

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" TIMIȘOARA
FACULTATEA DE ELECTRONICĂ ȘI TELECOMUNICAȚII

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Contribuții privind utilizarea filtrelor Kalman în
telecomunicații

Ing. Gál János

Conducător științific:
Prof. Dr. Ing. Ioan Naforniță

TIMIȘOARA
2010

Cuprins

Lista figurilor.....	
Lista tabelelor.....	
Introducere.....	

Capitolul 1

Interpretarea și estimarea frecvenței instantanee.....	
1.1 Noțiunea de frecvență instantanee.....	
1.2 Conceptul de frecvență instantanee.....	
1.2.1 Conceptul de frecvență.....	
1.2.2 Generalizarea conceptului de frecvență în cazul semnalelor nestaționare.....	
1.2.3 Interpretarea frecvenței instantanee.....	
1.3 Semnale cu fază polinomială (SFP).....	
1.4 Estimarea frecvenței pentru semnale staționare.....	
1.4.1 Definiția frecvenței instantanee în timp discret.....	
1.5 Tehnici de estimare a frecvenței pentru semnale staționare.....	
1.5.1 Estimarea adaptivă a frecvenței instantanee.....	
1.5.2 Algoritmul LMS.....	
1.5.3 Estimarea adaptivă RLS a frecvenței.....	
1.5.4 Metode de estimare a frecvenței instantanee bazate pe modelarea polinomială a fazei.....	
1.5.5 Algoritmul de estimare a coeficienților polinomiali bazat pe metoda celor mai mici pătrate.....	

Capitolul 2

Utilizarea filtrului Kalman în estimarea parametrilor semnalelor chirp.....	
2.1 Filtrul Kalman.....	
2.1.1 Prezentarea filtrului Kalman.....	
2.1.2 Fondatorii metodei de estimare.....	
2.2 Algoritmul filtrului Kalman standard discret.....	
2.2.1 Reprezentarea semnalelor în spațiul stărilor.....	
2.2.2 Condiții inițiale.....	
2.3 Model în spațiul stărilor pentru semnale nestaționare cu variația fazei de tip polinomial.....	
2.3.1 Modelul de semnal afectat de zgomot.....	
2.3.2 Aproximarea lui Tretter.....	
2.3.3 Vectorul de stare și ecuația de tranziție.....	
2.3.4 Ecuația de măsurare.....	
2.3.5 Legătura între stare și coeficienții polinomului fazei.....	
2.4 Estimarea parametrilor unui semnal chirp	
2.4.1 Algoritmul de filtrare Kalman standard.....	
2.4.2 Rezultatele cercetării.....	
2.4.3 Concluzii.....	

Capitolul 3

Identificarea parametrilor semnalelor cu fază polinomială cu filtrul Kalman extins.....	
3.1 Algoritmul filtrului Kalman extins	
3.1.1 Prezentarea filtrului Kalman extins.....	
3.2 Identificarea semnalelor cu fază polinomială prin utilizarea filtrarea Kalman extins.....	
3.2.1 Introducere.....	
3.2.2 Reprezentarea în spațiul stărilor neliniar semnalelor cu fază polinomială.....	
3.2.3 Modelul în spațiul-stărilor și ecuația de tranziție.....	
3.2.4 Ecuația de observare.....	
3.2.5 Algoritmul EKF.....	
3.2.6 Algoritmul EKF robust.....	
3.2.7 Rezultatele cercetării.....	
3.2.8 Analiza statistică.....	
3.2.9 Concluzii.....	

Capitolul 4

Demodularea necoerentă a semnalelor CPM prin filtru Kalman extins.....	
4.1 Modulația continuă de fază CPM.....	
4.2 Generarea semnalelor CPM.....	
4.2.1 Implementarea modulației GMSK în sistemul GSM.....	
4.3 Demodularea semnalelor CPM.....	
4.3.1 Probabilitatea de eroare în MSK și GMSK.....	
4.3.2 Demodularea coerentă a semnalelor CPM.....	
4.3.3 Demodularea necoerentă a semnalelor CPM.....	
4.3.3.1 Demodularea diferențială.....	
4.3.3.2 Detectorul discriminator.....	
4.4 Demodularea necoerentă prin filtru Kalman extins.....	
4.4.1 Modelul în spațiul-stărilor și ecuația de tranziție.....	
4.4.2 Algoritmul EKF.....	
4.5 Concluzii.....	

