

Communications Numériques et Théorie de l'Information

Contrôle de Connaissances avec documents

Mercredi 12 juin 2013 - 13h30 à 15h00



INMARSAT et les communications mobiles

Le système de communication par satellite INMARSAT exploite 11 satellites géostationnaires. Prévu pour offrir des services de téléphonie maritime pour les bateaux, aujourd'hui, le réseau INMARSAT assure aussi des services personnels de téléphonie mobile à couverture globale, ainsi que des services d'aide à la navigation aérienne. Chaque satellite du réseau est du type répéteur numérique (*bent pipe*), ce qui rend son architecture très simple, extrêmement robuste et fiable.

Plusieurs systèmes de communication à usages différents sont disponibles sur ce réseau satellitaire, systèmes A, GAN, BGAN, etc. Nous allons étudier un système particulièrement intéressant : le *Classic Aero*.

Ce système est réservé au domaine aéronautique. Il fournit des services de transfert de données de télémétrie du vol, ainsi que des services de transfert de données de parole à bas débit, à bord des aéronefs hors portée d'un réseau terrestre. Tous les appels téléphoniques passés depuis un avion qui traverse l'océan font usage de ce système. Ces services sont assurés en *full-duplex* (voie aller et voie retour), avec 10 MHz de bande disponible par voie de duplexage. Chaque aéronef se voit attribuer une sous-bande de fréquences (une en *uplink* et une autre en *downlink*, les deux canaux du duplex étant identiques). Deux aéronefs ne partagent pas les mêmes sous-bandes ; c'est le principe de l'accès multiple par répartition des fréquences (FDMA).

Classic Aero offre à chaque aéronef 7 canaux de fréquence pour les communications avec le satellite dans la bande de fréquences attribuée : un canal pour les données relatives à la sécurité du vol (télémétrie)¹, et six autres capables de supporter différents systèmes numériques, susceptibles d'offrir des services de téléphonie ou FAX à bas débit aux passagers. Ces 7 canaux ont tous la même largeur de bande. On les numérote c_0 à c_6 , le canal c_0 étant systématiquement réservé à la télémétrie. Plusieurs sous-systèmes de communications (C, H/H+, I, M, etc.) peuvent exploiter chacun des 7 canaux, en fonction des caractéristiques de l'implantation dans l'aéronef (fondamentalement les types et le gain de l'antenne de transmission).

La figure 1 montre un schéma d'implantation de l'antenne sur le dos d'un Airbus A340 de certaines compagnies aériennes.² La figure 2 montre le plan d'allocation des canaux de fréquences des 7 canaux dans la sous-bande attribuée à un aéronef (le vol AF328 en l'occurrence).



FIGURE 1: Implantation dorsale de l'antenne INMARSAT sur un A340.

Le tableau suivant résume les débits binaires des services des différents systèmes de *Classic Aero*, en kbit/sec.

	C	H/H+	I	M	mini-M
Voix		4.8	4.8	4.8	2.4
Télémétrie(c_0)	0.6	4.8	4.8	2.4	2.4
FAX		4.8	4.8	2.4	2.4

Certains opérateurs aériens louent seulement les services du système C. Dans ce cas la téléphonie pour les passagers, n'est pas disponible.

1. Déterminer la largeur de bande requise du canal de télémétrie c_0 , pour assurer une transmission 2-PAM, avec filtre de mise en forme à l'émission en racine de cosinus surélevé de *roll-off*, $\alpha = 0,3$. Pourquoi utilise-t-on une transmission binaire à votre avis ?

¹la même information qui est enregistrée dans les boîtes noires.

²Malheureusement, un nombre limité d'aéronefs en service possèdent ce type d'installation.

