BUREAU D'ETUDE GPS
Correction

Nous allons chercher à comprendre les raisons qui conduisent à ce que tous les récepteurs GPS (Global Positioning System) utilisent la même architecture de réception, à savoir une chaîne constituée des éléments présentés dans la figure, dans l'ordre donné dans cette même figure.

Récepteur GPS

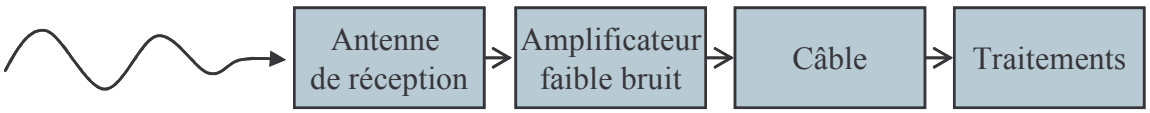

Figure 1 : Architecture typique d'un récepteur GPS

Pour ce faire, nous allons dans un premier temps évaluer les puissances reçues ainsi que le rapport signal / bruit dans des configurations classiques. Nous aborderons ensuite le cas de la corrélation des signaux (qui permet au récepteur de "retrouver" l'identité du satellite qui transmet le signal). Enfin nous arriverons à l'architecture du récepteur. Comme nous allons le voir, le niveau de réception étant très faible, les notions de bruit et de rapport signal à bruit sont fondamentales.

Le système GPS est constitué d'une trentaine de satellites qui orbitent autour de la terre à une altitude d'environ 20200 kilomètres (les orbites peuvent être considérées comme circulaires). La puissance d'émission d'un satellite est d'environ 20 W sur la fréquence L1 à 1,575 GHz, et le gain de l'antenne de 15 dB. En réception, afin de garantir une détection dans toutes les directions, le gain de l'antenne est ici de 0 dB. La figure 2 donne une représentation schématique de cette situation:

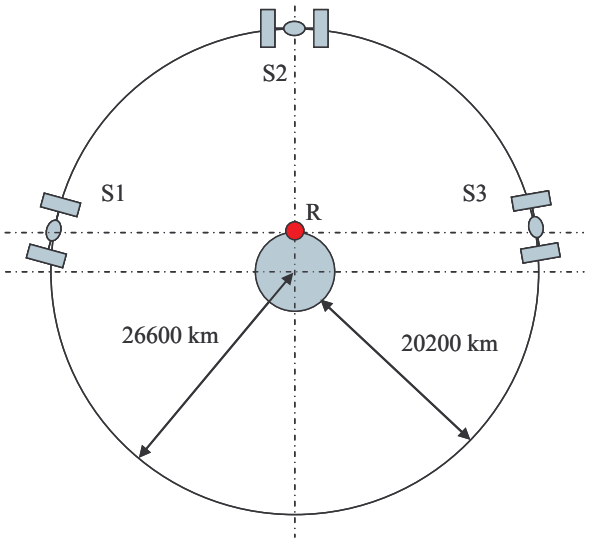

Figure 2 : Configuration possible de la constellation GPS

Remarques : on utilise S_2 , S_1 et S_3 pour désigner les satellites comme indiqué sur la figure.2. S/N pour désigner le rapport Signal à Bruit

1/ Donner l'intervalle des puissances reçues par le récepteur en fonction de la position des satellites.

Correction :

On utilise la formule du bilan de liaison pour les systèmes de télécommunication, il s'agit de calculer pour les différents satellites la puissance reçue par le récepteur sur Terre,

- Si l'on considère le satellite S_2, la puissance S reçue vaut
  $S = 3.56e^{-16}$ W=> -124.5dBm pour une distance de d= 20200Km

- Si l'on considère les satellites S_1 et S_3, la puissance S reçue vaut
  $S = 2{,}17e^{-16}$ W=> -126.6dBm pou une distance de d= 25818.6km

Le niveau minimal de réception possible est de -130dBm

2/ Sachant que le lobe principal du signal est étalé sur 2 MHz, retrouver le rapport de la puissance du signal sur la puissance du bruit thermique en réception. Donner une expression littérale puis faites l'application numérique.

