

REZUMAT TEZĂ

Contribuții la monitorizarea de la distanță a activității electrice a inimii

Tema tezei de doctorat este justificată de necesitățile de a preveni bolile cardiace, care apar alarmant de frecvent conform studiilor și statisticilor elaborate de instituții acreditate și împuternicite de a interprinde investigații în domeniul medical. Statistici naționale înregistrează decesul unei persoane la fiecare 10 minute din cauza unor afecțiuni cardiace, situație care nu mai este o consecință a vârstei înaintate. Îngrijorător este și faptul că, în România, vârsta persoanelor pasibile de infarct miocardic a scăzut sub 45 ani. O modalitate neinvazivă de a preveni bolile cardiace constă în monitorizarea activității electrice a inimii cu ajutorul electrocardiografei (monitorizare EKG) sau a magnetocardiografei (monitorizare MKG).

EKG-ul este o metodă simplă de diagnosticare a bolilor inimii, fiecare deviație de la forma acceptată drept standard a segmentelor și complexelor componente ale semnalului EKG (unda P, complexul QRS, unda T) indicând posibilitatea existenței unei afecțiuni cardiace. Fiind o metodă neinvazivă de investigație clinică, EKG – ul prezintă un anumit grad de incertitudine și implică un risc de diagnosticare incorectă.

MKG-ul, reprezintă o tehnică recentă de monitorizare a activității cardiace, aflată încă în stadiu experimental în ceea ce privește achiziția datelor în medii necranate. Semnalele MKG sunt o alternativă a semnalelor EKG clasice, utile în special în cazul monitorizării activității cardiace fetale. Magnetocardiografia este un procedeu neinvaziv de analiză a activității cardiace, asemănător cu electrocardiografia în cadrul căruia se măsoară câmpurile biomagnetice generate în timpul activității electrice a inimii, constituind astfel un mediu util de diagnosticare a bolilor cardiace. Diferența dintre cele două tehnici este dată în principal de modul de prelevare al semnalelor: semnalele EKG sunt prelevate prin intermediul unor electrozi atașați pe pielea pacientului, în timp ce semnalele MKG sunt prelevate cu ajutorul unor traductori aflați la o distanță de 2-3 cm de corpul uman.

Datele MKG utilizate în lucrarea de față au fost furnizate de către institutul de cercetare Institut fuer Photonische Technologien IPHT, Jena, Germania în timpul unui stagiu de cercetare întreprins la universitatea Technische Universitaet Ilmenau, Germania. Datele EKG folosite provin din baza de date publică de la Michigan Institute of Technology, S.U.A (MIT-BIH).

Intensitatea câmpurilor magnetice generate de corpul uman fiind foarte mică, se impune utilizarea unei aparaturi ultrasensibile (tehnica MKG dezvoltată la IPHT, Jena utilizează senzori de tip Superconductive Quantum Interference Devices - SQUID).

Cercetarea întreprinsă urmărește într-o primă etapă să ofere un ajutor medicului în pre-diagnosticarea afecțiunilor cardiace în sensul ameliorării sarcinii de interpretare a electrocardiografei. Cea de-a doua etapă urmărește să ofere mijloacele tehnice pentru a permite monitorizarea de la distanță a activității cardiace a inimii. Combinând diferite tehnici de prelucrare a semnalelor, se dorește creșterea probabilității de a pune un diagnostic medical corect.

Analiza wavelet a fost propusă drept o alternativă la analiza Fourier, prezenta teză de doctorat având drept scop de a dezvolta și testa algoritmi de prelucrare pentru principalele

etape de achiziție și monitorizare de la distanță: reducerea deviației liniei de bază a semnalelor EKG și MKG, reducerea zgomotului de achiziție, compresia semnalelor în vederea transmisiei la distanță și reconstrucția semnalelor comprimate. Rezultatele obținute sunt exemplificate atât calitativ cât și cantitativ, fiind realizate comparații cu alte metode în fiecare capitol. De asemenea, a fost realizat și un prim pas pentru a completa cercetarea asupra monitorizării de la distanță a activității cardiace printr-un sistem de diagnosticare automată: un prim pas realizat în acest sens este constituit de elaborarea unei prime metode de detecție a complexului QRS, care este menită să faciliteze munca medicului și să deschidă noi perspective de cercetare.

