focal parameter  $p$  and the eccentricity  $e$  are not, generally speaking, independent variables of the accretion disc model. For example, Lyubarskij et al. [7], solving the problem of stationary viscous accretion in eccentric discs, have obtained a second order differential equation for  $e=e(p)$ . Solving it numerically, they conclude that three classes of solutions exist (see Figs. 2, 4 and 5 from [7]). In particular, it is evident that the solution  $e=\text{const}$  is available — a result which is also confirmed analytically by Lyubarskij et al. [7]. The most attractive property of the accretion discs with an arbitrary constant eccentricity of the orbiting particles is the possibility to exist for any reasonable viscosity law dependence on the azimuthal angle  $\varphi$ . Consequently, there is no need to specify viscosity in details when we are dealing with constant eccentricity discs.

Following the notations of Lyubarskij et al. [7], we shall use as nonorthogonal curvilinear Eulerian coordinates the focal parameter  $p$  and the azimuthal angle  $\varphi$ . Since the evolution of the nearly Keplerian accretion discs with time is slow in comparison with the Keplerian time-scale, it is easy to show that in the case of constant  $e$  (i.e.,  $\partial e / \partial p \equiv e_p = 0$ ) the disc surface density  $\Sigma(p, \varphi, e, t)$  may be factorized [7]

$$(2) \quad \Sigma(p, \varphi, e, t) = f(p, e, t) / \sqrt{g} V^\varphi,$$

where

$$(3) \quad g = p^2 / (1 + e \cos \varphi)^4$$

is the determinant of the metric tensor and

$$(4) \quad V^\varphi = (GM/p^3)^{1/2} (1 + e \cos \varphi)^2$$

is the contravariant  $\varphi$ -component of the Keplerian velocity.  $G$  and  $M$  are the Newton's gravitational constant and the mass of the compact object in the disc centre, respectively. Our purpose in this paper is to obtain in the stationary case ( $\partial f / \partial t = \partial \Sigma / \partial t = 0$ ) an explicit expression for the unknown function  $f(p, e)$  using an appropriate viscosity law. In their investigation Lyubarskij et al. [7] introduce an auxiliary function  $Y(e, \varphi)$  through the relation

$$(5) \quad gr^p \sigma^{p\varphi} = -\frac{3}{2} (GMp)^{1/2} Y(e, \varphi),$$

where  $r^p=p$  is the contravariant  $p$ -component of the radius vector  $\bar{r}$  (for  $e_p=0$ ) and

$$(6) \quad \sigma^{p\varphi} = -\frac{3}{2} \left( \frac{GM}{p^5} \right)^{1/2} (1 + e \cos \varphi) \left[ 1 + \frac{7}{3} e \cos \varphi + \frac{1}{3} e^2 (1 + 4 \cos^2 \varphi) + \frac{1}{3} e^3 \cos \varphi \right],$$

(for  $e_p=0$ ) is the contravariant  $p\varphi$ -component of the shear tensor  $\sigma^{ik}$  ( $i, k=p, \varphi$ ).

Taking into account equalities (5) and (6), it is easy to compute

$$(7) \quad Y(e_p=0, \varphi) = \frac{1}{3} (1+e \cos \varphi)^{-3} (3 + e^2 + 7e \cos \varphi + 4e^2 \cos^2 \varphi + e^3 \cos \varphi).$$

In the model under consideration, the disc evolution is determined only by the viscous stresses  $w^{ik} = \eta \sigma^{ik}$  ( $i, k = p, \varphi$ ), where  $\eta$  is the integrated over the disc thickness viscosity coefficient. It should be noted that according to Syer and Clarke's results [6, 12], if the disc viscosity coefficient  $\eta$  is a separate function of streamline and azimuthal angle  $\varphi$ , the rate of change of the eccentricity  $e$  with the orbital phase  $\partial e / \partial \varphi \equiv e_\varphi$  can be expressed as a perfect differential. From this follows that orbit averaged value  $\langle e_\varphi \rangle$  equals to zero and the later authors conclude that, to first order of the perturbation theory, the viscous elliptical discs exactly preserve their eccentricity during the accretion process. In other words, the elliptical discs, once formed in any way in a Keplerian potential, are long living structures and the stationary approximation can not be ad hoc excluded from considerations as an unreal description of the accretion.

### III. Power law viscosity

We shall consider the model case of an  $\eta = \beta \Sigma^n$  viscosity law, where the multiplier  $\beta$  and the power  $n$  ( $0.5 \leq n \leq 3.0$ ) have constant values. Integrating over  $p$  the equation of angular momentum balance, Lyubarskij et al. [7] have obtained for the case  $e_p=0$  the following relation between the shear viscosity coefficient  $\eta$  and the mass accretion rate  $\dot{M}$ :

$$(8) \quad \int_0^{2\pi} \eta(p, \varphi) Y(e, \varphi) d\varphi = \frac{2}{3} [\dot{M} - D(\beta, n, e) / \sqrt{GMp}],$$

where  $D(\beta, n, e)$  is an integration constant depending on  $\beta, n$  and  $e$ , but not on  $p$  and  $\varphi$ . In their investigation Lyubarskij et al. [7] have neglected  $D$ , limiting their results to these parts of the disc which are far away from its inner boundary, i.e., for  $p$  large enough in order to be satisfied  $\dot{M} \gg D / \sqrt{GMp}$ . We, however, shall preserve the constant  $D$ . Substituting the adopted power law  $\eta = \beta \Sigma^n$  into (8) and taking into account (2), we obtain an expression for the unknown function  $f(p, e)$ , similar to eq. (39) in [7]. It includes an angle averaging of the auxiliary function  $Y(e, \varphi)$ :

$$(9) \quad f^n(p, e) = \frac{2}{3\beta} \left[ \dot{M} - \frac{D(\beta, n, e)}{\sqrt{GMp}} \right] \left[ \int_0^{2\pi} \frac{Y(e, \varphi) d\varphi}{(\sqrt{g} V^\varphi)^n} \right]^{-1},$$

where the mass accretion rate  $\dot{M}$  is related to the surface density  $\Sigma$ . In this paper we shall consider  $M$  as a constant parameter of the model, having in mind that for a stationary accretion  $\dot{M}$  does not depend on time  $t$  and the focal parameter  $p$ . First of all, we note that in the case  $e = \text{const}$  throughout the disc,  $(\sqrt{g} V^\varphi)^n = (GM/p)^{n/2}$  does not include dependence on  $\varphi$  and we have to evaluate only the integrated over  $\varphi$  value of the auxiliary function  $Y(e, \varphi)$ . Secondly, we have exact analytical expressions about the following integrals [13, 14]:

$$(10) \quad \int_0^{2\pi} (1 + e \cos \varphi)^{-3} d\varphi = \pi (2 + e^2)(1 - e^2)^{-5/2},$$

$$(11) \quad \int_0^{2\pi} \cos \varphi (1 + e \cos \varphi)^{-3} d\varphi = -3\pi e (1 - e^2)^{-5/2},$$

$$(12) \quad \int_0^{2\pi} \cos^2 \varphi (1+e \cos \varphi)^{-3} d\varphi = \pi (1+2e^2) (1-e^2)^{-5/2}.$$

Finally, according to the above relations, we simply have for  $e_p=0$

$$\int_0^{2\pi} Y(e, \varphi) d\varphi = 2\pi (1-e^2)^{-1/2}. \text{ Correspondingly:}$$

$$(13) \quad f(\beta, n, p, e) = \left( \frac{GM}{p} \right)^{1/2} \left\{ \frac{\sqrt{1-e^2}}{3\pi\beta} \left[ \dot{M} - \frac{D(\beta, n, e)}{\sqrt{GMP}} \right] \right\}^{1/n},$$

$$(14) \quad \eta(\beta, n, p, e) = \frac{\sqrt{1-e^2}}{3\pi} \left[ \dot{M} - \frac{D(\beta, n, e)}{\sqrt{GMP}} \right],$$

$$(15) \quad \Sigma(\beta, n, p, e) = \left\{ \frac{\sqrt{1-e^2}}{3\pi\beta} \left[ \dot{M} - \frac{D(\beta, n, e)}{\sqrt{GMP}} \right] \right\}^{1/n}.$$

These expressions illustrate the well known result that for constant eccentricity elliptical discs the viscosity coefficient  $\eta$  and the surface density  $\Sigma$  are functions on streamlines only [5-7]. In the outer parts of the disc (for  $p \gg D^2(\beta, n, e)/GMP^2$ )  $\eta$  and  $\Sigma$  become independent also on  $p$  and approach constant values:

$$(16) \quad f(\beta, n, p, e) \approx \sqrt{GM/p} \left( \dot{M} \sqrt{1-e^2}/3\pi\beta \right)^{1/n},$$

$$(17) \quad \eta(\beta, n, p, e) \approx \eta_{\max}(e) \equiv \dot{M} \sqrt{1-e^2}/3\pi,$$

$$(18) \quad \Sigma(\beta, n, p, e) \approx \Sigma_{\max}(\beta, n, e) \equiv \left( \dot{M} \sqrt{1-e^2}/3\pi\beta \right)^{1/n}.$$

For stationary circular accretion discs ( $e=0, p=r$ ), (16) and (17) transform into the expressions given by Lyubarskij et al. [7]:  $f_0(\beta, n, p) = \sqrt{GM/p} \left( \dot{M}_0 / 3\pi\beta \right)^{1/n}$  and  $\eta_0 = \dot{M}_0 / 3\pi$ .

#### IV. Boundary conditions

In order to evaluate the integration constant  $D(\beta, n, e)$  it is appropriate to utilize any physically reasonable conditions at the inner boundary of the accretion disc. Our investigation deals with the stationary case and, consequently, these conditions would also be independent on time  $t$ . Determination of such boundary conditions may be strongly complicated if general relativistic effects must be taken into account. But in the later case, as mentioned by Syer and Clarke [5, 12], differential precession leads to a circularization of the inner parts of the disc. For this reason we would expect that our supposition of constant eccentricity orbits with  $e \neq 0$  throughout the disc is not strictly fulfilled. Nevertheless, we shall simply limit us to the Newtonian mechanics description of the inner disc. But even in that case, the presence of the secondary star may cause a differential precession because of deviations from a Keplerian potential [5, 11]. We also

neglect this possibility and assume that giving not very precisely the inner boundary conditions, the global disc structure would not be drastically affected.

Following the suggestion of Shakura and Sunyaev [15], we may suppose that the viscous stress is nearly equal to zero on the last stable orbit with  $p = p_{\min}$ , i.e.,  $\eta(p_{\min}, e) \approx 0$ . This condition enables us to evaluate the integration constant  $D(\beta, n, e)$

$$(19) \quad D(\beta, n, e) = \dot{M} \sqrt{GM p_{\min}}$$

through the minimal value of the focal parameter  $p_{\min}$ . It should be noted that in the particular case of circular orbits  $p_{\min} = 3R_g$  for a nonrotating black hole or a neutron star with a radius  $R < 3R_g$ , where  $R_g$  is the Schwarzschild gravitational radius. During the transition from  $p > p_{\min}$  to  $p < p_{\min}$  the character of the gas particles motion abruptly changes. The nearly Keplerian orbiting with a slow radial drift is transformed into a fast radial falling without energy release due to viscous forces. Similar situation is expected for elliptical orbits if  $r_{\min} = \frac{p_{\min}}{1+e} < 3R_g$ , where the transition from one type orbits to another type occurs at the pericentre. According to (17) – (19), the expressions for viscosity and disc surface density can be rewritten in the following form:

$$(20) \quad \eta(p, e) = \frac{\dot{M} \sqrt{1-e^2}}{3\pi} \left[ 1 - \left( \frac{p}{p_{\min}} \right)^{-1/2} \right] = \eta_{\max}(e) \left[ 1 - \left( \frac{p}{p_{\min}} \right)^{-1/2} \right],$$

$$(21) \quad \Sigma(p, e) = \left( \frac{p}{GM} \right)^{1/2} f(p, e) = \left( \frac{\dot{M} \sqrt{1-e^2}}{3\pi\beta} \right)^{1/n} \left[ 1 - \left( \frac{p}{p_{\min}} \right)^{-1/2} \right]^{1/n} \\ = \Sigma_{\max}(e) \left[ 1 - \left( \frac{p}{p_{\min}} \right)^{-1/2} \right]^{1/n}.$$

Obviously, the vanishing of the viscosity  $\eta(p_{\min}, e)=0$  at the inner disc edge implies also vanishing of the disc surface density  $\Sigma(p_{\min}, e)=0$  at the same place because of the a priori accepted viscosity law  $\eta=\beta\Sigma^n$ . Sometimes it is more appropriate to decide that  $\Sigma$  does not approach zero value at  $p=p_{\min}$ . For example, if  $R > 3R_g$  or the compact object (primary star) is a white dwarf, a boundary layer is expected to exist between the accretion disc and the stellar surface. Correspondingly, the disc surface density  $\Sigma$  will not drop to zero at the inner boundary. Moreover, as we have mentioned earlier, at the innermost region of the disc a circularization of the particle orbits may occur. Then the assumption  $e=\text{const}$  throughout the disc is not a reasonable approximation for all disc radii. Consequently, it may be preferable to choose  $p_{\min}$  to be such a value of the focal parameter  $p$ , above which our description of the accretion disc structure (with  $e=0$ ) is valid. This situation suggests that it may be more appropriate boundary conditions of the considered model to be given at some value  $p=p_{\min}$  which differs from the focal parameter at the inner geometrical boundary of the disc. We are able to modify (20) – (21) for the case of nonzero density  $\Sigma_{\min}(e) \equiv \Sigma(p_{\min}, e) \neq 0$ . The result is a slightly more general form of these expressions:

$$(22) \quad \eta(p, e) = \eta_{\max}(e) \left\{ 1 - \left[ 1 - (\Sigma_{\min}(e)/\Sigma_{\max}(e))^n \right] \left( \frac{p}{p_{\min}} \right)^{-1/2} \right\},$$

$$(23) \quad \Sigma(p, e) = \left( \frac{p}{GM} \right)^{1/2} f(p, e)$$

$$= \Sigma_{\max}(e) \left\{ 1 - \left[ 1 - (\Sigma_{\min}(e)/\Sigma_{\max}(e))^n \right] \left( \frac{p}{p_{\min}} \right)^{-1/2} \right\}^{1/n}.$$

Therefore, the problem of determining of the integration constant  $D(\beta, n, e)$  in the angular momentum balance is transformed into the problem of finding of an appropriate value of the accretion disc surface density  $\Sigma$  around a given streamline. This may be more useful situation when the results (13) – (15) are applied to concrete constant eccentricity disc models.

## V. Discussion and conclusions

Our consideration of elliptical accretion discs is limited to the case of nested cofocal constant eccentricity streamlines. We have also adopted the approximation of a power law viscosity dependence  $\eta = \beta \Sigma^n$ , where parameters  $\beta$  and  $n$  are assumed to have constant values throughout the disc. We have derived in an explicit form analytical expressions for the surface density  $\Sigma$  and the integrated over the disc thickness shear viscosity coefficient  $\eta$ . According to conclusions of Syer and Clarke [5, 6],  $\Sigma$  and  $\eta$  are functions of streamlines only. Even more, for the outer disc regions ( $p > D^2(\beta, n, e)/GM^2$ ) these quantities approach constant values. Formulae (20) – (23) can easily be rewritten in the usual polar coordinates  $(r, \varphi)$  if the focal parameter  $p$  is replaced by means of (1):  $p = r(1 + e \cos \varphi)$ . Having in mind that the expected values of  $n$  lie approximately between 0 and 3, a weak dependence on  $\varphi$  appears in the expressions for  $\Sigma(r, \varphi)$  and  $\eta(r, \varphi)$ . It should be noted that giving of the disc boundary conditions at its inner part may possibly strike with difficulties (like the Lightman – Eardley instability [16]), in addition to the other approaches which limit the application of (20) – (23) to the real accretion discs. For example, the disc may not have a mirror symmetry with respect to the direction of pericentre–apocentre, which in our treatment is assumed to be the same for all ellipses. As pointed out by Syer and Clarke [5], when the eccentricity exceeds a critical value, the flow is relatively thickened for a section of the flow downstream of apocentre and, as a consequence, a prograde precession of the streamline will follow. They have also mentioned that it is not clear at present time whether this mechanism of circularization works for all parts of the accretion disc.

Nowadays it is not doubtful that elliptical accretion discs may exist at least around some of the known compact objects, preferably in close binary stellar systems. The analytical expressions derived in this paper would be useful for computation of the theoretical disc brightness distributions and profiles of disc spectral lines. The latter seem highly asymmetric depending on the disc eccentricity  $e$  and the disc inclination to the observer's line of sight [5, 9]. Changes of the accretion disc characteristics during the orbital motion will, in principle, give additional possibilities for verification of the approaches made in the considered model, e.g., constant eccentricity  $e$  along the disc radius, stationarity, averaging of the disc parameters over its height, etc.

## References

1. Pringle, J. E., M. J. Rees. Accretion Disc Models for Compact X-Ray Sources. – Astron. & Astrophys., 21, 1972, № 1, 1 – 9.
2. Pringle, J. E. Accretion Discs in Astrophysics. – In: Annual Rev. Astron. Astrophys. (Eds G. Burbidge, D. Layzer, J. G. Phillips), 19, 1981, 137 – 162.
3. Whitehurst, R. Numerical Simulations of Accretion Discs – I. Superhumps: A Tidal Phenomenon of Accretion Discs. – Monthly Not. Royal Astron. Soc., 232, 1988, № 1, 35 – 51.
4. Whitehurst, R., A. R. King. Superhumps, Resonances and Accretion Discs. – Monthly Not. Royal Astron. Soc., 249, 1991, № 1, 25 – 35.
5. Syer, D., C. J. Clarke. The Viscous Evolution of Elliptical Accretion Discs. – Monthly Not. Royal Astron. Soc., 255, 1992, № 1, 92 – 104.
6. Syer, D., C. J. Clarke. Erratum and Addendum: The Viscous Evolution of Elliptical Accretion Discs. – Monthly Not. Royal Astron. Soc., 260, 1993, № 2, 463 – 464.
7. Lyubarskij, Yu. E., K. A. Postnov, M. E. Prokhorov. Eccentric Accretion Discs. – Monthly Not. Royal Astron. Soc., 266, 1994, № 3, 583 – 596.
8. Whitehurst, R. Dynamics of Dwarf Novae Accretion Discs. – In: Theory of Accretion Disks – 2 (Eds W. J. Duschl et al.). NATO ASI Series, Garching, Germany, March 22 – 26, 417, 1993, 135 – 154.
9. Lubov, S. H. Eccentric Disk Instabilities and their Relation to Superhump Binaries. – In: Theory of Accretion Disks – 2 (Eds W. J. Duschl et al.). NATO ASI Series, Garching, Germany, March 22 – 26, 417, 1993, 109 – 123.
10. Ostriker, E. C., F. H. Shu, F. C. Adams. Near-Resonant Excitation and Propagation of Eccentric Density Waves by External Forcing. – Astrophys. J., 399, 1992, № 1, 192 – 212.
11. Adams, F. C., S. P. Ruden, F. H. Shu. Eccentric Gravitational Instabilities in Nearly Keplerian Disks. – Astrophys. J., 347, 1989, № 2, 959 – 975.
12. Syer, D., C. J. Clarke. The Viscous Evolution of Elliptical Accretion Discs. – In: Theory of Accretion Disks – 2 (Eds W. J. Duschl et al.). NATO ASI Series, Garching, Germany, March 22 – 26, 417, 1993, 155 – 158.
13. Dwight, H. B. Tables of Integrals and other Mathematical Data. Moscow, Nauka, 1973, p. 189.
14. Gradshteyn, I. S., I. M. Ryzhik. Tables of Integrals, Sums, Series and Products. Moscow, Nauka, 1971, 397 – 398.
15. Shakura, N. I., R. A. Sunyaev. Black Holes in Binary Systems. Observational Appearance. – Astron. & Astrophys., 24, 1973, № 3, 337 – 355.
16. Lightman, A. P., D. M. Eardley. Black Holes in Binary Systems: Instability of Disk Accretion. – Astrophys. J. Lett., 187, 1974, № 1, L1 – L3.

Received 24. II. 1997

Елиптични акреционни дискове с постоянен  
ексцентрициитет. I. Случай  $\eta = \beta \Sigma^n$

Димитър Димитров

(Резюме)

Получени са точни аналитични изрази за повърхностната  
плътност  $\Sigma$  и коефициента на сдвиговия вискозитет  $\eta$  за елиптични акреционни  
дискове с постоянен ексцентрициитет  $e$  на кофокалните токови линии на

частиците. Предположена е априорно степенната зависимост  $\eta = \beta \Sigma^n$  с постоянни параметри  $\beta$  и  $n$ . Във външните части на диска  $\Sigma$  и  $\eta$  се стремят към постоянни значения, зависещи от скоростта на акреция на вещество  $M, \beta, n$  и  $e$ .

Най-вътрешната област на диска се характеризира с бавно намаляващи  $\Sigma$  и  $\eta$ . В последния случай е въведен един допълнителен параметър (като едно гранично условие)  $-\Sigma_{\min}$ , който задава повърхностната плътност при минимално значение на фокалния параметър  $p_{\min}$ . Разгледаният модел на акреционен диск е валиден при допускането на стационарна акреция  $\dot{M} = \text{const}$ .

Благодарение на това предположение, външните граници на диска са определени чрез уравненията:

$$\Sigma = \Sigma_{\min} \left( \frac{p}{p_{\min}} \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$\eta = \beta \Sigma^n$$

където  $p$  е радиусът от центъра на диска.

Съществуващите външни граници на диска са:

$$\Sigma = \Sigma_{\min} \left( \frac{p}{p_{\min}} \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$\eta = \beta \Sigma^n$$

или

$\Sigma = \Sigma_{\min} \left( \frac{p}{p_{\min}} \right)^{\frac{1}{n}}$

или

(вторично)

Външните граници на диска са определени чрез уравненията:

$$\Sigma = \Sigma_{\min} \left( \frac{p}{p_{\min}} \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$\eta = \beta \Sigma^n$$

## Ефективност на енергоотделянето в тясна двойна система като функция от параметрите на системата

Мария Димитрова

Институт за космически изследвания, БАН

### Въведение

Акрецията на газ върху компактен обект в тясна двойна звездна система, съдържаща компактен обект, е основен източник на енергия за рентгеновата светимост на голям кръг различни по тип астрофизични обекти.

Физичните условия, при които се извършва енергоотделянето, обаче, са твърде комплексирани. При описание на газовото течение в тясна двойна следва да се отчитат гравитационното и магнитното въздействие от страна на компонентите на системата, както и процесите в самото течение – механизмите на вискоен трисне и енергообмен вследствие изльзване и погълщане на лъчение. Пространството около компактния обект следва да бъде разглеждано във всичките му три пространствени измерения.

Всичко това прави точното описание на течението практически невъзможно дори с помощта на числени модели. Още повече, че не са напълно ясни точните формули, описващи вискоените взаимодействия и процесите на изльзване.

На практика за обяснение на различните наблюдателни данни, натрупани през последните десетилетия, се прибягва до приближени модели с различна степен на достоверност, отчитащи едни или други физични процеси.

Сравнително най-пълно е изследвано влиянието на темпа на постъпване на газ в областта около компактния обект. Редица модели правят опит за описание на различни по тип променливости в рентгеновата светимост като резултат от промяна в темпа на акреция [1–4].

Едва в последните години се правят опити за моделиране на течения при различни въгрешни условия [5–8].

Настоящата публикация е продължение на серия изследвания, направени с цел да се изясни влиянието на всеки един от вътрешните и външните параметри на течението поотделно върху структурата му и респективно – върху рентгеновата светимост, която се отделя в областта, непосредствено около повърхността на компактния обект [3, 9]. И по-конкретно, изследвано е влиянието на параметрите на двойната система – маси на компонентите и разстояние между тях.

Такова изследване има смисъл в два аспекта. От една страна, в случай на ненадеждна идентификация на рентгеновия обект като част от двойна система, ако от параметрите на течението можем да получим указание за параметрите на системата. От друга страна – то допълва познанието за самото течение при отделяне влиянието на различните параметри един от друг.

### Пресмятания и резултати

Изследването се базира на числено моделиране.

Численият модел е построен на базата на Метода на крупните частици [10]. Изчисленията се извършват в неинерциална цилиндрична координатна система, в чийто център е разположен компактният обект.

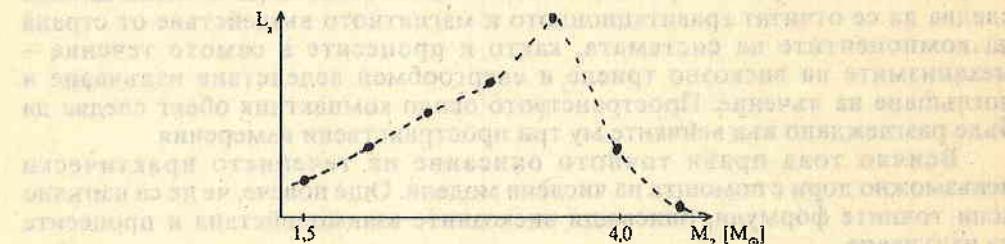
В изходните уравненията са отчетени гравитационните сили от двете компоненти на двойната система, както и центробежните сили. Налягането е сума от газовото и лъчистото налягане. Уравнението на енергетичния баланс е записано за случай на оптиически пълтен слой. Методът е по-пълно описан в предишната публикация [9].

Направени са две серии пресмятания.

В първата, при постоянно разстояние между компонентите на двойната система и компактен обект – неутронна звезда с маса  $1.5 M_{\odot}$ , варира масата на втората компонента. Разгледани са седем случая – 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4 и 4,5 пъти  $M_{\odot}$ .

Времевата еволюция, както и в предходните работи, се проследява до момента на установяване на стационарно състояние на газовото течение. За критерий се приема получаването на константна стойност на рентгеновото лъчение от повърхността на неутронната звезда. Критерият е основателен, тъй като това съответства на постоянен темп на падане на газ върху повърхността на обекта.

На фиг. 1 е представена зависимостта на тази постоянна стойност от масата на втората компонента.



Фиг. 1. Зависимост на рентгеновата светимост в тясна двойна система при достигане на стационарен режим от масата на втората компонента

На фиг. 2 е представена зависимостта на максималната повърхнинна пълтност, която се установява в течението, отново в различните седем случая.

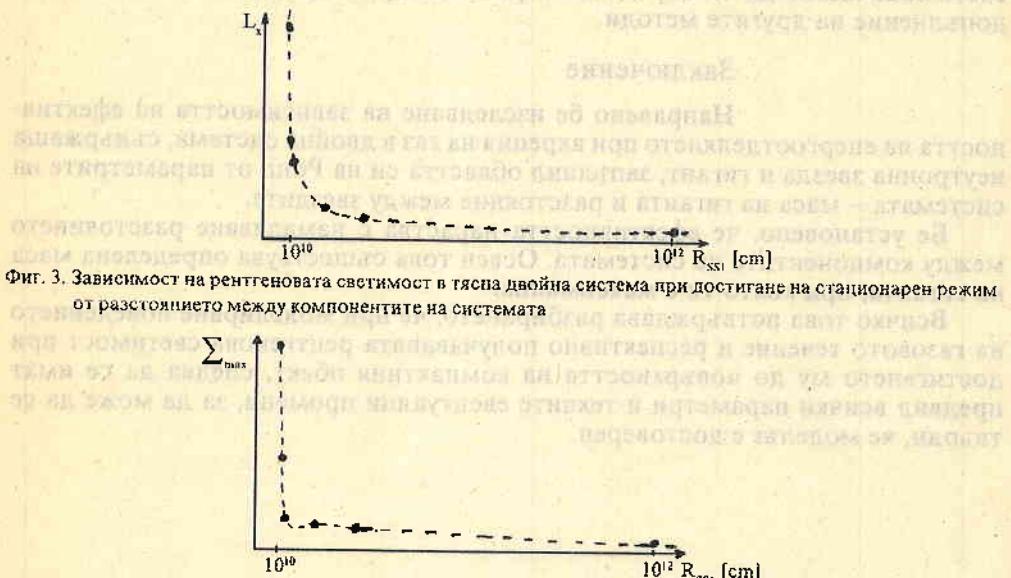


Фиг. 2. Зависимост на максималната повърхнинна пълтност на газовото течение в тясна двойна система при достигане на стационарен режим от масата на втората компонента

Както се вижда от графиките, рентгеновата светимост е максимална при  $M_2$  от порядъка на  $3,5 M_\odot$ , докато максималната плътност е растяща функция на масата на втората звезда.

При втората серия пресмятания, постоянна остава масата  $M_2 = 3,5 M_\odot$ . Разгледани са шест случая за разстоянието между компонентите съответно  $10^{10}, 5 \cdot 10^{10}, 10^{11}, 5 \cdot 10^{11}, 10^{12}$  и  $5 \cdot 10^{12}$  см.

На фиг. 3 и 4 са представени зависимостите отново на рентгеновата светимост и максималната повърхнинна плътност от това разстояние.



Фиг. 4. Зависимост на максималната повърхнинна плътност на газовото течение в тясна двойна система при достигане на стационарен режим от разстоянието между компонентите на системата

Както се вижда от фигурите, и двете величини намаляват с увеличаване разстоянието между компонентите на двойната система.

При всички пресмятания темпът на постъпване на газ през вътрешната точка на Лагранж в областта около компактния обект е един и същ и е равен на  $10^{-9} M_\odot/\text{год}$ .

Структурата на течението във всичките по-горе разгледани случаи е много близка до тази, представена в [3, 9]. Единствено максималната плътност е по-голяма при по-голяма маса на втората звезда, както и при по-малко разстояние между компонентите на системата (фиг. 2 и 4).

### Дискусии

Както се вижда от представените по-горе зависимости ефективността на енергоотделянето при акреция на газ в двойна здездна система зависи не само от темпа на постъпване на газ в областта около компактния обект, но и от параметрите на самата система. Ефективността е по-голяма при по-малко разстояние между компонентите на системата. Освен това е максимална при определено съотношение между масите на двете звезди.

При изследванията на други автори не е обръщано внимание на тези зависимости, вероятно най-вече поради обстоятелството, че разглежданията им са обвързани с конкретни наблюдавани обекти и са правени съответно при фиксириани параметри на двойната система [1, 3, 5-7].

Когато рентгеновият обект е надеждно идентифициран с конкретна двойна система и параметрите ѝ са уточнени по други критерии, все пак има смисъл да бъдат имани предвид споменатите зависимости в случаи, че по наблюдалата рентгенова светимост се съди за темпа на загуба на маса от страна на втората звезда. Особено в случаите на нестационарни режими на акреция.

При неточно определени параметри на двойната система или ненадеждна идентификация на рентгенов обект с такава, обратно, по рентгеновата светимост могат да се определят вероятни параметри, които да служат за допълнение на другите методи.

### Заключение

Направено бе изследване на зависимостта на ефективността на енергоотделянето при акреция на газ в двойна система, съдържаща неутронна звезда и гигант, запълнил областта си на Рош, от параметрите на системата – маса на гиганта и разстояние между звездите.

Бе установено, че ефективността нараства с намаляване разстоянието между компонентите на системата. Освен това съществува определена маса на гиганта, при която тя е максимална.

Всичко това потвърждава разбирането, че при моделиране поведението на газовото течение и респективно получаваната рентгенова светимост при достигането му до повърхността на компактния обект, следва да се имат предвид всички параметри и техните евентуални промени, за да може да се твърди, че моделът е достоверен.

### Литература

1. Gaudenzi, S., R. Lombardi, F. Giovannelli, R. Claudi – Adv. Space Res., 8, 1988, 2-3, p. 325.
2. Georgiewa, E., L. Filipov – Adv. Space Res., 8, 1988, 2-3, p. 493.
3. Filipov, L., M. Dimitrova – Adv. Space Res., 11, 1991, 2-3, p. 67.
4. Dimitrova, M. – Аерокосмически изследвания в България, 1996, кн. 13.
5. Whitehurst, R. – MNRAS, 1994, 266, p. 35.
6. Lanzaflame, G., G. Belvedere, D. Molteni – MNRAS, 1992, 258, p. 152.
7. Meglicki, Z., D. Wickremasinghe, G. V. Backnell – MNRAS, 1993, 264, p. 691.
8. Sandip Chakrabarti, Diego Molteni – MNRAS, 1995, 272, 1, p. 80.
9. Dimitrova, M. – Аерокосмически изследвания в България, 1997, кн. 13.
10. Белоцерковский, О. М. Видимые методы механики сплошных сред. Москва, Наука, 1985.

*Постъпила на 10. I. 1997 г.*

## The efficiency of the energy production in a close binary system as a function of the system's parameters

Maria Dimitrova

### (Summary)

In terms of a two-dimensional numerical model in a close binary star system, the efficiency of energy production as a function of the system's parameters is studied. The system is assumed to contain a neutron star and a red giant, that has filled its Roshe lobe. The calculations are made with constant accretion rate through the first Lagrangean point and constant mass of the neutron star, varying, first, the mass of the second star, and then, the distance between the two stars. It is shown that efficiency of energy production depends on both these parameters.

## Енерго-структурен инвариант в космическата плазма

Деян Гочев

Институт за космически изследвания, БАН

За комплексни системи не е възможна дългосрочна прогноза. Причина е редукционистичният и вероятностен подход в прилагане на законите за елементарни сили за описание на отворени системи далече от равновесие и усредняване. Силовото описание на комплексни системи, притежаващи структурност и типичности е неподходящо поради факта, че не е коректно да се приема баланс на действащите сили [1].

Околоземната космическа плазма (ОКП) е отворена система поради съществуващия обмен със Слънцето и междупланетното пространство. Съществува взаимна обусловеност на процесите между компонентите на този обмен - магнитното поле и потоците заредени частици. Основните контактни зони между тях и ОКП са дневната магнитопауза и плазменият слой в опашката, т.е., обособени са активни гранични области (във феноменологичен смисъл). Основен "канал" за енергиен обмен са магнитните силови линии. Промени на топологията им определят особеностите на процесите и резултатните структури. Процесите в ОКП са подобни на облакообразуване - флуктуациите възникват поради критични стойности, натрупване, градиенти. "Макроизглаждането" на спонтанно възникващите флуктуации води до образуване на структури с променящи се границии.

Активните области на Слънцето са с рекурентни промени на магнитното поле, големи скорости на слънчевия вятър (СВ) в полярните области и стохастични промени и ударни вълни в екваториалната област. Въз основа на различната им геоэффективност - по разположение, същност и продължителност - се правят опити за класификация на активните области, т.е. приписват им се свойства на структурни нива с разпределителни функции [2]. Подобен подход е възможен и за слънчевия вятър - мащабите на съответните структури са обратно пропорционални на концентрацията, температурата и скоростта [3].

СВ и ОКП са две плазмени образувания, в които има локални флуктуации, структури с вътрешна йерархия, поддържани от магнитното поле. Обличането на магнитосферата от СВ реално е взаимодействие на два флуида с различен брой степени на свобода. Резултатът е съществуването на постоянна самоорганизация на повторяеми и необратими процеси, образуването на вихри и вълни - затворени и отворени повторящи се структури. За изследване на типичния за тези явления детерминистичен хаос ще е полезно да се пресмятат фракталните размерности на двата взаимодействващи обекта и на граничните им области. Открити са същественият въпрос за регулиращите механизми в този дисипативен процес и определянето на максималните характерни времена. Магнитосферата е множество от ударни вълни и турбулентни процеси, т.е. разриви и хаотична енергийна каскада, в която, въпреки нееднородностите и нестабилностите, възможните структури са със сравнително големи мащаби и променливи граници [4]. Съществува и взаимодействие между вътрешни плазмени потоци – например при магнитна буря в опашката между "фоновото" антислънчево движение и ускорения противоположен поток. Наблюдава се и локално образуване на подструктури със слаба интензивност и постоянни за системата нива – радиационен пояс [5]. В конвективната полярна йоносфера се наблюдава стохастично образуване на плазмени "мехури" [5]. Съществува взаимодействие между авроралната област и плазмения слой, т.е. между две структури, които регулярно участват в образуването на гранични области [6, 7].

По авроралните магнитни силови линии съществуват пулсиращи потоци заредени частици, чието електромагнитно излъчване е "каспулирано" в специфични честотни диапазони. Еволюцията на структурите е придружена от интензивно електромагнитно излъчване. Пулсацията е последователност от пик, свързан с освобождаването на енергия поради вече образувана структура, спад, свързан с релаксационни процеси и затишисе – подготовка за образуване на нова структура. Изследването на съотношенията между трите части, както и сравняването им с размерите на явленията, върху които се наслагват [8], би допълнило представите ни за съответната йерархия.

