

Examen transmission de l'information

J.-M Friedt, 14 février 2020

Tous les documents papier et électroniques autorisés, accès aux téléphones portables proscrit.

1 Rôle de l'antenne dans une liaison radiofréquence

Galileo¹ est une sonde spatiale lancée dans les années 1990 pour explorer Jupiter et son système de satellites. Malheureusement, l'antenne parabolique, conçue comme un parapluie, ne s'est pas complètement ouverte. Le site www.nasa.gov/audience/formedia/factsheet/Galileo_communication_factsheet.html nous informe de la stratégie alternative qui a été utilisée, à savoir communiquer au moyen de l'antenne faible gain de diagramme de rayonnement supposé isotrope.

On notera, à la lecture de la prose qui suit, que la bande X se situe autour de 10 GHz, tandis que la bande S est définie entre 2 et 4 GHz.

Extrait de "Galileo's New Telecommunications Strategy" (03.23.04)

The High-Gain Antenna

The 4.8-meter (16-foot) wide, umbrella-like high-gain antenna is mounted at the top of the spacecraft. When unfurled, the antenna's hosiery-like wire mesh stretches over 18 umbrella ribs to form a large parabolic dish. Galileo was to have used this dish to radio its scientific data from Jupiter. This high-performance, X-band antenna was designed to transmit data back to Earth at rates of up to 134,400 bits of digital information per second (the equivalent of about one imaging frame each minute).

Galileo's original mission plan called for the high-gain antenna to open shortly after launch. For the Venus-Earth-Earth Gravity-Assist (VEEGA) trajectory mission, however, the heat-sensitive high-gain antenna had to be left closed and stowed behind a large sun shade to protect it during the spacecraft's passage through the inner solar system. During this portion of Galileo's journey, two small, heat-tolerant low-gain antennas provided the spacecraft's link to Earth. One of these S-band antennas, mounted on a boom, was added to the spacecraft expressly to bolster Galileo's telecommunications during the flight to Venus. The other primary low-gain antenna mounted to the top of the high-gain was destined to become the only means through which Galileo will be able to accomplish its mission. [...]

The Low-Gain Antenna

The difference between Galileo sending its data to Earth using the high-gain antenna and the low-gain is like the difference between the concentrated light from a spotlight versus the light emitted diffusely from a bare bulb. If unfurled, the high-gain would transmit data back to Deep Space Network (DSN) collecting antennas in a narrowly focused beam. The low-gain antenna transmits in a comparatively unfocused broadcast, and only a tiny fraction of the signal actually reaches DSN receivers. Because the received signal is 10,000 times fainter, data must be sent at a lower rate to ensure that the contents are clearly understood. [...]

Without any new enhancements, the low-gain antenna's data transmission rate at Jupiter would be limited to only 8-16 bits per second (bps), compared to the high-gain's 134,400 bps.

1. Rappeler le rôle de la parabole dans une antenne de ce type, et quelle(s) grandeur(s) géométrique(s) caractérise(nt) ses performances.
2. Rappeler le gain dans une liaison radiofréquence amenée par une parabole. Effectuer l'application numérique dans le cas de la parabole de Galileo exploitée en bande X.
3. Rappeler le rôle du gain dans le débit de communication entre deux interlocuteurs.
4. Sachant que la liaison était supposée fournir un débit de communication de 134400 bits par seconde en présence de la parabole, quel effet sur le débit de communication implique la perte de la parabole et l'utilisation d'un émetteur isotrope? Fournir une application numérique du débit de communication en l'absence de parabole.
5. L'antenne isotrope de Galileo ne fonctionne pas en bande X mais en bande S (on supposera à 2 GHz). Quelle est la conséquence sur le bilan de liaison?
6. Proposer une application numérique. Commenter l'affirmation du site de la NASA que le débit est de 8 à 16 bits par seconde dans cette configuration : est-ce en accord avec votre calcul? si non, commenter.

1. D.M. Harland, *Jupiter odyssey : the story of NASA's Galileo mission*, Springer (2000)



Figure 1: Galileo devant Jupiter

2 Identification de signaux transmis sur porteuse radiofréquence

Un signal est émis sur une porteuses dans la bande de communication à faible portée (*Short Range Devices*) SRD860² comprise entre 863 et 870 MHz. Cette porteuse est modulée par un signal analogique périodique.

