

REȚELE INDUSTRIALE



13.09.2009

Proiect Rețele Interconectate de Calculatoare

Rețele Industriale. Protocoale.
Controller Area Network(CAN).
Local Interconnect Network(LIN)

MOCANU Răzvan
AN VI, MASTER ISC

INTRODUCERE

SCURTĂ ISTORIE A AUTOMATIZĂRII ȘI REȚELELOR INDUSTRIALE

În prima parte a secolului al XX-lea sistemele de control al procesului și cele de producție erau construite în principal din dispozitive analogice și erau bazate pe tehnologia mecanică. După această perioadă au fost introduse tehnologiile de control pneumatic și de putere hidraulică. Prima dintre acestea a permis comandarea și controlarea sistemelor aflate la distanță de către un sistem central. Aceste tehnologii sunt în continuare folosite la scară largă.[1][3]

La începutul anilor '60, calculatorul digital a fost pentru prima dată folosit drept un controler digital. Termenul de *control digital direct* (DCC – *direct digital control*) era folosit pentru indicarea importanței implicării calculatorului în procesul de control. În această perioadă folosirea unui minicalculator pentru soluționarea problemelor de control nu era o variantă ieftină. În anul 1968, compania Modicon a inventat conceptul de automat programabil (PLC – *programmable logic controller*) – o singură unitate având ca scopuri acoperirea unei arii largi de cerințe și reducerea costurilor.

Odată cu răspândirea calculatoarelor digitale și a tehnologiilor asociate, rețelele industriale de comunicație au început să fie concepute cu sau convertite la transmisie digitală. Rețele particulare de comunicație digitală pentru uz industrial au apărut în anii '60 odată ce calculatoarele sistemelor de automatizare au fost conectate pentru prima dată.

Folosirea rețelor locale LAN (*local area network*) pentru interconectarea calculatoarelor și automatelor în cadrul unui sistem industrial de automatizare a devenit populară începând cu anul 1980. Beneficiul constând în comunicația de capacitate mare cu cost scăzut oferit de rețelele LAN a ajutat la realizarea sistemelor distribuite, precum și a multor servicii de automatizare. Sistemele industriale de automatizare au de obicei arhitecturi deschise distribuite și comunică prin intermediul rețelor digitale.

Este un lucru comun acum pentru utilizatori conectați la o rețea locală să comunice cu calculatoare sau automate aflate în alte rețele locale prin intermediul unor rețele mari WAN (*wide area network*).

Creșterea numărului de sisteme și dispozitive de automatizare, precum și răspândirea acestora, au dus la necesitatea dezvoltării de standarde care să facă posibilă interconectarea mai multor dispozitive automate diferite într-un mod standard. Eforturi considerabile de standardizare internațională au fost făcute în zona rețelor locale. Standardele OSI asigură o comunicație sigură pentru o pereche de dispozitive de automatizare, indiferent de producătorul acestora.

Rețelele industriale sunt folosite într-un număr mare de aplicații de producție. În multe dintre aceste aplicații, tipurile de dispozitive și performanța cerută determină tipul de rețea. Drept

exemplu putem considera două dispozitive: un senzor de proximitate de pe o curea de transmisie și o valvă de control folosită într-o rafinărie de petrol. Senzorul de proximitate are o singură funcție – transmiterea unui bit on/off care indică prezența unui obiect. Acest semnal poate fi transmis în câțiva biți. Totodată, informația de autodiagnosticare primită de la senzor se rezumă la un indicator de activ/inactiv care poate fi codificată și în acest caz cu puțini biți. În cazul celălalt al valvei de control, situația este mai complicată: funcțiile îndeplinite sunt complexe, iar parametrii de control sunt critici, mai ales într-un mediu cum e cel al rafinăriilor. Erori pot duce la situații periculoase și costuri suplimentare nedorite. Este evident că cele două dispozitive au cerințe diferite de rețea. Așadar, tipuri diferite de rețele industriale trebuie să acopere cerințe diferite. Selectarea tipului de rețea corect pentru cerințele specifice ale unei aplicații este de importanță majoră.

Majoritatea rețelelor industriale transferă datele serial. Transferul serial are avantajul că necesită un număr redus de fire pentru a transfera date între dispozitive. Cu mai puține fire se poate transmite informație pe distanțe mai mari. Deoarece rețelele industriale conectează mai multe dispozitive pe aceeași linie, nu este o activitate dificilă adăugarea unui nou dispozitiv la sistemele existente.

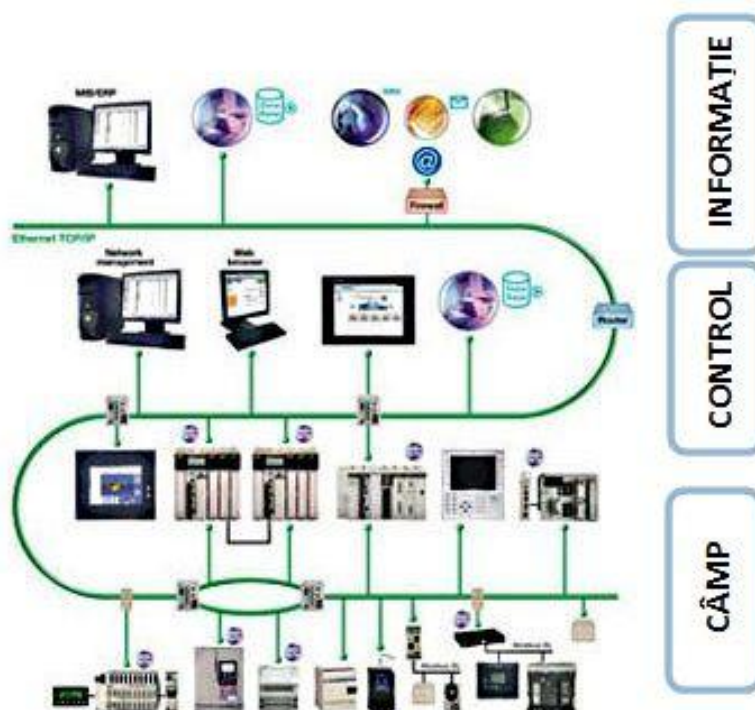
Rețelele au nevoie de un set de reguli – un protocol de comunicație – pentru a determina modul în care informația este transmisă între dispozitivele, calculatoarele, controlerele ș.a. conectate la rețea. Cu ajutorul protocoalelor de comunicație îmbunătățite sunt posibile reducerea timpului de transfer, asigurarea unei protecții mai bune a datelor și garantarea sincronizării și un a unui răspuns determinist în unele aplicații. Rețelele industriale asigură de asemenea un transfer fără erori și securizat de date între nodurile rețelei.

NIVELURI IERARHICE ALE REȚELOR INDUSTRIALE DE COMUNICAȚIE

Sistemele industriale de automatizare pot fi complexe fiind astfel necesară o structurare pe mai multe niveluri ierarhice. Fiecare nivel ierarhic are asociat un nivel de comunicație care are diferite cerințe în ceea ce privește rețeaua de comunicație. Figura 1-1 arată un exemplu de ierarhie a unui sistem industrial de automatizare.[1][2]

Rețelele industriale pot fi clasificate în diferite categorii în funcție de funcționalitate: rețele la nivel de câmp (magistrale pentru senzori, actuatori sau dispozitive), rețele la nivel de control (magistrala de control) și rețele la nivel de informație.

Se folosesc în principal magistrale pentru senzori și actuatori pentru a conecta dispozitive simple, discrete cu inteligență redusă, cum ar fi întrerupătoare, valve etc. cu controlere sau calculatoare. Magistralele pentru senzori cum ar fi ASI sau CAN sunt construite în așa fel încât fluxul de informație e redus la câțiva biți iar costul per nod este un factor important.



