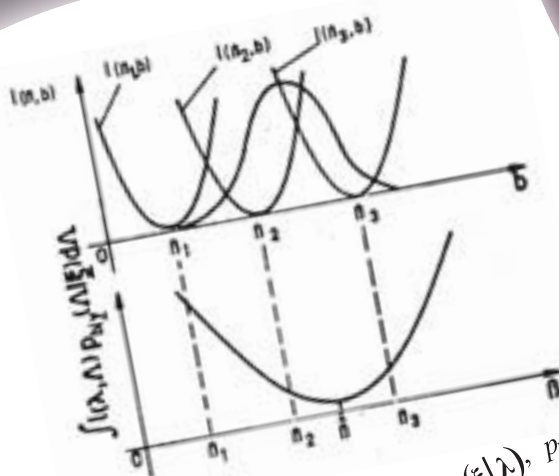


IDENTIFIKACIJA PROCESA

Dragutin Lj. Debeljković



Apriorna informacija - $P_{\beta|b}(\xi|\lambda)$, $P_b(\lambda)$, $\ell(\beta, b)$

Dr Dragutin Lj. Debeljković

IDENTIFIKACIJA PROCESA

**Mašinski fakultet
Univerziteta u Beogradu
2014**

Dr **Dragutin Lj. Debeljković**, redovni profesor
Mašinski fakultet - Univerzitet u Beogradu

Identifikacija procesa

Udžbenik

I izdanje

Recenzenti

Dr Zoran Ribar, redovni profesor
Mašinskog fakulteta u Beogradu

Dr Srđan Ribar, docent
Mašinskog fakulteta u Beogradu

Izdavač

Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet Beograd
11000 Beograd, Kraljice Marije 16

Za izdavača

Dr Aleksandar Obradović, prof.

Odobreno za štampu

odlukom *Dekana* br. 266/14 od 06.03.2014. godine.

Beograd, 2014

Tiraž: 100 primeraka

Štampa PLANETA print

ISBN 978-86-7083-823-9

*Preštampavanje, umnožavanje, fotokopiranje
ili reprodukcija cele knjige ili nekih njenih delova nije dozvoljena*

Dr Dragutin Lj. Debeljković

IDENTIFIKACIJA PROCESA

**Mašinski fakultet
Univerziteta u Beogradu
2014**

Predgovor

Udžbenik *Identifikacija procesa sa* sadrži i obuhvata osnovne postavke velikog broja metoda razvijenih za estimaciju parametara i identifikaciju objekata i procesa i namenjena je širem krugu čitalaca čija je oblast interesovanja i istraživanja vezana za ovu klasu problema i uopšte za teoriju i praksu automatskog upravljanja.

Velika većina savremenih sistema automatskog upravljanja izložena je neprestanom delovanju kako unutrašnjih tako i spoljašnjih neželjenih uticaja, koji u krajnjoj liniji menjaju njihove inherentne karakteristike i uslove u kojima oni rade.

U vezi sa time, određivanje i podešavanje matematičkog opisa objekata i procesa u uslovima njihovog normalnog funkcionisanja od posebnog je značaja.

Ovi i slični problemi predstavljaju fundamentalna razmatranja jedne posebne oblasti automatskog upravljanja – identifikacije.

Valja napomenuti da se ova oblast istraživanja ne susreće samo u tehničkim naukama već da je u dovoljnoj meri prisutna i zastupljena i na drugim poljima kao što su: medicina, biologija, ekonomije, demografija, itd.

Imajući u vidu sve strožije zahteve koji se nameću realnim sistemima automatskog upravljanja u pogledu kvaliteta njihovog dinamičkog ponašanja kao i činjenicu da je u tom kontekstu neophodno raspolagati odgovarajućim verodostojnim i kvalitetnim matematičkim modelima objekata i procesa, njihovo određivanje na bazi teorijskih razmatranja, uz korišćenje osnovnih zakona fizike ne može uvek da zadovoljavajuće rezultate.

Pokazuje se, naime, da je veoma često neophodno izvesne neodređenosti u modelima kompenzovati eksperimentalnim ispitivanjima.

U tom cilju koristi se identifikacioni postupak koji na bazi prikupljenih merenih podataka o karakteru i vrednostima ulaznih i izlaznih veličina razmatranog procesa treba da potpomogne formiranju njegovog konačnog, verodostojnog matematičkog modela.

