Comunicarea în timp real în rețele wireless

Andreea Caraibot   
*Departamentul de Automatică și Informatică Aplicată*  
Universitatea PolitehnicaTimișoara, România  
andreea.tamara@yahoo.com

Emil Cioplea  
*Departamentul de Automatică și Informatică Aplicată*  
Universitatea PolitehnicaTimișoara, România  
emilcioplea@yahoo.comArmina-Mihaela Cioabă  
*Departamentul de Automatică și Informatică Aplicată*  
Universitatea PolitehnicaTimișoara, România  
mihaela\_armina@yahoo.com

Cristian Cornea  
*Departamentul de Automatică și Informatică Aplicată*  
Universitatea PolitehnicaTimișoara, România  
cristi.1990.cristi@gmail.comPaul-Valentin Ciocu  
*Departamentul de Automatică și Informatică Aplicată*  
Universitatea PolitehnicaTimișoara, România  
ciocupaul99@gmail.com

Adrian-Daniel Cusma  
*Departamentul de Automatică și Informatică Aplicată*  
Universitatea PolitehnicaTimișoara, România  
adriandani74@gmail.com

*Abstract* — Rețelele *wireless* sunt folosite din ce în ce mai mult în arii vaste de lucru, ceea ce implică o continuă cercetare și dezvoltare pe această latură.

În această lucrare, este prezentată metoda AFEC (*Adaptive Forward Error-Correction*) de corectare a erorilor apărute în mesajul transmis, dar și posibilitatea de comunicare concurentă în rețelele *wireless*. Pentru a putea fi în legătură cu dezvoltarea umană, se vor puncta și diferite aspecte ale modurilor de comunicare fără fir, în timp real, din domeniul industrial, mai exact relația dintre senzori și actuatoare, cea din rețelele *wireless* industriale de tip *mesh*, un protocol de anti-blocaj la nivel de senzori și un studiu legat de eficiența energetică la rutare.

# Introducere

Comunicarea în timp real presupune faptul că mesajul transmis de emițător trebuie să ajungă la receptor într-o unitate de timp prestabilită, bine cunoscută. Dacă mesajul nu ajunge integral sau chiar deloc la destinație în acel *deadline*, se consideră faptul că informația este alterată, lucru ce va induce erori în performanțele oricărei aplicații ce o va utiliza.

Deprinderea de cabluri a necesitat descoperirea și rezolvarea problemelor aduse de interfața aeriană, ce periclitează calitatea datelor ajunse la destinatar, precum: o rată mai mare de eroare a unui *bit*, o lățime de bandă limitată și o conectivitate discontinuă între cele două dispozitive.

Pentru a evita pierderi ale informației pe calea de comunicație, dar și pentru a asigura ajungerea în timp a mesajului, se va propune o metodă AFEC („*Adaptive Forward Error-Correction scheme*” [1]) în detrimentul celei tradiționale SFEC (*Single Forward Error-Correction*) de transmitere și tratare a datelor trimise. AFEC presupune ținerea sub observație a căii de comunicație *wireless* iar în funcție de starea în care aceasta se află și de termenul limită stabilit, se alege cel mai optim cod de corecție dintr-un set predefinit, pentru a coda mesajul. Asigurarea corectitudinii informațiilor poate fi vitală în toate domeniile, lucru ce va pune în continuare presiune pe dezvoltarea unor modalități cât mai prompte de trimitere și corectare a datelor în acest tip de rețele.

Implementarea modului de comunicare concurentă este încercată pentru a exploata beneficiile și viabilitatea acesteia în mediul de comunicare *wireless*. Se încearcă aducerea acestei modalități și în cadrul interfeței de comunicare fără fir, prin [2], în speranța unei continue optimizări al procedeului de transmitere a datelor.

