

Acesta este capitolul 3 — *Nivelul fizic* — al ediției electronice a cărții *Rețele de calculatoare*, publicată la Casa Cărții de Știință, în 2008, ISBN: 978-973-133-377-9.

Drepturile de autor aparțin subsemnatului, Radu-Lucian Lupșa.

Subsemnatul, Radu-Lucian Lupșa, acord oricui dorește dreptul de a copia conținutul acestei cărți, integral sau parțial, cu condiția atribuirii corecte autorului și a păstrării acestei notițe.

Cartea, integrală, poate fi descărcată gratuit de la adresa <http://www.cs.ubbcluj.ro/~rlupsa/works/retele.pdf>

Capitolul 3

Nivelul fizic

3.1. Problema transmisiei informației la nivelul fizic

Sarcina nivelului fizic este aceea de-a transmite un șir de biți (sau, în general, un șir de simboluri) produs de o *sursă* către o *destinație*. Sursa și destinația se află la distanță una față de cealaltă.

Sursa și destinația sunt „clienții” sistemului de comunicație; nivelul fizic trebuie să fie capabil să transmită datele în folosul acestora.

Șirul de biți ce trebuie transmis poartă denumirea de *date utile*.

Pentru îndeplinirea scopului său, nivelul fizic dispune de un *mediu de transmisie*. Mediul de transmisie se întinde de la amplasamentul sursei până la amplasamentul destinației și este capabil să transmită la distanță o anumită acțiune fizică.

Nivelul fizic cuprinde trei elemente: mediul de transmisie, *emițătorul* și *receptorul* (vezi fig. 3.1). *Emițătorul* primește biții de la sursă și, în conformitate cu valorile lor, acționează asupra mediului. *Receptorul* sesizează acțiunile emițătorului asupra mediului și reconstituie șirul de biți produs de sursă. Șirul de biți reconstituit este livrat destinației.

Mărimea fizică ce măsoară acțiunea produsă de emițător și transmisă de către mediu până la receptor și care este utilizată efectiv ca purtătoare a informației se numește *semnal*. Semnalul este întotdeauna analizat ca o funcție continuă de timp.

Mărimea fizică utilizată ca semnal este aleasă de proiectantul sistemului de comunicații dintre acele mărimi pe care mediul ales le poate propaga în condiții bune. De exemplu, pentru transmisia prin perechi de conductoare, semnalul poate fi tensiunea electrică dintre conductoare sau intensitatea curentului prin conductoare.

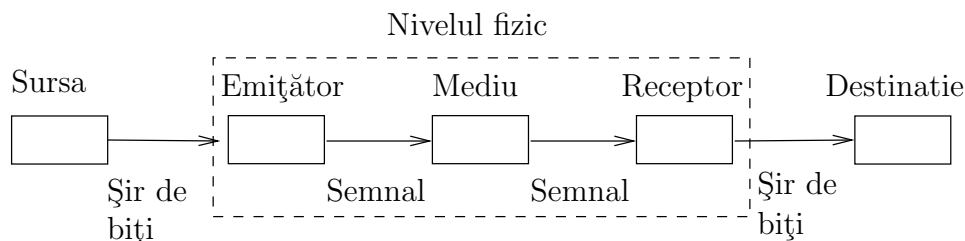


Figura 3.1: Modelarea transmisiei la nivel fizic

Emitătorul transformă șirul de biți recepționat într-un semnal adecvat transmiterii prin mediul de comunicație. Receptorul efectuează operația inversă. Corespondența dintre șirurile de biți posibile și semnalele corespunzătoare poartă denumirea de *schemă de codificare a informației prin semnal continuu*.

Schema de codificare utilizată trebuie să fie aceeași pentru emițător și receptor.

Mediul de transmisie modifică în general semnalul transmis, astfel că semnalul primit de receptor de la mediu nu este identic cu semnalul aplicat de emițător asupra mediului. Vom arăta în § 3.2 care sunt transformările suferite de semnal în timpul propagării. Schema de codificare a informației trebuie să țină cont de aceste modificări. O parte din schemele folosite vor fi studiate în § 3.3.

În continuarea acestui capitol vom trece în revistă problemele specifice legate de transmiterea semnalelor și de codificarea informației prin semnale. O analiză riguroasă a acestor probleme depășește cu mult cadrul acestei lucrări. Prezentarea de față are ca scop familiarizarea cu noțiunile și problemele respective, în vederea înțelegerii soluțiilor existente, limitărilor lor, parametrilor specificați în documentațiile privind echipamentele folosite și, mai ales, posibilității comunicării cu specialiștii în domeniul electronicii și comunicațiilor.

3.2. Transmiterea semnalelor

3.2.1. Modificările suferite de semnale

Pentru a studia modificările suferite de semnale în timpul propagării prin mediul de transmisie, vom considera în principal cazul transmiterii tensiunii electrice printr-o pereche de conductoare.

Semnalul măsurat la joncțiunea dintre emițător și mediu se numește *semnal emis* și îl vom nota cu $U_e(t)$, unde t este timpul. Semnalul măsurat

la joncțiunea dintre mediu și receptor se numește *semnal recepționat* și îl vom nota cu $U_r(t)$.

Transformările suferite de semnal sunt următoarele:

Întârzierea constă în faptul că semnalul recepționat urmează cu o anumită întârziere semnalul emis. Cu notațiile de mai sus și neglijând fenomenele ce vor fi descrise la punctele următoare, avem $U_r(t) = U_e(t - \Delta t)$. Durata Δt se numește *întârziere (de propagare)* sau *țimp de propagare*. Întârzierea are valoarea $\Delta t = \frac{l}{v}$, unde l este lungimea mediului iar v este viteza de propagare a semnalului. Viteza de propagare a semnalului depinde de natura mediului de transmisie. La transmisia prin conductoare, v depinde numai de materialul izolator dintre conductoare și, pentru materialele folosite în mod curent, are valoarea aproximativă $v \approx 2/3c = 2 \cdot 10^8$ m/s, unde c este viteza luminii în vid.

atenuarea constă în faptul că semnalul recepționat are amplitudine mai mică decât cel emis. Neglijând întârzierea, are loc $U_r(t) = g \cdot U_e(t)$, cu $0 < g < 1$. Ținând cont și de întârziere, avem $U_r(t) = g \cdot U_e(t - \Delta t)$. Numărul $1/g$ se numește *factor de atenuare în tensiune*.

De cele mai multe ori atenuarea unui semnal este exprimată prin *factorul de atenuare în putere*, numit pe scurt *factor de atenuare*, definit ca raportul dintre puterea semnalului emis și a celui recepționat. În cazul perechii de conductoare, deoarece puterea este proporțională cu pătratul tensiunii (raportul tensiune/intensitate fiind aproximativ constant), factorul de atenuare în putere este egal cu $1/g^2$.

Prin conectarea unul după celălalt a mai multor medii de transmisie, factorul de atenuare a mediului rezultat este produsul factorilor de atenuare ai componentelor. Din acest motiv, în loc de factorul de atenuare se folosește adesea logaritmul său: logaritmul factorului de atenuare rezultat este suma logaritmilor, în aceeași bază, ai factorilor de atenuare ai componentelor.

Logaritmul factorului de atenuare se numește pe scurt *atenuare*.

Valoarea logaritmului depinde de baza utilizată, baze diferite ducând la valori proporționale. Deoarece schimbarea bazei de logaritmare are un efect similar cu schimbarea unității de măsură pentru o mărime fizică, după valoarea logaritmului se scrie o pseudo-unitate de măsură ce arată de fapt baza de logaritmare utilizată. Pentru logaritmul în baza zece, pseudo-unitatea de măsură folosită este *belul*, având simbolul B. Pseudo-unitatea de măsură utilizată curent este *decibelul*, având simbolul dB. Avem $1 \text{ B} = 10 \text{ dB}$. O valoare exprimată în decibeli (dB) o putem vedea, echivalent, fie ca valoarea logaritmului în baza

10 înmulțită cu 10, fie ca valoarea logaritmului în baza $10^{1/10}$. De exemplu, dacă factorul de atenuare este $(1/g^2) = 10$, logaritmul său este $1 \text{ B} = 10 \text{ dB}$. Dacă factorul de atenuare este 2, logaritmul său (atenuarea) este $\log_{10} 2 \text{ B} \approx 0,3 \text{ B} = 3 \text{ dB}$.

Puterea semnalului emis se măsoară în watti (W) sau miliwatti (mW). Adesea, este specificată nu puterea ci logaritmul puterii: se ia numărul ce reprezintă puterea, în miliwatti, și logaritmul său se exprimă în decibeli. Pseudo-unitatea de măsură corespunzătoare reprezentării de mai sus se numește decibel-miliwatt, având simbolul (neconform regulilor Sistemului Internațional de Masuri și Unități) dBm. Ca exemple: o putere de emisie de 1 mW poate fi scrisă și 0 dBm, o putere de 1 W se scrie 30 dBm, iar 0,1 mW se scrie ca -10 dBm .

Puterea minimă a semnalului recepționat, pentru care receptorul este capabil să decodifice corect semnalul, se numește *pragul de sensibilitate* al receptorului. Ca și puterea emițătorului, pragul de sensibilitate se poate exprima în miliwatti sau în decibel-miliwatti.

distorsiunea este o modificare deterministă a semnalului recepționat față de cel emis, diferită de întârziere și atenuare. (O modificare este deterministă dacă, oricâteori transmitem un același semnal, modificarea se manifestă identic.) Mai multe detalii despre distorsiuni vor fi date în § 3.2.2.

zgomotele sunt modificări nedeterminate ale semnalului recepționat, cauzate de factori externi sistemului de transmisie (fulgere, întrerupătoare electrice, alte sisteme de transmisie de date, alte echipamente electronice) sau de factori interni cu manifestare aleatoare (mișcarea de agitație termică a atomilor din dispozitivele electornice).

Zgomotul se exprimă ca diferența dintre semnalul recepționat efectiv și semnalul ce ar fi recepționat în lipsa zgomotului. *Raportul semnal/zgomot* este raportul dintre puterea semnalului și puterea corespunzătoare zgomotului. Uneori termenul de raport semnal/zgomot este utilizat și pentru logaritmul raportului semnal/zgomot; de obicei nu este pericol de confuzie deoarece logaritmul este exprimat în decibeli, în timp ce raportul semnal/zgomot nu are unitate de măsură.

O categorie specială de zgomot este *diafonia*, care este un zgomot provenit din semnalul transmis pe un mediu de transmisie vecin.

3.2.2. Analiza transmiterii semnalelor cu ajutorul transformatei Fourier

Considerăm un dispozitiv electronic, care are o intrare și o ieșire

(fig. 3.2). În particular, o pereche de conductoare folosită pentru transmisie poate fi considerată un astfel de dispozitiv, capetele dinspre emițător constituind intrarea, iar cele dinspre receptor, ieșirea.