Teorija identifikacije dinamičkih objekata i procesa razvijala se pod okriljem teorije optimalnog upravljanja u prisustvu nedovoljne informacije. Imajući u vidu da su realni sistemi automatskog upravljanja izloženi stalnim i nepredvidljivim desjtvima spoljašnjih uticaja u vidu različitih poremećaja i šumova, koji po pravilu, imaju uvek slučajan karakter više nego očigledno je da se ova teorija morala u velikoj meri oslanjati i na prilaz sa pozicija verovatnoće i matematičke statistike.

Iz tih razloga u uvodnom delu knjige kao i izvesnom broju dodataka data je rekapitulacija osnovnih pojmova iz pomenutih oblasti.

Da bi se zainteresovanom čitaocu olakšalo praćenje izložene materije, dati su brojni primeri, koji algoritamski prezentuju izložene metode i postupke za identifikaciju parametara i / ili stanja objekat i procesa.

U odnosu na ranija izdanja autora po pitanju ove problematika, predmetni udžbenik obogaćen je novim sadržajem koji obuhvata postupke identifikacije i estimacije parametara i stanja obejaka i procesa sa raspodeljenim parametrima.

Imajući u vidu da su ovo procesi beskonačne dimenzije, opisani u matematičkom smislu parcijanim diferencijalnim jednačinama, posve je jasno koliko je ova problematika složena i koliko iziskuje istinskih napora da se na jedan prikladan način približi čitaocu.

Veliku pomoć u razumevanju ove materije, može da ima nedavno izašla knjiga istog autora pod naslovom *Linearni stohastički sistemi* kao i monografija *Analiza, sinteza i estimacija linearnih sistema automatskog upravljanja u prisustvu slučajnih signala* koje, u velikoj meri, mogu da predstavlja snažnu podlogu, za više nego elementarno, upoznavanje sa neophodnim matematičkim aparatom i nekim principima estimacije koji se tamo izlažu.

Pored čitalaca sa izrazitim afinitetima ka teorijskim razmatranjima ovaj udžbenik će, po svom sadržaju, zainteresovati i stručnjake koji se u većoj meri bave istraživačkim i praktičnim radom, pa će autor biti zahvalan na svim novim sugestijama i zapažanjima u pogledu daljeg poboljšanja kvaliteta njenog sadržaja.

Ovaj udžbenik napisan je u skladu sa nastavnim programom predmeta *Identifikacija procesa*, koji slušaju studenti grupe za automatsko upravljanje Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, na master akademskim studijama.

Dr Zoranu Ribaru, redovnom profesoru Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu i *Dr Srđanu Ribaru, docentu* Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu zahvaljujem se na korisnim sugestijama i trudu oko recenzije.

A u t o r

Beograd, april 2014. god.

SADRŽAJ

OPŠTI DEO

I OPŠTA RAZMATRANJA

1. UVOD	1
1.1. Objekti upravljanja	1
1.2. Modeli objekata upravljanja	3
1.3. Pojam operatora kao uopštene karakteristike objekata upravljanja	10
1.4. Identifikacija objekata i procesa osnovni pojmovi i ideje	13
Literatura	22
2. OPŠTE POSTAVKE PROBLEMA IDENTIFIKACIJE	23
2.1. Formulacija i osnovni prilazi rešavanju zadataka identifikacije	23
2.2. Opšta pitanja identifikacije objekata i procesa	31
2.2.1. Klasa modela	31
2.2.1.1. Parametarski i neparametarski modeli	31
2.2.1.2. Koncept linearnosti po parametrima	38
2.2.2. Klasa ulaznih signala	41
2.2.2.1. Klasifikacija signala	41
2.2.2.2. Izbor klase ulaznih signala	43
2.2.3. Kriterijum ekvivalencije	45
2.2.3.1. Smisao uvođenja kriterijuma ekvivalencije	45
2.2.3.2. Izbor kriterijuma ekvivalencije	47
2.2.3.3. Računski aspekti primene kriterijuma ekvivalencije	48
2.2.4. Upravlјivost, osmotrivost, identifikabilnost	50
2.2.5. Značaj apriornih informacija	52

2.2.6. Prikupljanje merenih podataka	53
2.2.7. Tačnost identifikacije	57
2.2.8. Vreme identifikacije	57
2.2.9. Oblasti primene identifikacije	57
2.2.10. Dalje perspektive	59
Literatura	60
3. ELEMENTI TEORIJE OCENA	61
3.1. Osnovne osobine tačkastih ocena	62
3.2. Funkcija kazne u zadacima ocenjivanja nepoznatih parametara; optimalne ocene	65
3.3. Neke vrste ocena	68
3.3.1. Bajesovsko ocenjivanje	69
3.3.2. Ocenjivanje metodom najveće verodostojnosti	72
3.3.3. Ocenjivanje uopštenom metodom najmanjih kvadrata	73
3.3.4. Ocenjivanje metodom najmanjih kvadrata	73
3.3.5. Ekvivalentnost pojedinih ocena	76
Literatura	78

