

Cabluri de telecomunicații

Cablurile reprezintă medii de transmisie cu parametri distribuiți, schema unei unități de o anumită lungime a cablului fiind prezentată în figura 1, de unde rezultă că un cablu este caracterizat de o rezistență distribuită, R , exprimat în Ω/km , de o capacitate distribuită, C , exprimat în nF/km , de o inductanță distribuită, L , exprimat în $\mu\text{H}/\text{km}$ și de o conductanță distribuită, G , exprimat în $\mu\text{S}/\text{km}$. Unitatea de lungime de 1km s-a ales datorită lungimilor relativi mari pe care le au aceste cabluri.

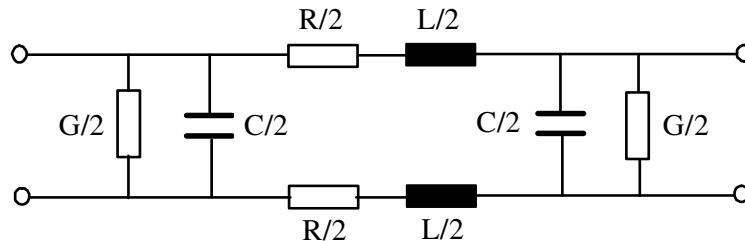


Fig. 1 Schema echivalentă a unei porțiuni de cablu de telecomunicații

Câteva observații importante legate de parametrii distribuiți ai cablurilor, parametri numiți și parametri primari sau lineici, sunt următoarele: parametri primari sunt dependenți de frecvență - rezistența și conductanța distribuită cresc odată cu frecvența, capacitatea distribuită este constantă cu frecvența, iar inductanța distribuită scade cu frecvența; în banda vocală contează doar rezistența și capacitatea distribuită, la frecvențe mai mari de 30kHz începe să intervină și inductanța, iar la frecvențe mai mari de sute de kHz începe să conteze și conductanța.

Pornind de la parametrii primari se pot defini alți parametri caracteristici cablurilor, parametri legați de funcția de transfer a cablului și de adaptarea de impedanță a cablului cu impedanțe externe. Doi parametri foarte importanți sunt impedanța caracteristică, Z_c , și indicele de propagare, γ , parametrii dați de relațiile următoare:

$$\gamma = \alpha(\omega) + j\beta(\omega) = \sqrt{(R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C)} \quad ; \quad Z_c(\omega) = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (1)$$

unde α este constanta de atenuare a cablului, exprimat în Np/km , iar β este constanta de defazare, exprimat în rad/km . Din relația (1) rezultă dubla dependență a constantei de propagare și a constantei de defazare de frecvență, prin intermediul parametrului frecvență și prin intermediul variației parametrilor primari cu frecvența.

Observație: transformarea din Np în dB se poate realiza conform relației: $1\text{Np} = 8.68\text{dB}$;

Importanța impedanței caracteristice este următoarea: dacă la un capăt al unui cablu cu impedanța caracteristică Z_c se conectează o impedanță de sarcină cu valoarea Z_c , atunci impedanța de intrare văzută la celălalt capăt al cablului va fi tot Z_c , adică are loc un fel de „reflexie” a impedanței de sarcină de la un capăt al cablului la celălalt capăt al acestuia, lucru foarte important dacă se dorește o adaptare de impedanță pe tot traseul circuitului (vezi figura 2 pentru cele discutate).

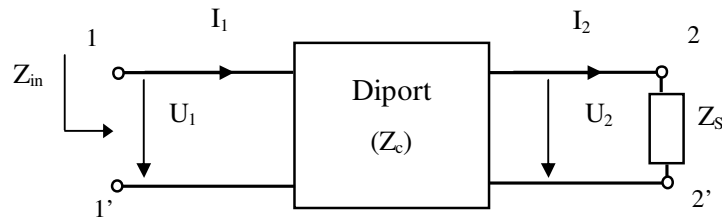


Fig. 2 Adaptarea de impedanță dintre un cablu și impedanțele conectate

Pe baza constantei de atenuare și cea de defazare se poate determina funcția de

atenuare în frecvență, $a(f)$ și anume: $a(\omega) = e^{\alpha(\omega) \cdot l} \cdot e^{j\beta(\omega) \cdot l} = \frac{\overline{U}_1}{U_2}$ (2) , unde l este

lungimea cablului. Dacă la intrarea cablului se aplică un semnal sinusoidal cu pulsația ω_s , amplitudinea A_i și faza φ_i , atunci la ieșirea cablului se va obține un semnal sinusoidal de aceeași frecvență, cu amplitudinea A_o și faza φ_o , date de relațiile:

$$A_o = A_i \cdot e^{-\alpha(\omega_s) \cdot l} \quad ; \quad \varphi_o = \varphi_i - \beta(\omega_s) \cdot l \quad (3)$$

Cablul de transmisie poate fi considerat și ca un dipol, parametri acestui dipol fiind dați de parametrii γ și Z_c . De exemplu un dipol poate fi caracterizat prin parametrii fundamentali, A , în felul următor:

$$\begin{aligned} U_1 &= A_{11} \cdot U_2 + A_{12} \cdot I_2 \Rightarrow \begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = [A] \cdot \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \\ I_1 &= A_{21} \cdot U_2 + A_{22} \cdot I_2 \quad [A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

