



(12) CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: a 2014 00881

(22) Data de depozit: 16/01/2015

(41) Data publicării cererii:  
29/07/2016 BOPI nr. 7/2016

(71) Solicitant:  
• SYSCOM 18 S.R.L., CALEA PLEVNEI  
NR. 139B, SECTOR 6, BUCUREȘTI, B, RO

(72) Inventatori:  
• CHELARU TEODOR-VIOREL,  
STR. VASILE CONTA NR. 1, BL. 34 A2,  
AP. 16, PLOIEȘTI, PH, RO;

• BORLAN ADRIAN, STR. HAGI-GHIȚĂ  
NR. 25, SECTOR 1, BUCUREȘTI, B, RO;  
• HOLDON BOGDAN, BD. IULIU MANIU  
NR. 17, BL. 21P, SC. 6, ET. 5, AP. 209,  
SECTOR 6, BUCUREȘTI, B, RO;  
• CONSTANTINESCU CRISTIAN,  
STR. CAPORALULUI NR. 25-27,  
BRAGADIRU, IF, RO;  
• CHELARU ADRIAN, STR. VASILE CONTA  
NR. 1, BL. 34 A2, AP. 16, PLOIEȘTI, PH, RO

(54) SISTEM DE GHIDARE NAVIGAȚIE ȘI CONTROL, CU  
UTILIZAREA UNGHIURILOR DE ROTAȚIE

(57) Rezumat:

Invenția se referă la un sistem de ghidare navigație și control, pentru un lansator suborbital. Sistemul conform invenției este format din următoarele module: un modul (M1) cu sursă de alimentare, un modul (M2) cu unitate de calcul și control interfețe, un modul (M3) cu senzor de accelerație liniară pe 3 axe, și receptor GPS, un modul (M4) cu senzor de viteză unghiulară pe 3 axe, și senzor de câmp magnetic pe 3 axe, componentele modulelor fiind dispuse pe plăci de circuit imprimat, realizate din punct de vedere geometric astfel încât să respecte configurația vectorului suborbital, toți senzorii fiind plasați în centrul plăcilor, cu axele orientate în aceeași direcții.

Revendicări: 2  
Figuri: 3

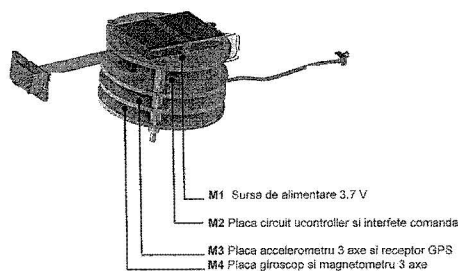


Fig. 2

Cu începere de la data publicării cererii de brevet, cererea asigură, în mod provizoriu, solicitantului, protecția conferită potrivit dispozițiilor art.32 din Legea nr.64/1991, cu excepția cazurilor în care cererea de brevet de invenție a fost respinsă, retrasă sau considerată ca fiind retrasă. Întinderea protecției conferite de cererea de brevet de invenție este determinată de revendicările conținute în cererea publicată în conformitate cu art.23 alin.(1) - (3).



# Sistem de ghidare navigatie si control cu utilizarea unghiurilor de rotatie

## (Descrierea propunerii de inventie)

### 1. Descrierea produsului

GNC, din punct de vedere constructiv, este format din urmatoarele module, ca in Figura 1:

- modul cu sursa de alimentare de 3.7 V (M1)
- modul cu unitatea de calcul si control interfete (M2)
- modul cu senzor de acceleratie liniara pe 3 axe si receptor GPS (M3)
- modul cu senzor de viteza unghiulara pe 3 axe si senzor camp magnetic pe 3 axe (M4).

Componentele modulelor sunt dispuse pe placi de circuit imprimat, realizate din punct de vedere geometric astfel incat sa respecte configuratia vectorului suborbital (Figura 2).

Toti senzorii pe 3 axe sunt plasati in centrul placilor si cu axele orientate in aceleasi directii (Figura 3).