Rețelele aeriene senzor-actuator au o aplicabilitate în multe domenii unde este nevoie de o reacție rapidă la detectarea unui eveniment într-o zonă de referință, astfel intervenind un cadru de comunicare în timp real. Acesta conferă eficiență aplicațiilor în care se găsește rețeaua de tip WSAN (rețea *wireless* de senzori-actuatori) [3], rezolvând două probleme majore:

* Minimizarea întârzierii de transmisie de la senzori la actuatoare
* Realizarea unei coordonări între actuatoare, pentru a obține o reacție cât mai rapidă

Pentru domeniul automatizărilor industriale, conducerea proceselor fără necesitatea cablajelor poate aduce numeroase avantaje, dar pe de altă parte, se confruntă cu anumite obstacole. *WirelessHART* [4] este un standard internațional dedicat controlului aplicațiilor industriale, bazate pe procese. Acesta oferă soluții pentru comunicarea fiabilă în timp real și administrarea centralizată a rețelei de tip *mesh*.

Conexiunile de senzori fără fir pot fi folosite pentru monitorizarea și controlarea echipamentului industrial în timp real. Ele preiau informația echipamentului și o livrează spre nodul *sink*, unde aceasta va fi analizată de stația supervizoare. Mediul industrial este nefavorabil pentru rețelele *wireless* datorită zgomotului ambiental ridicat, a undelor electromagnetice și a materialelor nefavorabile undelor radio. Se propune astfel, protocolul SA-AJCR (*Signal-to-Noise-Ratio assured Anti-Jamming Clustering Routing* [5]) pentru a îmbunătăți stabilitatea informațiilor transmise prin intermediul conexiunii dintre senzori.

Rețelele cu senzori din domeniul industrial furnizează costuri mai mici pentru conexiunea prin cabluri, cât și setarea și întreținerea aplicațiilor cu o mai mare ușurință. Cu toate acestea, înlocuirea parțială a conexiunilor folosind interfața aeriană în detrimentul firelor, trebuie să asigure o comunicare sigură, în timp real, dar și o eficacitate din punct de vedere energetic, pentru a se ridica la un nivel înalt. Astfel, se propune un protocol EARQ (*Energy Aware Routing*) [6], ce ține cont de cerințele domeniului și asigură transmiterea datelor în timp util și cu un consum de energie cât mai adecvat.

# Metodă

## Utilizarea adaptivă a codurilor de corecție

Se va considera faptul că un pachet de date va ține cont de termenul limită în care trebuie să ajungă la receptor, ce va fi reținut într-o variabilă. De asemenea, interfața aeriană este de tip Markov (în care probabilitatea unui eveniment depinde doar de evenimentul anterior) – de tip șir de stări ale calității căii de comunicație dintre cele două dispozitive. Scopul urmărit este ca, în urma transmiterii datelor, raportul între lățimea de bandă și rata de eroare să fie minim, deci profitul operațiunii maxim.

Emițătorul știe ce tip de pachet de date va urma să trimită (dintr-o mulțime predefinită de tipuri), deci și ce rezultat pozitiv în privința caracteristicii datelor este așteptată la destinație, lungimea mesajului și termenul limită în care trebuie să efectueze tranzacția. Conceptul AFEC (*Adaptive Forward Error-Correction*) are la bază alte două metodologii: ARQ (*Automatic Repeat Request*) și FEC (*Forward Error Correction*) [1]. Îmbinându-le, AFEC are două etape de execuție: stabilirea unui tabel ce indexează codul de corecție al erorilor folosit, în funcție de datele ce trebuie trimise și intervalul de timp limită impus (efectuat la conexiunea celor două dispozitive) și verificarea permanentă al *deadline*-ului și a stării căii de comunicare pentru a recalcula ce cod de corecție ar fi mai optim pentru trimiterea informației cu erori minime, corectabile.

Dacă intervalul de timp în care mesajul trebuie să ajungă la receptor permite doar o transmisie, atunci codul cel mai adecvat este ales în funcție de parametrii maximali (adică cel care poate repara cât mai mulți biți), iar în cazul în care se pot efectua mai multe tranzacții, codul folosit va fi calculat recursiv și mesajul va fi transmis cu ajutorul rezultatului ales. La momentul transmiterii mesajului, acesta va fi însoțit și de o variabilă de *timeout* în care emițătorul așteaptă un *feedback* de la receptor. În cazul în care confirmarea întârzie să apară sau este una negativă de la receptor, se ia în calcul retrimiterea informației ținându-se cont de *deadline*. Se poate lua decizia și de a se amâna transmisia pentru situația în care starea interfeței de comunicare este una defectuoasă sau nu se poate găsi un cod optim care să corecteze datele la primire (adică cu probabilitate 0 de corecție).