Dacă linia este formată din mai multe tronsoane cu parametrii diferiți atunci matricea globală este produsul matricilor elementare : $[A] = \prod_{i=1}^n [A_i]$ (5)

Parametrii fundamentali se pot determina în funcție de lungimea liniei, l , constanta de propagare și impedanța caracteristică astfel:

$$[A_i] = \begin{pmatrix} \cosh(\gamma_i \cdot l_i) & Z_i \cdot \sinh(\gamma_i \cdot l_i) \\ \frac{1}{Z_i} \cdot \sinh(\gamma_i \cdot l_i) & \cosh(\gamma_i \cdot l_i) \end{pmatrix} \quad (6)$$

Aspecte legate de caracteristica de atenuare a cablurilor bifilare

- cablurile bifilare torsadate din bucla de abonat (perechile din bucla de abonat) - caracteristicile acestor linii sunt determinate preponderent de parametrii distribuiți capacitivi (C/km) și rezistivi (R/km).
- legea generală de variație a atenuării firelor torsadate este dată de relațiile:

$$a(f)_{dB} = \begin{cases} k_1 \cdot f^{\frac{1}{2}} ; f < 10kHz \\ k_2 \cdot f^{\frac{1}{4}} ; 10kHz < f < 100kHz \\ k_3 \cdot f^{\frac{1}{2}} ; f > 100kHz \end{cases} \quad (7)$$

constantele k_x depind de geometria și lungimea cablului și de temperatură;

- în fig. 3 se prezintă variația atenuării pe km în banda vocală a firelor torsadate cu diferite diametre

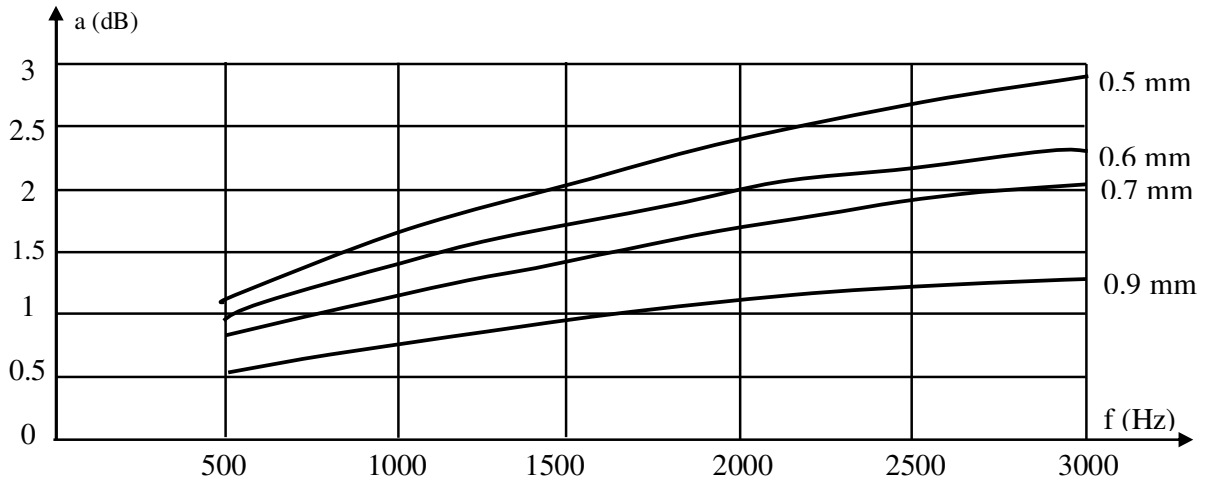


Fig. 3 Variația atenuării pe km în banda vocală a firelor torsadate cu diferite diametre

- atenuarea cablului la o anumită frecvență se poate calcula și în funcție de puteri ca și $a(f) = V_i^2(f)/V_o^2(f)$ (8), unde V_i este tensiunea aplicată la intrarea cablului, iar V_o este tensiunea măsurată la ieșirea cablului;
- alte relații empirice de calcul a atenuării cablului în funcție de frecvență și de lungime (relații generale și particulare) la o temperatură de 20°C:

$$L_{dB}(f) = (a \cdot \sqrt{f} + b \cdot f) \cdot d \quad (9)$$

distanța d este dată în km, parametrul a depinde de diametrul conductoarelor, iar parametrul b depinde de izolația cablului.