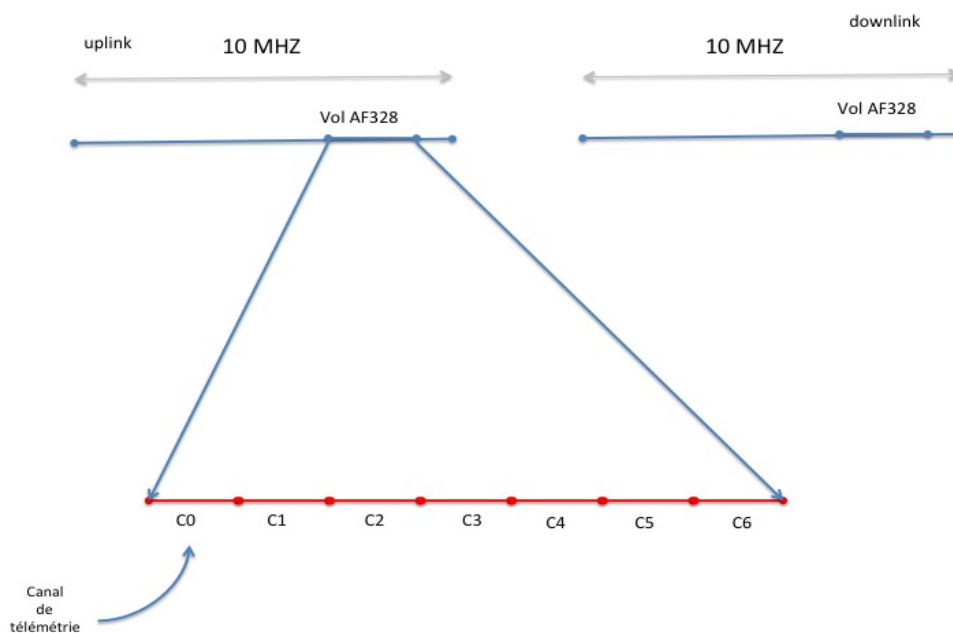


FIGURE 2: Plan d'allocation des fréquences de *ClassicAero*.

2. Calculer l'efficacité spectrale des systèmes C, H/H+, I, M et mini-M.
3. Déterminer la largeur de bande par aéronef (arrondir au plus petit entier supérieur ou égal à la valeur calculée).
4. Calculer le nombre d'aéronefs qu'un seul satellite peut desservir.
5. Calculer l'énergie requise par bit transmis pour assurer sur le système C, une qualité de service, $P_b \sim 10^{-5}$, sachant que la liaison aéronef-satellite peut être considérée comme un canal à bruit additif, blanc et gaussien, de densité spectrale de puissance $N_0 = 10^{-11} \text{ W/Hz}$.

INMARSAT a développé pour les familles Boeing 787 et Airbus A380, un système étendu appelé *Swift64*. Le tableau suivant résume les débits binaires des services de parole et de télémétrie du système *Swift64*, en *kb/s*.

	Swift64
Voix	4.8
Télémétrie(c_0)	14.4

6. Déterminer l'ordre de la modulation M-PAM requise pour ce système sur le canal c_0 de télémétrie, sachant que les largeurs de bande des 7 canaux restent inchangées et que les filtres de mise en forme utilisent le même *roll-off* α .

-
7. Déterminer la pénalité en énergie par bit transmis du service de télémétrie de *Swift64*, par rapport au service de télémétrie de H/H+, pour atteindre la même qualité de service, sachant que le canal reste le même.

Pour améliorer les performances en qualité de service, le système *Swift64* utilise un code correcteur d'erreur $C_{Swift64}$, de matrice génératrice :

$$\mathbf{G}_{Swift64} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

8. Déterminer les paramètres (n, k) du code dual engendré par la matrice de check de parité du code $C_{Swift64}$. Déterminer la capacité de détection et de correction de ce code.
9. On a utilisé le code $C_{Swift64}$ pour transmettre un mot de données. On a reçu le mot suivant :

$$y = [10111001].$$

Calculer le syndrome et déterminer le mot transmis.



Corrigés

- 1) Décomposition de la ressource largeur de bande disponible :

- Bw totale disponible : 20MHz,
- Bw par voie de duplexage : $20/2 = 10\text{MHz}$,
- ces 10MHz vont être partagés entre N_a aéronefs, chaque aéronef disposant de B_a Hz de largeur de bande. Cette valeur, B_a , doit être déterminée en fonction de la modulation utilisée et du débit binaire que l'on souhaite transmettre;
- chaque aéronef dispose de B_a Hz pour allouer 7 canaux de fréquence différents, numérotés de c_0 à c_6 ; tel qu'indiqué dans l'énoncé, le premier canal c_0 est réservé à la télémetrie (fondamentalement, vitesse relative à l'air de l'avion, puissance des moteurs, assiette, cap, altitude, etc.). Les B_a Hz vont être divisés en 7 sous-bandes de fréquences de même largeur de bande. La largeur de bande du canal c_0 détermine donc la largeur de bande requise par aéronef.

