

DIZAJNIRANJE PARAMETARA PCM/FM TELEMETRIJSKOG TRANSMISIONOG SISTEMA

Markoviæ M., Filipoviæ Z., Pavloviæ D.
Vazduhoplovni opitni centar u Beogradu

I UVOD

Savremena ispitivanja letelica zahtevaju merenje i obradu velikog broja elektriènih i neelektriènih velièina. Prenos izmerenih velièina sa letelice do prijemne stanice na zemlji vrši se telemetrijskim multikanalnim akvizicionim sistemima èiji se rad zasniva na impulsno-kodnoj modulaciji. Prilikom ispitivanja prototipova letelica od imperativnog znaèaja je obezbeenje pouzdanog i neprekidnog prenosa merenih podataka u realnom vremenu. Gubitak informacije u određenim kritiènim fazama eksperimenta mođe dovesti u pitanje bezbednost, a samim tim i nastavak ispitivanja. Zbog velike važnosti transmisionog podsistema vrši se njegova optimizacija, pri èemu se vodi raèuna o svim relevantnim ogranièenjima objekta ispitivanja. Osnovna karakteristika ispitivanja letelica je postizanje kompromisa između zahteva za merenjem velikog broja raznorodnih velièina, malog smeš tajnog prostora za integraciju potrebne merne opreme na letelici, kao i vođenja raèuna o ogranièenom propusnom opsegu koji je na raspolaganju za transmisiju podataka.

II OSNOVNA ARHITEKTURA PCM/FM TELEMETRIJSKOG SISTEMA

PCM/FM telemetrijski sistemi u svojoj arhitekturi podrazumevaju dva osnovna podsistema (slika 1):

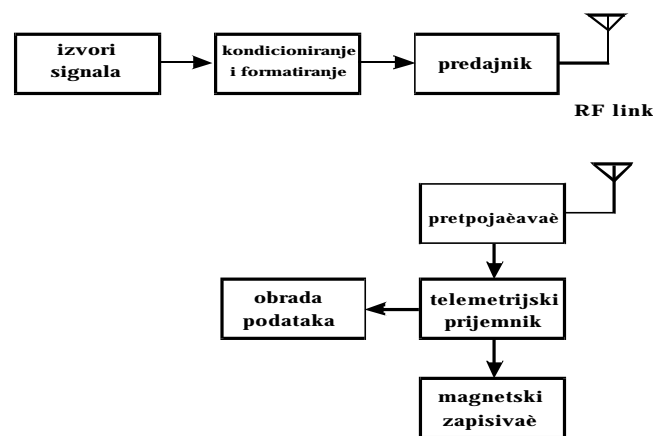
1. Merni podsistem koji se integriše na samoj letelici (*airborne data collection system*). Sastoji se u vidu specijalnog pakovanja (*telepack*) iz određenog broja mernih pretvaraèa koji vrše konverziju neelektriènih velièina u proporcionalni elektrièni signal, uređaja za multipleksiranje i digitalizovanje mernih signala, predajnika i više antena malog pojaèanja putem kojih se vrši transfer podataka do odgovarajuće prijemne stanice.
2. Kompatibilna telemetrijska prijemna stanica koja se sastoji od visoko usmerene paraboliène antene velikog pojaèanja koja u konfiguraciji sa prijemnim podsistemom omogućuje prijem i veoma slabih signala sa letelice, telemetrijskog procesnog sistema koji obavlja inverzan proces onom na letelici u smislu demultipleksiranja mernih parametara, memorisanja svih primljenih signala, prezentaciju istih na samoj stanici ili omogućavanje transfera podataka do drugih udaljenih telemetrijskih stanica za detaljnu analizu mernih parametara.

Rad telemetrijskog sistema se odvija u dva osnovna rešima:

1. Procesiranje mernih signala u realnom vremenu (*real time data processing*) i
2. Post-operacionalno procesiranje mernih parametara (*post-operational data processing*).

Pojam procesiranja u realnom vremenu podrazumeva neposredni uvid u određene merne parametre sa dovoljno malim vremenom kaš njenja od trenutka njegovog događanja. To su svi neophodni parametri koji direktno imaju uticaja na ispitivanje prototipa letelice u trenutku izvršavanja eksperimenta, kako sa aspekta kvaliteta leta tako i sa bezbednosnog aspekta same letelice.