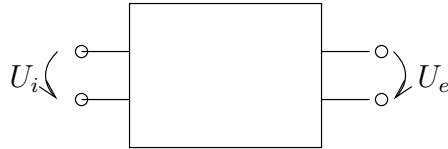


Figura 3.2: Un dispozitiv cu o intrare și o ieșire

Tensiunea de la ieșire depinde de tensiunea de la intrare, însă în general depinde de tot istoricul ei. Altfel spus, comportamentul dispozitivului poate fi descris de un operator L (reamintim că un operator este o funcție definită pe un spațiu de funcții cu valori tot într-un spațiu de funcții). Acest operator primește ca argument funcția timp-tensiune U_i care caracterizează semnalul de intrare. Valoarea operatorului este funcția timp-tensiune $U_e = L(U_i)$ care caracterizează semnalul de ieșire.

Multe dispozitive electronice au un comportament *liniar*, adică operatorul L care le caracterizează este un operator liniar. Reamintim că un operator L este liniar dacă, pentru orice funcții f și g și pentru orice scalari α și β , are loc

$$L(\alpha f + \beta g) = \alpha L(f) + \beta L(g).$$

Pentru un dispozitiv liniar, dacă semnalul de intrare $U_i(t)$ poate fi descompus ca o sumă de forma

$$U_i(t) = \alpha_1 U_{i1}(t) + \alpha_2 U_{i2}(t) + \dots + \alpha_n U_{in}(t),$$

atunci pentru semnalul de ieșire avem

$$U_e(t) = L(U_i)(t) = \alpha_1 U_{e1}(t) + \alpha_2 U_{e2}(t) + \dots + \alpha_n U_{en}(t),$$

unde $U_{e1} = L(U_{i1})$, $U_{e2} = L(U_{i2})$, ..., $U_{en} = L(U_{in})$.

Dispozitivele liniare au proprietatea că, dacă semnalul de intrare este *sinusoidal*, adică

$$U_i(t) = U_0 \cdot \cos(2\pi ft + \phi),$$

atunci semnalul de ieșire este tot sinusoidal și, mai mult,

$$U_e(t) = g(f) \cdot U_0 \cdot \cos(2\pi ft + \phi - \theta(f)),$$

unde $g(f)$ și $\theta(f)$ depind doar de cum este construit dispozitivul și de frecvența f a semnalului.

Orice semnal se poate scrie unic ca o sumă de semnale sinusoidale. (Nota: condițiile matematice asupra semnalului, și alte detalii se găsesc în lucrările de specialitate, de exemplu [Crstici et al. 1981]; aici facem doar o prezentare semi-intuitivă).

Un semnal *periodic* de perioadă T se poate descompune în așa-numita *serie Fourier*:

$$U(t) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cos\left(\frac{2\pi k}{T}t + \phi_k\right).$$

Un semnal *limitat în timp*, adică nul în afara unui interval finit $[0, T]$, se poate descompune sub forma:

$$U(t) = \int_0^{\infty} a(f) \cdot \cos(2\pi ft + \phi(f)) df. \quad (3.1)$$

Notă: relația (3.1) este dată de obicei sub forma numită *transformata Fourier inversă*:

$$U(t) = \int_{\mathbb{R}} \hat{U}(f) \cdot e^{2\pi i f t} df, \quad (3.2)$$

unde \hat{U} este o funcție complexă care se numește *transformata Fourier* a funcției U .

Relația (3.1) spune că semnalul U se poate scrie ca o sumă de sinusoidale cu diferite frecvențe f având amplitudinile $a(f)$ și defazaajul (decalajul sinusoidalei de-a lungul axei Ox) egal cu $\phi(f)$.

Frecvențele f pentru care amplitudinile corespunzătoare $a(f)$ sunt nenule alcătuiesc *spectrul* semnalului.

Pentru un dispozitiv liniar, semnalul de ieșire se poate calcula descompunând în sinusoidale semnalul de intrare, calculând efectul dispozitivului asupra fiecărei sinusoidale în parte și însumând în final ieșirile:

$$\begin{aligned}
U_e(t) &= L(U_i(t)) = \\
&= L\left(\int_0^{\infty} a_i(f) \cdot \cos(2\pi ft + \phi_i(f))df\right) = \\
&= \int_0^{\infty} L(a_i(f) \cdot \cos(2\pi ft + \phi_i(f)))df = \\
&= \int_0^{\infty} a_i(f) \cdot g(f) \cdot \cos(2\pi ft + \phi_i(f) - \theta(f))df,
\end{aligned} \tag{3.3}$$

unde $a_i(f)$ și $\phi_i(f)$ sunt funcțiile $a(f)$ și $\phi(f)$ din descompunerea, conform relației (3.1), a semnalului de intrare U_i .

Comportamentul unui dispozitiv liniar este deci complet definit de funcțiile $g(f)$ și $\theta(f)$.

Un semnal este nedistorsionat dacă și numai dacă, pentru toate frecvențele f din spectrul semnalului, $g(f)$ este constantă și $\theta(f)$ este proporțional cu f , adică există constantele g_0 și θ_0 astfel încât

$$\begin{cases} g(f) = g_0 \\ \theta(f) = \theta_0 f \end{cases} \tag{3.4}$$

pentru toate frecvențele f din spectrul semnalului.

În practică, condiția (3.4) este satisfăcută, cu o aproximație acceptabilă, doar pentru frecvențe care se încadrează într-un anumit interval $f \in [f_{\min}, f_{\max}]$. Acest interval se numește *banda de trecere* a dispozitivului. În consecință, dacă spectrul semnalului de intrare se încadrează în banda de trecere a dispozitivului, semnalul de ieșire va prezenta distorsiuni acceptabil de mici.

Diferența $f_{\max} - f_{\min}$ se numește *lățimea de bandă* a dispozitivului.

De exemplu, banda de trecere a unei linii telefonice este cuprinsă între aproximativ 300 Hz și 3 kHz.

3.3. Codificarea informației prin semnale continue

3.3.1. Scheme de codificare

Cea mai simplă codificare este aceea în care împărțim timpul în intervale de durată fixată Δt (pe care o numim *lungimea unui bit*) și, pe durata

fiecărui bit, semnalul emis va avea o anumită valoare — de exemplu 12 V — dacă bitul are valoarea 1 și o altă valoare — de exemplu 0 V — dacă bitul are valoarea 0 (vezi fig. 3.3).

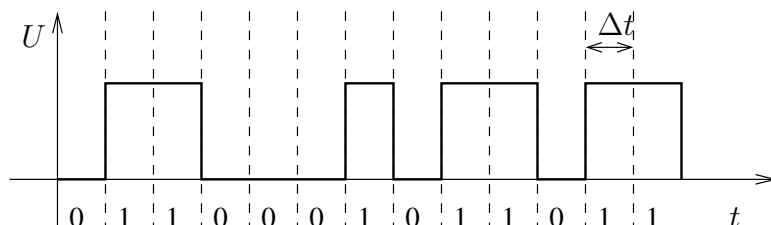


Figura 3.3: Codificarea directă

Receptorul determină intervalele corespunzătoare biților și măsoară semnalul la mijlocul fiecărui interval. Dacă tensiunea este mai mare decât o valoare numită *prag* — pentru exemplul nostru se poate lua ca prag 3 V — receptorul decide că bitul respectiv are valoarea 1, iar în caz contrar decide că bitul are valoarea 0.

Valoarea pragului poate fi fixă sau poate fi stabilită dinamic în funcție de amplitudinea semnalului recepționat pentru a ține cont de atenuare.

Să observăm că receptorul trebuie să fie sincronizat cu emițătorul, adică să examineze semnalul recepționat la mijlocul intervalului corespunzător unui bit. Acest lucru se poate face — însă este adesea nepractic — transmițând un al doilea semnal, de sincronizare, pe un mediu separat (adică folosind o altă pereche de fire).

Sincronizarea se poate face și pe baza semnalului util, dacă receptorul dispune de un ceas suficient de precis. În acest scop, receptorul va măsura timpul cât semnalul este „sus“ (peste prag) și va determina de câte ori se cuprinde în acest interval durata unui bit. Numărul de biți consecutivi identici trebuie să fie limitat, căci receptorul nu va putea distinge între n biți și $n + 1$ biți consecutivi având aceeași valoare, dacă n este prea mare.

Limitarea numărului de biți identici consecutivi se poate face în mai multe feluri:

Codificarea Manchester. Semnalul are una sau două tranziții pentru fiecare interval corespunzător unui bit. O tranziție la mijlocul intervalului arată valoarea bitului: tranziția este în sus pentru 1 și în jos pentru 0. Pentru a face posibil ca doi biți consecutivi să aibă aceeași valoare, la începutul intervalului corespunzător unui bit mai poate să apară o tranziție (fig. 3.4).

Rețelele Ethernet de 10 Mbit/s utilizează codificarea Manchester.

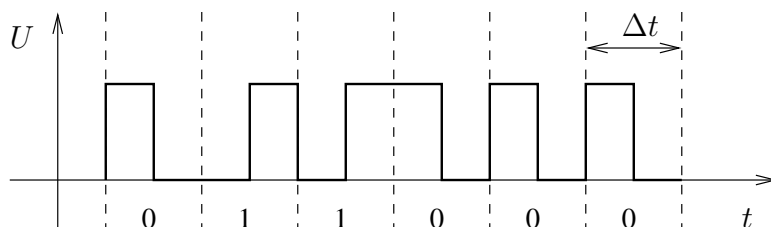


Figura 3.4: Codificarea Manchester

Codificarea Manchester diferențială. Semnalul are o tranziție la începutul fiecărui interval de bit. Dacă bitul este 1 atunci semnalul mai are o tranziție la mijlocul intervalului (fig. 3.5).

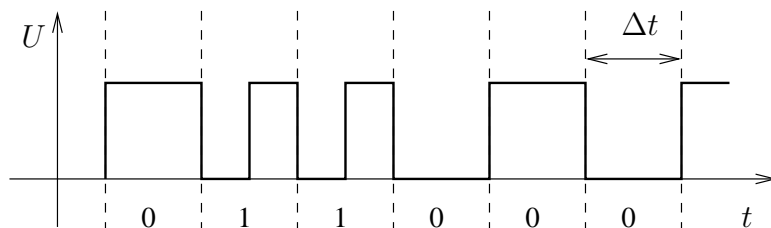


Figura 3.5: Codificarea Manchester diferențială

Codurile de grup sunt o familie de coduri construite după următoarea schemă:

Se fixează un număr n (valori uzuale: $n = 4$ sau $n = 8$); șirul transmis trebuie să aibă ca lungime un multiplu de n biți.

Se fixează o tabelă de corespondență care asociază fiecăruia dintre cele 2^n șiruri de n biți posibile un șir de m biți, unde $m > n$ este fixat, cu restricția ca între cei m biți să nu fie prea multe valori egale consecutive. Codul este determinat de numerele n și m și de această tabelă.

Șirul de biți de codificat se codifică astfel: mai întâi, fiecare grup de n biți consecutivi se înlocuiește cu șirul de m biți asociat. Apoi șirul de biți astfel obținut se codifică direct, un bit 0 fiind reprezentat printr-o valoare a tensiunii și un bit 1 prin altă valoare.

Rețelele Ethernet de 100 Mbit/s utilizează un cod de grup cu $n = 4$ și $m = 5$.

Să examinăm acum cerințele privind banda de trecere a mediului necesară pentru transmiterea semnalelor de mai sus.