Teza este structurată pe șase capitole. **În primul capitol** se introduce cadrul general al tezei.

În cel de **al doilea capitol** sunt descrise cele două tipuri de semnale analizate, semnalele EKG și MKG. S-a realizat o sinteză asupra principiului funcționării activității cardiace și a modului de prelevare și interpretare a electrocardiografei și a magnetocardiografei pentru a exemplifica câteva dintre posibilele afecțiuni cardiologice care pot fi tratate în urma diagnosticării și pentru a permite astfel o viziune de ansamblu asupra tematicii tezei.

Cel de **al treilea capitol** face o introducere în teoria funcțiilor wavelet privită din perspectiva reprezentărilor timp-frecvență. Principalele aspecte teoretice ale analizei wavelet sunt prezentate sistematizat. S-au prezentat caracteristicile principalelor tipuri de transformate wavelet: transformata wavelet continuă, transformata wavelet discretă și transformata wavelet staționară, pentru a facilita înțelegerea algoritmilor de prelucrare propuși în următoarele capitole ale tezei. De asemenea, s-au realizat comparații între transformata wavelet și transformata Fourier în scopul evidențierii avantajelor aplicării analizei wavelet semnalelor biomedicale nestaționare. În cazul semnalelor cvasi-periodice și nestaționare, cum sunt și semnalele biomedicale, informația conținută este mai dificil de accesat deoarece este important și momentul de timp la care are loc un eveniment iar modificările au loc într-un ritm rapid. Deoarece analiza Fourier clasică permite caracterizarea semnalului considerat doar în domeniul frecvență au fost studiate modalități mai generale de reprezentare a semnalului analizat atât în domeniul timp cât și în domeniul frecvență, numite reprezentări timp-frecvență. Una dintre acestea, *Transformata Fourier pe Termen Scurt (STFT)* prezintă dezavantajul unei rezoluții temporale fixe a ferestrei de analiză (impunând anumite limitări de utilizare în practică). Acest dezavantaj poate fi evitat prin folosirea analizei wavelet. Reprezentările timp-frecvență de tip wavelet pot oferi simultan informații în domeniul timp și în domeniul frecvență despre semnalul analizat. Funcțiile de bază ale analizei wavelet sunt obținute prin dilatarea și translatarea unei funcții generatoare, denumită *funcție wavelet mamă (mother wavelet – MW)*, astfel încât segmente ale semnalului care necesită moduri diferite de prelucrare pot fi analizate apelând la atomi timp-frecvență cu suporturi temporale diferite prin alegerea corespunzătoare a funcției MW. Proprietățile specifice ale transformatei wavelet, cum ar fi o bună acoperire a planului timp-frecvență și o implementare rapidă a algoritmului de calcul, recomandă utilizarea analizei wavelet în cazul semnalelor biomedicale de tipul semnalelor EKG sau MKG.

În **capitolul patru** au fost dezvoltate și testați o serie de algoritmi, bazați pe analiza wavelet, care cuprind principalele etape ale monitorizării de la distanță cu ajutorul semnalelor EKG: eliminarea deviației liniei de bază, reducerea zgomotului de achiziție, compresia și reconstrucția semnalelor EKG. Aplicațiile concrete au fost implementate în mediul de programare *Matlab* și testate pe date reale, provenite din baza de date publică de la MIT-BIH,