FIGURĂ 1-1. NIVELURI IERARHICE ALE REȚELOR INDUSTRIALE

Nivelul de câmp

Nivelul de la baza ierarhiei de automatizare este nivelul de câmp, care include dispozitivele de câmp cum ar fi actuatori și senzori. Dispozitivele elementare de câmp sunt uneori clasificate ca făcând parte din subnivelul de elemente. Rolul dispozitivelor din nivelul de câmp este să transmită date între produsul efectiv și procesul tehnic. Datele pot să fie în format binar sau analogic, sau ambele. Valorile măsurate pot să fie disponibile pentru perioade de timp scurte sau lungi.

Pentru comunicația la nivel de câmp au fost folosite de mult timp cabluri paralele, cu mai multe fire, precum și interfețe seriale. Cele mai folosite protocoale sunt standardele de comunicație RS232C, RS422 și RS485 pentru comunicația serială și standardul IEEE488 pentru comunicația paralelă.

Rețelele industriale la nivel de câmp reprezintă o categorie largă, cu parametri cum ar fi mărimea mesajelor și timpul de răspuns fiind printre cei mai importanți. În cele mai multe cazuri aceste rețele conectează dispozitive inteligente ce lucrează în rețele distribuite, constrânse de timp. Oferă capacități îmbunătățite de diagnosticare și configurare în schimbul unor cerințe de putere și preț ridicate. Rețele des întâlnite în clasele de magistrale de câmp (*fieldbus*) și cele de dispozitive sunt CANOpen, DeviceNet, FOUNDATION Fieldbus, Interbus-S, LonWorks, Profibus-DP și SDS.

Magistralele de câmp sunt folosite în mod curent pentru transferul de informație la nivelul de câmp. Aplicațiile din controlerele de la nivelul de câmp necesită funcții de transport ciclice, ce transmit informația sursă la intervale regulate, din cauza constrângerilor de timp ce trebuie

observat în mod strict în întreg procesul de automatizare. Reprezentarea valorilor măsurate la nivel de biți trebuie să fie cât mai scurtă posibil pentru a reduce timpul de transfer al datelor pe magistrală.

Nivelul de control

La nivelul de control, fluxul de informație este alcătuit în principal din încărcarea programelor, a parametrilor și a datelor. În procesele cu perioade scurte de inactivitate acestea sunt făcute din timpul procesului de producție. În controlerele de dimensiuni mici, e posibil să fie necesară încărcarea subrutinelor pe perioadă unui singur ciclu de producție. Acest lucru determină constrângeri de timp. Nivelul de control poate fi divizat în două subniveluri: subnivelul de celulă și cel de arie.

Subnivelul de celulă

Pentru operațiile de la acest nivel, sincronizarea mașinilor și rezolvarea evenimentelor pot necesita un timp de răspuns rapid. Aceste cerințe de timp-real nu sunt compatibile cu duratele mari de timp necesare transferului de programe pentru aplicație, ceea ce duce la necesitatea existenței unui procedeu adaptabil de segmentare a mesajelor.

Rețelele locale sunt folosite la acest subnivel pentru comunicație. Multe companii și-au dezvoltat rețele proprii pentru subnivelul de celulă al unui proces de automatizare. Ethernet împreună cu TCP/IP au fost alese drept standardul *de-facto* pentru acest nivel, deși acestea nu pot acoperi cerințele de comunicație în timp-real.

Eforturi considerabile s-au depus pentru standardizarea rețelei de comunicație de la acest nivel. Standarde existente bazate pe arhitectura OSI, rețeaua Mini-MAP dezvoltată în anii '80 precum și o serie de magistrale de câmp sunt folosite pentru a realiza o comunicație standard între dispozitive de la diferiți producători.

Subnivelul de arie

Subnivelul de arie e constituit din celule agregate în grupuri. Funcțiile celulelor sunt orientate la nivel de aplicație. La nivelul de arie, controlerele și operatorii de proces au funcții orientate la un nivel mai înalt, cum ar fi stabilirea obiectivelor de producție, pornirea și oprirea mașinilor sau activități de urgență.

Rețelele de la nivelul de control sunt folosite pentru realizarea rețelelor *peer-to-peer* între controlere cum ar fi automate programabile (PLC), sisteme distribuite de control (DCS – *distributed control system*) și sisteme de calculatoare pentru interfețe om-mașină (HMI – *human-machine interface*) sau arhivare. Pentru magistralele de control sunt folosite ControlNet, PROFIBUS-FMS sau Ethernet cu TCP/IP pentru conectarea cu dispozitivele de control și calculatoarele de la niveluri superioare.

Nivelul de informație

Nivelul de informație este nivelul de vârf pentru o fabrică sau un sistem industrial de automatizare. La acest nivel se asimilează datele de la nivelurile de arie și se controlează întregul sistem de automatizare. La acest nivel sunt prezente rețele mari (WAN) pentru schimbul de

informație la nivel de management. Se pot folosi rețele Ethernet pe post de *gateway*-uri pentru conexiunea cu alte rețele industriale.

REȚELE INDUSTRIALE CONTEMPORANE[2]

Sistemele moderne de control necesită comunicații digitale deschise. Rețelele industriale înlocuiesc firele convenționale punct-la-punct specifice RS-232 și RS-485 dintre dispozitivele existente de măsură și sistemele de automatizare cu o rețea bidirecțională complet digitală. Tehnologia rețelelor industriale oferă o serie de îmbunătățiri majore față de sistemele existente. Cu ajutorul rețelelor industriale standardizate, se pot alege instrumentul și sistemul care se aplică cel mai bine la cerințele proiectului fără a ține de cont de producătorul sistemului de control. Alte beneficii:

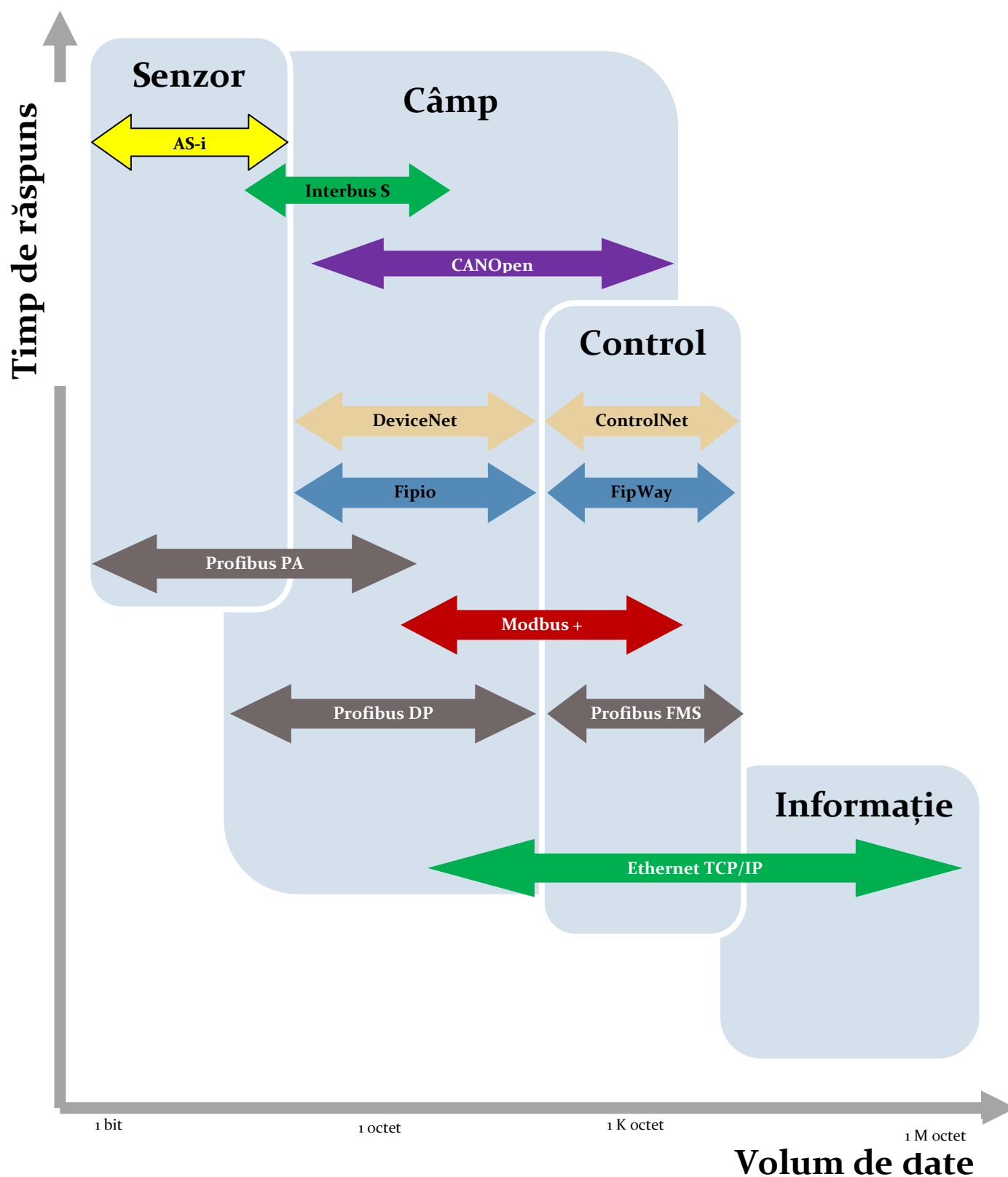
- Număr redus de cabluri – rezultă costuri reduse pentru instalare și mentenanță
- Dispozitive inteligente – performanță crescută și funcționalitate extinsă cum ar fi diagnosticare avansată
- Control distribuit – dispozitivele inteligente oferă flexibilitatea aplicării controlului central sau distribuit pentru performanțe și siguranță crescute

Nivel	Cerințe și constrângeri	Volum de date	Timp de răspuns	Distanță
Informație	• Schimb de date. • Securitatea calculatoarelor. • Standarde comune pentru pachetele software.	Fișiere Mb	1 min	Întreaga lume
Control	• Sincronizarea echipamentelor PLC în modul client/server cu unelte de control(HMI, supervizare). • Performanțe real-time.	Date Kb	50-500 ms	2-40 Km
Câmp	• Arhitectură distribuită. • Transparență.	Data Kb	5-100 ms (ciclu PLC)	10 m – 1 Km
Senzori	• Simplificarea cablajelor pentru sursa de putere, senzori și actuatori • Costuri optimizate de cablaj	Date Biți		1-100 m

TABEL 1-1. CERINȚE ȘI CONSTRÂNGERI DE COMUNICAȚIE

Pentru poziționarea rețelelor principale în funcție de cerințele de nivel, un mod eficient de realiza acest lucru este să urmărim cerințele de volum de informație și timp de răspuns. Un

grafic cu principalele rețele industriale grupate după aceste două criterii este prezentat în figura 1-2.[2]



CAN

CONTROLLER AREA NETWORK

INTRODUCERE

Istoria CAN începe acum mai bine de 20 de ani. La începutul anilor '80 un grup de ingineri de la Bosch GmbH căutau un sistem de magistrală serială adecvat pentru folosirea în autovehicule cu pasageri. Cele mai populare soluții adoptate la acea vreme au fost considerate neadecvate pentru cerințele majorității aplicațiilor din industria auto. Sistemul de magistrală trebuia, de fapt, să prezinte un set nou de funcționalități și trăsături care cu greu puteau fi găsite în arhitecturile existente de magistrale de câmp. Proiectarea noii propuneri a implicat de asemenea câțiva parteneri academici și a avut sprijinul Intel.[4]

Noul protocol de comunicație a fost prezentat oficial în 1986 cu numele *Automotive Serial Controller Area Network* cu prilejul congresului Societății Inginerilor Auto. Avea la bază o schemă multimaster de acces la mediul partajat ce se aseamăna cu binecunoscuta abordare CSMA(*carrier-sense multiple access*). Particularitatea introdusă de CAN însă era un nou mecanism distribuit nedistructiv de rezolvare a conflictelor de pe magistrală prin intermediul unor priorități atribuite implicit mesajelor aflate în colizie.

În anii imediat următori, Intel și Philips au început să producă chip-uri controler pentru CAN, dar urmând două filozofii diferite. Soluția Intel(referită ca FullCAN în literatura de specialitate) necesita mai puțină putere de procesare din partea echipamentului gazdă, deoarece majoritatea funcțiilor de comunicație și management al rețelei erau executate direct de controlerul de rețea. În schimb, soluția Philips(BasicCAN) era mai simplă dar impunea o încărcare mai mare pe procesorul folosit pentru interfațarea cu controlerul CAN. Încă de la mijlocul anilor '90 mai mult de 15 companii producătoare de semiconductoare, incluzând Siemens, Motorola și NEC, produc și livrează milioane de chip-uri CAN în principal către producătorii auto cum ar fi Mercedes-Benz, Volvo, Saab, Volkswagen, BMW, Renault și Fiat.

Specificația Bosch(versiunea CAN 2.0) a fost trimisă pentru standardizare internațională la începutul anilor '90. Propunerea a fost acceptată și publicată drept ISO 11898 la sfârșitul anului 1993 și conținea descrierea protocolului de acces la rețea și arhitectura nivelului fizic. În 1995 un addendum la ISO 11898 a fost aprobat, care descria formatul extins al identificatorilor de mesaj. Specificația CAN este în momentul de față în proces de revizuire și a fost împărțită în patru părți separate: ISO 11898-1(*Data Link Layer and Physical Signalling*), ISO 11898-2(*High Speed Medium Access Unit*) și ISO 11898-4(*Time-Triggered Communication*) au fost deja aprobate ca standarde internaționale, în timp ce ISO 11898-3(*Low-Speed, Fault-Tolerant, Medium Dependent Interface*) a atins statusul stabil și se află în procesul de finalizare.

Deși inițial conceput pentru aplicații auto, la începutul anilor 1990 CAN a început să fie adoptat și pentru alte scenarii. Documentele standardizate ofereau specificații satisfăcătoare de detaliate pentru nivelurile de comunicație inferioare dar nu ofereau ghidaj sau recomandări pentru partea

superioară a stivei de protocoale OSI, în general, și pentru nivelul de aplicație, în particular. Acesta este motivul pentru care aplicațiile inițiale ale CAN din afara scenariilor auto (mașini textile, sisteme medicale, ș.a.m.d.) au adoptat soluții monolitice *ad-hoc*. Grupul de utilizatori ai CAN în Automatizare (*CAN in Automation – CiA*) – fondat în 1992 – s-a ocupat inițial cu specificația pentru nivel de aplicație CAN standard. Efortul lor a dus la dezvoltarea specificației cu aplicații generale *CAL* (*CAN Application Layer – Nivelul de Aplicație CAN*). *CAL* era intenționat să umple spațiul liber dintre procesele de aplicație distribuite și suportul de comunicație de la baza acestora, dar în practică nu a avut succes, principalul motiv fiind independența față de aplicații a *CAL* și astfel fiecare utilizator fiind nevoit să-și dezvolte un profil convenabil bazat pe *CAL* pentru aplicația specifică nevoilor sale.

