

1

INTRODUCERE

1.1 FILTRE ADAPTIVE. CARACTERISTICI GENERALE

Un filtru adaptiv este un filtru capabil să-și modifice parametrii, în scopul optimizării unor caracteristici ale sale, pe baza unui algoritm recursiv. Capacitatea aceasta de autoajustare a parametrilor este utilă în special în cazul unor filtre care lucrează într-un "mediu" (semnal util de intrare, zgomot, interferențe) ce nu este complet cunoscut apriori de proiectant, sau este nestaționar. Filtrul adaptiv va fi deci constituit dintr-un filtru digital, cu parametri reglabili și un algoritm adaptiv, concretizat într-un bloc de calcul ce determină valorile optime pentru coeficienți, conducând la reglarea lor automată. Un exemplu tipic de filtru adaptiv cu răspuns finit la impuls este dat în figura 1.1.

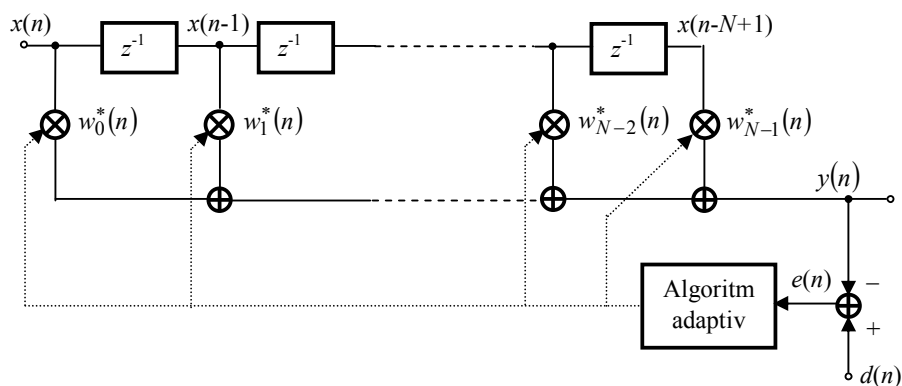


Fig. 1.1 Filtru adaptiv

În această schemă există două intrări: secvența de intrare a filtrului $x(n)$ și răspunsul dorit, $d(n)$. Pe baza unei combinații liniare a celor N eșantioane succesive ale intrării, se urmărește ca semnalul $y(n)$ de la ieșirea filtrului, să reprezinte o estimare a semnalului dorit,

$d(n)$. Pentru generalitate, vom presupune în continuare că atât semnalele, cât și coeficienții filtrului sunt mărimi complexe. În plus, coeficienții filtrului, $w_k^*(n)$, $k = 0, 1, \dots, N-1$, sunt funcții de variabila temporală discretă n . Secvența eroare, $e(n)$ este:

$$e(n) = d(n) - y(n) = d(n) - \sum_{k=0}^{N-1} w_k^*(n)x(n-k) = d(n) - \mathbf{w}^H(n)\mathbf{x}(n) \quad (1.1)$$

unde s-a notat cu asterisc operația de conjugare complexă, cu indicele superior T operația de transpunere, iar cu H , transpunerea hermitică (conjugare și transpunere),

$$\begin{aligned} \mathbf{w}(n) &= [w_0(n), w_1(n), \dots, w_{N-1}(n)]^T, & \mathbf{w}^H(n) &= (\mathbf{w}^T(n))^* \\ \mathbf{x}(n) &= [x(n), x(n-1), \dots, x(n-N+1)]^T \end{aligned} \quad (1.2)$$

Eroarea $e(n)$ este utilizată de algoritmul adaptiv pentru modificarea recursivă a coeficienților $w_k^*(n)$, $k = 0, 1, \dots, N-1$, la fiecare tact n .

Pentru a aprecia caracterul optimal al filtrului trebuie definită o "funcție cost". Pot fi utilizate drept funcții cost:

- eroarea medie pătratică, $E\{|e^2(n)|\}$,

- suma pătratelor erorilor (norma L_2 evaluată pe un suport finit)

$$\sum_{k=N}^M |e(n-k)|^2 \quad (1.3)$$

- suma ponderată a pătratelor erorilor

$$\sum_{k=1}^n \lambda^{n-k} |e(k)|^2 \quad (1.4)$$

- norma L_1 a erorii evaluată pe un suport finit,

$$\sum_{k=0}^{N-1} |e(n-k)|. \quad (1.5)$$

Există în literatură numeroși algoritmi adaptivi pentru diverse structuri de filtre. Alegerea unei anumite variante poate fi făcută ținând seama de următorii factori:

- viteza de convergență, exprimată prin numărul de iterații necesare pentru a se ajunge la o soluție suficient de apropiată de cea optimă, în condițiile unui mediu staționar;

