

În ultimele două decenii o atenție deosebită a fost acordată microsistemelor digitale, a dispozitivelor încorporate (embedded) acestea devenind un adevărat necesar în viața de zi cu zi. Alături de sistemele de calcul de dimensiuni medii și mari, cu grad ridicat de computație, dispozitivele embedded își demonstrează utilitatea în majoritatea domeniilor de activitate deși acestea de multe ori au resurse mai puține decât clasicele sisteme de calcul. Din această categorie apartine a sistemelor încorporate fac parte și rețelele de senzori care au beneficiat de o mai mare atenție în ultimii 10 până la 15 ani. Rețelele de senzori pot fi găsite într-o gamă largă de aplicații precum sisteme de monitorizare a mediului, sisteme de securitate, sisteme de detecție a incendiilor, sisteme robotizate de intervenție în caz de calamități, aplicații militare, platforme robotice.

O rețea de senzori este alcătuită în principal de microsisteme încorporate (noduri), fixe sau mobile, de obicei slabe în resurse hardware, cu alimentare în special limitată, pe baterie, cu capacități senzoriale superioare și de asemenea cu capacitate de comunicare fără fir. Aceste noduri, din punct de vedere hardware, sunt independente dar funcționalitatea acestora nu prezintă importanță decât atunci când acestea funcționează ca un tot unitar cu menirea de a îndeplini o funcție, un rol. Astfel apare necesitatea de a stabili o comunicare fiabilă între aceste noduri pentru a se putea realiza o rețea de senzori.

O atenție deosebită este acordată în ultima perioadă sistemelor timp real în cazul cărora nu doar rezultatul operației este important, dar în egală măsură este important și timpul necesar obținerii rezultatului. Un caz banal ar fi un sistem de detectarea incendiilor. Acesta ar trebui să alarmeze populația în faza incipientă a incendiului, nu după o întârziere considerabilă când orice efort este în zadar. Pentru a se impune acestor cerințe de timp nu doar microsistemele ce funcționează individual ca noduri ale rețelei de senzori trebuie să funcționeze în timp real ci și întreaga rețea să respecte niște cerințe stricte de timp. Pentru acesta este necesar ca o comunicare între nodurile unei rețele de senzori să respecte anumite cerințe de timp și în același timp să-și mențină scalabilitatea, toleranța la defecte și consumul de energie electrică scăzut.

O comunicare la nivelul unei rețele de senzori este realizată prin intermediul unei stive de protocoale ierarhizate pe nivele. Conform multor modele în acest sens aceasta stivă conține protocoale specializate pe accesul la mediu (protocoale MAC), corecția și detecția erorilor, rutarea informației etc.

Protocoalele de acces la mediu sunt protocoalele localizate la baza unei stive de comunicație și sunt cele care influențează cel mai mult comportamentul temporal al întregii comunicații. Aceste protocoale, deși au fost mult timp în atenția cercetătorilor, s-au dezvoltat mai puțin în direcția sistemelor timp real. Majoritatea studiilor sau axat pe reducerea consumului de energie electrică. Acest lucru este într-adevăr esențial într-o rețea de senzori dat fiind faptul că nodurile sunt alimentate de o baterie sau acumulator.

Într-o rețea de senzori cu cerințe de timp real reducerea consumului de energie electrică nu se află pe primele poziții în ordinea priorităților caracteristicilor unui protocol de acces la mediu. În acest caz, al rețelelor de senzori ce funcționează în manieră timp real, protocoalele de acces la mediu trebuie să se concentreze asupra cerințelor de timp spre a oferi o bază de comunicație bine determinată în timp. Majoritatea protocoalelor de acest tip se rezumă doar la garanții de timp soft real-time oferind doar un trafic garantat statistic. Acest lucru constituie una dintre principalele probleme ale acestui domeniu.

De asemenea o alta problemă des întâlnită este aceea că în majoritatea situațiilor cercetătorii își validează și de demonstrează soluția folosind medii de simulare care nu au capacitatea de a aproxima caracteristicile unui mediu de comunicație cu grad mare de instabilitate precum mediul de comunicație fără fir. În plus, se folosesc în multe situații cazuri particulare extrem de restrânse care în realitate nu sunt fezabile.