În aceeași perioadă, Allen-Bradley și Honeywell au început să lucreze la un proiect de control distribuit bazat pe CAN. Deși proiectul a fost abandonat ulterior, Allen-Bradley și Honeywell și-au continuat lucrul separat și s-au concentrat pe nivelurile superioare de protocoale. Rezultatele acestor activități au fost soluțiile *DeviceNet* de la Allen-Bradley și *Smart Distributed System (SDS)* de la Honeywell. *SDS* a rămas o soluție internă a Honeywell Microswitch, pe când *DeviceNet* a fost adoptat la scară largă devenind un competitor serios pentru soluții răspândite precum *PROFIBUS-DP* și *INTERBUS*.

În afară de *DeviceNet* și *SDS*, o serie de alte inițiative importante s-au concentrat pe CAN și scenariile sale de aplicare. *CANOpen* a fost conceput în cadrul unui proiect condus iarși de Bosch GmbH. Scopul *CANOpen* era de a defini un profil bazat pe *CAL*, care să suporte comunicația înăuntrul celulelor de producție. Specificațiile originale *CANOpen* au fost finisate de *CiA* și lansate în anul 1995. Ulterior, *CANOpen* cât și *DeviceNet* au devenit standarde europene și sunt acum folosite la scară largă în două arii diferite: automatizare și control distribuit.

PROTOCOLUL CAN

Arhitectura protocolului CAN este structurată conform abordarea pe niveluri a modelului ISO/OSI. Totuși, precum majoritatea rețelelor existente concepute pentru a fi folosite la nivelul de câmp în medii de producție automatizată, doar o parte din totalul nivelurilor au fost considerate pentru stiva de protocoale. Acest lucru a fost ales pentru a face implementările mai simple, mai ieftine și mai eficiente.[4]

Specificațiile ISO 11898-1 și ISO 11898-2, în particular, conțin doar nivelurile *fizic* și *de legătura de date*, după cum este arătat în fig. 1-3. Nivelul fizic se ocupă de transmisia efectivă a datelor peste suportul de comunicație și abordează aspectele mecanice, electrice și funcționale ale protocolului. Sincronizarea biților aparține acestui nivel.

Nivelul de legătură de date este separat în două subniveluri: *nivelul de control al accesului la mediu* (*MAC – medium access control*) și *nivelul de control logic al legăturii* (*LLC – logical link control*). Scopul subnivelului *MAC* este să dirijeze accesul la suportul partajat de transmisie prin furnizarea unui mecanism orientat către coordonarea utilizării magistralei, pentru a evita coliziuni netratabile. Funcțiile subnivelului *MAC* includ codarea și decodarea cadrelor, detectarea și semnalizarea erorilor, limitarea defectelor. Subnivelul *LLC* oferă utilizatorului

(programele de aplicație care rulează la nivelurile superioare) o interfață corespunzătoare, care e caracterizată de un set bine definit de servicii de comunicație, împreună cu abilitatea de a decide dacă un mesaj care vine e relevant pentru nod.

Specificația CAN este foarte flexibilă în ceea ce privește atât implementarea subnivelului LLC cât și alegerea suportului fizic de transmisie, dar nu permite nicio modificare a comportamentului subnivelului MAC.

După cum am menționat mai devreme, spre deosebire de majoritatea rețelelor de magistrale de câmp, specificația CAN nu include niciun nivel de aplicație nativ. Totuși, o serie de astfel de protocoale bazate pe CAN există și pot fi folosite pentru a simplifica proiectarea și implementarea sistemelor CAN complexe.

Nivelul fizic

Trăsăturile nivelului fizic CAN care sunt valide pentru orice sistem, cum ar fi cele legate de semnalizarea fizică, sunt descrise în ISO 11898-1. Unitățile de acces la mediu (transceiver) sunt definite în două documente separate: ISO 11898-2 și ISO 11898-3, pentru comunicații la viteze mari și respectiv mici. Definiția interfeței cu mediul (conectori) este de obicei descrisă în alte documente.

Topologia rețelei

Rețelele CAN sunt bazate pe o topologie de magistrală partajată. Magistralele trebuie terminate la fiecare capăt cu rezistori (impedanța nominală recomandată este de 20Ω) pentru suprimarea reflecțiilor semnalelor. Din același motiv, documentele standard menționează că topologia unei rețele CAN trebuie să fie cât mai apropiată de o singură linie.

Mai multe feluri de medii de transmisie pot fi folosite:

- Magistrală bifilară, care permite transmisii diferențiale ale semnalelor și asigură comunicații sigure. În acest caz, perechi de fire torsadate și ecranate (*shielded twisted pair – STP*) pot fi folosite pentru îmbunătățirea imunității la interferențe electromagnetice.
- Magistrală monofilară, o soluție mai simplă și mai ieftină ce prezintă imunitate scăzută la interferențe și este în principal potrivită pentru folosirea în aplicații din industria automobilelor.
- Mediu de transmisie optic, care asigură o imunitate totală la zgomotul electromagnetic și poate de asemenea fi folosit în medii riscante. Fibra optică este de obicei folosită pentru interconectarea diferitelor subrețele CAN. Acest lucru înlesnește conectarea instalațiilor care acoperă o arie extinsă.

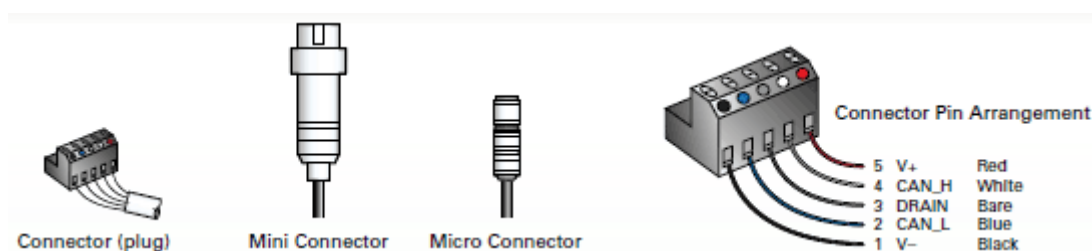
Mai multe rate de transmisie sunt disponibile pentru rețea, cea mai folosită fiind în gama 50Kb/s – 1Mbit/s. Extinderea maximă a unei rețele CAN depinde în mod direct de rata de transmisie. Relația exactă dintre aceste două cantități implică parametri cum ar fi întârzierile introduse de transceiver-e și opto-cuploare. În general, produsul matematic dintre lungimea magistralei și rata de transmisie trebuie să fie aproximativ constant. De exemplu, extinderea

maximă pentru o rețea cu o rată de 500Kbiți/s este de aproximativ 100 m și crește până la aproximativ 500 m dacă se folosește o rată de transmisie de 125Kbiți/s.

Repetoare de semnal pot fi folosite pentru a mări extinderea rețelei, în special atunci când e necesară acoperirea unor instalații vaste și rata de transmisie e scăzută sau medie. În schimb, acestea introduc întârzieri adiționale pe căile de comunicație; prin urmare, distanța maximă dintre oricare două noduri este în mod efectiv micșorată la rate de transmisie mari. Folosind repetoare se pot obține de asemenea topologii diferite față de cea de magistrală. În aceste cazuri, o planificare bună poate mări aria efectivă acoperită de rețea.

Merită menționat că, spre deosebire de alte rețele de câmp, cum ar fi, spre exemplu PROFIBUS-PA, în CAN nu există o modalitate eficientă din punct de vedere al costurilor de a folosi același fir pentru purtarea atât a semnalului cât și a alimentării. O pereche adițională de fire poate fi furnizată în interiorul cablului magistralei pentru alimentare.