- dezadaptarea ce exprimă măsura în care valoarea finală a erorii medii pătratice diferă față de eroarea medie pătratică dată de filtrul optim;

- capacitatea de urmărire a variațiilor statistice ale semnalelor, în condițiile în care acestea nu sunt staționare;

- robustețea algoritmului este legată de capacitatea acestuia de a opera chiar în cazul unor date "rău condiționate", ce ridică probleme de calcul numeric;

- complexitatea algoritmului evaluată prin numărul de operații aritmetice efectuate în fiecare iterație și capacitatea de memorie necesară;

- structura, deci modul de implementare hardware a filtrului și a algoritmului adaptiv; de o mare importanță pentru realizarea VLSI sunt modularitatea, paralelismul, concurența [Ha1],[Sh1];

- *proprietăți numerice* legate de erorile de cuantizare, stabilitatea numerică, precizia numerică în reprezentarea coeficienților. Se spune că un algoritm este "numeric robust" atunci când este insensibil la variația numărului de biți cu care se operează.

1.2 CONFIGURAȚII DE SISTEME ADAPTIVE

Se pot distinge patru configurații de sisteme adaptive, definite prin funcțiile pe care le îndeplinesc.

1.2.1 Identificarea sistemelor

Se dorește modelarea unui sistem necunoscut cu ajutorul unei funcții de transfer raționale. Acestui sistem, precum și filtrului adaptiv, li se aplică un același semnal de test x (figura 1.2). Semnalul de la ieșirea sistemului necunoscut va avea rolul de "semnal dorit" pentru ieșirea filtrului adaptiv. În măsura în care y și d sunt foarte apropiate, funcția de transfer a sistemului necunoscut poate fi aproximată cu aceea a filtrului adaptiv. Altfel spus, filtrul adaptiv realizează o modelare a sistemului necunoscut. Dacă sistemul este dinamic, modelul va fi și el variabil în timp. Rămân totuși deschise următoarele probleme:

-coincidența răspunsurilor în domeniul timp ale celor două sisteme implică și coincidența funcțiilor de transfer?

-cum trebuie ales semnalul de test, pentru a avea o identificare corectă într-o gamă cât mai largă de frecvențe?

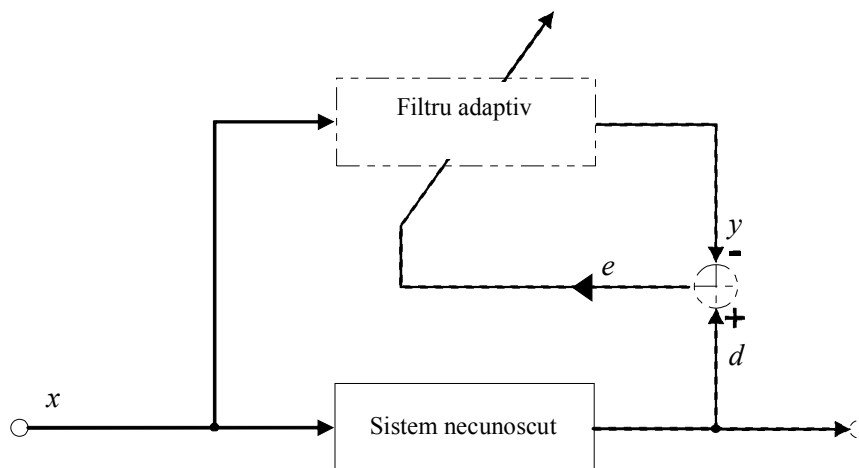


Fig. 1.2 Identificare adaptivă de sistem

Problema modelării sau identificării sistemelor este de mare importanță pentru domeniile controlului automat, comunicațiilor, prelucrării semnalelor. Vom prezenta în continuare doar două exemple.

Modelarea canalului radio

Într-o transmisiune radio, de la emițător la receptor se vor propaga, în afara unde directe, care poate fi obturată de diverse obstacole, și o serie de unde rezultând din fenomene

de reflexie, difracție, împrăștiere, produse de diferite obiecte din teren. Fenomenul este deosebit de pregnant în propagarea în mediile urbane, de exemplu în cazul comunicațiilor mobile. Ca urmare, răspunsul canalului la un impuls, va conține, în afară de un eventual răspuns principal, datorat propagării directe, o serie de replici, cu diverse atenuări și întâzieri. Acestea pot fi foarte supărătoare în cazul unor transmisiuni numerice. De aceea, modelarea canalului este o problemă importantă, pentru a oferi informații privind limitările introduse de canal și a lua eventual măsuri pentru evitarea fenomenelor ce decurg.

