

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" TIMIȘOARA

Facultatea de Electronică și Telecomunicații

Departamentul de Comunicații

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

**Contribuții la estimarea frecvenței instantanee
utilizând reprezentări timp-frecvență**

Conducător științific:

Prof. Dr. Ing. Ioan Naforniță

Doctorand:

Ing. Romulus Reiz

2012

CUPRINS

1. Introducere
 - 1.1. Noțiuni generale
2. Prezentarea și interpretarea noțiunii de „frecvență instantanee”
 - 2.1. Conceptul de frecvență instantanee
 - 2.1.1 Conceptul de frecvență
 - 2.1.2 Generalizarea conceptului de frecvență la semnalele nestaționare
 - 2.1.3 Interpretarea frecvenței instantanee
 - 2.2 Tehnici de estimare a frecvenței pentru semnale staționare
 - 2.2.1. Estimarea parametrilor unui semnal sinusoidal
3. Tehnici de estimare a frecvenței instantanee
 - 3.1. Estimarea diferenței de fază a unui semnal analitic
 - 3.2. Versiuni netezite ale estimatorilor diferenței de fază
 - 3.3. Estimarea frecvenței instantanee prin metoda trecerilor prin zero
 - 3.4. Estimarea adaptivă a frecvenței instantanee
 - 3.4.1 Algoritmul LMS
 - 3.4.2. Algoritmul RLS
 - 3.5. Estimarea frecvenței instantanee pe baza momentelor distribuțiilor timp-frecvență
 - 3.6. Estimarea frecvenței instantanee pe baza vârfurilor distribuțiilor timp-frecvență
 - 3.6.1 Vârfurile transformatei Fourier-scurtă
 - 3.6.2. Vârfurile distribuției Wigner-Ville
 - 3.6.3. Vârfurile distribuției Wigner-Ville “încrucișată”
 - 3.6.4. Vârfurile distribuției Wigner-Ville generalizată
 - 3.6.5. Alte distribuții timp-frecvență
 - 3.7. Estimarea frecvenței instantanee pe baza unui model auto-regresiv variabil în timp
 - 3.8. Îmbunătățirea metodelor de estimare a legilor de variație a frecvenței instantanee prin aplicarea algoritmilor de urmărire
 - 3.9. Metode de estimare a frecvenței instantanee bazate pe modelarea polinomială a fazei
 - 3.9.1. Algoritmul de estimare a coeficienților polinomiali bazat pe metoda celor mai mici pătrate
 - 3.9.1.1. Metoda de estimare a celor mai mici pătrate (LS)
 - 3.9.1.2. Descrierea algoritmului liniar al celor mai mici pătrate LS
 - 3.9.2. Estimarea frecvenței instantanee prin atribuirea unui polinom estimatelor locale ale IF

4. Reprezentări timp-frecvență

4.1. Introducere

4.2. Localizarea semnalelor în timp și în frecvență. Principiul incertitudinii Heisenberg-Gabor

4.3. Reprezentarea timp-frecvență de tipul transformare Fourier-scurtă

4.4. Reprezentarea timp-frecvență de tipul funcție de incertitudine

4.5. Reprezentarea timp-frecvență de tipul transformare Wigner-Ville

4.6. Reprezentarea de tip timp-factor de scală

4.7. Reprezentări timp-frecvență pătratice

5. Estimarea frecvenței instantanee a semnalelor nestaționare folosind maximele locale ale reprezentărilor timp-frecvență

5.1. Descrierea algoritmului folosit

5.2. Generarea semnalelor de test

5.3. Estimarea frecvenței instantanee a unui semnal sinusoidal modulat liniar în frecvență

5.4. Estimarea frecvenței instantanee a unui semnal sinusoidal modulat liniar în frecvență perturbat de un zgomot Gaussian, folosind maximele locale ale reprezentării Fourier scurtă

5.4.1 Influența lărgimii funcției fereastră folosită la obținerea reprezentării Fourier scurtă asupra estimării frecvenței instantanee a semnalului sinusoidal modulat linear în frecvență

5.4.2 Influența tipului de funcție fereastră folosită la obținerea reprezentării Fourier scurtă asupra estimării frecvenței instantanee a semnalului sinusoidal modulat linear în frecvență

5.5. Estimarea frecvenței instantanee a unui semnal sinusoidal modulat liniar în frecvență perturbat de un zgomot Gaussian, folosind maximele locale ale reprezentării Wigner-Ville