1. Après analyse des informations fournies par GNURadio lors de l'acquisition de signaux issus d'un récepteur de télévision numérique terrestre dont la configuration permet d'analyser le signal dans la bande SRD860, identifier la fréquence de la porteuse qui nous intéresse. On pourra par exemple tracer le spectre du signal dans diverses sous bandes de SRD860 afin de trouver le signal.
2. Ayant identifié la porteuse sur une large bande de fréquence (le récepteur de télévision numérique terrestre permet d'analyser jusqu'à 2 MHz de bande passante), comment zoomer le spectre sur le signal ? Analyser finement la structure du signal en ajustant la bande de mesure sur ± 20 kHz.
3. Connaissant la fréquence d'échantillonnage f_e et le nombre de points N affichés sur le spectre, quelle est la résolution spectrale de la mesure ? Application numérique dans le cas qui nous intéresse ici.
4. Compte tenu du spectre observé, quelle est la nature de la modulation de la porteuse pour transmettre l'information ?
5. Quel bloc de traitement GNURadio permet d'observer le signal transmis dans le domaine temporel ? Démontrer expérimentalement (présenter le résultat à un enseignant).
6. Quelle condition entre la fréquence de porteuse reçue et la fréquence de l'oscillateur local doit être vérifiée pour démoduler un signal modulé en amplitude ?
7. Quelle est la gamme de fréquences du signal transmis ? On pourra, pour cette analyse, observer le spectre du signal démodulé.
8. La source radiofréquence émet une puissance de 0 dBm. Quelle est la puissance radiofréquence reçue par un récepteur à une distance de 100 m à la fréquence de travail identifiée plus haut, en supposant que émetteur et récepteur sont tous deux munis d'antennes isotropes en polarisation linéaire parallèles.
9. Que se passe-t-il si un pigeon se pose sur l'antenne du récepteur et l'élément rayonnant est penché de 90° ?

3 Questions de cours

1. Un signal wifi est transmis dans la bande de fréquence autour de 2400 MHz. Quelle est la taille "idéale" d'antenne sur un routeur wifi pour échanger un tel signal ? Justifier.
2. Un signal à 20 kHz est échantillonné à 1 Méchantillons/seconde. Quelle est l'abscisse de la raie correspondante dans une transformée de Fourier discrète sur 1000 points ?
3. Combien de temps a-t-il fallu pour acquérir ces 1000 points ?
4. Quelles sont les quatre méthodes de partage du spectre entre plusieurs interlocuteurs ?
5. Quelle architecture de circuit permet de démoduler un signal FM ?
6. Un oscillateur local à 100 MHz présente une sensibilité thermique de 5 ppm/K. Quelle est sa variation de fréquence si la température varie de 10°C ?
7. Cet oscillateur cadence un récepteur de la bande FM commerciale. Est-ce que la dérive de l'oscillateur locale sera détectable sur le signal audiofréquence issu de la démodulation ?
8. Quelle architecture de circuit permet de s'affranchir d'une modulation BPSK pour reproduire en local l'oscillateur qui a cadencé l'émission ?
9. Quelle fonction mathématique permet de trouver un motif m connu dans un signal s ? Donner l'expression de cette fonction mathématique en fonction de $s(t)$ et $m(t)$.

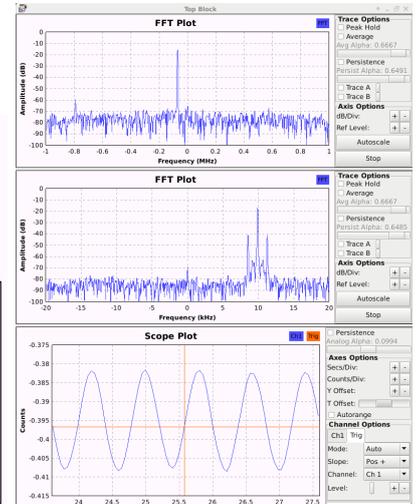
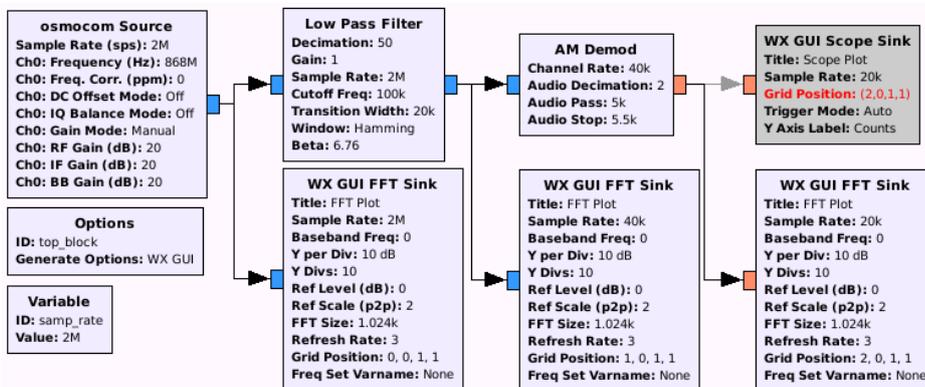
2. https://en.wikipedia.org/wiki/Short_Range_Devices#SRD860

Analyse :

