

4. Sisteme de comunicații “wireless”

4.1. Introducere

Sistemele de comunicații fără fir (wireless) includ radioreleele, sistemele bazate pe difracția troposferică, sistemele prin satelit, sistemele de comunicații personale (celulare, "cordless"), rețelele de comunicații personale și rețelele de calculatoare fără fir (WLAN). Releele de microunde punct-la-punct, în vizibilitate directă au fost pe larg folosite pînă la cel de al doilea război mondial. Aceste relee acoperă de regula o distanță de cca. 60 km. În jur de 100 de asemenea radiorelee pot acoperi intraga suprafață a SUA și oferă servicii de comunicații de bandă largă. Difracția pe troposferă poate mări lungimea legăturii pînă la cîteva sute de km. După 1960, sateliții geostaționari au început să joace un rol important în telecomunicații, extinzînd în mod dramatic lungimea legăturii la cca 12000 km. Trei sateliți pot oferi servicii care sa acopere toate concentrațiile importante de populație de pe glob. După 1980, devin populare telefoanele celulare și cele fără fir. Comunicațiile personale și comunicațiile celulare devin motorul dezvoltării industriei telecomunicațiilor. Mai multe sisteme de sateliți au fost desfășurate pentru a susține comunicațiile personale telefonice și de date între oricare două puncte de pe pămînt.

4.2. Ecuația emisiei a lui Friis

Să considerăm sistemul de comunicații fără fir din figura 4.1.

Un emițător cu o putere de ieșire P_t este aplicat unei antene cu un câștig G_t . Semnalul este captat de antena de recepție cu un câștig G_r . Puterea recepționată este P_r și distanța este R . Puterea de recepție o putem calcula dacă presupunem că nu avem pierderi atmosferice, neadaptari de polarizare, neadaptări de impedanță la nivelul feederului antenei, nealinieră și obstrucția. Antenele funcționează în regiunea de câmp îndepărtat.

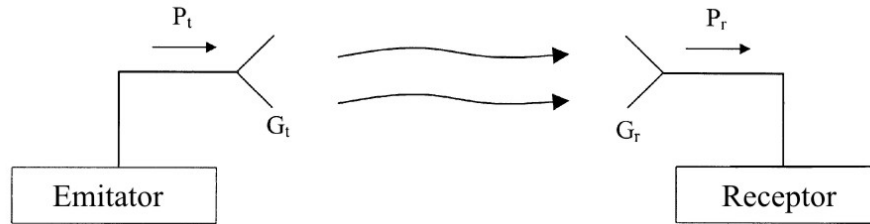


Fig.4.1 Sistem simplificat de comunicații fără fir

Densitatea de putere la nivelul antenei de recepție pentru o antena de emisie izotropică este dată de:

$$S_I = \frac{P_t}{4\pi R^2} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (4.1)$$

Dacă se folosește o antenă directivă, densitatea de putere este modificată și dată de:

$$S_D = \frac{P_t}{4\pi R^2} G_t \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (4.2)$$

Puterea recepționată este egală cu densitatea de putere multiplicată cu aria efectivă a antenei de recepție

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} A_{er} \text{ (W)} \quad (4.3)$$

Aria efectivă este legată de câștigul antenei prin relația:

$$G_r = \frac{4\pi}{\lambda_0^2} A_{er} \text{ sau } A_{er} = \frac{G_r \lambda_0^2}{4\pi} \quad (4.4)$$

Înlocuind (4.4) în (4.3) obținem:

$$P_r = P_t \frac{G_t G_r \lambda_0^2}{(4\pi R)^2} \quad (4.5)$$

Relația de mai sus este cunoscută ca ecuația emisiei de putere a lui Friis. Puterea recepționată este proporțională cu câștigul ambelor antene și invers proporțională cu R^2 .