Correction :

On calcule la puissance de bruit dans la bande équivalente du récepteur.
$N = K.T.B = 1.38^{e-23} * 290 * 2^{e6}$ => -111dBm= -141dBW

On peut ainsi d'après la question précédente calculer le rapport signal à bruit à l'entrée du système:

- pour S_2 $\boxed{S/N_{dB} = -13.5164dB}$

- pour S_1 & S_3 $\boxed{S/N_{dB} = -15.6dB}$

3/ Considérons les deux architectures de réception données en figure 3. La présence d'un câble de liaison entre l'antenne et le "récepteur" est en effet requise dans de nombreuses applications. C'est le cas par exemple sur un navire: l'antenne est située sur un mât (afin de rendre optimale la réception et de faire en sorte que cette dernière ne soit pas trop perturbée par les réflexions sur la mer) alors que le récepteur est dans le poste de pilotage, quelques fois plusieurs dizaines de mètres plus loin. Dans le cas présent, le câble a une longueur de 25 mètres et présente une atténuation d'environ 7 dB. L'amplificateur représenté sur la figure 3 possède un gain de 30 dB et un facteur de bruit de 3 dB.

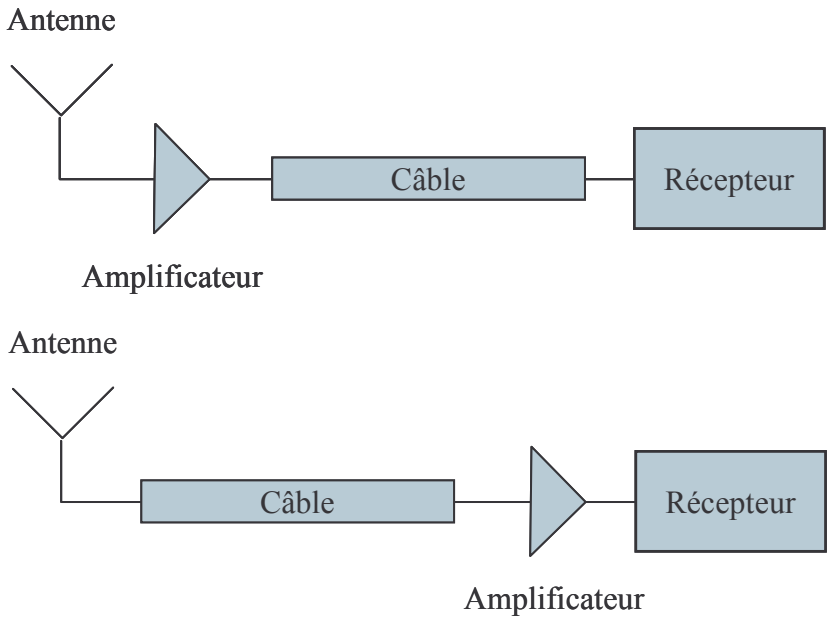

Figure 3 : Architectures à évaluer

Trouver, dans les deux cas des puissances de réception minimale et maximale (questions précédentes), le rapport signal sur bruit thermique en entrée du récepteur, pour les deux architectures mentionnées dans la figure 3.

Correction :

Nous allons déduire le rapport signal à bruit en entrée du module récepteur, en utilisant la formule vue en cours: F=(S/N)e / (S/N)s
Le facteur de bruit se déduit de la formule de Friis vue en cours intégré.