Tokom kompletnog procesa testiranja letelice, upotrebom telemetrijske stanice, vrši se memorisanje svih mernih parametara kao i podataka dobijenih pomoću opto-teodolitskih i radarskih sistema koji predstavljaju integrisanu celinu. Detaljna analiza izmerenih velièina obavlja se posle završetka testiranja i podrazumeva rekonstrukciju leta, najbolju procenu trajektorije letelice, korelisanje svih relevantnih događaja tokom eksperimenta, pronalaženje svih neregularnosti tokom testiranja, kao i komparaciju dobijenih realnih parametara sa podacima simuliranim u različitim fazama razvoja letelice.



Slika 1. Blok šema telemetrijskog sistema

III PARAMETRI NEOPHODNI ZA DIZAJN PCM/FM TELEMETRIJSKIH SISTEMA

Osnovna uloga telemetrijskog transmisionog sistema je pouzdan i neprekidan prenos signala izmerenih velièina sa letelice koje se ispituju. U procesu dizajniranja ovakvih mernih sistema veoma je bitno da se ostvari adekvatan izbor konfiguracije transmisionog sistema, kao i mešusobna kompatibilnost svih delova sistema, pri èemu se teži da se minimizira slabljenje elektromagnetnih talasa pri prostiranju od letelice do antene u okviru zemaljske telemetrijske stanice. Idealno rešenje ne postoji, ali se sveobuhvatnom analizom mođe doći do optimalnog rešenja koje æe

omogućiti kvalitetno praćenje ispitivanja letelica u realnom vremenu i eliminisati mogućnost gubitka informacija [1].

U dizajnu predajnog dela sistema veoma bitna pitanja koja se moraju rešiti su zahtev za stabilnošću radio signala, vrsta modulacije, transmisioni propusni opseg (i njegova ograničenja), snaga signala i dijagram zračenja i polarizacija predajne antene. Prijemni deo sistema mora biti tako dizajniran da se minimizira degradacija signala nastala usled filtriranja i šuma.

U savremenim ispitivanjima letelica primenjuju se modulacioni metodi na bazi vremenskog i frekventijskog multipleksiranja, ali i na bazi kombinacije ova dva metoda (hibridni sistemi). Izbor modulacionog metoda zavisi od velikog broja faktora, kao što je broj signala koji se prenose, frekventijski opseg tih signala, zahtevane tačnosti, da li su signali analogni ili digitalni itd. Kod telemetrijskih sistema čiji je rad zasnovan na vremenskom multipleksu najčešće se koristi impulsna kodna modulacija (PCM - *Pulse Code Modulation*) koja omogućuje, kroz kvantizacioni proces, binarnu reprezentaciju mernog signala u različitoj formi digitalnih kodova za ulaz u predajnik. Najčešće se koriste telemetrijski sistemi dizajnirani na bazi PCM i frekventijske modulacije, poznati kao PCM/FM sistemi, pre svega zbog povoljnijeg odnosa signal/šum, malog drifta signala, mogućnosti kriptovanja i bolje kompatibilnosti sa savremenom akvizicionom opremom. Sa druge strane, digitalno obrađeni signali zahtevaju veći propusni opseg za transmisiju. Uprkos tome, a zahvaljujući svim ostalim prednostima procesiranja digitalnih signala, PCM/FM telemetrijski sistemi se danas dominantno koriste za ispitivanje različitih vrsta letelica.

Kvalitet telemetrijskih podataka koji se obično izražava verovatnošću greške po bitu (BER- *Bit Error Rate*) zavisi od izbora koda PCM signala, vrste ne devijacije učestanosti, propusnog opsega premodulacionog filtera, predetekcijskog filtera, demodulatora, kao i od karakteristika detektora bita.

Kada se projektant telemetrijskog sistema opredeljuje za vrstu koda, osnovni zahtevi kojima se rukovodi su: mogućnost samosinhronizacije (binarni fazni kod ima osobinu samosinhronizacije jer ima tranziciju nivoa signala na sredini svakog signalizacionog intervala, pa je proces održavanja sinhronizacije i samim tim i akvizicije znatno jednostavniji), spektralna efikasnost (NRZ kod ima bolju spektralnu efikasnost od binarnog faznog koda jer zahteva skoro dvostruko manji propusni opseg), jednosmerna komponenta (binarni fazni kod nema DC komponentu), kao i korekcija greške i otpornost na šum [2].

Na osnovu IRIG 106 standarda kod PCM/FM sistema prenos mernih podataka sa letelica se vrši i koriste se tri frekventijska opsega: L-opseg (od 1435 MHz do 1535 MHz), S-opseg (od 2200 MHz do 2300 MHz) i gornji S-opseg (od 2310 MHz do 2390 MHz) [3]. U našoj zemlji je za potrebe telemetrije zakonom propisano korišćenje L-opsega frekvencija.