Както беше споменато, отвореността на системата се осъществява чрез магнитно присъединяване в члената магнитопауза и в опашката. Докато за първата област основното енергийно превръщане е електромагнитното излъчване, т.е. с малка структурираност, втората е основна гранична област с подчертан ефект на акумулиране на енергия [9]. Съществуват няколко интересни особености: за присъединяване в енергоактивната зона в опашката нужната за суб-буря тригерна енергия е около десет процента от освободената [10]. Съществуващото локално структурно образуване (паралелна компонента на електричното поле) на други основни структурни нива (полярна йоносфера) е съществено в подготвителната и възстановителната фаза на суб-бурята [11]. Създаването на неутрална линия е резултат от поредица от цикли [12],

завършващи съответно с образуване на електрично поле, електричен ток, магнитно поле, последното от които приключва със създаването на движещ се плазмоид, ограничен от затворена силова линия. Въпреки съществуващия енергиен излишък, след образуването на плазмоида поредицата от цикли спира (липса на пораждащ потенциал?). Известно е, че за присъединяването определящи са вертикалната и азимуталната компонента на междупланетното магнитно поле. За северна посока на вертикалната му компонента се наблюдават хаотично разположени присъединявания, образуване на ударни вълни, гигантски плазмени флукутации. Този процес съществува и в отдалечените области на магнитосферата [13], т.е., намалена интензивност на структурообразуване в голям обем. Северната компонента влияе и върху поведението на структурните граници – например с нарастване на модула ѝ движението на разрива на Харанг в северното полукълбо настъпва по-рано отколкото в южното. Съществува подобие между влиянието на сезонните ефекти (вътрешен фактор) и междупланетното магнитно поле (външен фактор). Установено е различното влияние на азимуталната компонента на междупланетното магнитно поле върху образуването на конвективни клетки – форми и характерни времена [14].

Основен канал за енергиен обмен са надлъжните токове. За тяхната същност моделите варират от дискретни (токове) до полеви (вълни). Ако приемем валидността на вълновия модел, то плазмоидът и надлъжният ток могат да се разглеждат като двата клона – вълнов и корпускулярен – на бифуркационна област на процес в магнитосферната опашка. Поради различни фактори съществува интензивно структурообразуване в самите надлъжни токове, което понякога води до промяна на граници и образуване на нови структури – тета-авора [15]. Промените на съотношението между отворените и затворените силови линии в авроралната област и в полярната шапка се дължат на съществуването на две гранични области и/или бифуркационна област на процес в магнитосферната опашка.

Пример за подобни въздействия, но от Земята към високите слоеве на атмосферата, е структурообразуването поради вътрешни фактори – възникването на електрическо поле при гръмотевична дейност, съпътстващото електромагнитно излъчване и локалното усиливане на полярните сияния в ниските слоеве на йоносферата. Изследването на разпределението на електрическото поле в океана за спокойни условия (затворена система) и при турбулентност (отворена система), съответно Гаусово и арксинусово, илюстрира подобието на проблемите [16].

Надявам се, че сбитото скициране на възможни връзки от гледна точка на предложения енерго-структурен инвариант ще стимулира дискусия за нуждата от създаване на нови обобщаващи методи за изследване.

## Л и т е р а т у р а

1. Jahrbuch der Max Planck Gesellschaft. 1993, p. 33.
2. Вагануй, И. Ann Geoph., 13, 1995, № 8, p.886.
3. Зелений, Л. М. Геомагнетизм и аэрономия, 33, 1993, кн. 4, с. 18.
4. Веселовски, И. С. Геомагнетизм и аэрономия, 35, 1995, кн.5, с. 95.
5. Мингалев, Г. М. Геомагнетизм и аэрономия, 33, 1995, кн. 5, с. 136.
6. Неповский, Р. Phys. Scr., 51, 1995, (in print).
7. Гельберг, Л. М. Геомагнетизм и аэрономия, 1994, 34, кн. 1, с. 48.
8. Зелений, Л. М. Итоги науки и техники, Москва, ВИНИТИ, 1986, т. 24, с. 97.
9. Величко, В. Геомагнетизм и аэрономия, 35, 1995, кн. 5, с. 49.
10. Tzurutani, B. I. GRL, 22, 1995, iss. 6, p. 553.
11. Ферстер, М. Геомагнетизм и аэрономия, 34, 1995, кн. 4, с. 160.
12. Гочев, Д. Енерго-структурен инвариант – предпоставки и същиности. – Аерокосмически изследвания в България, (под печат).
13. Raeder, J. GRL, 22, 1995, iss. 4, p. 349.
14. Rushoniem, J. M. GRL, 22, 1995, iss. 9, p. 1121.
15. Воробьев, В. Г. Геомагнетизм и аэрономия, 35, 1995, кн.5, с. 34.
16. Коротаев, Г. Х. Геомагнетизм и аэрономия, 35, 1995, кн. 4, с. 119.

Постъпила на 28. V 1996 г.

## An energy-structural invariant in space plazma

*Dejan Gotchev*

(Summary)

An unusual view on the processes of energy-structural transformation in the magnetosphere is presented. The general interrelation and its ambiguities are critically discussed.

## 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<sup>1</sup>

*Nikolai D. Birjuk\*, Vladimir N. Damgov\*\**

\* Department of Physics, Voronej State University,  
 394693 Voronej, Russia

\*\* Space Research Institute, Bulgarian Academy of Sciences,  
 6 Moscovska Str., 1000 Sofia, Bulgaria

#### Introduction

Qualitative analysis assumes considerable importance in the investigation of complex oscillating systems, since it allows of identifying the most general features of the system behaviour. The paper reveals a general method for analyzing linear systems with periodic and almost periodic parameters.

The Part 1 of the present paper [1] has quoted a basic system of two linear differential equations of the generalized parametric oscillating circuit. The reasonable areas of applying different form of equations have been discussed. A three-dimensional cylindrical space has been put in correspondence to the set of equations describing every possible oscillating systems with periodic parameters. Such an approach has allowed to make a methodologically consistent classification of the oscillating circuits with periodical parameters in accordance with the most important indication, namely the stability and instability according to Lyapunov's propoundings.

In the present Part 2 of the paper, the attention is mostly focused on the problem of stability of the canonical systems in a general form. Criteria for the stability or instability of a general linear resonance circuit are formed.

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

### Stability of the canonical systems

Let us assume that we have the following canonical system:

$$(1) \quad \frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{JH}(t) \mathbf{x},$$

where  $\mathbf{H}(t) = \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \beta & \gamma \end{pmatrix}$

An important role in the stability investigation is played by the rotation angle of vector  $\mathbf{x}(t) = \mathbf{X}(t)$ .  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{C}$  is a constant vector.

We shall denote the rotation angle of a given vector  $\mathbf{z}(t) = \begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix}$  as  $\varphi_z(t)$ . Obviously,

$$(2) \quad \frac{d\varphi_z(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \operatorname{arctg} \frac{q}{p} = \frac{\dot{q}p - \dot{p}q}{p^2 + q^2} = \frac{1}{p^2 + q^2} \operatorname{Det} \begin{pmatrix} p & \dot{p} \\ q & \dot{q} \end{pmatrix}$$

i.e.  $\varphi_z(t) - \varphi_z(0) = \int_0^t \frac{\operatorname{Det} \mathbf{z}/\dot{\mathbf{z}}}{(\mathbf{z}, \mathbf{z})} dt$ .

By using this formula, as well as the relation  $\operatorname{Det} \mathbf{a} \mathbf{J} \mathbf{b} = (\mathbf{a}, \mathbf{b})$ , we obtain the following equation for the rotation angle of the canonical system (1)

$$\varphi_x = \int_0^T \frac{(\mathbf{Hx}, \mathbf{x})}{(\mathbf{x}, \mathbf{x})} dt.$$

We designate the characteristic number  $h_{\max}(t)$  and  $h_{\min}(t)$  of matrix  $\mathbf{H}(t)$  as follows:

$$h_{\max}(t) = \frac{\alpha + \gamma}{2} \pm \sqrt{\frac{(\alpha - \gamma)^2}{4} + \beta^2}.$$

Since

$$h_{\min}(t) \leq \frac{(\mathbf{Hx}, \mathbf{x})}{(\mathbf{x}, \mathbf{x})} \leq h_{\max}(t)$$

it follows that

$$\int_0^T h_{\min}(t) dt \leq \varphi_x \leq \int_0^T h_{\max}(t) dt.$$

Let us assume that  $\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \alpha_0 \beta_0 \\ \beta_0 \gamma_0 \end{pmatrix}$  and  $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$  are arbitrary numbers, satisfying the conditions that  $\alpha_0 > 0$ ,  $\gamma_0 > 0$ ,  $\alpha_0 \gamma_0 - \beta_0^2 = 1$  while  $h_{\min}$ ,  $h_{\max}$  are roots of the equation:

$$\operatorname{Det} [\mathbf{H}(t) - h \mathbf{H}_0] = 0.$$

If inequalities

$$(3) \quad n\pi < \int_0^T h_{\min}(t) dt \leq \int_0^T h_{\max}(t) dt < (n+1)\pi$$

are satisfied for a definite  $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , equation (1) will be stable and  $\mathbf{H}(t) \in O_n$  (see [1]).

As an illustration of this stability criterion we shall consider equation  $\frac{d^2 y}{dt^2} + p(t) \gamma = 0$ , which is a particular case of the canonical system (1). Let us set  $C > 0$  as a constant, for which:

$$\frac{n\pi}{T} < C < \frac{(n+1)\pi}{T}, \quad n \text{ is an integer.}$$

Provided that inequalities

$$(4) \quad n\pi < \frac{1}{C} \int_0^T p_C^-(t) dt \leq \frac{1}{C} \int_0^T p_C^+(t) dt < (n+1)\pi,$$

where  $p_C^+(t) = \begin{cases} p(t), & \text{for } p(t) > C^2 \\ C^2, & \text{for } p(t) \leq C^2 \end{cases}$

$$p_C^-(t) = \begin{cases} p(t), & \text{for } p(t) \leq C^2 \\ C^2, & \text{for } p(t) > C^2 \end{cases}$$

are satisfied, the equation under consideration is stable and  $p(t) \in O_n$  (see [1]).

Let us formulate a second stability criterion. Let inequality  $H(t) C, C \geq 0$  be valid for any  $t$  and  $C$ . If inequalities  $k\pi < m_- \leq M_+ < (k+1)\pi$  are satisfied, equation (1) belongs to the  $k$ -th stability area (see [1]).

And if inequalities  $M_+ > k\pi, m_- < k\pi$  are satisfied, equation (1) belongs to the  $k$ -th instability area.

If inequality  $(H(t) C, C) \leq 0$  is valid for any  $t$  and  $C$ , the following substitutions should be carried out in the previous inequalities:  $M_\pm$  should be replaced by  $M_\mp$ , and  $m_\pm$  by  $m_\mp$ .

Here:

$$M_\pm = \frac{A_\pm + C_\pm}{2} + \sqrt{\frac{(A_\pm - C_\pm)^2}{4} + B_\pm^2},$$

$$m_\pm = \frac{A_\pm + C_\pm}{2} - \sqrt{\frac{(A_\pm - C_\pm)^2}{4} + B_\pm^2},$$

$$A_\pm = \int_0^T \exp \left( \pm \int_0^t g dt \right) \alpha dt, \quad B_\pm = \frac{1}{2} \int_0^T \exp \left( \pm \int_0^t g dt \right) \beta dt,$$

$$C_\pm = \int_0^T \exp \left( \pm \int_0^t g dt \right) \gamma dt, \quad g(t) = 2 \sqrt{\frac{(\alpha - \gamma)^2}{4} + \beta^2}.$$

Sometimes, owing to various reasons, equation (1) proves to be inconvenient for analyzing its stability. In such cases it is desirable to transform (1) into another equation located in the same area of stability or instability. Let us illustrate this option.

The following denotations are introduced as a supplement to (1):

$$(5) \quad \beta_0 = \frac{1}{T} \int_0^T \beta(t) dt, \quad \delta(t) = \int_0^t [\beta(t) - \beta_0] dt.$$

The variables are substituted as follows:

$$x_1 = e^{-\delta(t)} z_1, \quad x_2 = e^{-\delta(t)} z_2.$$

The result is a system of equations:

$$(6) \quad \begin{cases} \frac{d z_1}{dt} = -\beta_0 z_1 - \gamma_1(t) z_2, \\ \frac{d z_2}{dt} = \alpha_1(t) z_1 + \beta_0 z_2. \end{cases}$$

This is a system of a canonical type with a matrix

$$\mathbf{H}_1(t) = \begin{pmatrix} \alpha_1(t) & \beta_0 \\ \beta_0 & \gamma_1(t) \end{pmatrix}, \quad \alpha_1(t) = \alpha(t)e^{-2\delta(t)}, \quad \gamma_1(t) = \gamma(t)e^{2\delta(t)}.$$

Systems (1) and (6) are situated in the same areas of stability or instability, for it can be shown that the rotation angles of arbitrary vector solutions  $x(t)$  and  $z(t)$  for these two systems of equations are identical. System (6) however is frequently more convenient for investigation, since two elements in matrix  $\mathbf{H}_1(t)$  have proved to be equal and unchanging (constant) in time.

It is always possible to identify two constant matrices  $C^\pm$  so as to satisfy the inequalities:  $C^- \leq \mathbf{H}_1(t) \leq C^+$ .

These two matrices are determined in a sufficiently simple way as

$$(7) \quad C^\pm = \begin{pmatrix} \alpha_0^\pm & \beta_0 \\ \beta_0 & \gamma_0^\pm \end{pmatrix},$$

$$\alpha_0^+ = \max_t \alpha(t), \quad \gamma_0^+ = \max_t \gamma_1(t),$$

$$\alpha_0^- = \min_t \alpha(t), \quad \gamma_0^- = \min_t \gamma_1(t).$$

The constant matrix  $C^\pm$  is referred to the  $n$ -th stability zone, i.e.  $C^\pm \in O_n$  if

$$\frac{n^2 \pi^2}{T^2} < \text{Det } C^\pm < \frac{(n+1)^2 \pi^2}{T^2} \quad (\text{see [1]}).$$

On this basis the stability criterion can be formulated in the following manner.

If the inequalities

$$(8) \quad \frac{n^2 \pi^2}{T^2} \leq \alpha_0^\pm \gamma_0^\pm - \beta_0^2 \leq \frac{(n+1)^2 \pi^2}{T^2}$$

are satisfied and  $\alpha_0^+ + \gamma_0^+ > 0$ ,  $\alpha_0^- + \gamma_0^- > 0$ , equation (1) will be stable and  $\mathbf{H}(t) \in O_n$ ,  $n > 0$ .

Provided that inequalities (8) are satisfied, but  $\alpha_0^+ + \gamma_0^+ < 0$  and  $\alpha_0^- + \gamma_0^- < 0$ , equation (1) will also be stable and  $\mathbf{H}(t) \in O_{-n-1}$  ( $n > 0$ ).

In the case of  $\alpha_0^+ \gamma_0^+ - \beta_0^2 < 0$  and  $\alpha_0^- \gamma_0^- - \beta_0^2 < 0$ ,  $\mathbf{H}(t)$  will belong to the zero area of instability.

Finally we shall dwell on the following practical issue. Let us assume that there is a particular canonical system of the type of (1). How should we answer the question which area of stability or instability it belongs to? In order to come up with an answer, we should approximate the matrix of system  $H(t)$  with two piece-wise constant matrices  $H(t)$  and  $H^+(t)$ , so that  $H(t) \leq H(t) \leq H^+(t)$ . As the approximation accuracy increases, one of the following two conclusions is ultimately arrived at: (a) Matrices  $H(t)$  and  $H^+(t)$  fall in one area of stability or instability, which will also encompass matrix  $H(t)$ ; (b) These matrices never fall in the same area: one of them is situated in the stable area, while the other one is located in the adjacent unstable zone. Then obviously matrix  $H(t)$  lies on the boundary between these two areas.

The outlined method requires an ability to determine which area of stability or instability the piece-wise constant matrices belongs to. We divide up the interval  $[0, T]$  into smaller sub-intervals like this:  $0=t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n = T$ ,  $t_i - t_{i-1} = \tau_i$ . We set  $A(t) = K_i$  for  $t_{i-1} < t < t_i$ . Then  $x(t_i) = e^{K_1 \tau_1} \dots e^{K_n \tau_n} e^{K_1 \tau_1}$  and in particular

$$(9) \quad x(T) = e^{K_n \tau_n} \dots e^{K_2 \tau_2} e^{K_1 \tau_1}.$$

It is convenient to calculate the matrix exponent  $e^K$  according to the formula:

$$e^K = \operatorname{ch} \mu I + \frac{1}{\mu} \operatorname{sh} \mu K,$$

$\pm \mu$  are characteristic figures of  $K$ . In the particular case of  $\mu = 0$ , one can determine  $e^K = I + K$ .

The characteristic equation regarding  $x(T)$  is of the form

$$\lambda^2 - 2a\lambda + 1 = 0,$$

where  $2a = \operatorname{Sp} x(T)$ . Provided that  $|a| < 1$ , it follows that  $A(t) \in O$ , (all solutions are bounded), and when  $|a| > 1$ ,  $A(t) \in H$  is valid (there are unbounded solutions as well). With a view to identifying the number of the stable or unstable range, the rotation angle of the solution should be computed.

Let us take  $x_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$  as an initial vector. Then for  $t=t_1$ , the solution will take

the form  $x_1 = e^{K_1 \tau_1} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ . If  $K_1$  is unstable (i.e.  $\operatorname{Det} K_1 \leq 0$ ), the rotation angle for a period of time  $\tau_1$  will fall within the range  $-\pi \leq \varphi_1 < \pi$ . If  $K_1$  is stable (i.e.  $\operatorname{Det} K_1 > 0$ ), the matrix column can be used to determine the rotation angle only within an allowance of the term  $m\pi$  ( $m$  is an integer). For the purpose of establishing the rotation angle accurately, it is necessary to set temporarily  $T = \tau_1$  and to determine the stable range to which  $K_1$  belongs. Let us assume that  $m$  is the number of this stable range, while  $\varphi_1$  is the rotation angle over a period of time  $\tau_1$ . Then  $m\pi < \varphi_1 < (m+1)\pi$  and the angle can be determined accurately.

For  $t=t_2$  the solution will be  $x_2 = e^{K_2 \tau_2} e^{K_1 \tau_1} x_0$ ; once again the rotation angle  $\varphi_2$  is determined and the total resultant rotation angle is summed up:  $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$ . The complete rotation angle is:  $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n$ . If  $|a| < 1$  and  $m\pi < \varphi < (m+1)\pi$ ,  $A(t) \in O_m$  (see [1]). And if  $|a| > 1$ , the solution will be unstable:  $A(t) = H_m$ . We should determine  $m$ . As it was shown above, there is only one matrix  $K$ , satisfying the equation  $e^{KT} = \pm B$ ,  $B = e^{K_n \tau_n} \cdot e^{K_{n-1} \tau_{n-1}} \dots e^{K_2 \tau_2} \cdot e^{K_1 \tau_1}$ , (out of the two possible signs we select the one for which  $K$  is real). Let us assume that  $a_+$  and  $a_-$  are the natural

vectors of matrix  $K$ :  $Ka_{\pm} = \pm \mu a_{\pm}$  ( $\mu > 0$ ). We have already shown that all vectors lying in quadrants I and II (this refers to the natural vectors) turn at an angle  $\varphi$  over time  $T$ :  $m\pi < \varphi < (m+1)\pi$ , and the vectors situated in quadrants II and IV turn at an angle  $\varphi$ :  $(m-1)\pi < \varphi < m\pi$ . The problem of determining the rotation angle boils

down to plotting vectors  $a_+$  and  $a_-$ , clarifying which quadrant vector  $x_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$  lies in, and determining the angle by using one of the inequalities given above.

Thus, by employing simple algebraic operations one can always determine the stable or unstable area to which the interval-constant matrices  $H(t)$  and  $H^+(t)$  belong.

### Stability criteria of a generalized linear resonance circuit

We shall consider a generalized linear oscillating circuit of the type shown in Fig. 1, assuming that for  $t > 0$  its parameters change in accordance with an arbitrary continuous law, yet they remain positive:

$$C(t), G(t), L(t), R(t) > 0$$

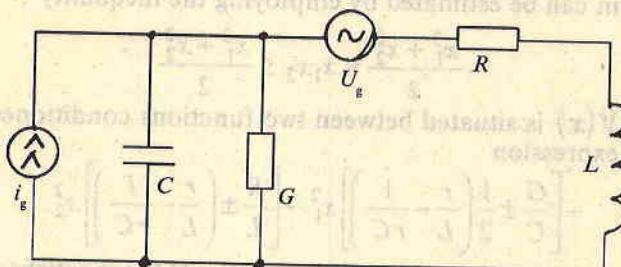


Fig. 1.

The free process is described by the following system of differential equations concerning the charge  $q$  of the capacitor and the magnetic flux  $\Phi$  of the inductance:

$$(10) \quad \begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -\frac{G}{C}x_1 - \frac{r}{L}x_2, \\ \frac{dx_2}{dt} = \frac{1}{rC}x_1 - \frac{R}{L}x_2, \end{cases}$$

where  $x_1 = \frac{q}{q_{00}}$ ,  $x_2 = \frac{\Phi}{\Phi_{00}}$ ,  $r = \frac{\Phi_{00}}{q_{00}}$ ;  $q_{00}, \Phi_{00}, r$  - constants.

The linear system (10) is a particular case of the system  $\frac{d}{dt}x = f(x, t)$  (see [1]), where  $x = \text{colon}(x_1, x_2)$ ,  $f(x, t) = A(t)x$ ,  $A(t) = \begin{pmatrix} -\frac{G(t)}{C(t)} & -\frac{r}{L(t)} \\ \frac{1}{rC(t)} & \frac{R(t)}{L(t)} \end{pmatrix}$ .

Two criteria (sufficient conditions) for oscillating circuit stability will be recounted.

**Criterion 1.** The oscillating circuit will be stable according to Lyapunov's definition, if a positive constant  $r$  can be selected, for which, given  $t \geq 0$ , the following inequalities will be satisfied:

$$(11) \quad \begin{cases} \frac{G}{C} \pm \frac{1}{2} \left( \frac{r}{L} - \frac{1}{rC} \right) \geq 0, \\ \frac{R}{L} \pm \frac{1}{2} \left( \frac{r}{L} - \frac{1}{rC} \right) \geq 0. \end{cases}$$

In order to prove this we select a definitely positive Lyapunov function [2] in the form

$$(12) \quad V(x) = \frac{1}{2}(x, x) = \frac{1}{2}(x_1^2 + x_2^2)$$

Its derivative in compliance with system (11) is

$$\dot{V}(x) = x_1 \dot{x}_1 + x_2 \dot{x}_2 = -\frac{G}{C} x_1^2 - \frac{R}{L} x_2^2 - \left( \frac{r}{L} - \frac{1}{rC} \right) x_1 x_2.$$

The last term can be estimated by employing the inequality

$$-\frac{x_1^2 + x_2^2}{2} \leq x_1 x_2 \leq \frac{x_1^2 + x_2^2}{2}.$$

Therefore,  $\dot{V}(x)$  is situated between two functions conditioned by the different signs of the expression

$$-\left[ \frac{G}{C} \pm \frac{1}{2} \left( \frac{r}{L} - \frac{1}{rC} \right) \right] x_1^2 - \left[ \frac{R}{L} \pm \frac{1}{2} \left( \frac{r}{L} - \frac{1}{rC} \right) \right] x_2^2.$$

We arrive at the conclusion that if inequalities (11) are satisfied, the derivative of Lyapunov's function is non-positive, which, in this case, is the condition of oscillating circuit stability according to Lyapunov's definition.

Given a satisfaction of the strict inequalities (11), i.e.

$$(13) \quad \begin{cases} \frac{G}{C} \pm \frac{1}{2} \left( \frac{r}{L} - \frac{1}{rC} \right) > 0, \\ \frac{R}{L} \pm \frac{1}{2} \left( \frac{r}{L} - \frac{1}{rC} \right) > 0. \end{cases}$$

Lyapunov's conditions for asymptotic stability are met.

**Consequence:** The oscillating circuit with positive parameters, where  $G(t)$  and  $R(t)$  are arbitrary time functions, while  $C$  and  $L$  are constants, is asymptotically stable according to Lyapunov's definition. Indeed, in this case parameter  $r$

can be selected so that  $r = \sqrt{\frac{L}{C}}$ . Then the bracketed expression in (13) will be nullified. The same consequence can be arrived at by using the energy conservation law as a starting point. Then we have to take into account that in the case of constant reactances there is no energy input in the circuit. The energy is continuously dissipated in the active elements of the circuit at varying speed.

**Criterion 2.** The oscillating circuit will be stable, if, for an arbitrary  $t$ , the following system of inequalities is satisfied:

$$(14) \quad \begin{cases} R - \frac{k-1}{2} \frac{dL}{dt} - \frac{l}{2} \frac{LC}{C} \frac{dC}{dt} \geq 0, \\ G - \frac{l-1}{2} \frac{dC}{dt} - \frac{k}{2} \frac{C}{L} \frac{dL}{dt} \geq 0, \end{cases}$$

where  $k$  and  $l$  are an arbitrary couple of integers taken from the set:  $0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \infty$ .

In order to prove this we set  $r=1$  ( $g_{00}=1$  and  $\Phi_{00}=1$ ) in (1) and choose a definitely positive Lyapunov's function in the form

$$(15) \quad V = L^{k-1} C^l \Phi^2 + L^k C^{l-1} q^2.$$

Then, provided that inequality (14) is satisfied, its total derivative

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= -2 L^{k-2} C^l \left[ R - \frac{k-1}{2} \frac{dL}{dt} - \frac{l}{2} \frac{LC}{C} \frac{dC}{dt} \right] \Phi^2 \\ &\quad - 2 L^k C^{l-2} \left[ G - \frac{l-1}{2} \frac{dC}{dt} - \frac{k}{2} \frac{C}{L} \frac{dL}{dt} \right] q^2, \end{aligned} \quad (15)$$

will be non-positive, i.e. once again Lyapunov's condition concerning the stability of the specific oscillating circuit under consideration is met. Analogously, provided that the strict inequalities (14) are satisfied, Lyapunov's criteria of asymptotic stability of the oscillating circuit are met.

**Consequence:** The oscillating circuit will be stable, if, for  $t \geq 0$ , the following system of inequalities is satisfied:

$$R + \frac{1}{2} \frac{dL}{dt} \geq 0, \quad G + \frac{1}{2} \frac{dC}{dt} \geq 0.$$

These inequalities are yielded by (11) at  $k=l=0$ . In this case Lyapunov's function (15) acquires a clear physical meaning, since it represents the instantaneous energy stored in the circuit reactances.

Let us now consider the case when  $R(t), G(t) > 0$  for  $t \geq 0$ , and let us assume that the continuously changing reactances of the generalized oscillating circuit (Fig. 1) can take both positive and negative values. In reality a similar situation occurs in the case of Josephson superconducting junctions, whose equivalent inductance takes negative values during a part of the changing period. In a more general treatment, this is a system, where the effect of a single-frequency non-degenerate parametric regeneration is manifested [3].

The free process in the generalized oscillating circuit (Fig. 1), excluding sources  $i_g$  and  $U_g$ , can be described by the following system of differential equations concerning the voltage  $U$  at the capacitor and the current  $i$  flowing through the inductance:

$$(16) \quad \begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -\frac{1}{C} \left( G + \frac{dC}{dt} \right) x_1 - \frac{1}{rC} x_2, \\ \frac{dx_2}{dt} = \frac{r}{L} x_1 - \frac{1}{L} \left( R + \frac{dL}{dt} \right) x_2, \end{cases}$$

where  $x_1 = \frac{U}{U_{00}}$ ,  $x_2 = \frac{i}{i_{00}}$ ,  $r = \frac{U_{00}}{i_{00}}$ ;  $U_{00}$ ,  $i_{00}$ ,  $r$  are constants.

Lyapunov's function is set in the form

$$(17) \quad V = \operatorname{sign} C \frac{rC}{2} x_1^2 + \operatorname{sign} L \frac{L}{2r} x_2^2,$$

where, for example,

$$\operatorname{sign} C = \begin{cases} 1, & \text{for } C > 0 \\ 0, & \text{for } C = 0 \\ -1, & \text{for } C < 0 \end{cases}$$

Hence function (17) is positively defined. Its derivative by virtue of (16) is

$$\frac{dV}{dt} = -\operatorname{sign} C r \left( G + \frac{1}{2} \frac{dC}{dt} \right) x_1^2 - \operatorname{sign} L \frac{1}{r} \left( R + \frac{1}{2} \frac{dL}{dt} \right) x_2^2 - (\operatorname{sign} C - \operatorname{sign} L) x_1 x_2.$$

The bracketed expression in the last term can take the following values: -2, -1, 0, 1, 2. If the extreme values are considered, it becomes obvious that  $\frac{dV}{dt}$  is always located between the following two functions:

$$(18) \quad -\operatorname{sign} C r \left( G + \frac{1}{2} \frac{dC}{dt} \right) x_1^2 - \operatorname{sign} L \frac{1}{R} \left( R + \frac{1}{2} \frac{dL}{dt} \right) \pm 2 x_1 x_2.$$

Since evidently  $-(x_1^2 + x_2^2) \leq \pm 2 x_1 x_2 \leq (x_1^2 + x_2^2)$  it can be seen that the two functions (18) are located between the functions

$$(19) \quad - \left[ \operatorname{sign} C r \left( G + \frac{1}{2} \frac{dC}{dt} \right) \pm 1 \right] x_1^2 - \left[ \operatorname{sign} L \frac{1}{r} \left( R + \frac{1}{2} \frac{dL}{dt} \right) \pm 1 \right] x_2^2.$$

Lyapunov's theorems (from Lyapunov's second method) and expression (19) allows of obtaining criteria of the stability or instability of the oscillating circuit in this case.

**Stability criterion.** The oscillating circuit will be stable, if the following system of non-strict inequalities is satisfied in the interval  $[t_0, \infty)$  and given a positive  $r$

$$(20) \quad \begin{cases} \operatorname{sign} C r \left( G + \frac{1}{2} \frac{dC}{dt} \right) - 1 \geq 0, \\ \operatorname{sign} L \frac{1}{r} \left( R + \frac{1}{2} \frac{dL}{dt} \right) - 1 \geq 0. \end{cases}$$

The oscillating circuit will be asymptotically stable, if the system of strict inequalities (20) is satisfied under the same conditions.

**Instability criterion.** The oscillating circuit will be unstable, if the following system of strict inequalities is satisfied at  $t \rightarrow \infty$  and a positive  $r$ :

$$(21) \quad \begin{aligned} \operatorname{sign} C r \left( G + \frac{1}{2} \frac{dC}{dt} \right) + 1 &< 0, \\ \operatorname{sign} L \frac{1}{r} \left( R + \frac{1}{2} \frac{dL}{dt} \right) + 1 &< 0. \end{aligned}$$

It follows from system (16) that if the signs of all oscillating circuit parameters are changed to their opposites, the result will be a system of the same type. This implies that if all the parameters of the oscillating circuit change in time according to arbitrary laws, yet in such a way that their signs change to their opposites simultaneously, from the viewpoint of stability the oscillating circuit will be equivalent to another oscillating circuit, whose parameters change in time in compliance with laws equal to the modules of the respective laws governing the changes of the initial oscillating circuit.

### Conclusion

Systems described by differential equations of the second and higher order with periodic coefficients have been tackled by a lot of works: beginning with the classical ones of Lyapunov and ending up with the numerous publications by modern researchers. In spite of the considerable number of instructive mathematical publications, the problem of analyzing qualitatively the free processes in a parametric oscillating circuit cannot be regarded as solved. There is an essential difference between the analysis of the abstract mathematical equation and the particular engineering-and-physical system. As a rule the engineering-and-physical problem is made up of three parts. The first one allows of using the physical properties of the system as a starting point for obtaining its schematic and analytical description as well as the respective mathematical equation. The second part consists in solving and exploring the equation obtained. The third part provides a physical-and-engineering interpretation of the results. The mathematical problem is a component of the engineering-and-physical one and constitutes the latter's second part. The powerful mathematical means used in its solution often allow of obtaining thoroughgoing results. Thus, in a certain sense, the engineering-and-physical approach is broader than the mathematical one, but the latter is more profound. When solving the engineering-and-physical problem, it is important to adapt and use adequately a relevant mathematical technique. The paper has sought to combine the general formulation of the engineering-and-physical problem concerning the processes in a generalized periodical oscillating circuit with the profundity of the mathematical exploration.

### 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 (in print).
2. Yakubovich, V.A., V.M. Stargin斯基. Linear Differential Equations With Periodic Coefficients and Applications. Moscow, Nauka Publ., 1987
3. Damgov, V.N. Principle of Modulation-Parametric Reversible Interactions. – Comptes Rendus de l'Academie Bulgare des Sciences, 46, 1993, № 2, 57 – 60.

Received 6. XI. 1996

Качествен анализ на свободните процеси в обобщен линеен трептящ кръг с периодични параметри

Част 2. Стабилност на каноничните системи и на обобщена линейна резонансна верига

*Николай Д. Бирюк, Владимир Н. Дамгов*

(Резюме)

В част първа на статията [1] бяха дискутирани възможните преобразувания на уравненията, описващи трептящ кръг с периодични и почти периодични във времето параметри. Бяха анализирани целесъобразните области на приложение на една или друга форма на системата диференциални уравнения и бе приложена класификация на трептящите кръгове по най-важния признак – устойчивостта и неустойчивостта на Ляпунов.

Основното внимание тук е фокусирано върху проблема за устойчивостта на каноничната система диференциални уравнения в общ вид. Формирани са критерии за устойчивостта и стабилността на обобщена линейна резонансна система с периодични във времето параметри. Доказва се важността за практиката на общия качествен анализ, на "разумния" баланс между общото абстрактно математично изследване и конкретния инженерен анализ на резонансните системи с периодични или почти периодични параметри. Само такъв подход позволява, от една страна, да се получи представа за множеството закономерности и свойствата на изследваната система, а от друга страна – да се избере най-подходящият математичен апарат за провеждане на набелязания анализ с необходимата дълбочина. В работата е направен опит да се съчетае възможно най-общото формулиране на физико-техническата задача за анализ на сложните процеси в периодична или почти периодична трептяща система с възможната задълбоченост на математическото изследване. Разработеният аналитичен подход е приложен конкретно към обобщена линейна трептяща система с периодични параметри, като са получени съвсем ясни и практически удобни критерии за устойчивостта и неустойчивостта на системата.

БИБЛIOГРАФИЧНИ СЪСТАВКИ  
1. Бирюк Н.Д., Дамгов В.Н. Качествен анализ на свободните процеси в обобщен линеен трептящ кръг с периодични параметри. Част 1. Каноничните системи. – Технически вестник. – 1985. – № 1. – С. 30–35.

БИБЛIOГРАФИЧНИ СЪСТАВКИ

Българска академия на науките. Bulgarian Academy of Sciences  
Аерокосмически изследвания в България. 14. Aerospace Research in Bulgaria  
София. 1998. Sofia

## Едно приложение на степенчатите функции при изследване на последователни процеси

**Симеон Денков, Христо Христов**

Военен научно-технически институт, София

В практиката на научно-изследователската дейност понякога се налага да се работи с различни функции (накъсано съединени) в последователни интервали на дадена променлива. Съществуват многобройни примери за това: лабораторно изследване на жизнеспособността на корпусната обшивка на космически апарати при обстрелването ѝ с псевдометеоритни частици [1], формиране и развитие на вълни от смущения в системи от тела с дискретно – нееднородни свойства [2], апроксимация на външната скоростна характеристика на двигател [3] и други процеси с последователни интервали на променливата.

Случаите се характеризират с няколко особени зони на развитие на процеса, всяка от които има свой собствен характер, общ вид на степенчатата или накъсано-свързана функция, описваща се от повече от две характерни уравнения, при свързването на които е невъзможно използването на степенчатата функция [4] в традиционния ѝ запис при повече от две променливи:

$$(1) \quad K = \sum_{i=1}^N \alpha_i \prod_{j=1}^N \Phi(\alpha_i - \alpha_j), \text{ при } j \neq i,$$

където  $\Phi(\alpha_i - \alpha_j)$  е степенчата функция.

Възниква въпросът може ли по някакъв начин да се намери една обща функция, която да съвмести в себе си над две до определен брой различни функции, като всяка от тях е в сила само в точно определен диапазон от стойности на дадена променлива, а в същото време различните диапазони следват непосредствено един след друг и представляват една непрекъсната цялостна област в някакъв обобщен голям диапазон?

Отговорът на този въпрос е положителен и може да разреши известните от математиката степенчани функции, които в някои литературни източници и съвременни математични програмни продукти са известни като функции

на Хевисайд (Heaviside), като се извърши едно модифициране и развитие за конкретните нужди.

Известни са няколко разновидности на степенчатите функции, но тук ще бъде засегнат вариантът, намиращ приложение в математичните софтуерни пакети, а именно:

$\Phi(x) = 0$ , когато  $x$  е по-малко от нула, т. е. отрицателно число,

$\Phi(x) = 1$ , когато  $x$  е равно или по-голямо от нула, т. е. положително число.

Нека разгледаме един пример на процес, който се описва с четири уравнения в четири последователни поддиапазона, определени от пет гранични стойности:

$$f_1(x) = \text{func}_1(x), \quad \text{за поддиапазона от } x_1 \text{ до } x_2;$$

$$f_2(x) = \text{func}_2(x), \quad \text{за поддиапазона от } x_2 \text{ до } x_3;$$

$$f_3(x) = \text{func}_3(x), \quad \text{за поддиапазона от } x_3 \text{ до } x_4;$$

$$f_4(x) = \text{func}_4(x), \quad \text{за поддиапазона от } x_4 \text{ до } x_5,$$

където  $f_i(x)$  са конкретните функции  $\text{func}_i(x)$  за съответния поддиапазон, всяка имаща свой собствен характер, а променливата  $x$  е една.