facilitând astfel comparația performanțelor metodelor propuse cu alte metode întâlnite în literatura de specialitate. În primul paragraf s-a propus o metodă de corecție a deviației liniei de bază a semnalului EKG, utilizând avantajele oferite de analiza wavelet. Inspirată de procedurile utilizate pentru regresia seriilor de timp, metoda estimează deviația liniei de bază cu ajutorul transformatei wavelet staționare SWT și efectuează corecția calculând diferența dintre semnalul EKG achiziționat și această estimare. Principalii parametri ai metodei sunt: funcția wavelet mamă și numărul de niveluri de descompunere. Numărul optim de iterații este ales funcție de frecvența de eșantionare utilizată la achiziția semnalului EKG. S-a propus un mod de calcul al numărului optim de iterații, ținând cont de frecvența de eșantionare utilizată la achiziția semnalului EKG și de perioada fundamentală a semnalului EKG, care poate fi apreciată pe baza măsurării pulsului pacientului. Metoda ia astfel în considerare un parametru al semnalului analizat. În cazul bazei de date de la MIT-BIH (frecvența de eșantionare este de 360 Hz), a fost ales un număr de 8 niveluri de descompunere. Secvența coeficienților de aproximare reprezintă estimata liniei de bază, în timp ce secvențele de coeficienți de detaliu sunt anulate. Astfel se obține o nouă secvență de coeficienți wavelet, pornind de la care, prin aplicarea transformatei inverse, ISWT, se obține estimarea liniei de bază. Operația descrisă fiind neliniară, metoda propusă poate fi considerată de asemenea drept o metodă neliniară timp-frecvență. În final, este calculată diferența dintre semnalul EKG achiziționat și estimarea liniei de bază realizată și se obține un semnal EKG corectat (vezi fig. 4.7). Metoda de estimare propusă este echivalentă unei filtrări trece-jos a semnalului EKG utilizând un filtru special, propunându-se și o metodă specială de construcție a unui asemenea filtru, prin produsul unui răspuns în frecvență prototip cu versiuni scalate ale aceleiași funcții. Prin simulările realizate s-a demonstrat că rezultate optime pentru eliminarea deviației liniei de bază se obțin în cazul utilizării funcției wavelet mamă Daubechies 5.

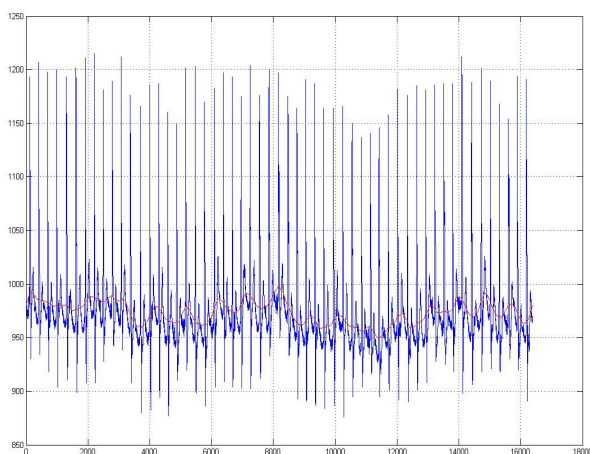
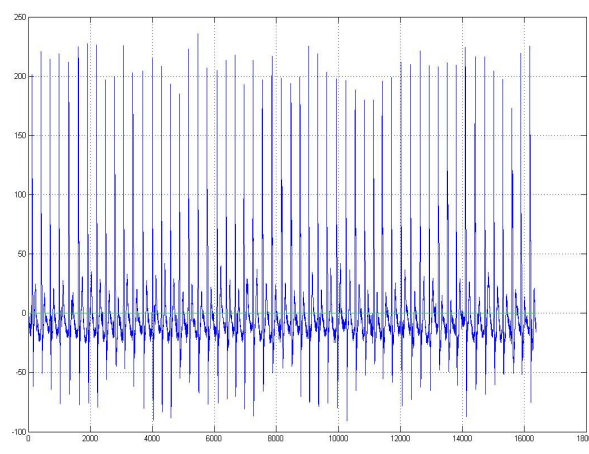


Fig. 4.7 a) EKG prezentând o deviație a liniei bază



b) EKG corectat.

În cel de-al doilea paragraf este prezentată o metodă de denoising. Algoritmul acestei metode exploatează proprietatea de invarianță la translații a SWT. Metoda de denoising a semnalului EKG propusă ia în considerare natura aditivă a zgomotului, generând două rezultate: estimata EKG-ului lipsit de zgomot și estimata zgomotului, care poate fi obținută calculând diferența dintre semnalul achiziționat și semnalul estimat. Algoritmul propus aplică un filtru de tip *bishrink* în domeniul wavelet, acest filtru fiind un filtru de tip Maximum A Posteriori, MAP, care ia în considerare dependența interscală a coeficienților wavelet. Filtrul propus a fost construit pornind de la premise a-priori referitoare la repartițiile statistice ale

coeficienților utili și a coeficienților de zgomot realiste. Au fost realizate teste asupra unor semnale EKG afectate de zgomot real, prelevate din baza de date MIT-BIH pentru a evalua performanța metodei propuse. SWT este calculată utilizând o funcție wavelet mamă cu o localizare timp-frecvență foarte bună (precum funcția wavelet mamă cu două momente nule, Daubechies 2), fiind selectate opt niveluri de descompunere. Rezultatele obținute sunt prezentate în fig. 4.23.