On utilise un filtre en RCS de roll-off $\alpha = 0.3$. Il n'y aura pas d'IES aux instants idéaux d'échantillonnage. La largeur de bande en bande de base requise vaut donc :

$$B_{RCS_{0,3}} = \frac{D \cdot (1 + \alpha)}{2} \text{ Hz},$$

avec D le débit binaire véhiculé sur ce canal. D'où la largeur de bande sur fréquence porteuse du canal c_0 , vaut :

$$B_{c_0} = 2 \cdot B_{RCS_{0,3}} = 2 \cdot \frac{D \cdot (1 + \alpha)}{2} \text{ Hz},$$

(voir cours de RF pour le rapport entre Bw en bande de base et BW sur fréquence porteuse). On obtient donc :

$$B_{c_0} = D \cdot (1 + \alpha) \text{ Hz}.$$

Pour déterminer le besoin en largeur de bande, on choisit le plus gros débit transporté par les différents services. En l'occurrence, il s'agit du service H/H+ (ou I). On déduit,

$$B_{c_0} = D \cdot (1 + \alpha) = 4.8 \times 1.3 = 6.24 \text{ kHz}.$$

- 2) Selon la définition d'efficacité spectrale :

$$\eta = \frac{D}{B_w} \text{ bits/s/Hz}.$$

Les débits binaires des différents services sont connus (voir tableau). Par contre on peut se poser la question de comment déduire la largeur de bande requise. Deux options sont envisageables :

1. on considère la largeur de bande allouée à chaque canal comme ressource disponible, dans ce cas, vu que le calcul de cette bande a été fixé pour le plus gros débit binaire, l'efficacité spectrale sera plus faible pour les services à plus faible débit, donc un mauvais usage de la fréquence pour ces services. Dans ce cas INMARSAT doit revoir son schéma d'allocation des canaux pour chaque aéronef ;
2. on considère la largeur de bande réellement consommée par chaque service ; dans ce cas l'efficacité spectrale rend une information plus réelle de l'usage des fréquences, mais ne tient pas compte du gâchis fréquentiel induit par les services à plus faible débit.

Nous choisirons dans la suite la première approche qui nous semble plus informative sur l'usage de la fréquence. On a donc,

$$B_w = B_{c_0} = 6.24 \text{ kHz},$$

constant. On déduit les efficacités spectrales des services résumées dans le tableau suivant, en bits/s/Hz :

	C	H/H+	I	M	mini-M
Voix		0.77	0.77	0.77	0.385
Télémetrie(c_0)	0.1	0.77	0.77	0.385	0.385
FAX		0.77	0.77	0.385	0.385

- 3) Les autres six canaux sont identiques au canal c_0 , donc la largeur de bande allouée par aéronef, sera :

$$B_a = 7 \times B_{c_0} = 43.58 \text{ kHz} \sim 44 \text{ kHz}.$$

- 4) La largeur de bande totale par voie de duplex 10MHz. Chaque aéronef utilise $B_a \sim 44 \text{ kHz}$, d'où le nombre d'aéronefs desservis par un satellite :

$$N_a = \frac{10 \text{ MHz}}{44 \text{ kHz}} = 227 \text{ aéronefs}.$$

Ceci peut sembler énorme, mais à certaines heures de la journée, seulement sur l'atlantique nord, il peut avoir le double de ce trafic entre l'Europe et les USA. Il faut indiquer que ce type de service n'est pas offert par tous les opérateurs aériens.