Cas 1 $F_1 = 2$ soit encore 3dB

- pour S2 $S/N_{dB} = -16.5dB$
- pour S1 & S3 $S/N_{dB} = -18.6\ dB$

Cas 2 $F_2 = 10$ soit encore 10dB

- pour S2 $S/N_{dB} = -23.5dB$
- pour S1 & S3 $S/N_{dB} = -25.6\ dB$

4/ La boîte "récepteur" de la figure 3 est en fait composée de deux éléments: les corrélateurs et les traitements numériques, comme décrits dans la figure 4.

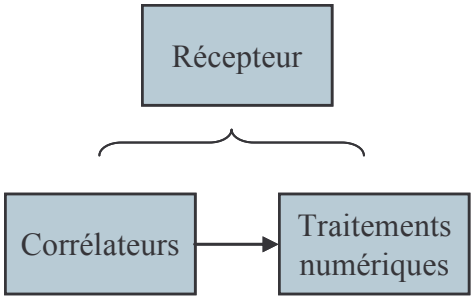

Figure 4 : Détail du "récepteur"

Le gain de corrélation d'un signal pseudo aléatoire (gain équivalent permettant de retrouver le signal dans le bruit dans un système de type CDMA) est typiquement donné par la formule

$$G_{eq-cor} = 10\log N$$

Où N est la longueur du code (en "chips"). Dans le cas du GPS, les codes utilisés font 1023 chips. Donner alors les nouvelles valeurs des rapports signal/bruit dans les différentes configurations discutées ci-dessus, en sortie de corrélation, le S/N doit être supérieur à 3 dB.

Correction :

$G_{eq-cor} = 10\log N$=30dB, on ajoute 30 dB au rapport signal à bruit précédent obtenus grâce au codage CDMA.

On reprend les résultats obtenus en question 3:

Cas 1
- pour S2 S/N_{dB} = + 13.5dB
- pour S1 & S3 S/N_{dB} = +11.4 dB

Cas 2
- pour S2 S/N_{dB} = + 6.5 dB
- pour S1 & S3 S/N_{dB} = +4.4 dB

5/ En fait, le montage retenue par l'installateur est le second, mais suite à une avarie, le câble se rompt et la réparation est effectuée avec un câble de même longueur (25 mètres), mais de moins bonne qualité à 1.575 GHz et présentant des pertes de 12 dB. Refaire les calculs dans ce nouveau cas et conclure en sachant que le seuil du récepteur est fixé à -27dB.

Correction :

Le facteur de bruit est plus élevé ici

Cas 2 + câble de mauvaise qualité

F'_2=31,62 soit encore 15dB

- pour S2 S/N_{dB} = -28.5dB
- pour S1 & S3 S/N_{dB} = -30.6 dB

Sans codage (avant le récepteur) on regarde par rapport au seuil de -27dB

Cela ne fonctionne plus on est inférieur au seuil de détection du récepteur L'installateur n'a pas forcément fait le bon choix d'architecture.

6/ Conclure de tout ce qui précède sur l'architecture nécessaire et sur la marge de fonctionnement d'un récepteur GPS.

Correction :

Pour le cas 1 cela fonctionne dans tous les cas
Dans le cas 2 cela fonctionne encore mais c'est limite, il ne faudrait pas un autre problème.
Dans le dernier cas cela ne fonctionne plus

Il vaut mieux choisir l'architecture cas 1 … d'après la formule de Friis. Si l'on peut il vaut mieux choisir le premier élément de faible facteur de bruit et de fort gain …
Le codage CDMA permet grâce à la corrélation et aux codes pseudo aléatoires de sortir un signal très faible du bruit, mais il faut faire attention aux composants que l'on choisit et à l'architecture.

7/ Nous allons maintenant analyser la sensibilité au brouillage d'un récepteur GPS. Pour ce faire, nous allons retenir comme cas typique de fonctionnement la meilleure configuration de rapport signal à bruit obtenue jusqu'à présent, puis définir la puissance que devrait émettre un "brouilleur" dont l'antenne aurait un gain de 0 dB et qui serait situé à 10 kilomètres du récepteur. La bande retenue est toujours de 2 MHz et l'on va chercher à déterminer le point pour lequel le rapport signal sur bruit après corrélation sera inférieur à 3 dB.