- cablu BKMA pentru instalații aeriene

$$L_{dB}(f) = (21 \cdot \sqrt{f} + 0.3 \cdot f) \cdot d \quad (10)$$

distanța d este exprimată în km

- cablu UTP CAT 3, caracteristică “worst case”, $d=100m$

$$L_{dB}(f) = (2.32 \cdot \sqrt{f} + 0.238 f) \quad (11)$$

- cablu UTP CAT 5, caracteristică “worst case”, $d=100m$

$$L_{dB}(f) = \left(1.967 \cdot \sqrt{f} + 0.023 \cdot f + \frac{0.05}{\sqrt{f}} \right) \quad (12)$$

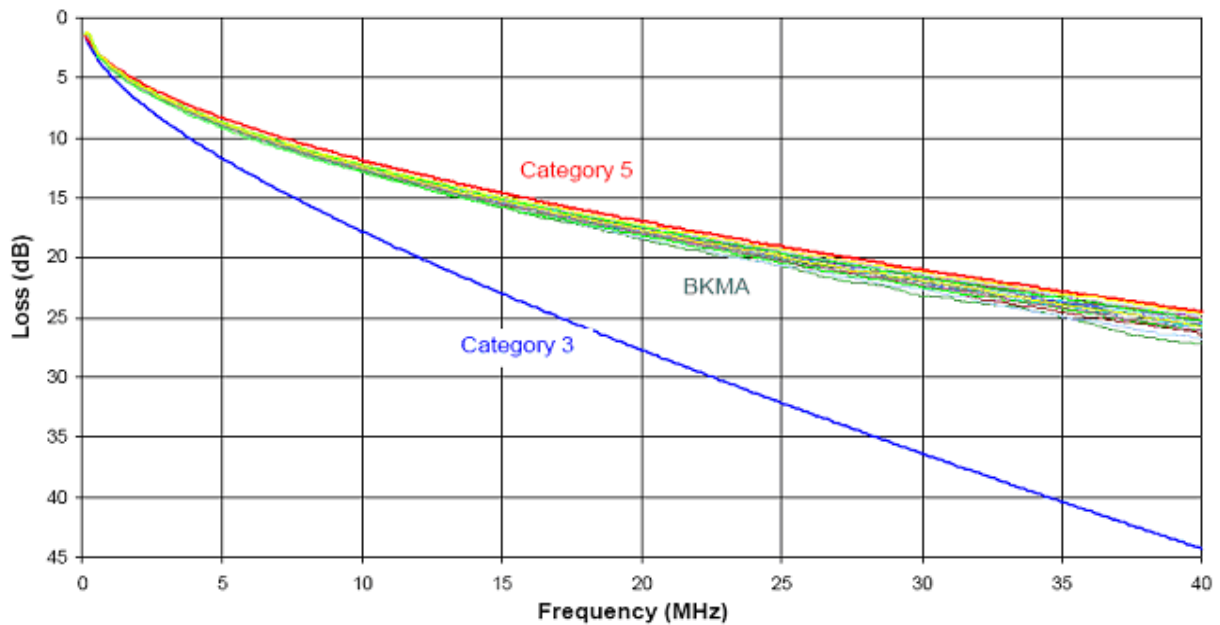


Fig. 4 Variația atenuării cu frecvența a cablurilor BKMA, CAT 3 și CAT 5, pentru o lungime de 180m și o temperatură de 20°C

Zgomotul de diafonie liniară este fenomenul prin care un semnal util apare într-un loc nepotrivit; acest semnal de zgomot este inteligibil și atrage după sine pierderea confidențialității;

- zgomotul de frecvență unică este determinat tot de fenomenul de diafonie și constă din semnale nedorite pe frecvențe fixe induse în canalul vocal - acest zgomot are un caracter staționar, un exemplu tipic fiind brumul de rețea.
- Fenomenul de diafonie se manifestă între perechile de fire din același cablu în două moduri fundamentale: paradiafonia și telediafonia - vezi fig. 5.

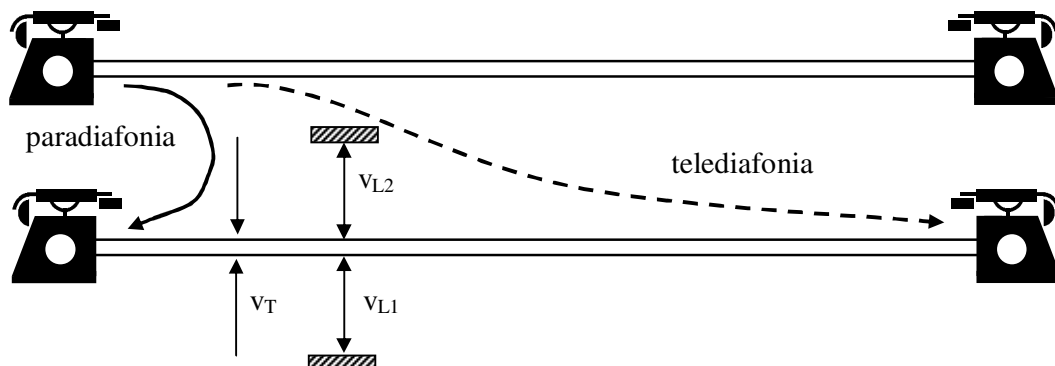


Fig. 5 Moduri de manifestare ale fenomenului de diafonie

- cauze principale combinate care determină fenomenul de diafonie: cuplajele capacitive parazite dintre perechile vecine și echilibrarea imperfectă față de pământ a circuitelor.
- pe un cablu format din fire torsadate există două tipuri de tensiuni: o tensiune transversală (sau diferențială) v_T între cele două fire – semnalul util, și o tensiunile longitudinale v_{L1} și v_{L2} între fiecare din fire și pământ (punctul comun sau masa comună) - reprezintă semnale parazite induse de

regulă prin cuplaje capacitive cu diferite surse de semnale – vezi fig. 5 - ideal diferența dintre semnalele longitudinale trebuie să fie zero, caz în care nu se generează o componentă transversală nedorită.