Conectorii nu sunt standardizați de specificațiile CAN. În schimb, o serie de standarde complementare și de aplicații de nivel înalt există care își definesc proprii conectori și rolurile pinilor. Spre exemplu, DeviceNet și CANOpen sugerează folosirea conectorilor cu cinci pini(fig. 2-1).



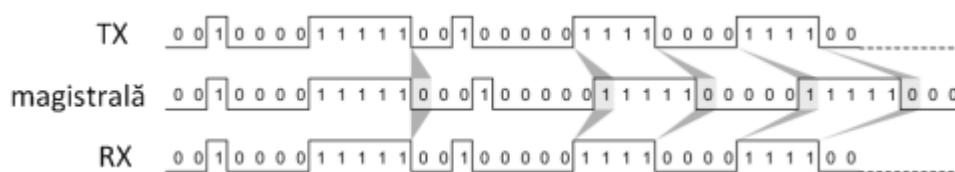
FIGURĂ 2-1. TIPURI DE CONECTORI DEVICENET

Codarea și sincronizarea biților

Nivelul electric de pe magistrala CAN poate avea două valori complementare, denumite simbolic valoare *dominantă* și valoare *recesivă*. De obicei, valoarea dominantă corespunde valorii logice 0 în timp ce valoarea recesivă corespunde valorii logice 1.

CAN se bazează pe codarea NRZ(*non-return-to-zero*) care prezintă o eficiență mare deoarece informația de sincronizare nu este codată separat față de date. Sincronizarea biților pentru fiecare nod este realizată prin intermediul circuitului DPLL(*digital phase-locked loop*), care extrage informația de sincronizare direct din fluxul de date provenit de la magistrală. În particular, tranzițiile semnalului sunt folosite pentru sincronizarea ceasurilor locale.

Pentru a furniza o sincronizare satisfăcătoare între noduri, fluxul de date transmis ar trebui să conțină un număr suficient de tranziții. Pentru a realiza acest lucru, CAN se bazează pe așa-numita tehnică de *dopare cu biți* (*bit stuffing*). În practică, la întâlnirea unui număr de cinci biți consecutivi cu aceeași valoare (fie dominantă, fie recesivă), nodul transmițător inserează un bit adițional cu o valoare complementară, după cum este arătat în fig. 2-2. Acești biți pot fi cu ușurință și siguranță extrași la nodul receptor pentru refacerea semnalului original.



FIGURĂ 2-2. TEHNICA DE DOPARE CU BIȚI (BIT STUFFING)

Un singur dezavantaj este demn de notat în legătură cu tehnica de dopare cu biți, și anume că timpul necesar transmiterii unui mesaj nu este fix, ci dependent de numărul de biți inserați. Acest lucru poate provoca instabilități ale semnalului.

Formatul de cadru

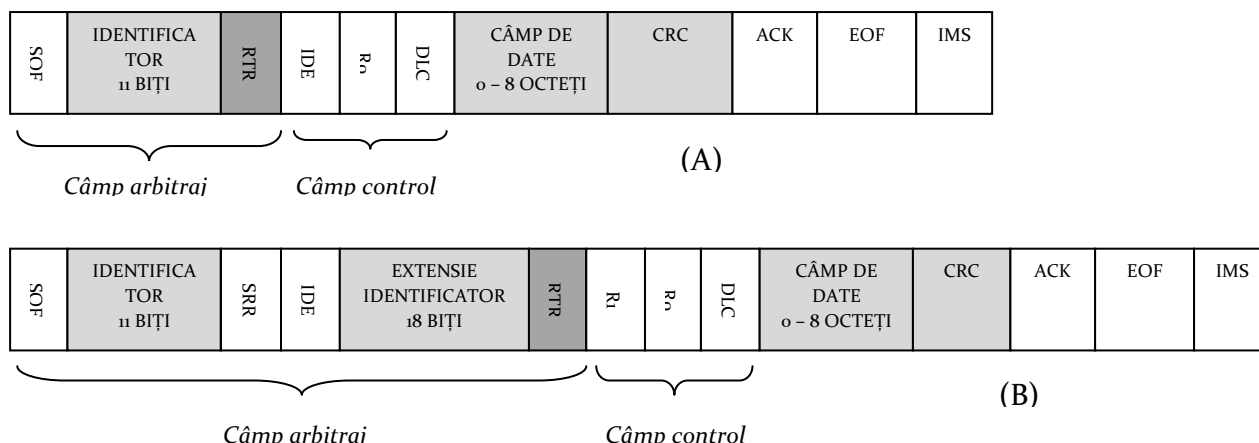
Specificația CAN ISO 11898-1 definește două formate pentru cadru: atât unul standard cât și unul extins. Aceste formate sunt diferențiate în principal de mărimea câmpului de identificator și de o serie de câțiva biți din câmpul de arbitraj. În particular, formatul standard CAN (CAN 2.0A) definește un câmp de identificator de 11 biți, ceea ce înseamnă că aplicațiile ce rulează în aceeași rețea au la dispoziție până la 2048 de identificatori diferiți. Formatul extins de cadru (CAN 2.0B) atribuie în schimb 29 de biți identificatorului, astfel încât până la jumătate de miliard de obiecte diferite ar putea exista (teoretic) în aceeași rețea. Aceasta este o valoare destul de mare, suficientă teoretic pentru orice fel de aplicație.

Cadrul de date

Cadrele de date sunt folosite pentru a transmite informație în rețea. Fiecare cadru de date în CAN începe cu un *bit de start* (*start-of-frame bit – SOF*) la valoarea dominantă, după cum e arătat în figura 2-3. Rolul său este să indice începutul cadrului, precum e cazul și în transmisiile efectuate prin intermediul echipamentelor convenționale UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitters*). Bitul SOF este de asemenea folosit pentru sincronizarea nodurilor receptoare.

Imediat după bitul SOF este poziția câmpului de arbitraj, care include atât bitul *identificator* cât și bitul *cerere transmisie la distanță* (*remote transmission request – RTR*). După cum sugerează numele, câmpul identificator identifică conținutul cadrului care este interschimbat în mod unic în toată rețeaua. Identificatorul este de asemenea folosit de subnivelul MAC pentru a detecta și

coordona prioritatea cadrului, care e folosită atunci când are loc o coliziune (cu cât valoarea numerică a identificatorului este mai mică, cu atât prioritatea este mai mare).



FIGURĂ 2-3. CADRE DE DATE. A) STANDARD. B) EXTINS.

Identificatorul este trimis începând cu cel mai semnificativ bit și terminând cu cel mai puțin semnificativ. Mărimea identificatorului este diferită pentru formatul standard și cel extins. În cazul din urmă, identificatorul a fost spart într-un identificator de bază de 11 biți și unul extins de 18 biți, pentru a furniza compatibilitate cu formatul de cadru standard.

Bitul RTR este folosit pentru a diferenția între cadrele de date și cel de distanță (*remote frames*). Din moment ce o valoare dominantă pentru RTR denotă un cadru de date în timp ce o valoare recesivă semnifică un cadru de distanță, un cadru de date are o prioritate mai mare față de unul de distanță având același identificator.

