

Predgovor

Ova knjiga predstavlja izmenjeno i dopunjeno izdanje monografije „Adaptivni digitalni filtri“, koju su autori objavili 2004. godine, a publikovana je od strane izdavača Akademska misao iz Beograda.

U želji da se čitaocima još više približe definicije i pojmovi iz oblasti estimacije, dodata su četiri nova poglavlja koja se bave generalnim principima estimacije slučajnih promenljivih i stohastičkih signala, optimalnim filtriranjem stohastičkih signala na bazi Vinerove i Kalmanove teorije optimalne estimacije, projektovanjem adaptivnih estimatora u nestacionarnom okruženju i sintezom robusnih estimatora u uslovima nepotpune apriorne informacije o statističkim karakteristikama stohastičkog okruženja. Izlaganje u preostalim poglavljima zasniva se na materijalu koji je prikazan u pomenutoj monografiji, ali su izlaganja propraćena i dopunskim tekstovima koji su bazirani na rezultatima naučno-istraživačkog rada autora u poslednjoj deceniji.

Primitimo, takođe, da je ova, kao i prethodna, knjiga nastala kao rezultat višedecenijske saradnje Odeljenja za obradu signala pri Institutu za primenjenu matematiku i elektroniku u Beogradu i Katedre za automatiku, iz koje je izrastao današnji Odsek za signale i sisteme, Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Autori izražavaju posebnu zahvalnost kolegama i saradnicima iz pomenutih institucija, kao i recenzentima na korisnim sugestijama i savetima koji su doprineli poboljšanju kvaliteta teksta.

Ova knjiga prevashodno je namenjena studentima redovnih i posle diplomskih studija Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, a pre svega studentima Odseka za signale i sisteme, ali može korisno poslužiti i svima onima koji nisu imali priliku da savladaju važnu oblast matematičkog modelovanja i estimacije parametara i/ili stanja, usvojene matematičke reprezentacije sistema na osnovu raspoloživih zašumljenih merenja na realnom sistemu. U knjizi su dati mnogi eksperimentalni rezultati i tretirani su aspekti praktične primene modelovanja i identifikacije sistema u realnim uslovima. Algoritmi i rešenja razmatrani u ovoj knjizi mogu naći svoju primenu u širokom području obrade i prenosa signala i upravljanju sistemima, kao i za obradu realnih signala različite fizičke prirode (signali govora i slike, biomedicinski signali, seizmološki signali, meteorološki signali, signali radara, sonara, satelita i drugih inteligentnih senzora). Stoga, knjiga može korisno poslužiti i inženjerima različitih profila koji se u svojoj praksi susreću sa problemima matematičkog modelovanja prirodnih ili veštački izazvanih pojava.

Efikasno praćenje izložene materije podrazumeva da čitalac poseduje osnovna znanja iz inženjerske matematike, koja se stiču na prve dve godine studija tehnike, a obuhvataju oblasti

linearne algebre, matematičke analize, kompleksne analize, numeričke analize i verovatnoće sa statistikom.

Primitimo, na kraju, da je u uvodnom izlaganju dat kratak prikaz razvoja teorije estimacije, sa posebnim osvrtom na Gausov metod najmanjih kvadrata za parametarsku identifikaciju sistema (objavljen je u prvoj polovini 19. veka), Vinerov optimalni estimator za neparametarsku identifikaciju sistema na osnovu njegove ulazno-izlazne reprezentacije (publikovan je u prvoj polovini 20. veka) i Kalmanov optimalni estimator za estimaciju nemerljivih stanja sistema na osnovu njegovog matematičkog opisa u prostoru stanja (nastao je u drugoj polovini 20 veka). Pomenuti estimatori predstavljaju zaokruženu celinu i efikasan alat za povezivanje empirijskih podataka (merjenja) sa sistema i njegove matematičke reprezentacije. Ovim naučnim dostignućima je, po prvi put u istoriji nauke i tehnike, uspostavljena veza između inženjerske prakse i teorije, što je dovelo do daljeg razvoja inženjerske nauke, kao i same vojne i svemirske tehnologije. Komercijalizacija naprednih tehnologija rezultovala je ubrzanom industrijskom revolucijom, koja traje više od jednog veka, a trenutno se nalazi u četvrtoj fazi. Navedenu fazu karakterišu metode veštačke inteligencije i „mekog računanja“, robotika i mehatronika, računarske tehnologije i mreže, a to sve zajedno sačinjava alate za projektovanje fabrika budućnosti.