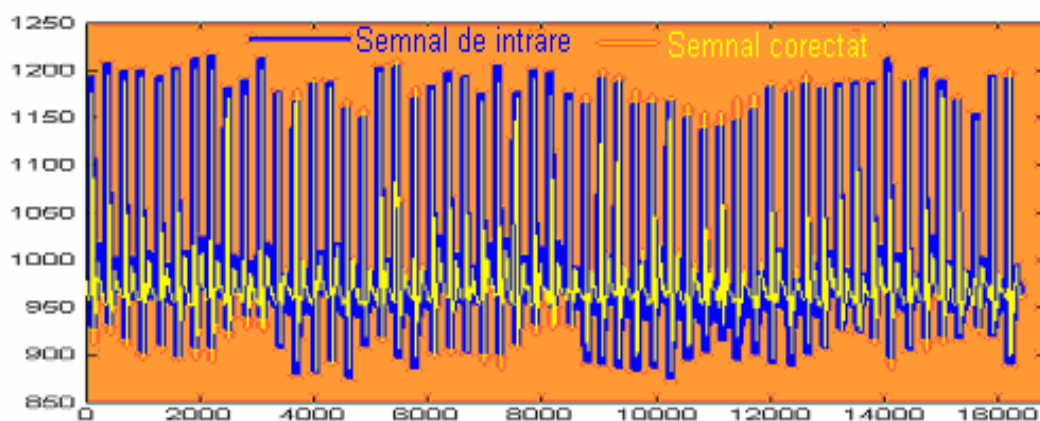


Fig. 4.23. Suprapunerea semnalului EKG original de intrare (albastru) și a semnalului EKG obținut după corecția deviației liniei de bază și denoising (galben).

Cel de-al treilea paragraf abordează problema transmiterii la distanță a semnalelor EKG, oferind soluții bazate pe analiza wavelet pentru compresia acestor semnale. O monitorizare de lungă durată crește șansa de a detecta în timp util o afecțiune clinică, însă generează în același timp un volum important de informație transmisă. Pentru a elimina acest neajuns au fost dezvoltate metode de compresie bazate pe Transformata Wavelet Discretă DWT. Au fost propuși doi algoritmi de compresie. Prima metodă prezintă un algoritm simplu de compresie a semnalelor biomedicale utilizând analiza wavelet. Simplitatea concepției permite implementarea facilă și o viteză de lucru bună. S-a demonstrat necesitatea de a lua în considerare cuantizarea coeficienților wavelet, operația de cuantizare influențând rata de distorsiune a metodei de compresie. Coeficienții wavelet au fost cuantizați pe 11 biți pentru a păstra rezoluția semnalelor EKG originale din baza de date de la MIT-BIH. De asemenea a fost propusă o strategie de selecție a parametrilor metodei bazată pe evaluarea unui factor de calitate, dependent de raportul dintre factorul de compresie CR și factorul de distorsiuni, PRD . Procedura permite selecția asociației optime între funcția wavelet mamă utilizată la calculul DWT și valoarea de prag (necesară pentru a distinge coeficienții wavelet utili), astfel încât calitatea compresiei să fie îmbunătățită. S-a demonstrat că factorul PRD nu reprezintă cea mai bună metodă de a măsura distorsiunile semnalului EKG reconstruit după compresie. Factorul PRD poate avea valori mici pentru semnale distorsionate vizibil. Deoarece diagnosticul în cazul semnalelor EKG se pune pe considerente vizuale, un criteriu vizual de apreciere a rezultatelor pare mai indicat în cazul acestor semnale biomedicale. Algoritmii de compresie bazat pe analiza wavelet a fost dezvoltat în continuare. Cea de-a doua metodă de compresie propusă utilizează proprietatea de codare în subbenzi a DWT (vezi fig. 4.37), obținându-se astfel un factor de compresie mai bun decât în cazul metodei propuse în paragraful 4.3.1. Fiecare subbandă de detaliu a fost tratată independent, valoarea de prag fiind stabilită în funcție de deviația standard a subbenzii respective.