Semnalele de formă rectangulară descrise mai sus au spectru infinit (spectrul lor nu este mărginit superior). Trecute printr-un mediu de comunicație care are o lățime de bandă finită, semnalele vor fi „rotunjite“ mai mult sau mai puțin.

Să notăm cu τ durata elementară a unui palier al semnalului ideal (durata minimă în care semnalul ideal are o valoare constantă). Pentru codificarea directă, $\tau = \Delta t$; pentru codificarile Manchester și Manchester diferențială, $\tau = \frac{1}{2}\Delta t$.

Dacă banda de trecere a mediului include intervalul $[0, \frac{1}{2\tau}]$, atunci mediul păstrează suficient din forma semnalului pentru ca receptorul să poată decodifica informația transmisă. Dacă frecvența maximă a benzii de trecere este mai mică decât $\frac{1}{2\tau}$, atunci un semnal rectangular care are, alternativ, un timp τ o valoare și următorul timp τ cealaltă valoare va fi distorsionat atât de mult încât „urcușurile“ și „coborâșurile“ semnalului nu vor mai putea fi identificate de către receptor și ca urmare informația purtată nu mai poate fi obținută.

Pentru un mediu dat, cu o bandă de trecere dată, există, prin urmare, o valoare minimă a lui τ pentru care receptorul poate extrage informația utilă din semnalul recepționat. Dacă limita superioară a benzii de trecere este f_{\max} , valoarea minimă este $\tau = \frac{1}{2f_{\max}}$.

Diversele codificări studiate mai sus au diferite rapoarte k între durata medie a unui bit și valoarea lui τ . La codificarea directă, durata unui bit este egală cu τ și deci $k = 1$. La codificarile Manchester și Manchester diferențială, durata unui bit este 2τ și avem $k = 2$. La codurile de grup, durata unui bit util este $\frac{m}{n}\tau$ și avem $k = \frac{m}{n}$. Debitul maxim cu care se pot transmite datele este $\frac{f_{\max}}{k}$.

3.3.2. Modulația

Există situații în care este necesar ca spectrul semnalului să ocupe o bandă departe de frecvența zero. Aceasta se poate întâmpla fie pentru că circuitele sau mediul de transmisie nu pot transmite frecvențele apropiate de zero (este de exemplu cazul transmiterii prin unde radio), fie pentru a putea transmite mai multe semnale pe același mediu prin multiplexare în frecvență (vezi § 3.3.3).

În aceste situații, semnalul rezultat direct în urma uneia dintre schemele de codificare descrise în paragraful precedent nu poate fi transmis direct. O posibilă soluție este *modulația*, descrisă în continuare.

Semnalul transmis efectiv este de forma:

$$U(t) = a \cdot \sin(2\pi ft + \phi),$$

unde unul dintre parametri a , f sau ϕ variază în timp, în funcție de semnalul original, rezultat direct din codificare.

Semnalul original îl numim *semnal primar* sau *semnal modulator*.

Semnalul sinusoidal, rezultat pentru valorile „de repaus” ale parametrilor a , f și ϕ , se numește *semnal purtător*, iar frecvența f de repaus se numește *frecvență purtătoare* și o vom nota în continuare cu f_p .

Semnalul rezultat în urma modulației se numește *semnal modulat*.

Operația de construcție a semnalului modulat pornind de la semnalul primar se numește *modulație*. Operația inversă, de obținere a semnalului primar dându-se semnalul modulat, se numește *demodulație*.

După parametrul modificat, avem:

modulația de amplitudine (prescurtat *MA*, engl. *amplitude modulation*, *AM*), care constă în modificarea amplitudinii a . Semnalul transmis este deci:

$$U(t) = U_0 \cdot s(t) \cdot \sin(2\pi f_p t),$$

unde $s(t)$ este semnalul modulator. Pentru ca amplitudinea $a = U_0 \cdot s(t)$ să fie mai mare decât 0, asupra semnalului $s(t)$ se impune restricția $s(t) > 0$.

Se observă că modulația în amplitudine este liniară (modulația sumei a două semnale $a + b$ este suma rezultatelor modulației independente pentru a și b).

Dacă semnalul modulator este sinusoidal

$$s(t) = 1 + m \cdot \sin(2\pi f_s t + \phi)$$

atunci

$$\begin{aligned} U(t) &= U_0 \cdot s(t) \cdot \sin(2\pi f_p t) = \\ &= U_0 \cdot (\sin(2\pi f_p t) + m \cdot \sin(2\pi f_s t + \phi) \cdot \sin(2\pi f_p t)) = \\ &= U_0 \cdot \left(\sin(2\pi f_p t) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{m}{2} \cos(2\pi(f_p - f_s)t - \phi) - \frac{m}{2} \cos(2\pi(f_p + f_s)t + \phi) \right) \end{aligned} \quad (3.5)$$

adică în urma modulației în amplitudine cu un semnal sinusoidal de frecvență f_s se obține o sumă de trei semnale sinusoidale având frecvențele $f_p - f_s$, f_p și $f_p + f_s$.

Din liniaritatea modulației în amplitudine și din relația (3.5) deducem că, pentru un semnal modulator având un anumit spectru, spectrul semnalului modulat conține frecvența purtătoare și două *benzi laterale*, stângă și dreaptă, acestea cuprinzând diferențele, respectiv sumele, dintre frecvența purtătoare și frecvențele din spectrul semnalului primar.

Întrucât spectrul semnalului modulat este simetric în jurul frecvenței purtătoare, de fapt doar una dintre benzile laterale poartă informație utilă. Din acest motiv, adesea se suprimă total sau parțial de la transmisie una dintre benzile laterale.

modulația de frecvență (prescurtat *MF*, engl. *frequency modulation*, *FM*), care constă în modificarea frecvenței f în jurul frecvenței purtătoare f_p .

Semnalul transmis are forma

$$U(t) = U_0 \cdot \sin(2\pi \cdot (f_p + m \cdot s(t)) \cdot t)$$

unde, din nou, f_p este *frecvența purtătoare*, $s(t)$ este semnalul modulator, iar m este o constantă. Semnalul modulator trebuie să respecte restricția $m \cdot s(t) s_0 \ll f_p$.

Analiza spectrului unui semnal modulat în frecvență este mult mai dificilă decât în cazul modulației în amplitudine.

modulația de fază, care constă în modificarea fazei ϕ .

Semnalul transmis are forma

$$U(t) = U_0 \cdot \sin(2\pi f_p t + m \cdot s(t))$$

Este evident că, întrucât receptorul nu are de obicei un reper absolut de timp, el nu poate detecta decât variațiile de fază ale semnalului recepționat. Ca urmare, o valoare constantă a lui $s(t)$ nu poate fi deosebită de zero și, mai mult, nici variații lente ale lui $s(t)$ nu pot fi detectate. În consecință, spectrul lui $s(t)$ nu poate conține frecvențe prea apropiate de 0.

Există și posibilitatea de-a varia simultan doi sau chiar toți cei trei parametri. *Modulația în cuadratură* constă în varierea simultană a amplitudinii a și a fazei ϕ , pentru a transmite simultan două semnale utile s_1 și s_2 .

Semnalul modulat are forma

$$\begin{aligned} U(t) &= U_0 \cdot \sqrt{s_1(t)^2 + s_2(t)^2} \cdot \sin\left(2\pi f_p t + \arctg \frac{s_1(t)}{s_2(t)}\right) \\ &= U_0 \cdot ((s_1(t)) \cos(2\pi f_p t) + (s_2(t)) \sin(2\pi f_p t)) \end{aligned}$$

3.3.3. Multiplexarea în frecvenţă

Multiplexarea, în general, constă în transmiterea mai multor semnale independente prin acelaşi mediu de transmisie.

Două semnale ale căror spectre se încadrează în benzi disjuncte pot fi separate cu ajutorul unor dispozitive numite *filtre* (de frecvenţă).

Multiplexarea în frecvenţă constă în transmiterea simultană prin acelaşi mediu a unor semnale având spectre încadrate în benzi disjuncte.

Emitătoarele produc semnale cu spectre disjuncte prin modulaţie utilizând frecvenţe purtătoare diferite. De notat că diferenţele între frecvenţele purtătoare trebuie să fie mai mari decât lăţimile de bandă necesare transmisiei semnalelor corespunzătoare.

Fiecare receptor trebuie să fie dotat cu un filtru care să lase să treacă doar banda utilizată de emiţătorul corespunzător.

3.3.4. Capacitatea maximă a unui canal de comunicaţie

Banda de trecere a mediului de transmisie împreună cu raportul semnal/zgomot determină o limită superioară a debitului transmisiei. Limitarea este independentă de schema de codificare utilizată pentru transmisie şi ca urmare este valabilă pentru orice schemă de codificare ne-am putea imagina.

Este util să avem în vedere existenţa acestei limite, în acelaşi fel în care cunoaşterea principiului conservării energiei ne foloseşte pentru a nu încerca construcţia unui perpetuum mobile — încercare din start sortită eşecului.

Pentru un mediu cu lăţimea de bandă Δf şi cu raportul semnal/zgomot s/n , debitul maxim de informaţie ce poate fi transmis este proporţional cu $\Delta f \cdot \log(s/n + 1)$. Acest rezultat provine din următoarele două observaţii:

1. Teorema de eşantionare a lui Shannon spune că un semnal al cărui spectru se încadrează într-un interval $[0, f_{\max})$ este unic determinat de valorile sale la momente de timp situate la intervale egale cu $\Delta t = \frac{1}{2f_{\max}}$ unul de altul.

Ca urmare, un semnal al cărui spectru este inclus în intervalul $[0, f_{\max})$ nu poate purta mai multă informaţie decât eşantioanele semnalului luate la interval $\frac{1}{2f_{\max}}$ unul de altul.

2. În prezența zgomotului, receptorul nu poate distinge între două valori posibile ale semnalului la un anumit moment de timp decât dacă diferența dintre cele două valori este mai mare decât amplitudinea zgomotului.

Ca urmare, cantitatea de informație purtată de un eșantion este limitată la o valoare proporțională cu $\log(s/n + 1)$.

Deoarece pentru o schemă de codificare fixată există o relație de proporționalitate între lățimea de bandă a mediului și debitul maxim al transmisiei, debitul maxim al transmisiei unui echipament de comunicație se numește uneori în mod impropiu tot *lățime de bandă* sau *bandă de trecere*.

3.4. Transmisia prin perechi de conductoare

La transmisia prin perechi de conductoare, mediul constă din două conductoare izolate între ele. Semnalul este considerat a fi tensiunea electrică între conductoare.

3.4.1. Construcția cablului

Conductoarele trebuie realizate dintr-un material cu conductivitate electrică ridicată. Aproape în toate cazurile materialul folosit este cuprul.

Izolația dintre conductoare trebuie să nu absoarbă multă energie dacă este plasată într-un câmp electric variabil. În acest scop doar anumite substanțe sunt potrivite. Materialele utilizate cel mai frecvent sunt polietilena și politetrafluoretilena (cunoscută sub numele de *Teflon*TM). Policlorura de vinil (PVC), utilizată adesea la izolarea conductoarelor de alimentare cu energie electrică, absoarbe prea mult din puterea unui semnal de frecvență mare; din această cauză nu se poate folosi în circuite de semnal. Aerul este cel mai bun izolator, dar nu oferă susținere mecanică.