- în fig. 6 se prezintă situația în care o sursă de semnal v (de exemplu rețeaua de alimentare) se cuplează prin intermediul capacităților parazite C_{c1} și C_{c2} cu cele două fire ale cablului, ceea ce determină apariția a două tensiuni v_{L1} și v_{L2} între fire și masă comună (pământul), tensiuni care se pot scrie sub forma:

$$\begin{aligned} v_{L1} &= v_{MC} + \frac{v_d}{2}; v_{L2} = v_{MC} - \frac{v_d}{2} \\ v_{MC} &= \frac{v_{L1} + v_{L2}}{2}; v_d = v_{L1} - v_{L2} \end{aligned} \quad (13)$$

unde v_{MC} este tensiunea de mod comun, iar v_d este tensiunea diferențială perturbatoare nedorită

- situația descrisă în fig. 6 se numește cuplaj longitudinal-transversal, iar raportul în decibeli între tensiunea longitudinală (de mod comun) și cea diferențială (transversală) se numește factorul (raport) de rejecție al modului comun, comun *RRMC* (*Common Mode Rejection Ratio*)

$$RRMC = 20 \cdot \lg \left(\frac{V_{MC}}{V_d} \right) [dB] \quad (14)$$

- dacă capacitățile C_{c1} și C_{c2} sunt egale și inductivitățile L din puntea de alimentare a aparatului telefonic sunt egale, atunci tensiunile longitudinale v_{L1} și v_{L2} sunt egale și tensiunea transversală (sau diferențială) perturbatoare este zero.
- situația prezentată în figura 6 este caracteristică cuplajului dintre rețeaua de alimentare și perechile de fire torsadate - se induce brum de rețea în canalul vocal.

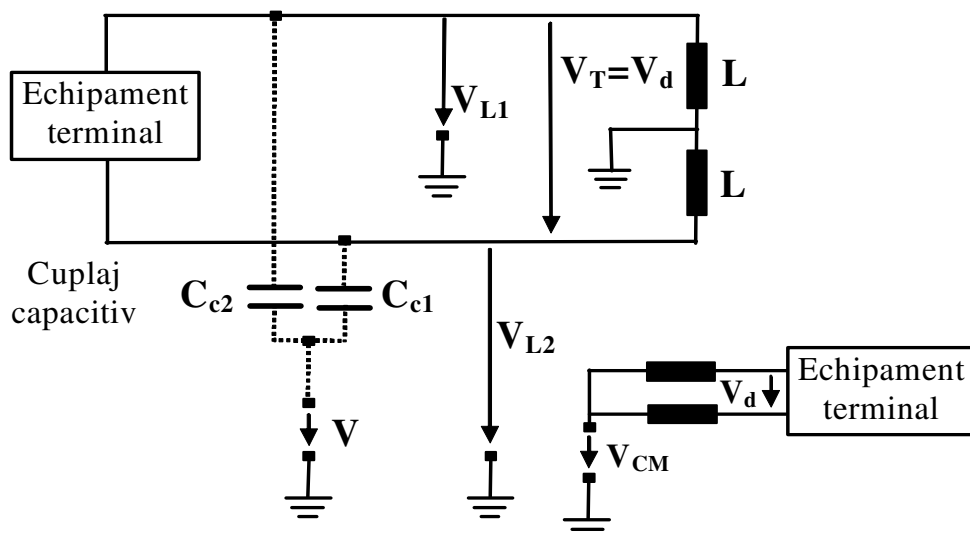


Fig. 6 Cuplaj capacitiv longitudinal - transversal

- figura 7 se prezintă situația corespunzătoare cuplajului dintre perechi de fire torsadate vecine, cuplaj care generează fenomenul de diafonie și induce tonuri de semnalizare în banda vocală.