După câmpul de arbitraj urmează câmpul de control. Pentru cadrele standard, acesta include bitul de extensie a identificatorului (*identifier extension* – IDE), care diferențiază între cadrele standard și extins, urmat de un bit rezervat ro. În cadrele extinse, bitul IDE aparține câmpului de arbitraj în esență, precum și bitul SRR (*substitute remote request*) – un bit transmis cu valoare recesivă pentru a păstra structura cadrelor. În acest caz, bitul IDE este urmat de extensia identificatorului și apoi de câmpul de control, care începe cu cei doi biți rezervați r₁ și r₀. După biții rezervați urmează codul de lungime a datelor (*data length code* – DLC) care specifică lungimea (în octeți) codată pe 4 biți a câmpului de date. Din moment ce bitul IDE este dominant în cadrele standard, în timp ce e recesiv în cele extinse, în cazul în care este folosit același identificator de bază, cadrele standard au prioritate în fața celor extinse.

Biții rezervați r₀ și r₁ trebuie transmiși de către nodul transmițător la valoarea dominantă. Receptorii totuși vor ignora valoarea acestor biți. Pentru câmpul DLC, sunt acceptate valori în gama 0 – 8.

Câmpul de date este folosit pentru a stoca încărcătura utilă a cadrului.

După câmpul de date urmează cele de CRC și confirmare(*acknowledge – ACK*). Primul dintre acestea este alcătuit dintr-o secvență de *cod cu redundanță ciclică(cyclic redundancy code – CRC)* codat pe 15 biți, urmat de un delimitator CRC la valoarea recesivă. Tipul de CRC folosit în CAN este special ales pentru a fi potrivit pentru cadre scurte. Câmpul de confirmare este alcătuit din doi biți: canalul ACK urmat de delimitatorul ACK. Ambii sunt transmiși la valoare recesivă de către transmițător. Canalul ACK, însă, este suprascris cu o valoare dominantă de către fiecare nod care a primit cadrul corect(nicio eroare nu a fost detectată până la câmpul ACK). În acest fel, canalul ACK este încadrat de doi biți la nivelul recesiv: delimitatorii CRC și ACK. Prin intermediul bitului ACK, nodul transmițător poate descoperi dacă cel puțin un nod din rețea a recepționat cadrul corect.

La sfârșitul cadrului se află câmpul EOF(*end-of-frame*), alcătuit din șapte biți recesivi, care indică pentru fiecare nod finalul unei transmisii fără erori. În particular, nodul transmițător presupune că schimbul cadrului a fost efectuat corect dacă nu întâmpină nicio eroare până la ultimul bit al câmpului EOF, în timp ce în cazul receptorilor, câmpul este considerat valid dacă nu sunt erori până la al șaselea bit EOF.

Cadrele succesive sunt separate de câmpul de *întrerupere(intermission – IMS)*, care este alcătuit din trei biți recesivi.

Cadre de distanță

Cadrele de distanță sunt foarte similare cadrelor de date. Singura diferență este că acestea nu sunt purtătoare de date(câmpul de date nu este prezent). Sunt folosite pentru a efectua o cerere de trimitere a unui mesaj în rețea de către un nod la distanță. Trebuie menționat faptul că nodul care inițiază cererea nu cunoaște identitatea nodului producător al informației aferente. Receptorii trebuie să descopere care dintre ei trebuie să răspundă.

Câmpul DLC din cadrele de distanță nu este folosit de protocolul CAN. Cu toate acestea, ar trebui setat la aceeași valoare cu cadrul de date corespunzător, pentru a menaja situația în care mai multe noduri fac cereri la distanță cu același identificator în același timp(acest lucru este valid într-o rețea CAN).

Trebuie reținut că datorită modului în care este codificat bitul RTR, în cazul în care o cerere este făcută pentru un obiect în același timp în care transmisia acelui obiect este începută de producătorul aferent, disputa este rezolvată în favoarea cadrului de date.

Cadre de eroare

Cadrele de eroare sunt folosite pentru a notifica nodurile din rețea de ocurența unei erori. Sunt formate din două câmpuri: *indicatorul de eroare(error flag)* și *delimitatorul de eroare(error delimiter)*. Sunt definite două tipuri de indicatori de eroare: indicatorul activ de eroare este alcătuit din șase biți dominanți, în timp ce indicatorul pasiv de eroare este alcătuit din șase biți recesivi. Un indicator de eroare activ încalcă regulile de dopare cu biți sau a părților cu format fix ale cadrului care este în mod curent interschimbat; prin urmare, impune o condiție de eroare care este detectată de toate stațiile conectate la rețea. Fiecare nod care detectează o condiție de eroare transmite un indicator de eroare independent de celelalte noduri. În acest fel, drept

consecință a transmisiei unui indicator de eroare, la un moment dat se pot afla de la 6 și până la 12 biți dominanți pe magistrală.

Delimitatorul de eroare este alcătuit din opt biți recesivi. După ce transmisia unui indicator de eroare s-a încheiat, fiecare nod începe să transmită biți recesivi și, în același timp, monitorizează nivelul semnalului pe magistrală până ce un bit recesiv este detectat. Din acel moment, nodul mai trimite încă șapte biți recesivi, în acest fel completând delimitatorul de eroare.

Cadre de supraîncărcare

Cadrele de *supraîncărcare* (*overload frames*) sunt folosite de receptorii lenți pentru a încetini operațiile din rețea. Acest lucru este realizat prin adăugarea unei întârzieri adiționale între cadre consecutive de date și distanță. Formatul acestor cadre este similar celor de eroare. În particular, un cadru de supraîncărcare este alcătuit dintr-un indicator de supraîncărcare urmat de un delimitator de supraîncărcare. Controlerele CAN folosite în zilele noastre sunt foarte rapide, fapt care face cadrele de supraîncărcare să fie aproape nefolositoare.

Tehnica de acces

Mecanismul de control al accesului la mediu pe care se bazează CAN este în esență CSMA. Atunci când niciun cadru nu este interschimbat, rețeaua este nefolosită și nivelul semnalului de pe magistrală este recesiv. Înainte de a transmite un cadru, nodurile trebuie să citească starea magistralei. În cazul în care rețeaua este nefolosită, transmisia începe imediat; altfel, nodul trebuie să aștepte până ce transmisia curentă ia sfârșit. Fiecare cadru are la început bitul SOF setat la valoarea dominantă, ceea ce informează celelalte noduri că rețeaua a trecut în starea ocupată.

Deși puțin probabil, se poate întâmpla ca două noduri să înceapă transmisia de cadre în exact același moment. Acest lucru se poate întâmpla deoarece întârzierile de propagare pe magistrală –deși foarte mici – sunt pozitive. Astfel, un nod își poate începe transmisia în timp ce bitul SOF al altei transmisii se află deja în tranzit pe magistrală. În acest caz, o coliziune va avea loc. În rețelele CSMA care sunt bazate pe detecția coliziunilor, cum e cazul rețelelor Ethernet necomutate, acest lucru duce inevitabil la coruperea tuturor cadrelor implicate, ceea ce înseamnă că vor trebui retransmise. Consecințele sunt o pierdere de timp și o scădere netă a lărgimii de bandă disponibile. În situații de încărcare mare, acest lucru poate duce la congestionarea rețelei.

Spre deosebire de Ethernet, CAN poate rezolva disputele într-un mod determinist, în așa fel încât nici timpul și nici lărgimea de bandă nu sunt irosite. În acest fel, condițiile de congestionare nu mai pot apărea și toată banda teoretic disponibilă a sistemului este în mod efectiv disponibilă comunicațiilor.

Arbitrajul magistralei

Cea mai distinctivă caracteristică a tehnicii de acces la mediu CAN este abilitatea de a rezolva într-un mod determinist orice coliziune care poate apărea pe magistrală. Acest lucru este făcut posibil de mecanismul de arbitraj, care găsește cel mai urgent cadru de fiecare dată când apare o dispută pentru magistrală.