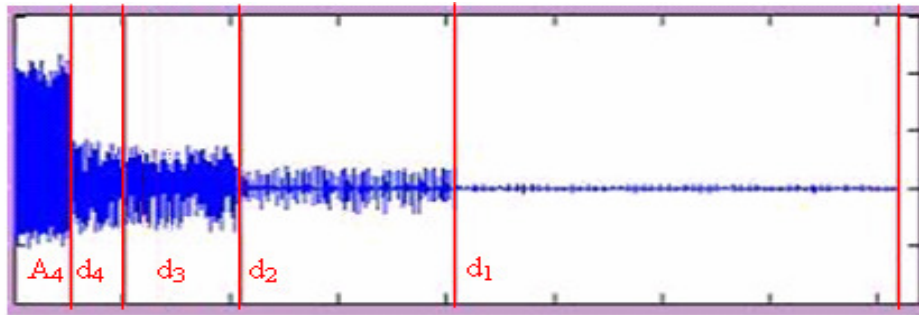


Fig. 4.37. Secvența de coeficienți wavelet distribuiți pe subbenzi: secvența coeficienților de aproximare împreună cu cele patru secvențe de coeficienți de detaliu.

S-a propus un algoritm de optimizare a performanțelor care să țină cont de principalii parametri: funcția wavelet mamă, numărul de momente nule, numărul de niveluri de descompunere. Metoda a fost testată pe un număr semnificativ de semnale EKG din baza de date MIT-BIH Arrhythmia, fiind considerate mai multe familii de funcții wavelet mamă ortogonale și biortogonale. Cele trei proceduri de prelucrare a semnalului EKG, necesare unui sistem de monitorizare de la distanță a activității cardiace a inimii (corecția deviației liniei de bază a EKG-ului, filtrarea zgomotelor de achiziție și compresia semnalului) au fost testate utilizând atât funcții wavelet biortogonale cât și ortogonale. A fost selectat un număr redus de niveluri de descompunere (cinci niveluri de descompunere), pentru a se obține un timp de prelucrare redus și o reconstrucție bună a semnalului. Algoritmul a fost testat și în situații limită, utilizând electrocardiograme afectate puternic de zgomot. Metoda de corecție a liniei de bază a oferit rezultate bune în cazul utilizării funcțiilor wavelet mamă biortogonale, metoda de denoising a permis înlăturarea zgomotului electromiografic iar rezultatele compresiei au arătat un factor de compresie competitiv, avantajul metodei constând în efortul computațional redus. Deci un algoritm adaptiv de compresie bazat pe analiza wavelet este potrivit în prelucrarea semnalelor EKG, factorul de compresie obținut fiind în jurul valorii de 15. Metoda de compresie adaptivă permite obținerea unui factor de compresie semnificativ fără a distorsiona componentele utile ale semnalului EKG analizat (fig. 4.40).

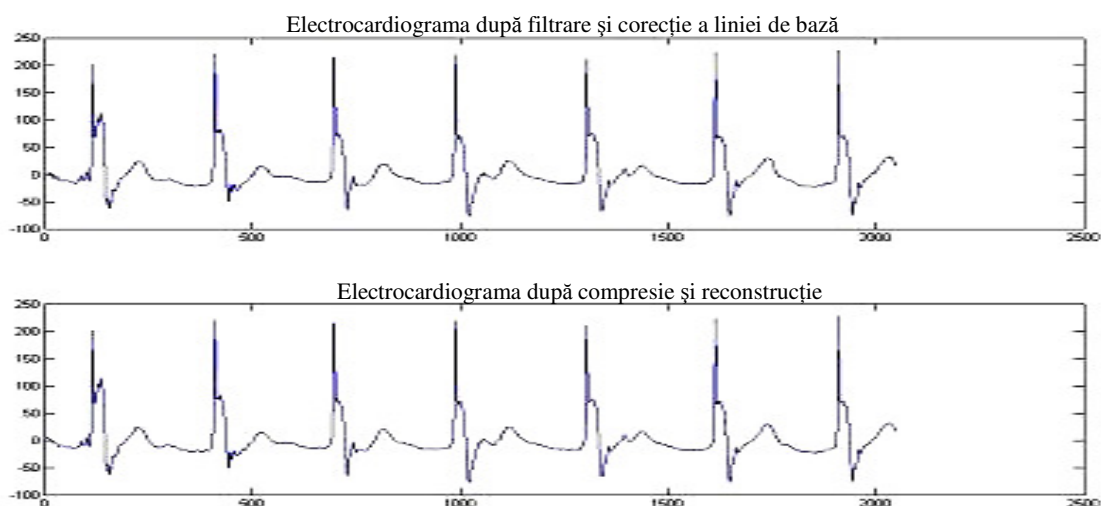


Fig. 4.40 Zoom realizat asupra a șapte bătăi ale semnalului EKG original 102 și ale semnalului reconstruit.

