

## МЕРЕЊЕ, АКВИЗИЦИЈА И ПРОЦЕСИРАЊЕ ПАРАМЕТАРА ВОЋЕНЕ РАКЕТЕ ТЕЛЕМАТАРСКИМ СИСТЕМОМ

Милоје Ђекић, Милорад Миловановић, Славица Зуковић, Војнотехнички институт ВЈ, Београд

**Садржај** – У раду је конципиран и предложен метод мерења параметара (аксијалног, нормалног, бочног убрзања и командног сигнала) вођене противоклопне (ПО) ракете у реалним (летним) условима, на бази конкретног телеметарског система. Третирана је сложена проблематика имплементације посебних сензора унутар тела ракете као и телеметарског предајника одређених карактеристика. Описани су хардвер, софтвер и лабораторијска тестирања предложеног метода и приказани резултати извршених мерења.

### 1. УВОД

У оквиру стратегије развоја система вођења и управљања (СВУ) ПО ракете од суштинског значаја је дефинисање мерних метода и одговарајуће опреме у различитим фазама пројектовања. Све то сачињава елементе тзв. сложеног експеримента који садржи адекватну софтверску и хардверску подршку.

Садржај и задатак мерења и аквизиције параметара вођене ракете телеметрисањем конципиран је и у појединим сегментима примењен у стратегији развоја система високох перформанси (СВП) за вођење и управљање (ВУ) ПО ракетом (Сл. 1). Систем мерења је представљен у облику низа модула чији су параметри одређени конкретним задацима испитивања и структуром мерног система. При томе није узето у обзир управљање организацијом модула. Добијене вредности естимације стања и параметара на основу мерења телеметарским системом АУДИН, користе се као еталонске вредности при одређивању ефикасности испитивања СВУ. Ово је нарочито важно када се зна да тачност и ниво аутоматизације процеса добијања тражених параметара суштински утичу на обим и трајање испитивања, а тиме и на квалитет пројектованог СВУ. Метод телеметарских испитивања посебно се показао ефикасним као комплементаран методима базираним на другим мерним системима (нпр. кинофототеодолитском-КФТ)[1].

### 2. ДЕФИНИСАЊЕ ПРОБЛЕМА

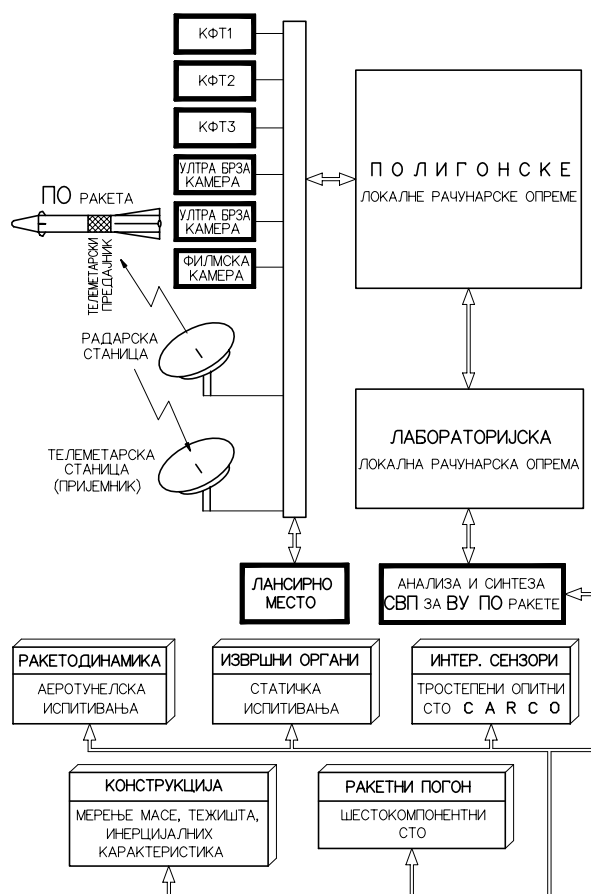
Унутар стратегије развоја СВП за ВУ ПО ракетом постоје фазе у којима је неопходно креирати што тачнији (еталонски) математички модел. У циљу достизања захтеване тачности потребно је, на основу аеротунелских, лабораторијских и полигонских (летних) експеримената, извршити естимацију стања и параметара СВУ ПО ракете на такав начин да примењени алгоритми естимације обезбеђују већу тачност и поузданост добијених резултата.