5.6. Estimarea frecvenței instantanee a unui semnal sinusoidal modulat liniar în frecvență perturbat de un zgomot Gaussian, folosind maximele locale ale reprezentării Choi-Williams

5.7. Estimarea frecvenței instantanee a unui semnal sinusoidal modulat în frecvență după o lege sinusoidală, perturbat de un zgomot Gaussian, folosind maximele locale ale reprezentărilor Fourier scurtă, Wigner-Ville și Choi-Williams

5.8. Estimarea frecvenței instantanee a unui semnal sinusoidal modulat în frecvență după o lege parabolică, perturbat de un zgomot Gaussian, folosind maximele locale ale reprezentărilor Fourier scurtă, Wigner-Ville și Choi-Williams

5.9. Estimarea frecvenței instantanee a unui semnal sinusoidal cu variație bruscă a frecvenței instantanee, perturbat de un zgomot Gaussian, folosind maximele locale ale reprezentărilor Fourier-scurtă, Wigner-Ville și Choi-Williams

5.10. Estimarea frecvenței instantanee a unui semnal sinusoidal cu variație lentă a frecvenței instantanee între regiuni unde frecvența este constantă, perturbat de un zgomot Gaussian, folosind maximele locale ale reprezentărilor Fourier scurtă, Wigner-Ville și Choi-Williams

5.11 Estimarea frecvenței instantanee a unui semnal sinusoidal modulat în frecvență perturbat de un zgomot Gaussian, folosind maximele locale ale unei reprezentări timp-frecvență obținută prin produsul dintre transformatele Fourier-scurtă și Vigner-Ville

5.12 Comparație cu alte metode de estimare a frecvenței instantanee a unui semnal modulat în frecvență perturbat de un zgomot Gaussian

6. Contribuții și concluzii

Bibliografie

Anexa 1

Anexa 2

Anexa 3

Anexa 4

Anexa 5

Anexa 6

Anexa 7

Anexa 8

Sinteza tezei de doctorat

Scopul principal al tezei este de a propune și studia metode de estimare a frecvenței instantanee a semnalelor nestaționare. Sunt prezentate principalele metode de estimare a frecvenței instantanee disponibile în prezent. Simulările prezentate bazate pe un algoritm propriu au ca țel testarea metodelor de estimare a frecvenței instantanee folosind detecția maximelor reprezentărilor timp-frecvență. De asemenea se urmărește compararea acestor metode de estimare cu cele convenționale, a avantajelor și dezavantajelor lor.

Un semnal este suportul fizic al unei informații. Ca urmare, el poate fi de origine foarte variată (acustică, radioelectrică, optică, mecanică, electrică,...), dar în ciuda acestei diversități el reprezintă în general evoluția temporală a unei mărimi necesară unuia sau mai multor utilizatori, care analizează semnalul primit căutând să extragă acea informație pe care o consideră utilă. Extragerea acestei informații se numește măsurare și manipularea rezultatului măsurării depinde de "lizibilitatea" semnalului analizat.

Reprezentarea semnalelor nestaționare este o problemă majoră în multe domenii legate de prelucrarea de semnale. Distribuțiile timp-frecvență au fost introduse cu scopul de a oferi o soluție generală acestei probleme, și pot fi considerate ca fiind o extensie a analizei spectrale clasice de tip Fourier. Aceasta din urmă este adaptată în special analizei semnalelor staționare sau cvasi-staționare, în timp ce distribuțiile timp-frecvență sunt dedicate semnalelor nestaționare. Un concept important în alegerea practică a distribuției timp-frecvență care va fi folosită la analiza unui semnal este reprezentat de frecvența instantanee. Acesta este un parametru care corespunde cu frecvența unui semnal sinusoidal care se potrivește local cel mai bine cu semnalul supus analizei. Frecvența instantanee a unui semnal este un parametru utilizat în telecomunicații, prelucrări ale semnalelor seismice și ale semnalelor radar precum și în diverse aplicații biomedicale. Importanța frecvenței instantanee rezultă din faptul că, în multe situații, semnalele analizate sunt nestaționare, un exemplu simplu fiind semnalele biomedicale.