Ultimul paragraf al capitolului patru prezintă un prim algoritm de detecție automată a complexului QRS. Deși nu reprezintă obiectivul principal al prezentei teze de doctorat, detecția automată a complexului urmărește crearea unei facilități care să ajute munca medicului. Algoritmul propus combină metode clasice iterative cu metode mai recente bazate pe analiza wavelet, prin utilizarea SWT. Metoda propune detecția unei R utilizând o singură etapă și luând în considerare caracteristicile formei de undă analizate: maximul local al fiecărui bloc de segmentare este detectat, localizarea temporală a vârfului detectat fiind de asemenea reținută pentru aplicații ulterioare ale algoritmului. Localizarea în timp este importantă pentru semnalele biomedicale, precum semnalul EKG, iar această proprietate este exploatată în detectarea limitelor de început și de sfârșit ale complexului QRS. Atât începutul cât și sfârșitul complexului QRS sunt detectate apelând la localizarea temporală a unei R detectată anterior, metoda de detecție putând fi considerată astfel adaptivă. Numărul de eșantioane necesare pentru o durată standard a complexului QRS este distribuit în mod simetric la stânga și la dreapta celor două puncte de minim care încadrează vârful unei R determinându-se începutul și sfârșitul complexului QRS, așa după cum se vede în figura 4.60. Etapa de validare a rezultatelor metodei utilizând analiza wavelet urmărește evitarea erorilor de detecție sau detecții false. Au fost realizate comparații ale performanței metodelor propuse cu alte metode din literatură, indicându-se competitivitatea rezultatelor obținute.

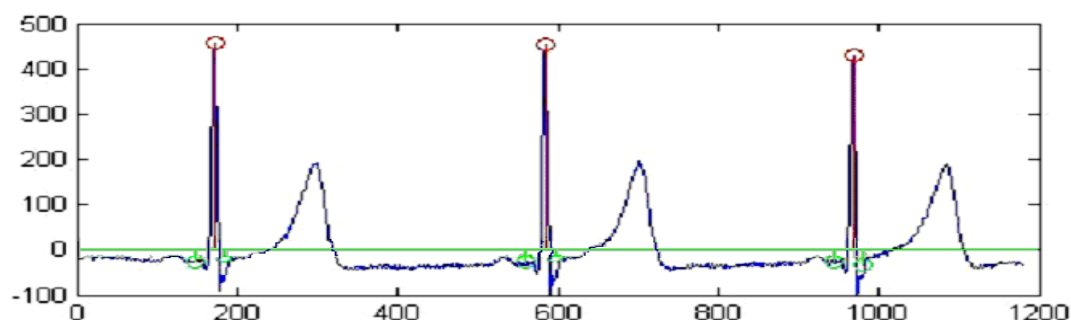


Fig. 4.60. Detecția complexului QRS pentru semnalul EKG 113.

În **capitolul cinci** se abordează problemele specifice prelucrării magnetocardiogramelor. Metoda de reducere a deviației liniei de bază bazată pe SWT, dezvoltată anterior în cazul semnalelor EKG a fost adaptată pentru cerințele specifice ale semnalelor MKG, furnizate de institutul IPHT, Jena. De exemplu, frecvența de eșantionare în acest caz este de 1 kHz. Caracteristicile metodei, funcția wavelet mamă utilizată și numărul de niveluri de descompunere au fost adaptate particularităților semnalelor MKG. Metoda de corecție a liniei de bază propusă utilizează SWT, undișoara mamă Coiflet4, 10 niveluri de descompunere și tratează problema reducerii deviației liniei de bază într-un mod satisfăcător (vezi fig. 5.6 respectiv fig. 5.8). Se poate remarca o reducere a deviației liniei de bază după aplicarea metodei. A fost dezvoltată și optimizată și metoda de filtrare a zgomotului de achiziție a semnalelor MKG bazată pe analiza wavelet, facilitând astfel punerea de către medic a unui diagnostic corect. În principiu, metoda propusă păstrează doar coeficienții wavelet de detaliu cu valori mai mari decât o valoare de prag stabilită, în timp ce ceilalți coeficienți sunt percepuți drept zgomot și eliminați. Procedura de filtrare bazată pe analiza wavelet reduce doar zgomotul biologic cauzat de activitatea musculară, zgomot care prezintă o sursă principală de perturbații în cazul semnalelor EKG, dar care nu este foarte accentuat în cazul semnalelor MKG, din cauza interferențelor magnetice mult mai puternice existente.