Посебно су битни параметри лета вођене ракете добијени телеметарским и КФТ системом спољно-трајекторних мерења који чине јединствену целину.

Параметри СВУ ПО ракете који могу да се измере и телеметарским и КФТ системом су: брзина, убрзање, путања, висина, углови курса, нагиба и закрета.

Помоћу телеметарског система могуће је, у току лета обезбедити мерење и других величина карактеристичних за СВУ ПО ракете (сигнал управљања, време рада маршевског мотора, излазак на режим и време рада

термалних батерија, армирање упаљача, итд.). Због ограниченог простора у раду су третирана само мерења аксијалног, бочног и нормалног убрзања и командног сигнала који, након обраде, на актуаторима извршних органа постаје сигнал управљања.



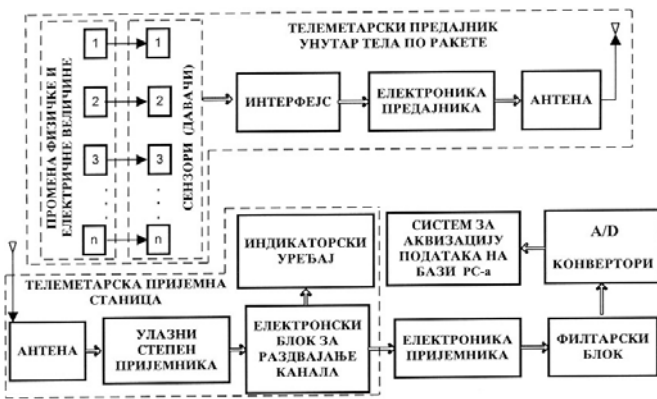
Сл. 1 Глобална структура система за мерење, аквизицију и процесирање сигнала у стратегији развоја СВП за ВУ ПО ракетом

Неопходно је дефинисати структуру мерног система (Сл. 2) на бази телеметарског примопредајника АУДИН, акцелерометра АDXL, NOTEBOOK-а или РС-а, који уз креирану и тестирану софтверску подршку омогућава поуздано мерење убрзања као и командног сигнала који се реализује управљачким органима у току лета ракете.

Вођена ракета на путањи развија убрзања а акцелерометри мере разлику стварног и гравитационог убрзања. Постављањем акцелерометара у задату тачку са координатама  $x_a, y_a, z_a$  и оријентацијом мерних оса дуж динамичког координатног система ( $Oxuz$ ), добијамо измерене вредности убрзања [2]:

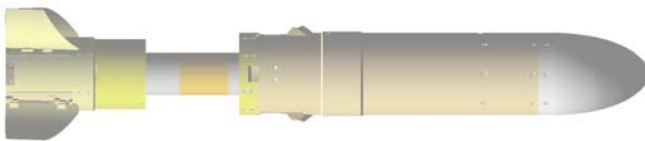
$$\begin{aligned}
 S_x &= a_x - g_x = \dot{u}_K - rv_K + qw_K - (q^2 + r^2)x + \\
 &\quad + (qp - \dot{r})y + (rp + \dot{q})z + g \sin \Theta, \\
 S_y &= a_y - g_y = \dot{v}_K - pw_K + rU_K - (r^2 + p^2)y + \\
 &\quad + (rq - \dot{p})z + (pq + \dot{r})x - g \sin \Phi \cos \Theta, \\
 S_z &= a_z - g_z = \dot{w}_K - qU_K + pv_K - (p^2 + q^2)z + \\
 &\quad + (pr - \dot{q})x + (qr + \dot{p})y - g \cos \Phi \cos \Theta,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где су  $a_x, a_y, a_z$ -компоненте убрзања задате тачке;  $g_x, g_y, g_z$ -компоненте гравитационог убрзања;  $u_K, v_K, w_K$ -компоненте кинематичке брзине;  $p, q, r$ -компоненте угаоне брзине;  $x, y, z$ -координате центра масе у динамичком координатном систему;  $\Phi, \Theta, \Psi$ -Ојлерови углови.