### 2. Descriere metodei de calcul

#### 2.1 Semnalele masurate de senzori

Dupa rotirea măsurătorilor pentru suprapunerea axelor sistemului de măsură peste axele triedrului legat de corp, avem la dispoziție 6 mărimi:

$p, q, r$  - componentele vitezei unghiulare după axele triedrului legat corp, măsurate de girometre

$a_{xa}, a_{ya}, a_{za}$  - componentele accelerației mișcării după axele triedrului legat de corp, măsurate de accelerometre.

#### 2.2 Determinarea unghiurilor de rotatie

Dupa cum se arată în lucrarea [1] o rotație între doua triedre oarecare poate fi exprimată cu ajutorul unui singur unghi  $\sigma$  în jurul unei axe de versori  $l, m, n$ .

Dar rotația generală a unghiului  $\sigma$  poate fi exprimată prin suprapunerea a trei rotații simultane după axele triedrului mobil ( $Oxyz$ ) de unghiuri:

$$\xi = \sigma l; \eta = \sigma m; \zeta = \sigma n \quad (1)$$

unde:

- $\xi$  - unghi de rotație în jurul axei x (unghiul de ruliu)
- $\eta$  - unghi de rotație în jurul axei y
- $\zeta$  - unghi de rotație în jurul axei z

Cele trei unghiuri definite anterior verifica relația:

$$\sigma^2 = \xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 \quad (2)$$

În lucrarea [1] se arată că dacă se știu vitezele unghiulare, unghiurile de rotație se obțin cu relația:

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi} \\ \dot{\eta} \\ \dot{\zeta} \end{bmatrix} = \mathbf{W}_R \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (3)$$

unde:

$$\mathbf{W}_R = \begin{bmatrix} f\xi^2 + h & f\eta\xi - \zeta/2 & f\zeta\xi + \eta/2 \\ f\xi\eta + \zeta/2 & f\eta^2 + h & f\zeta\eta - \xi/2 \\ f\xi\zeta - \eta/2 & f\eta\zeta + \xi/2 & f\zeta^2 + h \end{bmatrix} \quad (4)$$

în care

$$h = \frac{\sigma}{2 \tan(\sigma/2)}; \quad f = \frac{1-h}{\sigma^2}, \quad (5)$$

În forma scalară relația (3) devine:

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= (f\xi^2 + h)p + (f\eta\xi - \zeta/2)q + (f\zeta\xi + \eta/2)r; \\ \dot{\eta} &= (f\xi\eta + \zeta/2)p + (f\eta^2 + h)q + (f\zeta\eta - \xi/2)r; \\ \dot{\zeta} &= (f\xi\zeta - \eta/2)p + (f\eta\zeta + \xi/2)q + (f\zeta^2 + h)r. \end{aligned} \quad (6)$$

### 2.3 Determinarea coordonatelor liniare

Din lucrarea [1], rezultă că dacă punctul de măsurare a accelerațiilor nu coincide cu centrul de masă a lansatorului, dar presupunem că poziția lor relativă este fixă în timp, atunci accelerațiile centrului de masă în triedrul „corp” se pot determina cu relațiile:

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{xa} \\ a_{ya} \\ a_{za} \end{bmatrix} - \mathbf{B}_\Omega \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix} \quad (7)$$

unde:

- $x_a, y_a, z_a$  - coordonatele accelerometrului in sistemul legat de corp
- $a_{xa}, a_{ya}, a_{za}$  - valorile accelerațiilor indicate de accelerometru
- $a_x, a_y, a_z$  - accelerațiile centrului de masă,

iar:

$$\mathbf{B}_\Omega = \dot{\mathbf{A}}_\Omega + \mathbf{A}_\Omega^2 \equiv \begin{bmatrix} -(q^2 + r^2) & pq - \dot{r} & rp + \dot{q} \\ pq + \dot{r} & -(r^2 + p^2) & qr - \dot{p} \\ rp - \dot{q} & qr + \dot{p} & -(p^2 + q^2) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Dacă se neglijează componentele accelerațiilor unghiulare, greu de determinat, din (7) se obțin următoarele relații scalare:

$$\begin{aligned} a_x &= a_{x_0} + (q^2 + r^2)x_a - pqy_a - prz_a \\ a_y &= a_{y_0} - pqx_a + (r^2 + p^2)y_a - qrz_a \\ a_z &= a_{z_0} - rpx_a - qry_a + (p^2 + q^2)z_a \end{aligned} \quad (9)$$

aceasta putând fi considerată o relație de corecție .

