Simulation d'un émetteur / récepteur ADS-B et décodage temps réel à l'aide de radio logicielle
Projet TS229 – Année 2019/2020

Guillaume Ferré, Romain Tajan et Baptiste Laporte-Fauret

1 Objectifs

L'objectif du projet TS229 est de mettre en pratique dans un cas concret les cours et les TP de communications numériques, codage de canal et traitement du signal. Pour cela, il est demandé de simuler sous Matlab un émetteur/récepteur de données ADS-B (Automatic Dependent Surveillance Broadcast). Puis sur la base de vos résultats de simulation, vous adapterez votre récepteur afin d'être en mesure de'effectuer un décodage temps réel des avions survolant l'école.

Ce projet est découpé en différentes **tâches** qui peuvent être traitées dans l'ordre souhaité. Ces tâches indiquent les pré-requis et les objectifs à réaliser aux travers de **sous-tâches**. Le schéma en Fig. 1 représente ces différentes tâches et leur liens de dépendance. Une tâche bleue correspond à une tâche liée à "l'application", une tâche verte est une tâche orientée "signal / communications numériques" et une tâche rouge est une tâche orientée "couche accès". Les tâches en pointillées (par exemple la tâche 5) est une tâche optionnelle. Enfin, le trait en pointillé indique que la tâche 6 peut être débutée dès la lecture du sujet mais que la tâche 3 est nécessaire pour la mener à son terme.

Des étapes de **vérification** doivent également être effectuées. Enfin, la tâche doit être **validée** par votre encadrant avant de pouvoir poursuivre le travail.

Parmi les sous-tâches à accomplir, certaines sont à réaliser sous **Matlab** alors que d'autres sont uniquement **théoriques**. Il est important d'expliquer votre travail dans le **rapport** de projet en plus des informations obligatoires à fournir et qui seront indiquées clairement dans les tâches.

Ce projet est à rendre pour le **vendredi 25 octobre 2019** sur la plateforme Thor.

2 ADS-B : Introduction et fonctionnement

Afin de surveiller l'état du réseau aérien, un système de diffusion appelé *Automatic Dependant Surveillance - Broadcast* (ADS-B) a été proposé en complément des radars classiques. Dans ce système, les appareils estiment leurs positions (longitude, latitude, altitude) grâce aux techniques de positionnement par satellite (GPS - Global Positionning System, GLONASS - Global Navigation Satellite System ou encore Galiléo) et diffusent ces informations régulièrement (toutes les secondes environ). Ces informations sont ensuite récupérées :

- au sol : par des stations intermédiaires ou des tours de contrôle,
- dans les autres appareils : qui peuvent utiliser ces signaux pour leurs systèmes anti-collision.

Le principal avantage du système ADS-B par rapport au radar classique est son faible coût d'infrastructure. En effet, la station réceptrice possède seulement une antenne afin de recevoir les

