

METODOLOGIJA KALIBRACIJE PCM/FM TELEMETRIJSKOG SISTEMA ZA ISPITIVANJE LETELICA

Zoran Filipović, Vazduhoplovni opitni centar, Beograd

Sadržaj – U radu je prikazana metodologija kalibracije PCM/FM telemetrijskog sistema za ispitivanje letelica. Takođe su definisani iprofili test letova tokom kojih se mere relevantni parametri u cilju utvrđivanja performansi telemetrijskog sistema.

1. UVOD

Osnovna svrha ispitivanja prototipova letelice u zemaljskim i letnim uslovima je utvrđivanje relevantnih karakteristika koje definišu predviđene performanse letelice u realnim uslovima njenog rada. To se ostvaruje merenjem velikog broja parametara tokom kompleksnog procesa ispitivanja u različitim režimima rada letelice upotrebom posebnih telemetrijskih sistema (PCM/FM. *Pulse Code Modulation/ Frequency Modulation*). Osnovna funkcija PCM/FM telemetrijskog sistema je omogućavanje pouzdanog i neprekidnog prenosa signala izmerenih veličina sa letelice koja se ispituje do zemaljske prijemne stanice. U jednom tipičnom mernom procesu, neka veličina mora biti detektovana u senzorskom delu mernog pretvarača, konvertovana u ekvivalentni električni naponski ili strujni nivo, izvršena A/D konverzija i prenešena do kompatibilnog prijemnog dela u kome se vrši rekonstrukcija i prezentacija izmerene veličine. Tokom tih procesa merna veličina ne sme biti u znatnoj meri degradirana, jer bi to uticalo na utvrđivanje stvarnih performansi letelice. [2]

2. MODEL JEDNOG TELEMETRIJSKOG KANALA

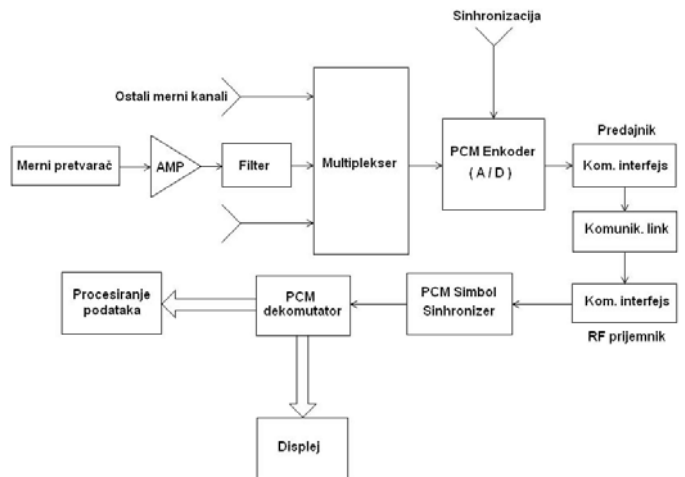
Da bi se izvršila analiza procesa merenja upotrebom telemetrijskog sistema, posmatra se uprošćeni merni lanac počevši od mernog pretvarača do dela u kojem se vrši prezentacija njegove izmerene vrednosti (Sl 1). To je model jednog mernog kanala PCM/FM telemetrijskog sistema koji se sastoji iz dva dela: prvi deo je integrisan na letelici, a drugi kompatibilni zemaljski deo vrši rekonstrukciju i prezentaciju izmernih veličina.

U jednom mernom kanalu mogu se procesirati različite forme električnih signala. Kod većine mernih pretvarača izlazni električni signal ima analognu formu različitih naponskih i strujnih nivoa. Postoji dosta vrsta MP na čijem izlazu se dobija numerički signal u različitim kodovima koji je proporcionalan mernoj veličini na njegovom ulazu (*Smart Transducers*). Takođe se vrši merenje parametara sa magistrala podataka MIL-1553B koje se konvertuju u fizičke jedinice. Bilo koja forma mernog signala tokom akvizicionog procesa prolazi kroz više stepena procesiranja kao što su: detektovanje, kondicioniranje, odabiranje i digitalizacija, prenos, prijem i rekonstrukcija. Svi ovi procesi se odvijaju u jednom integralnom mernom sistemu čije osnovne metrološke karakteristike zavise od : [3]

1. Mernog opsega.
2. Neophodne merne nesigurnosti .
3. Predviđenog preopterećenja mernog kanala i eventualnih posledica na rezultat merenja.
4. Mogućeg uticaja ambijentalnih uslova na mernu nesigurnost.
5. Optimalne selekcije određenih vrste mernih pretvarača.