Ca formă și dispunere relativă, există trei construcții utilizate:

- *Perechea simplă*, în care conductoarele sunt paralele unul față de celălalt. Conductoarele pot fi alcătuite dintr-o singură sârmă de cupru, sau — pentru a fi mai flexibile — dintr-un mănunchi de sârme subțiri. Fiecare conductor este învelit într-un strat izolator.

Adesea, mai multe perechi de conductoare sunt duse împreună, în paralel, formând un cablu. În cadrul unui cablu, este posibil ca un conductor să fie comun, partajat între două sau mai multe circuite de semnalizare. În acest caz, n circuite utilizează $n + 1$ conductoare, în loc de $2n$ câte sunt în cazul în care perechile sunt complet separate.

Avantajul este, evident, reducerea costului, iar dezavantajul este mărirea diafoniei între circuite.

Din cauza diafoniei și sensibilității la zgomote, perechea simplă se utilizează doar pe distanțe mici.

- *Perechea torsadată* (engl. *twisted pair*), în care conductoarele sunt răsucite unul în jurul celuilalt. Rolul răsucirii este de-a micșora interacțiunea cu câmpul electromagnetic înconjurător, adică micșorarea zgomotului indus de un câmp electromagnetic înconjurător și, totodată, micșorarea câmpului electromagnetic produs de semnalul ce trece prin perechea de conductoare. Acest lucru este important în special pentru micșorarea diafoniei cu celelalte perechi de conductoare din același cablu. În afară de răsucire, restul construcției este identică cu perechea simplă. Cablurile formate din perechi torsadate nu au niciodată un conductor comun pentru mai multe circuite.

Este important ca, în cazul unui cablu ce conține mai multe perechi torsadate, fiecare circuit de comunicație să utilizeze conductoarele din aceeași pereche și nu un conductor dintr-o pereche și un conductor din altă pereche. În caz contrar, apare diafonie foarte puternică între circuite (mai mare decât la perechea simplă). De remarcat că această greșeală este ușor de comis în urma unei identificări greșite a conductoarelor dintr-un cablu și nu este pusă în evidență de dispozitivele simple de testare, care verifică doar continuitatea în curent continuu a conductoarelor cablului.

- *Perechea coaxială* are unul din conductoare în forma unui cilindru gol în interior, iar celălalt conductor este dus prin interiorul primului conductor și izolat electric față de acesta. Conductorul exterior este format de obicei dintr-o plasă formată din sârme subțiri de cupru, înfășurate elicoidal, o parte din fire fiind înfășurate într-un sens și altă parte în celălalt sens.

Cablul coaxial este și mai protejat de interferențe decât perechea torsadată. Are de obicei atenuare mai mică decât perechea simplă sau cea torsadată. Costul este însă mai ridicat.

În oricare dintre variante, pentru a reduce suplimentar interferențele cu câmpul electromagnetic înconjurător, perechea de conductoare poate fi *ecranată*, adică învelită într-un strat conductor continuu. Pentru ca ecranul să fie eficient, trebuie să aibă continuitate de jur împrejurul conductoarelor (dacă este realizat prin înfășurarea unei foițe metalice, marginile foiței trebuie să facă contact ferm între ele) și pe lungime (să aibă legătură prin conectoare

către elemente de ecranare ale echipamentelor la care este conectat cablul).

Ecranul unui cablu poate fi colectiv, îmbrăcând întreg cablul, sau individual pentru fiecare pereche de conductoare.

Pe lângă elementele cu rol electric, un cablu conține elemente cu rol de protecție. Orice cablu este înfășurat cel puțin într-o manta de protecție, care ține la un loc și protejează mecanic conductoarele. Mantaua de protecție este fabricată de obicei din PVC.

Un cablu destinat montării aeriene trebuie să fie prevăzut cu un cablu de oțel pentru susținere mecanică. Un cablu destinat montării subterane trebuie prevăzut cu un scut metalic contra rozătoarelor.

3.4.2. Proprietăți ale mediului

În cele ce urmează vom presupune că lungimea cablului este fie de același ordin de mărime fie mai mare decât raportul dintre viteza luminii în vid și frecvența maximă din spectrul semnalului. În aceste condiții, perechea de conductoare are comportament de *linie lungă*, adică semnalul se propagă din aproape, sub forma unei unde, de-a lungul perechii de conductoare.

Proprietățile electrice mai importante ale mediului sunt:

Viteza de propagare a semnalului prin mediu. Este identică cu viteza de propagare a undelor electromagnetice în materialul dielectric dintre conductoare. Se specifică de obicei prin raportare la viteza luminii în vid (notată c , $c \approx 3 \times 10^8$ m/s). În mod tipic $v \approx 0,67 \times c \approx 2 \times 10^8$ m/s

Banda de trecere a mediului. Se întinde de la zero până la o frecvență maximă de ordinul a câteva sute de megahertzi sau câțiva gigahertzi. Limitările sunt date de două fenomene independente, pierderile în dielectric (la frecvențe mari dielectricul absoarbe o parte din energia câmpului electric dintre conductoare) și efectul pelicular (la frecvențe mari curentul electric din conductoare nu circulă uniform în toată masa acestora ci doar în vecinătatea suprafeței). Îmbătrânirea izolației cablului duce la micșorarea frecvenței maxime a benzii de trecere.

Atenuarea semnalului. Factorul de atenuare crește exponențial cu lungimea mediului. În consecință, logaritmul factorului de atenuare crește liniar cu lungimea mediului. Ca urmare, pentru un tip de cablu se specifică raportul dintre logaritmul factorului de atenuare și lungimea corespunzătoare, în decibeli pe kilometru. Cu titlu de exemplu, dăm câteva valori tipice: 17 dB/km pentru cablu coaxial „Ethernet gros“; 120 dB/km pentru cablu torsadat Ethernet.

Impedanța caracteristică a mediului. Să presupunem că atașăm la un capăt al unei bucăți infinite de cablu o sursă de tensiune alternativă. Se

observă că intensitatea curentului ce trece prin sursă și prin capătul dinspre sursă al cablului este proporțională cu tensiunea. Raportul dintre tensiune și intensitate se numește *impedanța caracteristică* a cablului.

Receptorul se caracterizează și el printr-o *impedanță de intrare*, definită ca raportul dintre tensiunea aplicată la bornele receptorului și intensitatea curentului absorbit de receptor. Emițătorul se caracterizează printr-o *impedanță de ieșire*, definită ca raportul dintre scăderea tensiunii la borne cauzată de absorbția unui curent de către un dispozitiv montat la bornele emițătorului și intensitatea curentului absorbit.

Dacă la un capăt de cablu de o anumită impedanță legăm un cablu de altă impedanță sau dacă emițătorul sau receptorul atașat are altă impedanță decât impedanța caracteristică a cablului, spunem că avem o *neadaptare de impedanță*. În acest caz, joncțiunea respectivă reflectă o parte din semnalul incident (este analog reflexiei luminii la trecerea din aer în sticlă, sau în general între medii cu indice de refracție diferit).

Reflexia produce două neajunsuri: pe de o parte scade puterea semnalului util ce ajunge la receptor, iar pe de altă parte un semnal ce suferă două reflexii succesive se poate suprapune peste semnalul util și, fiind întârziat față de acesta, îl distorsionează.

Impedanța se măsoară în *ohmi* (simbol Ω). Cablul pentru televiziune are impedanța de 75Ω . Cablul coaxial pentru rețea Ethernet are impedanța de 50Ω . Cablul torsadat Ethernet are 100Ω .

3.4.3. Legătură magistrală

La o pereche de conductoare pot fi conectate mai multe emițătoare sau receptoare. O astfel de interconectare poate avea două scopuri: pentru a realiza simplu o comunicație de tip difuziune (un emițător transmite simultan către mai multe receptoare) sau pentru a permite mai multor calculatoare să comunice fiecare cu fiecare.

O astfel de pereche de conductoare la care se leagă mai multe dispozitive se numește *magistrală*.

Realizarea mediului fizic, în acest caz, este complicată de necesitatea de a avea adaptare de impedanță în fiecare punct al mediului. În general, la simpla conectare a trei perechi de conductoare sau, echivalent, la ramificarea unei perechi apare, în punctul de ramificație, o neadaptare de impedanță.

Există dispozitive mai complicate (conținând transformatoare de semnal) care permit ramificarea unei perechi de conductoare fără a introduce o

neadaptare de impedanță, însă nu permit propagarea semnalului de la fiecare ramură spre toate celelalte.

O altă soluție de conectare a mai multor dispozitive (emițătoare sau receptoare) la un cablu constă în realizarea unei ramificații foarte scurte, astfel încât să nu aibă comportament de linie lungă (la frecvențele cu care se lucrează uzual, aceasta înseamnă cel mult câțiva centimetri), la capătul căreia se conectează emițătorul sau receptorul. Emițătorul sau receptorul astfel conectat trebuie să aibă impedanța de ieșire, respectiv de intrare, mult mai mare decât impedanța perechii de conductoare la care se conectează. O astfel de conectare se utilizează, de exemplu, în rețelele Ethernet vechi (vezi § 9.1.3 și fig. 9.1).

Dacă un capăt de pereche de conductoare este lăsat liber (neconectat), el produce reflexii. De fapt, un capăt neconectat poate fi văzut ca o joncțiune de la perechea ce are o anumită impedanță la un dispozitiv având impedanța infinită. Pentru evitarea reflexiilor, la capătul unei perechi de conductoare trebuie montat un dispozitiv numit *terminator*. Terminatorul este un simplu rezistor, având rezistența egală cu impedanța cablului. El absoarbe integral semnalul incident, neproducând nici un fel de reflexie. Notăm că terminatoarele sunt utilizate în mod normal doar pe legături magistrală; pe legăturile punct la punct, emițătorul și receptorul au, în mod obișnuit, impedanța necesară, astfel încât joacă și rol de terminator.

3.4.4. Considerente practice

Transmisia prin conductoare electrice este cea mai simplă de realizat deoarece calculatoarele însele folosesc intern semnale electrice pentru transmiterea, stocarea și prelucrarea informației. De asemenea, tăierea la dimensiune a cablurilor și montarea conectoarelor se pot realiza cu unelte relativ ieftine și fără a necesita prea multă calificare din partea lucrătorilor. Aceste motive fac ca, în majoritatea situațiilor practice, perechile de conductoare să fie încă cea mai potrivită soluție pentru comunicații pe distanțe mici.

Faptul că mediul de transmisie este conductor ridică însă probleme speciale, în situațiile în care prin conductoarele mediului de transmisie ajung să curgă curenți din alte surse.