Modelarea adaptivă în explorările geofizice

Scoarța terestră este alcătuită din straturi de roci cu proprietăți diferite. Cunoașterea acestei structuri este importantă, deoarece ea poate pune în evidență existența unor eventuale zăcăminte. O metodă ce permite studiul straturilor geologice se bazează pe așa-numita tehnică a reflexiei seismice. Într-un anumit punct de pe suprafața Pământului se aplică un generator de vibrații sau se produce o explozie. Se plasează doi senzori (geofoane), unul în imediata apropiere a punctului unde se aplică vibrația, iar al doilea, într-un alt punct (punctul de măsură). Informația culeasă de primul senzor va fi deci legată de excitația sistemului, în timp ce la al doilea senzor se vor recepționa, în afara unei unde propagate direct, o serie de unde reflectate la suprafețele de separare între straturi diferite. Întârzierile și atenuările lor dau informații utile privind structura scoarței terestre. Semnalul recepționat de la al doilea senzor, considerat ca ieșire a sistemului necunoscut, poate fi deci modelat ca ieșire a unui filtru cu răspuns finit la impuls, având drept intrare semnalul de la primul senzor. Rezultă deci posibilitatea unei modelări adaptive, în care semnalul dorit este semnalul dat de al doilea senzor, iar la intrare se aplică semnalul de la primul senzor.

1.2.2 Modelarea inversă

Și această configurație permite identificarea unui sistem necunoscut, prin conectarea acestuia în cascadă cu filtrul adaptiv (figura 1.3). În situația în care eroarea ar fi nulă, ar însemna că funcția de transfer globală a sistemului necunoscut și a filtrului adaptiv s-ar reduce la o întâzriere. Deci în general, funcția de transfer a filtrului adaptiv va aproxima inversul funcției de transfer a sistemului necunoscut, o identitate nefiind totuși posibilă din cauza prezenței inevitabile a zgomotului.

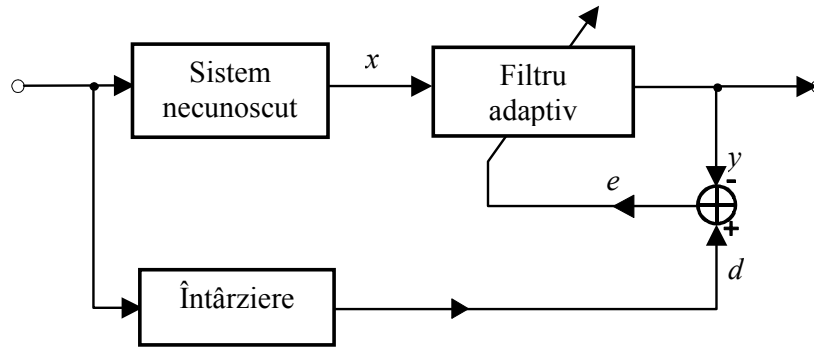


Fig. 1.3 Modelare inversă

Totodată, această schemă are proprietatea de a anihila efectul unei funcții de transfer nedorite. Deși această configurație permite, ca și precedenta, modelarea unui sistem, trebuie pusă în evidență o diferență esențială de natură practică. În cazul în care sistemul necunoscut este un sistem cu răspuns finit la impuls (fără poli în afara originii), prin metoda precedentă, filtrul

adaptiv va fi și el un filtru cu răspuns finit la impuls (FIR), în timp ce prin a doua metodă, va fi un filtru cu răspuns infinit la impuls (IIR), având numai poli la distanță finită. Realizarea unor filtre adaptive cu răspuns infinit la impuls este o problemă mult mai dificilă decât a unor filtre FIR. În plus, modelarea e posibilă numai dacă sistemul necunoscut este de fază minimă, deoarece în caz contrar ar rezulta un filtru instabil. De aceea, în acest caz este de preferat prima metodă. Dacă însă sistemul necunoscut este un sistem având numai poli, el va fi mai ușor modelat prin a doua configurație, deoarece aceasta presupune un filtru adaptiv FIR.