Generalno, metrološke katarakteristike se mogu podeliti u tri grupe:

1. Statičke metrološke karakteristike.
2. Dinamičke metrološke karakteristike.
3. Sistemske metrološke karakteristike.



Sl.1. Uprošćena šema jednog telemetrijskog kanala

3. OSNOVNI PRINCIPI NA KOJIMA SE ZASNIVA KALIBRACIJA TELEMETRIJSKOG SISTEMA

Kalibracija je proces utvrđivanja prenosne funkcije telemetrijskog sistema. Transfer funkcija može biti određena kako za pojedinačne komponente mernog sistema tako i za celokupan merni sistem počevši od prvog dela pa do poslednje komponente mernog sistema.

Kalibracija se zasniva na više principa:

1. Pridržavanje poznatim standardima u procesu simulacije određenih vrsta mernih veličina.
2. Merenja i registrovanja izlaznih električnih vrednosti signala pojedinih komponenata mernog sistema u uslovima sličnim stvarnim uslovima eksploatacije letelice.
3. Analiza registrovanih podataka tokom procedure kalibracije.
4. Konverzija (skaliranje) izmerenih električnih vrednosti u jedinice fizičkih mernih veličina.

Neki delovi mernog sistema se pojedinačno u određenim vremenskim intervalima etaloniraju u ovlašćenim Metrološkim laboratorijama (MP) dok se kalibracija telemetrijskog sistema u celini vrši posle završenog procesa integracije merne opreme na letelicama i konfigurisanja telemetrijske kompatibilne prijemne stanice. Određena merenja se vrše sa etalonskim instrumentima čija je tačnost merenja i do 10 puta veća od tražene. Za mnoge procedure kalibracije su razvijeni složeni softversko/hardverski akvizicioni sistemi i metodologije koji se koriste kako u zemaljskim uslovima kalibracije pre, tokom i posle leta. Transfer funkcija je zavisna od više grupa parametara:

1. Uticaja radne sredine: temperatura, pritisak, vlažnost,

ubrzanje, vibracije.

2. Uticaja preko izvora napajanja: šum, varijacije napona napajanja i frekvencije, elektromagnetne interferencije.
3. Uticaja u delu sistema za prijem, dekodovanje i prezentaciju rezultata merenja.

Na osnovu rezultata procesa kalibracije utvrđuje se da li se sistem nalazi u projektovanom dijapazonu tačnosti i pouzdanog rada i koji faktori limitiraju performanse telemetrijskog sistema. Zavisno od njih se donosi odluka o zameni neke komponente mernog sistema ili je neophodno izvršiti određene konceptijske promene u dizajnu telemetrijskog sistema kako u hardverskom tako i softverskom smislu.[1]

4. PARAMETARA KOJI DEFINIŠU PERFORMANSE TELEMETRIJSKOG SISTEMA

Posle procesa integracije merne opreme na letelici i softversko/hardverskog konfigurisanja kompatibilne zemaljske prijemne stanice, vrši se veliki broj merenja u cilju utvrđivanja performansi telemetrijskog sistema. Ta merenja se odnose na ocenu performansi predajnika, antena, prijemnika, gubitaka tokom prenosa radio linkom, efikasnosti krypto zaštite, elektromagnetne kompatibilnosti, validnosti mernih podataka i njihove korelisanosti sa vremenom tokom ispitivanja, pouzdanosti, tačnosti i performansi registrovanja podataka. [4]

U tom cilju se mere određeni parametri kao što su:

1. Bitska verovatnoća greške merenja (*BER-Bit Error Rate*).
2. Osetljivost prijemnika (*G/T*).
3. Spektar PCM/FM signala.
4. Vreme kašnjenja mernih podataka sa letilice do prijemne stanice.
5. Merna nesigurnost.

