La propagation des ondes radioélectriques

Travaux Dirigés (Corrigés)

UTBM-2003-2004

1 - Equation fondamentale des télécommunications (affaiblissement en espace libre):

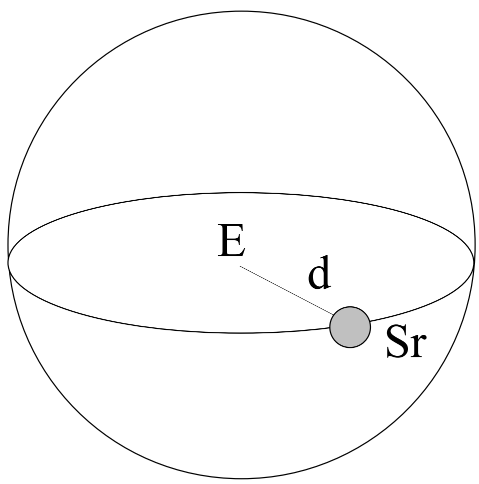
$$A_0 = 32,4 + 20\log(F) + 20\log(D)$$

où:

- F est la fréquence en MHz,
- D la distance en km.

Démontrez cette relation
Que se passe t-il si l'on double la distance, la fréquence?

Dans un espace homogène assimilable au vide, l'énergie rayonnée par une source radioélectrique isotrope se propage à la vitesse de la lumière et se répartit uniformément à la surface d'une sphère dont le rayon augmente avec le temps.



Soit:

- E la source de rayonnement isotrope
- Pe la puissance (en watts) rayonnée par cette source
- d la distance (en mètres) parcourue par l'onde à l'instant t.

L'énergie étant uniformément répartie sur la sphère de rayon d, la puissance disponible par unité de surface est égale à:

$$\frac{P_e}{4\pi d^2}$$

En plaçant à cette distance une antenne de réception dont l'aire équivalente est égale à Sr, la puissance reçue est alors:

$$P_r = \frac{P_e S_r}{4\pi d^2}$$

Dans la pratique, il n'est pas possible de réaliser une source de rayonnement parfaitement isotrope. On caractérise alors le diagramme de rayonnement de l'antenne d'émission par son gain dans les différentes directions. Dans celle qui nous intéresse, c'est-à-dire dans la direction du récepteur, l'énergie rayonnée sera, par définition, multiplié par le gain en puissance de l'antenne d'émission (Ge). On définit ainsi une Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente (PIRE) vérifiant la relation:

$$PIRE = P_e * G_e$$

La puissance reçue peut ainsi s'écrire:

$$P_r = \frac{P_e * G_e * S_r}{4\pi d^2}$$

Il n'est rationnel de caractériser l'antenne d'émission par son gain et l'antenne de réception par son aire équivalente, sachant que les deux antennes sont souvent les mêmes et que le résultat reste inchangé si l'on permute les fonctions émission et réception

En fait les notions de gain et d'aire équivalente sont liées: une grande surface d'onde plane rayonnée ou captée correspondra à un gain élevé et réciproquement. En désignant par λ la longueur d'onde dans le vide, le gain est lié à l'aire équivalente S par la relation:

$$G = \frac{4\pi S}{\lambda^2}$$

Ainsi nous avons:

$$P_r = P_e * G_e * G_r / \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2$$

Cette relation, souvent dénommée "équation fondamentale des télécommunications" est à la base des calculs et des mesures de propagation.

Si l'on pose Ge=Gr=1 (antennes isotropes) on obtient:

$$A = \frac{P_e}{P_r} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2$$

c'est à dire l'affaiblissement de propagation en espace libre entre antennes isotropes. Pour faciliter l'emploi des formules ci-dessus (équation fondamentale, affaiblissement de propagation), il est avantageux d'utiliser les décibels et de se référer à la fréquence de l'onde plutôt qu'à sa longueur d'onde. La fréquence F étant exprimée en MHz, et la vitesse de propagation de l'énergie électromagnétique dans le vide étant égale à 300 000 km/s ($3*10^8$ m/s), on a, en mètres:

$$\lambda = \frac{300}{F}$$

En choisissant d'exprimer la distance en km, c'est-à-dire en posant D=d/1000, l'affaiblissement en espace libre s'écrit:

$$A_0 = 20\log_{10}(42.F.D) = 32,4 + 20\log_{10} F + 20\log_{10} D$$

En utilisant les décibels, c'est-à-dire en prenant dix fois le logarithme de base 10 dans chaque membre l'expression suivante : $P_r = P_e * G_e * G_r / \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2$ devient:

$$P_r(dB_w) = P_e(dB_w) + G_e(dB) + G_r(dB) - A_p(dB)$$

avec: $A_p = A_0 + A_s$

L'affaiblissement total de propagation entre antennes isotropes (A_p) comprend en plus de l'affaiblissement en espace libre (A_0), un affaiblissement supplémentaire A_s qui traduit l'influence de nombreux facteurs d'environnement.