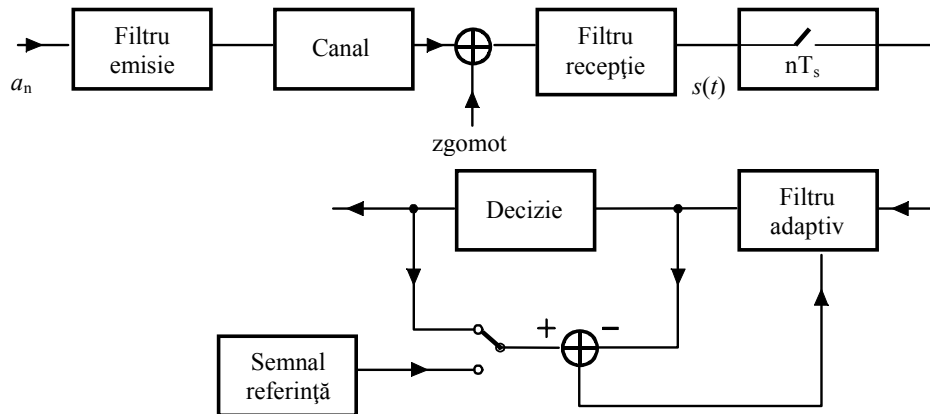


Fig. 1.4 Egalizare adaptivă

Un exemplu îl constituie *egalizarea adaptivă* a unor canale de comunicații. Pentru a ilustra principiul egalizării adaptive, vom considera un sistem de transmisiuni de date în banda de bază (figura 1.4). Într-un asemenea sistem, secvența de date a_n este aplicată, la emisie, unui filtru de formare, cu rolul de a limita lărgimea de bandă ocupată. Pe canalul de comunicație se introduce și un zgomot de bandă relativ largă.

La recepție, pentru reducerea acestui zgomot se utilizează un filtru, la ieșirea căruia semnalul util poate fi exprimat prin:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k p(t - kT_s) \quad (1.6)$$

T_s este perioada de tact iar $p(t)$ este răspunsul la impuls al filtrului global emisie-recepție. În cazul unei transmisiuni cu mai multe nivele, a_n poate lua valorile $\pm 1, \pm 3, \dots, \pm 2M-1$; $p(t)$ ar trebui în mod ideal să aibă o formă ca aceea din figura 1.5a, astfel încât

$$p(nT_s) = \begin{cases} 1, & n = 0 \\ 0, & n \neq 0 \end{cases} \quad (1.7)$$

Ca urmare, la oricare din momentele de eșantionare, de forma mT_s , avem, făcând abstracție de zgomot,

$$s(mT_s) = a_m \quad (1.8)$$

deci impulsurile nu se influențează reciproc.

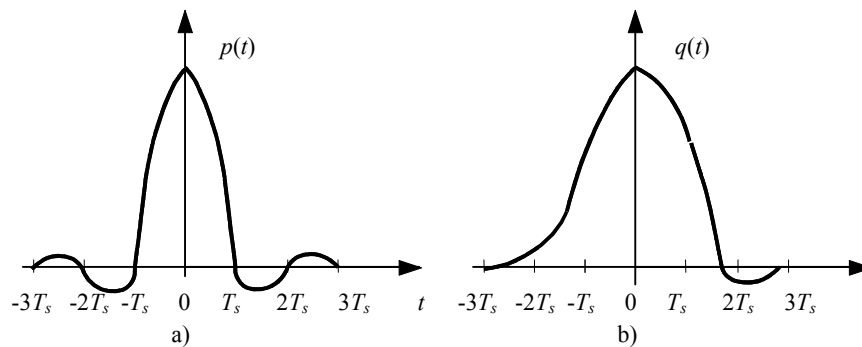


Fig. 1.5 Răspunsul la impuls al sistemului global emisie-recepție în cazul ideal (a) și în cazul real (b)

Canalul de transmisiune poate fi modelat și el sub forma unui filtru liniar. Acesta va distorsiona semnalul; răspunsul global la impuls, $q(t)$, poate avea o formă ca aceea din figura 1.5b. Ca urmare apare fenomenul de *interferență intersimbol*.

Pentru a evita distorsiunea introdusă de canal, va trebui introdus un alt filtru, cu rolul de *egalizor*. Acesta trebuie să compenseze distorsiunea introdusă de canal. Funcția de transfer a canalului nu este în general cunoscută, și în plus, ea poate varia lent în timp. Apare deci necesitatea ca acest filtru să fie adaptiv. Pentru a realiza inițial adaptarea, se poate transmite mai întâi o *secvență de antrenare*, cunoscută la recepție și se compară ieșirea filtrului cu un semnal de referință generat local, dar identic cu cel emis. După această fază de adaptare inițială, care durează de obicei mai puțin de o secundă, emițătorul transmite simbolurile de informație. Pentru a se asigura păstrarea în continuare a adaptării, semnalul de referință este generat utilizând simbolurile obținute după decizie, presupuse corecte. Această abordare este corectă dacă rata erorilor este relativ scăzută. În acest caz, existența unei decizii eronate, nu conduce la o dezadaptare importantă.