Mai departe, accelerațiile se pot roti în triedrul de start:

$$[a_{x_0} \ a_{y_0} \ a_{z_0}]^T = \mathbf{B}_I [a_x \ a_y \ a_z]^T \quad (10)$$

unde, (utilizand unghiuri de rotație)  $\mathbf{B}_I$  este matricea de rotație de la triedrul legat de corp la triedrul de start (inertțial):

$$\mathbf{B}_I = \begin{bmatrix} a\xi^2 + c & a\eta\xi - b\zeta & a\zeta\xi + b\eta \\ a\xi\eta + b\zeta & a\eta^2 + c & a\zeta\eta - b\xi \\ a\xi\zeta - b\eta & a\eta\zeta + b\xi & a\zeta^2 + c \end{bmatrix} \quad (11)$$

unde:

$$a = \frac{1-c}{\sigma^2}; \quad b = \frac{s}{\sigma}; \quad c = \cos \sigma; \quad s = \sin \sigma \quad (12)$$

Relația (10) poate fi pusa și in forma scalară:

$$\begin{aligned} a_{x_0} &= (a\xi^2 + c)a_x + (a\eta\xi - b\zeta)a_y + (a\zeta\xi + b\eta)a_z; \\ a_{y_0} &= (a\xi\eta + b\zeta)a_x + (a\eta^2 + c)a_y + (a\zeta\eta - b\xi)a_z; \\ a_{z_0} &= (a\xi\zeta - b\eta)a_x + (a\eta\zeta + b\xi)a_y + (a\zeta^2 + c)a_z \end{aligned} \quad (13)$$

Prin integrarea accelerațiilor în triedrul de start se determină vitezele în triedrul de start:

$$[\dot{v}_x \ \dot{v}_y \ \dot{v}_z]^T = [a_{x_0} \ a_{y_0} \ a_{z_0}]^T \quad (14)$$

iar apoi printr-o nouă integrare coordonatele:

$$[\dot{x}_0 \ \dot{y}_0 \ \dot{z}_0]^T = [v_x \ v_y \ v_z]^T \quad (15)$$

## 2.4 Formarea semnalelor de dirijare

Se pleacă de la semnalele de control a parametrilor de interes:

$$u_z = k_u^h h_z; u_\phi = k_u^\xi \tilde{\xi} + k_u^{\dot{\xi}} \dot{\tilde{\xi}}; u_\theta = k_u^\eta \tilde{\eta} + k_u^{\dot{\eta}} \dot{\tilde{\eta}} + k_u^{I\eta} \tilde{I}_\eta; u_\zeta = k_u^\zeta \tilde{\zeta} + k_u^{\dot{\zeta}} \dot{\tilde{\zeta}} \quad (16)$$

având semnificația:

- $u_z$  - semnalul de control abaterii laterale
- $u_\xi$  - semnalul de control al unghiului după axa x
- $u_\eta$  - semnalul de control al unghiului după axa y
- $u_\zeta$  - semnalul de control al unghiului după axa z.

Parametrii relativi de comandă  $\tilde{\eta}; \tilde{\zeta}; \tilde{\xi}; h_z$  sunt dați de:

$$\tilde{\eta} = \eta - \eta_d; \zeta = \zeta - \zeta_d; \tilde{\xi} = \xi - \xi_d; h_z = z_0 - z_{od} \quad (17)$$

unde:  $\eta_d; \zeta_d; \xi_d; z_{od}$  sunt mărimile de referință, dintre care unghiul programat de tangaj scade liniar:

$$\dot{\eta}_d = \eta_d - \dot{\eta}_d / t \quad (18)$$

Suplimentar față de ecuațiile de mișcare se mai definește termenul integral:

$$\dot{\tilde{I}}_\eta = \tilde{\eta} \quad (19)$$

Legătura dintre componentele derivatele unghiurilor tip Euler și componentele vitezei de rotație în triedrul mobil este dată de relația (6).