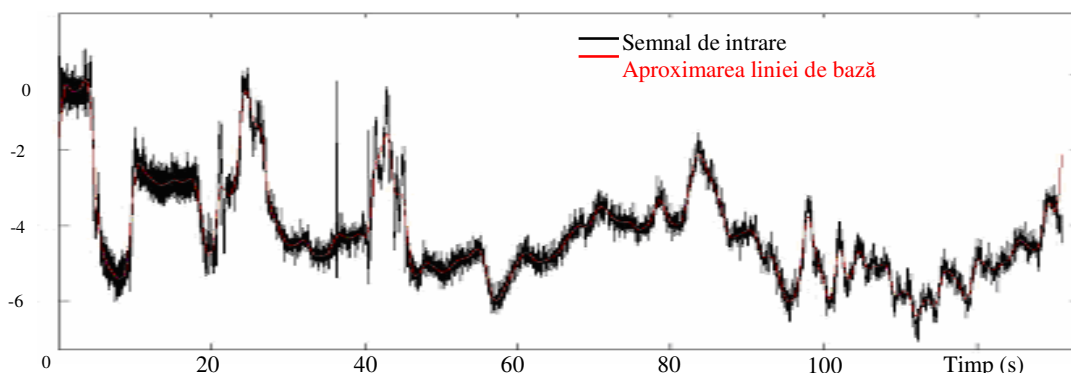


Figura 5.6. Estimarea liniei de bază a semnalului MKG utilizând undișoara mamă Daubechies2.

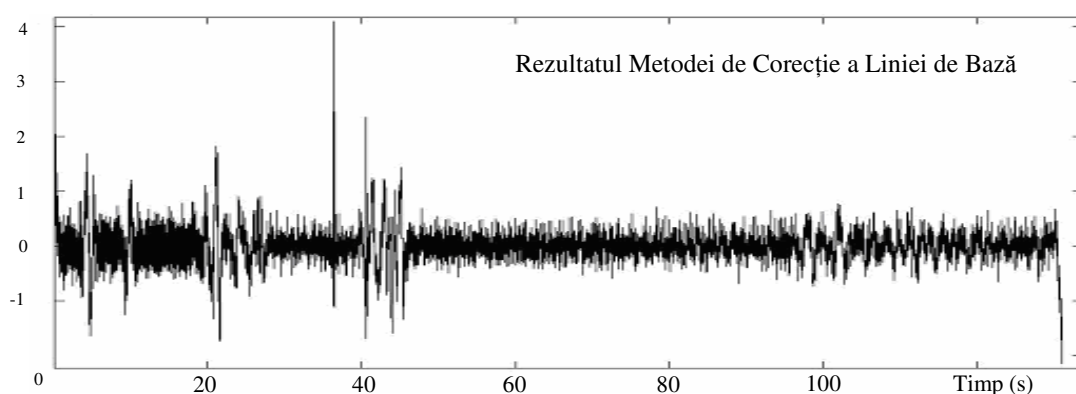


Figura 5.8. Rezultatul metodei de corecție a deviației liniei de bază a semnalului MKG.