Beograd, septembar 2017. godine

Autori

Sadržaj

Uvod

Kratak prikaz istorije estimacije	1
Optimalni Vinerov filter	6
Optimalni Kalmanov filter	8
Komparativna analize Vinerovog i Klamanovog filtra	10
Adaptivni filtri	11
Robustifikacija adaptivnih filtara	13

Glava 1

Kratak prikaz klasičnog pristupa projektovanja digitalnih filtara	15
---	----

Glava 2

Osnovi teorije estimacije	25
2.1 Estimator najmanjih kvadrata (minimalne srednje-kvadratne greške) kada je dato merenje skalarne slučajne varijable: jednodimenzioni (skalarni) LMS estimator	27
2.1.1 Estimator najmanjih kvadrata kao uslovno matematičko očekivanje, kada je dato skalarno merenje	27
2.1.2 Estimacija najmanjih kvadrata (LMS) skalarne slučajne varijable kada su data merenja niza slučajnih promenljivih (vektorska slučajna varijabla)	32
2.1.3 Kriterijum za ocenu kvaliteta estimacije i efikasnosti estimaora: Kramer-Raova teorema	39
2.1.4 LMS estimacija u slučaju kada je dato merenje kontinualnog skalarnog slučajnog procesa: jednodimenzioni (skalarni) LMS estimator	41
2.1.5 Skalarni linearni estimator najmanjih kvadrata (LLMS) kada su data merenja skalarne slučajne varijable: Analitički pristup optimizacije MSE kriterijuma	43
2.1.6 Skalarni linearni estimator najmanjih kvadrata (LLMS) kada su data merenja niza slučajnih varijabli (diskretna merenja realnog skalarnog slučajnog procesa)	44
2.1.7 Jednodimenzioni linearni metod najmanjih kvadrata (LLMS) kada je dat skalarni slučajni signal (kontinualno merenje): analitički pristup minimizacije MSE kriterijuma	47
2.1.8 Geometrijska interpretacija principa ortogonalnosti (projekcione teoreme): algebarski pristup minimizaciji MSE kriterijuma	51
2.1.9 Skalarni linearni estimator najmanjih kvadrata (LLMS) kada su data diskretna slučajna merenja (merenja skalarnog realnog diskretnog slučajnog procesa ili vektorske slučajne varijable): geometrijski pristup	54
2.1.10 Multidimenzionalni diskretni linerarni estimator minimalne srednje kvadratne greške (najmanjih kvadrata): vektorski diskretni LLMS estimator	59
2.1.11 Skalarni linearni estimator najmanjih kvadrata (LLMS) kada su data kontinualna merenja: geometrijsko-algebarski pristup	62
2.1.12 Multidimenzioni linearni estimator najmanjih kvadrata (LLMS) kada je dat vektorski kontinualni slučajni signal (kontinualno merenje): geometrijsko algebarski pristup	63
2.2 Estimator maksimalne aposteriorne verovatnoće: MAP estimator	66
2.3 Estimator maksimalne verodostojnosti: ML estimator	69

2.4 Estimator minimalne srednje apsolutne vrednosti greške: LAV estimator	78
---	----

Glava 3

Optimalni Vinerovi filtri: Neparametarska identifikacija linearnih vremenski-invarijantnih stohastičkih sistema	81
3.1 Kontinualni Vinerov filter	82
3.1.1. Postavke problema filtracije, predikcije i interpolacije u kontinualnom vremenskom domenu	82
3.1.2 Inovacioni pristup projektovanju optimalnog kontinualnog Vinerovog estimatora	86
3.1.3 Postavka problema optimalne linearne kontinualne Vinerove filtracije u frekvencijskom domenu	96
3.2 Diskretni Vinerov filter	106
3.2.1 Postavke problema optimalne Vinerove estimacije (filtracije, predikcije i interpolacije) u vremenski diskretnom domenu	106
3.2.2 Diskretni linearni Vinerov filter sa konačnim impulsnim odzivom (svim nulama): Vinerov FIR filter	110
3.2.3 Diskretni linearni Vinerov estimator sa beskonačnim impulsnim odzivom: Vinerov IIR estimator (prediktor, filter i interpolator)	114
3.2.4 Diskretni Vinerov filter za široko-stacionarne vektorske signale	127
3.2.5 Diskretni Vinerov filter za nestacionarne vektorske signale	128