Dans la pratique il faut également tenir compte des pertes dans les lignes d'alimentation des antennes (feeder), et plus généralement dans tous les dispositifs qui s'insèrent entre les émetteurs ou les récepteurs et les antennes.

Pour ce faire, nous allons écrire l'équation fondamentale des télécommunications sous une forme donnant complètement le bilan des gains et des pertes depuis la sortie de l'émetteur jusqu'à l'entrée du récepteur.

$$P_r(dB_w) = P_e(dB_w) - L_e(dB) + G_e(dB) - A_p(dB) + G_r(dB) - L_r(dB)$$

avec:

$L_e(dB)$: pertes entre l'émetteur et l'antenne d'émission;

$L_r(dB)$: pertes entre l'antenne de réception et le récepteur.

Les pertes en question peuvent être dues non seulement aux feeders (lignes bifilaires, guides ou coaxiaux) mais aussi à des équipements tels que filtres, duplexeurs, atténuateurs, etc.

Que se passe-t-il lorsqu'on double la fréquence ?

$$A_0(F) = 32.4 + 20 * \log_{10} F + 20 * \log_{10} D$$

$$A_0(2F) = 32.4 + 20 * \log_{10} 2F + 20 * \log_{10} D$$

$$A_0(2F) = 32.4 + 20 * \log_{10} F + 20 * \log_{10} 2 + 20 * \log_{10} D$$

$$A_0(2F) = A_0(F) + 20 * \log_{10} 2$$

$$A_0(2F) - A_0(F) = 20 * \log_{10} 2 = 6dB$$

Conclusion : Chaque fois que l'on double la fréquence, l'affaiblissement augmente de 6dB (perte de 6dB).

Que se passe-t-il lorsqu'on double la distance ?

De la même manière nous avons:

$$A_0(2D) - A_0(D) = 20 * \log_{10} 2 = 6dB$$

Conclusion : Chaque fois que l'on double la distance, l'affaiblissement augmente de 6dB (perte de 6 dB).

Les équations montrent que l'on peut doubler la portée d'un équipement et réaliser par exemple des liaisons de 100 km au lieu de 50 km en récupérant 6 dB par simple utilisation de coaxiaux courts.

Note sur les décibels: dB

- dBW	La puissance de référence est égale à 1 Watt,
- dBm	La puissance de référence est égale à 1 milliwatt,
- dB	Il n'y a pas de référence : $10\log_{10}$,
- dBµV	La tension de référence est égale à 1 µV,
- dBµVm^{-1}	Le champ de référence est égal à 1 µVm^{-1} (1 µV/m),

- Rapport de puissance en bels: $\log_{10}\left(\frac{P}{P_{référence}}\right)$
- Rapport de puissance en décibels: $10 * \log_{10}\left(\frac{P}{P_{référence}}\right)$
- Rapport de tension en décibels: $20 * \log_{10}\left(\frac{V}{V_{référence}}\right)$

2 - Un émetteur émet une puissance de 50 watts à la fréquence de 900 MHz.

a - Exprimez la puissance

- en dBW,
- en dBm.

Pe=50 W
F=900 MHz

$$P_e(dBW) = 10 * \log\left(\frac{P_e(Watt)}{1\,Watt}\right) = 10 * \log\left(\frac{50}{1}\right) = 10 * \log(50) = 17.0dBW$$

$$P_e(dBm) = 10*\log\left(\frac{P_e(Watt)}{1\ mW}\right) = 10*\log\left(\frac{50}{10^{-3}}\right) = 10*\log\left(50*10^3\right)$$

$$P_e(dBm) = 10*\log(50) + 10*\log_{10}\left(10^3\right) = 17.0 + 30 = 47.0dBm$$

b – Quelle est la puissance en dBm en espace libre à 100 m de l'antenne d'émission, à 10 km de l'émission. On suppose que les gains des antennes sont égaux à l'unité.