Сл. 2 Глобална структура мерења, аквизиције и процесирања сигнала на бази телеметарског система **AYDIN**

На основу измерених вредности помоћу акцелерометра **ADXL**, интегралењем добијамо компоненте брзине и путању у хоризанталној и вертикалној равни ракете. Дефинисани захтеви и постојећа опрема опредељују варијанту мерења, аквизиције и процесирања сигнала (Сл. 2) и варијанте уградње телеметарског предајника и акцелерометара у вођену ПО ракету (Сл. 3).



Сл. 3 ПО вођена ракета са уграђеним телеметарским предајником и акцелерометрима **ADXL**

Облик командног сигнала, којег треба мерити на ракети и његова стварна реализација се детектују помоћу струја намотаја унутар електромагнетног дела актуатора извршних органа.

### 3. ОПИС ХАРДВЕРА

Описани су најважнији делови система за мерење, аквизицију и процесирање сигнала на основу глобалне структуре приказане на Сл. 2 и са реалним компонентама у лабораторијској ТЕСТ конфигурацији и полигонским условима.

Телеметарски систем РАМ/ФМТ 1145 састоји се из ФМТ предајне групе и пријемне земаљске станице.

Предајну групу чине:

1. РАМ комутатор са 48 канала фреквенције одабирања 100 КHz, од чега 5 канала за синхронизацију.
2. FM предајник фреквенције 2.2165 GHz снаге 2 W.
3. Одговарајућа штампана антена.

Предајна група предвиђена је за рад у посебним климатомеханичким условима уз  $28 \pm 4V, 700mA$ .

Јединица ФМТ је уграђена у модификовано кућиште пречника 70 mm и прилагођена за пренос 12 телеметарских канала у опсегу 0-5V. Могућа је допуна до 17 канала модификацијом инсталације мултиплексера предајника и пријемника.

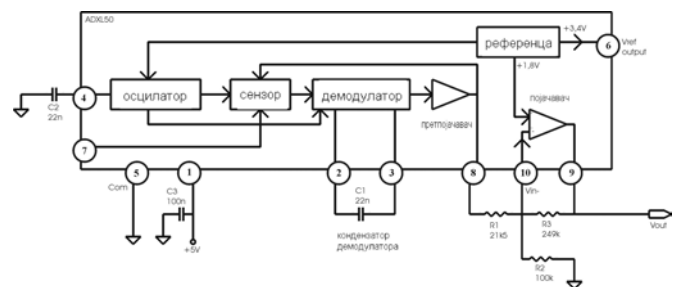
У циљу телеметарских испитивања релевантних физичких величина објекта телеметрисања потребно је извршити линеарну трансформацију поменутих величина на напонски опсег 0-5 V, што се постиже интерфејсом сопствене израде.

Земаљска станица састоји се од антенског система са аутоматским праћењем, телеметарског пријемника, РАМ/РАМ синхронизатора, D/A конвертора и РС-а или NOTEBOOK-а. Дигитално управљиви активни филтри омогућавају електричну филтрацију на телеметарским каналима пре А/D конверзије, и то у опсегу који се бира софтверски са рачунара пре саме аквизиције.

Акцелерометри **ADXL** су комплетно интегрисани монолитни давачи, са кондиционирањем излазног мерног сигнала намењени мерењу убрзања. Осетљивост давача је прекалибрисана.

На Сл. 4 приказана је функционална блок шема акцелерометра **ADXL** који је уграђен у ПО ракету.

Акцелерометар има могућност провере функционалности у self-тест процедури, која се обавља применом спољњег сигнала. Интегрисани баферски појачавач, са пуним излазним напонским опсегом (0,25-4,75) V, омогућава континуално подешавање осетљивости и излазног напонског нивоа за нулто убрзање. За филтрацију излазног сигнала може се користити једнополна или двополна пасивна мрежа. За директно повезивање на мерни систем нису потребне посебне активне компоненте.



Сл. 4 Функционална блок шема акцелерометра **ADXL** и припадајуће електронике

Ови акцелерометри су засновани на капацитивном мерном методу. Аналогни напонски излаз је директно сразмеран убрзању. Постоји интерни референтни извор, температурна компензација и све то утиче на постизање високе тачности и линеарности на целом опсегу радних температура.