Glava 4

Optimalni Kalmanov filter: Estimator stanja stohastičkih signala i sistema	135
4.1 Diskretni Kalmanov filter	135
4.1.1 Postavka problema diskretne Kalmanove filtracije u prostoru stanja	135
4.1.2 Prediktor-korektor strukture diskretnog Kalmanovog filtra	136
4.1.3 Kriterijum za ocenu kvaliteta estimatora: nepomeranost i minimalna varijansa greške estimacije (optimalni estimator minimalne varijanse greške)	138
4.1.4 Heuristička analiza rada diskretnog Kalmanovog filtra	142
4.1.5 Inicijalizacija i implementiranje diskretnog Kalmanovog filtra	144
4.1.6 Geometrijski princip ortogonalnosti	152
4.1.7 Asimptotske osobine diskretnog Kalmanovog filtra: diskretna Rikatijska jednačina	154
4.1.8 Kalmanov filter kao observer stanja linearnog diskretnog dinamičkog sistema	158
4.1.9 Kratak pregled osnovnih osobina Kalmanovog estimatora	164
4.2 Kontinualni Kalmanov filter: Optimalni estimator stanja kontinualnih stohastičkih modela signala i sistema u prostoru stanja	166
4.2.1 Postavka problema filtracije (estimacije) u prostoru stanja	166
4.2.2 Trajektorija linearnog kontinualnog sistema u prostoru stanja: metod varijacije parametara	169
4.2.3 Diskretizacija linearnog kontinualnog modela u prostoru stanja	174
4.2.4 Kontinualni Kalmanov filter: Estimator stanja stohastičkih modela sistema i signala u prostoru stanja	178
4.3 Robusni i adaptivni Kalmanovi filtri: estimacija stanja stohastičkih modela signala i sistema u uslovima nepoznavanja statističkih karakteristika šuma	193
4.3.1 Postavka problema robusne filtracije stohastičkih signala	193
4.3.2 Kratak prikaz koncepta M-robusne estimacije	198

4.3.3 Robusni Kalmanovi filtri zasnovani na konceptu M-robustne estimacije i metodu stohastičke aproksimacije: M-robustni Kalmanovi filtri tipa stohastičke aproksimacije	207
4.3.4 Adaptivni M-robustni Kalmanovi filtri tipa stohastičke aproksimacije	217
Glava 5	
Adaptivno filtriranje: Parametarska identifikacija diskretnih stohastičkih sistema	231
5.1 Uvod	231
5.2 Strukture digitalnih filtara	231
5.2.1 Filtri sa beskonačnim impulsnim odzivom (IIR filtri)	232
5.2.2 Filtri sa konačnim impulsnim odzivom (FIR filtri)	234
5.3 Kriterijumska funkcija za estimaciju parametara FIR filtra	236
5.3.1 Kriterijum srednje kvadratne greške (rizika) – MSE kriterijum	237
5.3.2. Minimizacija kriterijuma srednje kvadratne greške (rizika)	239
5.3.2.1 Njutnova metoda	241
5.3.2.2 Metoda najbržeg spusta	243
5.4 Adaptivni algoritmi za estimaciju parametara FIR filtara	245
5.4.1 Algoritam minimalnih srednje-kvadratnih vrednosti (LMS algoritam)	245
5.4.2 Algoritam najmanjih kvadrata (LS algoritam)	247
5.4.3 Rekurzivni algoritam najmanjih kvadrata (RLS algoritam)	249
5.4.4 Rekurzivni algoritam najmanjih kvadrata sa eksponencijalnim faktorom zaboravljanja (WRLS algoritam)	252
5.5 Adaptivni algoritmi za estimaciju parametara IIR filtara	258
5.5.1 Rekurzivni algoritam greške predikcije (RPE algoritam)	265
5.5.2 Algoritam pesudo-linearne regresije (PLR algoritam)	270
Glava 6	
Adaptivni digitalni filtri sa promenljivim faktorom zaboravljanja: Estimacija vremenski promenljivih parametara diskretnih stohastičkih sistema.....	275
6.1 Izbor promenljivog faktora zaboravljanja	275
6.1.1 Izbor faktora zaboravljanja na osnovu proširene greške predikcije	276
6.1.2 Fortescue-Kershenbaum-Ydstie algoritam (FKY algoritam)	278
6.1.3 Algoritam paralelne adaptacije (PA-RLS algoritam)	286
6.1.4 Generalisani algoritam otežinjenih najmanjih kvadrata sa promenljivim faktorom zaboravljanja	293
6.1.5 Izbor promenljivog faktora zaporavljanja na osnovu modifikovanog generalizovanog algoritma maksimalne verodostojnosti: MGLR algoritam	296
6.2 Eksperimentalna analiza.....	303
6.2.1 Komparativna analiza rekurzivnih algoritama za estimaciju promenljivog faktora zaboravljanja (analiza RLS algoritma sa PGP, FKY i PA strategijom za izračunavanje promenljivog faktora zaboravljanja)	303
Glava 7	
Adaptivni digitalni filtri sa povećanom brzinom konvergencije: Optimalno planiranje pobudnog signala	306
7.1 Definisane problema parametarske identifikacije	307
7.2 Adaptivni filtri konačnog impulsnog odziva sa optimalnim ulazom	308
7.3 Analiza konvergencije adaptivnih algoritama	312