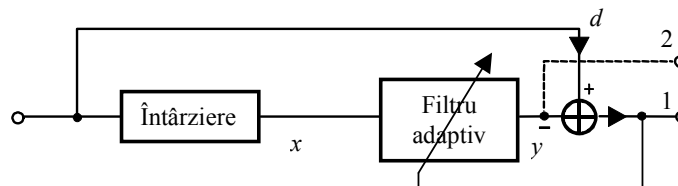


Fig. 1.6 Predicție

1.2.3 Predicția

Această operație presupune o estimare a unei valori viitoare a semnalului aplicat. Ca urmare, predictorul ideal contravine principiului cauzalității, deci nu se poate realiza fizic. Pentru a evita acest obstacol, filtrului i se aplică secvența de intrare întârziată, iar ieșirea acestuia este comparată cu eșantionul prezent (figura 1.6). Prin minimizarea erorii, se realizează o predicție optimă a semnalului de intrare. Se poate utiliza fie ieșirea 1, realizându-se "filtrul erorii de predicție", fie ieșirea 2, în care caz sistemul lucrează ca predictor. Eventual, un filtru având coeficienți identici cu cei ai filtrului adaptat, poate fi utilizat pentru a filtra direct semnalul neîntârziat. Evident, schema funcționează pe baza existenței unei anumite autocorelații a semnalului. În măsura în care aceasta este foarte mică (timpul de autocorelație este foarte scurt, exemplul limită fiind al zgomotului alb), semnalul nu mai este predictibil, așa încât schema nu mai poate funcționa. Vom prezenta trei aplicații tipice pentru această configurație.

Codarea predictivă a semnalelor vocale

După cum este cunoscut [Bo1],[St1],[Ma1], producerea semnalului vocal poate fi modelată cu ajutorul unor generatoare urmate de un filtru liniar, de tip IIR, eventual fără nului la distanță finită. Generatorul depinde de tipul de sunet. Pentru fonemele sonore (vocale), generatorul furnizează impulsuri cvasi-periodice, iar pentru fonemele nesonore, zgomot. Se pune deci problema determinării parametrilor excitației, iar apoi a funcției de transfer a filtrului. Acest lucru se realizează printr-un proces de predicție adaptivă. La fiecare moment de eșantionare, se determină și eroarea de predicție. Transmițând parametrii amintiți mai înainte și eroarea de predicție (de putere mult mai mică decât a semnalului), se poate reconstitui la recepție semnalul vocal. În felul acesta se poate realiza o transmisiune mult mai eficientă decât dacă s-ar transmite în mod efectiv semnalul.

Suprimarea unei interferențe de bandă îngustă suprapusă peste un semnal de bandă largă

Să presupunem că un semnal util, de bandă largă, $w(t)$ este suprapus peste o interferență de bandă îngustă, $x(t)$ (figura 1.7). Un exemplu de semnal de bandă largă este semnalul cu spectru împrăștiat (spread-spectrum). Semnalul de bandă îngustă poate fi un semnal modulat aparținând altui utilizator sau un semnal de bruijaj. În principiu este necesar un filtru oprește bandă care să elimine interferența. Cum caracteristicile spectrale ale acestui semnal nu sunt de obicei cunoscute și în plus, se pot modifica în timp, este util ca eliminarea interferenței să se realizeze cu un sistem adaptiv. Funcționarea se bazează pe proprietățile de autocorelație diferite ale celor două semnale. Reamintim că un semnal de bandă îngustă este puternic corelat, deci predictibil, în timp ce un semnal de bandă largă este slab corelat deci nepredictibil. În consecință, predictorul având ca intrare suma celor două semnale, va crea un estimat al semnalului $x(t)$, care va fi scăzut din semnalul total recepționat $y(n)$. (figura 1.8).

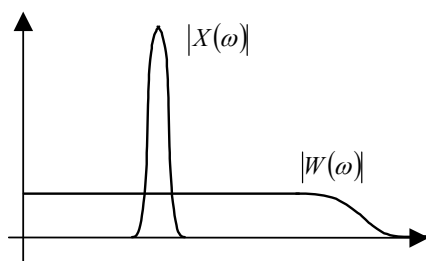


Fig. 1.7 Spectrele semnalelor $x(n)$ și $w(n)$

În consecință, predictorul va realiza practic o estimare a semnalului $x(n)$. Dacă din contra, semnalul util este cel de bandă îngustă (de exemplu $w(t)$ este un zgomot de bandă largă), se poate utiliza ca estimat al acestui semnalul de eroare.