Capitolul 5

Contribuții și concluzii.....	
Anexa 1.....	
Anexa 2.....	
Bibliografie.....	
Lista lucrărilor publicate.....	

Sinteza tezei de doctorat

Scopul principal al tezei este utilizarea filtrelor Kalman la determinarea parametrilor semnalelor de telecomunicații. Se axează în mod special spre problemele legate de determinarea frecvenței și fazei instantanee a acestor semnale. Asemenea semnale se regăsesc frecvent în fizică, în special în semnalele de tip radar, sonar și telecomunicații. În aceste aplicații semnalul recepționat prezintă o modulația instantanee de fază datorată mișcării relative între senzor și țintă pentru sistemele radar sau între emițător și receptor în cazul comunicațiilor prin telefoane mobile. Aceste semnale sunt nestaționare, având parametri variabili în timp.

Dacă în cazul semnalelor staționare, în decursul timpului s-au dezvoltat o serie de modele și metode de prelucrare, extinderea acestora în cazul semnalelor nestaționare arată repede limitele ce nu pot fi depășite decât prin dezvoltarea de metode specifice acestora. Estimarea parametrilor semnalelor cu fază polinomială, (SFP) afectate de zgomot gaussian aditiv a fost tratată cu interes considerabil în literatura de specialitate și au fost folosite câteva metode, formulate ca probleme de identificare a sistemelor liniare, pentru soluționarea problemei. Estimarea parametrilor prin filtrare Kalman a fost investigată pe larg în cazul semnalelor SFP afectate de zgomot gaussian. Utilizarea filtrării Kalman standard și varianta sa extinsă este justificată de către avantajele sale practice în determinarea parametrilor unui semnal SFP precum și în demodularea semnalelor cu fază continuă.

Teza de doctorat este structurată după cum urmează.

Capitolul 1 începe cu un studiu asupra metodelor și tehnicilor de estimare a frecvenței instantanee. În prima parte a acestui capitol sunt prezentate noțiunile fundamentale și interpretarea frecvenței instantanee. Apoi urmează o scurtă descriere a semnalelor cu fază polinomială în privința aplicabilității acestora în comunicații. Tot în cadrul acestui capitol sunt prezentate principalele tehnici de estimare a frecvenței instantanee: estimarea adaptivă (algoritmul LMS și RLS), estimarea bazată pe modelarea polinomială a fazei și pe metoda celor mai mici pătrate.

Capitolul 2 începe cu prezentarea importanței filtrului Kalman, care este bazat pe descrierea semnalelor în spațiul stărilor și algoritmi recursivi. În continuare este descris algoritmul filtrului Kalman standard. Apoi se prezintă un model de stare liniar prin aproximarea lui Tretter care transformă zgomotul aditiv în zgomot pe fază și care este utilizat în estimarea parametrilor semnalelor chirp. În final sunt prezentate rezultatele obținute în urma simulărilor.

În capitolul 3 s-a considerat estimarea parametrilor unui semnal liniar de amplitudine variabilă, care este un semnal având faza sub forma unui polinom de gradul doi și perturbat de un zgomot aditiv și gaussian. Algoritmul filtrului Kalman extins dezvoltat în teză în comparație cu filtrul Kalman standard, înlătură incertitudinile asupra fazei prin înlocuirea semnalului real cu reprezentarea lui în forma analitică. Au fost analizate și comparate performanțele metodei EKF cu metoda Kalman-Tretter.