7.4 Primena rekurzivnog algoritma najmanjih kvadrata sa optimalnim ulazom kod potiskivanja lokalnog eha u sistemima za skremblovanje	328
7.4.1 Definisavanje problema potiskivanja lokalnog eha u sistemima za skremblovanje ...	328
7.4.2 Eksperimentalna analiza	330
7.5 Primena promenljivog faktora zaboravljanja na adaptivne filtre konačnog impulsnog odziva sa optimalnim ulazom.....	335
Glava 8	
Robustifikacija adaptivnih digitalnih filtara: Parametarska identifikacija u približno poznatom stohastičkom okruženju	347
8.1 Robusni algoritam minimalne srednje-kvadratne greške: robusni LMS algoritam	349
8.1.1 Robustifikacija algoritma minimalne srednje-kvadratne greške: robusni LMS algoritam (RLMS algoritam)	351
8.1.2 Analiza stabilnosti robusnih estimatora.....	355
8.1.3 Eksperimentalna analiza na osnovu simulacija	357
8.2 Robusni rekurzivni algoritam najmanjih kvadrata sa optimalnim ulazom	363
8.2.1 Eksperimentalna analiza	368
8.3 Adaptivna procena faktora skaliranja kod robusnih algoritama.....	370
8.3.1 Eksperimentalna analiza	378
8.4 Robusni rekurzivni algoritam najmanjih kvadrata sa promenljivim faktorom zaboravljanja i detekcijom impulsnih smetnji	382
8.4.1 Eksperimentalna analiza	386
8.5 Rekurzivni robusni algoritam ponderisanih najmanjih kvadrata sa paralelnom robusnom adaptacijom faktora skaliranja I faktora zaboravljanja	388
8.5.1 Rekurzivna robusna estimacija parametara na bazi kriterijuma ponderisanih (težinskih) najmanjih kvadrata.....	389
8.5.2 Rekurzivna robusna estimacija faktora skaliranja (nepoznate standardne devijacije šuma)	393
8.5.3 Izbor promenljivog faktora zaboravljanja na osnovu robustifikovane modifikovane proširene greške predikcije (M-robusni MPGP algoritam).....	397
8.5.4 Eksperimentalna analiza	403
Glava 9	
Primene adaptivnih robusnih digitalnih filtara za potiskivanje eha u telekomunikacionim mrežama:.....	415
9.1 Eho-uzroci i načini nastanka	417
9.1.1 Eho kod prenosa govora.....	417
9.1.2. Akustički eho	419
9.1.3 Eho kod prenosa podataka.....	420
9.1.4 Osnovi principi adaptivnog potiskivanja eha	421
9.2 Matematički model sistema za potiskivanje eha	423
9.3 Analiza uticaja pobudnog signala na performanse sistema za potiskivanje eha kod prenosa govornog signala	424
Literatura	431
Lista skraćenica	439
Indeks	441