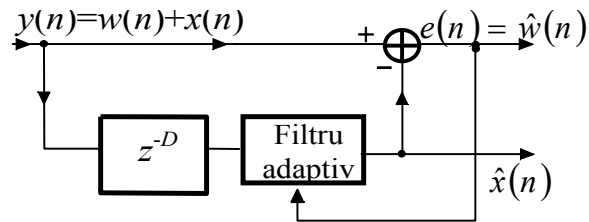


Fig. 1.8 Sistem adaptiv de separare a semnalelor

Intensificarea semnalului (suprimarea unui zgomot de banda largă)

Să considerăm, că peste un semnal util, de bandă relativ îngustă, $x(n)$ este suprapus un zgomot de bandă largă $w(n)$. Ne propunem să suprimăm zgomotul, sau altfel spus, să intensificăm semnalul în raport cu zgomotul. Problema se poate rezolva utilizând aceeași configurație ca în cazul suprimării unei interferențe de bandă îngustă, dar scopul este altul; obținerea unui estimat al semnalului $x(n)$. Filtrul se va comporta ca un filtru trece-bandă, de bandă îngustă, urmărind frecvența semnalului util.

1.2.4 Suprimarea interferențelor

În această configurație se urmărește reducerea unui semnal perturbator, suprapus peste semnalul util, dacă se dispune de un semnal puternic corelat cu perturbația (figura 1.9). În această schemă, semnalul primar constă într-un semnal util peste care este suprapus un semnal perturbator, iar semnalul secundar este un semnal puternic corelat cu perturbația, dar necorelat cu semnalul util. Se pune problema creării unui semnal "asemănător" celui perturbator care să fie scăzut din semnalul primar. Filtrul adaptiv va genera un estimat al semnalului dorit, dar cum componenta utilă a acestuia e necorelată cu intrarea filtrului, el va crea de fapt un estimat al perturbației. Vom prezenta și aici câteva aplicații tipice.

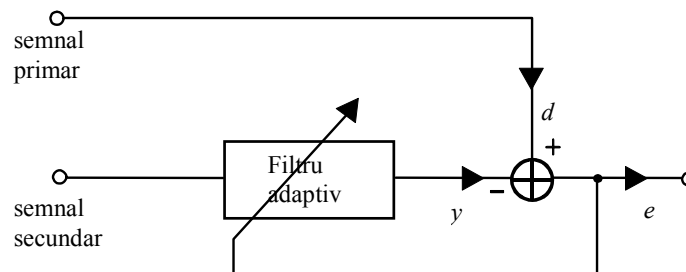


Fig. 1.9 Suprimarea interferențelor

Compensarea ecoului în transmisiunile de date pe canale telefonice

Pentru realizarea unei transmisiuni de date între două terminale pe canale telefonice, se utilizează două modemi, ce reprezintă interfața între datele digitale și canalul de transmisiune de tip analogic. Legătura între fiecare modem și centrala telefonică respectivă este realizată în mod

curent printr-o singură linie telefonică comutată, deci pe două fire. Pentru a putea separa semnalul transmis de cel recepționat se utilizează un triport, pe care-l vom numi, având în vedere structura sa, sistem diferențial (SD). La nivelul centralei, semnalele de pe liniile locale sunt preluate de asemenea prin câte un sistem diferențial, iar legătura între centrale este realizată prin linii telefonice unilaterale (prin care semnalul este transmis într-un singur sens); deci pentru asigurarea unei legături duplex se folosesc două linii; una va transmite semnalul de la A la B, iar cealaltă invers (figura 1.10). Ca urmare a unor dezadaptări, sistemele diferențiale nu realizează însă o separare perfectă a acestor semnale, iar rezultatul este cunoscut sub numele de ecou.

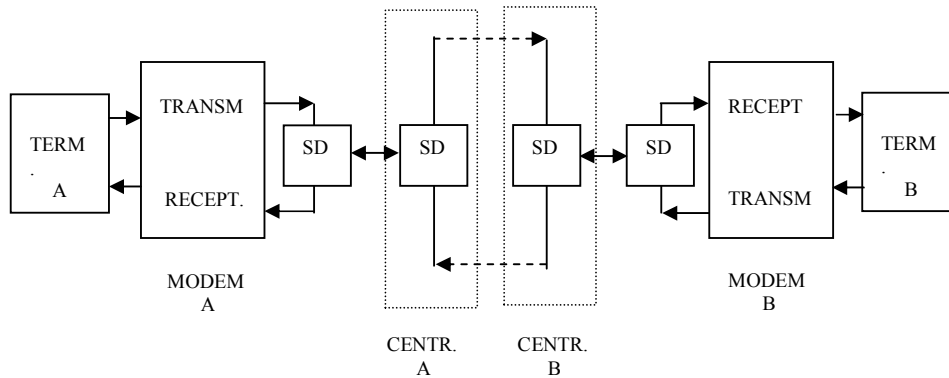


Fig. 1.10 Transmisiiune de date prin canale telefonice

Dacă notăm cu $s_A(t)$, $s_B(t)$, $s_{RA}(t)$ semnalele transmise de terminalele A și B și semnalul recepționat de A, ca urmare a fenomenului de ecou,

$$s_{RA}(t) = A_1 s_B(t) + A_2 s_A(t - d_1) + A_3 s_A(t - d_2) = A_1 s_B(t) + s_{EA}(t)$$

unde s-au pus în evidență două semnale ecou. Primul, provine de la SD din centrala proprie A și este numit *ecou apropiat*, iar al doilea provine de la centrala B și este numit *ecou îndepărtat*.