Astfel, între carcusele, legate la pământarea rețelei electrice, a două calculatoare sau alte echipamente, poate apărea o tensiune electrică de ordinul câtorva volți; dacă echipamentele sunt conectate la rețelele electrice a două clădiri diferite, tensiunea dintre carcuse de propagare lor poate fi chiar mai mare. Pentru ca aceasta să nu perturbe semnalul util, în construcția plăcilor de rețea trebuie luate măsuri speciale de izolare. Dacă unul dintre conduc-

toare este expus atingerii cu mâna (este cazul la rețelele Ethernet cu cablu coaxial, unde conductorul exterior este legat la partea metalică exterioară a conectorilor), standardele de protecție la electrocutare cer legarea la pământ a conductorului respectiv; legarea la pământ trebuie însă făcută într-un singur punct pentru a evita suprapunerea peste semnalul util a tensiunilor dintre diverse puncte ale rețelei de pământare.

O altă sursă de tensiuni parazite între conductoarele de semnal sunt descărcările electrice din atmosferă (fulgerele și trăznetele). Deoarece în mod normal conductoarele rețelei sunt izolate față de rețeaua de pământare, fenomenele atmosferice pot induce tensiuni ridicate între conductoarele rețelei și carcasele echipamentelor, putând duce la distrugerea echipamentelor rețelei. Ca urmare, în cazul unor cabluri de rețea duse prin exteriorul clădirilor, este necesară fie ecranarea cablului și legarea ecranului la pământ, fie amplasarea unor *descărcătoare* care să limiteze tensiunea dintre conductoarele rețelei și pământ.

3.5. Transmisia prin unde radio

Undele electromagnetice sunt oscilații ale câmpului electromagnetic. Aceste oscilații se propagă din aproape în aproape.

Frecvența unei unde electromagnetice este frecvența de oscilație a câmpului electromagnetic într-un punct fixat din spațiu.

Lungimea de undă a unei unde este distanța parcursă de undă în timpul unei oscilații complete. Lungimea de undă se notează cu λ și are valoarea $\lambda = \frac{v}{f}$, unde f este frecvența și v este viteza de propagare. Viteza de propagare depinde de mediul în care se propagă unda. Ca urmare, lungimea de undă se modifică la trecerea dintr-un mediu în altul.

Lungimea de undă se utilizează adesea în locul frecvenței pentru a caracteriza unda. În acest caz lungimea de undă se calculează pentru viteza de propagare a undelor electromagnetice în vid $v = c = 3 \times 10^8$ m/s.

Viteza de propagare în aer este foarte apropiată de viteza în vid; pentru majoritatea scopurilor cele două viteze pot fi considerate egale.

Undele radio sunt unde electromagnetice având frecvențe la care pot să lucreze dispozitivele electronice; în funcție de autori, limita de jos a frecvențelor undelor radio este cuprinsă între 30 Hz ($\lambda = 10000$ km) și 3 kHz ($\lambda = 100$ km), iar limita de sus a frecvențelor este cuprinsă între 1 GHz ($\lambda = 30$ cm) și 300 GHz ($\lambda = 1$ mm), cu observația că undele electromagnetice din intervalul 1 GHz – 300 GHz se numesc *microunde* și unii autori consideră că microundele nu fac parte dintre undele radio ci sunt o categorie separată de acestea.

De interes practic în rețelele de calculatoare sunt undele radio în intervalul 300 MHz – 30 GHz, sau echivalent, cu lungimile de undă cuprinse între 1 m și 1 cm.

La transmisia prin unde radio, mărimile fizice utilizate ca semnal sunt intensitatea câmpului electric și inducția magnetică. Cele două mărimi sunt proporționale în modul și au direcții perpendiculare una pe cealaltă și pe direcția de propagare a undei.

Într-un sistem de transmisie prin unde radio, emițătorul cuprinde două blocuri distincte: un dispozitiv electronic, care produce un semnal de tip tensiune și intensitate electrică, și *antena*, care convertește semnalul din tensiune și intensitate electrică în câmp electromagnetic.

Receptorul constă de asemenea dintr-o antenă, care plasată în calea undelor electromagnetice transformă semnalul din câmp electromagnetic în tensiune și intensitate electrică, și un dispozitiv electronic, care decodifică semnalul electric.

Orice antenă poate servi atât la emisie cât și la recepție. (Singura diferență ce apare între antene este că antenele de emisie de putere mare trebuie construite astfel încât să suporte tensiunile și curenții mari ce apar în elementele lor.)

Mai multe proprietăți ale sistemului de transmisie fac ca lățimea benzii de trecere a întregului sistem să fie îngustă în raport cu frecvențele între care se încadrează banda de trecere; raportul între lățimea benzii și limita inferioară a benzii este în mod tipic de cel mult câteva procente. Din această cauză, transmisia prin unde radio este întotdeauna cu modulație, iar frecvența purtătoare este cel puțin de câteva zeci de ori mai mare decât lățimea de bandă.

De exemplu, pentru o viteză de transmisie de 10 Mbit/s avem în mod tipic nevoie de o lățime de bandă apropiată de 10 MHz, pentru care frecvența purtătoare va fi de cel puțin 200 MHz.

3.5.1. Propagarea undelor

3.5.1.1. Polarizarea

Câmpul electromagnetic se caracterizează prin două mărimi vectoriale, definite pentru fiecare punct din spațiu: *intensitatea câmpului electric*, notată cu \vec{E} , și *inducția magnetică*, notată cu \vec{B} .

Într-un fascicul de unde electromagnetice, paralel și mult mai lat decât lungimea de undă, vectorii \vec{E} și \vec{B} sunt întotdeauna perpendiculari unul pe celălalt și pe direcția de deplasare a undelor.

Dacă \vec{E} are direcție constantă și îi variază doar sensul și modulul,

fasciculul se numește *polarizat liniar*. Un fascicul polarizat liniar se caracterizează prin direcția vectorului \vec{E} , numită *direcția de polarizare*.

Dacă \vec{E} are modul constant și direcția lui se rotește uniform, în plan perpendicular pe direcția de deplasare a undei, fasciculul se numește *polarizat circular*. Se distinge *polarizare circulară stângă* dacă, privind în direcția de propagare a undelor, dinspre emițător spre receptor, direcția lui \vec{E} se rotește în sens invers acelor de ceas; și *polarizare circulară dreaptă* dacă \vec{E} se rotește în sensul acelor de ceas.

Un fascicol cu polarizare circulară rezultă de fapt prin suprapunerea a două fascicole, de amplitudine egală, polarizate perpendicular unul pe celălalt, deplasându-se în aceeași direcție și cu un decalaj de un sfert de ciclu între ele. Dacă cele două fascicole au amplitudini diferite, rezultă ceea ce se numește *polarizare eliptică*; polarizarea liniară și polarizarea circulară sunt de fapt cazuri particulare de polarizare eliptică.

3.5.1.2. Absorbția și reflexia

Absorbția undelor radio în aer este neglijabilă.

Picăturile de apă (din ploaie, nori, ceață) absorb destul de puternic undele radio, în special microundele. Apa absoarbe puternic toate undele radio; de aceea este greu de obținut legătură radio sub apă. Absorbție moderată se produce în pământ și în diferite materiale de construcție.

Scăderea puterii undelor radio datorită absorbției este exponențială cu distanța, ca și în cazul propagării semnalelor prin cabluri.

Metalele reflectă undele radio. Plasele metalice care au contact bun între firele componente și au ochiurile mult mai mici decât lungimea de undă se comportă ca o suprafață metalică compactă. Armăturile clădirilor din beton armat nu fac contact electric prea bun între ele, însă perturbă serios propagarea undelor radio.

Ionosfera reflectă undele cu lungimi de undă de ordinul metrilor; prin reflexii repetate între Pământ și ionosferă, aceste unde pot parcurge ușor multe mii de kilometri.

3.5.1.3. Difracția

Orice undă ocolește obstacolele mai mici decât o fracțiune din lungimea de undă, în vreme ce în spatele obstacolelor mai mari de câteva lungimi de undă „rămâne umbră“. De aceea, undele lungi, cu lungime de undă de ordinul kilometrilor sau sutelor de metri sunt capabile să ocolească obstacole mari, inclusiv curbura Pământului pe distanță de câteva sute sau chiar mii de kilometri. Prin contrast, undele cu lungime de undă sub câțiva metri se propagă aproape numai în linie dreaptă, dealurile sau clădirile mai mari putând provoca umbre.

3.5.1.4. Interferența undelor

Dacă într-un punct ajung unde pe mai multe căi, de exemplu o cale directă și o cale prin reflexia pe un obstacol, unda recepționată în acel punct este suma undelor ce ajung pe toate căile.

Dacă diferența de drum între două căi este un număr întreg de lungimi de undă, dar mult mai mică decât lungimea unui bit, undele se suprapun în fază și se adună, semnalul recepționat fiind mai puternic. Dacă diferența de drum este apropiată de un număr impar de lungimi de undă, undele se suprapun în antifază și se anulează reciproc, semnalul recepționat fiind slab sau nul. În aceste situații, deplasarea receptorului (sau emițătorului) pe o distanță de la un sfert din lungimea de undă și până la de câteva ori lungimea de undă poate modifica mult calitatea semnalului (reamintim că în transmisiile de date se utilizează lungimi de undă cuprinse între 1 cm și 1 m). Schimbarea lungimii de undă pe care se face transmisia poate de asemenea modifica mult efectul.

Dacă diferența de drum între semnalele recepționate pe căi diferite este comparabilă sau mai mare decât lungimea unui bit și puterile semnalului pe cele două căi sunt apropiate, semnalele propagate pe cele două căi se bruiază reciproc. Situația apare mult mai rar decât cea prezentată mai sus, însă nu poate fi corectată decât prin mutarea stațiilor față de obstacolele ce produc reflexiile.

3.5.1.5. Divergența undelor

Pe măsură ce ne depărtăm de emițător, puterea semnalului scade datorită extinderii frontului de undă. Densitatea puterii este invers proporțională cu suprafața frontului de undă, care la rândul ei este proporțională cu pătratul distanței față de emițător.

Ca urmare, puterea recepționată P_r este invers proporțională cu pătratul distanței d dintre emițător și receptor:

$$P_r = P_e \cdot \alpha \cdot \frac{1}{d^2}$$

unde α este o constantă ce depinde de construcția antenelor de emisie și de recepție, iar P_e este puterea emițătorului.

Scăderea puterii datorită extinderii frontului de undă este independentă de eventuala absorbție a undelor în mediu; aceasta din urmă duce la o scădere exponențială cu distanța a puterii semnalului.

3.5.2. Antene

O *antena* este un dispozitiv care realizează conversia între un semnal electric (tensiune și intensitate electrică) pe o pereche de conductoare și

oscilațiile electromagnetice în mediul înconjurător antenei. Orice antenă este reversibilă: dacă i se aplică un semnal electric la borne, va radia unde electromagnetice și, reciproc, dacă este plasată în calea undelor electromagnetice, va produce semnal electric la borne.

În general o antenă este optimizată pentru o anumită bandă de trecere.

O antenă are un anumit *randament*, definit ca raportul dintre puterea unei electromagnetice radiate și puterea absorbită din semnalul electric primit.