Spisak slika

Slika 1. Blok šema Vinerovog filtra (estimatora)	6
Slika 2. Blok dijagram Kalmanovog estimatora (filtra)	9
Slika 3. Teorijski osnovi Kalmanove filtracije	10
Slika 4. Blok šema adaptivnog filtra	12
Slika 1.1 Specifikacija željene amplitudsko-frekvencijske karakteristike NF filtra	16
Slika 1.2 Zadovoljavajuća amplitudsko-frekvencijska karakteristika NF filtra.....	17
Slika 1.3 Amplitudsko-frekvencijske karakteristike Butterworth-ovih filtara reda $N=2, 4$ i 8 ..	18
Slika 1.4 Tipičan grafik kvadrata Chebyshev-ljeve funkcije	20
Slika 1.5 Postupak određivanja polova Chebyshev-ljevog filtra prvog tipa, četvrtog reda.....	21
Slika 2.1 Blok šema postupka estimacije	25
Slika 2.2 Mogući izgled funkcije gubtaka ili rizika u kriterijumu optimalnosti	26
Slika 2.3 Geometrijski prikaz principa ortogonalnosti (analogno sa linearnom algebram)	42
Slika 2.4 Postupak diskretizacije kontinualnog signala	48
Slika 2.5 Geometrijski princip ortogonalnosti; šematski prikaz	52
Slika 2.6 Uslovna f.g.v.	73
Slika 3.1 Blok šema optimalng Vinerovog estimatora	82
Slika 3.2 Dvokoračni inovacioni postupak za sintezu optimalnog kontinualnog Vinerovog estimatora	86
Slika 3.3 Transformacija spektra signala.....	88
Slika 3.4 Konverzija korelisanog slučajnog procesa u beli šum primenom inverznog filtra.....	88
Slika 3.5 Blok šema optimalnog Vinerovog estimatora	90
Slika 3.6 Blok šema Vinerovog filtra u kompleksnom domenu	94
Slika 3.7 MSE –kriterijum u funkciji parametra ε za različite fiksne vrednosti parametra η funkcije prenosa.....	97
Slika 3.8 Blok šema Vinerovog linearnog estimatora za procenu odbiraka vremenski diskretnog signala $\{x(i)\}$ na bazi diskretnih merenja $\{y(i)\}$	106
Slika 3.9 Filter za bojenje (korelisanje) belog šuma i inverzni filter za beljenje obojenog šuma u frekvencijskom kompleksnom domenu.....	114
Slika 4.1 Šematska ilustracija rada Kalmanovog filtra kao prediktor korektor algoritma u realnom vremenu (prikaz dva sukcesivna ciklusa u radu Kalmanovog filtra)	146
Slika 4.2 Pomoćni modul za izračunavanje optimalnog Kalmanovog pojačanja	146
Slika 4.3 Blok šema diskretnog Kalmanovog filtra kao estimatora stanja linearnih diskretnih dinamičkih stohastičkih sistema	155
Slika 4.4 Observer stanja sistema sa promenljivim pojačanjem	162
Slika 4.5 Funkcionalna šema sistema upravljanja sa Kalmanovim filtrom kao observerom stanja	164
Slika 4.6 Aproksimacija kontinualnog šuma merenja	177
Slika 4.7 Funkcionalni blok dijagram kontinualnog Kalmanovog filtra za model sistema.....	180
Slika 4.8 Određivanje ekvivalentnog linearnog kontinualnog sistema, koji se pobuđuje belim šumom a na izlazu generiše obojeni šum zadate spektralne gustine snage .	185
Slika 4.9 Kretanje tela u konstantnom gravitacionom polju	189

Slika 4.10 Strukturni blok dijagram adaptivnog robusnog Kalmanovog estimatora stanja sistema	228
Slika 5.1 Struktura IIR rekurzivnog filtra	233
Slika 5.2 Struktura transversalnog FIR nerekurzivnog filtra	235
Slika 5.3 Struktura adaptivnog digitalnog filtra	238
Slika 5.4 Izgled MSE za slučaj kad je $M=1$	239
Slika 5.5 Izgled MSE za slučaj kad je $M=2$	240
Slika 5.6 Grafički prikaz metode najbržeg spusta	244
Slika 5.7 Pravci određivanja minimuma kriterijumske funkcije kod metode najbržeg spusta i Njutnove metode.....	244
Slika 5.8 Direktna realizacija FIR filtra	248
Slika 5.9 Blok šema EE IIR digitanog filtra	259
Slika 5.10 Blok šema OE adaptivnog digitanog IIR filtra	261
Slika 6.1 Raspored prozora analize u MGLR algoritmu	296
Slika 6.2 Veza između diskriminacione funkcije MGLR algoritma i promenljivog faktora zaboravljanja	299
Slika 6.3 Promena parametra b_1 FIR filtra reda $M=9$ u skladu sa test signalom 2.....	303
Slika 6.4 Vrednost procenjenog parametra FIR filtra uz primenu fiksnog faktora zaboravljanja	304
Slika 6.5 Estimacija vremenski promenljivog parametra FIR filtra primenom RLS algoritma sa PGP strategijom za izbor promenljivog faktora zaboravljanja.....	305
Slika 6.6 Estimacija vremenski promenljivog parametra FIR filtra primenom RLS algoritma sa FKY strategijom za izbor promenljivog faktora zaboravljanja.	305
Slika 6.7 Estimacija vremenski promenljivog parametra FIR filtra primenom RLS algoritma sa PA strategijom za izbor promenljivog faktora zaboravljanja.	306
Slika 6.8 Estimacija vremenski promenljivog parametra b_1 (test 2) primenom RLS PGP algoritma.....	307
Slika 6.9 Estimacija vremenski promenljivog parametra (test 2) primenom RLS FKY algoritma.....	308
Slika 6.10 Estimacija vremenski promenljivog parametra (test 2) primenom PA RLS algoritma	308
Slika 6.11 Estimacija vremenski promenljivog parametra (test 2) primenom RLS algoritma	309
Slika 7.1 Opšta struktura sistema za parametarsku identifikaciju sistema	312
Slika 7.2 Blok šema sistema za skremblovanje govornog signala	334
Slika 7.3 Princip potiskivanja lokalnog eha za jedan pravac prenosa.....	335
Slika 7.4 Normalizovana greška estimacije (NEE) za beli Gausov šum pseudo-slučajnu binarnu sekvencu i optimalnu ulaznu sekvencu za red FIR filtra $M=9$	336
Slika 7.5 ERLE faktor za beli Gausov šum, pseudo-slučajnu binarnu sekvencu i optimalnu ulaznu sekvencu za red FIR filtra $M=9$	337
Slika 7.6 Normalizovana greška estimacije (NEE) za beli Gausov šum, pseudo-slučajnu binarnu sekvencu i optimalnu ulaznu sekvencu za red FIR filtra $M=256$	338
Slika 7.7 ERLE faktor za beli Gausov šum, pseudo-slučajnu binarnu sekvencu i optimalnu ulaznu sekvencu za red FIR filtra $M=256$	338
Slika 7.8 Normalizovana greška estimacije (NEE) za beli Gausov šum, pseudo-slučajnu binarnu sekvencu i optimalnu ulaznu sekvencu za red FIR filtra $M=1000$	339