Глобалната (или съставната) функция в този случай ще има вида

$$(2) \quad F(x) = H_{s1}(x) f_1(x) + H_{s2}(x) f_2(x) + H_{s3}(x) f_3(x) + H_{s4}(x) f_4(x),$$

където  $H_{si}(x)$  е произведение от функциите на Хевисайд, дефинирано така, че когато променливата  $x$  заема стойност от даден поддиапазон, то има стойност 1 (единица), а за останалите поддиапазони – 0 (нула).

В разгърнат вид тези произведения се дефинират така:

$$(3) \quad H_{s1}(x) = \Phi(x-x_1) \Phi(x_2-x) \Phi(x_3-x) \Phi(x_4-x) \Phi(x_5-x);$$

$$(4) \quad H_{s2}(x) = \Phi(x-x_1) \Phi(x-x_2) \Phi(x_3-x) \Phi(x_4-x) \Phi(x_5-x);$$

$$(5) \quad H_{s3}(x) = \Phi(x-x_1) \Phi(x-x_2) \Phi(x-x_3) \Phi(x_4-x) \Phi(x_5-x);$$

$$(6) \quad H_{s4}(x) = \Phi(x-x_1) \Phi(x-x_2) \Phi(x-x_3) \Phi(x-x_4) \Phi(x_5-x).$$

При многодиапазонно разпределение на работната област по-лесно може да се обясни алгоритъмът, ако представим функциите на Хевисайд като една условна матрица, на която по главния диагонал от ляво на дясно на всеки следващ ред се извършва по едно обръщане на действието изваждане, което за горния пример би изглеждало така:

$$(7) \quad \begin{vmatrix} x-x_1 & x_2-x & x_3-x & x_4-x & x_5-x \\ x-x_1 & x-x_2 & x_3-x & x_4-x & x_5-x \\ x-x_1 & x-x_2 & x-x_3 & x_4-x & x_5-x \\ x-x_1 & x-x_2 & x-x_3 & x-x_4 & x_5-x \end{vmatrix}$$

От този кратък пример достатъчно ясно се вижда как може да се организира работата и за значително по-голям брой поддиапазони с различен характер на поведение на функциите.

Що се касае до въпроса за съвпадането на стойностите на две съседни функции в граничната точка, това вече е друг въпрос и зависи от самото аналитично представяне на функциите и начините, при които те са изведени или апроксимирани и т. н.

А сега нека едновременно усложним и опростим задачата.

Усложняването ще бъде в резултат на въвеждането на две нови функции, едната валидна за всички стойности под долната граница, а другата – за всички стойности над горната граница:

$$f_0(x) = \text{func}_0(x), \text{ за стойности на } x, \text{ по-малки от } x_1;$$

$$f_5(x) = \text{func}_5(x), \text{ за стойности на } x, \text{ по-големи от } x_5.$$

Опростяването ще бъде за сметка на намаляване на броя на действията умножение. При внимателен анализ на уравнения (3), (4), (5) и (6) става ясно, че обвързването на променливата с конкретен поддиапазон зависи само от границите на конкретния поддиапазон, при което останалите поддиапазони имат дотолкова значение, доколкото произведението на функциите на Хевисайд при тях да бъде равно на нула, а това дава възможност за едно сериозно намаляване на броя на действията умножение. Ако отразим това върху условната матрица (7), то тя сега би изглеждала така:

|           |           |  |
|-----------|-----------|--|
| $x_1 - x$ |           | за стойности на $x$ , по-малки от $x_1$ ;  |
| $x - x_1$ | $x_2 - x$ | за стойности на $x$ от $x_1$ до $x_2$ ;    |
| $x - x_2$ | $x_3 - x$ | за стойности на $x$ от $x_2$ до $x_3$ ;    |
| $x - x_3$ | $x_4 - x$ | за стойности на $x$ от $x_3$ до $x_4$ ;    |
| $x - x_4$ | $x_5 - x$ | за стойности на $x$ от $x_4$ до $x_5$ ;    |
| $x_5 - x$ |           | за стойности на $x$ , по-големи от $x_5$ . |

В резултат на тези опростиования глобалната функция [2] в разгърнат израз за посочения пример ще придобие своя окончателен вид, както следва:

$$\begin{aligned} F(x) &= \Phi(x_1 - x) f_0(x) + \Phi(x - x_1) \Phi(x_2 - x) f_1(x) + \Phi(x - x_2) \Phi(x_3 - x) f_2(x) \\ &\quad + \Phi(x - x_3) \Phi(x_4 - x) f_3(x) + \Phi(x - x_4) \Phi(x_5 - x) f_4(x) + \Phi(x - x_5) f_5(x). \end{aligned}$$

Обобщаването на резултатите от това примерно изследване води до дефинирането на следните уравнения за многодиапазонен характер на уравнения спрямо една променлива:

а) Общ случай, когато променливата се изменя в целия интервал от възможни стойности, в който са дефинирани  $N$  гранични стойности, при което уравненията са  $N+1$  на брой:

$$F(x) = \Phi(x_1 - x) f_0(x) + \sum_{i=1}^N [\Phi(x - x_i) \Phi(x_{i+1} - x) f_i(x)] + \Phi(x - x_N) f_N(x);$$

б) Частен случай, когато променливата се изменя само в определен интервал от няколко поддиапазона, дефинирани с  $N$  гранични стойности, при което уравненията са  $N-1$  на брой:

$$F(x) = \sum_{i=1}^{N-1} [\Phi(x - x_i) \Phi(x_{i+1} - x) f_i(x)].$$

В резултат на това изследване е разработено едно приложение на степенчатата функция на Хевисайд за случаи на обобщаваща функция на различни функции в последователни интервали на дадена обща променлива при математическото интерпретиране на последователни процеси.

## Л и т е р а т у р а

1. Баранов, В., Хр. Христов, Ст. Петков, Кр. Бояджиев. Разработване на кумулативни заряди за изстреляне на псевдометеоритни частици. – Аерокосмически изследвания в България, № 11, 97 – 102.
2. Христов, Хр. Уравнение на фронта на плъзгаща се детонационна вълна по границата между два заряда. НТК, В. Търново, ВВОВУ "Васил Левски", Ремонт на въоръжението и техниката, 1996.
3. Денков, С. Математическо моделиране на скоростната характеристика на двигатели с въглерено горене в целия диапазон от обороти. Раздел от отчет по НИ и ОКД. С., ВНТИ, 1996.
4. Корн, Г., Т. Корн. Справочник по математике. М., Наука, 1977, с. 831.

*Постъпила на 22. XI. 1996 г.*

### A case of an application of step functions in the study of consecutive processes

**Simeon Denkov, Christo Christov**

#### (S u m m a r y)

The article deals with a case of an application of the step functions, to be more precise - with the function of Heaviside, in the study of consecutive processes, and equations for its particular application have been worked out. The function is used in the mathematical interpretation of consecutive processes which run, in particular, in aerospace studies: remote monitoring, imitation of highspeed impacts and development of waves of interferences in a system of bodies, approximation of speed characteristics of an engine and other processes, in which the character of the process in different consecutive intervals of the variable has a different mathematical interpretation.

Българска академия на науките. Bulgarian Academy of Sciences  
 Аерокосмически изследвания в България. 14. Aerospace Research in Bulgaria  
 София. 1998. Sofia

## Моделиране и оценка на безопасността на функциониране на системи за управление

*Антонио Андонов, Зоя Хубенова\**

*Висше военно транспортно училище, София*

\* *Институт за космически изследвания, БАН*

Проблемът за надежността, устойчивостта и безопасността на системите за управление в реално време на подвижни обекти в авиацията, космонавтиката, релсовия транспорт и др. рязко нарасна с повишането на тяхната сложност. За решаването на поставения проблем е необходимо в допълнение на общоизвестните методи за обезпечаване на надежност да се използва при разработката им т. нар. безопасна технология, за да се изключи възможността за появя на изхода на системата на опасни съобщения или сигнали. По такъв начин, в допълнение на понятиета надежност и експлоатационна готовност е въведено понятието безопасност като вероятност за появата в конкретния процес на управление на отказ (или дефект), който може да има катастрофални последствия. Но в предварително зададена система е необходимо да се установи минимално необходимото ниво на безопасност, т.е. максимално допустимата вероятност за отказ. Например в авиацията действат следните изисквания:

- вероятността за катастрофален отказ в системите трябва да бъде по-малка от  $10^{-7}$  на един час летателно време;
- вероятността за критичен отказ в системите трябва да бъде по-малка от  $10^{-5}$  на един час летателно време.

Между влака и самолета има съществено различие в схемите за обезпечаване на безопасността. В самолетите няма устройства за безопасност, подобно на железнодържните системи. Неговата безопасност се определя от отказоустойчивостта на всеки от елементите и може да бъде достигната само за сметка на високото ниво на надежност, което се обезпечава от конструктивните характеристики или чрез резервиране. Същевременно безопасността на влаковете се обезпечава не чрез наличието на отказоустойчивост на техните системи, а чрез прекратяване на движението им в

<sup>1</sup> Разработката е финансирана от НФ "Научни Изследвания" при МОНТ, съгласно дог. № 536/95.

случай на каквото и да е откази, в частност с помощта на задействане на осигурителните системи – системите за сигнализация и блокировка. Следователно в авиацията и в релсовия транспорт се използват различни стратегии за решаване на проблема за безопасността: чрез отказоустойчивост(fault-tolerance) и чрез безопасно след откази поведение на системата (fail-safe). Чрез тези две стратегии могат да се решат следните проблеми:

а) В системи, на които е необходима висока степен на безотказност за опазване на живота и околната среда, за управление на полети във въздушния и в космическия транспорт, за работа на комуникационни състаници и др., когато прекъсването за ремонт и възстановяване е недопустимо или опасно.

б) В системи на които е необходима висока готовност, като мощни изчислителни машини или мрежи от компютри (напр. в банковата система) с хиляди терминали, системи с осигурителна отговорност в релсовия транспорт и др., когато неработоспособност е допустима, но предизвиква големи загуби на живота или здравето на човека, на големи нематериални, духовни и природни ценности.

Проучванията показват, че има изобилие от публикации по тези проблеми. Въпреки това са нерешени или частично решени научно-теоретични и практически въпроси с голяма значимост:

1. Обикновено се търси решение на проблема за готовността, без да се поставя акцент на безотказността на система с откази, които се маскират чрез излишък;

2. На концептуално равнище няма единно разбиране за безопасността на системи за управление.

Конвенционалната теория на надеждността не се интересува от поведението на системата, в която са настъпили откази. Вследствие настъпването им системата може да предизвика големи загуби (напр. във въздушния транспорт). В повечето случаи в практиката обаче естеството на контролираното състояние или управлявания процес е такова, че поведението на системата не може да се раздели единствено на опасно или безопасно. В такива случаи за постигане на висока безопасност трябва да се търси висока отказоустойчивост, още повече, че ако всички откази са опасни, то безопасността се свежда до безотказност.

Съвременните подходи за анализ и синтез на системи за управление се основават на анализа на пространството на състоянията. При този подход понятието безопасност на системата за управление може да се определи по следния начин: Нека  $Y$  е множеството изходни сигнали на системата,  $Y_{\text{б}}$  – множеството безопасни изходни сигнали на системата,  $Y_{\text{оп}}$  – множеството опасни изходни сигнали на системата. Тогава  $Y_{\text{б}} \cup Y_{\text{оп}} = \bar{Y}$ , и условието за безопасност е  $Y_{\text{б}} \cap Y_{\text{оп}} = \emptyset$ .

Системата за управление се нарича идеално безопасна само в този случай, когато за произволен отказ  $f$ ,  $f \in F$ , където  $F$  е множеството повреди на системата, нейният изходен вектор удовлетворява условието  $Y_f \in Y_{\text{б}}$ . Идеалната безопасна система винаги осигурява безопасни изходни сигнали, дори когато се намира в неизправно състояние.

Изключително важно място в общия проблем, свързан с изграждането на ефективни, надеждни и с безопасно при откази поведение системи, заема проблемът за оперативна идентификация на динамичните им характеристики [1, 2]. Познаването на текущата информация за динамичното състояние на функциониращата система позволява от една страна да се организира оптимално управление с адаптация относно изменящите се външни условия,

а от друга, позволява да се вземат правилни и своевременни решения при възникване на нарушения във функционирането на системата. Така например в [2] е предложена структура на адаптивна система за автоматично управление с идентификация на динамичните характеристики, използваща комбиниран принцип на управление: адаптивно управление при относително бавно изменение на параметрите вследствие на параметрични смущения и изменение на структурата на управляващата част на системата при скокообразно изменение на параметрите, вследствие на откази с оглед осигуряване на безопасно поведение на системата. Тук понятията надеждност и безопасност се интерпретират като трета и четвърта степен след понятията устойчивост и качество на управлението, които изграждат представите ни за изискванията към системата за управление. Под надеждност на управлението се разбира свойството на алгоритъма на управление и съответстващата структура на управляващата част на системата да съхранява приемливо качество на системата при отказ на отделни подсистеми. Съдържанието на такъв принцип за построяване на системи е търсене и реализиране на такава конфигурация на алгоритъма на управление и на управляващата част, която да минимизира загубите в качеството на управление, обусловени от отказите. С оглед на безопасността на функциониране на системата, при нарастване на загубите над дадено ниво, основната задача, която трябва да реши системата от разглеждания клас е в привеждане на обекта на управлението в определена област или точка в пространство на състоянията. С други думи в този случай системата за управление изпълнява функции и на осигурителна система. Във връзка с това при проектиране на система за автоматично управление при този подход е необходимо да се изпълнят следните етапи:

1. Да се определят променливите на състоянието на автоматизирания обект;
2. Да се построи математичен модел на управляемото движение на обекта в пространство на състоянията.
3. Да се формулират изискванията по отношение на безопасността във вид на конкретни ограничения върху стойностите на променливите на състоянието, да се апроксимират във вида на линейни неравенства и да се построи изпъкнал многоъгълник на ограниченията в пространство на състоянията.
4. Да се определи функционалът на качеството на системата и неговата чувствителност по отношение на ограниченията;
5. Да се синтезират ограничаващите управления, препятстващи развитието на функционални нарушения.
6. Да се определи производителността на управляващата ЕИМ необходима за реализация на управляващите въздействия върху автоматизирания обект.

Казано с други думи, още при проектиране на системата, от гледна точка на безопасността възниква задачата за удържане на вектора на променливите на състоянието в зададена област  $X_{\text{дел}}$  от пространство на състоянията  $X$ , при възникване на откази.

Днес, във връзка с внедряването на компютърна техника в системите за автоматично управление, методите на т. нар. безопасна технология широко се използват в различни отрасли на промишлеността при управление на отговорни технологични процеси. Разработени и изпитани са различни безопасни микропроцесорни системи за управление. За изпълнението на зададени функции при осигуряване на надеждност и безопасност структурата на системата се състои от две нива, едното от които не е свързано с безопасността, а другото е безопасно. Безопасното ниво се изгражда от блокове

с по-висока надеждност и по-високи характеристики на безопасността. В този аспект може да се разгледа системата за управление. В общия случай системата за управление се състои от две основни части -- обект на управлението и управляваща част - регулятор. Съвкупността от критерии и правила, в съответствие с които функционира регулятора, преследвайки целите на управлението, представлява алгоритъма на управлението. При това представяне на системата, безопасността ѝ на функциониране може да се постигне по пътя на въвеждане на различни видове излишък: апаратен, информационен, програмен, времеви и др. Може да се въведе понятието елементарна система [1,2], т.е система без излишък. Като се вземе предвид, че структурата на произволна система е съставена от технически устройства в съответствие с нейната функционална схема и множество връзки между тях, осигуряващи функционирането ѝ в съответствие с определен алгоритъм, то елементарната система може да се определи като система, която е работоспособна само при отсъствие на откази в нейните технически устройства и връзки между тях. Тогава способите за обезпечаване на безопасност при функциониране се свеждат до:

– резервиране, т.е. добавяне на технически устройства и връзки към елементарната система, така че нейният алгоритъм на управление да е неизменен;

– алгоритмично обезпечаване, т.е. възможно преобразуване на структурата на елементарната система чрез добавяне на устройства и връзки по такъв начин, че да се измени алгоритъмът на управление.

За редица системи, включително и в транспорта, високата степен на апаратен излишък е нежелателна, а в някои случаи (авиация, флота) е недопустима. Затова разработването на методи за алгоритмично осигуряване на безотказност, позволяващи да се намали апаратният излишък, е особено актуално.

Да разгледаме система, съставена от обобщен обект, включващ обекта на управление, изпълнителните органи и датчици, затворена чрез обратна връзка през регулятор, формиращ алгоритъма на управлението. Ще считаме, че обобщеният обект при номинален режим се представя с уравненията на състоянието:

$$\begin{aligned} \dot{x}' &= A(t)x + B(t)u, \\ y &= C(t)x, \end{aligned}$$

където  $x \in R$  е векторът на състоянията на системата;  $u \in R$  – векторът на външните въздействия,  $A(t)$ ,  $B(t)$ ,  $C(t)$  са съответно преходната матрица на състоянието, матрицата на управлението и матрицата на наблюдението. Да предположим, че в системата могат да настъпят постепени параметрични смущения в матрица  $A(t)$ , внезапни откази в изпълнителните органи (матрица  $B(t)$ ) и внезапни откази в датчиците във вида на появата на допълнителен лъжлив сигнал в съответстващата компонента на вектора на наблюдението. Нека критерият за качество е зададен във вида [1]:

$$V[e(t), u(t)] = e^T(t) Q e(t) + \int f(z) dz,$$

където  $e(t) = y(t) - y^0(t)$  е сигналът на грешката,  $Q$  – симетрична, положително определена матрица,  $f(z)$  – функция, описваща изходния закон на управлението, реализирана от регулятора,  $z(t)$  – постъпващият в регулятора сигнал. Необходимо е да се определи структурата на регулятора, минимизиращ горния функционал върху множеството откази на системата, т.е. осигуряваш асимптотична устойчивост на решението. Структурата на системата, позволяваща да се реши поставената задача е показана на фиг.1.



фиг.1. Обобщена структура на отказоустойчива система

Блокът на обратната връзка формира управляващи сигнали  $z(t)$  и  $y(t)$ , първият от които компенсира параметричните смущения върху обекта, а вторият осигурява изключване на отказали датчици и изпълнителни органи и включване на резервни. При това могат да бъдат решени следните три задачи:

1. В зависимост от сигнала на грешката  $e(t)$  се установява фактът за наличие или отсъствие на отказ на системата, като нейното номинално състояние се възпроизвежда например чрез метода на наблюдателя на Люенбергер [1].

2. С помощта на алгоритъм за разпознаване се определя видът на отказа [3].

3. След диагностиране на системата [3,4] се осъществява компенсация на отказите, т.е. синтезират се управляващите сигнали  $z(t)$  и  $v(t)$ , осигуряващи устойчивост на системата в пространство на състоянията.

Сигналът, постъпващ на входа на регулатора, се формира във вида:

$$z(t) = K^T e(t),$$

където  $K^T$  е векторът на параметрите. На базата на прекия метод на Ляпунов, за който в качеството на функция на Ляпунов се избира посочения по-горе функционал на качеството, може да се определи областта на допустимите стойности на  $K$ , зависеща от отказа, и да се избере стойност от тази област.

В пространство на състоянията на системата отказът може да се свърже със загубата на устойчивост на системата. Тогава с оглед количествената оценка на безопасността, подобно на определянето на понятието информация в техническите системи като вероятност, с която заема известно състояние на физическа система, безопасността на системата може да се оцени чрез вероятността за това, че състоянието на системата ще принадлежи към множеството допустими състояния и едновременно ще се изпълняват условията, гарантиращи устойчив характер, т.е.:

$$P_{\text{без}}(t) = p(X \in X_{\text{доп}}, \text{Real } p_i < 0; i=1,\dots,n)$$

където  $X_{\text{доп}}$  е множеството от допустими състояния на системата, а  $\text{Real } p_i < 0$  са условия, определящи устойчивостта на състоянията.

Както е известно, линейните преобразования съответстват на вариации на структурата на системата, определена чрез матричен модел в пространство на състоянията. Инвариантите на матрицата на състоянието определят условията за физическа реализуемост. Съвкупността на инвариантите в определен момент характеризира напълно състоянието на системата. И съответно, на всяка траектория в пространство на състоянията отговаря съвкупност от стойности на инвариантите на матрицата на състоянията. Предложената оценка за безопасността може да се свърже с необходимите стойности на инвариантите  $I_i$  ( $i=1,\dots,n$ ). Но тъй като всяка функция на

инвариантите също е инвариант, то проблемът за оценка на безопасността може да бъде формулиран като условие за това, че определена функция на величините  $I_i$ , т.e.  $S=f(I_1, I_2, \dots, I_n)$  трябва да приема с определена точност стойности от зададена област, а задачата за количествено определяне на безопасността се свежда до определяне на вероятността за изпълнение на това условие [1].

В заключение може да се подчертая, че еднозначното описание на свойствата на произволна система е еквивалентно на намирането на съответните инварианти на съответния матричен модел в пространство на състоянията на системата. Инвариантите винаги отразяват реално съществуващите свойства и отношения, общи за цялото разнообразие от технически системи от даден тип. Във връзка с това изключително актуално е по-нататъшното развитие на теоретичните и приложните изследвания на задачата за алгоритмично осигуряване на отказоустойчивостта на системите за автоматично управление.

### Л и т е р а т у р а

1. Андонов, А. В. Проблемът за функционалната устойчивост на системите за подвижна радиовръзка. С., ВВТУ, 1996. 128 с.
2. Андонов, А. В., З. В. Хубенова. Проблемът за безопасността на функциониране на автоматичните системи в техническата кибернетика. - В: Сб. Научни трудове на ВВТУ, 1989.
3. Андонов, А. В. Диагностика на откази в микропроцесорни системи с високи изисквания за надеждност и безопасност при откази. IV научно-приложна конференция с международно участие "Приложение на ЕИМ и микропроцесорна техника в ж.п. транспорт", 1987.
4. Гришин, Ю. В. Динамические системы устойчивые к отказам. М., Радио и связь, 1985.
5. Иванов, Е. Б. Основи на автоматиката и телемехниката в ж.п. транспорт. С., ВВТУ, 1991.

*Постъпила на 21. I. 1997 г.*

### Modelling and evaluation of the safety of the functioning of an electronics system for a moving objects control

*Antonio Andonov, Zoja Hubenova*

#### (Summary)

In this paper the methods for providing the safety of the functioning of systems for a moving objects control in real time, in the aviation and the rail transport, are studied. The similarity and differences among these systems are analysed. A general method for modelling and evaluation of the safety is elaborated based on the contemporary automatic control theory (the methods of the states space). The condition and requirements concerning the automatic control systems are defined by making possible its functioning as a safety system. A proposal of a criterion for quantitative evaluation of the degree of safety in the systems functioning is made.

Българска академия на науките. Bulgarian Academy of Sciences  
 Аерокосмически изследвания в България. 14. Aerospace Research in Bulgaria  
 София. 1998. Sofia

## Application of models for comparison in aerospace experiments data processing and interpretation

*Roumen Nedkov*

*Space Research Institute, Bulgarian Academy of Sciences*

### Introduction

Practically most result mistakes in aerospace investigations are provoked by the oftenly occurring moments of indefiniteness in the real process of data registration and processing. The reasons such indefiniteness origin are practically from different nature and have a complex character. Principally they are: discrepancy between the theoretical models for description of space area and the real conditions, the space experiments take place, Re-covering of the investigated classes of patterns in space of instrumental measurements; Choice of wrong identification of educating patterns connected with wrong definition of discriminate functions in the area of recognition and classification of the investigated objects; principal oblated of the scientific hardware [1, 2].

The present papers are dedicated to the application of models for comparison in pairs, which result in decrease the level of indefiniteness in the educating patterns identifying.

The main aim of application of such models is to decrease the mistakes in space experiments data processing and interpretation.

### Models of experiments for comparison in pairs

In result of data processing different values of estimate of the features of the images of the  $k$  objects  $A_1, A_2, \dots, A_k$  of one and the same class occur.

Questions whether these differences are provoked by random factors or the objects are essentially different rises.

If  $[X_1], [X_2], \dots, [X_k]$ ,  $k \in [1, K]$  are matrixes of the measured sampling values of the features and each matrix had dimension  $n \times m$ , ( $n \in [1, N]$ ,  $m \in [1, M]$ ), i.e.

$$(1) \quad [\mathbf{X}_i] = \begin{bmatrix} x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1m} \\ x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2m} \\ \dots \\ x_{r1}, x_{r2}, \dots, x_{rm} \\ \dots \\ x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nm} \end{bmatrix}$$

then the set of  $k$  objects of one and the same class is defined by the vectors of the measured sampling values of the features of the images.

The matrix is:

$$(2) \quad \begin{bmatrix} \vec{\mathbf{X}}_1^T \\ \vec{\mathbf{X}}_2^T \\ \vdots \\ \vec{\mathbf{X}}_r^T \\ \vdots \\ \vec{\mathbf{X}}_k^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1m} \\ x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2m} \\ \dots \\ x_{r1}, x_{r2}, \dots, x_{rm} \\ \dots \\ x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{km} \end{bmatrix}$$

The procedure CP is:

The measured sampling values of the feature of the images  $[\mathbf{X}_1], [\mathbf{X}_2], \dots, [\mathbf{X}_k]$  are compared. Each one is compared with the other one (the objects is compared with itself). The account of the operation CP of  $k$  objects based on the matrix  $[\mathbf{X}_1], [\mathbf{X}_2], \dots, [\mathbf{X}_k]$  is  $0.5 N M K (K - 1)$ .

Analitically the procedure is described by the inequality:

$$(3) \quad g_m(\vec{\mathbf{X}}_{imn}) > g_m(\vec{\mathbf{X}}_{jmn}) \Rightarrow y_{ijmn} = 1, (y_{jimn} = 0),$$

$$(4) \quad g_m(\vec{\mathbf{X}}_{imn}) > g_m(\vec{\mathbf{X}}_{jmn}) \Rightarrow y_{ijmn} = 0, (y_{jimn} = 1),$$

where  $g_m, m \in [1, M]$ ,  $y_{ijmn}$  are  $m$ -th discriminate function, based on the  $m$ -educating feature and the binary random value: The binary random value is a CP procedure result.  $y_{ijmn} = 1$  means that the  $i$ -th object belongs to the given class.  $y_{jimn} = 0$  means that the application of the  $i$ -th object to the given class is rejected  $i, j \in [1, k]$ . In result of CP procedure ((3) or (4)) a numeric series  $\{s_i\}$  is set. It's terms are the weight sums of compared objects when  $m \rightarrow \infty, n \rightarrow \infty$  the terms of the numeric series  $\{s_i\}$  limes to it's mean values

$$(5) \quad s_{im} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_{ijmn}.$$

Quantitatively  $y_{ijmn}$  the indefiniteness connected with the random value of  $y_{ijmn}$  can be described by means of the probability by which  $y_{ijmn} = 1$ , i.e.

$$(6) \quad P\{y_{ijmn} = 1\} = \xi_{ijmn}, \quad 0 \leq \xi_{ijmn} \leq 1,$$

$$(7) \quad \xi_{jimn} = 1 - \xi_{ijmn}, \quad 0 \leq \xi_{jimn} \leq 1.$$

Based on the considerations exposed above the following models of experiments for CP can be formulating [3].

**MODEL A.** The probability  $\xi_{ijmn}$  does not depend on the sequence of comparison, i.e. either the procedure (3) or (4) is realised, because the result is one and the same. In this case the probability  $\xi_{ijmn}$  depends only on  $i$  or only on  $j$ , i.e.  $\xi_{ijmn} = \xi_{imn}$ . That means, that there is no effect in repeat the comparison, i.e. if one of the procedures (3) or (4) is realised it's not necessary to realise the other one.

**MODEL B.** The probability  $\xi_{imn}$  does not depend on the feature serial number  $m$  on which the comparison is realised, according to the procedures (3) or (4), i.e. there is no need to, repeat the comparison on definite feature. In this case the probability  $\xi_{imn} = \xi_{in}$ .

**MODEL C.** The probability  $\xi_{in}$  does not depend on the choice of the consecutive discreet value of the feature comparison  $n$  because the procedures (3) or (4) are realised for all measured discreet values of the features (proportion (5)).

In this case the probability  $\xi_{in} = \xi_i$ .

This work is dedicated to the application of **MODEL C**.

According to this model the definition of the models applicance to the given class or their rejection can be realised by estimation of the mean probability  $\bar{\xi}_i$ , or by mean probability  $\bar{\xi}_i = E\{\xi_{ji}\}$  when  $m \rightarrow \infty, n \rightarrow \infty$  (the script  $E\{\cdot\}$  indicates the averaging operation), where the  $\bar{\xi}_i$  and  $\xi_i$  following equations:

$$(8) \quad \bar{\xi}_i = \frac{\bar{s}_{im}}{M(K-1)},$$

$$(9) \quad \bar{\xi}_i = E\{\xi_i\}.$$

### Criteria for estimation the results of the statistic data processing, applying **MODEL C**

The criteria for estimation the result of CP procedure are:

#### I. Criteria for total equivalency

The zero hypotheses of these criteria are the following  $H_0$ : All objects are equal, the differences in the weight sums are provoked by random factors, i.e.  $\xi_i = 0,5$  for  $\forall i$ .

The alternative hypothesis is  $H_1$ : The objects are different and this is not provoked by random factors, i.e.  $\xi_i \neq 0,5$  for  $\forall i$ .

A measure of displacement  $d_i = \frac{s_i - \bar{s}_i}{0,5\sqrt{mk}}$  is involved.

According to the Pirson's criteria [4,5], when  $m \rightarrow \infty, k \rightarrow \infty$  the distribution of  $d_i$  of limits to normal with zero mean value and a mean quadratic displacement  $1-N(0,1)$ . In this case the criteria for total equivalency analytically in described as follows:

$$(10) \quad D_m = \sum_{i=1}^K d_i^2 = \frac{4}{mk} \left[ \sum_{i=1}^K s_i^2 - 0,25 m^2 k (k-1)^2 \right].$$

In this case if  $H_0$  is true, then the value  $D_m$  must not be greater than the criterial value of the tabulated function with apriori given level of significance  $\alpha$  and  $k-1$  degrees of freedom, i.e.

$$(11) \quad D_m \leq D_{mc} = \chi_{1-\alpha}^2 (k-1).$$

If the condition (11) is not true,  $H_0$  is rejected.  $H_a$  is accepted, which means that the objects are different and the differences between them are not provoked by random factors.

The scheme for application of the criteria is the following:

1. A level of significance  $\alpha$  is given.
2. The criterial value of the chosen level of significance is defined  $\alpha$ ,

$$D_m \leq D_{mc} = \chi_{1-\alpha}^2 (k-1).$$

3. The value of  $D_m$  according to formula (10) is calculated.

4. A check-up according to the condition (11) is done. It consists in the following:

$$(12) \quad \text{if } D_m \leq D_{mc} = \chi_{1-\alpha}^2 (k-1) \text{ then } H_0 \text{ is true,}$$

$$(13) \quad \text{if } D_m \geq D_{mc} = \chi_{1-\alpha}^2 (k-1) \text{ then } H_a \text{ is true.}$$

## II. Criteria for the special object

The zero hypotheses for this criteria is the following:

$H_0$ : All objects are equal, the special object is as all, i.e.  $\bar{\xi}_i = 0,5$  for  $\forall i$ .

The alternative hypothesis is  $H_a$ : The object with weight sum  $s_d$  is different and this is not provoked by random factors, i.e.  $\bar{\xi}_d > 0,5$  ( $1 \leq d \leq k$ ).

In this case according to the Pirson's criteria the distribution of the weight sums limits to the normal with mean value  $E\{s_d\} = 0,5 m (k-1)$  and a mean quadratic displacement  $\sigma_s = 0,5 \sqrt{m(k-1)}$ .

The criterial value of the weight sum  $s_c$  is defined by means of the equations

$$(14) \quad s_c = [0,5 m (k-1) + \chi_{1-\alpha}^2 (k-1) \sigma_s]$$

or

$$(15) \quad s_c = [0,5 m (k-1) + \chi_{1-\alpha}^2 (k-1) \sigma_s + 0,5]$$

if the data capacity is not enough.

The symbol  $[.]$  indicated the least integer, which does not exceed the numerical value of the expression in the square brackets.

The scheme for application of the criteria is the following:

1. The level of significance  $\alpha$  is given.
2. The criterial value of the weight sum  $s_c$  for the chosen level of significance  $\alpha$  is calculated according to the formulas (14) and (15).
3. The values of the critical weight sum  $s_c$  and the weight sum of the special object are compared. This procedure has the following view:

$$(16) \quad \text{if } s_d < s_c \text{ } H_0 \text{ is accepted,}$$

$$(17) \quad \text{if } s_d > s_c \text{ } H_a \text{ is accepted.}$$

## III. Criteria for equivalence of two special objects

The task solved by these criteria is as follows:

Does the difference in the weight sums of two special objects means that the objects are from different classes.

The zero hypotheses is  $H_0$ : The difference in the weight sums of the two special objects is provoked by random factors.

The alternative hypothesis is  $H_a$ : The difference in the weight sums of the two special objects is not provoked by random factors, i.e. the objects are from different classes.

According to the Pirson's criteria the distribution of the difference of the weight sums  $\Delta s_{if} < |s_i - s_f|$ , ( $i, f \in [1, k]$ ) limits to normal with zero mean value and a mean quadratic displacement  $\sigma_{\Delta s_{if}} = 0,5\sqrt{mk}$ ,  $m \in N(0, \sigma_{\Delta s_{if}})$ .

The critical value  $\Delta s_c$  of the difference is defined by the equations

$$(18) \quad \Delta s_c = [\chi^2_{1-\alpha} (k-1) \sigma_{\Delta s_{if}}]$$

or

$$(19) \quad \Delta s_c = [\chi^2_{1-\alpha} (k-1) \sigma_{\Delta s_{if}} + 0,5]$$

if the data capacity is not enough. The symbol  $[.]$  indicates the least integer, which does not exceed the numerical value of the expression in the square brackets.

The scheme for application of the criteria is the following:

1. The level of significance  $\alpha$  is given.
2. The critical value of the difference  $\Delta s_c$  for the chosen level of significance  $\alpha$  is calculated according to (18) or (19).
3. The values of  $\Delta s_{if} < |s_i - s_f|$ , ( $i, f \in [1, k]$ ) and  $\Delta s_c$  are compared. This procedure has the following view:
  - (20) if  $\Delta s_{if} < \Delta s_c$   $H_0$  is accepted,
  - (21) if  $\Delta s_{if} \geq \Delta s_c$   $H_a$  is accepted.

#### IV. Criteria for equivalence of two objects (criteria for the least significant sum)

The task solved by this criteria is the definition of such difference in the weight sums of the two objects  $s_i$  and  $s_j$ ,  $\Delta s_{ij} = |s_i - s_j|$ , which is statistically significant.

The zero hypotheses of these criteria are  $H_0$ : All objects are equal, the differences in the weight sums are provoked by random factors  $\xi_i = \bar{\xi}_j$  for  $\forall i, j$ .

The alternative hypothesis is  $H_a$ : The objects are different and this is not provoked by random factors, i.e.  $\xi_i \neq \bar{\xi}_j$  for  $\forall i, j$ .

The scheme for application of the criteria is the following:

1. The level of significance  $\alpha$  is given.
2. A check-up according to the scheme of the criteria for common equivalence is done. If  $H_0$  is accepted the procedure is cut off. If  $H_a$  is accepted the procedure continues.
3. The critical value of the difference  $\Delta s_c$ , according to (18) or (19) for the chosen level of significance  $\alpha$ , is calculated.
4. A check-up according to item 3 of the scheme of criteria III is done. If  $H_0$  is accepted, it is considered that the objects are from one and the same class. If  $H_a$  is accepted, it is considered that the objects belong to different classes, which means that their difference is statistically significant.

## References

1. Смоктый, О. И. Моделирование полей излучения в задачах космической спектрофотометрии. Ленинград, Наука, 1986, 114-119.
2. Глухчев, Г., П. Венков, Д. Мутафов, М. Яичева. Елементи на теорията за разпознаване на образи. С., БАН, 1982, 73-76.
3. Недков, Р. Цифровой телевизионный колориметр. Ленинград, ЛИКИ, 1981, 5-15.
4. Математическая энциклопедия. Т. 4, М., 1984, 288-290.
5. Корн, Г., Т. Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М., Наука, 1978, 609-630.

Received 16.I.1997

Приложение на модели за сравнение  
по двойки при обработка и  
интерпретация на данни, получени от  
аерокосмически експерименти

*Румен Недков*

(Резюме)

В работата са предложени три модела за използване на метода за сравнение по двойки при обработка на данни от аерокосмически изследвания. Целта на прилагане на конкретни вероятностни модели при обработката е намаляване на грешката при определяне на обучаващите признаки при класификация. Изложеното в статията дава основание за прилагане на конкретни статистически модели при класификация на получените аерокосмически данни още в процеса на първичната обработка.