Bitska verovatnoća greške merenja (BER) odnosi se na utvrđivanje performansi predajnog i prijemnog podsistema kao i uređaja za registrovanje podataka. Metodologija merenja verovatnoće greške parametara je definisana Standardom *IRIG/Document 118*. Tokom ove procedure vrši se emitovanje pseudo slučajne sekvence PCM signala kao modulišućeg signala visokofrekventnom nosiocu, u određenim koracima se menja snaga predajnika i obavlja se prijem i registrovanje takvih podataka sa letelice. Rezultati se porede sa teorijskim kao i podacima iz predhodnih testova. Za neki telemetrijski sistem se kaže da je kvalitetan ako se u najvećem broju testova tokom leta izgubi svaki milioniti bit a nije prihvatljivo ako je verovatnoća greške $BER \geq 1 \times 10^{-5}$

Osetljivost prijemnika (G/T) reprezentuje kvalitet detektovanog signala. Dobija se merenjem snage emitovanog signala iz hladnog i vrućeg izvora signala. Sunce se obično koristi kao vrući izvor snage (*P_{sun}*) a nebo kao hladni izvor signala (*P_{sky}*). Ova metoda je takođe definisana Standardom *IRIG/Document 118/volume 2*. [5]

Tokom celog test leta vrši se monitorovanje **spektra PCM/FM signala** kako bi se izvorno utvrdila njegova degradacija koja direktno utiče na verovatnoću greške mernog signala.

Vreme kašnjenja mernog signala (data latency) predstavlja vreme koje protekne od trenutka kada se dogodi neka pojava na letelici i trenutka kada se detektuje i prezentira na prijemnoj strani telemetrijskog sistema. Vrednost ovog vremenskog intervala je determinisana sa više faktora kao što su potrebna

vremena za: transmisiju, demodulaciju, dekomutaciju, dešifrovanje mernih podataka, filtriranje, procesiranje podataka i samu prezentaciju izmrenih vrednosti u fizičkim jedinicama. Ukoliko podaci stižu sa letelice koja je udaljena do 100 milja od prijemne stanice ta vrednost iznosi 1 ns. Ukoliko se prijem podataka obavlja sa satelita (orbite preko 22 000 milja) ta vrednost se kreće u intervalu od 125 do 250 ms.

Merna nesigurnost (tačnost) telemetrijskog sistema se definiše kao sposobnost sistema da verno reprodukuje izlaznu vrednost električnog signala iz nekog MP na izlazu iz telemetrijskog sistema tokom višestrukih merenja. Šum u telemetrijskom kanalu, kvantizaciona greška, slabljenja mernog signala tokom propagacije i drift faktori, prouzrokuju da je izmereni signal dobijen na izlazu telemetrijskog sistema samo aproksimacija izvornog mernog signala. Metodologija utvrđivanja merne nesigurnosti je dosta komplikovana i realizuje se višestrukim merenjima pod približno istom kompleksu mernih uslova kao i zamenom pojedinih mernih pretvarača sa simulatorima velike tačnosti i komparacije tako izmerenih vrednosti sa vrednostima dobijenim sa realnim mernim pretvaračima [1]. U cilju određivanja merne nesigurnosti određenih aerodinamičkih parametara koji se mere telemetrijskim sistemom na letelici, vrši se merenje istih upotrebom opto-teodolitskog sistem kao etalona i rezultati se kompariraju. Na ovaj način se dolazi do tačnih vrednosti položaja letelice u vazдушnom prostoru dobijajući vrednosti stvarne brzine i visine.

Ocena stanja telemetrijskog sistema se generalno može proračunati na osnovu jednačine 1 koja predstavlja matricu stanja telemetrijskog sistema:

$$R = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ S_n \end{bmatrix} * (V_1, V_2 \dots V_n) \quad (1)$$

Gde su:

- R rezultat ocene jednog telemetrijskog sistema, određenog trenutka i u određenoj zoni ispitivanja,
- S_n koeficijenti su rezultat ocene stanja sistema i mogu biti automatski detektovani od strane telemetrijskog sistema,
- V_n su težinski koeficijenti izvesnog stanja sistema.