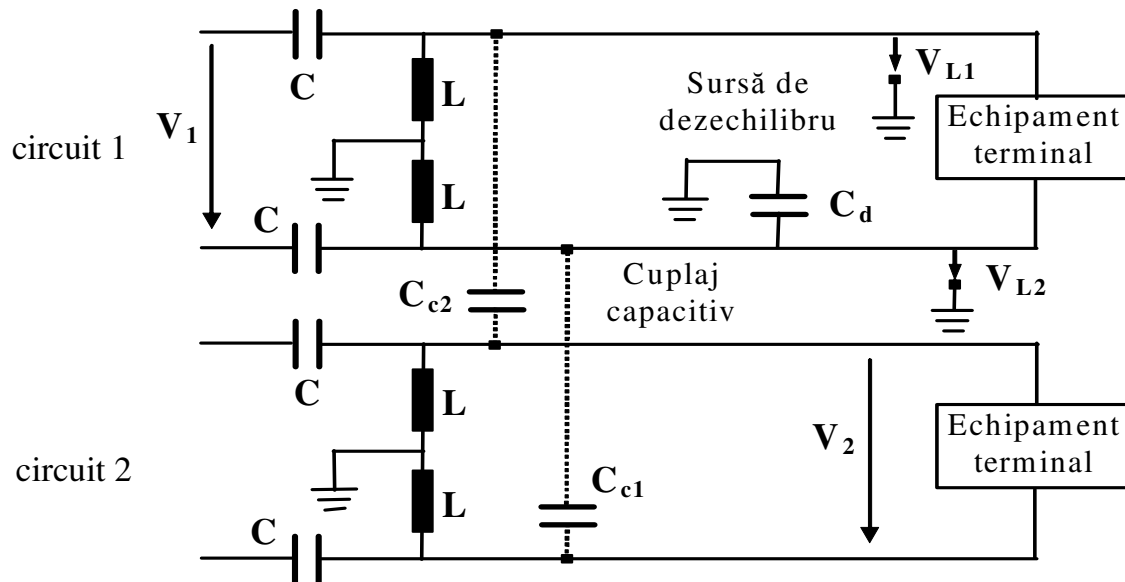


Fig. 7 Cuplaj transversal – longitudinal și cuplaj longitudinal - transversal

- în cazul situației din fig. 7 în primul circuit se transmite semnalul diferențial v_1 , semnal util, și în acest circuit apare un dezechilibru generat de capacitatea parazită C_d ; în lipsa acestei capacități tensiunile longitudinale v_{L1} și v_{L2} sunt identice, dar în prezența capacității C_d aceste tensiuni nu mai sunt identice - apare un cuplaj transversal-longitudinal între sursa de semnal care generează v_1 și firele circuitului 1.
 - ◆ datorită capacităților parazite C_{c1} și C_{c2} apare un cuplaj longitudinal-transversal între circuitul 1 și 2, adică între sursele de semnal prezentate de v_{L1} și v_{L2} și firele din circuitul 2 - în circuitul al doilea apare o tensiuni transversale (diferențiale) v_2 perturbatoare nedorite, chiar dacă capacitățile C_{c1} și C_{c2} sunt identice.
 - ◆ cuplajul transversal longitudinal se caracterizează prin atenuarea de

diafonie (crosstalk attenuation):
$$a_{cross} = 20 \cdot \lg \left(\frac{V_1}{V_2} \right) [dB] \quad (15)$$

- alte cauze care determină fenomenul de diafonie: cuplaje inductive dintre perechi (reduc prin torsadare), cuplaje parazite între subansamble electronice, cuplaje capacitive și inductive între trasee imprimate și între componente; diafonia introdusă de dispozitivele codoare PCM de grup (vechi); câștigul excesiv al repetoarelor vocale utilizate pe perechile din cablu.

Modelarea matematică a fenomenului de diafonie (paradiafonie – NEXT și telediafonie - FEXT) datorat cuplajului dintre perechile dintr-un cablu

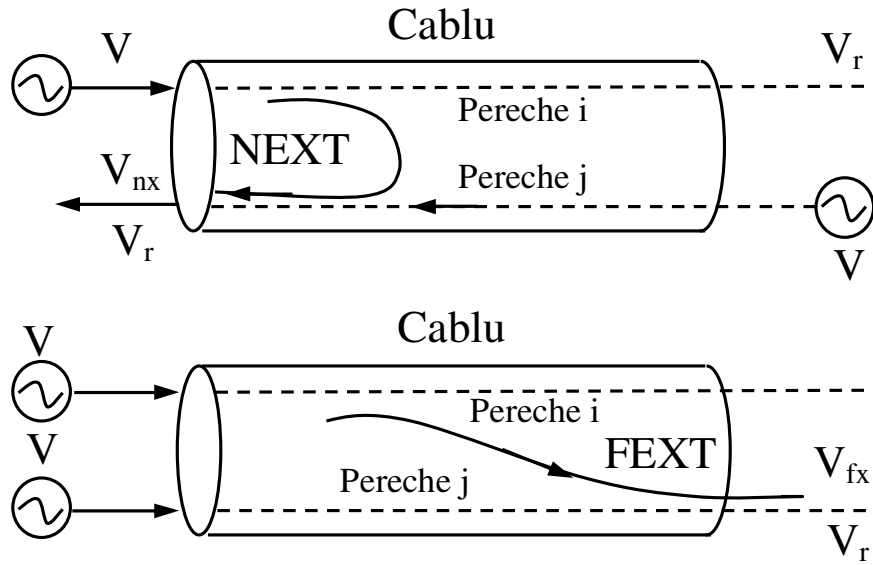


Fig. 8 Paradiafonia (NEXT) și telediafonia (FEXT) între perechile dintr-un cablu

- Cele două tipuri de diafonii (NEXT și FEXT) se pot caracteriza prin atenuările de diafonie, $A_{nx}(f)$ și $A_{fx}(f)$, dependente de frecvență – parametrii menționați se pot calcula conform relațiilor:
$$A_{nx}(f) = \frac{V^2(f)}{V_{nx}^2(f)} ; A_{fx}(f) = \frac{V^2(f)}{V_{fx}^2(f)} \quad (16)$$