- 5) Application directe de la probabilité d'erreur bit dans le cas binaire :

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot E_b}{N_0}}\right) = 10^{-5}.$$

À partir du formulaire de Communications Numériques, on déduit :

$$Q(x) = 10^{-5} \Rightarrow x \geq 4.25,$$

$$\sqrt{\frac{2.E_b}{N_0}} \geq 4.25 \rightarrow E_b \geq \frac{4.25^2}{2} \times N_0,$$

d'où,

$$E_b \geq 9.10^{-11} \text{ J.}$$

- 6) La largeur de bande du canal c_0 a été calculée pour le débit de 4.8 kb/s. Le débit du canal c_0 pour *Swift64* est trois fois supérieur. Si on utilise le même filtre et la même largeur de bande, alors il faut réduire le taux symbole d'un facteur 3. Comment ? on change l'ordre de la modulation de $M = 2$ à $M = 2^3 = 8$

$$M = 2 \rightarrow M = 8.$$

- 7) L'énergie par bit transmis requise pour le système H/H+ nécessaire pour atteindre la qualité de service $P_b \sim 10^{-5}$ a été calculée :

$$E_b(\text{H/H+}) \geq 9.10^{-11} \text{ J.}$$

Calculons la puissance requise pour la même probabilité d'erreur du service de télémétrie de *Swift64*.

En supposant l'usage d'un code de Gray, nous avons le résultat du Formulaire de Communications Numériques :

$$P_b = \frac{P_e}{\log_2(M)} \rightarrow P_e \sim 3.10^{-5}.$$

où, nous avons calculé au TD 2,

$$P_e = 2 \cdot \frac{M-1}{M} Q \left(\sqrt{\frac{6.E_b \log_2 M}{N_0 (M^2 - 1)}} \right)$$

Pour $M = 8$,

$$P_e = 2 \cdot \frac{7}{8} Q \left(\sqrt{\frac{E_b 18}{N_0 63}} \right) \sim 10^{-5}$$

Calculons E_b pour assurer la condition $P_e \leq 3.10^{-5}$.

$$P_e = \frac{7}{4} Q \left(\sqrt{\frac{18 E_b}{63 N_0}} \right) \leq 3.10^{-5}$$

Ceci nous conduit au résultat suivant :

$$Q \left(\sqrt{\frac{0.285.E_b}{N_0}} \right) \leq 1.7.10^{-5}.$$

Du Formulaire on déduit :

$$\sqrt{\frac{18.E_b}{63.N_0}} \geq 4.2,$$

$$E_b(\text{Swift64}) \geq 61.7.10^{-11} \text{ J.}$$

Si l'on compare cette énergie par bit par rapport au service H/H+ :

$$E_b(\text{H/H+}) \geq 9.10^{-11} \text{ J,}$$

On conclut une pénalité de l'ordre de $61.7/9 \sim 7$, c'est à dire 7 fois plus d'énergie par bit transmis pour assurer la même qualité de service.

- 8) Attention il s'agit du code dual du code C engendré par $\mathbf{G}_{\text{Swift64}}$. Si $\mathbf{G}_{\text{Swift64}} = [I(4 \times 4) | P(4 \times 4)]$, alors la matrice de check de parité de ce code s'écrit $\mathbf{H}_{\text{Swift64}} = [P(4 \times 4)^t | I(4 \times 4)]$. C'est à dire, C_{Swift64}^\perp a comme génératrice :

$$\mathbf{H}_{\text{Swift64}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

On déduit les dimensions de C_{Swift64}^\perp , $k = 4$, $n = 8$.

Remarque importante : à une permutation des colonnes près, la génératrice de C_{Swift64}^\perp est la même que la génératrice de C_{Swift64} . On déduit que :

$$C_{\text{Swift64}}^\perp = C_{\text{Swift64}}.$$

On dit que le code est *auto-dual*.

Pour déterminer la capacité de détection et correction du code, il suffit de calculer sa d_{\min} du code. La matrice de check de parité de C_{Swift64}^\perp est $\mathbf{G}_{\text{Swift64}}$. Il y a donc 4 colonnes linéairement dépendantes dans $\mathbf{G}_{\text{Swift64}}$. On conclut que sa $d_{\min} = 4$. Ce code détecte 3 erreurs et corrige 1.

- 9) Le calcul du syndrome est simple à réaliser :

$$S = y.\mathbf{H}_{\text{Swift64}} = [0001].$$

Ce motif syndromique correspond à la dernière colonne de $\mathbf{H}_{\text{Swift64}}$. Puisque le code corrige un seule erreur, on déduit que l'erreur est de la forme :

$$e = [00000001],$$

D'où le mot transmit,

$$c = y + e = [10111000].$$