Lucrarea prezintă o trecere în revistă a unor aspecte legate de analiza semnalelor nestaționare. În capitolul 2 se prezintă conceptul de frecvență instantanee și algoritmi de determinare a legii de variație a acesteia pentru semnale staționare și nestaționare. La începutul capitolului, se realizează un scurt istoric al noțiunii de frecvență și generalizarea acestei noțiuni pentru cazul semnalelor nestaționare. Apoi, se introduc definițiile pentru frecvența instantanee, timpul de întârziere de grup și semnalul analitic.

În capitolul 3 sunt prezentate tehnicile disponibile în prezent pentru estimarea frecvenței instantanee. Sunt prezentate metode bazate pe operația de diferențiere a fazei semnalului analitic, metoda trecerilor prin zero, metode de estimare adaptivă bazate pe algoritmul LMS sau RLS, metode care folosesc bucle PLL, estimări bazate pe momentele sau vârfurile distribuțiilor timp-frecvență și metode care folosesc un model polinomial pentru a reprezenta faza semnalului. S-a aprofundat doar cazul semnalului modulat în frecvență cu o singură componentă spectrală, dar s-au sugerat și soluții pentru cazul semnalelor cu mai multe componente.

Metodele de determinare ale frecvenței instantanee reprezintă o extindere a procedurilor dedicate estimării frecvenței semnalelor staționare pentru semnale al căror parametri variază în timp. Diversele metode care au fost dezvoltate pentru obținerea unei

estimări performante de frecvență sunt descrise pe scurt în capitolul al 3-lea. În cazul semnalelor nestaționare modulate în frecvență, legea de variație a frecvenței poate fi considerată a fi un spațiu continuu de frecvențe diferite. În acest caz, se consideră că frecvențele de la un anumit moment de timp sunt descrise complet de conceptul de „frecvență instantanee”. Semnalele nestaționare de acest fel se întâlnesc foarte des atât în natură cât și în mediile de procesare ale semnalelor. În concluzie există o acută nevoie de tehnici de estimare a frecvenței instantanee.

În capitolul 4 sunt prezentate reprezentări timp-frecvență mai importante, cum sunt reprezentarea de tip Fourier-scurtă, Wigner-Ville, undișoară și altele, precum și proprietățile lor mai semnificative. De asemenea, este realizată o analiză a legăturii care există între reprezentările timp-frecvență și frecvența instantanee.

Simulările prezentate în capitolul 5, realizate folosind un algoritm propriu, au ca țel testarea metodelor de estimare a frecvenței instantanee folosind detecția maximelor reprezentărilor timp-frecvență, precum și compararea acestor metode cu alte metode de estimare, a avantajelor și dezavantajelor lor.

Contribuții și concluzii

Nevoia de a prelucra și analiza semnalele nestaționare rezultă din natura nestaționară a majorității semnalelor din lumea reală. De-a lungul timpului, au fost dezvoltate instrumente de prelucrare a semnalelor dintre care unele sunt deosebit de performante, dar care pot fi folosite doar pentru semnale staționare. În general aceste metode sunt legate de descrieri în domeniul frecvenței. Constatarea că semnalele întâlnite în situații concrete sunt în marea lor majoritate nestaționare a condus la nevoia de a dezvolta “instrumente” specifice, adaptate acestor semnale, care țin cont de faptul că semnalul analizat poate avea o evoluție temporală a conținutului de frecvență. Aceste noi metode de prelucrare permit analiza spectrală cu parametru timp variabil.

Una dintre posibilitățile de analiză a semnalelor nestaționare constă în folosirea reprezentărilor timp-frecvență. Transformările timp-frecvență de tip Fourier-scurtă, Gabor, Wigner-Ville, Choi-Williams, undișoară și altele, ale unui semnal nestaționar, conțin informații deosebit de importante cu privire la caracteristicile acestuia.

Un alt concept deosebit de util în cadrul analizei semnalelor nestaționare este cel al frecvenței instantanee. În capitolul 2 al lucrării se prezintă conceptul de frecvență instantanee și algoritmi de determinare a legii de variație a acestuia pentru semnale staționare și nestaționare. De asemenea, se realizează un scurt istoric al noțiunii de frecvență și generalizarea acestei noțiuni pentru cazul semnalelor nestaționare.

În capitolul 3 a fost realizată o prezentare a tehnicilor disponibile în prezent pentru estimarea frecvenței instantanee, fiind descrise metode bazate pe operația de diferențiere a fazei semnalului analitic, metoda trecerilor prin zero, metode de estimare adaptivă bazate pe algoritmul LMS sau RLS, metode care folosesc bucle PLL, estimări bazate pe momentele sau vârfurile distribuțiilor timp-frecvență și metode care folosesc un model polinomial pentru a reprezenta faza semnalului.