3.5.2.1. Directivitatea

O antenă nu radiază uniform de jur împrejur. Prin *câștigul* (engl. *gain*) unei antene *pe o direcție* se înțelege raportul dintre puterea radiată pe acea direcție și puterea radiată de o antenă etalon, în aceleași condiții. Ca etalon se utilizează de obicei o antenă ipotetică care ar radia egal în toate direcțiile și ar avea randamentul 100%. Deoarece energia se conservă, câștigul este pe unele direcții supraunitar și pe altele subunitar, integrala lui pe întreaga sferă fiind $4\pi\eta$ (unde η reprezintă randamentul antenei). Câștigul este dat uneori direct, alteori este dat logaritmul câștigului, exprimat în decibeli.

Câștigul antenei pe diverse direcții este reprezentat grafic prin *diagramele de câștig*. O astfel de diagramă este o reprezentare a câștigului ca funcție de unghi pe toate direcțiile dintr-un plan.

O direcție de maxim local al câștigului, împreună cu direcțiile apropiate, se numește *lob*. Lobul care cuprinde maximul global al câștigului se numește *lobul principal* al antenei. Ceilalți lobi se numesc *lobi secundari* sau *lobi laterali*. Valoarea maximă, pentru toate direcțiile posibile, a câștigului este numită *câștigul antenei*.

O antenă optimizată să aibă câștig cât mai mare pe o direcție, în detrimentul celorlalte direcții, se numește *antenă directivă*. O antenă optimizată pentru a avea câștig cât mai uniform, cel puțin în planul orizontal, se numește *antenă nedirectivă*. O antenă cu câștig perfect uniform de jur împrejur (radiator izotrop) este imposibil de realizat.

Există o legătură între dimensiunea antenei, directivitatea și lungimea de undă la care funcționează. Anume, raza unghiulară a lobului principal (măsurată în radiani) nu poate fi mai mică decât raportul dintre diametrul antenei și lungimea de undă. Ca exemplu, pentru a obține un lob principal de 3° ($\approx 0,05$ rad) la o lungime de undă de 6 cm ($f = 5$ GHz) avem nevoie de o antenă de cel puțin 1,2 m diametru. Limitarea aceasta este legată de fenomenele de difracție a undelor și nu poate fi ocolită.

O antenă de recepție plasată în calea undelor recepționează o putere proporțională cu densitatea de putere a undei incidente. Raportul dintre puterea disponibilă la bornele antenei și densitatea de putere a undei incidente se numește *aria efectivă* sau *apertura* antenei. Apertura poate fi privită ca suprafața, transversală pe direcția de propagare a undelor, de pe care antena preia întreaga energie. Apertura depinde de direcția considerată a undei incidente.

Apertura față de o anumită direcție a undei incidente este proporțională cu câștigul antenei pe acea direcție. Relația este:

$$S = G \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (3.6)$$

unde S este aria efectivă, G este câștigul, iar λ este lungimea de undă.

Utilizând relația (3.6), se poate calcula puterea recepționată, dacă distanța dintre emițător și receptor este mult mai mare decât dimensiunile antenelor:

$$\begin{aligned} P_r &= P_e \cdot G_e \cdot \frac{1}{4\pi d^2} \cdot S_r = \\ &= P_e \cdot G_e \cdot \frac{\lambda^2}{16\pi^2 d^2} \cdot G_r \end{aligned}$$

unde P_r este puterea disponibilă la bornele antenei receptoare, P_e este puterea aplicată la bornele antenei emițătoare, d este distanța dintre emițător și receptor, G_e este câștigul emițătorului pe direcția spre receptor, iar G_r și S_r sunt respectiv câștigul și apertura antenei receptoare pe direcția spre emițător.

EXEMPLUL 3.1: Considerăm un emițător (de exemplu, un calculator dintr-o rețea IEEE 802.11 — *wireless*) care emite un semnal cu puterea $P_e = 100$ mW (sau, echivalent, +20 dBm) și frecvența $f = 2,4$ GHz (lungimea de undă este atunci $\lambda = 0,125$ m). Mai presupunem că receptorul se găsește la o distanță $d = 100$ m față de emițător, că absorbția semnalului este neglijabilă (emițătorul și receptorul se găsesc în câmp deschis și nu plouă) și că ambele antene au un câștig $G_e = G_r = 2$ pe direcția spre partenerul de comunicație. Rezultă puterea semnalului recepționat:

$$P_r = 10^{-1} \text{ W} \cdot 2 \cdot \frac{(0,125 \text{ m})^2}{16\pi^2 (100 \text{ m})^2} \cdot 2 \approx 3,9 \cdot 10^{-9} \text{ W},$$

adică aproximativ -84 dBm.

3.5.2.2. Polarizarea

Antenele cele mai simple au polarizare liniară: unda emisă este polarizată liniar, pe o direcție stabilită prin construcția antenei. Rotirea antenei emițătorului față de cea a receptorului duce la variația semnalului recepționat între un maxim (când direcțiile polarizărilor celor două antene sunt paralele) și un minim (teoretic zero) când direcțiile sunt perpendiculare.

O antenă polarizantă liniar va recepționa întotdeauna, indiferent de direcția de polarizare, o transmisie polarizată circular; reciproc, o antenă polarizantă circular va recepționa o emisie polarizată liniar. O antenă polarizantă circular va recepționa o transmisie polarizată circular numai dacă are același sens al polarizării. Rotirea antenelor în jurul dreptei ce le unește nu are efect.

3.5.2.3. Tipuri de antene

Antenele nedirective sunt de cele mai multe ori un simplu baston metalic (de fapt, bastonul este un pol, iar carcasa aparatului sau, după caz, Pământul, este celălalt pol). O astfel de antenă are câștig maxim în planul orizontal (perpendicular pe baston) și zero pe direcție verticală (în lungul bastonului). Undele produse sunt polarizate vertical.

Antenele directive cele mai răspândite pentru comunicații de date sunt așa-numitele *antene parabolice* (denumire improprie, pentru că forma parabolică este a reflectorului antenei). O astfel de antenă este alcătuită dintr-o oglindă în formă de paraboloid de rotație, în focarul căreia este plasată antena propriu-zisă. (În alte construcții, antena propriu-zisă este plasată în altă parte, iar unda electromagnetică este adusă în focarul reflectorului parabolic printr-un tub metalic numit *ghid de undă*.)

3.5.3. Raza de acțiune a unei legături radio

Spre deosebire de legăturile prin perechi de conductoare sau prin fibre optice, legăturile prin unde radio nu pot fi delimitate net la un anumit domeniu. Dăm în continuare factorii care influențează raza de acțiune a unei legături radio. Uneori vom dori să îi contracarăm, pentru a extinde domeniul de acțiune, alții dimpotrivă, îi vom dori să ne mențină o legătură radio într-un domeniu spațial limitat pentru a nu interfera cu legături radio din apropiere. Cabluri electrice sau optice putem duce câte dorim; câmp electromagnetic este numai unul. . .

3.5.3.1. Obstacolele

Obstacolele limitează raza de acțiune a legăturii radio. Mai mult, din cauza interferenței dintre undele reflectate pe diferite căi, este dificil de analizat

exact punctele în care este posibilă recepția unei emisii radio și punctele în care emisia este obstrucționată.

3.5.3.2. Linia orizontului

Unul dintre obstacolele ce limitează raza de acțiune a undelor radio este însuși Pământul, prin curbura suprafeței sale. O stație aflată la o anumită înălțime poate comunica cu o stație aflată la nivelul solului dacă și numai dacă stația de pe sol se află mai aproape decât linia orizontului celeilalte stații. Două stații pot comunica dacă există cel puțin un punct comun orizontului celor două stații.

În câmpie, distanța până la linia orizontului este (r desemnează raza Pământului, iar h este înălțimea antenei deasupra suprafeței Pământului):

- măsurată de-a lungul curburii, de la baza turnului în care se află observatorul: $d = r \cdot \arccos \frac{r}{h+r}$;
- măsurată în linie dreaptă de la observator:

$$d = \sqrt{(r+h)^2 - r^2} = \sqrt{h(2r+h)};$$

- dacă $h \ll r$, $d \approx \sqrt{2rh}$. De remarcat că dacă exprimăm numeric $2r$ în mii de kilometri ($2r \approx 12,7 \times 10^3$ km) și h în metri, distanța d rezultă în kilometri.

Exemple:

Distanța până la linia orizontului pentru un observator aflat la 1,6 m deasupra pământului (de exemplu un radiotelefon ținut în mână) este $d = \sqrt{12,7 \cdot 1,6}$ km $\approx 4,5$ km.

Un turn cu înălțimea de 20 m (obișnuit pentru un releu GSM) are linia orizontului la 16 km. O stație aflată într-un astfel de turn poate comunica cu un radiotelefon ținut în mână la o distanță de $16 \text{ km} + 4,5 \text{ km} = 20,5 \text{ km}$ (de regulă raza de acțiune a unui releu GSM este limitată de alte considerente).

De pe un turn cu înălțimea de 50 m, distanța la linia orizontului este $d = \sqrt{12,7 \cdot 50}$ km ≈ 25 km. Două relee de telecomunicații având 50 m înălțime fiecare pot comunica direct dacă sunt la mai puțin de 50 km unul de altul.

Distanța la linia orizontului crește încet cu înălțimea; dacă se dublează înălțimea, distanța la linia orizontului crește cu un factor de $\sqrt{2} \approx 1,4$.

3.5.3.3. Utilizarea sateliților artificiali ai Pământului

Sateliții artificiali ai Pământului sunt utilizați ca echivalentul unor turnuri înalte pentru montarea unor stații radio. După altitudinea la care

sunt plasați, distingem trei categorii de sateliți:

sateliți de joasă altitudine aflați între 200...1000 km, cu perioada de rotație de 1,5...1,8 h;

sateliți de altitudine medie între 10000...15000 km (raza orbitei de 3–4 ori raza Pământului), cu perioada de rotație de 6...9 h;

sateliți geostaționari aflați la 35800 km deasupra ecuatorului, au perioada de rotație de exact o zi și ca urmare apar ficși față de Pământ.

Un satelit are o arie de acoperire incomparabil mai mare față de o stație terestră. La 200 km altitudine, un satelit acoperă o rază de 1500 km, iar un satelit de medie altitudine acoperă o rază de peste 7000 km.

Din cauza distanțelor mari, comunicația cu sateliții necesită fie puteri mari, fie antene cu directivitate foarte bună. Este de remarcat faptul că distanța de la un satelit la o stație terestră este de la câteva zeci la câteva sute de ori mai mare decât distanța de la un releu amplasat într-un turn la o stație terestră. Ca urmare, pentru aceleași antene, puterile necesare sunt de la câteva sute la câteva sute de mii de ori mai mari.

La comunicația între sateliți geostaționari și stații fixe de pe sol se pot utiliza relativ ușor antene cu directivitate bună, deoarece antenele de pe sol sunt fixe. Orbita geostaționară este însă destul de „aglomerată”: presupunând că avem antene ce dau un fascicul cu diametrul unghiular de 6° , (vezi exemplul în care rezulta, pentru $f = 5$ GHz, un diametru al antenei de peste 1,2 m) putem distinge doar între 60 de sateliți distincți.

Pentru sateliții care nu sunt geostaționari, utilizarea antenelor directive necesită un sistem foarte complicat de urmărire a satelitului.