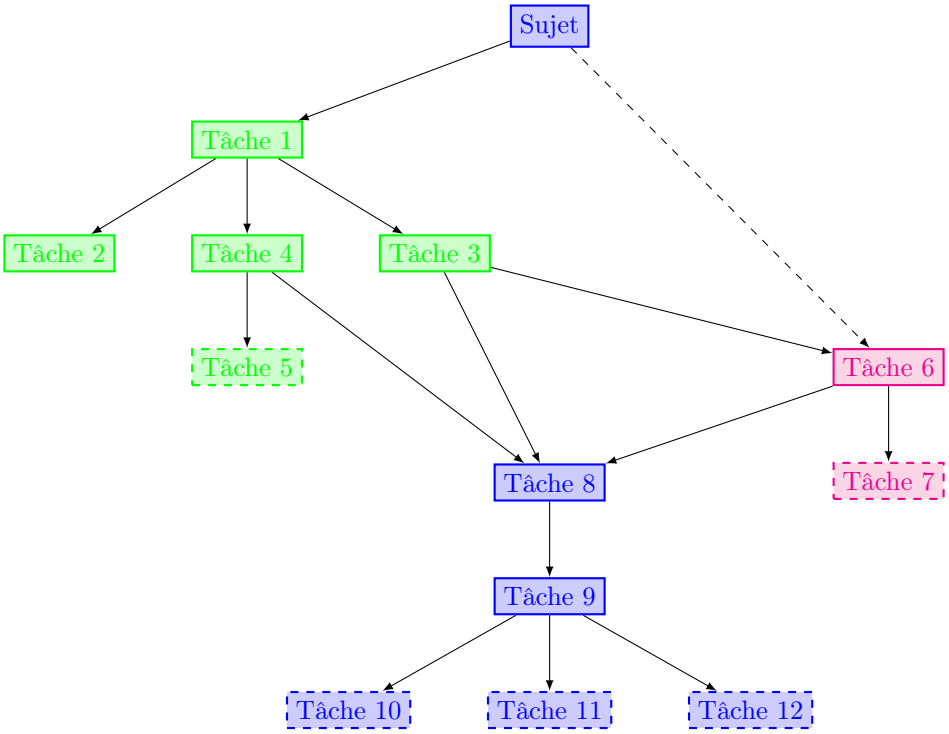


FIGURE 1 – Organigramme des taches

signaux ADS-B, le reste des traitements étant faits à bord des appareils. Le récepteur est donc entièrement passif et n'a pas besion d'interroger l'appareil pour qu'il émette sa position.

Il existe plusieurs liaisons pour la transmission des signaux ADS-B. Les deux principales sont :

— le 1090 Extended Squitter (1090 ES),

— l'UAT (Universal Access Transponder).

Dans ce projet, nous allons nous concentrer sur le 1090 ES car c'est le mode privilégié en Europe. Dans l'appellation 1090 ES, 1090 signifie que la fréquence porteuse des signaux ADS-B (pour ce mode de transmission) est 1090 MHz. ES signifie Extended Squitter, ce qui pourrait être traduit par message étendu. En effet, les messages transmis en utilisant ce mode avaient une durée de 56 bits (hors préambule de synchronisation). Dans le nouveau standard, les messages peuvent contenir 112 bits, d'où la notion de "message étendu".

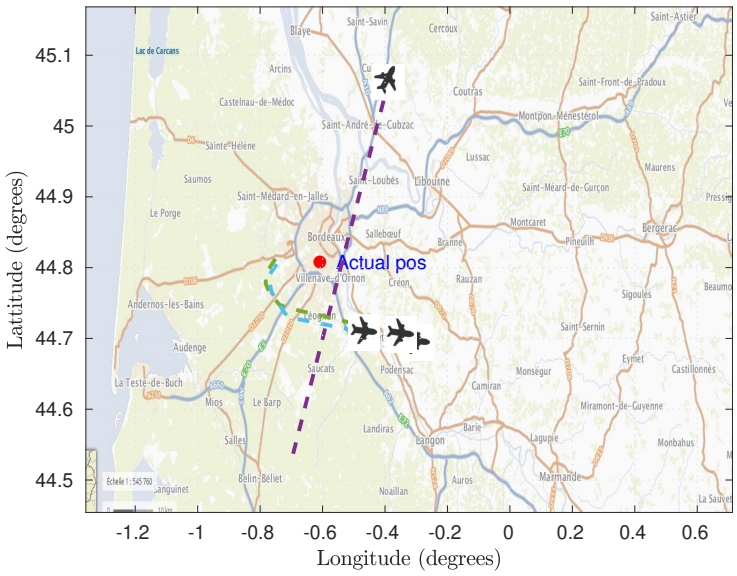


FIGURE 2 – Exemple de trajectoires décodées

Tâche 1 – Couche physique ADS-B
Prise en main de la chaine de communication ADSB
Durée 4h
Projet TS229 – Année 2019/2020

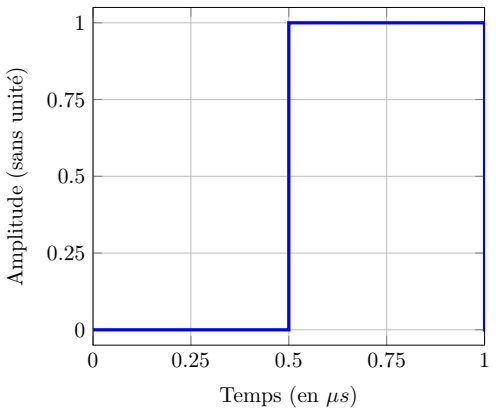
Guillaume Ferré, Romain Tajan et Baptiste Laporte-Fauret

Pré-requis

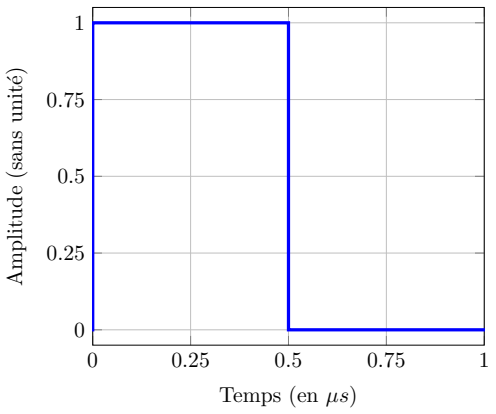
Aucun, lecture du sujet.