У представљеној имплементацији, у овом раду, користи се основна верзија акцелерометра **ADXL 50** који је намењен мерењу убрзања у опсегу  $\pm 50 g$  и опсегу фреквенција од (0-1) КHz. Осетљивост акцелерометра је 19 mV/g што резултује пуним напонским опсегом од  $\pm$

0,95 V за улазни опсег убрзања од  $\pm 50$  g. Излазни напон при нултом убрзању износи +1,8 V. Дизајнирани су за рад у опсегу радних температура  $-40$  до  $+85^\circ$  C. Резултати основних лабораторијских испитивања акцелерометра ADXL телеметрисањем приказани су у [3].

#### 4. ОПИС СОФТВЕРА

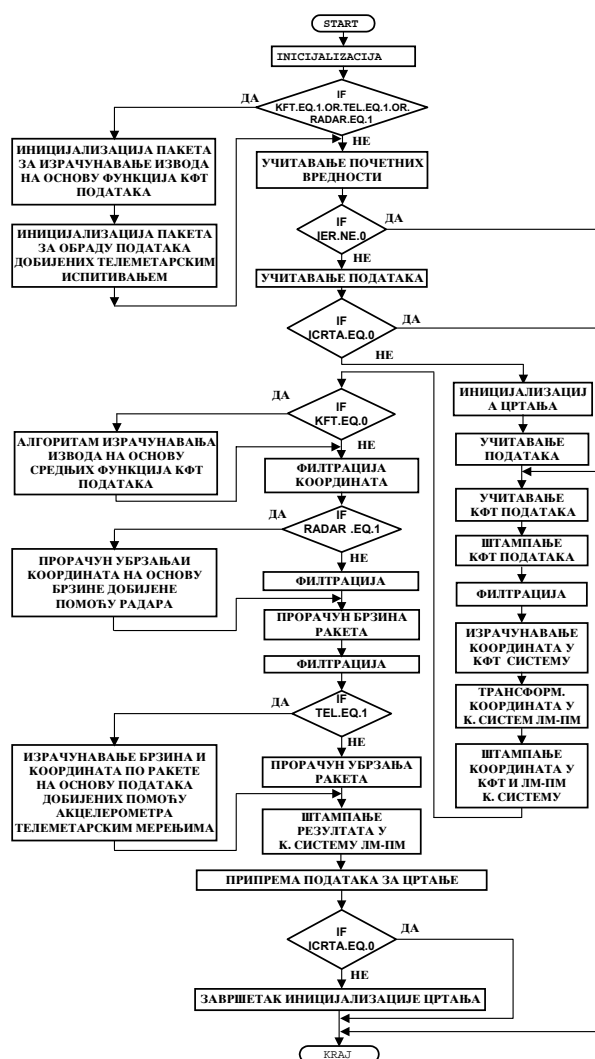
Употребљени софтвер је интегрисана функционална комбинација различитих пакета: LABTECH NOTEBOOK, SAMPLER, драјвера PCI 20046 и софтверског пакета TEOTERKOM.

На Сл. 5 приказана је глобална структура оригиналног софтверског пакета TEOTERKOM развијеног после дугогодишњих истраживања који омогућава израчунавање спољнотрајекторних параметара (као дела вектора стања) на бази мерења КФТ и телеметарским системом. Унутар софтвера искоришћене су, поред осталог, све теоријске поставке и развијени и тестирани софтвери [4,5] у циљу добијања што квалитетнијих параметара лета ПО ракете у контексту развоја СВП за ВУ. Овај софтверски пакет омогућава конципирање и испитивање оптималних алгоритама стабилног успостављања извода задатог степена за широку класу мерљивих функција које имају скокове и прекиде, а омогућава добијање извода са гарантованом минималном грешком.