3.5.3.4. Zgomotul

Zgomotul în transmisiile radio provine din multe surse, între altele aparatură electronică, întrerupătoare electrice (inclusiv colectoarele motoarelor de curent continuu). Transmisiile radio sunt mult mai sensibile la zgomot decât transmisiile prin conductoare electrice, deoarece la conductoare electrice undele radio pătrund accidental în semnal, din cauza ecranării imperfecte, pe câtă vreme la transmisiile radio semnalul util se amestecă direct cu zgomotul radio ambiant.

Nivelul zgomotului radio ambiant este un factor important care limitează inferior pragul de sensibilitate al receptorului și, în consecință, fixează puterea minimă pentru o anumită distanță emițător-receptor.

Nivelul de zgomot scade în general o dată cu creșterea frecvenței.

3.5.3.5. Scăderea puterii cu distanța

Densitatea de putere a undelor electromagnetice scade cu pătratul distanței de la emițător. Ca urmare, la o sensibilitate fixată a receptorului, pentru a dubla raza de acțiune a emițătorului trebuie să-i creștem puterea de 4 ori.

Pe de altă parte, dacă două emițătoare radio funcționează în aceeași regiune geografică și emit pe frecvențe identice sau foarte apropiate, atunci transmisia mai puternică „acoperă” transmisia mai slabă. Aceasta se întâmplă deoarece semnalele celor două emițătoare se suprapun. Dacă, în punctul în care este plasat receptorul, puterea unuia dintre emițătoare este mult mai mare decât puterea celuilalt, atunci receptorul va recepționa doar transmisia mai puternică, chiar dacă, singură, transmisia mai slabă ar putea fi recepționată corect. Dacă puterile sunt apropiate, receptorul nu va putea „înțelege” nici una dintre transmisii.

3.5.3.6. Emisia direcționată și polarizată

Domeniul de acțiune a unui emițător sau receptor poate fi restrâns în mod voit dotând emițătorul sau receptorul (de obicei ambele) cu antene directive. Trebuie însă calculate cu atenție divergența lobului principal, puterea emisă pe lobi secundari ai antenei și reflexiile de teren.

Polarizarea se poate utiliza pentru a separa două transmisii pe aceeași direcție și pe aceeași lungime de undă. În cazul utilizării polarizării liniare, cele două transmisii trebuie să utilizeze direcții de polarizare perpendiculare; în cazul polarizării circulare se vor folosi cele două sensuri (stânga și dreapta). Lobii secundari ai antenelor, precum și undele reflectate de diverse corpuri, au polarizări greu de controlat.

3.5.4. Spectrul radio și alocarea lui

Începem cu o precizare de terminologie: în general când este vorba de semnale, termenul de *frecvență* se utilizează cu sensul de frecvența unei componente în descompunerea Fourier a semnalului, iar termenul de *bandă* se folosește cu sensul de interval de frecvențe între care se încadrează spectrul Fourier al unui semnal.

În comunicații radio, termenul de frecvență se utilizează adesea și cu sensul de interval de frecvențe în care se încadrează o transmisie (efectiv, bandă în sensul de la semnale). Frecvențe diferite, în acest sens, înseamnă de fapt benzi disjuncte. Valoarea numerică a frecvenței, specificată în acest context, este frecvența purtătoare utilizată. Limitele efective ale benzii se determină din standardul de transmisie folosit.

Noțiunea de *bandă în care se face transmisia* specifică în acest context un interval de frecvențe alocat pentru o anumită categorie de transmisii radio. Benzile, în acest sens, se specifică fie printr-o anumită frecvență sau lungime de undă, din interiorul benzii, și având o valoare „rotundă“, fie printr-un nume. Limitele benzii se găsesc în standarde.

Două transmisii radio ce se fac pe frecvențe diferite, sau mai precis, a căror benzi de trecere sunt disjuncte, pot fi separate în general ușor. Separarea în frecvență este mult mai ușor controlabilă decât separarea spațială studiată în § 3.5.3. Două transmisii pe aceeași frecvență și în aceeași zonă geografică sunt practic imposibil de separat, dacă au puteri apropiate, sau transmisia mai slabă este imposibil de recepționat fiind „acoperită“ de cea mai puternică.

Pentru evitarea suprapunerilor între utilizatori, utilizarea diverselor benzi de frecvențe face obiectul unor reglementări legale în fiecare țară, precum și a unor acorduri internaționale. Emiterea unui semnal radio, pe o frecvență pentru care operatorul emițătorului nu este autorizat sau de o putere mai mare decât cea autorizată, poate duce la sancționarea contravențională sau chiar penală a operatorului.

În majoritatea cazurilor, un utilizator de comunicații radio care dorește să opereze un emițător trebuie să obțină o autorizație în care se specifică frecvența de lucru, puterea maximă, zona geografică în care operează, etc. Există frecvențe alocate posturilor de radio, sistemelor de comunicații radio ale diferitelor instituții (poliție, controlorii de trafic aerian, dispecerate de taxiuri, operatori de telefonie mobilă, etc.). Tot în această categorie, însă cu un statut aparte sunt radioamatorii: frecvențele sunt alocate activității de radioamator și nu unei persoane sau instituții, însă radioamatorii trebuie să se înregistreze pentru a putea emite.

Există însă benzi pentru care nu este necesară o autorizare expresă a emițătorului, cu condiția ca emițătorul să nu depășească o anumită putere. În această categorie intră frecvențele folosite de: rețelele IEEE 802.11 (Wireless Ethernet) și Bluetooth, tastaturi și mași fără fir, telefoanele fără fir, microfoanele fără fir, walkie-talkie-urile de jucărie, jucării cu telecomandă prin radio, telecomenzi pentru deschis garajul. Utilizatorul unor astfel de echipamente trebuie totuși să fie atent la eventualele diferențe între reglementările din diferite țări: un echipament poate funcționa legal fără autorizație în țara de origine, dar să necesite autorizație în altă țară.

Echipamentele care lucrează pe frecvențe pentru care nu trebuie autorizare ajung să interfereze dacă sunt plasate în apropiere. Unele dintre acestea permit selectarea frecvenței de lucru dintre 2–4 frecvențe predefinite. Utilizatorul va selecta o frecvență diferită dacă constată o funcționare proastă

și suspectează interferențe cu echipamente vecine. Altă soluție este schimbarea repetată a frecvenței de lucru, după o schemă convenită între emițător și receptor, și tolerarea unui număr de ciocniri ale transmisiilor pe perioadele în care echipamentele vecine se nimeresc aceeași frecvență. Tehnica se numește *frequency hopping* (salturi ale frecvenței).

Mai menționăm că, printre producătorii de semnale radio parazite intră și alte dispozitive, având alte scopuri decât comunicațiile. Ca fapt divers, enumerăm câteva:

- Sursele de alimentare de la aproape toate aparatele electronice moderne (așa-numitele *surse în comutație*), precum și blocul de baleiaj de linii de la televizoarele și monitoarele cu tub catodic, emit semnificativ pe frecvențe până la câteva sute de kiloherți (așa-numitele armonice, adică frecvențe care sunt multipli ai frecvenței de lucru a circuitului). Funcționarea acestora bruiază adesea posturile de radio pe unde lungi și uneori chiar medii.
- Radioemițătoarele emit și pe frecvențe ce sunt multipli ai frecvenței purtătoare (armonice). Din acest motiv, se întâmplă uneori ca un post de televiziune să apară, cu semnal foarte slab, și pe un canal superior celui pe care este transmis normal (dar atenție, uneori acest efect este datorat recepției de la un alt releu de televiziune, mai îndepărtat).

3.5.5. Particularități ale sistemelor de comunicație prin radio

3.5.5.1. Topologia legăturii

Legăturile între releele de comunicație radio, amplasate în turnuri și dotate cu antene parabolice, sunt în general punct la punct, ca în cazul legăturilor prin perechi de conductoare.

Legăturile între sateliții geostaționari și stațiile terestre sunt astfel că emisia satelitului este recepționată de mai multe stații de pe Pământ, și reciproc, satelitul recepționează emisia de la mai multe stații de pe Pământ; stațiile de pe Pământ nu comunică însă direct între ele. O astfel de comunicație poate prezenta riscul ca emisiile stațiilor de pe Pământ să se ciocnească fără ca stațiile să observe direct acest lucru.

La echipamente mobile există mai multe posibilități. Pentru distanțe mari, una din stații este fixă și se plasează într-un turn de unde poate comunica direct cu toate celelalte. Celelalte stații nu se „văd“ direct una pe alta și de cele mai multe ori nici dacă „se văd“ protocoalele folosite nu permit comunicații directe între ele (exemplu: telefoanele GSM). Stația centrală primește rol de arbitraj al transmisiilor.

Pentru distanțe mici, se poate adopta o organizare mai „democratică” (exemplu IEEE 802.11): stațiile comunică direct între ele, iar arbitrarea mediului se face prin mijloace asemănătoare cu cele utilizate pe cabluri magistrală (§ 4.2). Spre deosebire însă de cablurile magistrală, unde un pachet emis de o stație de pe cablu este recepționat de toate celelalte și, ca urmare, ciocnirea la recepție a două pachete este sesizată și de către emițătoare, la legăturile radio este posibil ca două transmisii să se ciocnească la receptor dar nici una din stațiile care le-au emis să nu recepționeze transmisia celeilalte.

3.5.5.2. Fiabilitatea

Fiabilitatea unei legături radio este în general mai scăzută decât a unei legături pe cablu:

- Rata de erori este mult mai mare. La o legătură radio, probabilitatea unei erori de un bit este în mod normal de $10^{-3} \dots 10^{-5}$. Pentru comparație, la transmisia prin perechi de conductoare, probabilitatea unei erori de un bit este de $10^{-7} \dots 10^{-10}$, iar la fibrele optice, erorile sunt și mai rare, $10^{-10} \dots 10^{-12}$.
- La frecvențe peste 10 GHz, datorită absorbției în picăturile de apă, starea legăturii poate depinde de starea vremii.
- Umbrele provocate de clădiri și relief, precum și interferențele între undele reflectate, sunt imposibil de calculat în mod practic. O stație ce ajunge în umbră va pierde legătura în mod imprevizibil.

3.5.5.3. Securitatea

La comunicațiile prin cablu pe distanță scurtă, securitatea comunicației poate fi asigurată păzind cablul. Din acest motiv rețelele locale pe cablu pot să nu prevadă măsuri contra intrușilor.

Undele radio nu pot fi păzite, analog cablului. Rețelele fără fir este esențial să aibă incorporate măsuri de securitate. Acestea presupun metode criptografice (vezi capitolul 6) ce previn ascultarea sau contrafacerea unui mesaj, și eventual schimbarea frecvenței (metoda *frequency hopping*) pentru a preveni bruiatul.

3.6. Transmisia optică

Transmisia optică este de fapt tot o transmisie prin unde electromagnetice, dar cu frecvențe mult mai mari, anume din intervalul cuprins între $1,6 \times 10^{14}$ Hz ($\lambda = 1,8 \mu\text{m}$) și $3,7 \times 10^{14}$ Hz ($\lambda = 0,8 \mu\text{m}$). Aceste unde electromagnetice fac parte din categoria undelor infraroșii. Vom folosi termenul de

lumină pentru aceste unde, deși nu se încadrează în domeniul luminii vizibile ($\lambda = 780 \text{ nm} \dots 380 \text{ nm}$).