U projektovanju predajnog antenskog sistema veoma je važno izabrati odgovarajući broj antena na letelici, kao i mesto na oplatu letelice gde će te antene biti ugrađene. One moraju obezbediti dobro prilagođenje na izlazni stepen predajnika, što uniformniji dijagram zračenja ka zemaljskoj telemetrijskoj prijemnoj anteni, dobar rad u širokom opsegu promene temperature, kao i pri velikim brzinama i ubrzanjima. Međutim, mora se voditi računa o tome da je

izbor lokacije predajne antene na letelici takav da je obezbeđen siguran i neprekidan prenos mernih podataka, ali bez menjanja aerodinamičkih karakteristika letelice, kao i o stvaranju indukovanih struja na površini letelice koje stvaraju sekundarno polje koje narušava dijagram zračenja antene. Tačna pozicija ovih antena se pažljivo proračunava u zavisnosti od geometrije vazduhoplova i profila manevra. Provera uspešnosti ugradnje antene vrši se merenjem dijagrama zračenja pre otpočinjanja programa ispitivanja u letu. Rastojanje antena od predajnika je minimalno kako bi se minimizirao gubitak snage u koaksijalnom kablju koji ih povezuje. Najčešće se koriste konfiguracije sa dve ili tri predajne antene od kojih je jedna postavljena na prednjem delu trupa čime pokriva zonu zračenja ispod letelice, a druge dve su postavljene horizontalno na bočnim stranama vertikalnog stabilizatora; ovim parom se obezbeđuje polarizacioni diversitet (prva bočna antena ima horizontalnu, a druga vertikalnu polarizaciju) [4].

Izbor prijemne telemetrijske antene zavisi od nekoliko faktora kao što su dobitak (efektivna površina), dijagram zračenja, frekvencija, polarizacija, mogućnost praćenja i zastupljenost šuma. Većina telemetrijskih prijemnih antenskih sistema su konfigurisani tako da primaju dve ortogonalne polarizacije (leva i desna kružna polarizacija ili vertikalna i horizontalna linearna polarizacija). Pri testiranju letelica najčešće je najbolje rešenje jednoosni ili dvoosni antenski sistem za praćenje

Efikasan metod za održavanje neprekidne i pouzdane RF komunikacije u telemetrijskom transmisionom sistemu je korišćenje diversiteta (*diversity*) tehnike na prijemnoj strani. Moguć je korišćenje različitih oblika tehnika diversiteta: frekventijski, fazni, prostorni, vremenski i ugaoni. Diversiteti signale emituje isti izvor, ali sa nekoreliranim karakteristikama slabljenja. Ovi signali se na prijemu kombinuju (mešaju, spajaju), pri čemu se postiže povećanje odnosa signal/šum, pa se tako povećava tačnost i neprekidnost prenošenih podataka. Postoje dva osnovna načina kombinovanja signala - pre detekcije (predetekcijsko kombinovanje) i posle detekcije (postdetekcijsko kombinovanje) primljenog signala. Predetekcijski kombajner je jednostavniji za korišćenje i obezbeđuje znatno poboljšanje odnosa signal/šum poboljšanjem odnosa nosilac/šum. Sa druge strane, postdetekcijski kombajneri su pogodni zbog niže cene, ali je ona postignuta na račun povećanja vremena za podešavanje. Kako bi se iskoristile dobre strane oba metoda kombinovanja, preporučljivo je korišćenje kombajnera optimalnog odnosa (*optimal ratio combiner*) koji u sebi sadrži i oba metoda; on menja odnos mešanja u zavisnosti od uslova rada i tako obezbeđuje neprekidnost signala i poboljšanje odnosa signal/šum.