Софтверски пакет TEOTERKOM поседује флексибилну, модуларну, структуру захваљујући чему је могуће обезбедити његову модификацију и проширење. Комуникација са софтверским пакетом је омогућена и при постојању минималног броја априорних информација. При томе се задају само вредности измерене функције, почетне вредности параметара подешавања  $\alpha = \alpha_0$  и априорне претпоставке о припадности мерене функције одређеној класи функција. Једноставност комуникације са софтверским пакетом TEOTERKOM постиже се унапред дефинисаним подацима и алгоритмима везаним за избор једначина у квадратном облику и конкретних класа обрађиваних функција. У циљу решавања постављеног задатка у софтверу је предвиђена могућност аутоматског избора параметара подешавања који омогућава оптималност нумеричког израчунавања извода. Омогућено је да корисник сам креира потребан алгоритам израчунавања извода на основу потпрограма који се налазе у библиотеци.

У овом раду, у циљу илустрације, примењен је подешавајући динамички филтер са могућношћу избора подешавајућег параметра  $\alpha$  на основу метода максималне веродостојности. За реализацију одговарајућег алгоритма естимације неопходно је утврдити облик једначина стања система, једначина мерења и одговарајућу статистику случајних величина [6].

У оквиру софтверског пакета TEOTERKOM важно место заузима подешавајући алгоритам филтрације који садржи следеће блокове: блок почетних вредности, блок дефинисања корака интеграције, блок израчунавања априорне естимације вектора стања, блок израчунавања подешавајућег параметра, блок израчунавања коефицијената појачања динамичког филтера, блок израчунавања априорне корелационе матрице грешке естимације и блок израчунавања естимације вектора стања.



Сл. 5 Глобални дијаграм тока софтвера TEOTERKOM

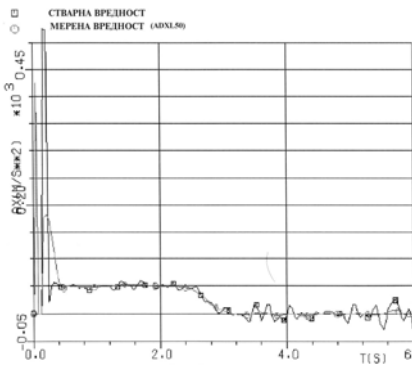
Софтверски пакет TEOTERKOM реализован је у MS FORTRAN-у и може се применити на различитим рачунарима. У конкретној пракси развоја СВП за ВУ ПО ракетом, софтверски пакет TEOTERKOM може се ефикасно искористити у оквиру аутоматизованог система обраде експерименталних мерења како у лабораторијским тако и у полигонским условима и то у форми софтверског модула.

#### 5. РЕЗУЛТАТИ

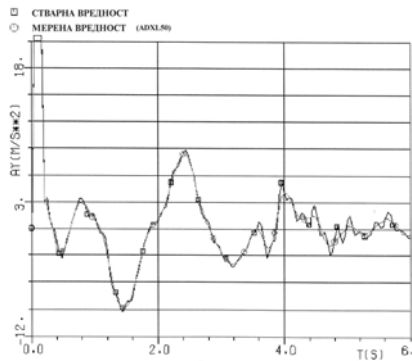
Због ограниченог простора, приказани су само резултати мерења, аквизиције и процесирања сигнала на бази телеметарског примопредајног система AYDIN у лабораторијским условима.

На Сл. 6 приказан је резултат теста акцелерометра ADXL 50(1) на CARCO симулатору лета ракете у динамичким условима. Овај акцелерометар намењен је мерењу убрзања дуж аксијалне осе ракете. Резултати мерења су у границама дефинисане тачности.

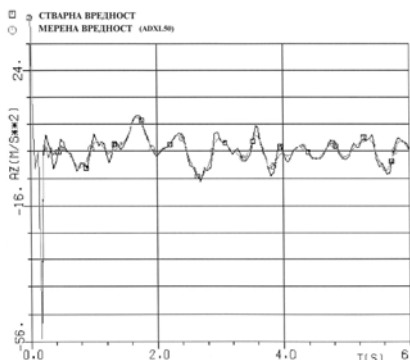
На Сл. 7 приказан је резултат теста акцелерометра ADXL 50(2), такође на CARCO симулатору лета ракете, под истим условима као у претходном тестирању. Намењен је мерењу бочног убрзања и има нешто лошије карактеристике због недовољно квалитетно изведене калибрације у статичким условима. Пре уградње неопходно је додатно тестирање.