Slika 7.9 ERLE faktor za beli Gausov šum, pseudo-slučajnu binarnu sekvencu i optimalnu ulaznu sekvencu za red FIR filtra $M=1000$	339
Slika 7.10 Normalizovana greška estimacije (SNR =10 dB) za izbor VFF primenom PA-RLS algoritma sa pobudnim signalom: Gausov šum i optimalna ulazna sekvenca	343
Slika 7.11 Normalizovana greška estimacije (SNR =20 dB) za izbor VFF primenom PA-RLS algoritma sa pobudnim signalom: Gausov šum i optimalna ulazna sekvenca	344
Slika 7.12 Normalizovana greška estimacije (SNR =30dB) za izbor VFF primenom PA-RLS algoritma sa pobudnim signalom: Gausov šum i optimalna ulazna sekvenca	345
Slika 8.1 Blok šema opšte strukture za parametarsku identifikaciju sistema (model sistema je poznat sa tačnošću do nepoznatog vektora parametara)	349
Slika 8.2 Oblik Ψ funkcije za različite estimatore	354
Slika 8.3 Log normalizovana greška estimacije za različite algoritme u prisustvu Gausovog šuma	359
Slika 8.4 Log normalizovana greška estimacije za različite algoritme u prisustvu impulsnog šuma	360
Slika 8.5 Usrednjena log normalizovana greška estimacije za različite verovatnoće računata na osnovu 100 Monte Karlo pokušaja.....	360
Slika 8.6 Aditivni impulsni šum na izlazu željenog sistema	369
Slika 8.7 Normalizovana greška estimacije (NEE) za različite adaptivne algoritme u slučaju kada u željenom odzivu nije prisutan impulsni šum.....	369
Slika 8.8 Normalizovana greška estimacije (NEE) za različite adaptivne algoritme u slučaju kada je u željenom odzivu prisutan impulsni šum.....	369
Slika 8.9 Aditivni šum promenljive dinamike: a) bez prisustva impulsnih smetnji b) uz prisustvo impulsnih smetnji	378
Slika 8.10 Procena faktora skaliranja: a) primenom medijane apsolutne devijacije b) iterativnom metodom	379
Slika 8.11 Normalizovana greška estimacije kada u aditivnom šumu nisu prisutane impulsne smetnje.....	380
Slika 8.12 Normalizovana greška estimacije kada su u aditivnom šumu prisutane impulsne smetnje.....	381
Slika 8.13 Estimacija vremenski promenljivog parametra primenom RRLS algoritma sa promenljivim faktorom zaboravljanja i detektorom „outlier“-a kada nije prisutna impulsna kontaminacija:	386
Slika 8.14 Promena parametra b_1 FIR filtra reda $M=9$	387
Slika 8.15 Estimacija vremenski promenljivog parametra primenom RRLS algoritma sa promenljivim faktorom zaboravljanja i detektorom „outlier“-a kada je prisutna impulsna kontaminacija:	387
Slika 8.16 Trajektorija vremenski promenljivog parametra,	407
Slika 8.17 Realizacija aditivnog šuma sa nultom srednjom vrednošću, :	408
Slika 8.18 Eksperimentalni rezultati za RRWLSV algoritam kada je nominalni šum gausovski nulte srednje vrednosti	408
Slika 8.19 Eksperimentalni rezultati za RLSVF algoritam kada je nominalni šum gausovski nulte srednje vrednosti	409
Slika 8.20 Eksperimentalni rezultati za RRLSS algoritam kada je nominalni šum gausovski nulte srednje vrednosti	409
Slika 8.21 Eksperimentalni rezultati za RRWLSV algoritam kada je nominalni šum gausovski nulte srednje vrednosti kontaminiran „outlier“-ima	410