Objectifs

Il existe de nombreuses façons de mettre en oeuvre un flux d'information binaire. Nous avons notamment vu l'année dernière en cours de communications numériques que les informations binaires étaient modulées numériquement pour créer des symboles, symboles qui étaient par la suite filtrés par un filtre dit de *mise en forme*. Dans le cadre du standard ADS-B, les signaux transmis autour de la porteuse à 1.09GHz sont obtenus par une modulation dite en position d'amplitude (PPM - Pulse Position Modulation). La modulation PPM considérée est binaire avec une période symbole $T_s = 1\mu s$. Cette modulation PPM encode les informations binaires 0 et 1 avec les impulsions $p_0(t)$ et $p_1(t)$ représentées respectivement en Figure 1(a) et Fig. 1(b).



(a) Impulsion $p_0(t)$ encodant le bit 0



(b) Impulsion encodant $p_1(t)$ le bit 1

FIGURE 1 – Impulsions de base pour la modulation par position, **ces impulsions sont nulles en dehors de la partie présentée**.

L'enveloppe complexe (i.e le signal bande de base) du signal envoyé s'écrit alors :

$$s_l(t) = \sum_{k\in\mathbb{Z}} p_{b_k}(t - kT_s) \tag{1}$$

sachant que T_s représente ici le temps de l'impulsion élémentaire ($p_0(t)$ ou $p_1(t)$) et que

$$p_{b_k}(t) = \begin{cases} p_0(t), & \text{si } b_k = 0 \\ p_1(t), & \text{si } b_k = 1 \end{cases}$$

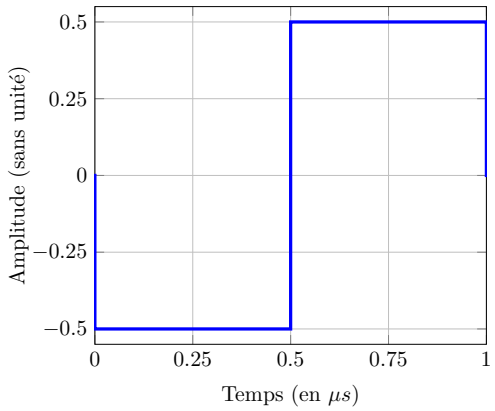


FIGURE 2 – Forme d'onde biphase $p(t)$, **cette impulsion est nulle en dehors de la partie présentée**.

Hypothèses :
- Les b_k sont indépendants et distribués uniformément,
- Le bruit bande de base $n_l(t) \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2_{n_l})$ de densité spectrale de puissance (DSP) bilatérale $\Gamma_{n_l}(f) = \frac{N_0}{2}$,
- Le modèle bande de base de l'architecture de communication considérée (en excluant les parties codage et décodage de canal) est présenté sur la figure 3.

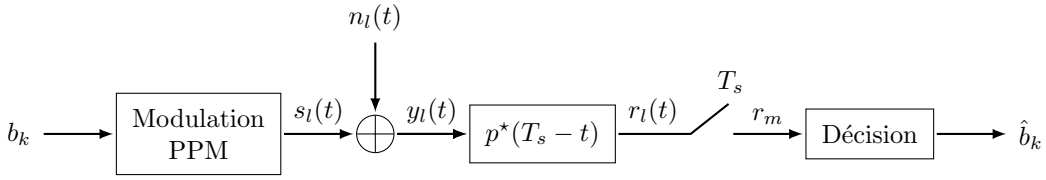


FIGURE 3 – Chaîne de communication complète, $p(t)$ étant donné en Figure 2.

Sous-tâches

Sous-tâche 1 - ***Théorie*** - *Montrer que le signal émis, donné en équation* (1) *peut se réécrire sous la forme*

$$s_l(t) = 0.5 + \sum_{k\in\mathbb{Z}} A_k p(t - kT_s) \tag{2}$$

où

$$A_k = \begin{cases} 1, & si\ b_k = 0 \\ -1, & si\ b_k = 1 \end{cases}$$

et $p(t)$ est la forme d'onde biphase donnée dans la Figure 2.