- Dacă mai multe perechi interferă cu perechea j suma puterilor semnalelor interferente NEXT și FEXT este dată de:
$$V_{nx}^2 = \sum_{i \neq j} V_{nx,j}^2 ; V_{fx}^2 = \sum_{i \neq j} V_{fx,j}^2 \quad (17)$$

- Dacă se consideră un cablu cu k perechi din care n perechi interferă, la frecvențe mari (>500kHz), atenuările de diafonie exprimate în dB au expresiile următoare:

$$\begin{aligned} A_{nx,dB}(f) &= K_{nx} - 15 \cdot \ln(f) + 6 \cdot \ln(m/n) \\ A_{fx,dB}(f) &= K_{fx} - 20 \cdot \ln(f) - 10 \cdot \ln(f) + 6 \cdot \ln(m/n) \\ m &= k - 1 \end{aligned} \quad (18)$$

K_{nx} și K_{fx} sunt constante de cuplaj de diafonie și depind de parametrii cablului UTP, iar m este numărul surselor interferente.

- cablu BKMA pentru instalații aeriene

$$\begin{aligned} A_{nx,dB}(f) &= 40.3 - 15 \cdot \ln(f) + 6 \cdot \ln(m/n) \\ A_{fx,dB}(f) &= 35.6 - 20 \cdot \ln(f) - 10 \cdot \ln(d) + 6 \cdot \ln(m/n) \end{aligned} \quad (19)$$

distanța d este exprimată în km

- cablu UTP CAT 3, caracteristică “worst case”, d=100m

$$\begin{aligned} A_{nx,dB}(f) &= 41.3 - 15 \cdot \ln(f) \\ A_{fx,dB}(f) &= 51 - 20 \cdot \lg(f/0.772) \end{aligned} \quad (20)$$

- cablu UTP CAT 5, caracteristică “worst case”, d=100m

$$\begin{aligned} A_{nx,dB}(f) &= 62.3 - 15 \cdot \lg(f) \\ A_{fx,dB}(f) &= 63 - 20 \cdot \lg(f/0.772) \end{aligned} \quad (21)$$