Mai mult decât atât, ținând cont de faptul că protocoalele de acces la mediu sunt la baza stivei de comunicație, acestea lucrează direct cu modulul radio al sistemului. Acest modul radio are la rândul lui un anumit grad de predictibilitate și introduce o serie de latențe. Întârzierile de timp ce sunt introduse de către modulele radio la nivelul sistemului ce compune un nod al rețelei sunt de cele mai multe ori ignorate, considerând o funcționare ideală a modulului radio. Un protocol de acces la mediu nu poate ignora aceste aspecte.

Prin această lucrare se va acționa asupra protocoalelor de comunicare de nivel MAC (Medium Access Control) în vederea obținerii unor garanții de timp în cadrul comunicării dintre nodurile unei rețele de senzori. Aceste protocoale nu doar că trebuie să asigure anumite cerințe stricte de timp dar trebuie să păstreze scalabilitatea și toleranța la defecte a întregii rețele de senzori. Aceste protocoale precum și protocoalele superioare trebuie să țină cont și de situația când nodurile rețelei sunt mobile (colective robotice). De asemenea, în aceasta lucrare se va acorda o importanță deosebită studiului acestor protocoale în cazuri reale, nu bazându-se doar pe simulări care de cele mai multe ori nu sunt conforme cu realitatea mai ales în acest domeniu al comunicației wireless dintre nodurile unei rețele de senzori.

Capitolul 2 introduce succint cititorul în sisteme timp real prezentându-i diferența între un sistem clasic și un sistem timp real precum și diferența între dezvoltarea aplicațiilor clasice și dezvoltarea aplicațiilor

care să respecte principiile sistemelor în timp real. De asemenea se prezintă și principalele sisteme de operare timp real pentru sisteme embedded. Principalele sisteme de operare prezentate în această secțiune sunt VxWorks, QNX, TinyOS, FreeRTOS din motivul că acestea sunt frecvent folosite în implementările curente de rețele de senzori și sisteme încorporate. De asemenea se pune accent și se prezintă mai pe larg nucleul de operare HARETICK deoarece acest sistem de operare este folosit în cadrul cercetării autorului.

În capitolul 3 se prezintă în mare considerații teoretice despre rețele de senzori wireless. În prima parte a acestui capitol se prezintă noțiuni de bază despre acest tip de rețele precum și despre comunicarea dintre sistemele numerice. o rețea de senzori wireless – WSN (Wireless Sensor Network) - este formată dintr-un număr mare de senzori inteligenți, referiți în continuare ca și noduri, dispuși pe o suprafață în exterior sau în interiorul unei clădiri, cu capacități de comunicare wireless, mobili sau ficși, care prin acțiuni colaborative formează o rețea de senzori cu scopul de a implementa o anumită aplicație ca un tot unitar. O configurație minimală a unui nod este formată dintr-un microcontroller, sursă de alimentare (baterie / acumulator), senzori și interfață de comunicare cu sau fără fir în funcție de tipul rețelei. Legat de comunicarea între sistemele numerice se prezintă modelul OSI și cum se regăsește acest model în comunicarea din cadrul rețelelor de senzori. Se arată de asemenea și importanța acestor rețele de senzori prin prezentarea unor aplicații realizate cu ajutorul rețelelor de senzori wireless. În continuare se pot găsi noțiuni despre protocoalele de rutare a informației în rețelele de senzori. Majoritatea protocoalelor de comunicație în cadrul rețelelor de senzori sunt orientate în primul rând pe reducerea consumului de energie și pe îmbunătățirea rate de transfer între nodurile rețelei și mai puțin pe îndeplinirea unor cerințe stricte de timp. Totuși protocoalele superioare din stiva de comunicație au fost dezvoltate în ultima perioadă și sper direcția operării în timp real. Protocoalele precum cele cu rolul de rutare a informației au primit poate cea mai mare atenție în cercetarea din ultima perioadă. Majoritatea algoritmilor consideră că protocoalele ce le transportă, respectiv protocoalele MAC de nivel inferior nu aduc nici o penalitate de timp și oferă garanții de timp real. În plus validarea tehnicilor și a algoritmilor se face cu ajutorul simulatoarelor ignorându-se puternic situațiile reale. Se consideră în multe cazuri că rețeaua este fixă, nodurile nu sunt mobile și se cunoaște cu exactitate poziția nodurilor. Aceste presupunții reduc semnificativ gradul de aplicabilitate ale rețelelor de senzori. Studiile sunt orientate în mare parte pe reducerea consumului de energie, nodurile unei rețele wireless de senzori sunt alimentate pe baterie.