Sous-tâche 2 - ***Théorie*** *-En considérant un bruit nul, que le signal binaire à émettre vaut $[1, 0, 0, 1, 0]$ et que les signaux sont causaux, représenter graphiquement $s_l(t)$, $r_l(t)$ et r_m. Déduire de ces signaux le rôle du bloc décision.*

Sous-tâche 3 - ***Matlab*** *- Sur la base de vos résultats à la question précédente, implémenter à l'aide du logiciel Matlab, la chaîne de communication présentée sur la figure 3. Afin d'être en mesure d'obtenir les allures discrètes des différents filtres de mise en forme, vous supposerez que la fréquence d'échantillonnage f_e du système est fixée à $20MHz$. Les versions discrètes de vos filtres de mise en forme ($p_0(t)$ et $p_1(t)$) et du filtre de réception $p^*(T_s - t)$ seront alors des vecteurs composés de $F_{se} = \frac{T_s}{T_e} = 20$ échantillons. Où $T_e = \frac{1}{F_e}$ désigne ici la période d'échantillonnage.*

Vérification

Sous-tâche 4 - *Matlab - Corroborer les allures théoriques de $s_l(t)$, $r_l(t)$ et r_m avec celles fournies par Matlab en émettant la séquence $[1, 0, 0, 1, 0]$.*

Sous-tâche 5 - *Théorie - Calculer la probabilité d'erreur binaire P_b pour la modulation PPM et le récepteur proposé sur la figure 3. Exprimer P_b en fonction du rapport $\frac{E_b}{N_0}$ et de la fonction $erfc(\cdot)$. On vous rappelle que ce calcul s'obtient en partant de l'expression de r_m (voir cours de communications numériques de première année).*

Sous-tâche 6 - *Matlab - L'objectif de cette implémentation est d'obtenir par la simulation Matlab, la courbe de taux d'erreur binaire du système présenté sur la figure 3. Comme pour le code précédent, les bits doivent être générés aléatoirement et suivant une loi discrète uniforme. Cependant cette fois-ci la taille du paquet d'information binaire est fixé et égale à $Nb = 1000$ bits. Modifier le code en conséquence afin de d'obtenir le Taux d'Erreur Binaire (TEB) en fonction du rapport signal à bruit $\frac{E_b}{N_0}$ pour des valeurs allant de $0dB$ à $10dB$ par pas de $1dB$. On considèrera qu'une valeur de TEB est légitime si le nombre d'erreur calculé est supérieur à 100. Tracer sur la même figure la valeur théorique de P_b déterminée dans la sous-tâche 4 ces dernières doivent se superposer.*

Validation

Faites valider votre travail par votre encadrant afin de passer à la tâche suivante.

Tâche 2 – Couche physique ADS-B
Densité spectrale de puissance
Durée 2h
Projet TS229 – Année 2019/2020

Guillaume Ferré, Romain Tajan et Baptiste Laporte-Fauret

Pré-requis

La **tâche 1** est nécessaire pour réaliser cette tâche.

Objectifs

L'objectif de cette tâche est de mettre en pratique vos connaissances en traitement du signal et communications numériques afin de calculer une densité spectrale de puissance. Cela est effectué du point de vue théorique et via une implémentation Matlab.

Sous-tâches

Sous-tâche 1 - ***Théorie*** - *Calculer le moment d'ordre 1 du signal* $s_l(t)$, $m_{s_l}(t) = E\left[s_l(t)\right]$ *et montrer qu'il ne dépend pas de* t *(i.e.* $m_{s_l}(t) = m_{s_l}$*).*

Sous-tâche 2 - ***Théorie*** - *Calculer la fonction d'autocorrélation du signal* $s_l(t)$ *:* $R_{s_l}(t,\tau) = E\left[s_l(t)s_l^*(t+\tau)\right]$.