## Studiu în favoarea comunicării concurente

De la protocoalele (de accesare media) MACAW și 802.11 până în prezent, CSMA (*carrier-sense multiple acces*) și RTS/CTS (*request-to-send/clear-to-send*) [2] au fost folosite pentru a evita comunicarea concurentă în rețelele *wireless*, cu toate că prezintă un cost semnificativ: previn cu totul orice comunicare de acest timp, chiar și în cazul în care schimburile de date nu ar rezulta în pierderi ale informației, reduc debitul de date în rețele de tip *mesh* și necesită o marjă de eroare suplimentară la transmisii de pachete mici.

Experimentele realizate în [2] au constat în folosirea a două perechi de antene receptor-emițător, poziționate în diferite locații una față de cealaltă și în verificarea pierderii de date cauzate de interferențele de comunicație dintre ele. Un al cincilea nod, sincronizatorul, coordonează transmisia efectuată de *sender* printr-un trigger. Modificarea distanței între cele două dispozitive, cât și a puterii semnalului au fost folosite pentru a verifica calitatea acestei metode. Pentru consistența mesajului primit, s-a încercat trimiterea unui număr diferit de pachete de date.

Pe de altă parte, s-a probat și implementarea unui algoritm de control al puterii prin care să se maximizeze comunicarea concurentă și să se reducă pierderea de pachete. Au fost testați cinci astfel de algoritmi, cu o reușită de 77-88% din cazuri.

## Cadru de comunicare în timp real pentru rețelele wireless senzor-actuator

Cadrul de comunicare în timp real menționat are la bază două etape:

* În primul rând, un algoritm de raportare a evenimentelor de către senzori spre actuatoare
* În al doilea rând, un algoritm de coordonare pentru a determina care actuatoare să efectueze acțiunile.

Procesul descris aproximativ de algoritmii prezentați anterior începe cu senzorii care detectează un eveniment în zona în care se află și încep să adune date pe care le vor grupa și transmite actuatoarelor mai apropiate, în funcție de nivelul de prioritate, astfel încât cele mai importante date vor ajunge primele la actuatoare. De remarcat este faptul că senzorii nu vor raporta măsurătorile actuatoarelor, decât dacă acestea se află în domeniul de interes. După primirea celor mai importante date, actuatoarele își vor forma o imagine brută asupra evenimentului perturbator și pot începe coordonarea, fără a aștepta conținutul total al informației.

În final, după primirea integrală a datelor și hărților culese de senzori, se va stabili care actuatoare și câte dintre acestea vor interveni în luarea deciziei. Această decizie va fi influențată de asemenea și de mărimea zonei în care a apărut evenimentul declanșator.

## Comunicarea fiabilă în timp real în rețelele wireless industriale de tip mesh

Într-o rețea *WirelessHART* oarecare, fiecare dispozitiv va trimite datele sale de proces către *Gateway*, în funcție de rata de eșantionare aferentă. În sens invers, managerul de rețea va trimite, la rândul lui, date de control periodic către fiecare dispozitiv. Pentru a face diferența între tipurile de date transmise și sensul acestora, standardul în discuție folosește trei tipuri de grafuri de rutare:

* Graf de distribuție (*broadcast graph*)-pentru propagarea mesajelor de control comune în întreaga rețea
* Graf de legătură ascendentă (*uplink graph*)-pentru transmiterea datelor de proces de la dispozitivele din rețea
* Graf de legătură descendentă (*downlink graph*)-fiecare dispozitiv va avea un astfel de graf unic, pe care îl va utiliza pentru a recepționa de la managerul de rețea mesaje de control proprii. Este folosit doar dacă este necesar.