Correction :

I est le signal du brouilleur reçu au niveau du récepteur GPS, I est considéré comme du bruit.
On cherche la valeur minimale de la puissance d'émission du signal brouilleur au delà de laquelle le GPS ne fonctionne plus, en considérant ce que l'on connaît, soit pour :

10*log(S/(I+N)) < -24 dB (seuil du récepteur -27dB +F1)

D'après question 1 S= -154.5dBW (pour S2) S= - 156.6dBW (pour S1& S3)

Nous avons calculé la densité de puissance de bruit thermique en entrée du système

N (2MHz)=-111dBm= -141dBW=> 8.10^{-15} W

Iw et Nw sont les signaux de bruit exprimés en W

Iw +Nw < $10^{-13.05}$ ou $10^{-13.26}$

Donc Iw > 8.11e-14W ou 4.7e-14W

A partir de quel niveau de puissance le brouilleur perturbe-t-il le fonctionnement du récepteur GPS?
On fait un bilan de liaison à l'envers entre l'antenne du brouilleur et du GPS:

$Iw = Pr_{_brouilleur} = (GeGrPe)/ A$

$A = (4\pi d/\lambda)^2$=> 116,4 dB

On obtient la puissance d'émission du brouilleur en dB

$Pe_{_brouilleur_dB}$ = Pr-Ge-Gr+Att = -131-0-0+116,4 = -14.5 dBW=> 0.035 W
$Pe_{_brouilleur_dB}$ = Pr-Ge-Gr+Att = -133,3-0-0+116,4 = -16,9 dBW=> 0.0204 W

Conclure sur la vulnérabilité du GPS en réception.

Correction :

Il suffit de 20mW à 10Km pour brouiller le GPS
On voit qu'il ne faut pas une puissance très élevée pour brouiller le GPS, ce qui est un problème pour le GPS: il n'est pas du tout robuste aux brouillages !!

8/ Dans le cas des signaux à usage militaire, le problème de la vulnérabilité des signaux est primordial. Trouver des approches permettant de réduire cette dernière pour le GPS. Faire quelques calculs rapides afin de répondre à la question sur une base quantitative

Correction :

Dans le cas des signaux à usage militaire, le gain de corrélation est de l'ordre 55 à 60dB car les codes utilisés sont beaucoup plus longs que les codes "civils" (de 1023 chips à 1,023 MHz, soit une durée de 1 ms).

Si on considère le gain de corrélation de 55 dB
On cherche la valeur minimale de la puissance d'émission du signal brouilleur au delà de laquelle le GPS ne fonctionne plus, en considérant ce que l'on connaît, soit pour :
10*log(S/(I+N)) < -49 dB

D'après question 1 S= -154.5dBW (S2) S= - 156.6dBW (S1 S3)
Et N (2MHz)=-111dBm= -141dBW

Iw +Nw < $10^{-10.55}$ ou $10^{-10.76}$

Donc Iw< 2.811e^{-11} W ou 1,73e^{-11} W

(la densité de puissance de bruit Nw dans la bande de fréquence de 2MHz est ici négligeable devant la puissance du signal Iw)

Donc quelle puissance d'émission du brouilleur est nécessaire?

Iw=Pr= (GeGrAtt) / Pe
L'atténuation est calculée pour une distance de 10Km et égale à 116,4dB

Pe= Pr-Ge-Gr+Att = -105.5-0-0+116.4 = 11dBW => 12.5 W
Pe= Pr-Ge-Gr+Att = -107.5-0-0+116.4 = 8.9 dBW => 7.76 W

Pour brouiller un GPS militaire il faut une puissance plus de 300 fois supérieure à la puissance nécessaire pour brouiller un GPS civil.