Sous-tâche 3 - ***Théorie*** - $s_l(t)$ *est cyclo-stationnaire de période de cyclo-stationnarité* T_s*. Sa Densité Spectrale de Puissance (DSP) s'obtient alors en calculant la transformée de Fourier de l'autocorrélation moyennée du signal* $s_l(t)$ *:*

$$\tilde{R}_{s_l}(\tau) = \frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} R_{s_l}(t,\tau)dt$$

Calculer $\tilde{R}_{s_l}(\tau)$ *et représenter graphiquement son allure.*

Sous-tâche 4 - ***Théorie*** - *En déduire la DSP de* $s_l(t)$ *:*

$$\Gamma_{s_l}(f) = \mathcal{F}\left(\tilde{R}_{s_l}(\tau)\right)$$

Exprimer cette DSP en fonction de T_s

Sous-tâche 5 - ***Matlab*** - *L'objectif de cette nouvelle implémentation Matlab et d'obtenir une estimation de la DSP de $s_l(t)$ en utilisant l'algorithme du périodogramme de Welch sans chevauchement et sans fenêtre de pondération. Cette estimation devra être comparée à l'expression analytique obtenue à la question précédente. Vous devez implémenter l'algorithme de Welch par vous-même et ne pas chercher à utiliser une fonction Matlab toute faite (exemple :* `pwelch.m`*).*

Repartir de votre code précédent afin d'implémenter le calcul de la DSP. Quelques modifications sont bien entendu nécessaires. Tout d'abord, les bits doivent désormais être générés aléatoirement suivant une loi discrète uniforme. Comme on ne s'intéresse qu'au calcul de la DSP de $s_l(t)$, ne conserver que les parties "ajout de bruit" et "récepteur".

Implémenter la fonction `Mon_Welch.m` *dont le prototype doit être :* `y=Mon_Welch(x,NFFT,Fe)` *où :*

- `x` *est le vecteur contenant les échantillons du signal pour lequel il faut calculer la DSP,*
- `NFFT` *représente le nombre de points sur lequel les FFT doivent être calculées,*
- `y` *est l'estimation de la DSP de* `x`*,*
- `Fe` *est la fréquence d'échantillonnage.*

Afin d'obtenir une estimation consistante de la DSP elle devra être obtenue en moyennant au minimum 100 FFT de $NFFT = 256$ points.

Vérification

Afficher sur une même figure les DSP de $s_l(t)$ obtenues analytiquement et expérimentalement. Ces dernières doivent se superposer. Si ce n'est pas le cas il vous appartient d'identifier la ou les raison(s) et de les corriger.

Validation

Faites valider votre travail par votre encadrant afin de passer à la tâche suivante.

Tâche 3 – Couche physique ADS-B
Algorithmes de codage et de décodage de canal
Durée 2h
Projet TS229 – Année 2019/2020

Guillaume Ferré, Romain Tajan et Baptiste Laporte-Fauret

Pré-requis

La **tâche 1** est nécessaire pour réaliser cette tâche.

Objectifs

L'objectif de cette partie est de vous faire implémenter le codeur et le décodeur de canal utilisés dans le cadre de la transmission des signaux ADS-B. La structure des signaux ADS-B émis par les avions est présentée sur la figure 1. Il ne s'agit pas ici de comprendre précisément la signification des différentes parties de la trame ADS-B. Ce travail se fera dans un second temps, lorsque nous aborderons la couche MAC. Ici nous allons simplement remarquer qu'une trame ADS-B dure $120\mu s$ soit l'équivalent de 120 bits et la présence d'un contrôle de parités de 24 bits en fin de trame (voir Fig. 1).

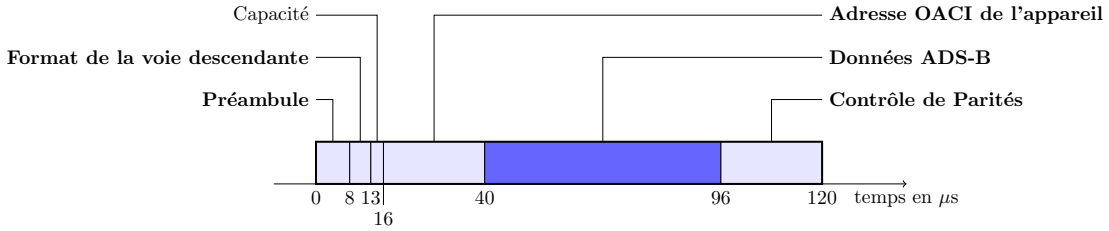


FIGURE 1 – Format d'une trame ADS-B

Sous-tâches

Les bits de parités sont issus d'un Code à Redondance Cyclique (CRC) de 24 bits dont le polynôme générateur est donné ci-dessous

$$p(x) = x^{24} + x^{23} + x^{22} + x^{21} + x^{20} + x^{19} + x^{18} + x^{17} + x^{16} + x^{15} + x^{14} + x^{13} + x^{12} + x^{10} + x^3 + 1.$$

Le codage CRC rajoute 24 bits au message initial ce dernier étant composé de 88 bits d'informations utiles et d'un entête (dit préambule) dont la durée est équivalente à celle de 8 bits. Les

24 bits de CRC servent à détecter d'éventuelles erreurs (parmi les 88 bits utiles) en réception. Le but principal de ce projet n'étant pas de programmer un détecteur d'erreur basé sur les CRC, vous utiliserez les fonctions Matlab dédiées à cet effet. Deux fonctions pourront en particulier être utiles :

— `crc.detector` qui sert à construire un détecteur CRC à partir du polynôme générateur,
— `detect` méthode d'un objet de type `crc.detector` afin de détecter la présence d'erreurs.