Българска академия на науките. Bulgarian Academy of Sciences  
 Аерокосмически изследвания в България. 14. Aerospace Research in Bulgaria  
 София. 1998. Sofia

## Програмата "КОРИН-ЗЕМНО ПОКРИТИЕ", приложена за територията на България

*Никола Георгиев, Хернани Спиридонов*

*Институт за космически изследвания, БАН*

Дистанционните методи са един ярък пример, как една бързо развиваща се космическа наука в последното десетилетие се превърна в технология, даваща възможност да се извършива изучаване и изследване на Земята като цяло и в детайли, което в недалечното минало не бе възможно [2, 3, 4]. Понастоящем и в България се изпълняват редица проекти на основата на дистанционните изображения от различни ИСЗ, като LANDSAT – TM, SPOT и др.

За един кратък период у нас се реализираха редица проекти с помощта на сканерна информация, като: пилотен проект в Добруджа, свързан с поземлената реформа, проектът "МАРС" и успешно завършилият проект "КОРИН - ЗЕМНО ПОКРИТИЕ" (CORINE LAND COVER) [1].

Основните цели на КОРИН, програмата на Комисията на Европейската общност, са:

- събиране на информация за околната среда във връзка с отделни аспекти, които имат приоритет за всички страни – членки на общността;
- координиране на събирането на данни и организацията на информацията между страните членки или на международно ниво;
- осигуряване на съгласуваност на информацията и съвместимост на данните.

За начало на проекта "КОРИН" може да се смята датата 27 юни 1985 г., когато Комисията на Европейската общност е приела решение за разработване на „един експериментален проект за събиране, координиране и осигуряване на съгласуваност на информацията от държавите членки, за околната среда и естествените ресурси на Общността“ [1].

За да се реализира този проект, се е наложило да се решат два предварителни въпроса, а именно:

1. Да се разработи процедура за събиране, стандартизация и обмен на данни за околната среда.
2. Да се създаде географска информационна система с цел осигуряване на информацията за околната среда.

След като са извършили анализи и са обосновали целите и задачите, техническите и организационните мероприятия на проекта "КОРИН", специалистите на Европейската общност са доказали значението на този проект и необходимостта за Общността. Направените изводи и заключения са дали възможност на Комисията, да препоръча започване на реализацията му в рамките на Европейската общност на основата на съвременните прогресивни методи за събиране и управление на информацията за земното покритие, като се използват основно спътникови данни от дистанционното сканиране на Земята.

Наред със заключенията, направени от специалистите за икономическото и стопанското значение на проекта "КОРИН", се е извършило и изследване от десет независими екипа на десет различни области от страните – членки на Европейската общност, с характерен и специфичен ландшафт за съответния район.

С тези изследвания се е отговорило на три основни въпроса:

1. Най-подходящият мащаб е  $M 1 : 100 000$ .
2. Размерите на най-малката област, която да бъде картографирана е 25 ha.
3. Базовата информация да бъдат спътниковите данни.

На основата на отговора на тези три въпроса се е извършило формулиране на номенклатурата (цифровото кодиране), с която ще се означават отделните елементи от Земното покритие на проекта "КОРИН".

Номенклатурата е организирана в три нива:

- първо ниво – 5 раздела, обхващащи основните категории (които са абстрактни в по-голяма или в по-малка степен) на земното покритие на планетата;
- второ ниво – 15 раздела – за мащаби от  $1 : 500 000$  и  $1 : 1 000 000$ ;
- трето ниво – 44 раздела, които ще се използват за проекта "Земно покритие" в мащаб  $1 : 100 000$  (Приложение 1).

Организаторите на проекта дават възможност за въвеждане и на четвърто ниво от националните екипи, ако с помощта на трите определени нива не е възможно да се характеризира определен елемент от земното покритие, специфичен и повтарящ се многократно в страната.

Ако така представените до тук проблеми могат да се приемат като основни и на които специалистите е трябвало да отговарят още на първия етап, то в последствие се е наложило да се решават още редица допълнителни задачи, а именно:

1. Подбор на спътникови данни за изготвяне на псевдо-цветовото изображение в  $M 1 : 100 000$ . Това се отнася до следните решения:
  - избор на сензори (LANDSAT: MSS, T.M., SPOT: H. R. V.), с който ще се получат мултиспектралните данни,
  - подбор на данни от получената сканерна информация.

След анализирането на различните сензори, монтирани на LANDSAT 1, 2, 3, 4 и 5 и SPOT 1 и 2, в [1] се отбелязва, че за проекта "КОРИН" изготвяне на базови изображения може да бъде постигнато с използването на всеки от сензорите MSS, T. M. и H.R.V., тъй като избраният мащаб  $1 : 100 000$  не изисква много високо пространствено решение.

2. Събиране и организиране на спомагателни данни, към които се отнасят всяъкъв вид документация, картиграфска и фотографска информация, имаща отношение към земното покритие, която не идва директно от спътниковата база данни. Тези данни включват основно: топографски карти; тематични карти, касаещи земното покритие; статистическа информация; аерофотоснимки и интерпретационен прозрачен лист.

Топографските карти, с които разполага всяка една страна, са едни от най-съществените допълнителни документи, тъй като те са събрали и локализирали с голяма точност информация за населени места, разграничителни линии, административни граници, релеф, геодезически опорни точки и др.

Фактически стандартните топографски карти са неотменна част от проекта. Те се използват на различни етапи от изготвяне на тематичната база данни за земното покритие, а именно:

- Използват се за изготвяне на прозрачно интерпретационно фолио за работа по интерпретацията и с това се залага геометрията.
- Необходими са за геометричните корекции на спътниковите данни и изготвянето на псевдо-цветното изображение.
- Представляват опорен документ за контролиране на геометрията при дигитализирането на интерпретационите листове.
- Те са важен източник на допълнителна информация за земното покритие.

При интерпретацията е желателно да се използват карти с мащаби в 1 : 25 000, 1 : 50 000, като за основна карта да се използва картата в същия мащаб на сканерното изображение, именно M 1 : 100 000.

Освен топографските карти, като най-надежден допълнителен материал, за някои специални случаи се препоръчва да се използват и тематични карти в различни мащаби, като геологки, почвени и др. Значение имат и карти с директно отношение към проекта, като растителни, горски, селскостопански и др.

Наред с тази графична документация, може да се използва и статистическа информация, която съдържа данни за годично разпределение на селскостопанската продукция, описание на горите и др.

Аерофотоснимките са едни от тези материали, които са извънредно рационални при неясно идентифициране на отделни елементи. Заедно с топографските карти, аерофотоснимките играят главна роля в проекта "Земно покритие". Те се използват за идентифициране (като номенклатурен клас) на псевдо-цветовото изображение на единично изчертаните елементи, които могат да се класифицират некоректно, при определянето на точните граници на спътниковите изображения и за проверка и определяне на резултатите от картираните елементи на земното покритие.

В процеса на интерпретацията се използва прозрачно недеформируемо фолио, което се поставя върху сателитното изображение и върху което се очертават земните елементи по време на интерпретацията. Прозрачният лист е важен документ и трябва да се създава с голямо внимание. Точността на резултатите в базата данни ще зависи от качеството на прозрачния лист.

Наред с тази спомагателна графичка информация от Комисията на ЕО бяха предоставени на Института за космически изследвания (ИКИ) – БАН, магнитни ленти с космическа информация, идентична с тази, с която бяха изгответи космическите карти с псевдо-оцветяване за територията на България.

След като в голяма част от страните на Европейската общност този проект беше успешно реализиран, по предложение на Комисията към ЕО, той се предложи за изпълнение и на бившите социалистически страни. Несъмнено този ход се яви необходим, като се има предвид, че в обозримо бъдеще предстои включването на тези страни в рамките на ЕО. Вземайки предвид целите на този проект, за координиране и управление на околната среда и

природното наследство, той има значение не само за националната, но и за Европейската общност. Първоначално проектът "КОРИН" беше предложен и започна да се реализира в Унгария, Полша и Чехия.

След продължителни обсъждания в края на 1994 г. между редица Български институции от една страна, и представители на Комисията към ЕО от друга, за техническите възможности, наличните допълнителни материали и не на последно място специалисти за интерпретация на псевдо-оцветените сканерни изображения, се стигна до решение през 1995 г. да се започне изпълнението на проекта "КОРИН - ЗЕМНО ПОКРИТИЕ" и в България. Прие се координацията у нас да се извърши от Министерството на околната среда, за ръководител на проекта беше определен ст.н.с. д-р Ст. Благоев. Решава се в изпълнението на проекта да участват два екипа, единият – от секцията по "Дистанционни методи" при ИКИ – БАН, а вторият – от "Геопланпроект" АД, като за ръководител на интерпретацията е определен ст.н.с. I ст. д.г.н. Хр. Спиридовон. Цялостната дейност по изпълнението на проекта се водеше от г-н Крист Инкс от Брюксел, работещ в Комисията към ЕО.

Преди да анализираме цялостно изпълнението на проекта "КОРИН", ще отбележим, че колективът беше от разнородни специалисти, притежаващи в различна степен съответна научна и техническа подготовка и практически опит, което даде своето отражение при преодоляването на проблеми и трудности при всеки отделен етап. Това се дължеше на факта, че при този начин на визуална интерпретация се влагаха несъмнено индивидуалните схващания за информативността, която носи всяко псевдо-оцветяване на отделния елемент, пречупено през призмата на специалистите с геодезическа, геологическа, географска и математическа подготовка и специализация.

Преди започване на практическата дейност, за реализацията на проекта, се проведе курс от г-н Крис Инкс, който сподели мнение за особеностите на интерпретацията, значенията на някои от псевдо-цветовете и други моменти, които трябва да се съблюдават. След завършване на курса се проведе тест, с който трябваше да се оцени нивото на всеки член от колектива, като от ръководителя се анализираха специфичните допуснати грешки. Всеки пропуск или правилно решение най-фрапиращо носеше белега на субективизма. Специалистите с инженерна подготовка и картографска специализация бяха очертали границите на населените места по-точно и с прави линии, за разлика от специалистите по природните науки, които обаче въз основа на познанията си за ландшафта бяха правилно идентифицирали и очертали елементите от земното покритие.

Преди започване на интерпретацията бяха изготвени в Брюксел от сканерните изображения на LANDSAT – TM и на основата на предоставените от Военно-топографската служба (ВТС) топографски карти в M 1 : 100 000, космически карти също в M 1 : 100 000 с псевдо-оцветени елементи.

Междувременно бяха изпълнени всички предварителни работи, съгласно инструкциите на Комисията на ЕО, с което всеки интерпретатор разполагаше с набор от топографски карти в мащаби 1 : 25 000, 1 : 50 000 и 1 : 100 000 в две емисии 1975 - 1978 г. и съвремени от 1980 г., които оказаха решителна помощ при интерпретацията. Наред с тези материали, при комплицирани и трудно решими случаи, се ползваха аерофотоснимки в мащаб, приблизително около 1 : 16 000 и по-съвременни снимки в мащаб около 1 : 60 000, направени специално за изпълнение на научните програми на ИКИ – БАН. Тематични карти и статистическа информация не бяха използвани поради извънредно специфичния характер, неподходящи мащаби и не на последно място –

наличните топографски карти и аерофотоснимки бяха достатъчни носители на информация при интерпретацията.

С помощта на специална таблица (Приложение 2) имаше възможност всеки определен елемент от земното покритие, с размери по-малки от 25 ha, да се присъедини към съседен елемент, но с по-голяма тежест (този елемент които има по-голямо число в таблицата) от съседните на него. Аналогични таблици бяха представени и за определяне на псевдо-оцветените елементи.

Интерпретацията продължи повече от година. Цялостното завършване на едно прозрачно фолио (у нас се използваше Мелинекс) в M 1 : 100 000 с определени граници и номенклатурни номера на елементите от земното покритие, рамковото и извънрамковото оформление, трябваше да се изпълнят за 18 дни (Приложение 3).

Трудностите за всеки интерпретатор, колкото и субективни да бяха, имаха и общ характер. Голямо значение има сезонът, през който са направени сканерните изображения. Например при пасищата и нивите, които през различните сезони сменят своето псевдо-оцветяване, определяното на номенклатурата на елементите е неточно, а оризовите полета и водните площи при сухи сезони се приемат като голи земи. Характерни случаи в това отношение имаше в Източни Родопи, където светло-кафявия цвет на някои горски ниви се оцветяваха като скали, а огромни пространства с известрели скали се оцветяваха като изсъхнали пасища.

Големи затруднения се получиха и при идентифицирането на широколистните и иглолистните гори, тъй като тяхното псевдо-оцветяване се различаваше само в нюансите на кафявия цвет – така широколистните гори се оцветяваха в светло кафяво, а иглолистните гори в тъмно кафяво. В зависимост от това, кога са направени сканерните изображения – през пролетния или есения сезон, сенките от планинските вериги оказваха влияние върху нюансите на оцветяваните горски масиви, като светло кафявото ставаше тъмно кафяво, което водеше до грешна интерпретацията, т.е. масови бяха решенията, когато огромни масиви от широколистни гори се определяха като иглолистни. Този случай беше трудно преодолим от всеки член на колектива, но по-големи затруднения имаше в началния етап при инженерния състав, които са работили предимно с чернобели аерофотоснимки при изготвяне на топографски карти, където сянката няма такова решаващо значение.

Сравнително леко този проблем може да се преодолее, с помощта на компютърна обработка на предоставените ни магнитни ленти, тъй като ТМ–сензорите имат значителното преимущество, че съдържат седем спектрални диапазона, които правят възможно да се създадат 35 изображения с използване на различни спектрални комбинации. Така от направените няколко експеримента при спектрална комбинация, която дава оцветяване на широколистните и иглолистните гори в два нюанса на зеления цвят, сенките не оказваха такова влияние и имаше възможност еднозначно да се определи вида на горските масиви.

По редица причини този метод не се използва, но ще отбележим, че полската проверка, която се правеше в края на всеки етап, даваше възможност да се изясняват случаите, при които нямаше еднозначност в определението на номенклатурата на отделните елементи. Такива бяха случаите при уточняванията на светло-кафявите горски почви в районите на Източните Родопи, които бяха дешифирани като голи скали и случаите с огромни територии изветрели скали, интерпретирани като пасища.

В заключение ще отбележим, че изпълнението на тази огромна по своята мащабност и уникална по своето значение задача, която се завърши за кратки срокове с много високи оценки за постигнатото качество и достоверност при получените картни материали, даващи информация за земното покритие на цялата територия на България, ни дава възможност да се направят следните изводи и заключения:

1. По неоспорим начин се доказва значението на космическите методи при изготвяне на картни материали с отлични качества на огромни територии.
2. В конкретния случай е създадена физическата основа на една географска информационна система на определено ниво, която може да послужи за бъдещо допълване с нова информация.
3. Реализирането на програмата "КОРИН" се изпълни с минимален брой специалисти и за кратки срокове, приблизително една година, факт който досега не беше познат в практиката у нас.
4. При периодични обновления на земното покритие (приблизителен период от 10 – 15 години) с нова космическа информация ще може да се постави на научна основа координираното и съгласуваното управление и стопанисване на земните природни дадености на територията ни в национален и международен мащаб.
5. Не на последно място трябва да отбележим, че участниците в тази дейност имаха невероятната възможност да получат голям опит при интерпретацията на космическите изображения.

#### Литература

1. CORINE Land cover. Technical guide - EUR 12585 EN , Brussels 1993.
2. Космическая съемка и тематическое картографирование. М., Изд. Московского университета, 1980 г.
3. Картографирование по космическим снимкам и охрана окружающей среды. М., Недра, 1982.
4. Дистанционное зондирование. Превод с английского. М., Недра, 1983.

*Постъпила на 25. II. 1997 г.*

#### The CORINE - LANDCOVER programme applied for the territory of Bulgaria

*Nicola Georgiev, Kheirani Spiridonov*

(Summary)

In the paper, the objectives and tasks of the CORINE - LANDCOVER project are described, a programme of the Committee of the European Community. It is realised with the help modern progressive methods for collection, coordination, agreement, organisation and control of the landcover information between the countries-members of EC, using mainly data from the remote sensing of the Earth.

Bulgaria accomplishes the project by the help of space scanner images from the satellite LANDSAT-TM in scale 1:100 000 with pseudocolouring of the different elements of the Earth's cover. The obtained results are analysed and conclusions are made as to the subjective and objective interpretation-related problems. The significance of space methods in the high-quality mapping of large territories within short periods of time and the organisation of GIS at a certain level are convincingly confirmed.

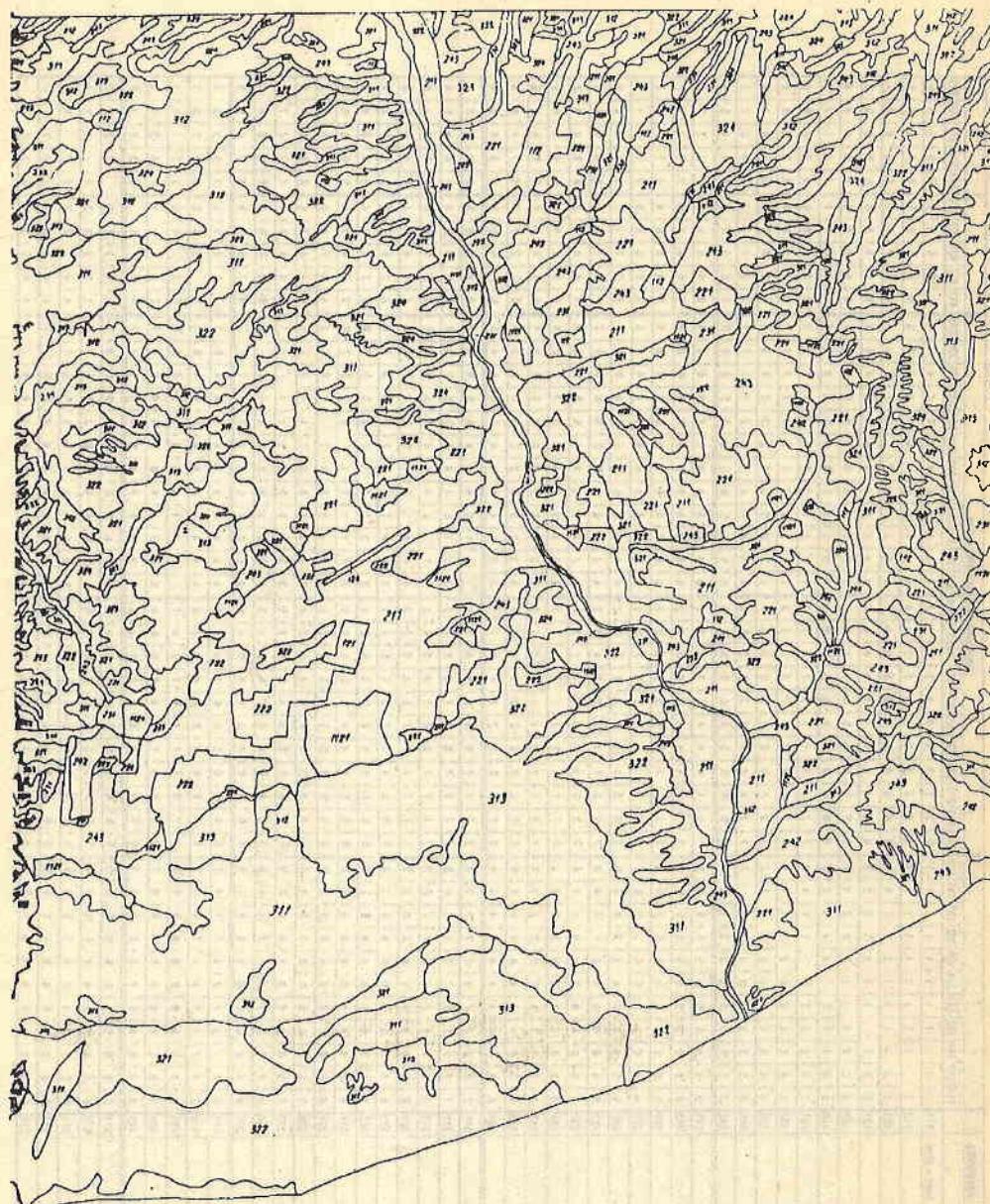
| КОРИН – “ЗЕМНО ПОКРИТИЕ” – Н О М Е Н К Л А Т У Р А |   |   |
|--|---|---|
| НИВО I   | НИВО II   | НИВО III  |
| 1. Изкуствени повърхности                          | 1.1 Градски структури<br>1.2. Индустритни, търговски и транспортни участъци<br>1.3. Мини, кариери, сметища и строителни площадки<br>1.4. Области с изкуствена, неселскостопанска растителност | 1.1.1. Непрекъснати градски структури<br>1.1.2. Прекъснати градски структури<br>1.2.1. Индустритни и търговски участъци<br>1.2.2. Пътни и ж.п.мрежи и принадлежащата им земя<br>1.2.3. Морски пристанища<br>1.2.4. Летища<br>1.3.1. Кариери и открити рудници<br>1.3.2. Сметища<br>1.3.3. Строителни площадки<br>1.4.1. Зелени градски зони<br>1.4.2. Съоръжения за спорт и отдих   |
| 2. Селскостопански области                         | 2.1. Орна земя<br>2.2. Многогодишни култури<br>2.3. Пасища<br>2.4. Нееднородни селскостопански области  | 2.1.1. Ненапоявана орна земя<br>2.1.2. Постоянно напоявана земя<br>2.1.3. Оризища<br>2.2.1. Лозя<br>2.2.2. Овощни и плодни насаждения<br>2.2.3. Маслинови горички<br>2.3.1. Пасища<br>2.4.1. Едногодишни култури, съвместно с трайни насаждения<br>2.4.2. Комплексни култивирани култури<br>2.4.3. Земя, основно използвана за селскостопански култури със значителни области с естествена растителност<br>2.4.4. Агро-горски области |

|   |  |   |
|---|--|---|
| <b>3. Гори и полуестествени области</b> | <b>3.1. Гори</b>   | <b>3.1.1. Широколистни гори</b><br><b>3.1.2. Иглолистни гори</b><br><b>3.1.3. Смесени гори</b>  |
|   | <b>3.2. Групи шубнаци и/или тревиста растителност</b>                            | <b>3.2.1. Естествени тревисти и хълмисти области</b><br><b>3.2.2. Ливади и храстни</b><br><b>3.2.3. Постоянно-зелена растителност</b>   |
|   | <b>3.3. Открити области с малко или без растителност</b>                         | <b>3.2.4. Преходни области с гори и храстни</b><br><b>3.3.1. Плажове, дюни, пясъчни равнини</b><br><b>3.3.2. Голи скали</b><br><b>3.3.3. Области с рядка растителност</b><br><b>3.3.4. Изгорели области</b><br><b>3.3.5. Глетчери и постоянно засенчени области</b> |
| <b>4. Влажни области</b>                | <b>4.1. Вътрешни влажни области</b><br><br><b>4.2. Крайбрежни влажни области</b> | <b>4.1.1. Вътрешни блата, мочурища и тресавища</b><br><b>4.1.2. Торфени блата</b><br><b>4.2.1. Солени блата</b><br><b>4.2.2. Солници</b><br><b>4.2.3. Приливно-отливни области</b>  |
| <b>5. Водни пространства</b>            | <b>5.1. Вътрешни води</b><br><br><b>5.2. Морски води</b>                         | <b>5.1.1. Речни корита</b><br><b>5.1.2. Водни басейни</b><br><b>5.2.1. Крайбрежни лагуни</b><br><b>5.2.2. Естуарии</b><br><b>5.2.3. Морета и океани</b>   |

## Приложение 2

| PRODUCTS     | TODAY'S EXCHANGE RATES |         | YESTERDAY'S EXCHANGE RATES |         |
|--------------|------------------------|---------|----------------------------|---------|
|              | OPENING                | CLOSING | OPENING                    | CLOSING |
| DATE < 25/04 | 111                    | 112     | 121                        | 122     |
| 112          | 1                      | 1       | 1                          | 1       |
| 121          | 1                      | 1       | 1                          | 1       |
| 122          | 1                      | 1       | 1                          | 1       |
| 123          | 1                      | 1       | 1                          | 1       |
| 124          | 1                      | 1       | 1                          | 1       |
| 131          | 3                      | 2       | 3                          | 2       |
| 132          | 3                      | 2       | 2                          | 3       |
| 133          | 1                      | 1       | 1                          | 1       |
| 141          | 3                      | 2       | 3                          | 2       |
| 142          | 3                      | 2       | 3                          | 2       |
| 211          | 5                      | 5       | 5                          | 5       |
| 212          | 5                      | 5       | 5                          | 5       |
| 213          | 5                      | 5       | 5                          | 5       |
| 221          | 4                      | 4       | 5                          | 5       |
| 222          | 5                      | 5       | 6                          | 6       |
| 223          | 5                      | 6       | 6                          | 6       |
| 231          | 6                      | 5       | 6                          | 5       |
| 240          | 3                      | 2       | 3                          | 2       |
| 242          | 3                      | 2       | 3                          | 2       |
| 243          | 4                      | 4       | 4                          | 4       |
| 311          | 7                      | 7       | 7                          | 7       |
| 312          | 7                      | 7       | 7                          | 7       |
| 321          | 8                      | 8       | 8                          | 8       |
| 322          | 5                      | 6       | 6                          | 6       |
| 323          | 5                      | 6       | 6                          | 6       |
| 326          | 6                      | 6       | 6                          | 6       |
| 411          | 7                      | 7       | 7                          | 7       |
| 412          | 7                      | 7       | 7                          | 7       |
| 421          | 8                      | 8       | 8                          | 8       |
| 422          | 6                      | 5       | 6                          | 5       |
| 511          | 5                      | 5       | 5                          | 5       |
| 512          | 5                      | 5       | 5                          | 5       |
| 521          | 6                      | 6       | 6                          | 6       |
| 533          | 6                      | 6       | 6                          | 6       |

Справочник

SHEET N. K-9-64  
TITLE PETRICH

SATELLITE DATA  
SENSOR: LANDSAT TM  
SCENE No: 184/31  
ACQ. DATE: 28.10.89

INTERPRETOR: NIKOLAY GEORGIEV  
START DATE: 15.01.95  
END DATE: 28.01.95  
N.DAYS: 14

VERIFICATION ACCEPTANCE  
1. INTERPREATORS LEADER  
(H. SPIRIDONOV)  
2. PROJECT LEADER  
(S. BLAGOEV)  
3. TECHNICAL UNIT

TOPOGRAPHIC MAP  
SCALE: 1:100 000  
DATE:  
PROJECTION: SYSTEM 1970  
MAP CORNERS  
U.L.: U.R.:  
D.L.: D.R.:  
CONTROL POINTS:

Българска академия на науките, Bulgarian Academy of Sciences  
Аерокосмически изследвания в България, 14. Aerospace Research in Bulgaria  
София, 1998, Sofia

## Приложение на дистанционни методи при изследване на смесено дълбоко съобщество

Владимир Вълчев

## *Институт по ботаника, БАН*

Формулирането и решаването на задачи на дистанционното изследване се основава на измерването с помощта на аеро- и космически средства на различни количествени показатели на отразената слънчева радиация или собственото излъчване на земната повърхност. Използването на получените данни позволява единозначно да се идентифицират различни природни образувания върху нея. Това изисква прилагането на такива методи и средства, които биха дали на изследователите възможност с най-голяма достоверност да дешифрират аero- и космически изображения. До този момент са публикувани редица работи от наши и чужди автори [1, 2].

Настоящата работа има за цел да се установят най-информативните канали от видимата и БИЧ (близка инфрачервена) област на електромагнитния спектър. Те биха позволили достоверно идентифициране на растителни обекти върху земната повърхност, получени на аero- и космични фотоизображения.

Изследвано е издънково смесено дъбово съобщество. Дървостоят му е изграден основно от благун и цер. Има единично участие на бряст, липа и клен. Заема площ от около 30 ha, на възраст от 20–25 години. Височината на дърветата е 6–8 m, диаметърът на гръдна обиколка – 18–22 cm. Има недобре развит подлес от клен, мукина и млади дъбчета. Тревистият етаж е много слабо развит и със сравнително много беден състав – включва 8–10 вида.

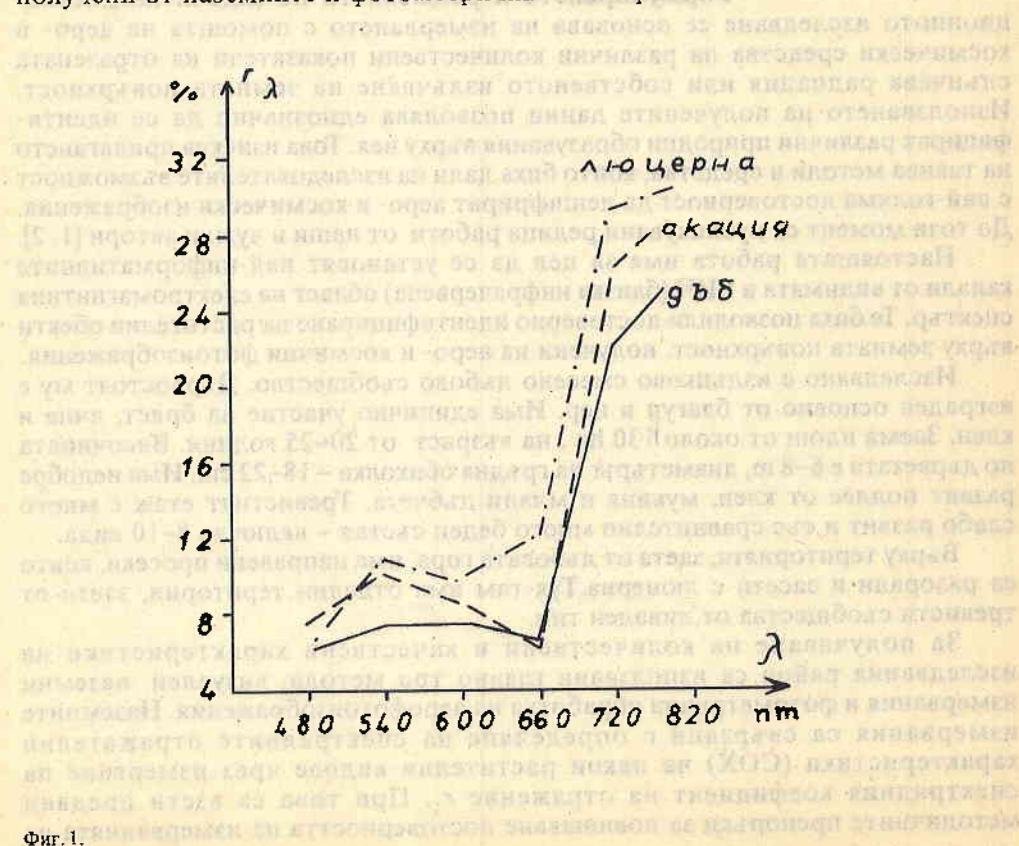
Върху територията, заета от дълбоката гора, има направени просеки, които са разорани и засети с люцерна. Гук-там има отделни територии, заети от тревисти съобщества от ливаден тип.

За получаване на количествени и качествени характеристики на изследвания район са използвани главно три метода: визуален, наземни измервания и фотометрична обработка на аерофотоизображения. Наземните измервания са свързани с определяне на спектралните отражателни характеристики ( $\text{COX}$ ) на някои растителни видове чрез измерване на спектралния коефициент на отражение  $r_\lambda$ . При това са взети предвид методичните препоръки за повишаване достоверността на измерванията на

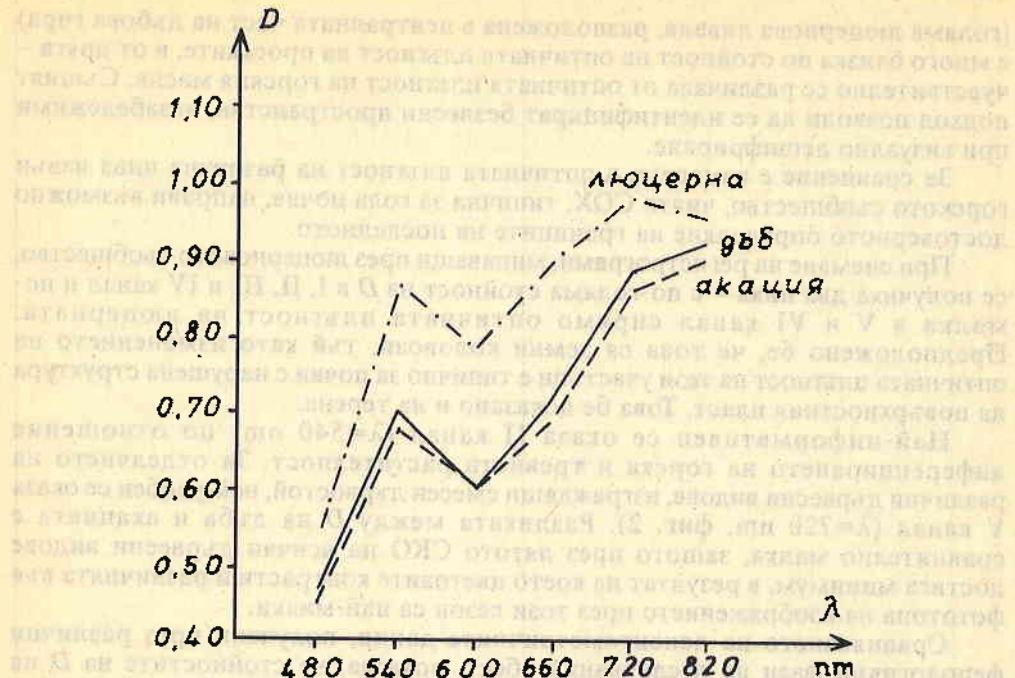
чай-информативните параметри на различни растителни структури [3]. Спектрометрирани са периферни клони от благун и акация и част от тревостоя на люцернова ливада с помощта на прибора "ИСОХ-020", който има 20 канала. Те обхващат видимия и БИЧ диапазон на електромагнитния спектър ( $\lambda=400\div 820$  nm).

Фотометричната обработка дава възможност за измерване на оптичната плътност ( $D$ ) на фотонегативи. Те са получени с помощта на многозоналната аерокосмична фотокамера "МКФ-6М", монтирана на борда на самолет лаборатория АН-30. Фотокамерата работи в шест канала на видимата и БИЧ област на електромагнитния спектър ( $\lambda=400\div 820$  nm), като отделните канали се характеризират със следните максимуми на спектрална чувствителност (съответно от I до VI канал): 480 nm, 540 nm, 600 nm, 660 nm, 720 nm и 820 nm. Измерването на  $D$  на негативите във всички канали е извършено с микроденситометър "MD-100" свързан с компенсационно записващо устройство "К-201", което дава възможност за графичен запис на измерваните величини – т.н. регистрограми. Използвано е и маршруично обхождане на изследвания обект, за да бъде събрана априорна информация за него.

Фигура 1 илюстрира само стойностите на  $r_{\lambda}$  от спектрометрирането за тези дължини на вълните, които съвпадат с  $\lambda$  на шестте канала на камерата. Зависимостта, която съществува между  $D$  и  $\lambda$  при изследванието три обекта, е представена на фиг. 2. По този начин се получава съпоставимост на данните, получени от наземните и фотометричните измервания.



Фиг. 1.



Фиг. 2.

Зелените растения се характеризират с два максимума на отражение – първия при  $\lambda=540$  nm и втория – БИЧ област на електромагнитния спектър, и минимум за  $\lambda=660$  nm, което се вижда и от фиг. 1. За  $\lambda=660$  nm обаче не се получава очакваният минимум на  $D$  (фиг. 2.). Този факт е обусловен от започващата промяна на баграта на горската растителност, което е последвано от увеличение на отражателната способност на растителните обекти в синята и зелената област на спектъра до 3,5 пъти, а за червената – до 10 пъти. Ивицата на погълъщане на последната изчезва.

Измерванията показват, че оптичната плътност на дъба е по-голяма от оптичната плътност на акацията (фиг. 2), т.е. отражателната способност на короните на дъбовите дървета е по-голяма. Обяснение за това може да се намери ако се съпостави морфологичното и анатомичното устройство на листата на дъба и акацията (дъбовите листа са по-плътни и с по-добре развити кутикула и епидермис в сравнение с акациевите листа).

Отражателната повърхност на дървесното и на тревистото съобщество е с различна структура. Това обуславя разликите в спектралния коефициент на отражение (СКО) на двата фитоценоза (дъбова гора и люцернова ливада). Поради по-голямото погълъщане на слънчевата радиация от дървесното насаждение,  $r_\lambda$  на гората е по-малко от  $r_\lambda$  на люцерната (фиг. 1). Тази зависимост се запазва и при микроденситометрирането (фиг. 2), т.е.  $D$  на гората е по-малко от  $D$  на люцерната, като съответните стойности на  $r_\lambda$  и  $D$  имат аналогичен ход.