În acest caz, se poate scrie comanda de dirijare în formă matriceală:

$$\begin{bmatrix} u_l \\ u_m \\ u_n \end{bmatrix} = -\mathbf{U}_R \begin{bmatrix} u_\xi \\ u_\eta \\ u_\zeta \end{bmatrix} - \mathbf{T}_2 \mathbf{A}_l \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_z \end{bmatrix} \quad (20)$$

unde:

$$\mathbf{U}_R = \mathbf{W}_R^{-1} = \begin{bmatrix} e\xi^2 + b & e\eta\xi + a\zeta & e\zeta\xi - a\eta \\ e\xi\eta - a\zeta & e\eta^2 + b & e\zeta\eta + a\xi \\ e\xi\zeta + a\eta & e\eta\zeta - a\xi & e\zeta^2 + b \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{A}_l = \mathbf{B}_l^T = \begin{bmatrix} a\xi^2 + c & a\eta\xi + b\zeta & a\zeta\xi - b\eta \\ a\xi\eta - b\zeta & a\eta^2 + c & a\zeta\eta + b\xi \\ a\xi\zeta + b\eta & a\eta\zeta - b\xi & a\zeta^2 + c \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, e = \frac{1-b}{\sigma^2}$$

În final comanda de dirijare se poate pune în formă scalară:

$$\begin{aligned} u_l &= -(e\xi^2 + b)u_\xi - (e\eta\xi + a\zeta)u_\eta - (e\zeta\xi - a\eta)u_\zeta \\ u_m &= -(e\xi\eta - a\zeta)u_\xi - (e\eta^2 + b)u_\eta - (e\zeta\eta + a\xi)u_\zeta + (a\zeta^2 + c)u_x \\ u_n &= u_{nb} - (e\xi\zeta + a\eta)u_\xi - (e\eta\zeta - a\xi)u_\eta - (e\zeta^2 + b)u_\zeta - (a\zeta\eta + b\xi)u_x \end{aligned} \quad (22)$$

si este compusă din trei semnale care, după amplificare, se aplică sistemului de comandă reactivă (RCS) pe cele trei canale:

$u_l$  - comanda in ruliu

$u_m$  - comanda in girație

$u_n$  - comanda în tangaj

$u_{nb}$  - semnal de compensare a greutateii.

Algoritmul de calcul astfel descris este utilizat pentru formarea semnalului de dirijare la sistemul de ghidare, navigatie si control care face obiectul prezentei propunerii de inventie.

### 3. Revendicari

A. Utilizarea unui  $\mu$ Controller programabil cu consum foarte mic de energie (Ultra Low Power) si cu unitate de calcul in virgula mobila, ceea ce permite efectuarea unor calcule complexe, caracteristice unui procesor numeric de semnal (DSP), dar cu un buget energetic sensibil imbunatatit.

B. Metoda de determinarea a coordonatelor liniare si a atitudinii vehiculului bazata pe unghiuri de rotatie.

### 4. Referinte

- [1] Chelaru T.V. „Dinamica Zborului–Racheta dirijată”, Ed a - II- a revizuita și adăugită , Ed. Printech, ISBN 973-718-013-5, București, 434 pag. ,mai 2004.
- [2] „Proiect Lansator suborbital de testare, dezvoltare subsisteme neconvenționale” Raport științific si tehnic etapa 1, decembrie 2012.