Sous-tâche 1 - *Matlab - L'objectif de cette implémentation est de mettre en œuvre les algorithmes de codages et de décodage de canal. Comme pour votre précédente implémentation, les bits doivent être générés aléatoirement et suivant une loi discrète uniforme. Cependant cette fois-ci la taille du paquet d'information binaire est fixée et égale à $Nb = 88$ bits, soit la taille du paquet de bits utiles dans le paquet ADS-B. Rajouter les parties de codage et de décodage de canal comme présenté sur la chaîne complète de communications en Fig. 2.*

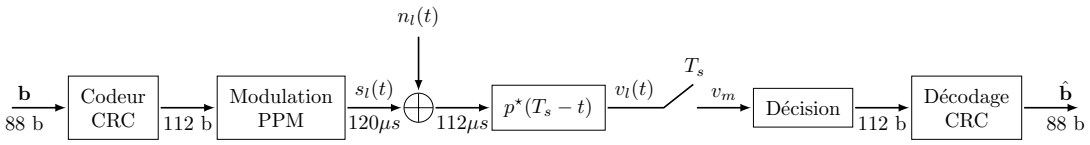


FIGURE 2 – Chaîne de communication

Vérification

Implémenter cette nouvelle chaine de communication en y insérant le codeur et le décodeur de canal. Tester le bon fonctionnement du système en vérifiant que le décodeur vous indique :

— que le message est intègre en l'absence d'erreur,
— que le message n'est pas intègre en présence d'erreur parmi les 88 bits de données utiles,

Validation

Faites valider votre travail par votre encadrant afin de passer à la tâche suivante.

Tâche 4 – Couche physique ADS-B
Synchronisation en temps
Durée 4h
Projet TS229 – Année 2019/2020

Guillaume Ferré, Romain Tajan et Baptiste Laporte-Fauret

Pré-requis

La **tâche 1** est nécessaire pour réaliser cette tâche.

Objectifs

Deux défauts n'ont pas été pris en compte dans les tâches précédentes :
- la synchronisation temporelle : le signal subit un délai de propagation δ_t, il faut le compenser,
- la synchronisation fréquentielle : l'effet Doppler introduit par le mouvement de l'avion ansi que les défauts d'oscillateurs locaux introduisent un décalage en fréquence δ_f.

Ces deux effets sont pris en compte avec le modèle en bande de base suivant

$$y_l(t) = s_l(t-\delta_t)e^{-j2\pi\delta_f t} + n_l(t)$$

où δ_t et δ_f représentent respectivement les désynchronisations temporelle et fréquentielle du signal.

Sous-tâches

Sous-tâche 1 - *Théorie - Quelle est l'ordre de grandeur du décalage de fréquence Doppler d'un avion se déplaçant à* $900km/h$ *?*

Sous-tâche 2 - *Théorie - On va désormais considérer l'architecture de communication présentée sur le figure 1.*

1. *Montrer que* $|y_l(t)|^2 = s_l^2(t-\delta_t) + z_l(t)$. $z_l(t)$ *est-il un bruit blanc gaussien ?* $z_l(t)$ *est-il indépendant de* $s_l(t)$ *?*
2. *Quel est l'avantage de prendre le carré du module de l'enveloppe complexe du signal reçu ?*

La synchronisation est réalisée à la réception en utilisant un signal $s_p(t)$ de durée $T_p = 8\ \mu s$ appelé préambule et envoyé en entête des trames ADS-B. Le préambule est le signal donné en Figure 2. Une telle forme d'onde ne peut pas être présente dans le signal $s_l(t)$. En effet si vous essayez d'obtenir $s_p(t)$ à partir d'une combinaison binaire de 8 bits en sortie du modulateur PPM