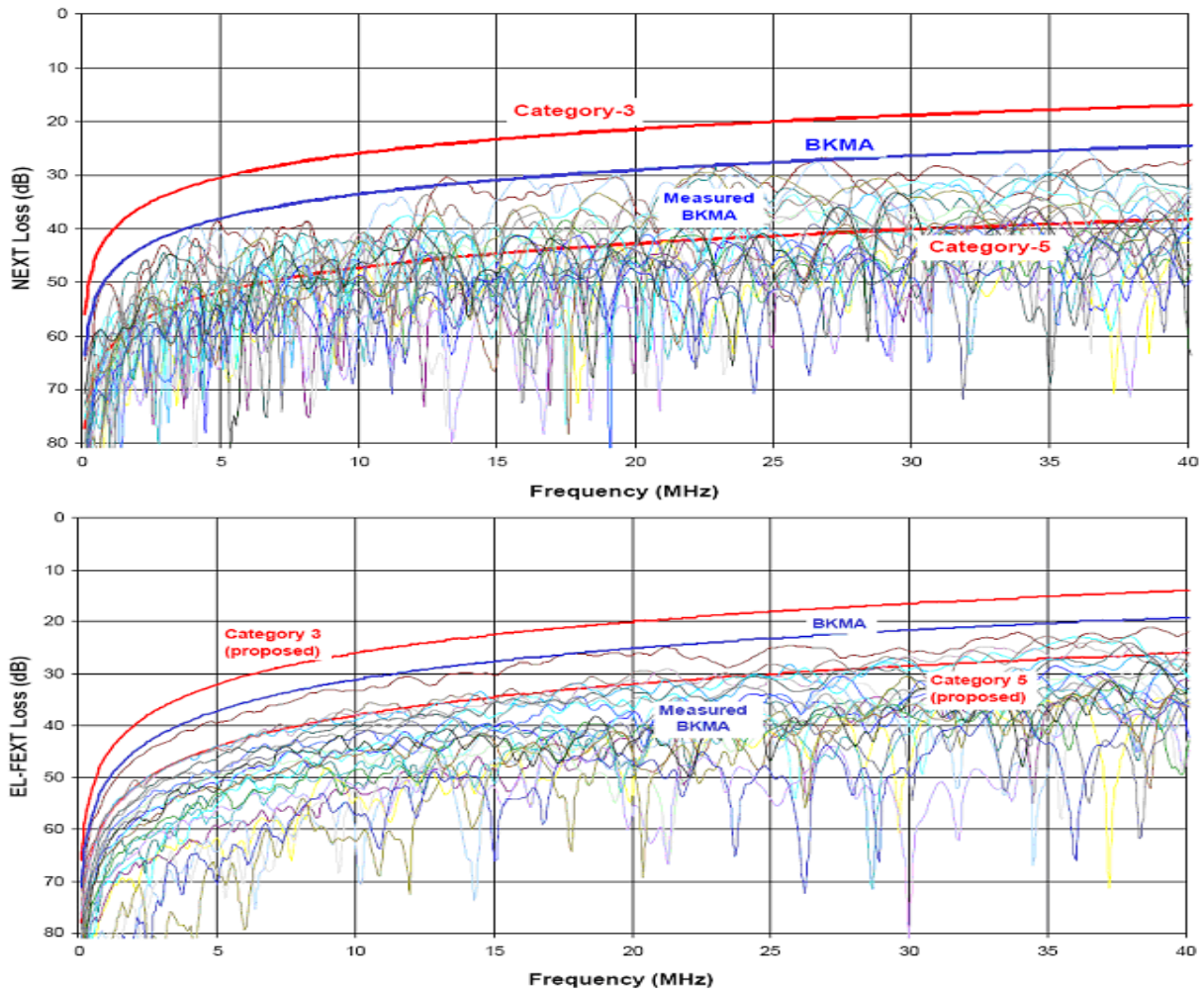


Fig. 9 Variația cu frecvența a atenuării de paradiafonie și telediafonia pereche – pereche pentru cablurile considerate; EL-FEXT = FEXT - Atenuare.

- Alte relații pentru diafonia pereche – pereche – densitățile spectrale ale semnalelor de interferență:

$$\begin{aligned} Next(f) &= S(f) \cdot K_N \cdot f^{1.5} \\ Fext(f) &= S(f) \cdot K_F \cdot f^2 \cdot l \cdot |H(f)|^2 \end{aligned} \quad (22)$$

unde f este frecvența în Hz, l este lungimea în picioare, K_N constantă egală cu $8.536 \cdot 10^{-15}$, K_F constantă egală cu $7.74 \cdot 10^{-21}$, $S(f)$ este densitatea spectrală a semnalului interferent, $H(f)$ funcția de transfer în frecvență a canalului.

- Dacă există n surse perturbatoare identice, însumarea efectelor se poate face astfel:

$$\begin{aligned} Next[f, n] &= S(f) \cdot K_N \cdot f^{1.5} \cdot n^{0.6} \\ Fext[f, n] &= S(f) \cdot K_F \cdot f^2 \cdot l \cdot |H(f)|^2 \cdot n^{0.6} \end{aligned} \quad (23)$$

Valoarea de 0.6 se determină mai mult empiric – este valabil în special pentru cablurile din America. Cablurile din Europa au un exponent de 0.7 sau 0.8. Formula este precisă pentru un număr mare de semnale interferente.

- Alte formule de însumare sunt mult mai complexe.
- Pentru o exemplificare finală se mai prezintă câteva specificații legate de cablul UTP CAT 5:
 - Capacitate: 14 pF/ft;
 - Conductor: fir de cupru 24 AWG;
 - Frecvență: până la 100MHz;
 - Impedanță: $100 \pm 15 \Omega$;

Metodă de test	Maximum	Minimum
Rezistență DC, ($\Omega/100m$)	9.38	
Dezechilibrul rezistenței DC (%)	5	
Impedanță (Ω) 1 – 100MHz	100 ± 15	
	Atenuare dB/100m	Diafonie NEXT dB/100m
0.772 MHz	1.833	64
1.000 MHz	2.100	62
4.000 MHz	4.333	53
8.000 MHz	6.000	48
10.000 MHz	6.666	47
16.000 MHz	8.333	44
20.000 MHz	9.333	42
25.000 MHz	10.666	41
31.250 MHz	12.000	40
62.500 MHz	17.333	35
100.000 MHz	22.333	32

Tabel 1. Câteva specificații legate de cablul UTP CAT 5

Structura și parametrii cablurilor de telecomunicații utilizați în practică Cabluri de telecomunicații urbane

Cablurile de telecomunicații urbane se utilizează la cablarea zonelor urbane și sunt destinate să funcționeze la o tensiune maximă de exploatare de 150V. Există cabluri urbane de abonat (legătură abonat – CT) și cabluri de intercomunicație (legături între CTU).

Din punctul de vedere al modului de poziționare, cablurile de telecomunicații urbane pot fi grupate astfel:

- cabluri de telecomunicații aeriene montate pe fațadele clădirilor sau pe stâlpi;
- cabluri de telecomunicații subterane poziționate direct în sol sau în canalizație.

Construcție

Structura generală este prezentată în figură:

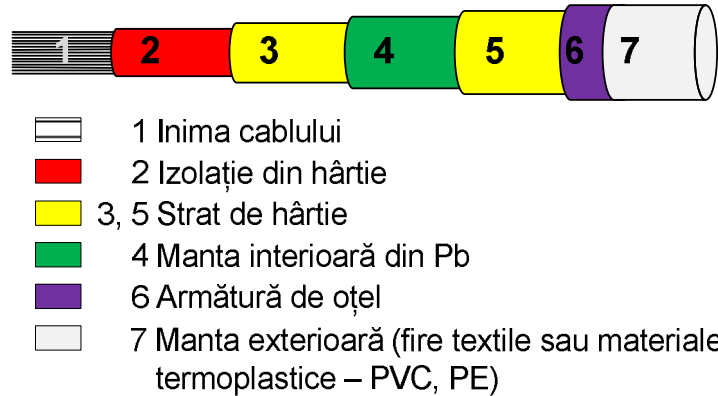


Figura 10 Structura generală a cablurilor de telecomunicații

Observații: în cazul cablurilor moderne izolația conductoarelor este de plastic; în locul învelișurilor de hârtie se utilizează folie de plastic, iar mantaua externă metalică se înlocuiește cu plastic cauciugat. Pentru a se asigura o anumită protecție împotriva interferențelor externe se poate utiliza o folie metalică (de aluminiu) situată sub învelișul extern. O tehnologie mai nouă utilizează un gel special pentru umplerea interstițiilor dintre firele cablului. Astfel apa nu poate pătrunde în interiorul cablului, chiar dacă are loc întreruperea cablului într-un mediu umed. Firele din inima cablului sunt torsadate pentru a se reduce cuplajele electromagnetice (diafonia).