Регистрограмите по профили дадоха възможност да се определи, че незалесените части (просеките) са заети от тревисти съобщества. Това е направено чрез съпоставянето на оптичните плътности на обектите. От една страна, оптичната плътност на априорно познато тревисто съобщество

(голяма люцернова ливада, разположена в централната част на дъбова гора) е много близка по стойност на оптичната плътност на просеките, и от друга – чувствително се различава от оптичната плътност на горския масив. Същият подход позволи да се идентифицират безлесни пространства, незабележими при визуално дешифриране.

За сравнение е измерена и оптичната плътност на разорана нива извън горското съобщество, чиято СОХ, типична за гола почва, направи възможно достоверното определяне на границите на последното.

При снемане на регистрограми, минаващи през люцерновото съобщество, се получиха два пика – с по-голяма стойност на  $D$  в I, II, III и IV канал и по-малка в V и VI канал спрямо оптичната плътност на люцерната. Предположено бе, че това са земни коловози, тъй като изменението на оптичната плътност на тези участъци е типично за почви с нарушена структура на повърхностния пласт. Това бе доказано и на терена.

Най-информативен се оказа II канал ( $\lambda=540$  nm) по отношение диференцирането на горска и тревиста растителност. За отделянето на различни дървесни видове, изграждащи смесен дървостой, най-удобен се оказа V канал ( $\lambda=720$  nm, фиг. 2). Разликата между  $D$  на дъба и акацията е сравнително малка, защото през лятото СКО на всички дървесни видове достига минимум, в резултат на което цветовите контрасти и различията във фототона на изображението през този сезон са най-малки.

Сравняването на денситометричните данни, получени през различни фенологични фази на изследвания обект, показва, че стойностите на  $D$  на гората през октомври са по-малки от тези за август. Изключения има в трети канал ( $\lambda=600$  nm), в който те са почти равни. Всичко това е обусловено от различията в обагрянето на гората в два сравнително отдалечени по време момента от вегетационния сезон – през октомври има силно намаляване на хлорофилното съдържание, което понижава СКО и във втори канал не се получава характерният за зелената растителност максимум.

Изложението до тук анализ на приложението на различни дистанционни методи за дешифриране на някои растителни обекти показва, че под влияние на баграта на оптично активната повърхност на гората настъпва промяна в отразяването в отделните части на видимата и БИЧ област на спектъра. При това съществува разлика в отразяващата способност на дървесните и на тревистите съобщества, което дава възможност стриктно да се разграничават тези два типа растителност. Различията са еднопосочни и при двата метода.

Най-информативен е втори канал ( $\lambda=540$  nm) по отношение разграничаването на дървесна от тревиста растителност. За дешифриране на различни дървесни съобщества най-подходящ е пети канал ( $\lambda=720$  nm). Ефективността на дешифриране се повишава при подходящо комбиниране на фотоинформация и фенологично състояние на отделните компоненти на растителността.

#### Литература

1. Мишев, Д. Дистанционни изследвания на Земята от Космоса. С., БАН, 1981. 320 с.
2. Толчельников, Ю. Оптические свойства ландшафта. М., Наука, 1974. 189 с.
3. Мишев, Д., Г. Мардиросян. Комплексные синхронные и квазисинхронные измерения и наблюдения при дистанционном аэрокосмическом исследовании Земли. - Аэрокосмические исследования в България, 1991, №7, 31 - 38.

Постъпила на 3. I. 1997 г.

## Application of remote sensing for investigation of a mixed oak community

*Vladimir Vulchev*

### (Summary)

**Mixed oak and herb ecosystems have been studied aiming at the establishment of the most informative channels for identification of different plant objects. The results achieved show that there are differences in the reflecting ability of the tree and herb ecosystems. The differences provide the possibility for reliable distinguishing between the two types of vegetation in the channel with  $\lambda=540$  nm. For the differentiation of different tree ecosystems the most suitable proved to be the channel with  $\lambda=720$  nm. The efficiency of the differentiation increases when the period of study and the phenological state of the studied vegetation are combined properly.**

### Introduction

Mixed oak and herb ecosystems have been a focus in our research. The main aim is to distinguish the two types of vegetation in the field by using remote sensing methods. The results obtained show that there are differences in the reflecting ability of the two types of vegetation. The differences provide the possibility for reliable distinguishing between the two types of vegetation in the channel with  $\lambda=540$  nm. For the differentiation of different tree ecosystems the most suitable proved to be the channel with  $\lambda=720$  nm. The efficiency of the differentiation increases when the period of study and the phenological state of the studied vegetation are combined properly.

A mixed oak and herb ecosystem is a complex system consisting of different components. The main components are the trees, shrubs, grasses, herbs, and flowers. The trees and shrubs are the dominant components, while the grasses, herbs, and flowers are secondary components. The trees and shrubs are the primary components, while the grasses, herbs, and flowers are secondary components.

The mixed oak and herb ecosystem is a complex system consisting of different components. The main components are the trees, shrubs, grasses, herbs, and flowers. The trees and shrubs are the dominant components, while the grasses, herbs, and flowers are secondary components. The trees and shrubs are the primary components, while the grasses, herbs, and flowers are secondary components.

The mixed oak and herb ecosystem is a complex system consisting of different components. The main components are the trees, shrubs, grasses, herbs, and flowers. The trees and shrubs are the dominant components, while the grasses, herbs, and flowers are secondary components.

## Optimal control of unpowered flight in vertical plane<sup>1</sup>

*Todor Tagarev*

*Space Research Institute, Bulgarian Academy of Sciences*

### 1. Introduction

The way the energy of gliding aircraft is used may contribute to an increase in their effectiveness, and in some cases, i.e. a flight of an aircraft with engine failure, directly relates to the probability of its survival. Many of the traditional methods for control of unpowered flight are empirically derived, which makes them suitable in a limited range of initial conditions. The total energy of an aircraft would be effectively used only through implementation of optimal control strategies or their close approximations.

Methods for trajectory optimization are under constant development. A recent example is the attempt for direct trajectory optimization via representation of the dynamical system in differential inclusion format [1]. Nevertheless, most successful solutions of the problem are reached through numerical implementation of the Pontryagin's minimum principle. Unfortunately, many of the solutions are based on strong assumptions of trajectory segments in the vertical flight path [2,3], fixed flight time [1,2] and quite arbitrary definition of boundary conditions [2,3].

In the current paper, the optimal control problem is solved via Pontryagin's minimum principle. The flight time is not fixed. The boundary conditions have physical meaning. The problem of optimal control of unpowered flight is solved according to three criteria:

- Maximum flight range;
- Maximum kinetic energy at the point of impact with the Earth surface;
- Optimal conditions for surface penetration in the point of impact.

A penalty function approach is used to account for end-state constraints. The two-point boundary value problem is solved numerically. The same procedure is used for the three criteria. The differences are in the formulae for the end values of the costate variables.

---

<sup>1</sup> This paper was included in the Programme of the Third European Control Conference, September 1995, Rome, Italy.

The optimal control of the unpowered flight guarantees effective use of the potential and kinetic energy of the aircraft. Its implementation would substantially increase the flight range, the aircraft energy at the point of impact, and the penetration characteristics. Furthermore, it would provide opportunities to compensate for model parameter changes and perturbations.

## 2. Problem formulation

### 2.1. Equations of motion

The equations of motion relative to an Earth-fixed coordinate system were described using a rigid-body dynamical model in absence of wind.

$$(1) \quad \begin{cases} \dot{v} = -\frac{D}{m} - g \sin \gamma, \\ \dot{\gamma} = \frac{L}{mv} - \frac{g \cos \gamma}{v}, \\ \dot{x} = v \cos \gamma, \\ \dot{h} = v \sin \gamma \end{cases}$$

Here  $m$  denotes the aircraft mass, and  $g$  – the gravitational acceleration. The state variables are speed  $v$ , vertical flight path angle  $\gamma$ , horizontal flight distance  $x$ , and altitude  $h$ . The aircraft drag  $D$  and lift  $L$  are described by the equations

$$(2) \quad \begin{aligned} D &= c_D \frac{\rho v^2}{2} S, \\ L &= c_L \frac{\rho v^2}{2} S, \end{aligned}$$

where  $S$  is the wing area,  $\rho$  is the air density, and the parameters  $c_D$  and  $c_L$  depend on the Mach number  $M$ . In the particular model the aerodynamics parameters are defined by the equations

$$(3) \quad \begin{aligned} c_D &= c_{D_0}(M) + c_L^\alpha \alpha^2, \\ c_L &= c_L^\alpha \alpha^2, \end{aligned}$$

where  $\alpha$  is the aircraft angle of attack. Denoting  $\rho_{N0}$  as air density at sea level,  $H(h) = \rho/\rho_{N0}$  as relative density, and  $\mu = \rho_{N0} S/(2m)$ , eqs. (1) take the form

$$(4) \quad \begin{cases} \dot{v} = -c_D \mu H(h) v^2 - g \sin \gamma, \\ \dot{\gamma} = c_L \mu H(h) v - \frac{g \cos \gamma}{v}, \\ \dot{x} = v \cos \gamma, \\ \dot{h} = v \sin \gamma \end{cases}$$

The functions  $H(h)$  and  $M(v, h)$  are described in detail in [4].

### 2.2. Optimization problem

The optimal control problem is stated in Mayer form and requires minimization of the criterion

$$(5) \quad J = \Theta [y(t_f), t_f]$$

for differential constraints on the state vector  $y^T(t) = [v(t), \gamma(t), x(t), h(t)]$  in the form

$$(6) \quad y = f(y, \alpha, t), \quad y(t_0) = y_0$$

described by eqs. [4], constrains on the end state

$$(7) \quad P [y(t_f), t_f] = 0,$$

and saturation-type constraints on the control function  $\alpha$

$$(8) \quad |\alpha(t)| \leq \alpha_s.$$

The duration of the flight  $t_f$  is not fixed.

The solution for three different criteria is examined:

a. Maximum flight range

$$(9a) \quad J = x(t_f);$$

b. Maximum kinetic energy at the point of impact with the Earth surface

$$(9b) \quad J = -0.5 v^2(t_f);$$

c. Optimal conditions for surface penetration in the point of impact [5]

$$(9c) \quad J = -v(t_f) \sin \gamma(t_f).$$

The constraints on the end state for the three cases are as follows:

$$(10a) \quad h(t_f) = 0,$$

$$(10b, c) \quad h(t_f) = 0, \quad x(t_f) - X = 0,$$

where  $X$  is the initial horizontal distance to the required point of impact with the Earth surface.

The problem is solved via Pontryagin's minimum principle. The second constraint in eqs. (10b, c) is accounted for by a penalty function in criteria (9b), (9c):

$$(11b) \quad J = -0.5 v^2(t_f) + 0.5 s_b [x(t_f) - X]^2,$$

$$(11c) \quad J = -v(t_f) \sin \gamma(t_f) + 0.5 s_c [x(t_f) - X]^2.$$

The first constraint in eqs. [10] is accounted for by a Lagrange multiplier  $\psi$ , which leads to a unconditional minimization of

$$(12) \quad \Pi(t_f) = J[y(t_f), t_f] + \psi h(t_f).$$

The Hamiltonian for the optimal control problem is defined by the equations

$$(13) \quad H(y, \alpha, \lambda, t) = \lambda^T f,$$

$$(14) \quad \dot{\lambda} = -\frac{\partial H}{\partial y},$$

$$(15) \quad \dot{\lambda}(t_f) = -\frac{\partial \Pi(t_f)}{\partial y(t_f)}.$$

The Lagrange multiplier and the flight time are determined from eqs. (7) and the condition [6]

$$(16) \quad H(t_f) + \frac{\partial J[y(t_f), t_f]}{\partial t_f} + \frac{\partial P^T[y(t_f), t_f]}{\partial t_f} \psi = 0.$$

Eqs.(14) for the costate variables have the form

$$(17) \quad \begin{aligned} \dot{\lambda}_v &= \lambda_v \mu H(h) \left( \frac{dc_{D0}}{dM} \frac{dM}{dv} v^2 + 2c_D v \right) - \lambda_\gamma \left( \mu H(h) c_L + \frac{g \cos \gamma}{v^2} \right) \\ &\quad - \lambda_x \cos \gamma - \lambda_h \sin \gamma, \\ \dot{\lambda}_\gamma &= \lambda_v g \cos \gamma - \lambda_\gamma \frac{g}{v} \sin \gamma + \lambda_x v \sin \gamma - \lambda_h v \cos \gamma, \\ \dot{\lambda}_x &= 0, \\ \dot{\lambda}_h &= \lambda_v \mu v^2 \left( \frac{dc_{D0}}{dM} \frac{dM}{dh} H(h) + c_D \frac{dH}{dh} \right) - \lambda_\gamma \mu v c_L \frac{dH}{dh}, \end{aligned}$$

where the dependence of the derivatives  $dM/dv$ ,  $dM/dh$ , and  $dH/dh$  on the phase state is derived analytically from the relations in [4]. The end values of the costate variables are defined from eqs.(7), (16), and for the particular criteria are as follows:

$$(18a) \quad \begin{aligned} \lambda_v(t_f) &= 0, \\ \lambda_\gamma(t_f) &= 0, \\ \lambda_x(t_f) &= 1, \\ \lambda_h(t_f) &= -\frac{1}{\operatorname{tg} \gamma(t_f)} \end{aligned}$$

$$(18b) \quad \begin{aligned} \lambda_v(t_f) &= v(t_f), \\ \lambda_\gamma(t_f) &= 0, \\ \lambda_x(t_f) &= -s_b [x(t_f) - X], \end{aligned} \quad (18)$$

$$(18) \quad \lambda_h(t_f) = -\frac{v(t_f) - s_b [x(t_f) - X] \cos \gamma(t_f)}{\sin \gamma(t_f)}; \quad (18)$$

$$(18c) \quad \begin{aligned} \lambda_v(t_f) &= -\sin \gamma(t_f), \\ \lambda_\gamma(t_f) &= -v(t_f) \cos \gamma(t_f), \\ \lambda_x(t_f) &= -s_c [x(t_f) - X], \end{aligned} \quad (18)$$

$$(18) \quad \lambda_h(t_f) = \frac{\dot{v}(t_f)}{v(t_f)} + \frac{\dot{\gamma}(t_f) + s_c [x(t_f) - X]}{\operatorname{tg} \gamma(t_f)}; \quad (18)$$

### 2.3. Numerical solution

The two-point boundary value problem (7), (17), (18) is solved numerically. Eqs.(4) are integrated using the 4th order Runge – Kutta method until the first condition in (10) is fulfilled. Then, using eqs.(18) the end values of the costate variables are defined and eqs.(17) are integrated backwards until  $t = t_0$ . The consequent approximation for the control function is

$$(19) \quad \alpha^{N+1}(t) = \alpha^N(t) + k^N(t) \frac{dH}{d\alpha^N(t)},$$

limited by the maximum allowed angle of attack  $\alpha_s$  in eq.(8). For the gradient of the Hamiltonian an analytical form exists

$$(20) \quad \frac{dH}{d\alpha^N(t)} = \mu c_L^\alpha H(h^N) v^N [-2v^N \lambda_v^N \alpha^N(t) + \lambda_\gamma^N].$$

The initial approximation  $\alpha^0(t)$  for the first criterion is derived from the condition of maximum lift-to-drag ratio on the trajectory, and for the particular model is

$$(21a) \quad \alpha^0(t) = \sqrt{c_{D0}(M)/c_L^\alpha}.$$

For the other two criteria the initial approximation was computed according to the formula

$$(21b,c) \quad \alpha^0(t) = k_1 \alpha^* + k_2 \left( \gamma + \operatorname{tg}^{-1} \frac{h}{X - x} \right)$$

and the limitation on the angle of attack (8). The parameters  $k_1 \alpha^*$  and  $k_2$  are explicitly defined in [5]. Here in parentheses is the direct pursuit control parameter, and  $\alpha^*$  is determined from the condition for a straight flight

$$(22) \quad \alpha^* = \frac{g \cos \gamma}{\mu c_L^\alpha H(h) v^2}$$

The choice of  $k''(t)$  in (19) allows for incorporation of different optimization techniques and is a subject of a separate study. Effective numerical algorithms for the solution of the two boundary value problem in flight dynamics are studied in [7, 8].

### 3. Results and discussion

Figure 1 shows the initial approximation, the optimal control function, and the state variables on the optimal trajectory for the maximum range criterion. For  $v_0=450$  m/s,  $g_0=30^\circ$ ,  $x_0=0$ , and  $h_0=10000$  m the increase in the flight range is 42 percent.

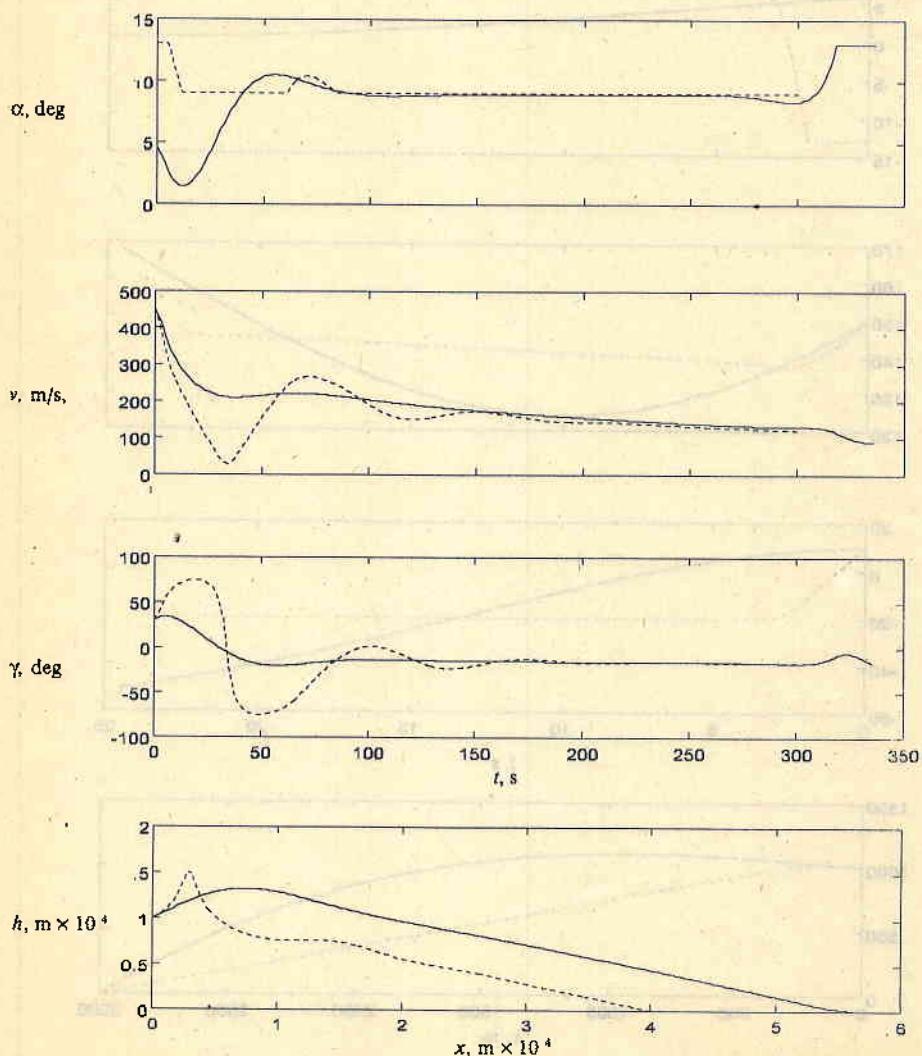


Fig.1. Optimal control and trajectory for the maximum range criterion  
initial approximation, —— optimal variables

The relevant variables for the maximum kinetic energy criterion are presented in fig. 2. For  $v_0=150$  m/s,  $\gamma_0=10^\circ$ ,  $x_0=0$ ,  $h_0=1000$  m and  $X=3000$  m the energy at the point of impact with the Earth surface is increased with 40 percent. For the same initial condition and  $X=5500$  m the use of traditional control methods does not guarantee arrival at the required point of impact, while the optimal control does. If  $X=5900$  m the required point of impact cannot be reached even with implementation of the optimal control function. The solution in such cases coincides with the optimal control for the maximum range criterion without, however, satisfying the second terminal constraint in (10b).

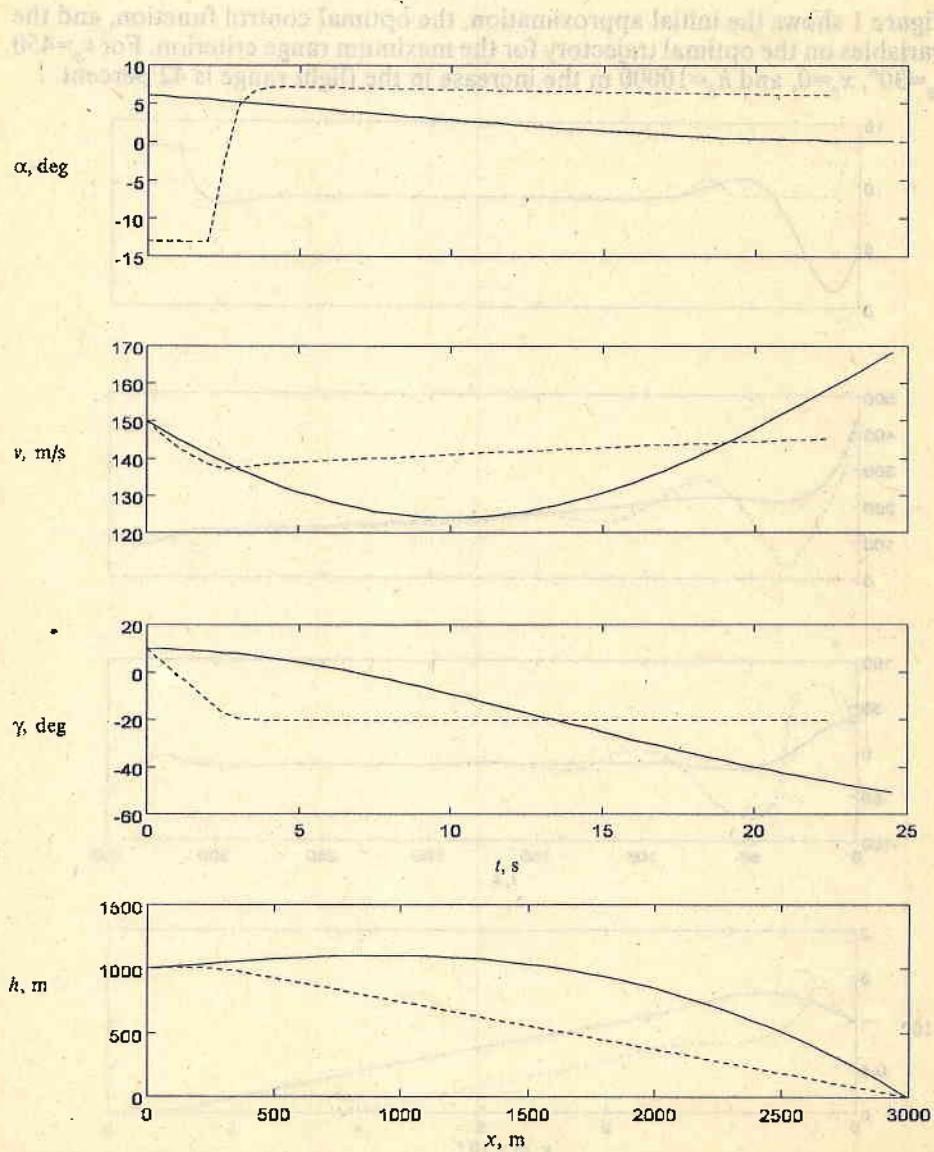


Fig.2. Optimal control and trajectory for the maximum kinetic energy at the point of impact criterion

— initial approximation, — optimal variables

Figure 3 shows the initial approximation, the optimal control function, and the optimal trajectory variables minimizing criterion (11c). For initial conditions  $v_0=150$  m/s,  $\gamma_0=10^\circ$ ,  $x_0=0$ ,  $h_0=1000$  m and  $X=3000$  m the implementation of the optimal control would increase the depth of penetration with 117 percent. Furthermore, if the direct pursuit guidance is applied, the aircraft would meet the Earth surface at an angle of 20 degrees, which would result in a significant probability for a ricochet.

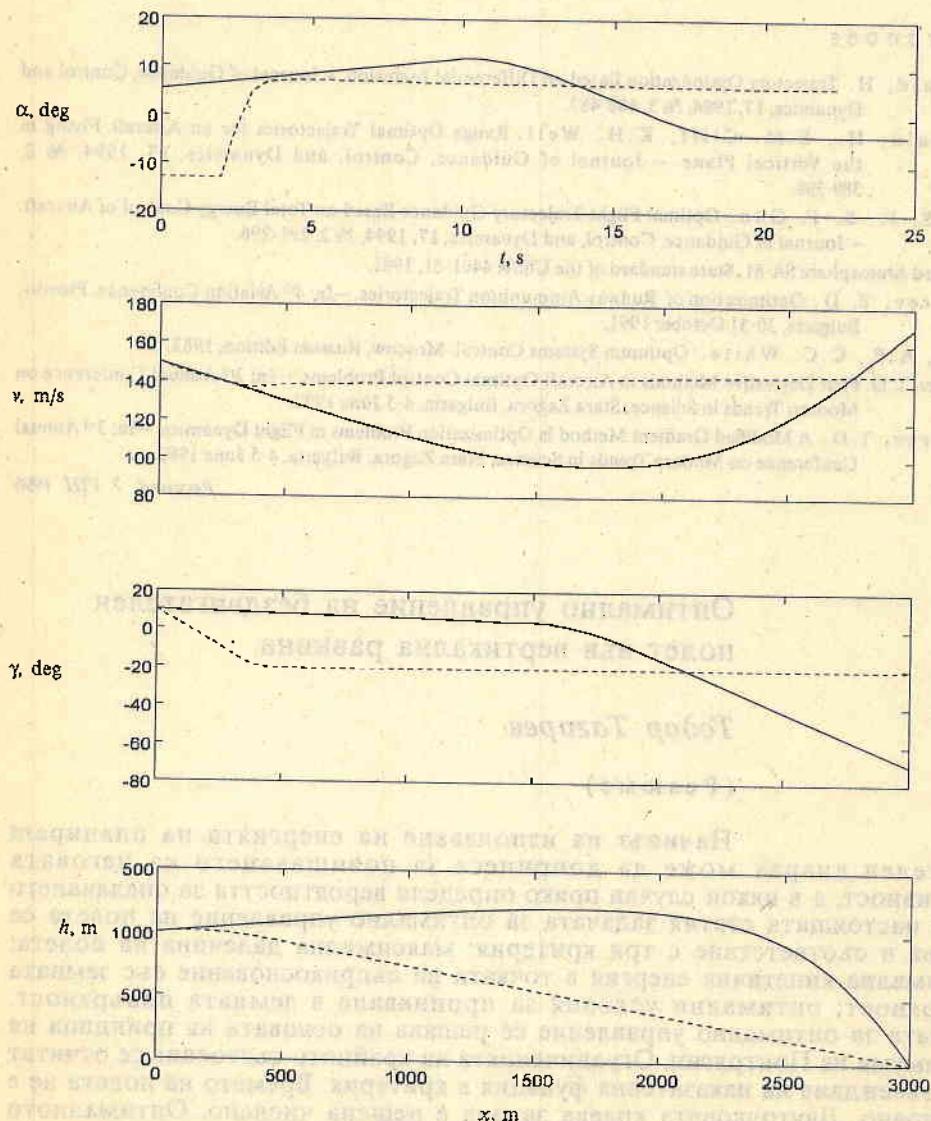


Fig.3. Control function and trajectory variables for optimal conditions for penetration at the point of impact with the Earth surface  
 —— initial approximation, —— optimal variables

The implementation of the optimal control would increase not only the aircraft effectiveness, but also the opportunities for compensation for model parameter changes and other perturbations.

In conclusion, the optimal control problem of unpowered flight in vertical plane was solved via Pontryagin's minimum principle for a class of terminal criteria and constraints. The implementation of such control would increase the aircraft effectiveness, and in some cases, i.e., a flight of an aircraft after its engines have failed, may guarantee safe landing and survival of crew and passengers.

#### References

1. Seywald, H. Trajectory Optimization Based on Differential Inclusion. – Journal of Guidance, Control and Dynamics, 17, 1994, № 3, 480-487.
2. Seywald, H., E.M. Cliff, K.H. Well. Range Optimal Trajectories for an Aircraft Flying in the Vertical Plane. – Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 17, 1994, № 2, 389-398.
3. Wu, S.-F., S.-F. Guo, Optimal Flight Trajectory Guidance Based on Total Energy Control of Aircraft. – Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 17, 1994, № 2, 291-296.
4. Standard Atmosphere SA-81. State standard of the USSR 4401-81, 1981.
5. Tagarev, T. D. Optimization of Runway Ammunition Trajectories. – In: 4<sup>th</sup> Aviation Conference, Plovdiv, Bulgaria, 30-31 October 1991.
6. Sage, A. P., C. C. White. Optimum Systems Control. Moscow, Russian Edition, 1982.
7. Tagarev, T. D. First Derivative Methods in Aircraft Optimal Control Problems. – In: 3<sup>rd</sup> Annual Conference on Modern Trends in Science, Stara Zagora, Bulgaria, 4-5 June 1992.
8. Tagarev, T. D. A Modified Gradient Method in Optimization Problems in Flight Dynamics. – In: 3<sup>rd</sup> Annual Conference on Modern Trends in Science, Stara Zagora, Bulgaria, 4-5 June 1992.

*Received 7.VIII.1996*

## Оптимално управление на бездвигателен полет във вертикална равнина

*Тодор Тагарев*

(Резюме)

Начинът на използване на енергията на планиращ летателен апарат може да допринесе за повишаването на неговата ефективност, а в някои случаи пряко определя вероятността за оцеляването му. В настоящата статия задачата за оптимално управление на полета се решава в съответствие с три критерия: максимална далечина на полета; максимална кинетична енергия в точката на съприкосновение със земната повърхност; оптимални условия за проникване в земната повърхност. Задачата за оптимално управление се решава на основата на принципа на максимума на Понтриагин. Ограниченията на крайното състояние се отчитат чрез въвеждане на наказателна функция в критерия. Времето на полета не е фиксирано. Двуточковата краева задача е решена числено. Оптималното управление на планиращия полет гарантира ефективно използване на кинетичната и потенциалната енергия на летателния апарат. Реализацията му допълнително позволява компенсиране на промени в параметрите на модела и неочетени външни смущения.

Българска академия на науките. Bulgarian Academy of Sciences  
 Аерокосмически изследвания в България. 14. Aerospace Research in Bulgaria  
 София. 1998. Sofia

## Equipment for the Greenhouse SVET'95 project and some optimisations for future experiments on board the MIR orbital complex

*Tania Ivanova, Plamen Kostov, Svetlana Sapunova,  
 Gail Bingham\*, Steven Brown\**

*Space Research Institute, Bulgarian Academy of Sciences,  
 Sofia, Bulgaria*

*\*Space Dynamics Laboratory, Utah State University,  
 Logan, USA*

### Introduction

Higher plants are a basic link in a future Biological Life Support System intended to provide space crews with food and clear the air in spacecrafts as well. SVET Space Greenhouse (SG) which is the first and the only one for the present automatic equipment for higher plant growth was designed under a Russian-Bulgarian project within the INTERCOSMOS programme and launched onboard the CRYSTAL module, docked to the MIR Orbital Complex (OC) even in June 1990. The technical and technological methods and means used in the process of development gave an opportunity to carry out the first two-month experiments with plants of radishes and Chinese cabbage.

The experiments with SVET SG were resumed in 1995 and an American Gas Exchange Measurement System (GEMS) was supplemented to the existing Bulgarian plant life support systems. A three-month experiment with wheat, named "GREENHOUSE SVET" was started on August 10, 1995 by the 19th Russian crew (Nikolai Budarin), and continued by the 20th ESA international crew up to November 9. Plant samples of different development stages and units of SVET SG were sent back to Earth by Shuttle STS-74.

A set of SVET-2 equipment (a greenhouse of new generation) was developed and launched on board the MIR OC to conduct experiments in 1996–1997. Successful earth three-month experiments with wheat were carried out with SVET-2 SG by a three-member crew within a sealed cabin in IBMP, Moscow (from 25 Oct. 1995 to 22 Jan. 1996).

Description of the equipment for  
GREENHOUSE SVET'95 project

The GREENHOUSE SVET equipment used in the 1995 experiment included the Bulgarian-Russian developed SVET SG and the new supplemented Russian-American SVET Instrumentation System (SIS) [1]. The block diagram is shown in Fig.1. The Vegetation Module (VM) full of substrate is mounted on rails in the Plant Growth Unit (PGU) of SVET. The Illumination Unit (IU) can be vertically moved and fixed at different positions. A ventilator ensures lamp cooling and air circulation within PGU. A hydro-air system (HAS) is located on the bottom of PGU. Two of the PGU walls can be removed for easy operation, and one of them is transparent. The sensors for measurement and control of the environmental parameters in PGU are mounted. The Control Unit (CU) receives and processes the data obtained by the sensors during all the vegetation cycle and automatically controls the executive mechanisms. Special microprocessor programs ensure automation of all processes and give signals if failure has occurred. Visual control and manual guidance are also possible.

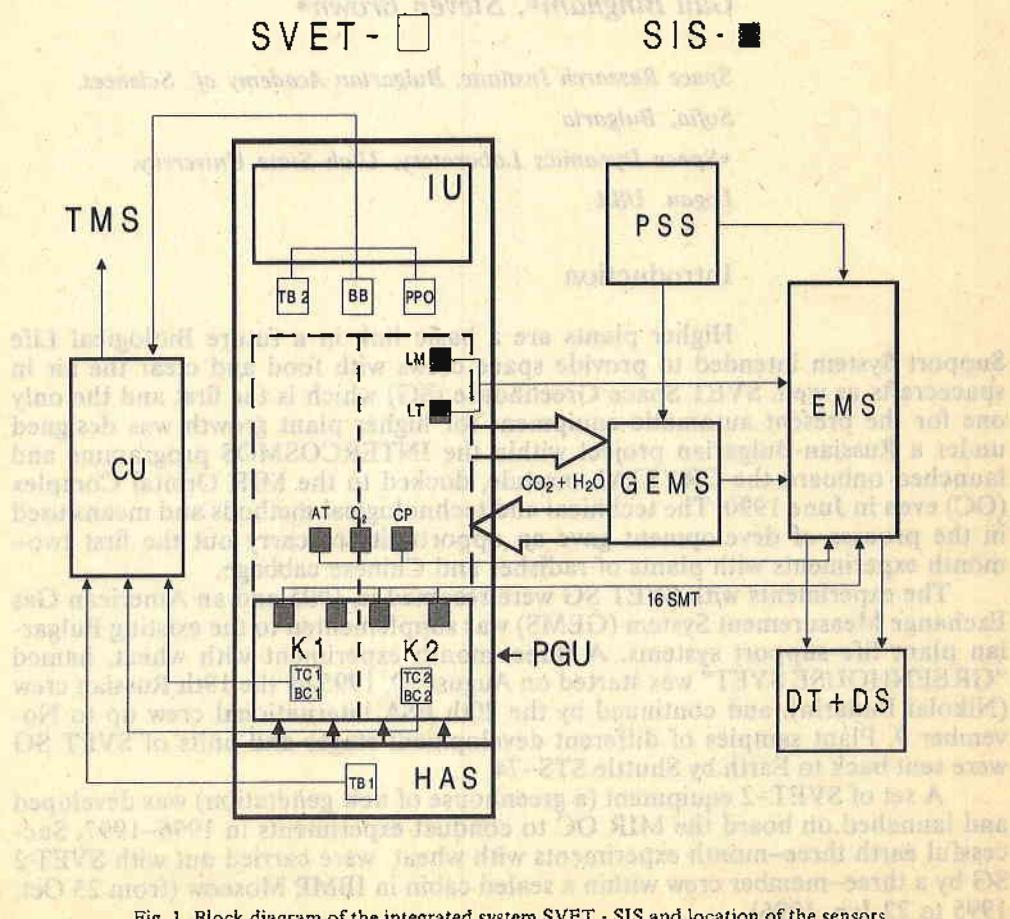


Fig. 1. Block diagram of the integrated system SVET - SIS and location of the sensors (□ at SIS)

The parameters controlled by CU are as follows:

- air temperature entering PGU-TB1;
- air temperature within PGU-TB2;
- substrate temperature in cell K1 of VM-TC1;
- substrate temperature in cell K2 of VM-TC2;
- relative air humidity within PGU-BB;
- substrate moisture in K1-BC1;
- substrate moisture in K2-BC2;
- duration of the lighting period -PPO.

The sensors measuring TB2, BB and PPO mounted on a unit fastened to IU will drop out of the GREENHOUSE SVET-2 equipment for the 1996 experiment. Only TB2 will stay (on the top of IU) to control switching off of the light in case of exceeding the admissible temperature in PGU. CU measures the parameters of the vegetation process every 4 hours and records a telemetric frame which is transmitted to Earth by the Telemetric System (TMS).

SIS encloses two separate transparent bags, called leaf chambers which cover the plants growing in each vegetation module (VM) of SVET SG. It allows local gas exchange and leaf environment measurement [2].