În capitolul 4 se prezintă principalele protocoale de acces la mediu folosite în acest domeniu cu ridicarea principalelor probleme și impedimente. Se pune accent pe prezentarea mai pe larg a celei mai răspândite stive de protocoale ce se folosește în rețelele de senzori și anume stiva ZigBee. Protocoalele de nivel MAC sunt în principal protocoale de nivel 2 din modelul de referință OSI specializate pe accesul la mediul de comunicație. Principalul rol al acestuia este de a asigura o legătură directă, punct la punct între 2 noduri ale rețelei, o conexiune stabilă de acest tip fiind vitală pentru nivelele superioare, cum ar fi spre exemplu protocoalele de rutare [74]. În funcție de modul de acces la mediu protocoalele MAC se pot clasifica în: protocoale bazate pe coliziuni și protocoale bazate pe planificarea transmisiilor. Protocoalele din prima categorie sunt în general protocoale ce se bazează pe scheme de acces de tip CSMA. Aceste protocoale, datorită impredictibilității apărute în urma coliziunilor nu sunt adaptabile pentru sisteme timp real. În partea opusă se află protocoalele ce sunt orientate pe planificarea transmisiilor iar din această categorie fac parte protocoalele bazate pe tehnici cum ar fi FDMA și TDMA sub diferite forme. Acestea din urmă sunt în general protocoalele cele mai ușor implementabile în sisteme timp real. De asemenea în acest capitol se prezintă și protocolul de acces la mediu folosit de această stivă de protocoale și anume standardul IEEE 802.15.4. Se poate constata faptul că majoritatea protocoalelor de tip MAC se orientează mai mult asupra consumului de energie decât asupra garanțiilor de timp real. O problemă intens întâlnită este aceea că în marea majoritate a situațiilor cercetătorii își validează soluția folosind simulatoare iar în cazul unor protocoale de nivel jos precum cele de acces la mediu, simulatoarele, indiferent de complexitate, nu au capacitatea de a reda un mediu real de comunicație. Mai mult decât atât, penalitățile de timp introduse de modulul radio în sine sunt de cele mai multe ori ignorate considerând o funcționare ideală a modulului radio. În multe situații se consideră chiar și cazuri particulare extrem de restrânse care nu pot fi acceptate în realitate (rețele în care poziția nodurile se cunoaște cu exactitate, adăugarea unui modul GPS fiecărui nod pentru localizare, comunicarea în medii lipsite de perturbații, măsurători doar în cazuri favorabile, etc.).

Majoritatea implementărilor actuale de rețele de senzori folosesc ca și pachet de protocoale de comunicație stiva ZigBee având ca protocol de acces la mediu standardul IEEE 802.15.4. Aceasta deși oferă o soluție integrată și funcțională pentru organizarea comunicației la nivelul unei rețele de senzori nu este orientată pe aplicații critice în timp real. Mai mult, protocolul de acces la mediu folosit de asemenea nu este gândit pentru acest tip de aplicații.

În capitolul 5 se prezintă o analiză experimentală a protocolului de acces la mediu IEEE 802.15.4 și a stivei ZigBee din perspectiva interoperabilității și a operației în timp real. Practic se folosesc module radio de la Digi International de tip XBee ce implementează stiva ZigBee, a căror comunicație este capturată și analizată folosind module radio ce au implementat în hardware doar protocolul de acces la mediu IEEE 802.15.4. Analiza a constatat în capturarea comunicației și analiza pachetelor de date printr-un număr mare de experimente. S-a constatat că modul de împachetare al stivei ZigBee aduce o serie de dezavantaje în contextul comunicării într-o rețea de senzori wireless prin faptul că împachetarea introduce un număr de 33 octeți în plus doar la nivelul stivei ZigBee fără a considera protocolul de acces la mediu. Problema în acest caz este în primul rând creșterea pachetului de date pe un mediu extrem de instabil și supus zgomotelor și perturbațiilor, cum este mediul wireless ceea ce poate duce la o scădere considerabilă a ratei de succes de transmisie a unui pachet de la sursă la destinație. A doua problemă introdusă de modul de împachetare a datelor apare în momentul în care se dorește să se folosească module wireless mai slabe în resurse. De obicei, se tinde ca o rețea wireless de senzori să fie compusă dintr-un număr de sute sau chiar mii de noduri și este de dorit să se folosească module radio cu un preț relativ scăzut. Acesta au multe limitări în ceea ce privește dimensiunea maximă a pachetului de date ce este suportată. Deci, aplicarea stivei ZigBee într-o astfel de situație devine greoaie dacă nu chiar imposibil.