Capitolul 4 debutează cu o privire de ansamblu asupra modulației de tip CPM, (Continuous Phase Modulation) și include o sinteză a literaturii de specialitate privind cercetările făcute în domeniul modulațiilor MSK și GMSK. În scopul unei bune ilustrări a acestor modulații au fost prezentate caracteristicile fundamentale ale acestora, precum și modul de generare al semnalelor MSK și GMSK. Urmează apoi o prezentare a detecției coerente și necoerente, împreună cu mai multe referințe din literatura publicată pe acest subiect. Detecția coerentă necesită un receptor capabil să estimeze cu erori acceptabile atât frecvența cât și faza purtătoarei semnalului. În cazul detecției necoerente, nu este necesară recuperarea purtătoarei și, prin urmare, este mai puțin costisitoare și utilizează scheme mai simple, comparativ cu detecția coerentă. Acest capitol se concentrează pe demodularea necoerentă a semnalelor CPM folosind filtrul Kalman extins. Paragraful 4.4 prezintă modelul semnalului CPM în spațiul stărilor și ecuațiile care descriu algoritmului de filtrare Kalman extins utilizat. Apoi sunt analizate și comparate performanțele BER a semnalelor MSK și GMSK în canale AWGN.

Capitolul 5 este consacrat prezentării concluziilor rezultate în urma studiului teoretic și aplicativ efectuat acestei teze, evidențiind contribuțiile personale.

Contribuțiile personale

Scopul urmărit în teză este utilizarea filtrelor Kalman în estimarea parametrilor semnalelor cu fază polinomială afectată de zgomot gaussian și în demodularea necoerentă a semnalelor cu modulație de fază continuă.

În capitolul 2, am făcut o prezentare succintă a algoritmului Kalman standard și utilizarea sa în estimarea parametrilor semnalelor chirp. În cadrul acestui capitol, mai precis în paragraful 2.4, am propus un model liniar în spațiul stărilor pentru semnalele chirp cu amplitudine variabilă.

În paragraful 2.4.2 am analizat, prin simulare, convergența parametrilor semnalului chirp înecat în zgomot gaussian aditiv pentru diferite domenii de variație ale frecvenței instantanee și pentru diverse valori ale raportului semnal pe zgomot. În urma simulărilor efectuate am observat că filtrul Kalman standard converge foarte rapid spre valorile căutate. Aceste rezultate confirmate de un număr important de simulări arată că filtrul Kalman standard utilizat în aproximarea lui Tretter este performant în estimarea parametrilor unui semnal chirp înecat în zgomot alb, gaussian, atâta timp cât raportul semnal pe zgomot depășește 13dB.

În capitolul 3, am considerat estimarea parametrilor semnalelor chirp folosind algoritmul Kalman extins. În acest scop am propus un model neliniar în spațiul stărilor pentru semnalele cu fază polinomială. În urma simulărilor efectuate am observat cazuri de divergență datorită liniarizării, la rapoarte semnal pe zgomot mai mici decât 10dB. Am ajuns la concluzia că este mai bine să supraestimez valoarea dispersiei zgomotului ca să compensez termenii neglijați la liniarizarea ecuației de măsurare. Consecințele unei asemenea creșteri a dispersiei au fost pozitive, rata de divergență a scăzut în mod semnificativ. Am definit un factor de robustețe din ecuația (3.54) și am denumit algoritmul EKF respectiv „algoritm EKF robust”.

În paragraful 3.2.7 am simulat estimarea parametrilor semnalului SFP înecat într-un zgomot gaussian, folosind algoritmul EKF robust. Am observat că dacă raportul semnal

pe zgomot este mai mic de 13dB, în estimarea parametrilor fazei algoritmul EKF furnizează rezultatele mult mai bune decât rezultatele oferite de metoda Kalman-Treter. Din analiza rezultatelor obținute a rezultat următoarea concluzie: algoritmul EKF robust implementat pe acest model extinde gama performanțelor algoritmilor Kalman în estimarea fazei polinomiale de la un raport semnal pe zgomot de cel puțin 13dB la cel puțin 5dB.

În capitolul 4 am studiat principalele metode de demodulare (coerentă și necoerentă) a semnalelor cu modulație de fază continuă, transmise prin canalul AWGN. Am propus utilizarea filtrului Kalman extins la demodularea necoerentă a semnalelor MSK și GMSK.