Jasan uvid u buduću dizajn, kao i karakteristiku čitavog transmisionog sistema, dobija se analizom, odnosno procenom, veze. Procena veze može pomoći u predviđanju potrebe za promenom konfiguracije sistema kako bi se ostvarili optimalni uslovi za pouzdan prenos podataka, u smislu ostvarivanja zadovoljavajućeg odnosa signal/šum koji predstavlja karakteristiku sistema koja pokazuje njegovu sposobnost detektovanja signala sa prihvatljivom verovatnošću greške u prisustvu šuma, kao i ostvarivanja željenog dometa veze. Dva osnovna razloga degradacije odnosa signal/šum su smanjenje snage signala i porast snage šuma, odnosno interferirajućih signala. Parametri transmisionog sistema koji se uzimaju u obzir pri proceni

veze su: snaga predajnika (snaga telemetrijskog predajnika se kreće od 1 do 10 W), gubici u kابلu između predajnika i predajne antene, dobitak predajne antene, gubici prostiranja signala između predajne i prijemne antene, osetljivost prijemnog sistema, kao i propusni opseg prijemnika - od njega zavisi ukupna snaga šuma u sistemu, kao i odnos signal/šuma koji je potrebno ostvariti da bi se dobio željeni kvalitet podataka, a koji zavisi i od modulacionog metoda i tipa podataka koji se prenose.

Uzroci gubitaka u prostiranju EM talasa između predajne antene na letelici i prijemne antene u okviru zemaljske telemetrijske stanice su:

1. Slabljenje slobodnog prostora:

$$L_p = 20 \log \left(\frac{4\pi D}{\lambda} \right) \quad (1)$$

λ je talasna dužina, a D udaljenost predajne i prijemne antene (λ i D su u istim jedinicama).

- Prostiranje po više putanja; zbog refleksije elektromagnetnih talasa od raznih objekata koji se nalaze na putanji njihovog prostiranja, prijemna antena osim direktnog EM talasa prima i jedan ili više sekundarnih talasa. Gubici se obično kreću između 6 i 30 dB [2], a ovaj problem se efikasno rešava korišćenjem predajnih antena sa vertikalnom polarizacijom, više-direkcionih prijemnih antena sa uskim snopom zračenja, diversitetnom tehnikom (kombinacija prostornog, frekvencijskog i polarizacionog diversiteta), kao i korišćenjem korektivnih kodova.
- Atmosferska refrakcija je pojava koja takođe izaziva slabljenje signala, a javlja se zbog promene nivoa indeksa prelamanja atmosfere sa visinom.
- Slabljenje uzrokovano atmosferskim prilikama (magla, padavine - kiša, sneg). Obično ima vrednost od 1dB, pri čemu na učestanostima između 1.4 i 2.3 GHz, čak i pri jakim kišama nema značajnijeg slabljenja signala.
- Slabljenje usled prolaska signala kroz jonizovani gas koji je nastao usled izlaznog plamena iz izduvnika mlaznog motora; u ovom slučaju dolazi do promene polarizacije signala i može iznositi i preko 30 dB, a rešava se korišćenjem tehnike diversiteta (polarizacioni diversitet).

IV PRIMER PRAKTIČNE REALIZACIJE PCM/FM TELEMETRIJSKOG SISTEMA

U nastavku će biti opisana optimalna konfiguracija transmissionog sistema za prenos u realnom vremenu kolor video/FM signala i PCM/FM telemetrijskog signala, za domet do 200 km daljine (PAL kolor TV signal zahteva ± 2.25 MHz, PCM signal zahteva ± 500 kHz, zaštićeni opsezi su 1 MHz). Video signal zauzima frekvencijski opseg od 6 Hz do 5 MHz, a PCM signal zauzima opseg od 20 Hz do 750 kHz (binarni protok 1.5 Mb/s). Prenos se obavlja u L-opsegu frekvencija, a potrebna širina propusnog opsega se izračunava na osnovu Karsonovog obrasca ($m < 1$) [5]:

$$B = 2(f_m + \Delta f) \quad (2)$$

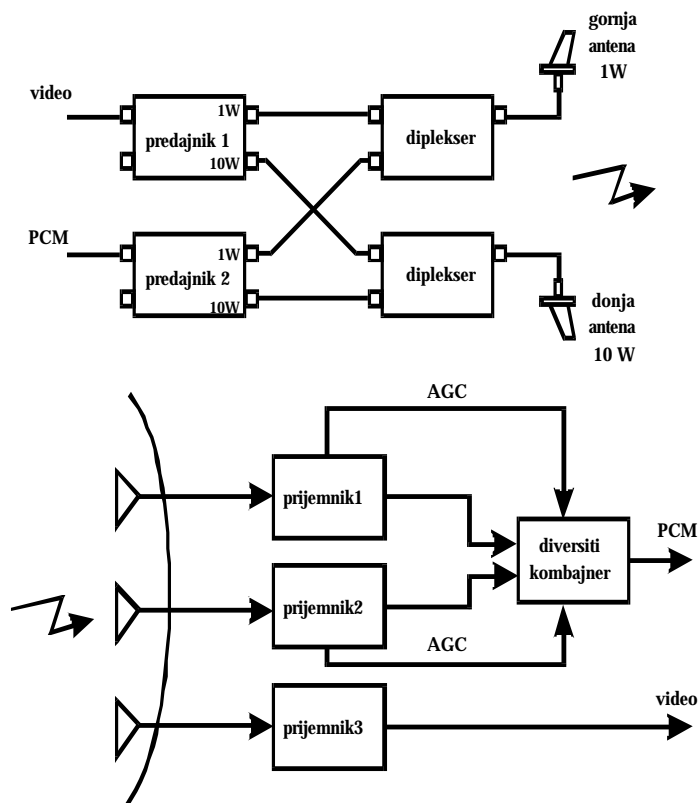
gde je:

f_m - najviša učestanost u spektru modulašćeg signala,
 Δf - maksimalna devijacija učestanosti nosioca.

Najviša učestanost u spektru modulašćeg signala je 7.5 MHz, a maksimalna devijacija učestanosti 2.5 MHz. Na

osnovu ovih podataka dobija se da je potrebna širina propusnog opsega 20 MHz.

Na slici 2 je prikazana konfiguracija predajnog i prijemnog podsistema.



Slika 2. Blok šema predajnog i prijemnog podsistema

Predajni podsistem se sastoji od predajnika video signala i predajnika telemetrijskog (PCM) signala. Predajnici rade u opsegu od 1435 MHz do 1545.5 MHz i imaju dva izlaza različitih snaga (1 W i 10 W). Izlazi predajnika se vode u dva dipleksera koji vrše razmicanje frekvencije nosioca video/FM i PCM/FM signala. Signali sa izlaza dipleksera se vode na dve predajne četvrttalasne monopol antene kompaktnog dizajna i mase manje od 140g. Polarizacija ovih antena je vertikalna, a rade u frekvencijskom opsegu od 1435 MHz do 1500 MHz i imaju dobitak od 3 dB. Jedna antena (1 W) se ugrađuje na gornju stranu trupa, a druga (10 W) na donju stranu trupa vazduhoplova, tako da prijemni antenski sistem za automatsko praćenje u zemaljskoj telemetrijskoj stanici uvek "vidi" bar jednu predajnu antenu (moguće bi bila i konfiguracija od tri predajne antene, ali bi dobitak bio nedovoljan da se prevaziđu negativni efekti dobijeni zbog većih mogućnosti za nule antena izazvane suprotnom polarizacijom).

Prijemni podsistem se sastoji od dvoosnog antenskog sistema, dva prijemnika PCM signala, jednog prijemnika video signala i diversitetnog kombajnera (za PCM signale). Dvoosni antenski sistem za praćenje radi u opsegu frekvencija od 1435 do 2400 MHz, sa dobitkom od 22 dB (u L-opsegu frekvencija). Polarizacija je RHCP i LHCP (desna i leva kružna polarizacija). Brzina praćenja je 20 stepeni/s. Po azimutu je neprekidna pokrivenost, a po elevaciji od -30 do +20 stepeni. Radi u opsegu temperatura od -28 °C do +50 °C.

Prijemnici su superheterodini prijemnici sa dvostrukom konverzijom (prva MF je 160 MHz, a druga MF je 20 MHz) i sklopom za automatsku kontrolu pojačanja (AGC). Prijemnici rade u frekvencijskom opsegu od 10 kHz do 4.2 GHz sa diskretnim frekvencijskim podopsezima. Faktor šuma iznosi između 8 i 12 dB (u zavisnosti od primenjenog RF tuner-a). Signali sa izlaza prijemnika PCM signala se vode u diversiteti kombajner optimalnog odnosa koji ima mogućnost simultanog predetekcijskog i postdetekcijskog kombinovanja i poboljšanje odnosa signal/šuma od 2.5 dB.

Gubici prostiranja za ovaj sistem - za domet od 200 km i frekvenciju nosioca 1500 MHz ($\lambda = 0.2$ m), se izračunavaju na osnovu izraza (1) i dobija se da iznose 142 dB. Za snagu predajnika od 10 W (40 dBm) i dobitak predajne antene od 3 dB, dobija se efektivna izračunana snaga predajnika (EIRP):

$$\text{EIRP}(\text{dB}) = P_t + G_t = 40 + 3 = 43\text{dB} \quad (3)$$

Snaga signala na ulazu prijemnog dela sistema izračunava na osnovu sledećeg izraza:

$$P_r = \text{EIRP} - L_s + G_r - L_o \quad (4)$$

gde je:

EIRP (dBW) - emitovana snaga predajnika,

G_r - (dB) dobitak prijemne antene,

L_s (dB) - gubici slobodnog prostora i

L_o (dB) - kumulativni atmosferski gubici.