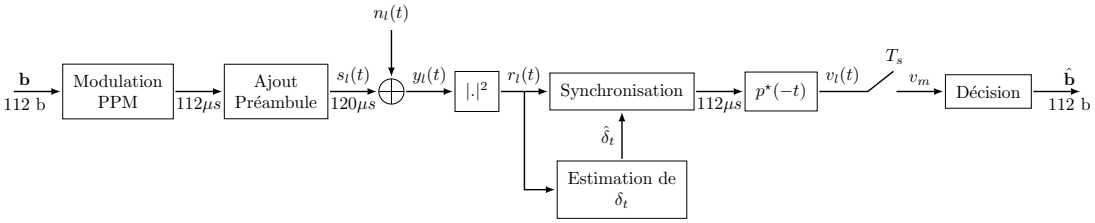


FIGURE 1 – Chaîne de communication complète

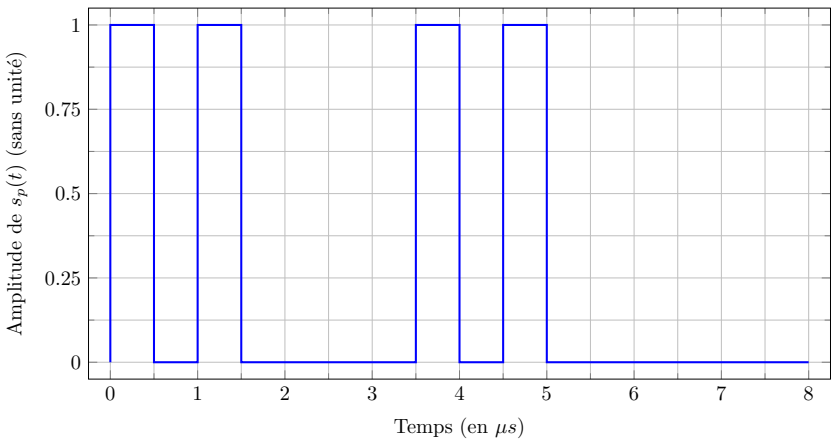


FIGURE 2 – Préambule $s_p(t)$ de $T_p = 8$ μs débutant les trames ADS-B

vous n'y parviendrez pas. Cette unicité permet de mettre en œuvre une méthode simple et très répandue pour effectuer la synchronisation temps/fréquence d'un signal : **l'intercorrélation**.

Désormais, pour $t \in [0, T_p]$ $s_l(t) = s_p(t)$ de sorte que

$$y_l(t) = s_p(t - \delta_t)e^{-j2\pi\delta_f t} + n_l(t), \text{ pour } t \in [\delta_t, \delta_t + T_p]$$

où $s_p(t)$ est le signal de préambule connu de l'émetteur et du récepteur. On effectue la synchronisation temporelle en cherchant le maximum de la corrélation suivante :

$$\rho(\delta_t') = \frac{\int_{\delta_t'}^{\delta_t'+T_p} r_l(t)s_p^*(t-\delta_t')dt}{\sqrt{\int_0^{T_p} |s_p(t)|^2 dt} \cdot \sqrt{\int_{\delta_t'}^{\delta_t'+T_p} |r_l(t)|^2 dt}}.$$

L'estimation est alors réalisée en prenant la valeur de $\hat{\delta}_t$ telle que

$$\hat{\delta}_t = \arg\max_{\delta_t'} |\rho(\delta_t')| \tag{1}$$

Sous-tâche 3 - *Théorie - Montrer que $|\rho(\delta_t')| \leq 1$ pour tout δ_t'. Donner le cas d'égalité.*

Sous-tâche 4 - *Matlab - L'objectif de cette implémentation est de mettre en œuvre l'algorithme de synchronisation temporelle du signal. Modifier votre code en conséquence afin que ce dernier soit cohérent avec la figure 1. Les distorsions seront modélisées sachant que :*

- *Le délai de propagation δ_t est aléatoirement et uniformément réparti entre 0 et $100T_e$,*
- *Le décalage en fréquence δ_f est aléatoirement et uniformément réparti entre $-1kHz$ et $1kHz$.*

Il est conseillé d'implémenter l'algorithme de synchronisation dans une fonction Matlab dédiée à cet effet.