Metoda de compresie bazată pe analiza wavelet este simplă ca și principiu și în consecință rapidă și ușor de implementat. A fost evidențiată în capitolul patru, necesitatea de a lua în considerare cuantizarea coeficienților wavelet în analiza unei metode de compresie destinată transmisiei de date. Cuantizarea introduce anumite distorsiuni în procedura de compresie a datelor. În scopul reducerii acestor distorsiuni, trebuie selectate corect caracteristicile metodei: transformata wavelet utilizată, funcția wavelet mamă folosită la calculul transformatei wavelet și valoarea pragului. Strategia de selecție a caracteristicilor propusă este bazată pe calculul factorului de calitate, care depinde de factorul de compresie și de factorul *PRD*. Algoritmii de compresie dezvoltat anterior pentru semnale EKG (cap. 4.3.1) a fost adaptat, luând în considerare trăsăturile caracteristice ale magnetocardiogramelor astfel încât să-i fie testate performanțele și în cazul semnalelor MKG. Au fost luate în considerare mai multe caracteristici ale algoritmului de compresie, precum funcția wavelet mamă utilizată la calculul DWT, numărul de momente nule ale funcției MW și numărul de niveluri de descompunere al transformării DWT. Valoarea de prag pentru coeficienții wavelet a fost stabilită în mod adaptiv funcție de pasul de cuantizare. Factorul de compresie obținut este situat în jurul valorii de 4,59, valoare comparabilă cu cele obținute cu prima metodă de compresie propusă pentru semnalele EKG dar algoritmul este mai stabil. Se remarcă că nu pot fi percepute distorsiuni vizibile ale semnalului MKG în urma reconstrucției (vezi fig. 5.20). În plus, o măsură cantitativă a rezultatelor este redată prin valoarea *PRD*. Valorile obținute sunt mai mari decât cele obținute în cazul semnalelor EKG, dar se încadrează în limitele prescrise în literatură. Un sistem de monitorizare cardiacă de la distanță ar trebui luat în considerare și în

cazul semnalelor MKG pentru a crește posibilitatea unei diagnosticări în timp util al unui număr cât mai mare de pacienți.

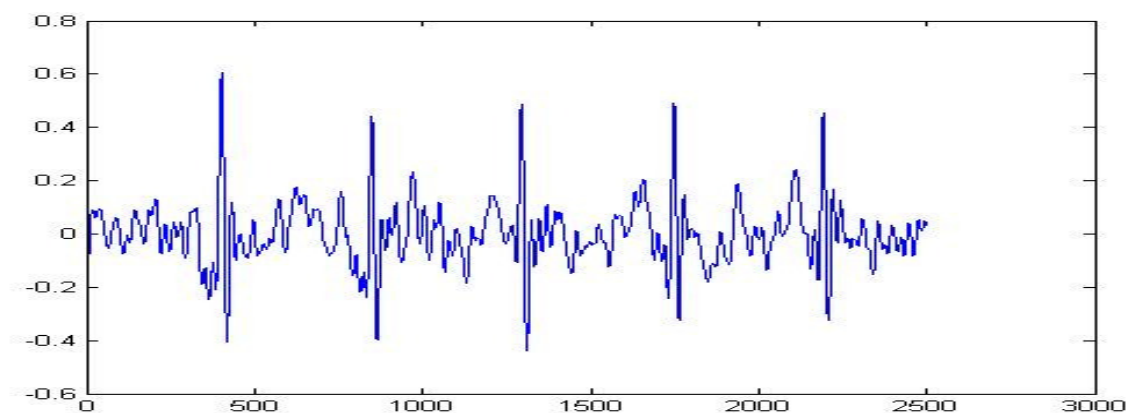


Fig. 5.20. Semnalul MKG reconstruit după compresie utilizând funcția wavelet mamă Db20 și 7 niveluri de descompunere.

În concluzie, analiza wavelet oferă o bună flexibilitate și permite dezvoltarea unor metode de prelucrare atât a semnalelor EKG cât și a semnalelor MKG, care să țină cont de particularitățile acestora pentru optimizarea parametrilor, contribuind astfel la o monitorizare de la distanță a activității electrice a inimii. Cei trei algoritmi propuși în paragrafele 4.1, 4.2 și 4.3 respectiv 5.1, 5.2, 5.3, elaborați cu ajutorul mediului de programare *Matlab*, au fost înglobați într-un tot unitar, flexibilitatea metodelor permițând alegerea separată a parametrilor etapelor, astfel încât să se obțină rezultate optime. Prezenta teză de doctorat asupra monitorizării de la distanță a activității electrice a inimii poate fi completată printr-un sistem de diagnosticare automată. Un asemenea sistem ar trebui să cuprindă o segmentare a semnalului EKG sau MKG în undele componente (unda P, complexul QRS și unda T) și o identificare automată a cazurilor patologice pe baza analizei formelor acestor unde componente. Un prim pas realizat în acest sens este constituit de elaborarea unei prime metode de detecție a complexului QRS (prezentată în paragraful 4.4), care este menită să faciliteze munca medicului și să deschidă noi perspective de cercetare.