Nodurile principale ale unei rețele *WirelessHART*, care vor îndeplini funcționalitățile de bază specifice oricărui nod din o rețea de tip *mesh*, sunt: managerul de rețea, *Gateway*, punct de acces, *router*, dispozitiv, computer portabil și adaptor. În acest standard, rutarea grafurilor este abordată astfel: un dispozitiv din rețea va trimite un pachet de date cu *id*-ul grafului pe o cale către destinație iar toate celelalte dispozitive în cale vor fi configurate cu informații despre graf și despre vecinii cărora trebuie să le paseze informația.

Pentru ca rutarea grafurilor să se realizeze, trebuie satisfăcute următoarele cerințe legate de tipurile de grafuri menționate:

* graful de distribuție și cel de legătură ascendentă nu vor permite lucrul cu mai puțin de două puncte de acces în rețea, iar fiecare dispozitiv al celor două grafuri va avea cel puțin două căi către *Gateway* (în ambele cazuri, aceste aspecte cresc considerabil șansele ca mesajul să fie transmis în întreaga rețea)
* fiecare dispozitiv al grafului de distribuție va avea cel puțin două noduri părinte de la care va primi informații
* fiecare dispozitiv din graful de legătură ascendentă are două noduri copil prin care să transmită informația spre *Gateway*
* grafurile de legătură descendentă vor avea un singur ciclu direcționat, de lungime 2 și fiecare nod va fi nodul părinte al nodului destinație
* *Gateway*-ul va fi singura sursă din graful de legătură descendentă, iar nodul către care este direcționat graful va fi singurul receptor

Se urmărește o rețea scalabilă, care să poată fi configurată la scară largă în automatizările industriale de mare anvergură. În acest demers, se extinde standardul *WirelessHART* de la câte un graf de legătură descendentă pentru fiecare nod în parte, la o secvență ordonată de astfel de grafuri locale, ce vor fi reutilizate pentru diferite destinații.

În vederea realizării unui program de comunicare se va porni de la două caracteristici: împărțirea traficului de rețea cu toți succesorii acesteia, reducând lățimea de bandă pentru fiecare în parte. Programele de comunicare ale succesorilor sunt construite în așa fel încât, combinația acestora va respecta programul inițial. Cea de-a doua caracteristică este conceptul intervalelor de timp partajate pentru a permite mai multor dispozitive din rețea să comunice concurent cu un același dispozitiv printr-o intrare comună. În construcția programului de comunicare se va aplica politica cea mai rapidă rată de eșantionare este prima și se va folosi o matrice M pentru a se ține evidența utilizării *slot*/canal de rețea.

## Protocol anti-blocaj în conexiunile industriale de senzori wireless

Zonele de blocaj pot fi prevenite prin imobilizarea datelor importante, mapând regiunile acestora, pentru că sunt mult mai importante decât găsirea nodurilor în cauză, mare parte a nodurilor blocate necesitând suprascrierea CSMA (*carrier sense multiple acces*), suplinită de MAC (*medium acces control*) [5] pentru declararea blocării. Protocolul SA-AJCR folosește un cluster de o săritură pentru a descoperi acest fenomen. În momentul în care clusterul conține un nod blocat, acest cluster nu poate face *upload* la date, iar dacă nodul principal al clusterului este blocat, nu poate primi date.

Experimentul din [5] a fost executat în mediul Matlab, unde s-au considerat, pe o arie de 500 m x 500 m, noduri aleatorii drept surse de semnal (adică instrumente industriale), de la care pleacă pachete generate o dată pe secundă, care trebuie să ajungă la un nod sink localizat în mijlocul ariei. Pachetele transmise, dacă depășeau minimul impus de SNR (*Signal-to-Noise-Ratio*) era considerat lipsit de erori iar dacă nu, era scos din considerare. La momente ocazionale de timp, câteva noduri au fost considerate blocate.

În primul rând, pentru a valida eficiența modelului propus pentru distanța radio și pentru a evalua impactul neregularităților radio asupra ratei de livrare a pachetelor, rețeaua de senzori a fost testată la diferite nivele de medii electromagnetice și fără noduri blocate. Se observă că o conexiune cu un număr satisfăcător de noduri, poate să realizeze o rată mare de pachete livrate în condiții bune. Totuși, distanța de comunicare pentru fiecare nod suferă de atenuări grave, odată cu mărirea gradului de neregularitate, până la momentul în care unele noduri nu mai comunică. Chiar dacă rata de încredere este asigurată la prețul distanței de comunicare, se merită să se folosească constrângeri puternice. Dacă numărul de 300 de noduri este depășit, atunci rata de pachete livrate converge pentru nivelele de medii testate.