Caracteristici electrice

Caracteristicile de interes în practică sunt:

- **Rezistența electrică** – măsurată pe circuit fizic (pereche) în c.c. la 20°C. Au valori între 57Ω/km (2×0.9mm) și 284Ω/km (2×0.4mm).
- **Rezistența de izolație** a fiecărui conductor față de toate celelalte legate împreună la manta (5000MΩ/km).
- **Capacitatea de lucru** – măsurată la 800Hz între o pereche și celelalte legate la manta (40-60nF).
- **Atenuarea** (la 800Hz) – se calculează cu relația:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega RC}{2}} [Np / km] \quad (24)$$

în care R reprezintă rezistența electrică a perechii conductoare în Ω/km, C reprezintă capacitatea nominală sau maximă a perechii în F/km, iar ω reprezintă pulsația în rad/sec.

- **Tensiunea de străpungere** – cablul de lungime finită trebuie să suporte aceste tensiuni fără să se străpungă, timp de un minut:

- 1500V aplicată între mantaua de Pb legată la pământ și toate conductoarele legate între ele;
- 500V aplicată între ansamblul primelor conductoare ale fiecărei perechi legate împreună și ansamblul celorlalte conductoare legate împreună.

Cabluri de telecomunicații interurbane

Sunt utilizate pentru cablarea traseelor de mare distanță. Sunt destinate să funcționeze la o tensiune maximă de 250V.

Conductoarele de cupru sunt torsadate în perechi cu un anumit pas, în cuarte dublă pereche DM (Diesel horst – Martin) sau cuarte S (stea).

Cablurile de telecomunicații interurbane pot fi de joasă și de înaltă frecvență.

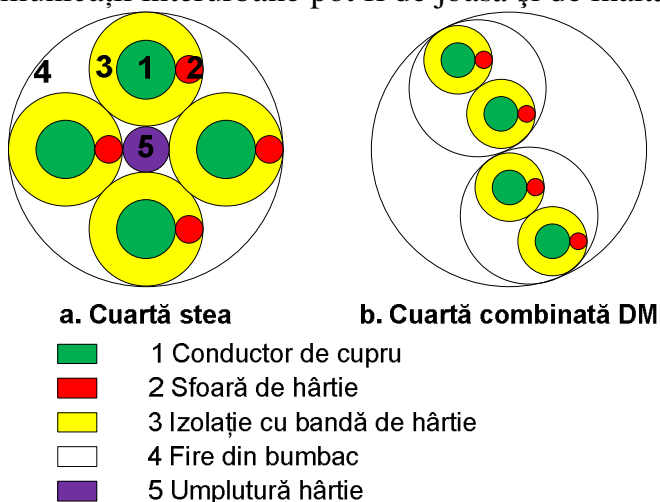


Figura 11 Circuite fizice în cuarte

Izolația cablurilor noi este din plastic. Vezi observațiile anterioare.

Astfel de cabluri se pot utiliza pentru transmisiile cadrelor PCM primare sau ale unor cadre PDH.

Caracteristici electrice

- **Rezistența electrică** a unei perechi măsurată în c.c. la temperatura 20°C, trebuie să fie cel mult 57Ω/km (2×0.9mm) și 32Ω/km (2×1.2mm).
- **Rezistența de izolație** se măsoară între un conductor al cablului și toți ceilalți conductori legați împreună cu mantaua cablului și trebuie să fie minim de 10000Ω/km.
- **Tensiunea de încercare:** fiecare lungime de cablu finită trebuie să suporte, fără străpungere, timp de un minut o tensiune de:
 - 2000V (50Hz) între mantaua de Pb pusă la pământ și toți conductorii circuitelor legați împreună;
 - 500V (50Hz) între oricare din conductoare și toți ceilalți conductori ai cuartei legați împreună.

- **Capacitate nominală** la frecvența de 800Hz, măsurată între conductorii unei perechi și toți ceilalți conductori legați împreună la mantaua cablului, trebuie să fie 26.5nF/km pentru perechile de înaltă frecvență și 38.5nF/km pentru cele de joasă frecvență.
- **Constanta de atenuare** este partea reală a constantei de propagare și trebuie să aibă următoarele valori:
 - 75mNp/km la $f = 800\text{Hz}$ pentru circuitele de joasă frecvență;
 - 240mNp/km la $f = 120\text{kHz}$ pentru circuitele de înaltă frecvență;
 - 350mNp/km la $f = 240\text{kHz}$ pentru circuitele de înaltă frecvență.