Dacă $P_r = S_{i,\min}$, semnalul minim necesar pentru sistem, intervalul maxim de acoperire va fi dat de:

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G_t G_r \lambda_0^2}{(4\pi)^2 S_{i,\min}} \right]^{1/2} \quad (4.6)$$

Pentru a include efectele diverselor pierderi datorate nealinierii, dezadaptării de polarizare, dezadaptării de impedanță și atmosferei, putem adăuga un factor L_{sis} care combină toate pierderile. Ecuația (4.6) devine:

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G_t G_r \lambda_0^2}{(4\pi)^2 S_{i,\min} L_{\text{sis}}} \right]^{1/2} \quad (4.7)$$

unde $S_{i,\min}$ poate fi legat de parametrii receptorului. Din figura 4.2 se poate vedea că factorul de zgomot este definit ca:

$$F = \frac{S_i / N_i}{S_o / N_o} \quad (4.8)$$

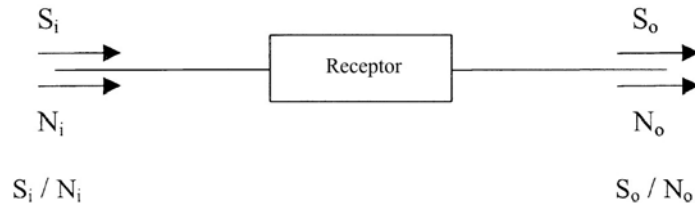


Fig. 4.2. Raportele semnal-zgomot la intrarea și ieșirea unui receptor

Prin urmare

$$S_i = S_{i,\min} = N_i F \left(\frac{S_o}{N_o} \right)_{\min} = k T B F \left(\frac{S_o}{N_o} \right)_{\min} \quad (4.9)$$

unde k este constanta lui Boltzmann, T este temperatura absolută și B este banda receptorului. Substituind (4.9) în (4.7) obținem:

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G_t G_r \lambda_0^2}{(4\pi)^2 k T B F (S_o/N_o)_{\min} L_{\text{sis}}} \right]^{1/2} \quad (4.10)$$

unde:

- P_t = puterea emițătorului (W)
- G_t = câștigul antenei de emisie, ca raport
- G_r = câștigul antenei de recepție, ca raport
- λ_0 = lungimea de undă în spațiul liber (m)
- $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K (constanta lui Boltzmann)
- T = temperatura (K)
- B = banda (Hz)
- F = factor de zgomot
- $(S_o/N_o)_{\min}$ = raportul semnal-zgomot minim al receptorului
- L_{sis} = pierderile sistemului, ca raport
- R_{\max} = acoperirea maximă (m)

Raportul semnal-zgomot la ieșire, pentru o distanță R , este dat de:

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{P_t G_t G_r}{k T B F L_{\text{sis}}} \left(\frac{\lambda_0}{4\pi R} \right)^2 \quad (4.11)$$

Din ecuația (4.10) se poate vedea că acoperirea se dublează dacă puterea de ieșire este crescută de patru ori. În sistemele radar, trebuie ca puterea de ieșire să fie mărită de 16 ori pentru a dubla acoperirea.

Din ecuația (4.11) se poate vedea că raportul semnal-zgomot de la ieșirea receptorului poate fi crescut dacă distanța de transmisie este redusă. Creșterea puterii de emisie sau a câștigului antenei vor contribui și ele la creșterea raportului semnal-zgomot la ieșire.

Exemplu

Într-o legătură de comunicații duplex, emițătorul emite o putere de 100 W la 10 GHz. Antena de emisie are un câștig de 36 dB, iar antena de recepție un câștig de 30 dB. Care va fi nivelul puterii recepționate la o distanță de 40 km (a) dacă nu există pierderi în sistem și (b) pierderile sistemului sunt de 10 dB ?