Slika 8.22 Eksperimentalni rezultati za RLSVF algoritam kada je nominalni šum gausovski nulte srednje vrednosti kontaminiran „outlier“-ima	410
Slika 8.23 Eksperimentalni rezultati za RRLSS algoritam kada je nominalni šum gausovski nulte srednje vrednosti kontaminiran „outlier“-ima	411
Slika 8.24 Realizacija aditivnog šuma	411
Slika 8.25 Trajektorija vremenski promenljivog parametra	412
Slika 8.26 Normalizovana greška estimacije (NEE), za različite algoritme, u nestacionarnom okruženju sa Gausovskim šumom nulte srednje vrednosti i vremenski promenljivim parametrom	412
Slika 8.27 Normalizovana greška estimacije (NEE), za različite algoritme, u nestacionarnom okruženju sa Gausovskim šumom nulte srednje vrednosti koji je kontaminiran „outlier“-ima i vremenski promenljivim parametrom.....	413
Slika 9.1 Nastanak eha u analognoj telefonskoj mreži pri prenosu govornog signala	418
Slika 9.2 Nastanak akustičkog eha. Akustički eho je posledica kratkog spajanja između zvučnika i mikrofona, usled refleksije od okolnih predmeta	419
Slika 9.3 Blok šema potpunog dvosmernog prenosa (“full-duplex”) na jednomvodu realizovanog pomoću hibrida. Signali eha su obeleženi isprekidanim linijama	420
Slika 9.4 Adaptivno potiskivanje akustičkog eha	421
Slika 9.5 Adaptivno potiskivanje eha (APE) za oba pravca prenosa govornog signala	422
Slika 9.6 Adaptivno potiskivanje lokalnog i linijskog eha	422
Slika 9.7 Blok šema sistema za adaptivno potiskivanje eha	424
Slika 9.8 ERLE faktor kada se prenosni put signala eha simulira sa FIR filtrom	427
Slika 9.9 ERLE faktor kada se prenosni put signala eha simulira IIR filtrom tipa Butterworth	427
Slika 9.10 ERLE faktor kada se prenosni put signala eha simulira IIR filtrom tipa Chebyshev.....	428

Spisak tabela

Tabela 1.1 Preslikavanje funkcije prenosa NF filtra u funkciju prenosa željenog tipa filtra	23
Tabela 4.1 Heuristički opis funkcionisanja Kalmanovog Filtra	143
Tabela 4.2 Dijagram toka algoritma digitalne Kalmanove filtracije	145
Tabela 4.3 Dijagram toka Kalmanovog observera stanja linearnih diskretnih vremenski-invarijantnih sistema	161
Tabela 4.4 Linearni kontinualni model i ekvivalentni linearni diskretni model u prostoru stanja	177
Tabela 4.5 Jednačine kontinualnog Kalmanovog filtra	181
Tabela 4.6 Proračun diskretnog Kalmanovog filtra za praćenje objekta u prostoru.....	193
Tabela 4.7 Dijagram toka algoritma M-robustne digitalne Kalmanove filtracije tipa stohstičke aproksimacije	215
Tabela 4.8 Dijagram toka procedure za implementaciju adaptivnog M-robustnog Kalmanovog filtra.....	223
Tabela 5.1 Dijagram toka RLS algoritma	252
Tabela 5.2 Dijagram toka WRLS algoritma	257
Tabela 5.3 Dijagram toka EE-WRLS algoritma	265
Tabela 5.4 Dijagram toka RPE algortima	269
Tabela 5.5 Dijagram toka PLR algoritma.....	271
Tabela 6.1 Određivanje faktora zaboravljanja FKY strategijom	282
Tabela 6.2 Određivanje faktora zaboravljanja PA strategijom.....	292
Tabela 7.1 Vrednost usrednjene normalizovene greške estimacije za beli Gausov šum i optimalnu ulaznu sekvencu (SNR=10 dB).....	342
Tabela 7.2 Vrednost usrednjene normalizovene greške estimacije za beli Gausov šum i optimalnu ulaznu sekvencu (SNR=20 dB).....	343
Tabela 7.3 Vrednost usrednjene normalizovene greške estimacije za beli Gausov šum i optimalnu ulaznu sekvencu (SNR=30dB).....	344
Tabela 8.1 Dijagram toka RLMS algoritma	354
Tabela 8.2 Usrednjena log normalizovana greška estimacije za različite verovatnoće računata na osnovu of 100 Monte Karlo pokušaja	361
Tabela 8.3 Usrednjena log normalizovana greška estimacije za različite vrednosti inteziteta impulsnog šuma, računata na osnovu 100 Monte Karlo pokušaja	361
Tabela 8.4 Usrednjena log normalizovana greška estimacije za različite vrednosti raspodele amplitude računata na osnovu 100 Monte Karlo pokušaja	361
Tabela 8.5 Dijagram toka RRLS algoritma.....	365
Tabela 8.6 Dijagram toka RRLSO algoritma	366
Tabela 8.7 Dijagram toka algoritma za istovremnu estimaciju parametara i faktora skaliranja	377
Tabela 8.8 Varijansa procene faktora skaliraja: a) primenom medijane apsolutne devijacije b) iterativnom metodom	380
Tabela 8.9 Dijagram toka RRLS algoritma sa promenljivim faktorom zaboravljanja i detekcijom impulsnih smetnji	384