SIS consists of four primary modules: a gas exchange monitoring system (GEMS), an environmental monitoring system (EMS), a power supply system (PSS), and a data collection and display system (DT+DS) [3].

The gas exchange system has for an object to provide accurate measurement of absolute and differential CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O levels in the air entering and exiting the PGU as well as absolute and differential pressures in the measured gases. It is necessary to evaluate some prime indicators of plant health as photosynthesis, respiration, and transpiration.

The environmental measurement system provides the capability to measure the air and soil conditions in which plants are growing.

The leaf area measurement system is a modified version of a commercial leaf area scanner. In flight, leaves will be attached to the leaf board and scanned using a hand-held scanner.

SIS supplements SVET SG with additional sensors which will give the possibility to take more information about the air and soil conditions for growing up of the plants.

The additional variables to be measured are:

- plant air temperature (AT);
- plant light monitor (LM);
- plant leaf temperature (LT);
- soil temperature and moisture (SMT);
- cabin pressure (CP);
- cabin O<sub>2</sub>;
- cabin H<sub>2</sub>O (air humidity);
- cabin CO<sub>2</sub>.

The PGU environmental variables are measured by an instrument cluster with sensors located on the upper end of a rod in one corner of each leaf chamber.

The SVET system provides one substrate moisture sensor per module (BC1(2)) which measures and controls the substrate moisture level by means of the CU and hydrosystem. 16 additional sensors SMT (8 per module) will be supplemented by SIS to monitor the water distribution. They are designed to be integrated in the existing VM on flight.

## Equipment problems during the GREENHOUSE SVET'95 experiment and results

During the GREENHOUSE'95 experiment there were several failures of the SVET hardware sent to MIR in 1990 [4]. They were caused by problems arisen in compatibility between the Bulgarian and American equipment.

After a brief functioning period, three of the six and subsequently the forth lamp shut down. It was concluded that an overheating had occurred because of the leaf bags restricting the flow of cooling air. Later the leaf bags were removed but the Control Unit microprocessor system of SVET failed because of an overloaded power supply caused by the non-functioning lamps. It was reach a decision to pass to manual mode. 18 days later CU completely failed (the supply of 12V letting the equipment to operate in manual mode dropped off) as a result of long operation in abnormal mode. A way was devised to provide 12V from the American power supply and SVET continued its work.

Thus enough of the problems were overcome to keep the plants growing during the 90-day interval from seed planting to harvest. Plants about 8 cm tall (in consequence of the insufficient irradiance), but appearing quite healthy with a normal green colour that reached the 3-leaf stage were grown in this experiment. Unfortunately they grew in all directions but not directly towards the lamps, because SVET was lined with the American mirror Mylar so light had came from all directions.

After the experiment accomplished CU, IU and VM were returned back to Earth by Shuttle STS-74 and sent to Bulgaria to have their defect analysis made. IU was restored and sent to Russia for a synchronous earth experiment to be conducted (in conditions repeating the onboard ones). For that purpose a possibility to switch on and off different number of lamps was brought in it to imitate the situation arisen on board. The goal of this experiment was to estimate the impact of microgravity on plant growth by re-creating on Earth all the rest conditions.

As a result of the experience gained in the GREENHOUSE SVET'95 experiment a space greenhouse SVET-2 of new generation was to be developed for the planned seed-to-seed experiment in 1996 as well as some experiments on board the MIR OC in 1997.

### Some optimisations of the SVET hardware for future experiments

A new, optimised Illumination Unit within the SVET-2 equipment with considerably improved technical and biotechnical characteristics has been designed to meet the requirements of the plants.

The plants need light with determined quantity and quality. A photo-physiological inquiry shows that the plants consume energy mostly in two spectral bands—blue and red. The activity of some physiological processes depending on the effect of light of different wave length is shown in Fig. 2 (curve 1 – phototropism and curve 2 – photosynthesis). Till the experiment in 1990 fluorescent lamps LB 8-6 (12 pieces) were used. The spectral-response characteristic of IU using these kinds of lamps is shown by curve 3. It is seen that almost the whole luminous energy is concentrated in minimum sensibility zone of the plants. That considerable discrepancy between the light source and plant needs was due to the lack of special lamps (during the period of development) with appropriate characteristics and save enough for the crew in case of breaking a lamp.

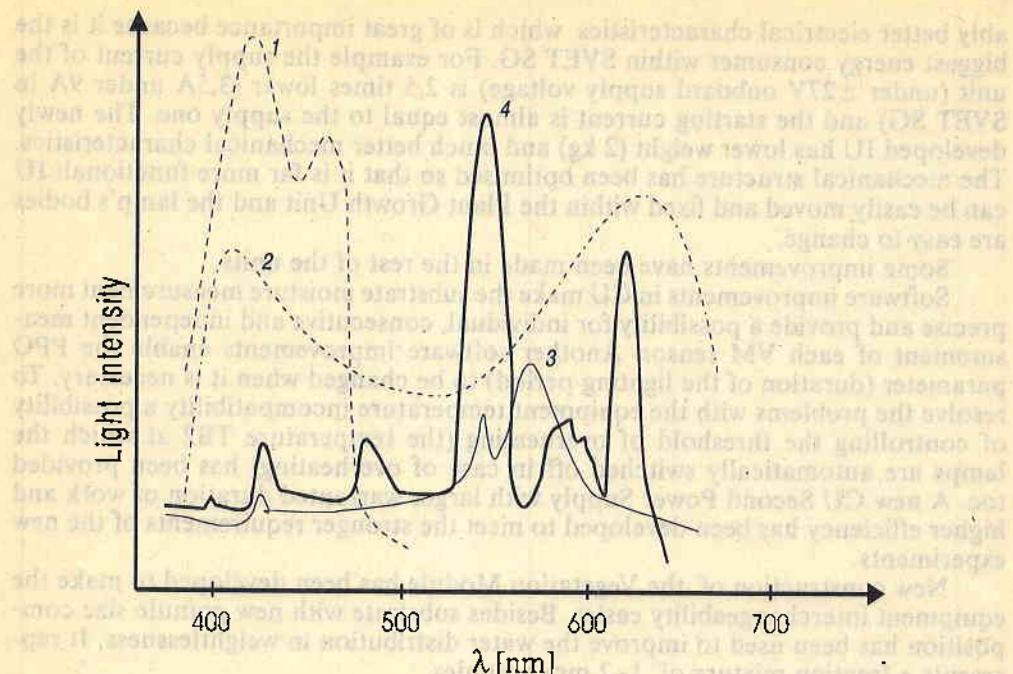


Fig. 2. Light wave length necessary for plant's: 1 – phototropism, and 2 – photosynthesis; Spectral response characteristics of the lamps used in 3 – SVET (LB 6-8) and 4 – SVET-2 (DS 11-21)

The increased supply of fluorescent lamps in the last years gave a possibility to conduct an extensive researches on the characteristics of the supplied kinds of lamps. The spectral-response characteristics of 12 kind of lamps in the band 400–600 nm have been taken with the help of the Faculty of Physics at Sofia University. For some of them the measuring range in the blue and red region respectively has been enlarged. The energy characteristics which are of particular importance when put to use the onboard power supplies have been analysed. The geometrical dimensions of IU narrow the range of the used lamps too. The fluorescent lamp DS 11/21 of OSRAM (6 pieces) as a most suitable for our aim was chosen. At that the lamp spectrum is suitable for intensive photosynthesis as well as for providing phototropism of the plants, so important in conditions of a space flight (curve 4 of Fig. 2).

In connection with building of lamp's bodies two more important investigations have been conducted – on a white reflecting paint, made to order, suiting very special requirements, and on a transparency coefficient of the plexiglass for proofing the separate illuminants. As a result of the investigations considerably (2,5 times) improved brightness characteristics of IU have been received – at a distance of 15 cm from the illuminants the intensity is 27 000 lx (under 12 000 lx in SVET SG in 1990). In the circumstance we can expect considerable increase of the plant productivity (quantity of biomass) in the future experiments.

The larger warranted duration of work of the lamps DS 11/21 (8000 hours) ensure 5 times better reliability of the equipment. Besides the new IU has consider-

ably better electrical characteristics which is of great importance because it is the biggest energy consumer within SVET SG. For example the supply current of the unit (under  $\pm 27V$  onboard supply voltage) is 2,5 times lower (3,5A under 9A in SVET SG) and the starting current is almost equal to the supply one. The newly developed IU has lower weight (2 kg) and much better mechanical characteristics. The mechanical structure has been optimised so that it is far more functional: IU can be easily moved and fixed within the Plant Growth Unit and the lamp's bodies are easy to change.

Some improvements have been made in the rest of the units.

Software improvements in CU make the substrate moisture measurement more precise and provide a possibility for individual, consecutive and independent measurement of each VM sensor. Another software improvements enable the PPO parameter (duration of the lighting period) to be changed when it is necessary. To resolve the problems with the equipment temperature incompatibility a possibility of controlling the threshold of overheating (the temperature TB2 at which the lamps are automatically switched off in case of overheating) has been provided too. A new CU Second Power Supply with larger warranted duration of work and higher efficiency has been developed to meet the stronger requirements of the new experiments.

New construction of the Vegetation Module has been developed to make the equipment interchangeability easier. Besides substrate with new granule size composition has been used to improve the water distribution in weightlessness. It represents a fraction mixture of 1–2 mm granules.

Secondary Pump Power Supply with higher efficiency and higher starting current has been upgraded to replace the SPPS unit standing on MIR within PGU.

### Conclusion

The new developed upgraded units (IU, CU, VM and Secondary Pump Power Supply – SPPS) were produced, sent to Moscow in January 1996 and launched on board the MIR OC (VM on Shuttle in March and all the rest on the Progress module in April '96). New fundamental biological research for growing a crop of wheat "from seed to seed" during the six-month flight (from July to December 1996) of an American astronaut will be carried out with this equipment. Three new experiments with plants that have a shorter vegetation cycle (peas for example) have been planned for 1997. Perfect results have been obtained in preliminary earth experiments with vegetable plants (onions, peas, lettuces and dill) carried out on the space greenhouse of new generation SVET-2 in the Space Research Institute, Sofia.

All the 1996–1997 experiments will be conducted on the program MIR–NASA and financed by NASA. To provide the equipment for these experiments bilateral agreements between Bulgaria, Russia and USA have been concluded. Thereby another step towards creating a steady onboard Biological Life Support System for the future long-term manned space missions (initially to Mars) has been made.

### References

- I. Ivanova, T., P. Kostov, S. Sapunova. Renewing of the Greenhouse SVET Biotechnological Experiment Onboard the MIR Space Complex. – In: 46th Intern. Astronautical Congress, Oslo, Norway, 2–6 Oct. 1995, Rep. IAF/IAA-95-G. 4. 01.

2. Bingham, G., F. Salisbury, W. Campbell, J. Garman et al. The Spacelab Mir-1 "Greenhouse" experiment. – In: Proc. 30th Meet. COSPAR, Hamburg, Germany, 1994.
3. Bingham, G., S. Brown, D. Jones. Svet Instrumentation System Critical Design Review, SDL/94-001. Space Dynamics Laboratory, USU, Logan, Utah, 1994.
4. Salisbury, F., G. Bingham et al. Growing Super-Dwarf Wheat on the Russian Space Station Mir (Project "Greenhouse"). – In: Space Res. in Bulg., 14, 1997.

*Received 17. VII. 1996*

**Апаратура за проекта "ОРАНЖЕРИЯ СВЕТ"  
през 1995 г. и някои оптимизации за бъдещи  
експерименти на борда на орбитална станция МИР**

**Таня Иванова, Пламен Костов,  
Светлана Сапунова, Гейл Бингхам,  
Стивън Браун**

(Резюме)

В статията е описана апаратурната част на експеримента, проведен от 10 август до 9 ноември 1995 г. на борда на орбиталния комплекс (OK) МИР по проект "ОРАНЖЕРИЯ СВЕТ". Разгледани са някои проблеми, възникнали в хода на експеримента, както и научните резултати от него – база на предстоящите експерименти с пшеница "от семе до семе" и с други растения на борда на OK МИР по програма МИР–НАСА през 1996–1997. Описани са оптимизацията, въведени в хардуера на оранжерия СВЕТ–2 – оранжерия от нова генерация, разработена за провеждането на новите експерименти.

## Growing super-dwarf wheat on the Russian space station Mir (Project "Greenhouse")

*Frank B. Salisbury<sup>a</sup>, Gail E Bingham<sup>b</sup>,  
 William F. Campbell<sup>a</sup>, John G. Carman<sup>a</sup>,  
 Steven Brown<sup>b</sup>, Linda Gillespie<sup>a</sup>, Pam Hole<sup>a</sup>,  
 Vladimir N. Sytchev<sup>c</sup>, Igor B. Podolsky<sup>c</sup>,  
 Margarita Levinskikh<sup>c</sup>, David Bubenheim<sup>d</sup>,  
 Boris Yendler<sup>e</sup>*

<sup>a</sup> Utah State University, Department of Plants,  
 Soils & Biometeorology, Logan, Utah 84322-4820

<sup>b</sup> Utah State University, Space Dynamics Laboratory,  
 1695 North Research Park Way, North Logan, Utah 84341

<sup>c</sup> Institute of Biomedical Problems,  
 123007 Khoroshevskoe sh., 76a, Moscow, Russia

<sup>d</sup> Mail Stop 239-15

<sup>e</sup> Code SLX, Mail Stop 239-23, NASA Ames Research Center,  
 Moffett Field, California 94035

### Introduction

There are two primary reasons to grow plants in an orbiting satellite: 1) To study basic gravitational biology; that is, to study possible plant responses to the near absence of accelerational forces (usually called microgravity - although accelerational forces are closer to microgravity). 2) To achieve maximum yields of edible plant products for future use in a bioregenerative life support system (a Controlled Ecological Life Support System - CELSS). In America and Western Europe, most space research with plants has been motivated by basic

gravitational biology although the work is often justified with reference to a CELSS application. In the former Soviet Union and apparently also in Bulgaria, studies with plants in space have been more strongly motivated by the CELSS challenge than by that of fundamental biology.

Although abnormal affects have been noted in short-duration plant experiments in space (downward bending of leaf petioles and blades called *epinasty*, spindly growth, chromosome aberrations, etc.), many plants have appeared to grow quite normally during short duration experiments on the U.S. Shuttle and on Soviet or Russian space craft although detailed studies often discover subtle abnormalities. This seems to be especially true for seedlings that have obtained most of their nutrients (energy, minerals) from the seed.

On the other hand long-duration plant experiments in space, carried out only by Soviet, Russian, and Bulgarian investigators, have never produced completely normal plants that have grown through a complete life cycle. *Arabidopsis* did grow through a life cycle (i.e., "from seed-to-seed"), but growth was quite retarded and generally poor [1]. The plants were grown in a *Phyton Three* device in *Salyut Seven* in 1982 for 69 days from sowing to return to earth. Plants were under continuous light. Upon return to earth, 5 plants produced 22 normal pods, and 2 plants produced 11 sterile pods. There were about 200 seeds, half of them immature. Forty-two percent germinated to produce normal plants. The good news is that the life cycle was indeed completed (we might say there were no "show stoppers"). The bad news is that plant growth was considerably less vigorous and, healthy than was achieved with ground controls in the same plant-growth devices.

Several studies were carried out with wheat in various devices in *Mir* [2,3]. Again, plants were far less vigorous than comparable plants on earth. Chlorophylls were reduced producing chlorosis, carotenoid levels also declined, and there were various mineral imbalances: phosphorus increased, calcium decreased, and other minerals changed. Total lipids decreased, and fatty-acid ratios changed. Super-Dwarf wheat was grown in *Svetoblock-M* in *Mir* for 167 days during 1991 [2]. Growth ceased at about day 40 but began again after 90–100 days, producing new shoots. Three heads, each surrounded by a leaf (i.e., in the "boot"), developed from 100–132 days but matured on earth under somewhat higher light. Twenty eight seeds were produced, and 8 out of 12 given to us germinated normally in Utah.

In 1990, radish and cabbage were grown in the Bulgarian-Russian growth chamber *Svet* [4,5]. Plants were grown for 54 days. Again, although plants grew during the 54-day period, many abnormalities were observed. For example the radishes produced 2.6 g of dry mass in space and 21.6 g of dry mass on earth; Chinese cabbage produced 2.65 g in space and 35.80 g on earth.

Is the poor growth observed in the long-term space experiment a direct plant response to microgravity? We cannot conclude that this is the case because space plants were usually exposed to stresses that were not always duplicated in the ground controls. For example  $\text{CO}_2$  levels in *Mir* are much higher than those in most of the control studies, and they fluctuated over a wide range. Plants are known to be highly sensitive to  $\text{CO}_2$  levels [6]. Temperatures have fluctuated in the *Svet* experiment reaching  $37^\circ\text{C}$  at one point, for example (Tania Ivanova, personal communication). The substrate conditions are especially critical because they cannot be duplicated on earth. The drainage caused by gravity creates a totally different substrate environment from that in space [7]. Lack of drainage in space could lead to water logging or even to regions of dry substrate if capillary forces are not sufficient to bring water to such regions.

### Goals of our experiment

Two approaches must be taken to solve the problem of environmental stresses in space experiments: First, the environmental conditions and the stresses\* and strains that they produce must be carefully documented. Irradiance levels are typically low and may or may not be the same as those used in ground controls. Although many environmental measurements have been made, the desirable level of documentation has never been achieved. Second, available technology should be applied to reduce the levels of stress as much as possible.

With these ideas in mind, our current experiment on Mir has the following goals:

1. To grow Super-Dwarf wheat through a complete life cycle in the Russian-Bulgarian plant growth chamber Svet in the Krystal module of Mir. As noted above in relation to *Arabidopsis*, it has long been a goal of space biologists to grow a plant through a complete life cycle in microgravity. Our current experiment did not achieve this goal, but we will strive to achieve it during 1996 (see below).
2. To document the environmental parameters that might impact plant growth (in addition to microgravity): CO<sub>2</sub> concentrations (potentially allowing measurement of photosynthesis and respiration), water vapor (allowing measurement of transpiration), irradiance levels, leaf (infrared) and air temperatures, oxygen, total cabin pressures, and substrate moisture conditions (16 moisture probes in the root module).
3. To collect various samples and photographs for analysis on the ground. This goal should allow us to document the strains experienced in response to whatever stresses are measured.
4. To improve conditions for plant growth as much as possible. Paramount in this goal is to utilize the 16 moisture probes to maintain ideal moisture levels in the root module. We have also added Mylar (mirror) reflectors to the walls of Svet to increase irradiance levels. In general, however, future effort will be required to further improve conditions for plant growth, specifically the high levels of CO<sub>2</sub> and the relatively low irradiance.

### Hardware for "Project Greenhouse"

Svet was designed jointly by scientists at the Institute of Biomedical Problems in Moscow and the Bulgarian Academy of Sciences, Space Research Institute. There is about 0.1 m<sup>2</sup> of plant growing area. A modified computer controls the photoperiod and the automatic watering system. Air circulates to cool the lamps and to hold temperatures close to those in the cabin. An improved version of Svet was developed and delivered in 1995. In addition to many technological improvements, it allows a wider range of photoperiods and has about twice as much irradiance as the original version of Svet.

Under the direction of Cail Bingham in the Space Dynamics Laboratory at Utah State University, an environmental data system has been developed. This

---

\* Stress can be defined as any environmental parameter that limits plant growth below its genetic potential (or less rigorously, below the yield and quality levels observed under "normal" conditions on earth). By analogy to physical science, the actual reduction in yields or other measured plant parameters may be referred to as strain.

has involved the major part of the U.S. budget and human effort. The biggest challenge was to develop infrared CO<sub>2</sub> analyzers that could measure CO<sub>2</sub> levels up to 2 % with an accuracy of  $\pm 0.035\%$ . To measure photosynthesis, plants are enclosed in a transparent plastic bag (actually two cuvettes, each one above half of the root module, which is also divided into two compartments). CO<sub>2</sub> and humidity levels of air entering and exiting each cuvette are measured. This requires four infrared analyzers. Because removal of humidity was not feasible in this project, the CO<sub>2</sub> measurement had to be carried out with an open system rather than closed cuvettes in which the humidity would increase to high levels, producing condensate on many surfaces. Such an open system to measure photosynthesis requires a much higher level of accuracy than would be the case in a closed system in which the plants could be allowed to draw down the CO<sub>2</sub> as it was being measured. The necessary levels of accuracy were achieved.

In addition to the infrared sensors for CO<sub>2</sub>, and water vapor, the environmental data system includes sensors for leaf (infrared) and air temperatures, irradiance, pressure, oxygen, and substrate moisture (16 probes based on thermal conductivity). Leaf area must be estimated to provide photosynthesis, respiration, and transpiration readings, and this was to be achieved by leaf scanners when plants were sampled and by estimates based on photographs. All of this instrumentation was flight qualified and is presently installed on Svet in Mir and on ground control versions of Svet. (The leaf scanners were not used by the cosmonauts in the 1995 experiment; for the 1996 experiment, we are considering measurements of samples after they are returned to earth.)

Much attention has been given to the root module because of the difficulties mentioned above in achieving ideal moisture, nutrient, and oxygen levels in the substrate for plant growth in microgravity. In the current experiment, changes were made in the root module compared with its status in the 1990 experiment. Hydraulic conductivity was improved by using substrate particles of smaller average diameter and by more dense packing to assure firm particle-to-particle contact. The substrate is a zeolite called Balkanine. It was precharged by Bulgarian scientists with the nutrient elements required for ideal plant growth, and indeed such plant growth has been achieved with Balkanine in many earth-based experiments. To improve our understanding of water and oxygen availability to roots, a mathematical model of water movement based on concepts of soil physics and thermodynamics (free energy) was developed by a graduate student, Scott Jones, working with a soil physicist, Dani Or, at Utah State University.

Table 1 shows the schedule for "Project Greenhouse". The equipment was delivered to Mir during June and July of 1995, and an experiment was carried out on Mir-19 and Mir-20 from August to November 1995. The goal of this first experiment was to test the hardware and to obtain plant data that will be compared not only with data obtained in ground experiments but also with data obtained during the 1996 experiment. That experiment will be carried out between March and December as indicated in Table 1. It also involves an attempt to grow plants through a complete life cycle with environmental measurement and sampling. In addition, a second crop of plants will be harvested when they are approximately 35 d old and returned to earth at liquid nitrogen temperature in the GN<sub>2</sub> freezer. These plants will be analyzed for various chemical parameters including a suite of plant hormones that are known to be extremely sensitive to environmental stresses.

Table 1

Schedule for "Project Greenhouse"

| Mission           | Date                         | Objective  |
|-------------------|------------------------------|--|
| Spektr            | Docked with Mir June 1, 1995 | Equipment delivered  |
| STS-71            | July 7, 1995                 | Delivered root module and seeds  |
| Mir 19 and Mir 20 | August to November, 1995     | Experiment "Greenhouse 2a" a proof-of-concept experiment to test the hardware, obtain plant data   |
| STS-74            | November, 1995               | Return of root module and plant samples  |
| STS-76            | March 21, 1996               | Launch: root module, fixation kit, logbook kit   |
| Priroda Module    | April, 1996                  | Launch new light block, controller, and spare parts  |
| NASA-3            | July to December, 1996       | Seed-to-seed experiment; second planting (35 d)  |
| STS-79            | August 1, 1996               | Launch hard disc №2  |
| STS-81            | December 5, 1996             | Recover samples from seed-to-seed experiment plus the second planting (35-day-old plants frozen in GN <sub>2</sub> , freezer for subsequent chemical analysis) |

The experiment involved four kinds of procedures carried out in space:

1. **Recording of environmental data.** This was discussed above. As noted, the parameters included soil moisture status (16 probes plus two sensors that are part of the Bulgarian root module), leaf (infrared) and air temperatures, irradiance (two sensors placed below the lights and near the top of the leaf cuvettes), carbon dioxide and oxygen concentrations, water vapor concentration, and cabin pressure.

2. **Photography.** A camera bracket was designed to be attached to Svet in such a way that nine photographs could be taken at each photography session. Three photographs were to be taken at each of three positions: looking directly into the unit at a low level, a higher level, and the same higher level but with the camera tipped toward the substrate by a few degrees. At each position, a photograph was to be taken from a center position, from the left of center, and from the right of center. These were to provide stereo views of the growing plants that might help in estimating leaf areas. Unfortunately, the camera bracket was misplaced before the experiment began. It was located only after the experiment was complete.

3. **Plant samples.** Samples were to be (and will be in 1996) taken according to the schedule shown in Table 2. Although the stages did not occur as hoped (see discussion below), plants were sampled five times. Each time, some plants were fixed in chemical fixative for subsequent anatomical analysis on earth, and some

plants (first two stages) or excess materials were placed into desiccant bags where they were dried; dried plant material can be analyzed for such parameters as mineral element content, cellulose, and lignin. At the time the samples were taken, plants were to be placed on a leaf scanner that measures leaf area. This would allow us to document growth rate and would also provide areas necessary in the expression of photosynthetic and respiratory data. As noted this procedure was not carried out in 1995; we are working on ways to measure leaf areas of the returned fixed samples.

**4. Final harvest.** In the seed-to-seed experiments, the goal was to harvest mature plants with viable seeds. These plants were to be placed in desiccant bags for final drying and to prevent growth of fungi. Because mature plants are dry anyway, it is not necessary, to use chemical fixatives. There were no seeds or even sterile heads produced in the 1995 experiment (see discussion below), but the available plants were placed in the desiccant bags as planned. (Some fungal growth was detected on one of the young plants in a desiccant bag; apparently the sides of the bag had been pressed together so that water vapor could not move from the plant to the desiccant.) In the case, of 35-day old plants (1996 experiment), fresh plants will be placed in the GN<sub>2</sub>, freezer and returned to earth. Excess material if there is any, will be placed in desiccant bags.

As shown in Table 2, plants in the seed-to-seed experiment are to be sampled at five stages. In a workshop with American and Russian participants in September, 1995, it was agreed that our original schedule should be changed slightly. Of great interest to plant anatomists and cytologists are the events that occur during gametogenesis (formation of pollen and the embryo sac) as well as the growth of the pollen tube and fertilization, which is the combining of the sperm nuclei from the pollen tube with the egg and the endosperm nuclei. We realized, on the other hand, that seed filling is a relatively less interesting stage in the plant's life cycle, albeit an important stage in the production of the final seeds. Thus it was decided to take the last three samples during the period of gametogenesis to fertilization, hoping to catch some of these events in progress.

Table 2

*Sampling schedule for the seed-to-seed experiments*

| Original sampling schedule                             | Modified sampling schedule<br>(As of September 12, 1995 in Moscow) |
|--|--|
| Prefloral: 6-day-old seedlings                         | Prefloral: 6-day-old seedlings                                     |
| Early floral: 13-day-old, young plants                 | Early floral: 13-day-old, young plants                             |
| Boot stage: ca. 30-day-old plants<br>(crew determines) | Boot stage: ca. 30-day-old plants<br>(crew determines)             |
| Anthesis: ca. 45-day-old plants                        | Gametogenesis/Anthesis:<br>ca. 42-day-old plants                   |
| Seed Filling: ca. 60-day-old plants                    | Pollination/Fertilization:<br>ca. 49-day-old plants                |

## The 1995 Experiment (Mir 19-20)

As this manuscript is being prepared, "Project Greenhouse, 1995" has just been completed. To summarize, there were several failures of the Svet hardware sent to Mir in 1990, but enough of the problems were overcome to keep the plants growing during the 90-day interval from seed planting to harvest. No heads were formed, however, so sampling times were arbitrary and not based on visible, developmental stages. The following outlines the experiment as events were reported to us (or as we participated):

### Events during Greenhouse 2

1. August 7. Cosmonauts initiate installation of the Utah equipment for "Greenhouse 2." We planned a daily transfer of data to earth via MIPS (Mir Interface to Payload Systems), but the MIPS system was tested and failed.
2. August 8. The setup for Svet and the Gas Exchange Measurement System (GEMS) was completed.
3. August 9. Svet and GEMS were provided with power.
4. August 10. "Program 1" was run to test the Svet hardware.
5. August 11. Cosmonaut Nikolai Budarin, who was assigned to our project, initiated "Program 2" on the Svet controller; this program adds water to the root module. The moisture sensors reported that cuvette №1 received too little water; cuvette №2 received more but only about half of the desired amount.
6. August 13. (Aug. 13 is assumed to be day zero.) Program 2 had been initiated again, providing sufficient water to cuvette №1 but too much to cuvette water to cuvette №2. *Seeds were planted.*
7. August 14 (day 1). The lights were turned on ("Program 3"), and three of the six lamps in the light unit, specifically those over cuvette №1, shut down after a brief functioning period. These lamps remained off, and a forth lamp also failed although we are not sure exactly when this occurred. Continued tests of the MIPS system failed.
8. August 15 (day 2). The Balkanine was still too wet in cuvette №2 although cuvette №1 had about the right amount of water. The excess water in cuvette №2 may have inhibited germination. It was concluded that the leaf bags (properly called cuvettes, but this term has also been applied to the two compartments that make up the root module) were restricting the flow of cooling air by the lamps and probably caused the malfunctioning of half of the lamps. Thus the leaf bags were removed, and the GEMS was hooked up to run in looped-back mode. It provided analytical data of CO<sub>2</sub> levels in the Krysal module, but photosynthesis measurements were not possible for this experiment (Modified bags have been designed and constructed to allow more airflow past the lamps. They will be sent to Mir for the 1996 experiment.) It is not clear, however, that the lamp failure was caused by restricted air flow caused by the leaf bags. Temperature data indicate that the lamps overheated twice after the leaf bags were removed (ca. days 6 and 40). This apparently occurred because the fan that was supposed to cool the lamps when off and had to be restarted by the cosmonauts. In any case, plants were subjected to high temperatures (at least 45°C) twice during their growth cycle, and this may have had profound effects on the course of their development.
9. August 16 (day 3). The Sver automatic controller failed because of an overloaded power supply caused by the non-functioning lamps. Hence, the system had to be operated in manual mode (i.e., lamps and the water supply system had to be turned on and off by the cosmonauts). The lamps over cuvette №1 were confirmed dead.
10. August 17 (day 4). Germinating seedlings were about 1 cm tall. The Svet controller still failed to function, and lights were turned off when the cosmonaut retired and on again upon arising. Thus plants received about 16 h of light and 8 h of darkness each day – a photoperiod too short to promote rapid development of flowers and seed heads. (Lights were left on over night five times: ca. days 51, 64, 76, 82 and 89.) Plants were watered for about 5 s in the morning; the root modules were very wet. The GEMS moisture sensors were used to determine the daily water doses. Data from the computer screen were radioed orally to earth. These data indicated that all sensors were functional and properly installed. Actually, the equipment had not been properly grounded, and this led to erroneous data, noted in the next entry.
11. August 18 (day 5). Cuvette №1 had 36 healthy plants (reduced-light side); cuvette №1 had 10 plants, and a fungal growth was noted on the wicks (determined to be harmless). (The seed strips sent to Mir had 26 seed; thus, each cuvette had 52 seeds for a total of 104 seeds in Svet.) The light sensors suggested that light levels, in spite of the lamp failures, were higher than in the ground studies. It now appears that the overheating that caused the lamps to fail also upset the irradiance sensors because the controller was not electrically grounded. When a ground was hooked up (ca. day 36), irradiance was seen to be very low. (There is a possibility that lamps function more efficiently in microgravity because of the lack of internal convection, but such an effect was not sufficient to provide ample light in this experiment.) The relative humidity in the core module of Mir was about 65 % and about 50 % in the Krysal module where Svet is

located. Temperature increased to about 28°C because of an oven experiment located next to Svet (23°C is ideal for wheat). The cosmonauts reported that the camera bracket we had specially designed and constructed to take stereo photographs was lost somewhere on Mir. It was subsequently located but too late to take the desired pictures.

12. August 21 (day 8). The root modules were both drying out. There was a question about whether seeds should be replanted in cuvette №2; the decision was delayed pending more information.

13. August 22 (day 9). More seeds germinated mostly in cuvette №2 as the over-wet substrate dried out. The irradiance sensors reported 450  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  in cuvette №1 and 650  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  in cuvette №2; this made us very optimistic until the sensor malfunction was finally deduced. Because corrections must still be made to the recorded data, exact figures for irradiance at the plant level are not available; irradiance was probably about 100  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  or less. In ground tests, irradiance levels were 250  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , which was sufficient but not as high as might be desired. Photographs were taken but unfortunately without the camera bracket.

14. August 24 (day 11). There were 40 plants in cuvette №1 (20/row) and 17 plants in cuvette №2 (row 1 = 6; row 2 = 11). The plants in cuvette №2 that germinated later than those in cuvette №1 seemed to be catching up. This is probably because they were receiving somewhat more light. The decision was made not to replant seeds in cuvette №2.

15. August 26 (day 13). Plants were about 8 cm tall and appeared quite healthy. They had reached the 3-leaf stage. Six plants were placed in chemical fixative and three were placed into desiccant bags (first sampling). This stage was to have been the prefloral stage, but 13-day old plants usually have passed that stage.

16. August 31 (day 18). Four plants were fixed and three dried at the 3 or 4-leaf stage (second sampling). This was to be the early floral stage, but only examination of samples will tell us if the plants had initiated floral primordia.

17. September 3 (day 21). The Svet controller completely failed so that it became impossible to turn on the lights or to add water to the substrate. This led to a frantic weekend in which Bingham at the Space Dynamics Laboratory communicated with Ivanova in Bulgaria and with our Russian coinvestigators. The problem was finally diagnosed as low voltage (9 V) from the power supply. A way was devised to provide 12 V from the Utah power supply by connecting the appropriate plugs with paper clips. After 33 h of darkness, the lights were back on, everything was working, and the plants were growing. A video recording was telemetered to earth, but reception was poor. Nevertheless, it was possible to see that the plants did indeed appear healthy.

18. September 6 or 7 (day 24 or 25). Soyuz docked with Mir, and Yuri Gazonko replacing Budarin.

19. September 11 or 12 (day 29 or 30). Budarin returned the hard disc from the notebook controller, allowing us to examine complete environmental data for the first month of the experiment (data that should have been sent to earth via MIPS).

20. September 16 (day 34). Four plants were fixed and two dried. At this age, plants would normally have been in the boot stage (third sampling).

21. September 18 (day 36). A video was taken showing the equipment and the plants, which appeared to be a normal green color (although color balance of the lights makes this somewhat uncertain). The plants were growing in all directions, more like crab grass than wheat! Of course they did not have the directional force of gravity to orient them; apparently they did not grow directly toward the lamps because Svet was lined with mirror Mylar so light came from essentially all directions (as we had planned with our Russian colleagues to increase the light the plants received).

22. October 5 (day 53). The stems and flag leaves (attached to the head, if a head had formed) of six plants were chemically fixed and the remaining leaves were placed in desiccant bags (fourth sampling). This was to be the gametogenesis stage if plants had developed as they do on earth, but as noted, heads failed to form.

23. October 21 (day 69). Another video was taken, again showing a fairly good green color of the plants.

24. October 25 (day 73). Six stems and flag leaves were fixed and excess material dried at what would have been the pollination/fertilization stage (fifth sampling).

25. November 8 (day 87). The experiment was terminated, and plants were harvested into drying bags. No heads were visible to the cosmonauts.

26. November 12. The U.S. Shuttle Atlantis, STS-74, was launched to dock with Mir. During subsequent days, samples and equipment (root module, lamp bank, controller) were transferred to STS-74.

27. November 20. Samples were returned to earth at Kennedy Space Center and divided among U.S. and Russian investigators.

28. November 27 to December 1, 1995. A science meeting was held at the NASA Ames Research Center, Moffett Field, California, to discuss the 1995 experiment and to plan ground and space studies for 1996. Attending the meeting were the following U.S. and Russian investigators: Salisbury, Bingham, Carman, Campbell, Walkyria Goncalves (graduate student), Sytchev, Levinskikh, and Podolskiy (Chernova and Ivanova were present at Kennedy Space Center). Personnel from Ames included Bubenheim, Yendler, Greenawalt, Jahns, Lagel, Patterson, Pletcher, Savage, Schnepp, and Tverskaya (interpreter).

### Synchronized ground control and post-flight experiment procedures

After the hard discs from the controlling notebook computer were returned to earth, it became possible to work up detailed sets of data on the environmental parameters that were recorded. This has been accomplished to a large extent. We have documented when the lights were actually functioning, levels of moisture in the root module, air and plant (infrared) temperatures, and other factors. These data make it possible to establish a synchronized ground control in which temperatures, CO<sub>2</sub> levels, light, etc. are duplicated. Such a control was discussed in some detail among U.S. and Russian investigators at the meeting at the NASA Ames Research Center following return of the samples and data. The synchronized ground control will be carried out in Moscow and a similar study will be done at NASA Ames under the direction of Bubenheim, who will not have a copy of Svet to use but who has capabilities to control pressure and gas composition somewhat more accurately than will be possible in Moscow.