Pentru reducerea ecoului, ar trebui scăzut din semnalul recepționat $s_{RA}(t)$ un semnal $\hat{s}_{EA}(t)$, care să aibă caracteristicile semnalului ecou. Acest semnal fiind puternic corelat cu semnalul transmis de terminalul A, s_A , poate fi creat utilizând un filtru adaptiv, având drept intrare semnalul emis, $s_A(t)$, și drept semnal eroare, diferența $s_{RA}(t) - \hat{s}_{EA}(t)$ (figura 1.11).

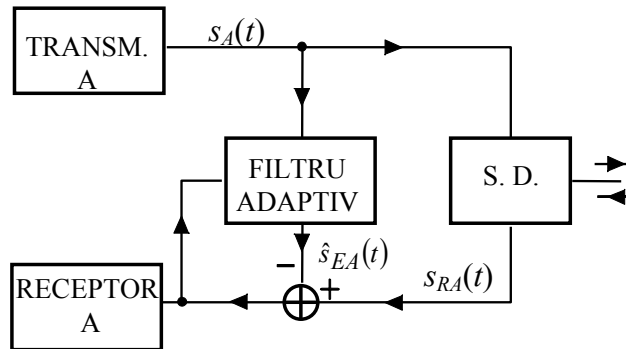


Fig.1.11 Compensarea ecoului electric

Filtrul adaptiv, de tip RFI, va trebui să aibă o lungime suficient de mare pentru a putea realiza o întârziere egală cu aceea a ecourilor. Cum de regulă este o diferență mare între întârzierile specifice ecoului apropiat și celui îndepărtat, se pot utiliza două supresoare de ecou separate. Există diverse variante de introducere a supresorului de ecou în structura modemului.

Compensarea ecoului acustic

În unele echipamente telefonice cu audiție în difuzor, precum și în cele destinate teleconferințelor, există posibilitatea apariției unei reacții acustice, prin pătrunderea semnalului recepționat, amplificat și redat de difuzor, în microfon, putând rezulta chiar o intrare în oscilație a sistemului. Un sistem adaptiv de suprimare a ecoului se introduce și aici; acesta va realiza un semnal asemănător celui redat de difuzor, care se scade din semnalul preluat de microfon.

De multe ori, cele două tipuri de ecou descrise mai sus, ecoul produs de echipamentele canalului de comunicații, ce va fi numit ecou electric, și cel acustic apar simultan, așa cum este sugerat în figura 1.12. În principiu, metoda de compensare este aceeași. Trebuie însă să avem în vedere că întârzierile ce aferente ecoului electric sunt mult mai mic decât cele corespunzătoare ecoului acustic, datorită vitezei de propagare mult mai reduse a semnalului acustic. Ca urmare, filtrul pentru compensarea ecoului acustic va trebui să aibă o lungime mult mai mare, cu toate neajunsurile ce rezultă. Din acest motiv, în realitate nu vor exista compensatoare destinate ambelor tipuri de ecou.

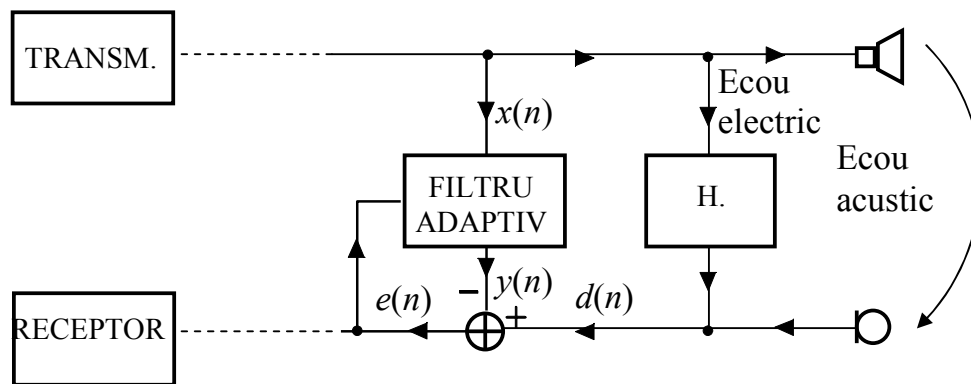


Fig.1.12 Compensarea ecoului electric

Schema din figura 1.11 se referă la reducerea ecoului ce afectează echipamentul propriu, ca urmare a conectării sale în sistem. Recomandările în vigoare pornesc de la un alt punct de vedere, acela al obligativității fiecărui echipament de a nu genera ecou în rețea. Astfel recomandarea G 168 a Uniunii Internaționale de Telecomunicații, (ITU-T) referitoare la compensarea ecoului electric, se bazează pe schema din figura 1.12, în care ecoul produs de echipamentul local este anihilat de filtrul adaptiv funcționând în acest echipament.