Za procenu stanja jednog telemetrijskog sistema potrebno je doći do potrebnih koeficijenata matrice kao i definisati matrični skup sa biranjem podskupa u zavisnosti od vrste zone ispitivanja i karaktera samih test letova.

U slučaju konkretnog PCM/FM telemetrijskog sistema kod koga se ocena stanja vrši na osnovu praga osetljivosti prijemnika, verovatnoće greške (*BER*), slabljenja signala usled prisustva refleksija i transmisionih sposobnosti pomenuta matrica sadrži 4 koeficijenta (S_1, S_2, S_3, S_4). Do pomenutih koeficijenata je moguće doći upotrebom posebnog matematičkog modela koji reprezentuje prijemni sistem koji u sebi sadrži idealni simulator signala, prijemnik, dekomutator i računar. Estimacija koeficijenata tog modela se vrši na osnovu konkretnih rezultata merenja u određenoj zoni ispitivanja. Simulacija podrazumeva softversko upravljanje radom simulatora telemetrijskog signala čime je omogućeno variranje izlazne frekvencije, nivoa izlaznog signala, nivoa šuma, bitske

brzine, tipa modulacije, kašnjenja signala zbog Doplerovog efekta i slabljenje signala zbog refleksija. U samom prijemniku je moguće podešavati automatsku kontrolu pojačanja (AGC) i frekvencije (AFC) kao i prag osetljivosti na PCM signal. Kod dekomutatora je moguće varirati bitsku brzinu i širinu propusnog opsega petlje kojom se vrši smanjenje visokofrekventnog šuma čime se redukuje fazni džiter. Kao rezultat tako složene simulacije dobijaju se koeficijenti matrice S_n .

Ukoliko se pretpostavi da se testiranje vrši u slučaju kada se letelica nalazi i na malim visinama, tada nije moguće zanemariti slabljenje signala usled refleksija tako da je težinski koeficijent koji reprezentuje ovaj uticaj veći od ostalih kao što je uočljivo u jednačini: [42].

$$V = (v_1, v_2, v_3, v_4) = (0.2, 0.2, 0.5, 0.1) \quad (2)$$

Ukoliko je vrednost ovog parametra R veća od 0.9 smatra se da je stanje konkretnog telemetrijskog sistem dobro.

5. KARAKTERISTIČNI PROFILI TESTOVA ZA UTVRĐIVANJE PERFORMANSI INTEGRISANOG TELEMETRIJSKOG SISTEMA NA LETELICI

Utvrdjivanja performansi telemetrijskog sistema vrši u tačno definisanoj zoni ispitivanja u kojoj se na predviđenim lokacijama pored kompatibilne telemetrijske stanice nalaze radar i opto-teodolitski sistem. Svi navedeni akvizicioni sistemi su softversko/hardverski integrisani u jednu celinu koja omogućuje potpunu sinhronizaciju istih tokom praćenja letelice u realnom vremenu kao i posleletnim analizama.

Zona (poligon) za ispitivanja performansi telemetrijskog sistema po svojoj geografskoj i fortifikacionoj arhitekturi u idealnom slučaju trebalo bi da omogući realizaciju više vrsta letnih ispitivanja različitog karaktera koji su veoma slični realnim manevrima letelice koji će biti upražnjavani tokom normalnog veka upotrebe. U realnim uslovima nije moguće imati jedan poligon na kojem se vrše sva testiranja koja ce verno reprezentovati realne uslove aplikacije letelice. Određena testiranja kao što su ispitivanje elektromagnetne kompatibilnosti vazduhoplovnih elektronskih uređaja i telemetrijskog sistema tokom realnog rada oružnog sistema vrše se na posebnim poligonima za ispitivanje integracije naoružanja na letelicama ili same funkcionalnosti projektila koji su takođe opremljeni sa veoma kompleksnom mernom opremom. Prijemna telemetrijska antena se pozicionira na najvišu tačku tako da direktno pokriva pistu u čijoj blizini nije dozvoljeno prisustvo bilo kojih objekata i vozila zbog izazivanja mogućih refleksija.