Soluție

$$f = 10 \text{ GHz} \quad \lambda_0 = \frac{c}{f} = 3 \text{ cm} = 0.03 \text{ m}$$

$$P_t = 100 \text{ W} \quad G_t = 36 \text{ dB} = 4000 \quad G_r = 30 \text{ dB} = 1000$$

(a) Din ecuația (4.5),

$$P_r = P_t \frac{G_t G_r \lambda_0^2}{(4\pi R)^2} = 100 \times \frac{4000 \times 1000 \times (0.03)^2}{(4\pi \times 40 \times 10^3)^2} = 1.425 \times 10^{-6} \text{ W} = 1.425 \mu\text{W}$$

(b) $L_{\text{sis}} = 10 \text{ dB}$:

$$P_r = P_t \frac{G_t G_r \lambda_0^2}{(4\pi R)^2} \frac{1}{L_{\text{sis}}} = \frac{1.425}{10} = 0.1425 \mu\text{W}$$

4.3. Pierderile în spațiu

Pierderile în spațiu iau în considerare împrăștierea energiei de RF pe măsură ce ea se propagă. Așa cum se poate vedea, densitatea de putere ($P_t/4\pi R^2$) de la o antenă izotropică se reduce cu $1/R^2$ pe măsură ce crește distanța. Să considerăm o antenă de emisie izotropică și o antenă de recepție izotropică, ca în figura 4.3.

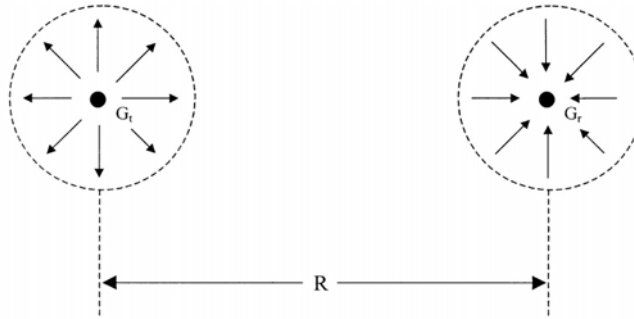


Fig. 4.3. Antene izotropice separate printr-o distanță R

Ecuția (4.5) devine:

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda_0}{4\pi R} \right)^2 \quad (4.12)$$

deoarece $G_r = G_t = 1$ pentru o antena izotropica. Pierderile spațiale (SL) sunt definite prin:

$$SL = \frac{P_t}{P_r} = \left(\frac{4\pi R}{\lambda_0} \right)^2, \text{ ca raport} \quad (4.13)$$

$$SL = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda_0} \right), \text{ în dB} \quad (4.14)$$

Exemplu

Calculați pierderile spațiale la 4 GHz pentru o distanță de 35860 km.

Soluție

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 10^9} = 0.075 \text{ m}$$

$$SL = \left(\frac{4\pi R}{\lambda_0} \right)^2 = \left(\frac{4\pi \times 3.586 \times 10^7}{0.075} \right)^2 = 3.61 \times 10^{19} = 196 \text{ dB}$$

4.4. Ecuația legăturii și bugetul legăturii

Pentru o rețea de comunicații, ecuația emisiei a lui Friis poate fi utilizată pentru a calcula puterea recepționată. Ecuația (4.5) poate fi rescrisă sub forma:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda_0}{4\pi R} \right)^2 \frac{1}{L_{sis}} \quad (4.15)$$

Această relație mai este cunoscută și sub numele de ecuația legăturii. Pierderile sistemului L_{sis} includ diferite pierderi datorate, de exemplu, dezadaptării între antenă și cablu, erorii de orientare, atmosferei și dezadaptării de polarizare.

Convertind ecuația (4.15) în decibeli, avem:

$$10 \log P_r = 10 \log P_t + 10 \log G_t + 10 \log G_r - 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda_0} \right) - 10 \log L_{sis} \quad (4.16a)$$

sau

$$P_r = P_t + G_t + G_r - SL - L_{sis} \quad (\text{în dB}) \quad (4.16b)$$

Din ecuația (4.16) putem dezvolta un tabel, numit bugetul legăturii, pentru a calcula puterea recepționată plecînd de la puterea emisă, adăugînd cîștigul antenei de recepție și de emisie și scăzînd pierderile spațiale și alte pierderi diverse.

Să considerăm, de exemplu, o legătura pămînt – satelit care funcționează pe 14.2 GHz, ca în figura 4.4.