IDENTIFIKACIJA OBJEKATA I PROCESA

II METODE ZA IDENTIFIKACIJU I ESTIMACIJU OBJEKATA I PROCESA SA USREDSREĐENIM PARAMETRIMA

4. KLASIČNE METODE IDENTIFIKACIJE	79
4.1. Metode za identifikaciju impulsnog odziva	81
4.1.1. Identifikacija impulsnog odziva korišćenjem integrala konvolucije	82
4.1.2. Identifikacija impulsnog odziva metodom najmanjih kvadrata	84
4.1.3. Identifikacija impulsnog odziva metodom najveće verodostojnosti	86
4.1.4. Identifikacija impulsnog odziva korelacionom tehnikom	88

4.1.4.1. Identifikacija impulsnog odziva korišćenjem ulaznog signala u vidu belog šuma	88
4.1.4.2. Identifikacija impulsnog odziva korišćenjem ulaznog signala u vidu pseudo-slučajnog binarnog šuma	91
4.1.4.3. Identifikacija impulsnog odziva dekonvolucijom Wiener-Hopf-ove jednačine	92
4.1.5. Identifikacija impulsnog odziva korišćenjem referentnog modela sa podešavajućim parametrima	95
4.1.6. Grafička identifikacija parametara processa korišćenjem impulsnog odziva	97
4.2. Identifikacija odskočnog odziva	99
4.3. Identifikacija sinusnog odziva	102
Literatura	103

5. OCENJIVANJE

PARAMETARA OBJEKATA I PROCESA	105
5.1. Ocenjivanje regresionim postupcima	105
5.1.1. Ocenjivanje na osnovu konačnog broja merenja	106
5.1.1.1. Metoda najmanjih kvadrata	111
5.1.1.2. Uopštena metoda najmanjih kvadrata	112
5.2. Ocenjivanje regresionim sekvencijalnim postupcima	114
5.2.1. Rekurentni metod najmanjih kvadrata	115
5.3. Ocenjivanje metodom najveće verodostojnosti	119
5.4. Ocenjivanje bajesovskim prilazom	127
5.5. Gradijentne metode u zadacima ocenjivanja parametara	134
5.5.1. Metode pretraživanja	136
5.5.2. Gradijentne metode	136
5.5.2.1. Gauss-Seidel-ova metoda	138
5.5.2.2. Gradijentna metoda	140
5.5.2.3. Metoda najbržeg pada	142
5.5.2.4. Neke druge metode	145
5.5.2.5. Primena gradijentnih metoda u prisustvu algebarskih ograničenja tipa jednakosti	150
5.6. Metoda stohastičke aproksimacije	153
Literatura	160

6. OCENJIVANJE PARAMETARA DINAMIČKIH OBJEKATA I PROCESA	163
6.1 Metoda najmanjih kvadrata	163
6.2. Metoda najveće verodostojnosti	165
6.3. Gradijetne metode	169
6.4. Metoda stohastičke aproksimacije	172
6.5. Neke druge metode	175
Literatura	180
7. OCENJIVANJE STANJA OBJEKATA I PROCESA	183
7.1 Kalman-Bucy-jev filter	184
7.1.1. Postavka problema	185
7.1.2. Rešavanje problema	187
7.2. Metoda najveće verodostojnosti	192
7.3. Bajesovsko ocenjivanje	194
7.3.1. Postavka problema	196
7.3.2. Nesekvencijalni prilaz	197
7.3.3. Sekvencijalni prilaz	200
Literatura	203
8. ISTOVREMENO OCENJIVANJE PARAMETARA I STANJA OBJEKATA I PROCESA	205
8.1. Formulacija DTGP	206
8.2. Kvazilinearizacije	211
8.3. Invarijantno uronjavanje	218
8.4. Gradijentni postupak	222
8.5. Metoda stohastičke aproksimacije	225
8.6. Bajesovski prilaz formulaciji dvo – tačkastog graničnog problema	227
Literatura	229
9. IDENTIFIKACIJA STRUKTURE OBJEKATA I PROCESA	231
Literatura	235