Reducerea zgomotului în transmisiunile vocale

Să considerăm cazul unui pilot de avion, care utilizează un sistem de comunicații radio. Nivelul mare al zgomotului (acustic) va duce la o inteligibilitate redusă a mesajelor transmise de pilot. Pentru a reduce acest fenomen, se preia cu un al doilea microfon, astfel plasat încât să fie puțin sensibil la semnalul vocal, dar sensibil la zgomotul produs de motoare, semnalul secundar din figura 1.9.

Reducerea unei interferențe prin modificarea caracteristicii de directivitate

Să considerăm un receptor radio ce utilizează un sistem de antene. Semnalul recepționat se obține prin însumarea ponderată a semnalelor date de antene. Ponderile respective determină totodată aspectul caracteristicii de directivitate a sistemului de antene. Să presupunem că peste semnalul util se suprapune o interferență de putere mult mai mare, venind pe o altă direcție decât cea a semnalului util. Pentru generarea optimă a ponderilor vom utiliza un sistem adaptiv de tipul prezentat în fig. 1.9. Semnalul primar va fi cel de la ieșirea sistemului de antene, iar semnalul secundar, va fi dat de una din antene, cu pondere fixă, sau neinclusă în sistemul de recepție. Sistemul se va adapta practic pe semnalul cel mai puternic, deci pe semnalul perturbator, așa încât acesta va fi puternic atenuat în semnalul eroare ce reprezintă de fapt ieșirea sistemului. Această funcționare este echivalentă cu crearea unui minim al caracteristicii de directivitate pe direcția emițătorului perturbator [W1].

Bibliografie

- [Al1] **Alexander S.T.**, *Adaptive Signal Processing*, Springer, New York, 1986.
- [Bo1] **Boite R., Kunt M.**, *Traitement de la Parole*, Lausanne, Polytechnique Romande, 1987.
- [B1] **Bellanger M.G.**, *Adaptive Digital Filters and Signal Analysis*, M. Dekker, New York, 1987.
- [Co1] **Cowan C. F. N., Grant P.M.**, *Adaptive Filters*, Mc. Graw-Hill, New York, 1983.
- [Ci1] **Ciochină S.**, *Sisteme adaptive*, UPB, 1997.
- [Ha1] **Haykin S.**, *Adaptive Filter Theory*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1991.
- [Ho1] **Honig M.L., Messerschmitt D.G.**, *Adaptive Filters*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1985.
- [M1] **Mulgrew B., Cowan C. F. N.**, *Adaptive Filters and Equalizers*, Kluwer Academic Publishers, Boston M.A., 1988.
- [Ma1] **Mateescu A., Ciochină S., Dumitriu N., Șerbănescu A., Stanciu L.**, *Prelucrarea numerică a semnalelor*, Ed. Tehnică, București, 1997.
- [Ma2] **Mateescu A., Bănică I., Popescu S., Borcoci E.**, *Manualul inginerului electronist, vol. II, Transmisiuni de date*, Ed. Tehnică, 1984
- [N1] **Negrescu C.**, *Bazele algoritmilor adaptivi de gradient. Metode de optimizare*, UPB, 1997.
- [Pr1] **Proakis J.G.**, *Digital Communications*, Mc. Graw-Hill, 1983.
- [Pr2] **Proakis J.G., Rader C.M., Ling F., Nikias C.L.**, *Advanced Digital Signal Processing Algorithms*, Macmillan Publishing Company, 1992.
- [Sh1] **Shanbhag N.R., Parhi K.K.**, *Pipelined Adaptive Digital Filters*, Kluwer Academic Publishers, Boston M.A., 1994.
- [St1] **Stanomir D., Negrescu C., Jalbă L.**, *Algoritmi pentru prelucrarea semnalului vocal. Teorie și aplicații în comunicațiile GSM*, Ed. Athena, București, 1998.
- [Tr1] **Treichler J., Johnson C.R., Larimore M.G.**, *Theory and Design of Adaptive Filters*, Wiley, New York, 1987.
- [W1] **Widrow B., Stearns S.D.**, *Adaptive Signal Processing*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1985