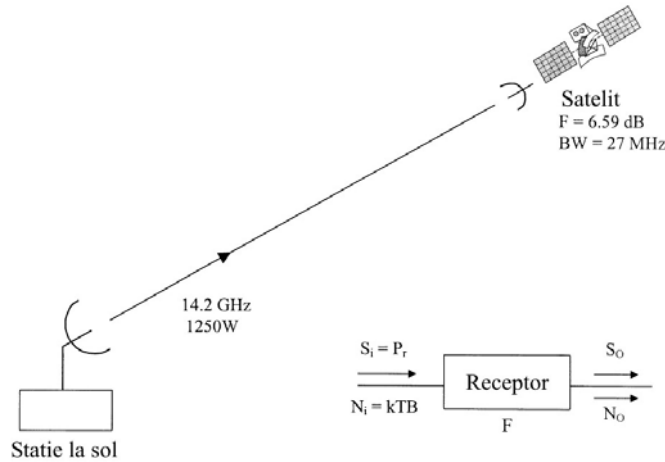


Fig. 4.4. Legătură pămînt – satelit

Stația de sol emite o putere de 1250 W. Distanța de transmisie este 37137 km. Receptorul de pe satelit are o cifră de zgomot de 6.59 dB și o bandă ocupată per canal de 27 MHz. La frecvența de funcționare de 14.2 GHz, lungimea de undă în spațiul liber este de 0.0211 m. Pierderile spațiale pot fi calculate cu relația (4.14):

$$SL(dB) = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda_0} \right) = 207.22 \text{ dB}$$

Putem dezvolta următorul buget al legăturii:

Puterea emițătorului de la sol (P_t)	+30.97 dBW (1250 W)
Pierderile pe cablul antenei de la sol	-2 dB
Cîștigul antenei de la sol (G_t)	+54.53 dB
Eroarea de orientare a antenei de la sol	-0.26 dB
Margine	-3 dB
Pierderile spațiale	-207.22 dB
Pierderile atmosferice	-2.23 dB
Pierderile de polarizare	-0.25 dB
Pierderile în cablul antenei de la satelit	0 dB
Cîștigul antenei de la satelit	+37.68 dB
Eroarea de orientare a antenei de la satelit	-0.31 dB
Puterea recepționată de satelit (P_r)	-92.08 dBW sau -62.09 dBm

Aceeași putere P_r poate fi obținută utilizînd ecuația (4.15) utilizînd L_{sis} , care include pierderile datorate pe cablu, eroarea de orientare a antenei, pierderile atmosferice, pierderile de polarizare și marginea. Din tabelul de mai sus, L_{sis} este dat de:

$$L_{sis} = -2dB - 0.26dB - 3dB - 2.23dB - 0.25dB - 0.31dB = -8.05dB$$

Cu puterea P_r la intrarea receptorului de la satelit putem calcula raportul semnal-zgomot la ieșirea acestui receptor. Din definiția factorului de zgomot rezultă că raportul semnal-zgomot la ieșire este:

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{S_i}{N_i} \frac{1}{F} = \frac{S_i}{kTBF} = \frac{P_r}{kTBF} \quad (4.17)$$

Pentru un receptor de pe satelit cu o cifră de zgomot de 6.59 dB și o bandă per canal de 27 MHz, raportul semnal-zgomot la ieșire, la temperatura camerei (290 K) utilizată în mod standard pentru a calcula puterea de zgomot, este:

$$\frac{S_o}{N_o} (dB) = 10 \log \left(\frac{S_o}{N_o} \right) = 10 \log \left(\frac{P_r}{kTBF} \right) = 10 \log P_r - 10 \log(kTBF) = \quad (4.18)$$

$$= -92.09 \text{ dBW} - (-123.10 \text{ dBW}) = 31.01 \text{ dB} = 1262$$

Acesta este un factor zecimal-zgomot la ieșire bun. O valoare mai mare va asigura o funcționare a sistemului în condiții de vreme rea și la variații largi de temperatură. Pierderile atmosferice cresc drastic în timpul furtunilor. Receptorul de pe satelit va fi solicitat, în spațiu, la variații foarte mari de temperatură.