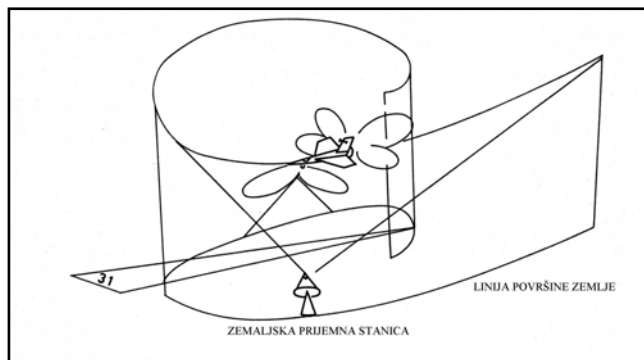
Prijemna stanica generalno mora pouzdano vršiti prijem i procesiranje signala sa letelica koje se kreću velikom brzinom i neposrednoj blizini same prijemne antene (Sl 2).

Da bi se utvrdila verovatnoća greške koja se može pojaviti u slučajevima ispitivanja koja u sebi sadrže veliki broj letova sa izraženim evolucijama (slučaj ispitivanja letnih kvaliteta), neophodno je utvrditi vrednost bitske verovatnoće greške telemetrijskog signala na prijemnoj strani, U tom cilju se izvode testovi sa manevrima kod kojih se letelica okreće oko svog težišta a samim tim se direktno utiče na dijagram zračenja jer takođe dolazi do rotacije transmissionog vektora u prostoru propagacije elektromagnetnog zračenja (Sl. 3).

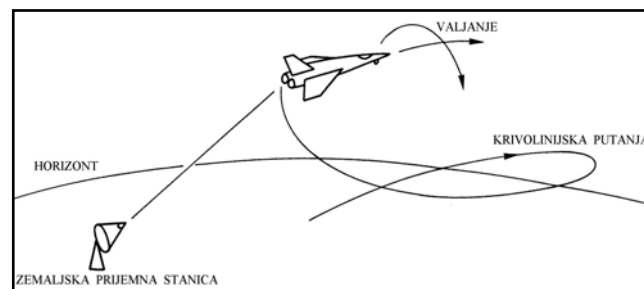
Određivanje verovatnoće greške PCM/FM signala u određenoj zoni ispitivanja podrazumeva upotrebu složenog mernog sistema kako na samoj letelici tako i na prijemnoj strani telemetrijskog sistema.

Merenje se izvodi u više faza i sa različitim raspodelom snage na telemetrijskim antenama koja se obavlja pomoću delitelja snage i to odnosu gornja/donja antena 10 /90 % ili ravnomerna raspodela snage predajnika 50 / 50 %.

U tabeli 1. prikazani su rezultati merenja bitske verovatnoće greške za navedene profile letova, različite raspodele snage iz predajnika na dve telemetrijske avionske antene i za različite bitske brzine PCM (NRZ-L kod) telemetrijskog signala. Merenje je vršeno tokom 15 letova na avionu G-4 na aerodromu Batajnica sa višestrukim ponavljanjem istog manevra u jednom letu. Zavisno od vrste ispitivanja potrebno je implementirati najmanje dve antene na letelici koje pokrivaju gornju polusferu zračenja (*upper*) i donju polusferu zračenja (*lower*). Takođe je potrebno za datu antensku konfiguraciju menjati raspodelu snage.



Sl. 2. Geometrija profila leta u neposrednoj blizini prijemne telemetrijske antene



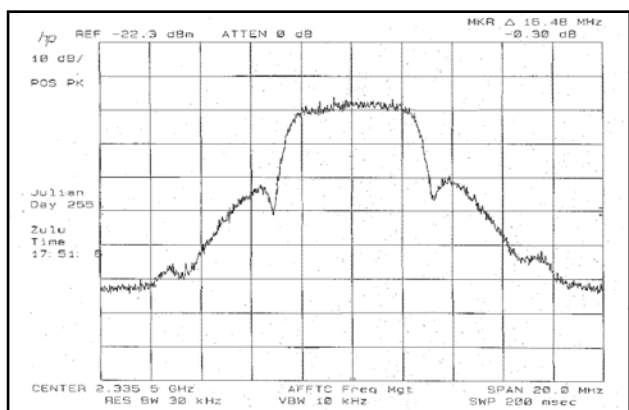
Sl. 3. Geometrija profila leta sa izraženim evolucijama