Mecanismul de arbitraj CAN permite coliziunilor să fie rezolvate prin oprirea transmisiilor tuturor cadrelor implicate cu excepția celui caracterizat de prioritatea cea mai înaltă (identificatorul cu valoarea cea mai mică). Tehnica de arbitraj exploatează particularitățile nivelului fizic CAN și anume că nivelul pe magistrală este dominant dacă cel puțin un nod transmite un bit dominant și este recesiv dacă toate nodurile transmit biți recesivi.

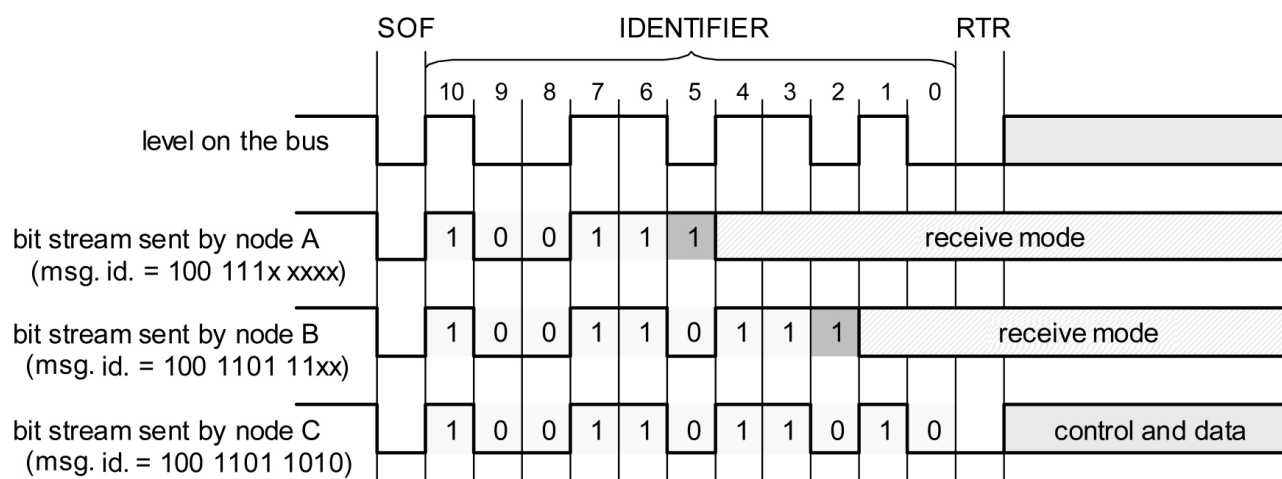
Prin intermediul tehnicii de *numărare binară inversă* (*binary countdown*) fiecare nod – imediat după transmisia bitului SOF – transmite identificatorul mesajului în mod serial pe magistrală, începând cu cel mai semnificativ bit. La transmisie, fiecare nod compară nivelul observat pe magistrală cu valoarea bitului care este în proces de a fi scris. Dacă nodul transmite o valoare recesivă și nivelul pe magistrală este dominant, nodul înțelege că a pierdut disputa și se retrage imediat. Mai precis, se oprește din transmisie și își comută portul de ieșire pe nivelul recesiv pentru a nu interfera cu celelalte noduri aflate în dispută. În același timp, se comută în starea de recepție pentru a citi cadrul de pe magistrală (câștigător).

Tehnica de numărare binară inversă asigură că în cazul unei coliziuni, toate nodurile ce trimit cadre cu prioritate mai mică își vor anula transmisiile până să ajungă la sfârșitul câmpului de arbitraj, cu excepția celui care transmite cadrul caracterizat de cea mai mare prioritate (nodul câștigător nici nu realizează că un conflict a avut loc pe magistrală). Acest lucru implică faptul că două noduri dintr-o rețea CAN nu pot transmite mesaje referitoare la același obiect (caracterizate de același identificator) în același timp. În caz contrar, coliziuni netratabile au loc care la rândul lor, provoacă erori de transmisie. Datorită proprietății de retransmisie automată a controlerelor CAN, acest lucru va duce aproape sigur la o rafală de erori pe magistrală, până ce nodurile implicate sunt deconectate de mecanismul de limitare a defectelor. Acest lucru implică asocierea unică între un obiect și producătorul său.

O excepție de la această regulă este dată de cadrele fără un câmp de date, cum ar fi, spre exemplu cadrele de distanță. În acest caz, dacă are loc o coliziune între cadre cu același identificator, se suprapun perfect și nicio coliziune nu mai are loc.

Toate nodurile care pierd o dispută trebuie să reîncerce transmisia odată ce schimbul cadrului câștigător s-a terminat. Vor încerca toate să retransmită cadrele imediat după ce au citit câmpul de întrerupere de pe magistrală.

Figura 2-4 prezintă un exemplu de rezolvare a unui conflict pe magistrală pentru cazul în care 3 noduri încep transmisia simultan.



FIGURĂ 2-4. FAZA DE ARBITRAJ ÎN CAN

CONCLUZII

CAN este ideal pentru aplicații care necesită un număr mare de mesaje scurte și o siguranță mare în medii de operare dificile. Deoarece CAN este bazat pe mesaje și nu pe adrese, se potrivește în mod special cazurile în care datele sunt cerute de mai mult de o locație și consistența la nivelul întregului sistem este necesară.[4][2]

Limitarea defectelor este de asemenea un mare avantaj al rețelelor CAN. Nodurile defecte sunt în mod automat deconectate de la magistrală, ceea ce previne deturnarea rețelei de către un singur nod defect și asigură banda disponibilă pentru transmisia mesajelor critice. Această limitare a erorilor permite de asemenea adăugarea nodurilor la o magistrală în timp ce aceasta este operațională, tehnică altfel cunoscută sub numele de *hot-plugging*.

Arhitectura multi-master CAN dă posibilitatea nodurilor să notifice într-un mod foarte simplu evenimente asincrone critice, alarme, urgențe. Nu există un punct central de control (cum este de exemplu în cazul rețelelor FIP) ceea ce aduce un plus de fiabilitate, întrucât nu există un punct care poate opri funcționarea întregii rețele.

Datorită mecanismului de arbitraj, este cert că niciun mesaj nu va fi întârziat de schimburi de mesaje de prioritate redusă(fenomen cunoscut sub numele de *inversia priorității*). Un mesaj poate fi totuși întârziat de unul cu prioritate redusă a cărui transmisie a început deja. Acest lucru este de neocolit într-un astfel de sistem. Totuși, deoarece mărimea cadrului este foarte mică(cadrele standard au cel mult 135 de biți, incluzând biții dopați), timpul de blocaj experimentat de mesajele foarte urgente este destul de mic. Acest lucru face ca rețeaua CAN să aibă un timp de răspuns foarte bun, ceea ce explică de ce este folosită în aplicații de control în timp-real în ciuda lărgimii de bandă relativ mici.

LIN

LOCAL INTERCONNECT NETWORK

INTRODUCERE

LIN este o arhitectură de rețea monofilară bazată pe UART dezvoltată inițial pentru senzori din industria automobilistică și pentru aplicații de rețelistică. Nodul principal(*master*) LIN conectează rețeaua la rețele de nivel superior cum ar fi CAN.[4]

Conceput în anul 1998, consorțiul LIN este compus din producătorii de mașini Audi, BMW, DaimlerChrysler, Volvo și Volkswagen. LIN este o magistrală serială necostisitoare folosită pentru sisteme electronice de control distribuit pentru autovehicule. Permite o comunicație eficientă între senzori inteligenți și actuatori acolo unde lărgimea de bandă și versatilitatea rețelei CAN nu sunt necesare. Aplicații tipice sunt controlul ușilor(ridicarea geamurilor, blocarea lor și controlul oglinzilor), scaune, reglarea climatică, iluminare și senzorii de ploaie. În afara sectorului auto, LIN este folosită pentru controlul mașinilor ca o sub-magistrală pentru CAN.