III METODE ZA IDENTIFIKACIJU I ESTIMACIJU OBJEKATA I PROCESA SA RASPODELJENIM PARAMETRIMA

10. NEKA OPŠTA PITANJA ESTIMACIJE PARAMETARA OBJEKATA I PROCESA SA RASPODELJENIM PARAMETRIMA	237
10.1. Matematičke osnove i polazni modeli za identifikaciju objekata i procesa sa raspoedeljenim parametrima	237
11. NEŠTO UOPŠTENNO O ESTIMACIJI PARAMETARA PROCESA	241
11.1. Primena identifikacije na (PRP)	242
11.2. Klasifikacija metoda	244
12. SELEKTIVNI PREGLED POSTIGNUTIH REZULTATA NA POLJU ESTIMACIJE PARAMETARA OBJEKATA I PROCESA SA RASPODELJENIM PARAMETRIMA.....	242
Literatura	254
13. ESTIMACIJA PARAMETARA U OBJEKTIMA I PROCESIMA SA RASPODELJENIM PARAMETRIMA	267
13.1. Uvod	267
13.2. Selektivni pregled literature iz ove oblasti	269
13.3. Specifični rezultati estimacije objekata i procesa sa raspoedeljenim parametrima	284
13.3.1. Estimacija parametara metodom karakteristika	284
13.3.2. Korišćenje Galerik-ove metode radi olakšavanja estimacije parametara	299
Literatura	307

14. ESTIMACIJA STANJA U OBJEKTIMA I PROCESIMA SA RASPODELJENIM PARAMETRIMA	317
14.1. Uvod	317
14.2. Stohastički modeli procesa sa raspedeljenim parametrima	318
14.3. Kratak pregled aktuelnih istraživanja	320
14.4. Osnovna teorija linearnog filtriranja sistema sa raspedeljenim parametrima	321
14.4.1. Prilaz preko ortogonalnih projekcija	321
14.4.2. Prilaz sa pozicija najmanjih kvadrata	322
14.4.3. Prilaz preko uslovne karakteristične funkcije	324
14.4.4. Bajesovski prilaz	326
14.4.5. Metoda najveće verodostojnosti	328
14.4.6. Inovativni prilaz	328
14.4.7. Prilaz sa stanovišta principa maksimuma	329
14.5. Poravnavanje i predviđanje	331
14.5.1. Poravnavanje na fiksnom intervalu	332
14.5.2. Poravnavanje sa fiksnom tačkom	333
14.5.3. Poravnavanje sa fiksnim kašnjenjem	333
14.5.4. Predikcija stanja	334
14.6. Dalji rezultati linearnog filtriranja	335
14.6.1. Merenja u diskretnoj tački	335
14.6.2. Granični šum i merenja	335
14.6.3. Filtriranje izmerenog obojenog šuma	337
14.6.4. Filtriranje sistema sa kašnjenjem	337
14.7. Ocenjivanje stanja nelinearnih procesa sa raspedeljenim parametrima	339
14.7.1. Metoda najveće verodostojnosti	339
14.7.2. Prilaz najmanjih kvadrata	341
14.7.3. Prilaz Fokker-Planck-ovom jednačinom	345
14.7.4. Nelinearni sistemi sa čistim vremenskim kašnjenjem	348
14.7.5. Filtriranje procesa sa raspedeljenim parametrima i pokretnim granicama	350

14.8. Osmotrivost i optimalni izbor lokacije mernih tačaka	353
14.8.1. Osmotrivost proces sa raspodeljenim parametrima	353
14.8.2. Optimalno mesto mernih tačaka	355
14.8.3. Prostorno – vremenska diskretizacija procesa sa raspodeljenim parametrima	358
14.9. Rigurozna opšta teorija estimacije stanja	360
14.10. Primeri primene	367
14.10.1. Primer sa zanemarljivim poremećajem stanja	367
14.10.2. Primer sa graničnim merenjima	369
14.10.3. Primer optimalnog mernog mesta	370
14.10.4. Primer nelinearnog filtriranja	373
14.10.5. Primer filtriranja sa pokretnim granicama	374
14.10.6. Primer filtriranja nuklearnog reaktora	376
14.10.7. Primer optimalne detekcije u prisustvu raspodeljenih šumova	378
Literatura	380

DODACI

IV DODACI

A – Oznake	389
B – Neka pitanja strukture objekata i procesa	397
C – Bayes-ova formula	399
D – Ortogonalne funkcije	403
E – Izvodi iz matrice analize	407
F – Neka posebna pitanja i aspekti metode najmanjih kvadrata	409
G – Primena metode najveće verodostojnosti pri nezavisnom i sekvencijalnom prikupljanju podataka	417
H – Izvodi iz varijacionog računa	419

I – Kalman-Bucy-jev filter za linearni, stacionarni diskretni objekt	425
J – Inverzna matrična lema	429
LITERATURA	431