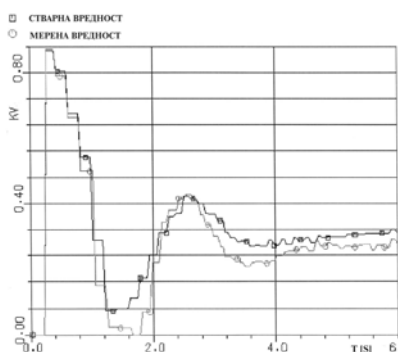
Сл. 6 Резултат тестирања акцелерометра ADXL(1) на CARCO симулатору лета



Сл. 7 Резултат тестирања акцелерометра ADXL(2) на CARCO симулатору лета



Сл. 8 Резултат тестирања акцелерометра ADXL(3) на CARCO симулатору лета



Сл. 9 Телеметрисање команде по висини Kv у лабораторијским условима

На Сл. 8 приказан је резултат теста акцелерометра ADXL 50(3), намењеног мерењу нормалног убрзања. Тестирање је реализовано под истим условима као у претходном. Резултат је сасвим задовољавајући, иако подешавајући параметар филтера има нешто већу вредност него у претходним случајевима.

На Сл. 9 приказан је резултат мерења команде по висини, уз задовољење свих услова коректног пријема сигнала унутар телеметарске аквизиционе петље.

У полигонским (летним) испитивањима, на основу досадашњих искустава, реално је очекивати проблеме тзв. статусног задовољења услова рада телеметарске аквизиционе петље, али и одговарајуће разрешење тих проблема.

Сви аспекти употребе телеметарског система у поступку мерења, аквизиције и процесирања сигнала при испитивању ПО вођене ракете у полигонским условима биће третирану у другом раду.

## 6. ЗАКЉУЧАК

Мерење, аквизиција и процесирање параметара вођене ракете, базирани на телеметарском систему AYDIN део су интегрисаног и веома сложеног система примењеног у стратегији развоја СВП за ВУ ПО ракетом. Конципиран је, развијен и тестиран софтверско-хардверски систем у лабораторијским условима и намењен испитивању вођених ракета у лету.

Овај систем је комплементаран КФТ и радарском систему са којима је, захваљујући софтверском пакету TEOTERKOM, интегрисан у јединствену целину чиме је постигнута већа тачност и поузданост добијања естимације стања и параметара СВУ ракете. Тестирани софтверско-хардверски приступи имају и једну универзалну димензију која их чини применљивим и у областима изван ракетне технике, истовремено омогућавајући нове креативне иновације.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Милорад Миловановић, Милоје Ђекић, "Трајекторна мерења у условима постојања више локалних рачунарских мрежа", ЕТРАН, Београд, 1993.
- [2] Ю.А. Бэлов, и др. "Математическое обеспечение сложного эксперимента", Киев, Наук, Думка, 1982.
- [3] М. Миловановић, "Софтвер за аквизицију и анализу сигнала акцелерометра телеметрисаног у лабораторијским условима (MS FORTRAN, MS DOS, PC)", ВТИ, Београд, 1997.
- [4] М. Миловановић, "Софтвер за аквизицију података помоћу телеметарског система AYDIN (MS FORTRAN, MS DOS, PC)", ВТИ, Београд, 1996.
- [5] М. Миловановић, "Софтвер за обједињену анализу спољнотрајекторних параметара и параметара система вођења и управљања противоклопне ракете (MS FORTRAN, MS DOS, PC)", ВТИ, Београд, 1992.
- [6] М. Миловановић, Милоје Ђекић, "Процедура естимације стања и параметара вођене ракете", ЕТРАН, Сокобања, 2000.

**Abstract** – This paper outlines and suggests a method the guided anti-tank missile parameters (axial, normal and side acceleration) measurement in real (flight) conditions on the basis of a concrete telemetry system. The complex problem of special transducers - sensors implementation within the missile corpus is considered as well as the telemetry transmitter with certain characteristics. Some laboratory indoor tests of the proposed method are described and the results of the conducted tests are presented.

## GUIDED MISSILE PARAMETERS MEASUREMENT AND ACQUISITION BY TELEMETRY SYSTEM

Милоје Ђекић, Милорад Миловановић, Славица Зуковић