O rețea LIN este alcătuită dintr-un nod *master* și unul sau mai multe noduri *slave*. Toate nodurile au inclusă o sarcină de comunicare cu nodurile slave care este împărțită la rândul ei în două subsarcini, una de transmisie și alta de recepție. Nodul master are o a treia sarcină de transmitere master. Comunicația într-o rețea LIN este întotdeauna începută de nodul master: acesta transmite pe magistrală un mesaj compus din informațiile de sincronizare și identificatorul de mesaj.

Un singur nod sclav este activat ca urmare a recepției și filtrării identificatorului. Acesta începe imediat transmisia răspunsului. Răspunsul este alcătuit din doi, patru sau opt octeți și un octet de verificare a sumei de redundanță ciclică(CRC). Antetul trimis de master și acest răspuns alcătuiesc un cadru de mesaj.

Identificatorul unui mesaj denotă conținutul unui mesaj, dar nu și destinatarul. Acest concept de comunicație permite schimbul de date în moduri diferite: de la nodul master către unul sau mai multe noduri sclav și de la un nod sclav către nodul master și/sau către alte noduri slave. Este posibil să se comunice semnale de la un nod sclav către alt nod sclav fără să fie implicat și nodul master și fără să fie nevoie ca mesajul să fie transmis de master către toate nodurile(*broadcasting*). Secvența cadrelor de mesaje este controlată de master și poate forma cicluri.

Trăsăturile principale ale rețelei LIN sunt:

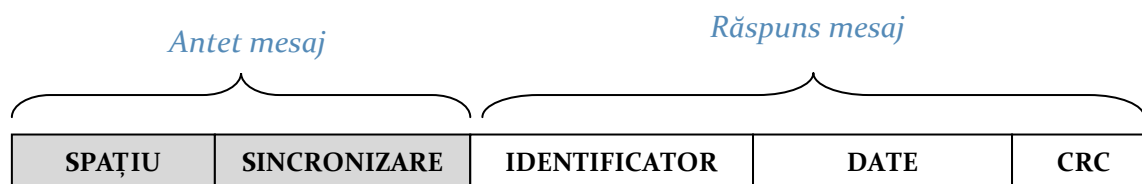
- Un singur master, până la 16 sclavi (fără arbitraj al magistralei).
- Comunicație monofilară cu viteze de până la 19,2Kbiți/s, cu o lungime de 40m a magistralei.

- Timpi de latență garantați.
- Cadru de date variabil ca mărime(2, 4 sau 8 octeți).
- Flexibilitate mare la configurare.
- Recepție *multi-cast* cu sincronizarea timpului.
- Sume de control ciclic redundant și detecția erorilor.
- Detecția nodurilor defecte.
- Implementare necostisitoare cu silicon bazată pe hardware standard UART/SCI.
- Tensiune operațională de 12V.

CADRUL DE DATE

Cadrul de date pentru protocolul LIN este unul foarte simplu, detaliat în figura 3-1. Un mesaj conține următoarele câmpuri:

- Spațiu de sincronizare(*synchronization break*).
- Octet de sincronizare.
- Octet de identificator.
- Octeți de date.
- Octet de sumă de verificare.



FIGURĂ 3-1. CADRUL DE DATE LIN

Câmpul SPAȚIU este folosit pentru activarea tuturor sclavilor LIN atașați și comutarea lor în starea de ascultare pentru citirea părților care urmează ale antetului. Este constituit dintr-un bit de *start* și mai mulți biți *dominanți*. Câmpul SYNC este folosit pentru sincronizarea echipamentelor sclave. Câmpul IDENTIFICATOR definește o acțiune unică care trebuie executată de unul sau mai multe noduri sclav atașate. Răspunsul este alcătuit din câmpul de DATE și câmpul CRC. Lungimea câmpului de date poate fi de la 0 la 8 octeți. Este un câmp fix, setat la faza de planificare a rețelei în care se ține cont de cerințele sistemului implementat.

Există șase tipuri de cadre definite.

Cadrele necondiționale(*uncoditional frames*) sunt întotdeauna purtătoare de semnale și identicatorii lor sunt în gama 0 – 59(0x00 – 0x3b). Toți abonații la cadrul necondițional vor primi cadrul și îl vor face disponibil aplicației(presupunând că nicio eroare nu a fost detectată).

Al doilea tip este reprezentat de cadrele declanșate de evenimente(*event triggerred frames*). Scopul unui cadru declanșat de evenimente este să mărească îndatoririle complexului LIN fără să aloce prea mult din lărgimea de bandă pentru interogarea mai multor noduri sclave cu

evenimente care au o rată de apariție rară. Primul octet de date al cadrului necondițional de date este egal cu identificatorul protejat. Dacă niciunul din nodurile sclav nu răspund la antet, restul cadrului este silențios iar antetul e ignorat. Dacă mai mult de un nod răspunde la antet atunci o coliziune va avea loc, pe care masterul trebuie să o rezolve printr-o cerere a tuturor cadrelor necondiționale înainte de a-l cere din nou pe cel declanșat de eveniment.

Antetul unui cadru *sporadic* va fi trimis atunci când masterul știe că un semnal purtat în cadru a fost îmborsărit(*updated*). Nodul care a publicat cadrul *sporadic* va furniza răspunsul la antet.

Cadrul de diagnostic(*diagnostic frame*) conține întotdeauna date de configurație sau diagnosticare și întotdeauna are o mărime fixă de 8 octeți. Identificatorul este fie 60, denumit cadru de cerere master, sau 61, caz în care este un cadru de răspuns sclav.

Mai există alte două tipuri de cadre: cadrul definit de utilizator(*user defined frame*) și cadrul rezervat(*reserved frame*).

CONCLUZII

Specificația LIN a fost concepută pentru a permite folosirea unor noduri hardware foarte ieftine în cadrul unei rețele. Este o rețea de cost-săzută, monofilară bazată pe ISO 9141. În cadrul topologiilor de rețea utilizate în autovehiculele moderne sunt folosite fie microcontrolere cu capabilități UART sau hardware LIN dedicat.

Magistrala LIN poate fi folosită drept o alternativă cu costuri reduse la CAN în rețele auto sau industriale de viteză redusă. Pentru a adăuga și mai multă flexibilitate rețelei, interfața LIN poate fi implementată cu logică reconfigurabilă, soluție ce nu numai eficientă din punct de vedere al consumului de energie, dar permite reconfigurarea interfeței de la distanță pentru a fi fie master fie sclav.

Abilitatea de a reconfigura dispozitivul la ambele tipuri poate ajuta la diagnosticul defectelor în câmp, testarea în timpul dezvoltării dar și reducerea inventarului prin ținerea pe stoc a unui singur dispozitiv.

BIBLIOGRAFIE

1. S. Dijev, *Industrial Networks for Communication and Control*, Elements of Industrial Automation Course, Lecture 4, University of Sofia, Faculty of Engineering
2. Schneider Electric SAS, 2008, *Automation Solution Guide*, Capitolul 9.
Disponibil pe: http://www.automation.schneider-electric.com/as-guide/EN/pdf_files/asg-9-industrial-networks.pdf la data de 13.09.2009
3. Steve Mackay et al., *Practical Industrial Data Networks: Design, Installation and Troubleshooting*, 2004, Newnes
4. Richard Zurawski, *The Industrial Communication Handbook*, Capitolul 13, Capitolul 31, 2005, CRC Press