În al doilea rând, rețeaua a fost testată cu 300 de noduri, la diferite nivele de medii electromagnetice, având și noduri blocate. Factorul major al scăderii ratei de pachete primite a fost existența nodurilor blocate în rețea. Protocolul a separat eficient zonele aflate în blocaj de cele normale pentru a stabili rute auxiliare pentru transmisia de date. Chiar dacă zonele blocate au fost exagerate de către protocol, maparea a fost realizată cu ușurință. Comunicarea în timp real a fost realizată și în ciuda condițiilor nefavorabile.

## Eficiența energetică de rutare pentru comunicațiile sigure, în timp real, în rețelele de senzori industriali wireless

EARQ [6] este un protocol care asigură transmiterea datelor de la noduri senzoriale la noduri *sink*, utilizând două tipuri de mesaje: *beacon* și pachete de date. Mesajele de tip *beacon* sunt trimise de la un nod către altul, din apropiere, cu scopul de a se crea o tabelă de rutare. Această tabelă cuprinde informații despre poziția, costul energetic, energia reziduală, întârzierile și fiabilitatea nodurilor din apropiere. Tabela este actualizată constant, atunci când primește mesaje *beacon* cu date diferite de la nodurile existente în tabelă sau le înregistrează când primește informații de la un nod nou.

Când un nod senzorial găsește drumul cel mai adecvat înspre nodul *sink,* începe să trimită pachete de date către acesta ținând cont de *deadline* și fiabilitate. Acest *deadline* trebuie ales cu foarte mare grijă, luând în calcul mărimea și densitatea rețelei, astfel încât un pachet de date să poată ajunge în timp util la nodul *sink*. Pentru a se ajunge la o fiabilitate cât mai mare, în pachete se reține o valoare, 0 sau 1, care semnifică gradul de verosimilitate între noduri, aceasta putând fi schimbată de la un nod la altul în funcție de datele existente în tabela de rutare.

Drumul de la nodul senzorial la nodul *sink* este construit în 3 etape:

* selectarea nodurilor care sunt capabile să transmită informația în timp către nodul *sink*
* calcularea probabilității ca un nod să fie selectat dintre cele de mai sus, bazat pe informațiile existente în tabela de rutare
* selectarea aleatorie a unui nod în funcție de probabilitate

De asemenea, EARQ alege și o rută alternativă, chiar dacă e mai puțin optimă decât prima, pe care trimite pachete de date, pentru a evita situațiile în care un pachet nu ajunge la destinație. Astfel, acesta alege o rută optimă pentru a trimite pachete de date cât și o rută mai puțin optimă pentru cazurile în care un pachet se pierde pe drum.

# Rezultate și concluzii

Renunțarea la conexiunea a două dispozitive prin intermediul cablajelor este dorită în foarte multe domenii de interes din prezent, însă avantajele aduc cu ele și dezavantaje. Cu multă muncă, aceste dezavantajele pot fi evitate. Cercetarea acestei schimbări a început acum multă vreme și nu contenește nici în prezent, dorindu-se ridicarea siguranței și performanței comunicării în timp real în rețelele *wireless* la nivelul celei cu ajutorul firelor.

În ceea ce privește modalitatea de a utiliza adaptiv codurile de corecție a erorilor, implementarea prin intermediul unui program de simulare a unor evenimente discrete [1] a dovedit îndeplinirea scopului urmărit, fără a impune un consum exagerat de energie a celor două dispozitive ce comunică prin transmiterea repetată a mesajului, neasigurând o rată de succes crescută. Bineînțeles, cercetarea fiind făcută în urmă cu ceva timp, până în zilele noastre cu siguranță s-au descoperit și optimizat lucruri noi privind această temă.