În capitolul 4 sunt prezentate reprezentările timp-frecvență mai importante, cum sunt reprezentarea de tip Fourier-scurtă, Wigner-Ville, undișoară și altele. În capitolul 4 se

analizează de asemenea relațiile de legătură dintre conceptele prezentate în capitolele anterioare, fiind pus accent în special pe relația dintre frecvența instantanee și distribuțiile timp-frecvență.

În capitolul 5 se prezintă un algoritm propriu de estimare a frecvenței instantanee a unor semnale nestaționare, modulate în frecvență folosind detecția maximelor reprezentărilor timp-frecvență. Utilizând această metodă, au fost analizate semnale modulate în frecvență, acoperite de un zgomot gaussian de medie nulă, pentru diverse valori ale raportului semnal-zgomot. Semnalele folosite au fost atât modulate liniar în frecvență, cât și parabolic sau după o lege sinusoidală. De asemenea, a fost testată metoda de estimare a frecvenței instantanee pentru cazul semnalelor cu variații bruște sau lente ale frecvenței. O parte din rezultatele obținute pe parcursul acestui capitol au fost publicate în lucrări precizate în lista de referințe bibliografice.

Rezultatele obținute au demonstrat faptul că, atunci când nivelul zgomotului este suficient de mic, adică raportul semnal-zgomot este suficient de mare, legea de variație a frecvenței instantanee a semnalelor nestaționare poate fi determinată cu erori mici folosind maximele locale ale reprezentărilor timp-frecvență. Deci „crestele” reprezentărilor timp-frecvență pot fi folosite pentru a aproxima frecvența instantanee a semnalului analizat, afirmație demonstrată și de alți autori în lucrări care sunt menționate în bibliografie.

În cadrul capitolului 5 au fost obținute mai multe tipuri de reprezentări timp-frecvență, atât liniare (reprezentarea Fourier-scurtă) cât și biliniare (de tip Wigner-Ville și Choi-Williams). De asemenea, a fost propusă o reprezentare timp-frecvență complexă, obținută prin produsul dintre reprezentările timp-frecvență de tip Fourier-scurtă și Wigner-Ville, reprezentare care s-a calculat cu scopul de a combina proprietățile utile ale celor două transformări inițiale.

În cazul semnalelor modulate liniar în frecvență, rezultatele obținute au fost bune pentru toate cele patru reprezentări timp-frecvență menționate. Cele mai bune performanțe s-au obținut pentru acest tip de semnale prin utilizarea reprezentării Wigner-Ville, și a reprezentării timp-frecvență obținută prin produsul dintre reprezentările timp-frecvență de tip Fourier-scurtă și Wigner-Ville. Acest fapt se datorează faptului că, pentru semnalele modulate liniar în frecvență, termenii de interferență generați de reprezentarea Wigner-Ville sunt ne semnificativi și nu afectează procesul de estimare a frecvenței instantanee.

Așa cum s-a menționat anterior, în cazul folosirii transformatei Fourier-scurtă o serie de factori pot influența estimarea frecvenței instantanee a semnalului: tipul și mărimea funcției fereastră folosită la obținerea transformatei respectiv tipul și nivelul semnalului de zgomot. Pentru a testa performanțele metodei de estimare a frecvenței instantanee s-au făcut determinări ale erorilor de estimare în mai multe situații: folosind ferestre de tip Hamming, Hanning, dreptunghiulară, triunghiulară, Gaussiană, de tip Bartlett, Blackman și Kaiser, având fiecare lărgimi de 33, 65, 129, 257, 513 și 1025 eşantioane. Cele mai bune rezultate au fost obținute folosind o fereastră de tip Gaussian de 129 eşantioane lărgime, adică o reprezentare timp-frecvență de tip Gabor.