When the root module was returned to earth, it was examined by several team members (Yendler, Bingham, Podoisky, Levinskikh, Ivanova, Chernova, Salisbury Bubenheim, and Campbell). The goal was to examine distribution of water and the presence of microorganisms. The Balkanine in cuvette №2 was wet enough (about 21 to 27 % of dry mass) that water might have been redistributed during the accelerational forces of landing and while standing before delivery to us; bottom layers were wetter than upper layers, suggesting that this was the case. The Balkanine in cuvette №1 appeared only slightly wet; moisture content varied from about 17 to 19 % of the dry mass. (Note the rather narrow range of wetness from "slightly wet" to "very wet" appearance; this range roughly represents most of the water that is available to plants.) Analysis of the data from the soil-moisture probes (recorded on the hard discs) indicated that there was a sharp range in moisture content, with the Balkanine close to the wicks where the seeds were planted being very wet, essentially at full saturation, whereas the Balkanine some distance away was fairly dry. This was not apparent in the module returned to earth, but there was much time (about two weeks) for water to be redistributed after the final watering.

Some chemical analysis will be carried out to study the available nutrients and other soil characteristics of the Balkanine. Procedures have been discussed at length, but budgetary considerations may limit how much can be done.

Fixed and dried samples were distributed to U.S. and Russian investigators for microscopic analysis. Some of the dried material will be examined for nutrient elements, cellulose, lignin, etc. These analyses will be carried out in Russia, Utah and NASA Ames Research Center. The frozen material, to be returned in late 1996, will be analyzed for plant hormones (abscisic acid, indoleacetic acid, several cytokinins), free amino acids, and other chemicals. Although at the time of this writing the samples have not been examined anatomically or biochemically as planned, a striking initial observation was that there were no visible heads although the plants remained alive in the low light conditions for 90 days until the final harvest. Under such low light conditions on earth, plants have always formed heads even though there were often no seeds in the heads. We plan to study at least three factors that could have led to the continued vegetative state in Mir: (1) Our ground studies under low light have always had continuous light, and it is known that long photoperiods strongly promote flowering in wheat, including Super-dwarf. (2) Brief treatment with high temperature. Such temperatures (45°C or higher) occurred twice the first time when the plants were only seedlings; such temperatures could have destroyed the flowering process. (3) Water logged substrate. Lack

of oxygen around the roots can lead to ethylene production, and ethylene inhibits flowering in many species. As noted above, de Balkanine was super-saturated much of the time, especially where the roots were located.

### Experiment verification test

An experiment verification test was carried out at the Institute of Biomedical Problems from February 21 to May 24, 1995. The Bulgarian Svet was used with the lights and controls comparable to those expected to be used in the 1990 experiment (but, because of equipment failures, not comparable to those in the 1995 experiment). The substrate was Balkanine, and the full Utah instrumentation was attached. All scheduled samples and photographs were taken. For the first time in six or seven similar but somewhat less elaborate trials, plants were healthy all the way to harvests. It was felt that the soil-moisture probes made it possible to maintain a near ideal substrate moisture level. Samples and photographs are not being analyzed. The Utah instrumentation functioned well except that there was too much CO<sub>2</sub> enrichment noise to allow accurate measurement of photosynthesis and respiration. Ways were devised to overcome some of these limitations, and rough photosynthesis measurements were obtained. In a somewhat more stable environment, continuous photosynthesis measurements should be possible as had been previously planned.

Seven kits were tested in the experiment verification test, and some modifications were suggested. These kits were and will be used on Mir to carry out "Project Greenhouse". The kits are: fixative, harvest, leaf-area-measurement, glove bag, dry stowage, log book, and observation (photography). (As noted, the leaf-area-measurement may be dropped if we can obtain reliable measurements on fixed plants.)

### Some ground-based research

Many studies that cannot be described here have been carried out in Moscow, Utah State University, and NASA Ames Research Center as preparation for interpretation of results obtained from the flight experiments [8-10]. For example, at Utah State University six, foam-board Svet mockups are located in each of two temperature-controlled rooms. Various substrates have been used in these studies including zeolite, perlite/peatmos (ca 80/20 %), and in the near future hydroponics. Each mockup has two plastic bags (cuvettes) as in the flight and ground control Sverts. Photoperiod is controlled individually in each mockup, and CO<sub>2</sub> levels are measured as gas enters each cuvette. Levels, including levels as high as those in Mir, can be set manually.

In studies with this facility we have documented the uniformity among the various mockups and we have demonstrated that, at the light levels expected in Svet in Mir, plant growth is much better at 22 °C than at 27 °C. The substrate is clearly a serious problem even on earth at 1 g<sub>n</sub>. In addition, we have clearly documented the promotive effect of long photoperiods on the rate of flower development.

In other studies we have grown Super-dwarf wheat under a range of low irradiance levels. We have studied ways to measure leaf areas. We have developed fixatives that remain stable for many months. We have learned to break a post-harvest dormancy of Super-dwarf wheat seeds by treating moist seeds with cold. We have validated the GN<sub>2</sub> freezer for storage. At NASA Ames, we have carried out preliminary studies with high CO<sub>2</sub>, (Bubenheim), and Yendler has studied moisture distribution in Balkanine and other substrates (e.g., glass beads).

1. Merkies, A. I., R. S. Laurinavichyns. Complete cycle of individual development of *Arabidopsis thaliana* Haynh plants at Salyut orbital station. – Doklady AN SSSR, 271, 1983, №2, 509–512.
2. Mashinsky, A. L., I. Ivanova, T. Derendyaeva, G. S. Nechitailo, F. B. Salisbury. "From seed-to-seed" experiment with wheat plants under space-flight conditions. – Advances in Space Research 14, 1994, №1 1, 13–19.
3. Nechitailo, G. S., A. L. Mashinsky. Space Biology. Moscow, Mir Publishers, 1993.
4. Ivanova, T., I. Dandolov, S. Sapunova, Yu. Berkovich, A. Mashinski. First results obtained from the exploitation of the "Svet" space greenhouse in the conditions of "Mir" orbital station. – In: Koloman Boda (ed). Current Trends in Cosmic Biology and Medicine 11, 1991, 179–184. Ivanka pri Dunaj, Slovakia.
5. Ivanova, T., Yu. A. Berkovich, A. L. Mashinsky, G. I. Meleshko. The first "Space" vegetables have been grown in the "Svet" Greenhouse using controlled environmental conditions. – Acta Astronautica 29, 1993, №8, 639–644.
6. Bugbee, B., B. Spanarkel, S. Johnson, O. Monje, G. Koerner. CO<sub>2</sub> crop growth enhancement and toxicity in wheat and rice. – Advances in Space Research, 14, 1994, №11, 257–267.
7. Ivanova, T., I. Dandolov. Moistening of the substrate in microgravity. – Microgravity Sci. Technol., Vol. 3, 1992, 151–155.
8. Salisbury, F. B., L. Gillespie. Growth of Super-dwarf wheat under low irradiance in preparation for two space-flight experiments. – ASGSB Bulletin, 6, 1992, №1, 70.
9. Salisbury, F. B., G. E. Bingham, L. S. Gillespie. Preparations for a flight experiment with wheat on the Russian Space Station Mir. – ASGSB Bulletin, 7, 1993, №1, 38.
10. Salisbury, F. B., L. Gillespie, G. Bingham. Preparations for CELSS flight experiments with wheat. – Adv. in Space Research, 14, 1994, №11, 21–27.

Received 14. V. 1996

### Отглеждане на пшеница сорт "Супер-джудже" на руската орбитална станция "МИР" (Проект "Оранжерия")

**Франк Салисбъри, Гейл Бингхам,  
Уилям Кампбел, Джон Карман,  
Стивън Браун, Линда Гилеспи, Пам Хол,  
Владимир Сичев, Игор Подолски,  
Маргарита Левински, Дейвид Бубенхайм,  
Борис Ендлер**

#### (Резюме)

В статията е описан експериментът "Оранжерия 2", проведен на орбиталната станция "Мир", по фундаменталния биологичен проект Мир-Шатъл'95. Експериментът е стартиран на 10 август 1995 г. от 19-тия и продължен от 20-тия екипаж на "Мир". Той е опит да се отгледа пшеница сорт "Супер-джудже" по време на един цял вегетационен цикъл и да се експериментира апаратура за контролиране параметрите на средата, създадена в университета в щат Юта, САЩ (Лаборатория по космическа динамика) и монтирана към българската космическа оранжерия "Свет". Статията засяга общата организация и научните резултати от експеримента. Представено е подробно описание на експеримента "Оранжерия 2", точно както събитията са били предавани на Земята. Дадена е също програмата на Руско-Американо-Българския проект "Оранжерия".

## Photoelectric transducer based on the use of Mouarov's effect

*Kamen Valchev, Jivko Jekov,  
 Garo Mardirossian, Ivan Hristov*

*Space Research Institute, Bulgarian Academy of Sciences*

Nearly all automated and robotized systems necessitate the measurement of linear shiftings through executive mechanisms with small constructional dimensions with enhanced positioning accuracy. To satisfy this necessity, a number of such mechanisms have been designed and are operating in practice [1–3].

The aim of the development here described was the design of an executive mechanism and linear-shiftings sensor with reduced dimensions and high positioning accuracy, suitable for exploitation in space aircraft, too.

A piston photoelectric transducer based on the use of Mouarov's effect is proposed, combining the functions of an executive mechanism and a linear-shiftings sensor [4].

The piston photoelectric transducer based on the use of Mouarov's effect consists of three cylinders 1, 2 and 3 (Fig. 1). On cylinders 1 and 2, by a photolithographic method, concentric hatches are marked, satisfying condition:

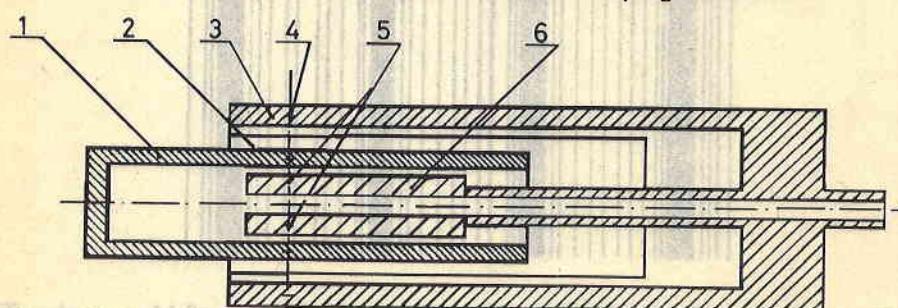


Fig. 1

$$(1) \quad \omega_1 = \omega; \quad \omega_2 = \omega + \Delta\omega \text{ and } \varphi_1 = \varphi_2 = \frac{\pi}{2},$$

where  $\omega_1 = \omega$  is the distance between two adjacent hatches of cylinder 1;  
 $\omega_2 = \omega + \Delta\omega$  – the distance between two adjacent hatches of cylinder 2;

$\varphi_1 = \varphi_2 = \frac{\pi}{2}$  – the angle at which the hatches of the 1st and 2nd cylinder are drawn with respect to the  $x$ -axis.

On cylinder 3, light-diodes 4, are fixed which form opto-electronic couples with photo-diodes 5.

Substituting conditions (1) in the equation of Mouarov's combination stripes, we obtain:

$$(2) \quad W = \frac{\omega_1 \omega_2}{\sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2 - 2\omega_1 \omega_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}}$$

and

$$(3) \quad W = \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{\omega(\omega + \Delta\omega)}{\Delta\omega},$$

where  $W$  is the distance between two adjacent combination stripes.

From here, about  $x$ -axis:

$$(4) \quad x = -\frac{p \omega_1 \omega_2 + c_1 \omega_2 - c_2 \omega_1}{\sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2 - 2\omega_1 \omega_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}} \\ = \frac{p \omega_1 \omega_2 + c_1 \omega_2 - c_2 \omega_1}{\omega_2 - \omega_1} \\ = \frac{p \omega(\omega + \Delta\omega) + c_1(\omega + \Delta\omega) - c_2 \omega}{\Delta\omega},$$

where  $c_1, c_2$  are the distances at which the first hatches of the two scales on the  $x$ -axis are located;  $p$  is the successive number of the combination stripe.

From expression (4), it follows that, in this case, the combination Mouarov stripes are parallel to the  $y$ -axis (Fig. 2).

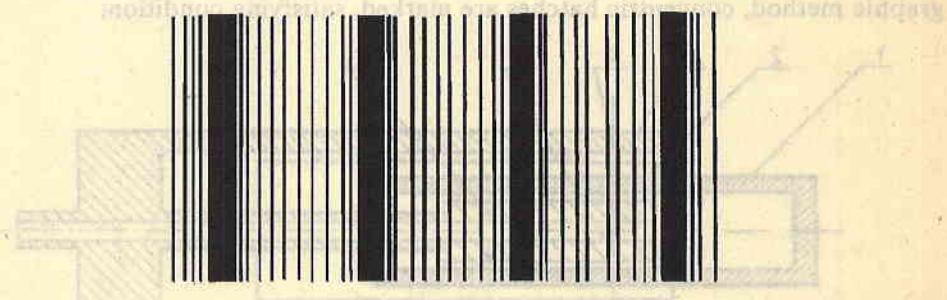


Fig. 2

The piston photoelectric transducer based on the use of Mouarov's effect, operated in the following way. On change of pressure in front of piston 6, cylinder 1 moves forward or backward depending on the direction of change of this pressure. Here, a linear relationship between pressure and mechanical shifting is assumed. On movement of cylinder 1 in either direction, the light flow from light-diodes 4, is modulated by the Mouarov combination stripes. On formation and

amplification of the electric signals from photo-diodes  $S_1$ , two logical levels are obtained – a logic "0" and a logic "1".

The low electric potential of the logic "0" results from the low level of the light flow, and the electric potential of the logic "1" – from its high level. The transition from "0" to "1" and vice versa corresponds to the shifting of Mouarov's combination stripe.

With a view to reducing external noise, the light- and photo-diodes operate in the infrared section of the spectrum optic range. The laboratory experiments showed, however, that this is not enough, so additional noise-proof coding of the light-flow had to be made.

As a result of the unification of the sensor and the executive mechanism, the operational parameters of the transducer are reduced, and the use of Mouarov's effect increases the accuracy of the linear shifting registration.

#### References

1. Presnuhin, L. Fotoelektricheskie preobrazuvateli informatsii. Moskva, Mashinostroenie, 1974 (in Russian).
2. Pivovarova, L., N. Kulikova. Fotoelektricheskie preobrazuvateli dlja izmerenija uglovih i lineinih peremeshchenij. – Optiko-mehanicheskaja promishlenost, № 6, 1974 (in Russian).
3. PHOTONICS Spectra. Laurin Publication. 1990–1997.
4. Valchev, K., J. Jekov. Izpolzuvane efecta na Mouarov vav vissoko-tochnata izmervatelnata aparatura. – In: Second National Conference in Optics and Laser Technics "Optrics'84", Varna, 1984.

*Received 25.II.1997*

### Фотоелектричен преобразувател с използване на ефекта на Муаров

**Камен Вълчев, Живко Жеков,  
Гаро Мардироян, Иван Христов**

#### (Резюме)

Обект на статията са предложените метод и реализация на бутален фотоелектричен преобразувател с използване на ефекта на Муаров, в който се обединяват функциите на изпълнителния механизъм и сенсора за линейни премествания. Като резултат се повишава точността на отчитане на линейното преместване при намалени габарити на преобразувателя, което го прави подходящ за експлоатация и в космически летателни апарати.

## Малки двуканални фотометри по проекти "Активен" и "АПЕКС"

Бойчо Бойчев

Институт за космически изследвания, БАН

В Централната лаборатория за космически изследвания, Института за космически изследвания и Централната лаборатория за слънчево-земни въздействия при Българската академия на науките са разработени редица спектрометрични системи за видимия, ултравиолетовия и инфрачервения диапазон за измерване на слаби оптични емисии в йоносферата [1 и др]. Тези емисии са следствие от явления, протичащи в авроралната област, предизвикани от изсилването на потоци заредени частици по време на магнитни бури, генериране и дисипация на електромагнитни вълни, модифициране на основните параметри на средата и в резултат интензи-фициране на естествените оптични емисии. Всички тези процеси на преобразуване на енергия водят до йоносферни и магнитосферни смущения в широк спектър на електромагнитните вълни.

В последно време за изучаване на сложните физически процеси, протичащи в йоносферно-магнитосферната плазма, се провеждат и експерименти, включващи активни въздействия върху околната плазма от борда на космически апарати, каквито бяха проведени по проектите "Активен" и "АПЕКС" [2].

В частност измерването на слабите оптични емисии, предизвикани от това въздействие, синхронно с измерванията в други области на електромагнитния спектър, са необходим елемент за изясняването на тези процеси.

Известни са значителен брой уреди, разработени за изследвания по горепосочения проблем, летели на различни космически обекти, по различно време и съответно на различно техническо ниво. Това са уредите ЕМО1 до ЕМО5 [3], Спектър 15 и 256 [4], Дъга 1 и 2 [5], СМП 32 [6], както и прибор ФС [7] за проект "АПЕКС". Всички тези уреди са спектрометрични апарати, чрез които се измерват оптични емисии основно във видимия и близкия ИЧ диапазон, в няколко спектрални области. Те са фиксирани в зависимост от възприетата оптична схема чрез много на брой механично превключващи интерференчни сфетофилтри – монохроматори, и един фотоприемник – обикновено ФЕУ, или чрез използването на дифракционна решетка – полихроматор и разнесени в пространството фотоприемници, понякога един координатно чувствителен приемник - ССД линия.

В общия случай в тези уреди е постигната пределна чувствителност, точност и достатъчна спектрална разделителна способност за сметка на значителни габарити, маса и консумация на енергия. В уредите има и механика за управление на затвор и филтри, която е чувствителна към вибрации и ускорения. Към недостатъците можем да причислим и необходимостта от охлаждане на приемниците, както и високо захранващо електрическо напрежение, в случаите когато се използва фотоприемник ФЕУ. В някои от уредите не е решен въпросът с автокалибровка и контролиране на характеристиките по време на работа.

Тези основни параметри на споменатите по-горе фотометри, позволяват те да бъдат използвани само за средни и големи космически летателни апарати. Поради големите си габарити, маса и консумация на енергия те не могат да бъдат прилагани на малки космически обекти, каквито са субспътниците Магион-2 (С2-АК) и Магион-3 (С2-АП) по проектите "Активен" и "АПЕКС".

Необходимостта от провеждането на фотометрични измервания от борда на посочените субспътници, в система спътник–субспътник, по време на активни въздействия върху плазмата, наложи разработването на нов тип фотометър, отговарящ на следните специфични изисквания:

- Научна задача: изследване на слаби оптични емисии на околоземната плазма и атмосферата.

- Ниска енергоконсумация, малки габарити и тегло.

- Съвместимост с възможностите на радиотелеметрията на малък космически обект.

- Точна привръзка по време на получената информация поради паралелната работа с други измервателни системи на борда на субспътника и основния спътник.

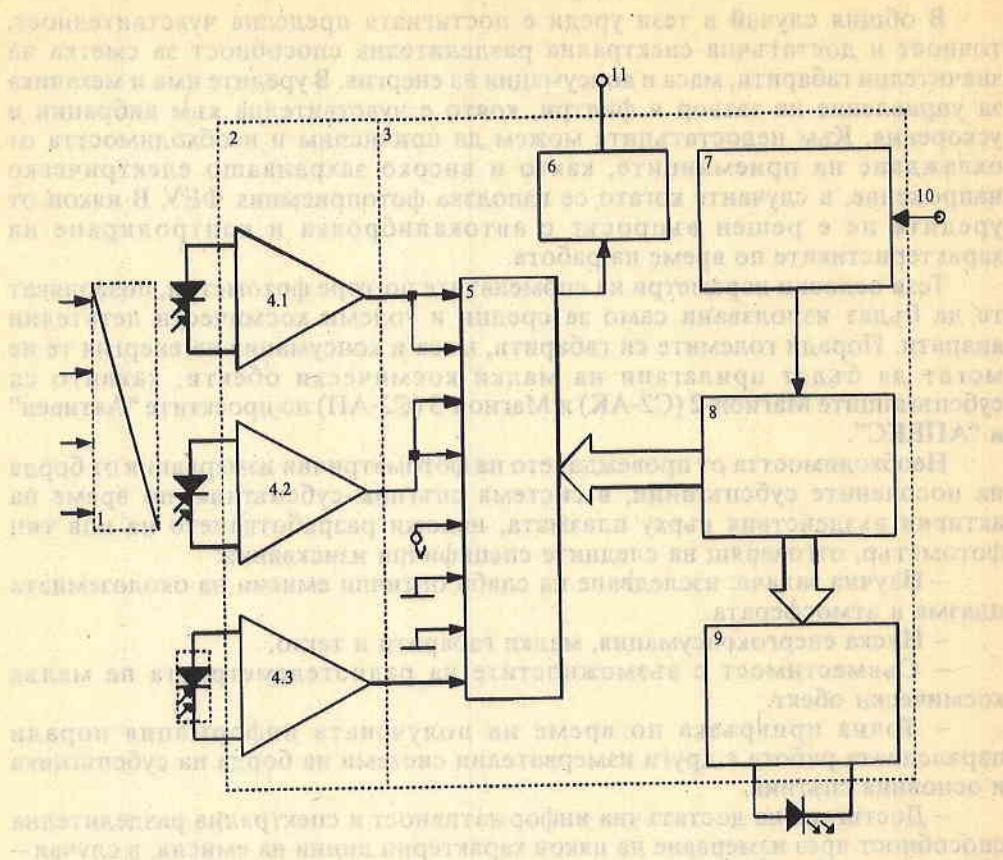
- Достигане на достатъчна информативност и спектрална разделителна способност чрез измерване на някои характерни линии на емисия, в случая – OI<sub>6300</sub>Å и OI<sub>5577</sub>Å.

- Осигуряване на голям динамичен диапазон на измерване поради невъзможността за управление на прибора по време на работа.

- Оценка на достоверността на получаваната информация чрез периодична автокалибровка, оценка на радиационни въздействия върху детекторите и др.

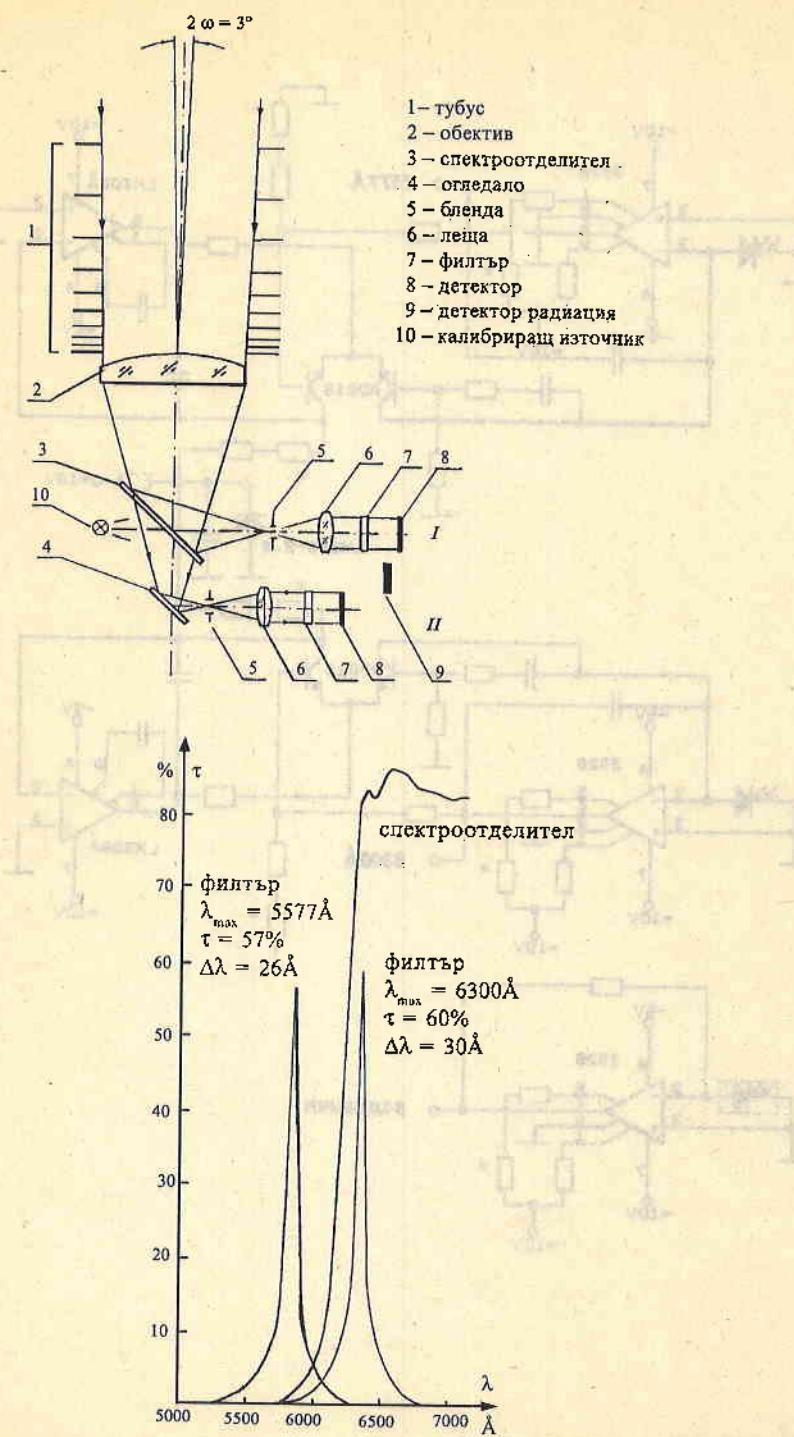
Разработеният на основата на горепосочените изисквания малък двуканален фотометър ФДС (фотометър двуканален субспътников) бе реализиран по блокова схема, показана на фиг. 1. Оптичната схема и някои параметри на използваните оптични елементи са показани на фиг. 2. На фиг. 3 е показана принципната електрическа схема на аналоговата част. В структурната схема на апаратурата са предвидени два канала за спектрални измервания и един канал за качествена оценка на радиационната обстановка, работещи паралелно. Получаваната информация се мултиплексира в 5 и по един аналогов телеметричен канал постъпва в телеметрията на космическия носител. Чрез блокове 7 и 8 получената информация се синхронизира с бордовото време, а също така чрез блок 9 – управляем генератор на ток и източник на светлина – светодиод, се осигурява синхронна периодична калибровка по време на работа.

Използваните фотоприемници във фотометъра са силициеви диоди с голяма площ. Фотоприемниците работят във фотодиоден режим при нулево напрежение върху тях  $U_d = 0$  V и еквивалентно товарно съпротивление

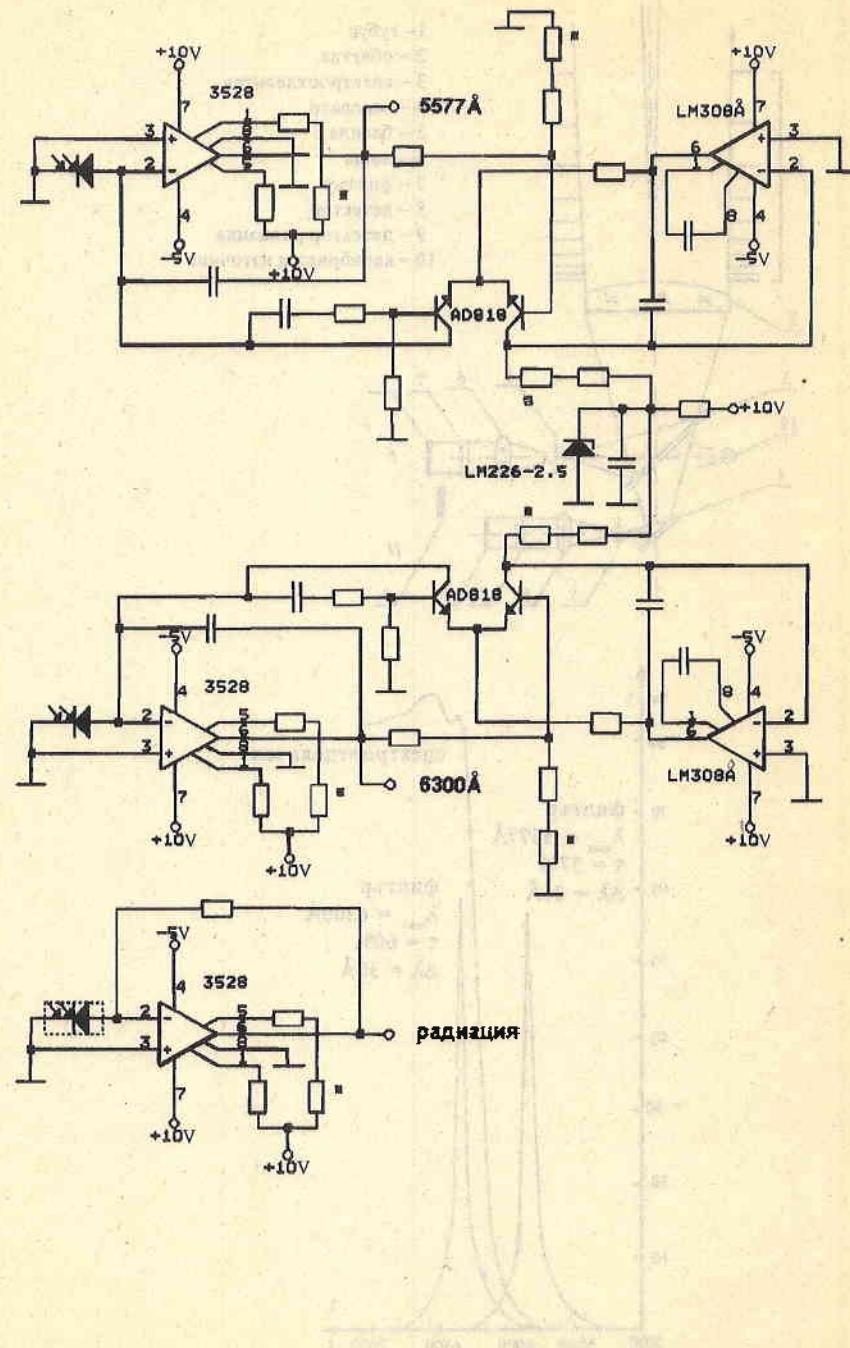


Фиг. 1. Структурна схема на фотометъра

- 1 – оптическа система
- 2 – аналогов блок
- 3 – цифров блок
- 4.1 – логаритмичен преобразувател ток–напрежение (канал 1)
- 4.2 – логаритмичен преобразувател ток–напрежение (канал 2)
- 4.3 – преобразувател ток–напрежение (канал 3)
- 5 – мултиплексер за (аналогови) данни
- 6 – буферен усилвател (изход към телеметрията)
- 7 – схема за синхронизация с бордовото време
- 8 – логическа схема, осигуряваща циклограмата на работа
- 9 – блок за синхронна калибровка
- 10 – вход за синхронизация сигнал DTEN
- 11 – изход към телеметрията на спътника



Фиг. 2. Оптичната схема и графики, илюстриращи спектралната ѝ пропускателна способност



Фиг. 3. Принципна схема на аналоговата част

$R_1 = 0 \Omega$ . Този режим на работа осигурява нечувствителност спрямо околната температура, линейност и огромен динамичен диапазон на работа. Реализацията на режима се осъществява чрез преобразуватели ток – напрежение, които са разработени като логаритмични с цел разширяване на динамичния диапазон по отношение на постъпвания от фотоприемника ток, пропорционален на светлинния поток.

Използваните фотоприемници в прибора са SP103 [8] за ФДС1 и BPY12 [9] за ФДС2. При работа с преобразуватели ток – напрежение те осигуряват динамичен диапазон  $D = 10^5$  при линейност в рамките на 1%. Промяната на детекторите доведе до повишаване на праговата чувствителност над 2 нъти.

Поради изключително строгите изисквания по отношение на енергоконсумацията и малкия входен ток не беше възможно използването на стандартни логаритмични преобразуватели като например 4127 [10], ICL8048 [11] и се наложи разработването на сдвоен логаритмичен преобразувател ток – напрежение на дискретни елементи, като основно внимание беше обърнато на понижаване на консумацията и на разширяване на динамичния му диапазон към малките токове. Той е построен на 2 броя операционни усилватели тип 3528 [10], опорен източник LM226/2,5 [12], логаритмични двойки транзистори AD818 [13] и допълнителни операционни усилватели LM308A [12]. Изходното напрежение на всеки от преобразувателите зависи от десетичния логаритъм на отношението на входния ток  $I_{in}$  (от детектора) към опорния  $I_{ref}$ .

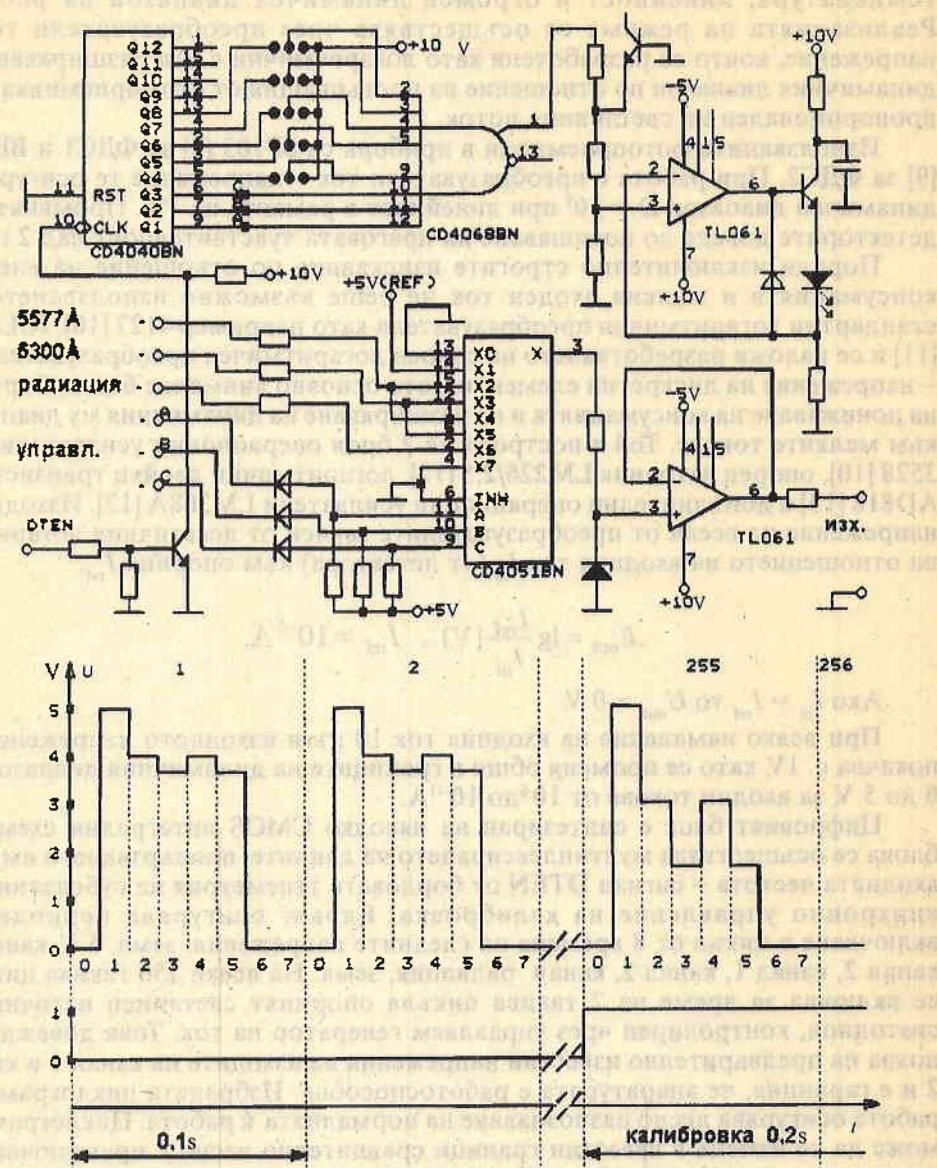
$$E_{out} = \lg \frac{I_{ref}}{I_{in}} [V], \quad I_{ref} = 10^{-6} A.$$

Ако  $I_{in} = I_{ref}$  то  $E_{out} = 0 V$ .