Prin simularea algoritmilor de captură a canalului și control al puterii semnalului în cadrul comunicării concurente, s-a ajuns la concluzia că aceștia ar fi o alternativă favorabilă în protocoalele MAC (protocoale de accesare media). Experimentele autorilor [2] nu demonstrează numai posibilitatea acestei modalități de comunicare într-o rețea *wireless*, ci și faptul că restricțiile de tip *carrier-sense* și RTS/CTS sunt, în majoritatea cazurilor, necesare.

Cadrul de comunicare în timp real pentru rețelele *wireless* senzori-actuatoare prezentat constituie o soluție eficientă pentru raportarea perturbațiilor întâlnite în zonele de referință, având ca scop reducerea traficului de rețea și minimizarea întârzierii de transmitere a datelor între componentele constatatoare și cele ce acționează și iau decizii în privința incidentelor apărute. Felul în care se desfășoară procesul descris de cadrul respectiv permite acționarilor să înceapă o coordonare și o prelucrare timpurie a informațiilor, datorită faptului că datele cu cea mai mare importanță sunt preluate primele, optimizând oferirea unui răspuns. Domeniile în care se poate întâlni sunt variate, precum cel comercial, industrial, științific și militar, fiind utilizate spre exemplu pentru monitorizarea mediului, detectare și întreținere în fabrici mari industriale, supraveghere militară sau chiar în industria aerospațială [3].

Aplicarea particularităților standardului *WirelessHART* va conduce la îmbunătățirea considerabilă a calității automatizărilor industriale realizate cu ajutorul rețelelor *wireless*. Se vor construi, astfel, rețele la scară largă eficiente, de încredere, rapide, care pot răspunde la cerințele stricte din mediul industrial.

Rețelele fără fir se potrivesc cu domeniul industrial, însă este necesară asigurarea stabilității datelor în timp real. S-a discutat despre protocolul SA-AJCR, care are rolul de a se descurca cu un zgomot ambiental înalt și interferențe electromagnetice specifice. Pentru a asigura păstrarea datelor prin transmisie, se limitează artificial distanța de comunicare, protocolul permițând IWSN (*Industrial Wireless Sensor Network*) să fie tolerant la blocări de noduri, prin crearea unor rute auxiliare.

Se pot realiza aplicații de control industriale foarte eficiente dacă se folosesc rețelele de senzori industriali fără fir, pentru control, cu menționarea faptului că acest proces, pentru a nu întâmpina probleme, necesită transmiterea informațiilor în timp util și fără erori. De aceea, EARQ este o alternativă foarte bună, fiind un protocol de rutare pentru comunicații sigure, în timp real, ce echilibrează cu succes fiabilitatea cu un consum redus de energie.

##### Bibliografie

1. M. Elaoud, P. Ramanathan, “Adaptive Use of Error-Correcting Codes of Real-time Communication in Wireless Networks,” *Proceedings. IEEE INFOCOM ’98, the Conference on Computer Comunications. Seventeenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Gateway to the 21st Century (Car. No. 98)*, San Francisco, 1998, pp. 548-555.
2. D. Son, J. Heidemann, B. Krishnamachari, “Towards Concurrent Communication in Wireless Networks,” *USC/ISI Technical Report ISI-TR-648*, July 2007.
3. E. C. H. Ngai, M. R. Lyu, J. Liu, “A Real-Time Communication Framework for Wireless Sensor-Actuator Networks,” *2006 IEEE Aerospace Conference*, 2006, pp. 1-9.
4. S. Han, X. Zhu, A. K. Mok, D. Chen, M. Nixon, “Reliable and Real-Time Communication in Industrial Wireless Mesh Networks,” *2011 17th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*, Chicago, 2011, pp. 3-12.
5. L. Liu, G. Han, S Chan, M. Guizani, “An SNR-Assured Anti-Jamming Routing Protocol for Reliable Communication in Industrial Wireless Sensor Networks,” *IEEE Communications Magazine*, 2018, pp. 23-29.
6. J. Heo, J. Hong, Y. Cho, “EARQ: Energy Aware Routing for Real-Time and Reliable Communication in Wireless Industrial Sensor Networks,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 5, no. 1, FEB. 2009, pp. 3-11.