Tabela 1 Vrednosti verovatnoće greške za različite profile letova

R. B.	BER (4 kw/s)			BER (16kw/s)			BER(32kw/s)		
	Rasp. snage na anten.(W)			Rasp. snage na anten.(W)			Rasp. snage na anten.(W)		
	1/10	5/5	10/1	1/10	5/5	10/1	1/10	5/5	10/1
1	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵
2	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵
3	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴
4	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴
5	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴
6	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵
7	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴
8	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴
9	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵
10	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵

Na prijemnoj strani se u najboljem slučaju koristi prijemni podsistem sa dve antene (15-ft i 8 ft) koje su istovremeno levo kružno (LHCP) i desno kružno (RHCP) polarisane kao i sa po dva prijemnika i diversiti kombajnera. Diversiti signali se uzimaju sa izlaza prijemnika i zatim optimalno kombinuju tj. sabiraju na način koji je određen tehnikom kombinovanja. Sistemi sa diversiti tehnikom mogu biti opremljeni za fazni, frekvencijski, prostorni, vremenski i ugaoni diversiti. [1]

Slika spektara PCM/FM signala sa letelice, čija je bitska brzina od 5Mb/s prikazana je na Sl 4..



Sl. 4. Spektar PCM/FM(5Mb/s) signala sa letelice

6. ZAKLJUČAK

Savremena ispitivanja letelica zahtevaju merenje i obradu velikog broja električnih i neelektričnih veličina koja se vrše se PCMFm telemetrijskih multikanalnih sistema čiji se rad zasniva na impulsno-kodnoj modulaciji.

U tom cilju se mere određeni parametri kao što su: bitska verovatnoća greške merenja, osetljivost prijemnika, spektar PCM/FM signala, vreme kašnjenja mernih podataka sa letelice do prijemne stanice i merna nesigurnost. Utvrđivanja osnovnih performansi telemetrijskog sistema na letelicama vrši se u dve

faze: tokom zemaljskih ispitivanja i letnih ispitivanja. Tokom kalibracionih procedura prati se funkcionalnost svake komponente mernog sistema i vrši kvalitativan procena mogućih uticaja navedenih simulacija na rezultate merenja. Posebno su kompleksni testovi za proveru elektromagnetne kompatibilnosti koji su veoma ekstremni i izvode se simuliranjem različitih vrsta zračenja.

Tokom letnih ispitivanja realizuju se karakteristični profili test letova koji su specifični za konkretnu letelicu a u cilju utvrđivanja performansi PCMFm telemetrijskog sistema.

7. LITERATURA

- [1] Z. Filipović “ *Doprinos sintezi PCMFm telemetrijskog sistema za ispitivanje letelica* ”, Vojna akademija VJSCG “Doktorska disertacija”, Beograd 2005.
- [2] Z. Filipović “ *Merenje neelektričnih veličina u procesu ispitivanja* ”, “Magistarski rad”, ETF Beograd 1989.
- [3] Filipović, Z., Marković, M., Pavlović, D., “ *PCM/FM telemetrijski sistem za merenje vazduhoplova i fizioloških karakteristika pilota* ”, TELFOR, Beograd, 2002.
- [4] Hedman, W.R. “ *The Sun as a Calibration Source for L-band S-band Telemetry* ” in *Proceedings of the International Telemetry Conference*, Vol. IV, PP. 330-342, 1977.
- [5] John O. Reddemann, *Edwards Range Telemetry Evaluation*, Edwards AFB, California 93534

Abstract – This paper presents calibration methodology of PCM/FM telemetry system for flight test purposes. It is also define the profile of specific test flights in order to measure relevant parameters which determine performances of PCM/FM telemetry system.

CALIBRATION METHODOLOGY OF PCM/FM TELEMETRY SYSTEM FOR FLIGHT TEST PURPOSES

Zoran Filipović