- à 100m nous avons:

Méthode 1 :

$$P_r = \frac{P_e * G_e * G_r * \lambda^2}{(4\pi)^2 * d^2}$$

$$P_r = \frac{50*1*1*\left(\frac{1}{3}\right)^2}{(4\pi)^2 * 100^2} = 3,5*10^{-6}\ \ W$$

$$\lambda = cT = \frac{c}{f} = \frac{3*10^8}{900*10^6} = \frac{1}{3} = 0,33cm$$

$$P_r(dB_m) = 10*\log_{10}\left(P_r(mW)\right) = 10*\log_{10}\left(3,5*10^{-3}\right) = -24,5\ dBm$$

Méthode 2 :

Pe = 50 Watts, soit $P_e = 10\log_{10}\left[\frac{50}{10^{-3}}\right] = 46,98\ dB_m$

$$P_r(dB_m) = P_e(dB_m) - (32.4 + 20\log_{10}(F) + 20\log_{10}(D))$$

$$P_r(dB_m) = P_e(dB_m) - (32.4 + 20\log_{10}(900) + 20\log_{10}(0.1))$$

$$P_r(dB_m) = 46.98 - (32.4 + 59.08 - 20) = -24,5\ dB_m$$

- à 10 km nous avons:

$$P_1 = \frac{P_e * G_e * G_r * \lambda^2}{(4\pi)^2 * d_1^2},\ P_2 = \frac{P_e * G_e * G_r * \lambda^2}{(4\pi)^2 * d_2^2}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2,\ P_2 = P_1 * \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2$$

$$P_r\left(10km\right)=P_r\left(100m\right)*\left(\frac{100}{10000}\right)^2=3,5*10^{-3}*10^{-4}W$$

$$P_r\left(dBm\right)=24,5-40=-64,5dBm$$

Méthode 2 :

Pe = 50 Watts,

$$P_r(dB_m)=P_e(dB_m)-(32.4+20\log_{10}\left(F\right)+20\log_{10}\left(D\right))$$

$$P_r(dB_m)=P_e(dB_m)-(32.4+20\log_{10}\left(900\right)+20\log_{10}\left(10\right))$$

$$P_r(dB_m)=46.98-(32.4+59.08+20)=-64,5\ dB_m$$

3 -Soit un récepteur est situé à 10 km d'un émetteur émettant 50 W. Si l'on suppose l'affaiblissement en espace libre et si l'on a f=900 MHz, Gt=1 et Gr=2 calculer:

La puissance au niveau du récepteur

$$P_r=\frac{P_e*G_e*G_r*\lambda^2}{\left(4\pi\right)^2*d^2}$$

$$P_r\left(dBW\right)=10*\log_{10}\left(\frac{50*1*2*\left(1/3\right)^2}{\left(4\pi\right)^2*\left(10000\right)^2}\right)=10*\log_{10}\left(7*10^{-10}\right)=-95,5dBW$$

$$P_r\left(dBm\right)=10*\log_{10}\left(7*10^{-10}/10^{-3}\right)=-95,5+30=-61,5dBm$$

$$P_r(dB_m)=P_e(dB_m)-(32.4+20\log_{10}\left(900\right)+20\log_{10}\left(0.1\right))$$

L'amplitude du champ au niveau du récepteur

$$P_r\left(d\right)=\frac{\left|E\right|^2}{120\pi}*A_r=\frac{P_tG_tG_r\lambda^2}{\left(4\pi\right)^2d^2}$$

A_r est la surface équivalente de l'antenne de réception, elle est reliée à son gain par l'expression suivante:

$$A_r=\frac{G_r*\lambda^2}{4\pi}$$

$$|E| = \sqrt{\frac{120\pi * P_r(d)}{G_r * \lambda^2 / 4\pi}} = \sqrt{\frac{120\pi * 7 * 10^{-10}}{2 * 0,33^2 / 4\pi}} = 0,0039 V/m$$

La tension d'entrée du récepteur en supposant que l'antenne à une impédance de 50 Ohms.

Nous avons:

$$P_r(d) = \frac{\left[V/2\right]^2}{R_{ant}} = \frac{V^2}{4R_{ant}}$$

$$V = \sqrt{P_r(d) * 4 * R_{ant}} = \sqrt{7 * 10^{-10} * 4 * 50} = 0,373 * 10^{-3} V$$

$$V = 0,373 mV$$