Exemplu

La 10 GHz, o stație de sol emite o putere de 128 W spre un satelit aflat la o distanță de 2000 km. Câștigul antenei de sol este 36 dB cu o eroare de orientare de 0.5 dB. Câștigul antenei de pe satelit este de 38 dB cu o eroare de orientare de 0.5 dB. Pierderile atmosferice presupunem că sunt de 2 dB, iar pierderile de polarizare de 1 dB. Calculați puterea la intrarea receptorului și raportul semnal-zgomot de la ieșirea acestuia. Receptorul de pe satelit are o cifră de zgomot de 6 dB la temperatura camerei. O bandă de 5 MHz este necesară per canal, iar pentru calcule se va folosi o margine de 5 dB.

Soluție

Mai întâi calculăm pierderile spațiale:

$$\lambda_0 = c/f = 0.03 \text{ m}, \quad R = 2000 \text{ km}$$

$$SL(dB) = 20 \log \frac{4\pi R}{\lambda_0} = 178.5 \text{ dB}$$

Bugetul legăturii este următorul:

Puterea de emisie la sol	+21.1 dBW (sau 128 W)
Câștigul antenei de la sol	+36 dB
Eroarea de orientare a antenei	-0.5 dB
Pierderile spațiale	-178.5 dB
Pierderile atmosferice	-2 dB

Pierderile de polarizare	-1 dB
Cîștigul antenei de pe satelit	+38 dB
Eroarea de orientare a antenei de pe satelit	-0.5 dB
Margine	-5 dB
Puterea semnalului recepționat	<u>-92.4 dBW</u> sau -62.4 dBm

Raportul zgomot-zgomot la ieșirea receptorului de pe satelit se calculează cu relația (4.18):

$$\begin{aligned} \frac{S_o}{N_o} (dB) &= 10 \log \frac{P_r}{kTBF} = 10 \log P_r - 10 \log(kTBF) \\ &= -92.4 \text{ dBW} - (-130.99 \text{ dBW}) = 38.59 \text{ dB} \end{aligned}$$

Același rezultat poate fi obținut utilizînd ecuațiile (4.15) și (4.11), rescrise ca mai jos:

$$\begin{aligned} P_r &= P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda_0}{4\pi R} \right)^2 \frac{1}{L_{sis}} \\ \frac{S_o}{N_o} &= \frac{P_t G_t G_r}{kTBF L_{sis}} \left(\frac{\lambda_0}{4\pi R} \right)^2 \end{aligned}$$

Acum:

$$\begin{aligned} P_t &= 128 \text{ W} & G_t &= 36 \text{ dB} = 3981 \\ G_r &= 38 \text{ dB} = 6310 & \lambda_0 &= 0.03 \text{ m} \\ k &= 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} & T &= 290 \text{ K} \\ B &= 5 \text{ MHz} = 5 \times 10^6 \text{ Hz} & F &= 6 \text{ dB} = 3.98 \end{aligned}$$

$$L_{sis} = 0.5 \text{ dB} + 2 \text{ dB} + 1 \text{ dB} + 0.5 \text{ dB} + 5 \text{ dB} = 9 \text{ dB} = 7.94$$

$$R = 2000 \text{ km} = 2 \times 10^6 \text{ m}$$

$$P_r = 128 \text{ W} \times 3981 \times 6310 \times \left(\frac{0.03 \text{ m}}{4\pi \times 2 \times 10^6 \text{ m}} \right)^2 \frac{1}{7.94} = 5.77 \times 10^{-10} \text{ W} = -92.39 \text{ dBW}$$

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{128 \text{ W} \times 3981 \times 6310}{1.38 \times 10^{-23} \text{ W/sec/K} \times 290 \text{ K} \times 5 \times 10^6 / \text{sec} \times 3.98 \times 7.94} \times \left(\frac{0.03 \text{ m}}{4\pi \times 2 \times 10^6 \text{ m}} \right)^2 = 7245 \text{ sau } 38.60 \text{ dB}$$

4.5. Puterea efectiv radiată izotrop și parametrii G/T

Puterea efectiv radiată izotrop (EIRP) este puterea emisă care ar fi necesară dacă semnalul ar fi radiat egal în toate direcțiile în loc să fie focalizat. Să considerăm o antenă izotropă care emite o putere P'_i și o antenă direcțională care emite o putere P_i ca în figura 4.5, și un receptor amplasat la o distanță R de antene.