Capitolul 6 începe cu prezentarea unui model care definește principalele componente de timp ce compun întârzierea în transferul informației între nodurile unei rețele de senzori. Se prezintă practic 3 modulele de timp. Primul model de timp descrie componentele de timp ce fac parte din întârzierea ce apare în cazul transferului unui pachet de date de la un nod transmițător către un nod receptor. Acest model descrie amănunțit componentele de timp în sensul că se arată și modul de identificare a acestora și parametrii de care fiecare componentă de timp depinde. Al doilea model prezintă un model de timp ce caracterizează întârzierea ce apare la nivelul sistemului de operare în momentul în care nodul efectuează o transmisie. În mod similar un al treilea model de timp prezintă întârzierea ce apare la nivelul sistemului de operare al nodului receptor în momentul recepției unui pachet de date. Tot în acest capitol se prezintă și un cadru de măsurare a acestor componente de timp. Cadrul de măsurare este compus dintr-o componentă hardware și o componentă software ce preia datele măsurate pe un calculator PC și efectuează calculele necesare. Folosind acest cadru de măsurare se identifică experimental componente de timp introduse cu ajutorul a două tipuri de module radio. Cu ajutorul unui număr mare de măsurători se trasează caracteristicile și comportamentul temporal a fiecărei componente de timp. În acest mod se face o analiză a predictibilității fiecărei componente de timp. Cu ajutorul acestui model de timp un dezvoltator de aplicații folosind module radio și integrându-se într-un sistem în timp real, poate identifica, calcula și aproxima componentele de timp a întârzierilor introduse de comunicația wireless la nivel de acces la mediu. Mai mult decât atât se pot folosi ecuațiile definite anterior pentru a se putea calcula și aproxima penalitățile de timp introduse de modulul radio la nivelul sistemului de operare sau a firmware-ului ce rulează pe dispozitivul respectiv, în cazul de față nodurile unei rețele.

În prima parte a capitolului 7 se prezintă o schemă de acces la mediu, bazată pe schema de acces TDMA, denumită GTDMA și fiind una din principalele contribuții prezentate în această lucrare. Această schemă de acces la mediu generalizează tehnicile de slot-stealing prezentate în literatură și oferă o soluție omogenă de a utiliza acest tip de politică de acces atât în mediul de comunicație cu fir cât și în aplicațiile cu comunicație fără fir. Se prezintă de asemenea și rezultate experimentale obținute în urma simulării acestei politici. În ultima parte a acestui capitol se prezintă protocolul de acces GTDMA-MAC, bazat pe schema de acces GTDMA, ce reprezintă un model de protocol în timp real.

Schema de acces nou introdusă se bazează pe politica de acces TDMA. Aceasta prezintă două mari dezavantaje: necesitatea sincronizării ceasurilor interne ale nodurilor rețelei și utilizarea prețară a canalului de comunicație. Slaba utilizare a canalului apare în situația în care unele noduri ale rețelei nu doresc acces la canalul de comunicație și astfel slotul lor de timp asignat rămâne nefolosit. În același context există în rețea și noduri care au acumulat multe date ce trebuie transmise mai departe având astfel nevoie de multe sloturi de timp pentru a-și încheia întregul transfer de date. Fiecare nod având de obicei un singur slot asignat într-un cadrul TDMA, în cazul nodurilor cu cerințe mari de comunicație datele vor fi transmise după multe iterații ale cadrului TDMA. Astfel unele noduri au nevoie mare de sloturi de timp pentru a transmite un volum mare de date pe când altele lasă sloturile de timp nefolosite. În această situație apare utilizarea slabă a canalului de comunicație.

Pentru rezolvarea acestei probleme se propune o schemă de comunicație bazată pe TDMA care îmbunătățește utilizarea canalelor radio. Astfel sloturile de timp nefolosite de către anumite noduri sunt preluate după anumite reguli de alte noduri ale rețelei ce au nevoie de a folosi mai multe sloturi de timp pentru a transfera un volum mare de date. Această îmbunătățire nu afectează predictibilitatea oferită

de schema TDMA clasică. Schema nou introdusă, Greedy TDMA, este o schemă de comunicație cu reguli generale ce poate fi aplicată pe orice mediu de comunicație. Politica nou introdusă este validată prin medii de simulare și se arată cum aceasta este superioară clasicei scheme TDMA în termeni de utilizare a mediului de comunicație.