Tabela 8.10 Dijagram toka rekurzivnog robusnog algoritma ponderisanih najmanjih kvadrata sa robusnim adaptivnim faktorom skaliranja i faktorom zaboravljanja	400
Tabela 8.11 Srednja vrednost i varijansa uzorka za različite stepene kontaminacije	406
Tabela 8.12 Srednja vrednost i varijansa uzorka za različite intenzitete „outlier“-a,	406
Tabela 8.13 Srednje kvadratna norma matrice kovarijanse greške estimacije za različite početne uslove	407
Tabela 9.1 Karakteristike RLS i LMS adaptivnih algoritama	429

Uvod

U opštem slučaju pojam „filter“ podrazumeva fizički uređaj čiji je zadatak da ukloni neželjene sastojke iz odgovarajuće mešavine. U originalnoj definiciji filter je fizički sklop koji rešava problem izdvajanja neželjenih komponenti iz mešavine koja se sastoji od gasa, tečnosti i čvrste faze. Kasnije, u eri elektronskih cevi i analogne elektronike ovaj termin je označavao analogno kolo koje filtrira elektronske signale. Ovakvi signali predstavljali su mešavine komponenti (harmonika) na različitim frekvencijama, te je ovaj fizički (elektronski) sklop potiskivao neželjene frekvencije. Ovaj koncept je proširen krajem prve polovine 20. veka na izdvajanje korisnog signala iz zašumljene sredine, pri čemu su i signal i šum opisani stohastički preko odgovarajućih spektralnih gustina snage i njima pridruženih kovarijacionih funkcija. Međutim, pre početka uvodnog izlaganja razmotrimo ukratko osnovne momente u razvoju teorije estimacije.

Kratak prikaz istorije estimacije

Neizbežnost postojanja grešaka prilikom merenja fizičkih veličina uočeno je još u doba Galileja Galileja (*Galileo Galilei*, 1564-1642). Međutim, prvi formalni matematički metod za tretiranje ovakvih grešaka predložio je tek 1795. godine Karl Fridrih Gaus (*Carl Friedrich Gauss*, 1777-1855). Iako se ovaj metod, koji je nazvan metod najmanjih kvadrata (u engleskoj literaturi *Method of Least Squares*) pretežno koristi za optimalno rešavanje problema linearne estimacije, Gaus je primenio ovaj metod za rešavanje, sa matematičkog stanovišta, nelinearnog problema estimacije u okviru astronomije. Ovaj događaj je obrađen na više mesta u literaturi i ukratko se može prikazati na sledeći način. Prvog dana 19. veka, 01.01.1801. godine, italijanski astronom *Giuseppe Piazzi* proučavao je astronomski katalog zvezda, neznavši da je katalog odštampan sa greškom. Pokušavajući da pronađe nedostajuću zvezdu u katalogu, otkrio je novu planetu, koju je kasnije nazvao Ceres, a da nije bio ni svestan svog otkrića. Narednu 41 noć pratio je kretanje planete iz observatorije u Palermu, nakon čega je prekinuo eksperiment. Međutim, kada je nakon izvesnog vremena nastavio eksperiment, više nije mogao da pronađe nebesko telo. O svom otkriću je 24.01.1801. godine pismenim putem obavestio Johana Boda (*Johan Bode*), koji je bio poznat po Bodeovom zakonu, na osnovu koga se moglo proračunati, u astronomskim jedinicama, rastojanje planete od Sunca, na osnovu formule