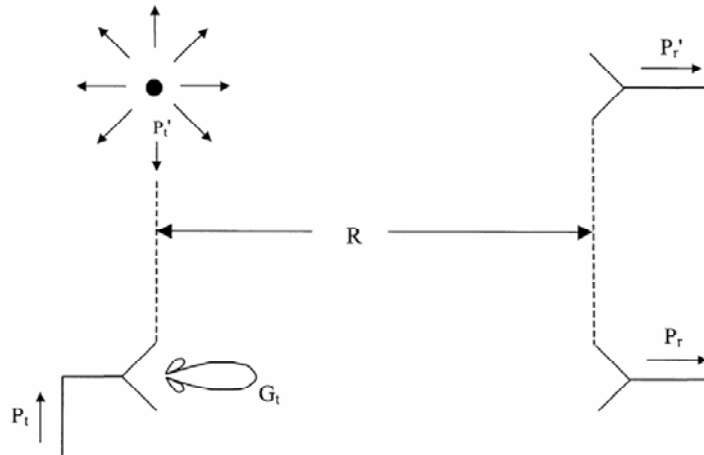


Fig. 4.5. Definiția EIRP

Puterea recepționată de la antena izotropă este:

$$P_r' = \frac{P_t'}{4\pi R^2} A_{er} = \frac{P_t'}{4\pi R^2} \frac{G_r \lambda_0^2}{4\pi} = P_t' G_r \left(\frac{\lambda_0}{4\pi R} \right)^2 \quad (4.19)$$

Puterea recepționată de la antena directivă este, conform ecuației (4.5):

$$P_r' = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda_0}{4\pi R} \right)^2 \quad (4.20)$$

unde

$$P_r' = P_r, \quad P_t' = P_t G_t = EIRP \quad (4.21)$$

Astfel EIRP este cantitatea de putere care ar trebui emisă de un radiator izotrop pentru a se obține o putere măsurată la receptor. Într-un sistem de comunicații, cu cât este mai mare EIRP, cu atât sistemul este mai bun. Prin urmare, avem:

$$EIRP = P_t G_t = \frac{P_r}{G_r} \left(\frac{4\pi R}{\lambda_0} \right)^2 \quad (4.22)$$

Exemplu

O antenă de transmisie are un câștig de 40 dB și emite o putere de 100 W. Care este EIRP ?

Soluție

$$P_t = 100 \text{ W} = 20 \text{ dBW}$$

$$G_t = 40 \text{ dB} = 10000$$

$$EIRP = P_t G_t = 1 \times 10^6 \text{ W} \text{ sau } 60 \text{ dBW}$$

Parametrul G/T este un factor de merit utilizat de obicei pentru stațiile de sol pentru a indica abilitatea acestora de a recepționa semnale slabe înecate

în zgomot. G este câștigul antenei de recepție (G_r) și T este temperatura de zgomot a sistemului (T_S).

Raportul semnal-zgomot la ieșire pentru o legătură este dat de ecuația (4.11), rescrisă mai jos:

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{P_t G_t G_r}{kTBFL_{sis}} \left(\frac{\lambda_0}{4\pi R} \right)^2 \quad (4.23)$$

Substituind EIRP, pierderile în spațiu și parametrul G/T în relația de mai sus, obținem:

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{(EIRP)(G_r/T_S)T_S}{(\text{pierderi spatiale})kTBFL_{sis}} \quad (4.24)$$

Se poate observa din relația de mai sus că raportul semnal-zgomot la ieșire este proportional cu EIRP și G_r/T_S și invers proportional cu pierderile spațiale, banda, factorul de zgomot al receptorului și pierderile sistemului.