Într-un mediu de comunicație cu fir, aplicarea acestei scheme nu prezintă probleme majore.

Aplicarea schemei de comunicație Greedy TDMA în mediul wireless presupune adăugarea unor mecanisme menite să adapteze schema de comunicație cerințelor canalului de comunicație. Se propune astfel protocolul de acces la mediu GTDMA-MAC care definește atât algoritmul de comunicație cât și împachetarea datelor. Prin împachetarea datelor protocolul nu introduce multă informație redundantă pe lângă datele utile fiind astfel superior din acest punct de vedere standardului IEEE 802.15.4. De asemenea menține anumite mecanisme definite de standard care pot fi folosite cu succes într-un mediu timp real.

Un alt aspect important de menționat este acela că protocolul GTDMA-MAC fiind bazat pe o schemă ce are la bază politica TDMA nu mai are nevoie de operațiuni adiționale de acces la mediul de comunicație, cum este operațiunea CCA descrisă în secțiunile anterioare.

Principalele obiective propuse pentru activitatea de cercetare doctorală și principalele contribuții sunt următoarele:

[O1]. *Efectuarea unui studiu amănunțit al problemelor ce apar pentru a realiza un model de protocol MAC de comunicare în timp real. Acest studiu presupune o amplă documentare în legătură cu protocoalele de comunicare existente și stabilirea limitărilor acestora în contextul de timp real.*

Îndeplinirea acestui obiectiv împreună cu sub-obiectivele sale este evidențiată de următoarele contribuții:

- Model temporal pentru comunicația wireless pentru a analiza penalitățile de timp introduse de modulele radio precum și pentru a analiza comportamentul temporal al acestora
- Cadru de măsurare a parametrilor de timp ce compun întârzierea totală în cadrul transmisiei și recepției datelor între modulele radio
- Noduri ale unei rețele de senzori folosind mai multe module radio existente pe piață
- Analiză experimentale a comportamentului temporal a unor module radio existente pe piață
- Identificarea componentelor de timp ce afectează predictibilitatea temporală a comunicației

Aceste contribuții s-au materializat într-o publicație la o conferință indexată BDI și printr-un articol trimis spre review la un jurnat indexat ISI. De asemenea, acest obiectiv propus a fost îndeplinit și prin realizarea capitolelor teoretice 2, 3 și 4 a acestei lucrări.

[O2]. *Realizarea unui protocol de timp MAC care să fie orientat atât pe menținerea unui consum redus de energie electrică la nivelul unui nod cât și la nivelul întregii rețele, cu facilități de comunicare în timp real.*

Îndeplinirea acestui obiectiv este evidențiată de următoarele contribuții:

- Realizarea unei scheme de comunicație bazată pe schema TDMA ce îmbunătățește principalul dezavantaj al TDMA: slaba ocupare a mediului de comunicație
- Simulator în mediu discret pentru a valida și evalua experimental schema de acces Greedy TDMA propusă
- Adaptarea schemei de acces Greedy TDMA pentru comunicația wireless în cadrul unei rețele de senzori rezultând protocolul de acces la mediu GTDMA-MAC

Aceste contribuții s-au materializat într-o publicație la o conferință indexată ISI.

[O3]. *Realizarea practică a unui dispozitiv/modul/sistem de comunicare în timp real care să ofere facilități de comunicare hard real time, destinat amplasării acestuia pe nodurile unei rețele de senzori.*

Acest obiectiv s-a îndeplinit prin următoarele contribuții ce s-au materializat într-o publicație la o conferință indexată BDI și printr-un articol trimis spre review la un jurnat indexat ISI:

- Model temporal pentru comunicația wireless pentru a analiza penalitățile de timp introduse de modulele radio precum și pentru a analiza comportamentul temporal al acestora
- Noduri ale unei rețele de senzori folosind mai multe module radio existente pe piață
- Analiză experimentale a comportamentului temporal a unor module radio existente pe piață

Aceste contribuții au dus la îndeplinirea obiectivelor propuse pentru activitatea de cercetare. Pe lângă acestea, în plus, s-a mai realizat și o analiză experimentală a celei mai utilizate stive de protocoale pentru rețelele de senzori, și anume stivă ZigBee și s-a identificat și experimental principalele probleme ce fac ca această stivă de comunicație să nu poată fi folosită într-un mediu timp real. Această analiză s-a materializat printr-o publicație la o conferință indexată ISI.