Bitska brzina je 1.5 Mb/s (61.76 dB), dobitak prijemne zemaljske antene 22 dB, kumulativni atmosferski gubici 15 dB, pa se dobija da P_r iznosi -92 dB.

Odnos signal/šuma pod pretpostavkom da je celokupna prijemna snaga sadržana u modulišću signalu, dobija se iz sledećeg izraza:

$$\frac{P_r}{N_0} = \frac{S}{N_0} = \frac{E_b}{N_0} \cdot R \quad (5)$$

gde je:

S - srednja snaga modulišću signala,

E_b/N_0 - energija bita po spektralnoj gustini snage šuma, a

R - bitska brzina.

Iz izraza (5) se može odrediti odnos E_b/N_0 :

$$\frac{E_b}{N_0} = \left(\frac{P_r}{N_0} \right) \cdot \frac{1}{R} \quad (6)$$

Za $N_0 = -174$ dBm ($N_0 = kT^0$, $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K, $T^0 = 300$ K) i $R = 61.76$ dB (1.5 Mb/s) i dobijenu vrednost za P_r , dobija se da ovaj odnos iznosi 20.24 dB.

Za računanje margine veze bitno je razdvojiti zahtevani odnos E_b/N_0 ($(E_b/N_0)_{\text{zah}}$) od stvarnog odnosa E_b/N_0 ($(E_b/N_0)_{\text{stv}}$) na prijemu. Razlika (dB) između $(E_b/N_0)_{\text{stv}}$ i $(E_b/N_0)_{\text{zah}}$ daje marginu veze:

$$M = \text{EIRP} + G_r - \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{zah}} - R - kT^0 - L_s - L_o \quad (7)$$

gde je:

R (dB-bit/s) - bitska brzina,

kT^0 (dBW/Hz) spektralna gustina srednje snage šuma.

Odnos $(E_b/N_0)_{\text{zah}}$ oslikava razliku od jednog projekta sistema do drugog. Ona može biti prouzrokovana primenjenim metodima modulacije ili npr. šumom kodovanja. Zahtevani odnos E_b/N_0 od 12 dB daje marginu veze od 8.24 dB, pa je

omogućen pouzdan prenos podataka za većinu karakterističnih ispitnih letova.

V ZAKLJUČAK

Osnovna funkcija telemetrijskog transmisionog sistema je omogućavanje pouzdanog i neprekidnog prenosa signala izmerenih veličina sa letelice koja se ispituje do zemaljske prijemne stanice. Neadekvatan izbor komponenata transmisionog sistema prouzrokuje onemogućavanje kvalitetnog praćenja ispitivanja vazduhoplova u realnom vremenu, što je nedopustivo kod ispitivanja prototipova vazduhoplova jer može doći do ugrožavanja bezbednosti letelice. Pošto je veoma teško napraviti idealno rešenje, do optimalne konfiguracije transmisionog telemetrijskog sistema se često dolazi kompromisom više elemenata koji su rezultat sveobuhvatne inženjerske analize.

LITERATURA

[1] Filipovića Z., Pavlovića D., Radovića D., "Optimizacija telemetrijskog transmisionog sistema za prenos video i PCM signala sa vazduhoplova", ETRAN, Soko Banja, 2000.

[2] Law, E.L., Hust, D.R., "Technical Publication TP000044 - Telemetry Applications Handbook", Pacific Missile Test Center, Point Mugu (California), 1987.

[3] IRIG document 106-86, "Telemetry Standards", Telemetry Group, Range Commanders Council, 1986.

[4] Radovića D., Filipovića Z., Pavlovića D., "Ograničavajući faktori pri izboru i implementaciji telemetrijskih antena na letelicama", ETRAN, Soko Banja, 2000.

[5] Rosen, C. "System Transmission Parameters Design for Threshold Performance", International Telemetry Conference, 1983.

Abstract: In this paper are presented main goals in designing PCM telemetry transmission system for flight test procedure. Also is described practical realization of PCM/FM telemetry system for transmission video/FM and PCM/FM signals in the range of 200 km.

SYSTEM TRANSMISION PARAMETERS DESIGN FOR PCM/FM TELEMETRY

Markovića M., Filipovića Z., Pavlovića D.