- [3] STP M 040421-99, „Indici de calitate a zborului rachetei comandate - Cerințe tehnice generale”, București, 1998.
- [4] STP M 40455-99, „Sistemul rachetă dirijată - Terminologie și simboluri”, București, 1998.
- [5] STP M 40406-99, „Sistemul rachetă comandată - Terminologie și simboluri”, București, 1998.
- [6] STP M 40405-96, „Caracteristici geometrice și aerodinamice ale rachetei - Terminologie și simboluri”, București, 1995;
- [7] STP M 40420-96 -Derivatele coeficienților torsorilor dinamici - Terminologie și simboluri, București, 1995;
- [8] Chelaru T.V., Barbu C. “Mathematical model for sounding rockets, using attitude and rotation angles”, International Journal of Applied Mathematics and Informatics, ISSN 2074-1278, Issue 1, Volume 3, pp. 35-44, 2009.
- [9] Chelaru T.V., Stoica A.M., Barbu C., Chelaru A., “Attitude control for small satellites using rotation angles”, Proceedings of 1-st IAA Conference on Dynamics and Control of Space Systems–DyCoSS’2012, pp. 719-738, ISBN 978-0-87703-588-6 Porto, Portugalia, 19-21 Mar. 2012.
- [10] Niță M.M., Stoica A., Dănăilă S., Pârvu P., Teodorescu C., “Derivatele coeficienților torsorilor dynamic”, STP M 40420-96, 1995, Standard de Tehnică Profesională Militară.

## 5. Abrevieri

RCS - Reaction Control System (Sistem de comanda reactiva)

GPS - Global Positioning System (Sistem de pozitionare globala prin satelit)

GNC - Guidance Navigation and Control System (Sistem de ghidare navigatie si control)

MEMS - Micro Electro Mechanical System (Dispozitive micro-electro-mecanice)

Terminologia si notațiile sunt in concordanță cu standardele [3], [4], [5], [6], si [7].

$$\mathbf{A}_1 = \mathbf{B}_1^T = \begin{bmatrix} a\xi^2 + c & a\eta\xi + b\zeta & a\zeta\xi - b\eta \\ a\xi\eta - b\zeta & a\eta^2 + c & a\zeta\eta + b\xi \\ a\xi\zeta + b\eta & a\eta\zeta - b\xi & a\zeta^2 + c \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, e = \frac{1-b}{\sigma^2}$$

În final comanda de dirijare se poate pune în formă scalară:

$$\begin{aligned} u_l &= -(e\xi^2 + b)u_\xi - (e\eta\xi + a\zeta)u_\eta - (e\zeta\xi - a\eta)u_\zeta \\ u_m &= -(e\xi\eta - a\zeta)u_\xi - (e\eta^2 + b)u_\eta - (e\zeta\eta + a\xi)u_\zeta + (a\zeta^2 + c)u_z \\ u_n &= u_{nb} - (e\xi\zeta + a\eta)u_\xi - (e\eta\zeta - a\xi)u_\eta - (e\zeta^2 + b)u_\zeta - (a\zeta\eta + b\xi)u_z \end{aligned} \quad (22)$$

si este compusă din trei semnale care, după amplificare, se aplică sistemului de comandă reactivă (RCS) pe cele trei canale:

- $u_l$  - comanda in ruliu
- $u_m$  - comanda in giratie
- $u_n$  - comanda în tangaj
- $u_{nb}$  - semnal de compensare a greutateii.

Algoritmul de calcul astfel descris este utilizat pentru formarea semnalului de dirijare la sistemul de ghidare, navigatie si control care face obiectul prezentei propunerii de inventie.

### 3. Revendicari

A. Utilizarea unui  $\mu$ Controller programabil cu consum foarte mic de energie (Ultra Low Power) si cu unitate de calcul in virgula mobila, ceea ce permite efectuarea unor calcule complexe, caracteristice unui procesor numeric de semnal (DSP), dar cu un buget energetic sensibil imbunatatit.

B. Metoda de determinarea a coordonatelor liniare si a atitudinii vehiculului bazata pe unghiuri de rotatie.

### 4. Referinte

- [1] Chelaru T.V. „Dinamica Zborului–Racheta dirijată”, Ed a - II- a revizuita și adăugită , Ed. Printech, ISBN 973-718-013-5, București, 434 pag. , mai 2004.
- [2] „Proiect Lansator suborbital de testare, dezvoltare subsisteme neconvenționale” Raport științific și tehnic etapa 1, decembrie 2012.