Mărimea considerată ca semnal este puterea luminoasă. Am putea considera, în mod echivalent, că semnalul transmis de mediu este intensitatea câmpului electric sau inducția magnetică și că utilizăm modulație în amplitudine pentru a transmite semnalul util.

Emisia și recepția se realizează cu dispozitive semiconductoare capabile să emită raze infraroșii la trecerea curentului prin ele (LED-uri, asemănătoare celor de pe panourile de aparate, sau, după caz, diode laser) și, respectiv, care permit trecerea curentului doar în prezența luminii.

Pentru unele aplicații, presupunând comunicație pe distanță de cel mult câțiva metri (de exemplu, pentru telecomenzi de televizoare sau pentru dispozitive IrDA), raza de lumină se propagă direct prin aer de la emițător la receptor. Metoda este dificil de extins la distanțe mai mari.

Raza de lumină poate fi însă foarte ușor ghidată printr-o fibră optică. O fibră optică este în esență un fir dintr-un material transparent, prin interiorul căruia trece lumina. Dacă raza de lumină lovește peretele lateral al fibrei, se întoarce înapoi în fibră. În acest fel, lumina ce intră printr-un capăt al fibrei iese prin celălalt capăt chiar dacă fibra nu este perfect dreaptă.

Fibra optică se mai numește și *ghid de undă optic* (engl. *optical waveguide*), deoarece este identic ca și scop și foarte asemănător funcțional cu ghidul de undă utilizat pentru microunde.

Lungimea fibrei, între emițător și receptor, poate atinge câteva zeci de kilometri. Lucrurile care fac posibilă atingerea unor distanțe atât de mari sunt atenuarea mică (sub 1 dB/km) și imunitatea aproape perfectă la zgomot.

3.6.1. Construcția mediului

Constructiv, o fibră optică este alcătuită dintr-un *miez* (engl. *core*) din silica (bioxid de siliciu, SiO_2 , amorf), înconjurat de un *înveliș* (engl. *cladding*), tot din silica, dar cu un indice de refracție puțin mai mic. Diametrul miezului este principalul parametru dat la o fibră optică; este cuprins între 8 μm și 62,5 μm . Diametrul învelișului este în mod curent de 125 μm . Pentru comparație, diametrul firului de păr uman este de 20...30 μm .

Între miez și înveliș poate fi o discontinuitate netă, sau se poate ca indicele de refracție să scadă gradual. Fibrele cu discontinuitate netă se numesc *fibre optice cu discontinuitate* (engl. *step index fiber*) iar fibrele cu trecere graduală de la miez la înveliș se numesc *fibre optice graduale* (engl. *grade index fiber*).

Fibra propriu-zisă fiind extrem de subțire și fragilă, ea este învelită

în mai multe straturi cu rol de protecție mecanică.

Ideea de bază a conducerii semnalului prin fibră este că o rază de lumină ce se propagă oblic prin miez și atinge suprafața de contact dintre miez și înveliș să se reflecte înapoi în miez. Reflexia trebuie să fie cu pierderi extrem de mici, deoarece o rază se va reflecta de multe ori de la un capăt la celălalt al fibrei.

3.6.1.1. Conectarea fibrelor optice

Problemele legate de conectarea fibrelor optice reprezintă principalul dezavantaj al fibrelor optice față de perechile de conductoare. Conectarea cap la cap a două tronsoane de fibră se poate face:

- *prin lipire*, încălzind fibra până la temperatura de topire a sticlei și având grijă ca să se lipească capetele dar să nu se amestece miezul cu învelișul. Conectarea prin lipire necesită echipamente mai scumpe, este nedemontabilă, dar perturbă cel mai puțin transmiterea semnalului prin fibră. O lipitură produce o atenuare a semnalului în jur de 0,1 dB, din cauza reflexiei unei părți a luminii incidente.
- *prin conectoare optice*. Fiecare capăt de fibră se șlefuieste foarte bine și se prinde într-o piesă metalică cu rol de ghidaj. Piese metalice atașate capetelor de fibră se strâng una față de cealaltă, realizând alinierea față în față a capetelor de fibră. Eventual, spațiul dintre capetele de fibră se poate umple cu un gel transparent cu indice de refracție apropiat de cel al fibrei, reducând astfel reflexia la capătul fibrei.

3.6.2. Propagarea semnalului optic

3.6.2.1. Moduri de propagare

Dacă diametrul fibrei nu este mai mare de câteva zeci de ori lungimea de undă a luminii, modelul opticii geometrice — propagarea luminii sub forma de raze — nu mai este o aproximare acceptabilă a fenomenelor ce au loc. Din studiul ecuației undelor rezultă doar un număr finit de soluții, numite *moduri de propagare*. Intuitiv, un mod este un posibil traseu al razei de lumină, traversând în mod repetat, în zig-zag, axul fibrei și păstrând un unghi fixat față de acesta; în fibre suficient de subțiri, doar anumite unghiuri sunt permise.

Dacă o fibră permite existența mai multor moduri de propagare a luminii, fibra se numește *multimod*. Modurile diferite se propagă în general cu viteze puțin diferite. Intuitiv, acest lucru se întâmplă deoarece viteza de propagare a semnalului în fibră este egală cu valoarea componentei longitudinale a vitezei de propagare a luminii, care depinde de unghiul dintre direcția

de propagare a luminii și axa fibrei. Datorită vitezelor diferite, semnalul emis de la un capăt al fibrei este distorsionat, fiind recepționat la celălalt capăt ca mai multe copii puțin decalate în timp. Acest fenomen de distorsionare a semnalului se numește *dispersie intermodală*.

Opusul fibrei multimod este fibra *monomod*, în care ecuația undelor admite o singură soluție. Existența unui singur mod elimină dispersia intermodală, îmbunătățind calitatea propagării semnalului. Pentru a admite un singur mod, fibra trebuie să fie mult mai subțire, diametrele standard fiind 10 μm sau 8 μm . Diametrul mai mic al fibrei atrage două dificultăți: pe de o parte, cerințele de aliniere mecanică a fibrei față de sursă sunt mai stricte, iar pe de altă parte densitatea de putere luminoasă emisă prin fibră trebuie să fie mai mare. Acest din urmă fapt duce la necesitatea utilizării diodelor laser ca sursă de lumină (LED-urile nu mai sunt adecvate) și, în consecință, la creșterea prețurilor echipamentelor.

3.6.2.2. Caracteristici ale mediului

Dăm în continuare caracteristicile principale ale propagării:

viteza de propagare este viteza luminii în silica, aproximativ $0,67 \times c$;

atenuarea este, așa cum am văzut, foarte mică, de ordinul câtorva decibeli pe kilometru sau chiar câteva zecimi de decibel pe kilometru.

distorsiunile apar sub forma de *dispersie*, adică lățirea impulsurilor. Sunt cauzate de mai multe fenomene, și au ca și consecință limitarea practică a produsului dintre frecvența maximă ce se poate transmite și distanța dintre emițător și receptor. Acest produs se numește (impropriu) banda de trecere și se măsoară în megahertzi kilometru (MHz km). Valorile tipice, pentru o fibră multimod, sunt de ordinul a 500 MHz km.

zgomotul în transmisia prin fibră optică apare aproape exclusiv datorită fotodiodei receptoare (zgomot termic); acesta limitează inferior sensibilitatea receptorului și, la atenuare dată a fibrei, puterea emițătorului. Captarea de paraziti de-a lungul fibrei, și în particular diafonia, sunt neglijabile.

3.6.2.3. Multiplexarea în lungimea de undă

Considerând ca semnal intensitatea câmpului electric, observăm că prin fibra optică se transmite un semnal modulat în amplitudine. Frecvența purtătoare este frecvența undelor infraroșii. Semnalul modulator este rădăcina pătrată a puterii luminoase emise.

Ca urmare, este posibilă realizarea multiplexării în frecvență a mai multor semnale pe aceeași fibră optică. Emițătoarele sunt diode laser sau LED-uri de culori diferite. Receptoarele sunt dotate cu câte un filtru de culoare corespunzătoare plasat în fața elementului fotosensibil. Această metodă de multiplexare se numește *multiplexare în lungimea de undă* (engl. *wavelength division multiplexing* — WDM). Subliniem că diferența între multiplexarea în lungime de undă și multiplexarea în frecvență este doar de terminologie, nu una principală. Diferența provine doar din faptul că, în cazul transmisiei optice, în lipsa mijloacele de-a analiza direct semnalul electromagnetic (asupra căruia operează multiplexarea în frecvență), analizăm doar puterea semnalului electromagnetic.

Este posibilă și transmisia duplex pe o singură fibră optică. Pentru aceasta se realizează o construcție cu oglinzi semitransparente care permite ca raza de lumină emisă să pătrundă în fibră, iar raza de lumină ce iese din fibră să ajungă pe elementul receptor. Pentru a preveni diafonia între cele două senzuri de propagare, este necesar ca reflexiile pe capetele fibrei să fie extrem de reduse sau să se aplice o multiplexare în lungimea de undă între cele două senzuri.

3.6.3. Considerente practice

Realizând o transmisie ghidată prin cablu, fibrele optice concurează direct cu perechile de conductoare. Fibrele optice au câteva avantaje: sunt izolatoare din punct de vedere electric, sunt foarte puțin sensibile la zgomet, este dificil de interceptat comunicația prin ele (fără a le tăia este aproape imposibil de interceptat semnalul, iar tăierea fibrei poate fi ușor detectată), au atenuare mică și, în sfârșit, sunt mult mai ușoare (conțin mult mai puțin material) decât perechile de conductoare.

Toate aceste avantaje fac fibrele optice să fie extrem de atractive pentru comunicația pe distanțe mari, precum și pentru echipamente ce lucrează în condiții mai speciale, de exemplu la tensiuni electrice mari sau în medii cu radiații electromagnetice puternice.

Principalele dificultăți la utilizarea fibrelor optice sunt legate de cablare.

Deși puterea luminii transportate prin fibra optică este foarte mică, secțiunea extrem de mică a fibrei face ca densitatea de putere să fie suficient de mare pentru a fi periculoasă. Riscul principal este ca, în cazul în care lumina de la emițătorul optic pătrunde în ochi, să producă leziuni ireparabile ale retinei. Riscul de accident este mărit prin faptul că lumina nu este vizibilă. Ca măsură de protecție, se pot utiliza ochelari speciali prevăzuți cu filtre care

lasă să treacă lumina vizibilă, dar blochează infraroşiile transmise prin fibre.

Lipirea fibrelor sau montarea conecatoarelor pe fibre necesită echipamente scumpe (zeci de mii de dolari pentru un dispozitiv de lipire şi în jur de o mie de dolari pentru setul de unelte necesare montării conecatoarelor) şi personal calificat. Din acest motiv, se comercializează cabluri, de diferite lungimi, cu conecatoare gata ataşate.

Un fir de praf ajuns pe capătul unei fibre optice obstrucţionează serios trecerea luminii. De aceea, conectoarele necuplate se acoperă cu capace protectoare.