1. le réflecteur parabolique a pour vocation d'augmenter la surface collectrice de l'antenne, *i.e.* remplacer le terme λ^2 dans l'équation de Friis par un gain de l'ordre de $\pi D^2 \lambda^2$ représentatif de la surface qui intersecte la surface de la sphère sur laquelle se distribue la puissance émise πD^2 avec D le diamètre de l'antenne, grandeur qui la caractérise.
2. X-band = 10 GHz, donc le gain de l'antenne de 4,8 m de diamètre à $\lambda = 300/10000 = 0,03$ m est de $G = \pi^2 D^2 / \lambda^2 = 250000$ ou $G = 10 \times \log_{10} \left(\left(\pi \frac{D}{\lambda} \right)^2 \right) = 20 \times \log_{10} \left(\pi \frac{D}{\lambda} \right) = 54$ dBi
3. perte du gain d'antenne dans la liaison : on a vu par le théorème de Shannon sur la capacité de canal qu'à faible rapport signal à bruit le débit de communication est uniquement limité par la puissance (développement limité de la fonction logarithme) ...
4. ... donc on passe du débit nominal de 134 kb/s à $134000/250000 \simeq 0.5$ b/s
5. S-band low gain antenna : 2-4 GHz donc les pertes de propagation sont réduites (cf le terme en f^2 qui apparaît dans l'équation des pertes par propagation FSPL).
6. $250000/5^2 = 10000$ donc les affirmations sont cohérentes, le signal reçu sera bien 10000 fois plus faible que celui que nous aurions reçu en présence de la parabole. Cette analyse néglige cependant le fait que le terme λ apparaît aussi dans le gain des paraboles, compensant la réduction de pertes de propagation par la perte d'efficacité des miroirs paraboliques.

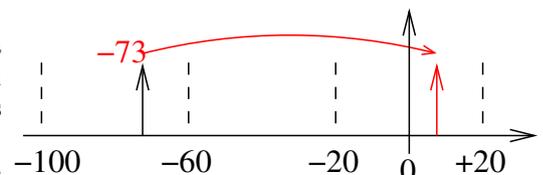
Identification de signaux transmis sur porteuse radiofréquence

1. 868 MHz
2. décimation précédée d'un filtre passe bas. Pour passer de 2 MHz à ± 20 kHz, on décime d'un facteur 50.
3. f_e/N . Sur un spectre comprenant 1024 points, la résolution spectrale est de l'ordre de 20 Hz.
4. Seulement deux raies de part et d'autre de la porteuse : il s'agit d'une modulation en amplitude.
5. AM Demod.



6. La fréquence de LO doit être dans la bande passante du redresseur/passe bas du démodulateur AM.

Note : on pourra être surpris du fait que la raie associée à l'émission soit à gauche de l'origine sur le spectre large bande (± 1 MHz) et à droite après décimation. La raie s'est en fait déplacée par repliement spectral : ce récepteur TNT a été calibré avec un décalage à la fréquence nominale de -84 ppm, soit à 868 MHz un écart d'environ $84 \times 868 = -73$ kHz. Cette fréquence sort de la place ± 20 kHz après décimation. Néanmoins le filtre passe-bas ne coupe qu'à 100 kHz, laissant donc la raie avant décimation. Le repliement spectral amène le signal par sauts de 40 kHz dans la bande passante : $-73+80 = +7$ kHz, proche des 10 kHz observés.



7. le balayage de fréquence se fait entre 1,0 et 1,5 kHz : cf la courbe page suivante, graphique du bas.

8. les pertes de propagation en espace libre (FSPL) sont $FSPL = 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(d) - 147,55$ en unités SI donc pour $d = 100$ m et $f = 868 \cdot 10^6$ Hz on trouve des pertes de 71 dB : le signal reçu sera de -71 dBm ou 80 pW.
9. polarisation linéaires croisées : aucun signal n'est reçu.

Questions de cours

1. $300/2400/4 = 3,12$ cm pour un monopôle ou 6,25 cm pour un dipôle,
2. 1000 points pour une extension de 1 MHz donc $\simeq 500$ points pour $\simeq 500$ kHz donc l'abscisse est le point d'indice $500/500 \times 20 = 20$.
3. 1000 points acquis à 1 MHz sont obtenus en 1 ms.
4. {C,T,D,S}DMA
5. boucle à verrouillage de phase,
6. $100 \times 5 = 500$ Hz/K donc 5 kHz de dérive sur 10 K.
7. non : le rôle de la démodulation est d'éliminer la porteuse en suivant ses dérives lentes,
8. boucle de Costas implémentant soit une fonction arctangente insensible aux rotations de π , soit la mise au carré du signal (tel que la modulation de π devienne 2π) puis division par deux de la fréquence du signal résultant,
9. corrélation :

$$c(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot m(t - \tau) dt$$

Contrairement à la convolution, ici l'axe des temps des deux arguments évolue dans le même sens.