6. Figuri

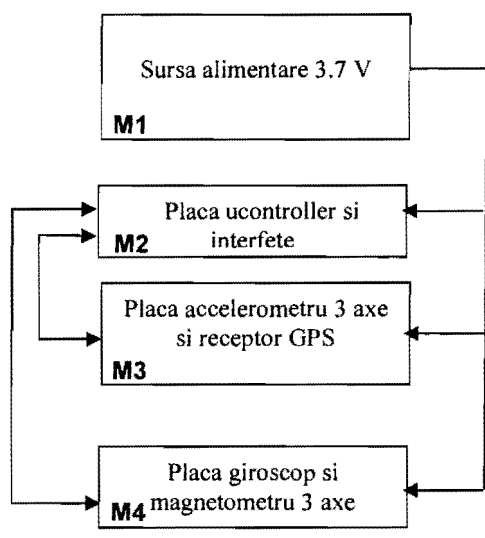


Figura 1

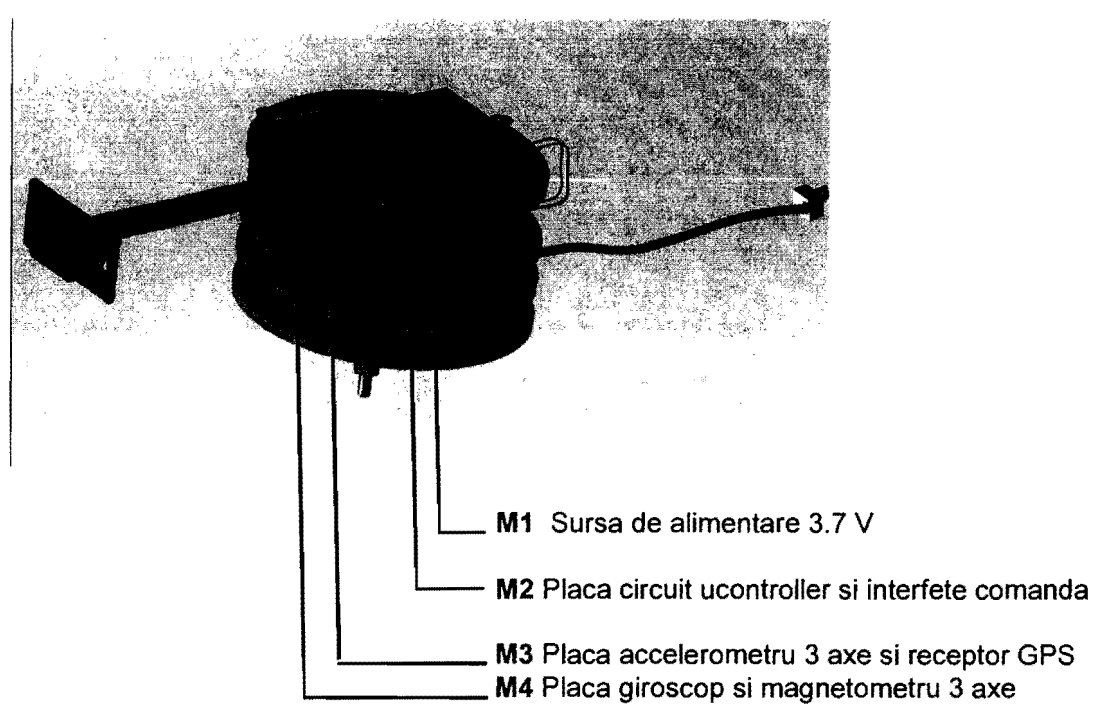


Figura 2

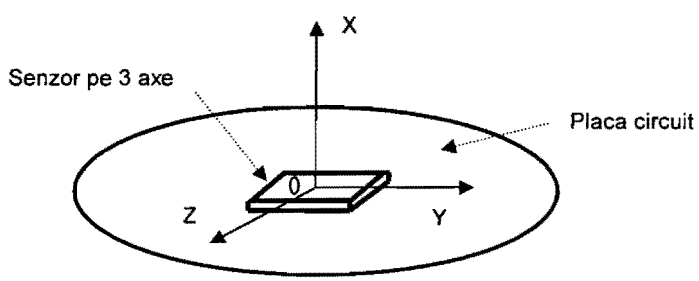


Figura 3