După cum s-a precizat pe parcursul capitolului 5, metoda proprie de determinare a frecvenței instantanee folosind maximele locale ale reprezentărilor timp-frecvență a fost testată și în cazuri când semnalul analizat era modulat sinusoidal sau parabolic în frecvență. Cele două tipuri de semnale au produs rezultate similare. În acest caz, termenii de interferență produși fac practic imposibilă folosirea reprezentării Wigner-Ville, chiar la

nivele reduse ale zgomotului suprapus peste semnalul util. Rezultate mai bune au fost obținute prin folosirea reprezentării de tip Choi-Williams, dar cele mai mici erori au fost obținute când pentru estimarea frecvenței instantanee s-a utilizat reprezentarea Fourier-scurtă, sau reprezentarea timp-frecvență obținută prin produsul dintre reprezentările timp-frecvență de tip Fourier-scurtă și Wigner-Ville.

În continuare, a fost demonstrat faptul că algoritmul propus pentru estimarea frecvenței instantanee poate fi folosit și pentru cazul semnalelor care prezintă salturi de frecvență. Folosind reprezentările timp-frecvență descrise mai sus, s-a constatat că detecția salturilor de frecvență poate fi realizată cu erori suficient de mici, doar la nivele mici ale zgomotului. În acest caz, rezultatele furnizate de folosirea reprezentărilor timp-frecvență de tip Fourier-scurtă au fost cele mai bune, în timp ce reprezentarea Wigner-Ville nu poate fi folosită pentru acest tip de semnal, erorile de estimare fiind mari chiar și în absența zgomotului perturbator.

La sfârșitul capitolului 5 au fost testate și alte trei metode de estimare a frecvenței instantanee, cu scopul de a compara rezultatele furnizate de aceste metode cu cele obținute prin folosirea algoritmului propus, bazat pe detecția maximelor reprezentărilor timp-frecvență. Sunt prezentate rezultatele obținute la estimarea frecvenței instantanee a semnalelor modulate linear și sinusoidal în frecvență folosind trei metode de estimare diferite. Primul procedeu de estimare a frecvenței instantanee se bazează pe diferențierea fazei semnalului. Cea de-a doua metodă de estimare a frecvenței instantanee folosită utilizează un algoritm autoregresiv, iar a treia metodă de estimare a frecvenței instantanee se bazează pe utilizarea momentului de ordinul întâi al distribuției timp-frecvență de tip Fourier Scurtă. Semnalele folosite au fost aceleași care s-au utilizat pentru a estima frecvența instantanee prin detecția maximelor reprezentărilor timp-frecvență. Folosind aceste metode de estimare au fost obținute rezultate similare pentru cele două tipuri de semnale modulate linear și sinusoidal în frecvență. Rezultatele care au fost obținute folosind cele trei metode de estimare sunt inferioare celor obținute prin utilizarea maximelor reprezentărilor timp-frecvență, dovedind utilitatea algoritmului de estimare prezentat. Acest fapt se poate datora faptului că o reprezentare timp-frecvență produce o „împrăștiere” a energiei zgomotului perturbator în planul timp-frecvență, ducând la posibilitatea detecției frecvenței semnalului util chiar și la nivele de zgomot unde celelalte metode nu mai pot fi folosite practic. Trebuie menționat faptul că dacă zgomotul depășește un anumit prag critic, nici algoritmul de estimare a frecvenței instantanee prin detecția maximelor reprezentărilor timp-frecvență nu mai poate fi folosit, erorile fiind în acest caz mari. Acest prag critic depinde de tipul semnalului analizat, și de parametrii reprezentării timp-frecvență folosite.

Așa cum s-a precizat mai sus, analiza semnalelor în planul timp-frecvență a fost realizată cu ajutorul unor programe proprii realizate în mediul MATLAB, unde este foarte util toolbox-ul Timp-frecvență. Algoritmul folosit poate fi aplicat unor semnale nestaționare care sunt salvate pe discul fix al calculatorului. În perspectivă, dezvoltarea de aplicații în timp-real, care să poată fi utilizate la estimarea frecvenței instantanee a unor semnale prelevate direct din placa de sunet a calculatorului, sau prin intermediul unei plăci de achiziții de date sunt de dorit. Un program ce ar furniza rezultatul estimării în timp real, ar fi deosebit de util în numeroase domenii, și ar putea fi folosit cu succes pentru obținerea

de rezultate rapide, fără a mai fi necesară înregistrarea prealabilă a semnalelor și prelucrarea lor ulterioară.

Concluziile obținute în lucrare pot fi utilizate în alegerea unui anumit tip de reprezentare timp-frecvență, în vederea analizării unui semnal nestaționar, în vederea obținerii de rezultate cât mai corecte în prezența zgomotului.