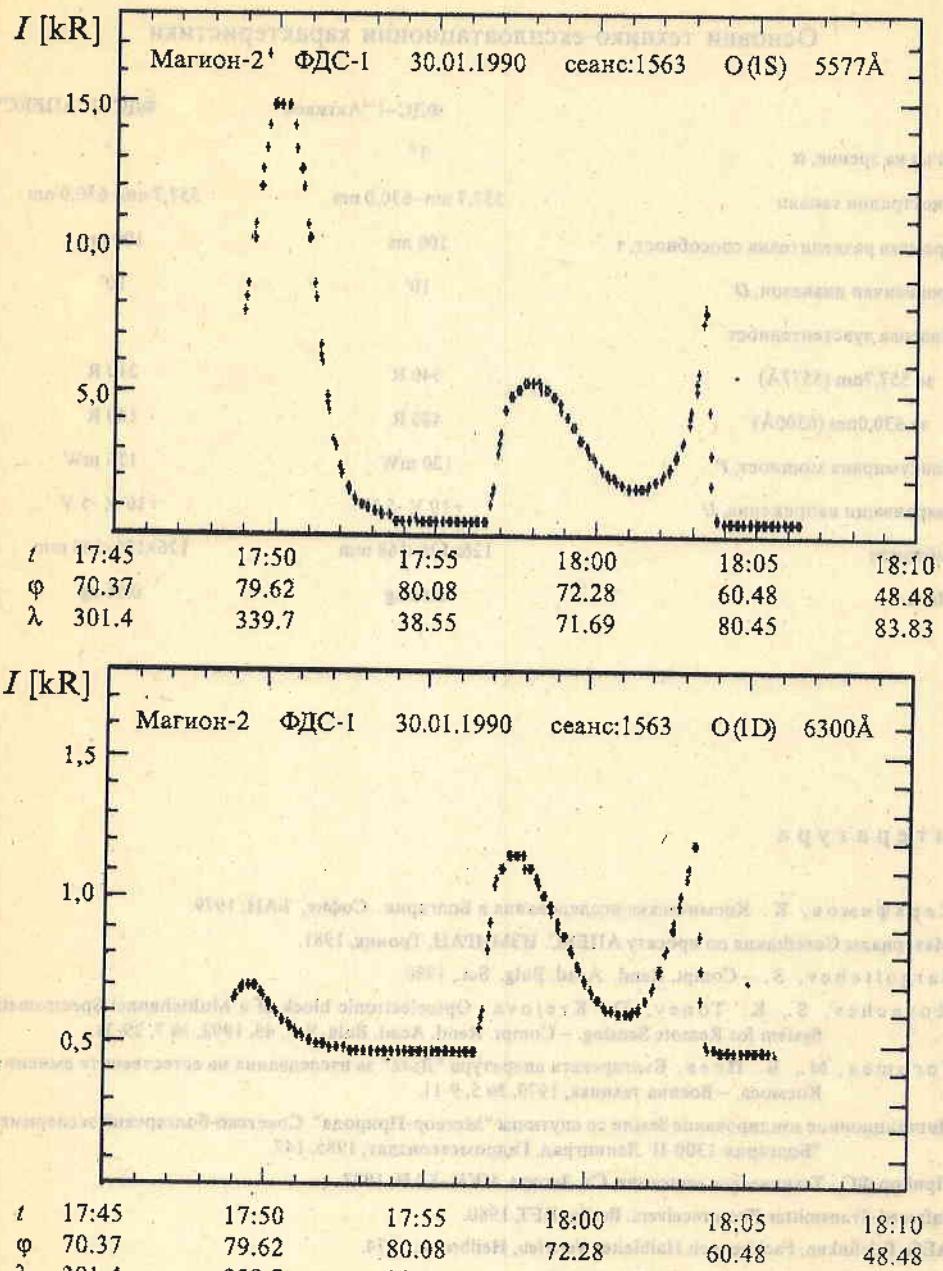
При всяко намаление на входния ток 10 нъти изходното напрежение се покачва с 1V, като се променя общо в границите на динамичния диапазон от 0 до 5 V, за входни токове от  $10^{-6}$  до  $10^{-11} A$ .

Цифровият блок е синтезиран на няколко CMOS интегрални схеми. В блока се осъществява мултиплексирането на данните, привързването им към входната честота – сигнал DTEN от бордовата телеметрия на субспътника и синхронно управление на калибровка. Блокът осигурява периодично включване в цикъл от 8 времена на следните напрежения: земя, 5 V, канал 1, канал 2, канал 1, канал 2, канал радиация, земя. На всеки 256 такива цикъла се включва за време на 2 такива цикъла опорният светлинен източник – светодиод, контролиран чрез управляем генератор на ток. Това довежда до появя на предварително известни напрежения на изходите на канал 1 и канал 2 и е гаранция, че апаратурата е работоспособна. Избраната циклограма на работа осигурява лесно разпознаване на нормалната ѝ работа. Циклограмата може да се изменя в известни граници сравнително лесно с превключвания на платката на цифровия блок. Цифровият блок и примерната циклограма на работата му са показани на фиг. 4.

Два варианта на малкия двуканален фотометър ФДС работиха и предадоха информация по време на провежданите експерименти по проекти "Активен" и "АПЕКС" от борда на субспътници Магион-2 (C2-AK) и Магион-3 (C2-AP), разработени в Геофизичния институт на Чехословашката академия на науките в Прага. И по двата експеримента програмата включваща синхронна работа на система спътник–субспътник, както и активни експерименти. По-долу са дадени основните характеристики на двата варианта на апаратурата. На фиг.5 са показани няколко сеанса на приета информация.



Фиг. 4. Цифров блок и примерна циклограмма на работата му



фиг. 5. Иллюстрация на приета информация при някон сеанси

Основни технико-експлоатационни характеристики

|  | ФДС-1 "Активен"                        | ФДС-2 "АПЕКС"                          |
|--|--|--|
| 1. Ъгъл на зрение, $\alpha$                | $3^\circ$                              | $3^\circ$                              |
| 2. Спектрални канали                       | $557,7 \text{ nm} - 630,0 \text{ nm}$  | $557,7 \text{ nm} - 630,0 \text{ nm}$  |
| 3. Времева разделителна способност, $t$    | $100 \text{ ms}$                       | $100 \text{ ms}$                       |
| 4. Динамичен диапазон, $D$                 | $10^5$                                 | $10^5$                                 |
| 5. Прагова чувствителност                  |  |  |
| за $557,7 \text{ nm}$ ( $5577\text{\AA}$ ) | $540 \text{ R}$                        | $210 \text{ R}$                        |
| за $630,0 \text{ nm}$ ( $6300\text{\AA}$ ) | $480 \text{ R}$                        | $180 \text{ R}$                        |
| 6. Консумирана мощност, $P$                | $120 \text{ mW}$                       | $120 \text{ mW}$                       |
| 7. Захранващи напрежения, $U$              | $+10 \text{ V}, -5 \text{ V}$          | $+10 \text{ V}, -5 \text{ V}$          |
| 8. Габарити                                | $126 \times 126 \times 168 \text{ mm}$ | $126 \times 126 \times 168 \text{ mm}$ |
| 9. Маса                                    | $0,56 \text{ kg}$                      | $0,56 \text{ kg}$                      |

### Л и т е р а т у р а

1. Серафимов, К. Космические исследования в Болгарии. София, БАН, 1979.
2. Материалы Совещания по проекту АПЕКС. ИЗМИРАН, Троицк, 1981.
3. Sargoitchev, S. – Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci., 1980.
4. Kovachev, S., K. Tonev, D. Krejova. Optoelectronic block of a Multichannel Spectrometric System for Remote Sensing. – Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci., 45, 1992, № 7, 29-31.
5. Гогощев, М., Б. Пеев. Българската апаратура "Дъга" за изследвания на естествените емисии от Космоса. – Военна техника, 1979, № 5, 9-11.
6. Дистанционное зондирование Земли со спутника "Метеор-Природа". Советско-болгарский эксперимент "Болгария-1300-II". Ленинград, Гидрометеоиздат, 1985. 147.
7. Прибор ФС - Техническое описание, Ст. Загора, ИКИ-БАН, 1987.
8. Infrared-Transmitter Photoreceivers. Berlin, RFT, 1980.
9. ABG-Telefinken, Fachbereich Halbleiter Vertrieb, Heilbronn, 1974.
10. General Catalog Burr – Broun, 1979.
11. INTERSIL Catalog. Intersil Datel GmbH, Munchen, 1988.
12. NATIONAL SEMICONDUCTOR Linear Databook. Santa Klara, 1978.
13. ANALOG DEVICES Data Acquisition Products Catalog, 1978.

Постъпила на 14. V. 1996

## Small two-channel photometers under the "Aktiven" and "Apex" projects

Boytcho Boytchev

#### (Summary)

The paper is devoted to the small two-channel photometers intended for the study of weak optical emissions of the around-the-earth plasma and atmosphere from board of space objects such as the subsatellites "Magion-2" (S2-AK) and "Magion-3" (S2-AP) under the "Aktiven" and "Anex" projects.

The specific technical and exploitation requirements to the photometers resulting from the peculiarities of the small space objects are formulated, their structural and optic scheme is briefly described, the most important elements of their electric circuit are considered, their major technical and exploitation characteristics are provided, and an illustration of the received information is shown.

## Ефективност на визирни оптични уреди при наблюдение на отдалечени обекти

**Живко Жеков**

*Институт за космически изследвания, БАН*

Статията се отнася до оптични визири за наблюдение на отдалечени обекти при различна яркост на фона в диапазона от  $10^6$  до  $4,2 \cdot 10^3 \text{ cd/m}^2$ .

Пресмятане на оптични визири с плавно променливо дискретно и постоянно увеличение е представено в [1–3], отчитане влиянието на светоразсейването във визирните оптични уреди в [4–5], а зависимостта между зрителното поле и времето за откриване на обекта, в [6].

Задачата на изследването е при отчитане на яркостта на фона за конкретни случаи от диапазона  $10^6$  до  $4,2 \cdot 10^3 \text{ cd/m}^2$  да се пресметне ефективността на визирния оптичен уред.

За центъра на зрителното поле, ефективността на визирните оптични уреди  $N_o$  се определя от отношението на пределната осветеност на изследвания обект, регистрирана с невъоръжено око –  $E_u$ , към пределната осветеност, регистрирана чрез оптичния визир –  $E_o$ :

$$(1) \quad N_o = E_u / E_o .$$

От физиологичната оптика е известно, че пределната осветеност се явява функция на яркостта на фона ( $B$ )

$$(2) \quad E_o = f(B) = cB^n ,$$

където коефициентът  $c$  и степенният показател  $n$  се променят в зависимост от яркостта на фона.

Способността на оптичния уред да създава по-светло или по-тъмно изображение се характеризира от неговата светосила  $H$ , а коефициентът на светоразсейване влияе върху контраста на изображението.

Светосилата  $H$  се определя и от отношението на осветеността от равнината на изображението на оптичния уред, към яркостта на обекта, отчитайки допълнителната яркост  $\Delta B$  от светоразсейването:

$$(3) \quad H = E / B + \Delta B ,$$

където  $\Delta B = \beta (B_{ob} + B_f)$ ,  $B_{ob}$  е яркост на обекта;  $B_f$  – яркост на фона.

За продълговат обект, наблюдавам чрез оптичен визир, светосилата е

$$(4) \quad H_{\text{o.o.}} = g \tau_{\text{o.c.}} d^2,$$

а за точков обект

$$(5) \quad H_{\text{t.o.}} = g \tau_{\text{o.c.}} D^2,$$

където  $g = n(n)^2 \cdot \tau_{\text{o.o.}}$  е константа за окото;  $D, d$ , са входящ и изходящ диаметър на визирната оптична система;  $\tau_{\text{o.c.}}$  - коефициент на светопропускане на оптичната система.

Тогава за изследване на продълговати обекти, използвайки формули (3) и (4), се получава

$$(6) \quad H/H_{\text{o.o.}} = B'/B + \Delta B = \tau_{\text{o.c.}} \beta d^2/\delta^2,$$

където  $\beta$  е коефициент на светоразсейване;  $d^2/\delta^2$  - отношение, характерно само при  $\alpha \leq \delta$ , определящо непълното използване на диаметъра на зеницата на наблюдателя.

За изследване на точкови обекти, използвайки формули (3) и (5) и замествайки  $D^2 = d^2 \cdot r$ , ( $r$  – видимо увеличение на оптичната система) се получава изразът

$$(7) \quad H_{\text{o.c.}}/H_{\text{o.o.}} = E_{\text{o.c.}}/E_{\text{o.o.}} = \tau_{\text{o.c.}} \beta r d^2/\delta^2.$$

При преминаване на светлината през оптична система

$$(8) \quad E' = \tau_{\text{o.c.}} r^2 E d^2/\delta^2,$$

$$(9) \quad B' = B \tau_{\text{o.c.}} d^2/\delta^2.$$

Съпоставяйки значенията на  $E'$  и  $B'$  от изразите (8) и (9) с (2), за окото, въръжено с визирна оптична система, в центъра на зрителното му поле се получава

$$(10) \quad E_o r^2 \tau_{\text{o.c.}} k_\delta d^2/\delta^2 = f(B, \tau_{\text{o.c.}}, k_\delta, d^2/\delta^2),$$

където  $k_\delta$  е коефициент, отчитащ ефекта на Стайлс–Кроуфорд, показващ сумарното въздействие на светлинния поток върху окото на наблюдателя.

Изхождайки от зависимостите (1), (2) и (10) и отчитайки яркостта на фона в зададения интервал и промяната му, за ефективността на визирния оптичен уред в центъра на зрителното поле се получава

$$(11) \quad N_o = \frac{c r^2 \beta k_\delta (d^2/\delta^2) (B + \Delta B)}{c' [\beta k_\delta (d^2/\delta^2) (B + \Delta B)]^{n'}},$$

където  $c'$  и  $n'$  са коефициент и степенен показател, съответстващи на променливата яркост на фона.

Стойностите на коефициента и степенния показател са представени в таблица 1.

Таблица 1

| Яркост на фона $B$ ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) | $n$  | $c$                  |
|---|------|----------------------|
| $B < 3 \cdot 10^{-4}$                         | 0    | $1 \cdot 10^{-8}$    |
| $B = 3 \cdot 10^{-4}$                         | 0,24 | $1,2 \cdot 10^{-7}$  |
| $B = 3 \cdot 10^{-3}$                         | 0,67 | $3,72 \cdot 10^{-7}$ |
| $B = 30$                                      | 0,84 | $2,2 \cdot 10^{-7}$  |
| $B \geq 3 \cdot 10^{-3}$                      | 0,84 | $2,2 \cdot 10^{-7}$  |

Ефективността на визирния оптичен уред в зависимост от зрителното  $N_0$  поле се определя аналогично от израза

$$N_\beta = (c/c') (B + \Delta B)^{n-n'} \Gamma^2 (\tau_{\text{o.c.}} \beta k_\delta d^2 / \delta^2)^{1-n'}$$

В заключение следва да се отбележи, че са получени изрази за определяне на ефективността на конкретни визирни оптични уреди при наблюдение на отдалечени обекти при различна яркост на фона, като са приведени данни за стойността по коефициента  $c$  и степенния показател  $n$ , способстващи за пресмятане в диапазона на яркост на фона от  $10^{-6}$  до  $4,2 \cdot 10^3 \text{ cd}/\text{m}^2$ .

### Литература

1. Жеков, Ж., И. Кирчев. Визир с плавно променяща се увеличение. Н.С., ВНВАУ "Г.Димитров", Шумен, 1982.
2. Жеков, Ж., А. Александров. Визир с дискретно променливо увеличение. – В: Национална конференция с международно участие, "Космос-85", Варна, 1985.
3. Жеков, Ж., К. Вълчев. Влияние на светоразсейването върху видимостта на отдалечени обекти посредством визирни оптични уреди. Н.К., под.22810, София, 1986.
4. Александров, А., Ж. Жеков, К. Вълчев. Влияние на светоразсейването върху видимостта на яркостта на обекта при наблюдение с визирни оптични уреди. – В: Десета национална конференция с международно участие, МТОС-85, Варна, 1988.
5. Жеков, Ж., Г. Гергинов. Експериментално изследване на зависимостта между зрителното поле на оптични визири и времето за откриване на продълговата цел. Н.С., ВНВАУ "Г.Димитров", Шумен, 1983.

Постъпила на 27. II. 1997 г.

### Efficiency of visor optic devices in the monitoring of remote objects

Jivko Jekov

(Summary)

The paper is devoted to the efficiency of visor optic devices in the monitoring of remote objects with different background brightness. In particular, the results from the study of the efficiency of optic visors with background brightness from  $10^{-6}$  to  $4,2 \cdot 10^3 \text{ cd}/\text{m}^2$  in the monitoring of point or elongated objects are presented.

Българска академия на науките. Bulgarian Academy of Sciences  
Аерокосмически изследвания в България. 14. Aerospace Research in Bulgaria  
София. 1998. Sofia

# Верификация на програмното осигуряване на компютърни системи за управление и системи за полунатурно моделиране на мозъци на хора

*Памет Христов. Петър Генев*

## Планы Аристотеля

*Институт за космически изследвания, БАН*

Статията е продължение на "Подход за проектиране и изследване на компютърни системи за управление на летателни апарати на базата на модели на Хоар", публикувана в кн. 12/1996 г. на поредицата "Аерокосмически изследвания в България".

Верификация на програми – това е приложение на формални методи (ФМ) за доказване на коректността на програмната система преди началото на работата ѝ (а може би и в процеса на работа). Под коректност на програмата се разбира нейната адекватна реакция на различни входни данни, получаване на изходни данни за определено време (системи за реално време), липса на безкрайни цикли, безкрайно засемане на ресурси, което е особено сложно за доказване и достигане при паралелни системи.

Преди няколко години приложението на формални методи в програмно-то осигуряване (ПО) и в частност – в ПО на управляващи системи, се смяташе за недостатъчно обосновано по ред причини – приложението на сложните математични методи затрудняваше програмистите, смятани се за невъзможно да се направи достатъчно надеждна спецификация и верификация на системата, приложението беше затруднено (а и сега е) при използване на класическата технология на програмирането, липсваха програмни пакети, автоматизиращи приложението на ФМ. Поради това първоначално намериха приложение методи, занимаващи се само със специфициране на ПО ( $Z$  - нотация [1-5] и др.). Отделно за управляващите системи и особено за сложните космически и авиационни системи се смяташе за недопустимо приложението на ФМ поради тяхната уникалност и сложните алгоритми.

<sup>1</sup> Изследванията се финансират от НФ "Научни изследвания" при МОНТ - дог. И-305/93.

Същевременно, по данни на NASA Langley Formal Methods Group [6], ред катастрофи с летателни апарати са станали поради ненадеждност на ПО, идваща от невъзможността за проверката му с класически методи.

- F14: попада в свредел поради грешки в тактическото ПО (Software Engineering Notes, Volume 9, Number 5).
- F18: катастрофира поради грешки в ПО (Software Engineering Notes, Volume 6, Number 2).
- AFTI-F16: лошо взаимодействие на процесите в програмната система, дрейф и шум в датчиците водят до отказ на системата. Приземява се с управление по един канал.
- X29: открита е грешка в ПО чрез симулации след 162 полета. Анализът показва, че грешката би могла да доведе до нестабилност и загуба на самолета.
- НИМАТ катастрофира поради грешка по време в ПО, неоткрита при обширните тестове.

### Защо са необходими ФМ и какво представляват?

Компютърната система може да не работи поради повреда във физическите компоненти или поради грешки в проекта/реализацията на ПО. За системи, които трябва да притежават свръхвисока надеждност и безопасност, трябва да се имат предвид и двата случая. Има установени технологии за откриване на повреди в компонентите, базирани на модели на Марков. Грешките в проекта на ПО представляват много по-голяма заплаха. За съжаление, няма научно обоснована защита против тази заплаха, която да е напълно приложима в практиката. Има три основни стратегии, които се прилагат в този случай:

1. Тестове (натурно моделиране);
2. Робастно ПО (Design Diversity), работоспособно при някои грешки ( $N$ -version програмиране, блокове за възстановяване и др.);
3. Избягване на грешките – ФМ (формална спецификация/верификация, автоматичен синтез на програми и др.).

Проблемът в натурното моделиране е необходимото време за доказване на свръхвисоката надеждност на системата. Например, за да докаже  $10^{-9}$  вероятност за отказ за 1 час мисия, системата трябва да се тества повече от 114 000 години.

Основната идея на робастното програмиране е да се използват отделни екипи за проектиране/реализация, за да се получат различни версии от една спецификация. След това се използват неточни прагови избиратели, за да се маскират ефектите от грешките в проектирането в една от версите. Надеждата е, че недостатъците в проекта ще проявят грешките си независимо. За съжаление, този метод е отхвърлен при няколко експеримента с ПО с ниска надеждност. Освен това, този метод не може да бъде проверен за ПО с висока надеждност, тъй като се изисква прекалено много време.

Формалните методи, като че ли предлагат единствения защитен метод от грешки в проекта на програмата. За системите, за които е необходима свръхвисока надеждност, изглежда няма друг избор, освен да се проектират по най-строгия начин, известен досега, а именно – използване на ФМ [6].

ФМ се използват за специфициране и моделиране на поведението на системата и за математическа проверка на това, дали проектът и реализацията удовлетворяват функционалните и защитните изисквания на системата. Спецификацията, моделирането и верификацията могат да се направят с използване на различни техники и с различна степен на строгост. Една примерна разпространена последователност е показана по-долу:

Ниво 1: Формална спецификация на цялата или на част от системата.  
 Ниво 2: Формална спецификация на две или повече нива на абстрактност и ръчно доказване на това, че детализираната спецификация съдържа по-абстрактната спецификация.

Ниво 3: Формални доказателства чрез програми, доказващи теореми.

В заключение на обзора може да се цитира [7] "Техниките, основани на формални методи, такива като езика CSP (Communicating Sequential Processes) доказано най-пълно удовлетворяват изискванията за преодоляване на сложността в специфицирането на конкурентни, вложени, разпределени системи и системи за реално време".

Днес съществуват ред готови програмни продукти, позволяващи специфициране и верификация на ПО с различна степен на абстрактност на спецификацията. Ще разгледаме накратко някои от тях.

- **B-Method** набор от математически методи за специфициране, проектиране и реализация на програмни компоненти. Системата се моделира като набор от взаимозависими абстрактни машини. Абстрактната машина се описва чрез AMN (Abstract Machine Notation), който е базиран на състояния език за формални спецификации. С AMN състоянието се моделира с използване на множества, отношения, функции, последователности и др. Методът определя как да се проверява спецификацията за устойчивост и как да се проверява проектът и реализацията за коректност (на данните и алгоритъма).

- **EVES/Verdi** – включва език за спецификации (Verdi), генератор на правила за доказване, автоматична система за заключение (NEVER), интерпретатор, компилатор. Verdi е формална нотация, базирана на нетипизирана теория на множествата, която може да се използва за представяне на строги математични концепции. Verdi се използва за доказване на теореми от теория на множествата, за доказване на функционална коректност на апаратни структури, програмни структури и др. EVES е система за верификация на програми, написани на Verdi [ORA – Canada].

- **FDR** (Failures-Divergence Refinement) – програмен пакет, който позволява автоматична проверка на много възможности на системи с краен набор състояния или диалогоvo изследване на процеси, които провалят тези проверки. Базиран е на стандартната (untimed) математична теория на взаимодействащите последователни процеси (CSP), която се интересува от реда, но не и от точното време на събитията. Разработен е специално за индустриални приложения. Прилаган е за проектиране на VLSI, настройка на мрежови протоколи, управление, обработка на сигнали и др.

- **PVS** – състои се от език за спецификации, предварително зададени теории, програма за доказване на теореми, утилити. Езикът за спецификации е базиран на класическа типизирана логика от високо ниво. PVS спецификациите са организирани в параметризирани теории, които съдържат предположения, дефиниции, аксиоми и теореми. Участници в проекта са NASA и други аерокосмически компании.

- **VDM – SL** (M Toolbox) – един от най-развитите формални методи, предназначен за функционална проверка на програмни системи. Централен елемент на VDM е езикът за спецификации – VDM – SL, който се използва на фазите на спецификация и реализация на ПО.

- **CABERNET** – поддържа формално изграждане на системи за реално време. Представя среда за специфициране, изпълнение и валидация на спецификациите на системи за реално време, базирани на временно и функционално разширение на мрежите на Петри.

• VDM++ (Venus) – поддържа разработка на обектно-ориентирани конкурентни системи, на базата на комбинация от приложението на графично моделиране и формална спецификация. В края на процеса се достига до генериране на прототип.

**Общи характеристики на разгледаните методи:**

(по-скоро на процедурите за разработване на ПО с тях)

- В повечето методики се проверява спецификацията и реализацията, тъй като те са разработени за паралелни езици.

- Повечето методики проверяват за определени видове некоректност.

- Процесът на верификация обикновено е интерактивен и изиска достатъчно дълго време.

- Невъзможна е верификацията в реално време на автоматично създадени спецификации.

- Повечето продукти изискват сравнително мощни компютри (Sun SPARC, Silicon Graphics и др.).

- Верификацията е еднократен процес, протичащ (може би на няколко итерации) преди началото на работата на системата.

От друга страна, верификацията на една реконфигурираща се система трябва да бъде непрекъснат процес – всяка нова конфигурация се изразява и в нова спецификация (възможно – съставена без участие на човек), коректността на която от своя страна трябва да бъде доказана. Това изиска метод, позволяващ непрекъсната верификация. В блоково-модулните системи, при наличието на диалогов и/или автоматичен програмен генератор, ситуацията се опростява от това, че не е необходимо да се проверява крайната реализация на ПО, тъй като тя се генерира автоматично по спецификацията (проверява се само коректността на спецификацията).

**Основни параметри на метода за верификация:**

- опростен формален подход – приема се, че ако спецификацията отговаря на закона на Хоар за съответната структура на процесите, тя е коректна;

- "Основната отговорност" за коректността на програмата се прехвърля върху спецификацията. Тъй като се работи със стандартни структури и обекти (модели на Хоар) и формалната спецификация се съставя автоматично по технологичната, то се предполага, че програмата се съставя правилно.

**Описание на метода.** Спецификацията на системата е описането на предполагаемото ѝ поведение. Когато системата е изградена от взаимодействащи процеси, най-естествено при наблюдение на поведението е разглеждането на нейния протокол и протоколите на съставящите я процеси. Спецификацията на един процес се състои от описание на неговите протоколи и техните свойства. Специфицира се последователността от действия, които извършва процесът, като особено внимание при взаимодействащите процеси се обръща на спецификацията на взаимодействията по каналите на процеса.

Ако  $P$  е обект, отговарящ на спецификацията  $S$ , то се казва, че  $P$  удовлетворява  $S$ , съкратено  $P \text{ sat } S$ . Това означава, че  $S$  описва всички възможни резултати от наблюдението на поведението на  $P$ , или, с други думи,  $S = \text{TRUE}$  всеки път, когато нейните променливи приемат значения, получени в резултат от наблюдението на обекта  $P$ ; т. е. –

$$\nabla pr. pr \in \text{trace}(P) \Rightarrow S,$$

където  $pr$  е променлива, която означава произволен протокол на процеса  $P$ .

Доказва се коректността не на програмни структури (от рода на  $x := y$ , IF THEN ELSE, FORK, JOIN и др.), а на структури от обекти (процеси, агрегати и др.) – например:

$System = P_1 \parallel P_2$ ; CSP - описание на системата

CSP - описание на процесите

$P_1 = Adder_1 \rightarrow Prop_{11} \rightarrow Stat_{11} \rightarrow SepPoint_{11} \rightarrow Prop_{12}$

$P_2 = Prop_{21} \rightarrow Prop_{22} \rightarrow SepPoint_{21} \rightarrow Stat_{21}$

Протоколна система:

$trace(System) = trace(P_1) \cup trace(P_2)$

Протоколна  $P_1$ :

$trace(P_1) = (Adder_1, Prop_{11}, Stat_{11}, SepPoint_{11}, Prop_{12})$

Протоколна  $P_2$ :

$trace(P_2) = (Prop_{21}, Prop_{22}, SepPoint_{21}, Stat_{21})$

За коректността на такава структура е достатъчно протоколите (сумата от протоколите на съставящите я обекти) да отговарят на изведените в CSP закони.

**Основен проблем.** Извеждане на протоколите –  $np$ ,  $np'$ ,  $np''$  и т.н. (извеждат се на базата на азбуките на процесите и агрегатите). Азбука на процес: {Prop, Stat1, Stat2, Matrix, SeparatePoint, Mul, Adder, Vector...}. Азбука на агрегат: {input, Transfer Function, output}. Transfer Function е множество от предавателни функции: пропорционална, апериодична, колебателна, сумиране и др.

- Протоколи на процеса – последователност от звена, които участват в процеса.
- Протоколи на агрегата – стойности на входа и изхода на агрегата.
- Изчисляване на протоколите.

В теорията на Хоар са изведени закони, позволяващи да се докаже, че процесът  $P$  съответства на своята спецификация  $S$ . Ето някои от тях:

a. STOP sat ( $np = <>$ ) – това е процес, който не прави нищо и има празен протокол;

6. Ако  $P \text{ sat } S$ , то  $(c \rightarrow P) \text{ sat } (np = <> \vee np_0 = c \& S(np'))$ , където  $np'$  е произволен протокол на  $(c \rightarrow P)$ . Всички закони са приведени в [8].

Законите на Хоар определят коректността на структури от процеси  $(c \rightarrow P; c \rightarrow P \mid b \rightarrow T; c \rightarrow P \parallel b \rightarrow T$  и др.). Коректността на самите процеси –  $P$ ,  $T$  и др., се определя от коректността на агрегатите, от които са съставени, тъй като връзките между агрегатите са линейни.

Определянето на коректността на агрегатите става на базата на техните спецификации. Спецификациите се определят на базата на дискретните преходни характеристики на звеното и интеграла на Дюамел и физически описват реакцията на агрегата при произволни входни въздействия. Общата формула за определяне на реакцията на агрегата е:

$$y(t) = h(t)x(0) + \int_0^t h(t-\tau)x(\tau)d\tau,$$

където  $h(t)$  е преходната функция на агрегата,  $x(0)$  – значението на  $x(t)$  при  $t = 0$ ,  $y(t)$  – изходен сигнал,  $x(t)$  – входен сигнал, или

$$y_k = -\sum_{i=1}^n a_i y_{k-i} + \sum_{j=0}^m b_j u_{k-j},$$

където  $a_i$  и  $b_j$  са коефициенти на диференчното уравнение,  $y_k$  и  $u_k$  – дискретни входен и изходен сигнал на агрегата.

– за агрегата  $\Pi$  – звено:

$$\text{PA} = (0 \leq np_i \leq np'_{i-1} \Rightarrow |np'_i - K * np_i| \leq 1),$$

където  $np_i$  са специални променливи, обозначаващи произволни протоколи на агрегатите (например – за PA –  $np$  е входен сигнал, а  $np'$  – изходен);  $np'_{i-1}$  е изходният сигнал на предходния агрегат,  $K$  – коефициент на усилване на звеното.

– за агрегата Апериодично звено от първи ред (AZ1) –

$$y(t) = e^{-\frac{t}{T_1}} y_0 + k \int_0^t e^{-\frac{t-\tau}{T_1}} u(\tau) d\tau.$$

Като се приеме  $t_0 = (k-1)T$  и  $t = kT$ , се получава

$$y_k = e^{-\frac{T}{T_1}} y_{k-1} + k \int_{(k-1)T}^{kT} e^{-\frac{kT-\tau}{T_1}} u(\tau) d\tau.$$

Диференчното уравнение в случая има вида

$$y_k = -a_1 y_{k-1} + b_1 u_{k-1}.$$

Коефициентите на уравнението имат следния вид:

$$a_1 = -e^{-\frac{T}{T_1}} \text{ и } b_1 = k_1 T_1 \left( 1 - e^{-\frac{T}{T_1}} \right).$$

От тук спецификацията на AZ1 е:

$$\text{AZ1} = (0 \leq np_i \leq np'_{i-1} \Rightarrow |np'_i - (-a_1 y_{k-1} + b_1 u_{k-1})| \leq 1).$$

Определянето на коректността става чрез предварително изчисляване на протоколите на Хоар за процеси и агрегати и изследване на съответствието на тези протоколи на законите на Хоар. За процесите протокола се определя от последователността от агрегати, които го формират, и от връзките му с други процеси. За агрегатите предварително може да се определи само диапазона на изменение на променливата  $np$ . В този смисъл методът за верификация може да продължи работата си в реално време като част от метода за контрол на работата на системата чрез протоколи на Хоар.

Методът може да се представи като няколко последователни стъпки:

1. Определяне на типа (структурата) на процеса или подсистемата;
2. Изчисляване на протоколите чрез функцията trace (P).

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 [8].

trace (P)= (R)\* &

```
if P = (STOPP) then trace (P) = {<>};  
elseif P = (c → P) then trace (P) = {<> U }<c> ∧ t | t ∈ trace(P)};  
elseif 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 | α R) ∈ trace(P) & (t | α Q) ∈ trace(Q) & t ∈ (α R ∪ α Q)*}
..... други конструкции на Хоар
else
end.

```

3. Проверка на протоколите (избор от множество стандартни протоколи) чрез функцията SAT(PS(np)), която в общ вид е приведена по-долу.

В този смисъл методът е част от метода за контрол на работата на системата чрез протоколи на Хоар, тъй като протоколите могат да се проверяват както предварително, така и по време на работа.

```

SAT(PS(np)) =
if P = STOP then
    if np = <> then return TRUE;
    else return FALSE;
end;
elsif P sat S(np) & (c → P) then
    if (np = <> V (np0 = c & S(np'))) then return TRUE;
    else return FALSE;
end;
elsif P sat S(np) & (c → d → P) then
    if (np ≤ <c,d> V (np i <c,d> & S(np''))) then return TRUE;
    else return FALSE;
elsif P sat S(np) & Q sat T(np) & (c → P|d → Q) then
    if (np = <> V (np0 = c & S(np')) V (np0 = d & T(np'))) (*S(np') и T(np'))
са спецификации на избраната алтернатива*) then return TRUE;
    else return FALSE;
elsif ∀ x ∈ B.(P(x) sat S(np,x)) & (x:B → P(x)) then
    if (np = <> V (np0 ∈ B & S(np', np0))) then return TRUE;
(*процес с избор от множество*)
    else return FALSE;
elsif P sat S(np) & Q sat T(np) & P || Q then
    if S(np | α P) & T(np | α Q) then return TRUE; (* паралелни
процеси *)
    else return FALSE;
----- други стандартни структури -----
    else return FALSE;
end;

```

#### Програмно осигуряване на метода за верификация

ПО работи на базата на масиви от данни тип RECORD, в които е записана спецификацията на процесите, агрегатите (тип и параметри) и връзките между тях (каналите). Реализирано е на Modula-2.

#### Изчислителни експерименти с метода за верификация

С метода бяха извършени ред експерименти, като му бяха задавани коректни спецификации и такива, съдържащи некоректности – например при взаимодействие на няколко процеса по един физически канал може да

се зададе един от каналите да извърши непременно синхронно взаимодействие, т. е. – да изчаква готовност от комуникация с него процес. Това ще блокира работата на другите процеси, взаимодействащи по същия физически канал.

#### Изводи

Предимствата на метода са следните:

- ✓ предлага се опростен универсален подход;
- ✓ основан е на строга математична теория (CSP), което позволява по-голямо доверие към резултатите от работата му;
- ✓ покрива всички видове некоректност на програмното осигуряване – deadlock, разходимост, безкрайно заемане на ресурси и др;
- ✓ позволява проверка както преди началото на работата на системата, така и в реално време.

Методът е предназначен за работа в средата на блоково-модулни системи, базирани на модели на Хоар, с предварително определен набор от системни обекти.

#### Литература

1. Gerhart, S. L. Applications of Formal Methods : Developing Virtuoso Software. – IEEE Software, Sept.1990.
2. Hall, A. Seven Myths of Formal Methods. – IEEE Software, Sept.1990.
3. Spivey, J. M. Specifying a Real-Time Kernel. – IEEE Software, Sept.1990.
4. Delisle, N., D. Garlan. A Formal Specification of an Oscilloscope. – IEEE Software, Sept.1990.
5. Kemmerer, R. A. Integrating Formal Methods into the Development Process. – IEEE Software, Sept.1990.
6. NASA Langley Formal Methods Program. URL: <http://atb-www.larc.nasa.gov/>.
7. Hinckey, M., S. A. Jarvis. Concurrent Systems: Formal Development in CSP. McGraw –Hill International Series in Software Engineering published 12th January 1995.
8. Hoare, C. A. R. Communicating Sequential Processes. PRENTICE – HALL International Ltd., London, 1985.

*Постъпила на 9. IV. 1997*

### A software verification of computer control systems and real time simulation systems using Hoare's models

*Plamen Christov, Peter Getzov, Plamen Angelov*

#### (Summary)

Some possibilities of a formal methods application are considered and especially the Hoare's models application to the moving objects computer control systems and real time simulation systems software development. Some common questions of formal methods application are briefly described. A Hoare's models based method is presented. It is characterised by simplicity and automatic real time working. Ways and means of system objects Hoare's protocols are given and the procedures implementing the method too.

## 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 Bulgarian, Russian or 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 x 295).

• 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. Bulard, E., I. Coooper. The determination of the masses necessary to produce a given gravitational field. - Proc. Royal Soc., London, 194, 1948, 332-347.

2. Yanovskaya, T., L. Porokhova. 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 Str., Sofia 1000, Bulgaria

## УКАЗАНИЯ ЗА АВТОРИТЕ

В тематичната поредица "Аерокосмически изследвания в България" се печатат оригинални научни статии от областта на космическата и авиационната наука и практика.

**Условия:** Статиите трябва да бъдат представени в 2 екземпляра на български, руски или английски. Българските автори трябва да представят и превод на статията, ако тя е на руски или английски език.

- Обемът на статията (включително таблиците и литературата) не трябва да превиши 15 стандартни машинописни страници (30 реда на страница, 60 удара на ред) с формат 210x295.
- Всяка статия трябва да бъде придружена от резюме (до 1 стандартна страница) на български и на един западен 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 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 фигуранта 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. Серифимов. - 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"