În paragraful 4.4 am propus un model în spațiul stărilor privind utilizarea filtrului Kalman extins în scopul demodulării necoerentă a semnalelor cu modulație de fază continuă cu amplitudine constantă, perturbate de zgomot gaussian aditiv .

În paragraful 4.4.2 am făcut o analiză a performanțelor BER ale semnalelor MSK și GMSK. Am observat că în cazul modulației MSK am obținut rezultate mai bune decât în cazul modulației GMSK. Utilizarea filtrului gaussian limitează variațiile frecvenței instantanee a semnalului modulat în frecvență. Prin aceasta se reduce banda semnalului modulat cu sacrificiul introducerii de interferențe intersimbol. Prin filtrare impulsurile de date devin mai lungi și pătrund în intervalele de simbol alăturate. Cum algoritmul EKF utilizat nu este un estimator optimal, filtrul devine ușor divergent datorită operației de liniarizare. Acest comportament l-am observat în cazul demodulării semnalelor MSK și GMSK folosind o rată de eșantionare $n_{\text{Samp}}=4$ și un raport E_b/N_0 mai mic de 7dB, indiferent de valoarea produsului durată \times bandă.

Lista lucrărilor publicate

1. **Janos GAL**, Marius SĂLĂGEAN, Mirela BIANU, Ioan NAFORNIȚĂ, „The Instantaneous Frequency Determination for Signals with Polynomial Phase using Kalman Filtering”, *Proceedings of the Symposium on Electronics and Telecommunications*, Fifth edition, September 19-20, 2002, vol. I, pag. 186-189
2. Cristian CHIONCEL, **Janos GAL**, „Parameter estimation of the chirp signal”, *Proceedings of the Symposium on Electronics and Telecommunications*, Sixth edition, October 22-23, 2004, vol. II, pag. 87-90
3. **J. Gal**, A. Campeanu, I. Nafornița, „Estimation of Noisy Sinusoids Instantaneous Frequency by Kalman Filtering”, *Proceedings of the Symposium on Electronics and Telecommunications*, Seventh edition, September 21-22, 2006, vol. II, pag. 69-72
4. **Gal, J.**, Campeanu, A., Nafornița, I., „Estimation of Chirp Signals in Gaussian Noise by Kalman Filtering”, *Proceedings of International Symposium on Signals, Circuits and Systems, ISSCS 2007* July 2007, Iași Romania pp. 299-302.
5. **Gal, J.**, Campeanu, A., Nafornița, I., „Identification of Polynomial Phase Signals by Kalman Filtering”, *Lucrările Sesiunii de comunicări științifice “Doctor Etc 2007”* Tmș 20.09.2007, pp. 58-61.
6. **Gal J.**, Câmpeanu A., Nafornița I., „Identification of Polynomial Phase Signals by Extended Kalman Filtering”, *Proceedings of EUSIPCO 2008, 16th European Signal Processing Conference organised by EURASIP*, August 25-29, Lausanne, Switzerland, pp. 405-409
7. Andrei Câmpeanu, **Gál János**, Metode adaptive de prelucrare a semnalelor, Editura Politehnică Timișoara, 2009, ISBN: 978-973-625-605-9
8. **János Gál**, Andrei Câmpeanu, Ioan Nafornița, „Estimation of Chirp Signals by Extended Kalman Filtering”, *Lucrările Sesiunii de comunicări științifice “Doctor Etc 2009”* Timișoara 24-25 septembrie 2009, pp. 35-39.
9. **János Gál**, Andrei Câmpeanu, Ioan Nafornița, „Noncoherent Demodulation of Continuous Phase Modulation Signals using Extended Kalman Filtering”, *OPTIM 2010 – 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, Brasov, 20-22 mai 2010, pag. IACM.4.1.09
10. **János Gál**, Andrei Câmpeanu, Ioan Nafornița, „Kalman Noncoherent Detection of CPFSK Signal”, *The 8th International Conference on Communication “COMM 2010”*, 10-12 June 2010, Bucurest, vol. I, pp. 65-68