Vérification

Sous-tâche 5 - *Matlab - Vérifier que sans bruit dans la chaine de communication vous estimez parfaitement le décalage temporel δ_t.*

Sous-tâche 6 - *Matlab - On cherche maintenant à observer les performances du récepteur proposé malgré les imperfections en temps et en fréquence. Adapter votre précédent code pour désynchroniser aléatoirement chaque nouvelle trame émise et calculer le TEB en fonction de $\frac{E_b}{N_0}$ pour des valeurs allant de 0 à $10dB$ par pas de $1dB$. Superposer cette courbe de résultats avec la courbe de probabilité d'erreur binaire théorique et identifier le nombre de dB perdu pour un TEB=10^{-3}.*

Validation

Faites valider votre travail par votre encadrant afin de passer à la tâche suivante.

Tâche 5 – Couche physique ADS-B
Synchronisation en fréquence
Durée 2h
Projet TS229 – Année 2019/2020

Guillaume Ferré, Romain Tajan et Baptiste Laporte-Fauret

Pré-requis

La **tâche 4** est nécessaire pour réaliser cette tâche.

Objectifs

On se focalise maintenant sur la synchronisation fréquentielle : l'effet Doppler introduit par le mouvement de l'avion ainsi que les défauts d'oscillateurs locaux introduisent un décalage en fréquence δ_f.

Cet effet s'exprime avec le modèle en bande de base suivant :

$$y_l(t) = s_l(t - \delta_t)e^{-j2\pi\delta_f t} + n_l(t)$$

où δ_t et δ_f représentent respectivement les désynchronisations temporelle et fréquentielle du signal.

Sous-tâches

Améliorer votre précédent code afin de prendre en compte ce décalage fréquentiel.

Vérification

Sous-tâche 1 - *Matlab - Vérifier que sans bruit dans la chaine de communication vous estimez parfaitement le décalage fréquentiel* δ_f.

Sous-tâche 2 - *Matlab - Comme précédemment, on cherche maintenant à observer les performances du récepteur proposé malgré les imperfections en temps et en fréquence. Adapter votre précédent code pour désynchroniser aléatoirement chaque nouvelle trame émise et calculer le TEB en fonction de* $\frac{E_b}{N_0}$ *pour des valeurs allant de* 0 *à* $10dB$ *par pas de* $1dB$. *Superposer cette courbe de résultats avec la courbe de probabilité d'erreur binaire théorique et identifier le nombre de dB perdu pour un* $TEB{=}10^{-3}$.

Validation

Faites valider votre travail par votre encadrant afin de passer à la tâche suivante.

Tâche 6 – Couche MAC ADS-B
Implémentation de la couche MAC
Durée 3h
Projet TS229 – Année 2019/2020

Guillaume Ferré, Romain Tajan et Baptiste Laporte-Fauret

Pré-requis

La **tâche 3** est nécessaire pour réaliser entièrement cette tâche. Peut être commencée après lecture du sujet.

Objectifs

Le but de cette partie est de développer une fonction Matlab qui convertit un message binaire en registre afin de pouvoir en extraire les données sur les appareils concernés.

Structure des trames ADS-B

Les signaux émis par les appareils pour l'ADS-B ont une durée de 120 μs. Ils sont constitués des parties suivantes :

— le préambule (identique à celui de la section précédente),
— le format de la voie descendante,
— la capacité,
— l'adresse OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) de l'appareil,
— les données ADS-B,
— les bits de contrôle de parité.

La durée de chacune des parties ainsi que leur position dans une trame ADS-B sont représentées en Figure 2. Nous détaillons maintenant la fonction des différentes parties de la trame.

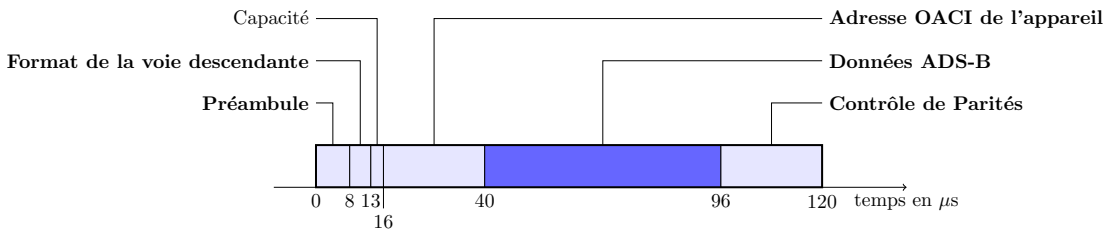


FIGURE 1 – Format d'une trame ADS-B

Le préambule

Il sert pour la synchronisation temporelle et fréquentielle des signaux. Le préambule est identique quelque soit les types de signaux ADS-B transmis, il dure $8\mu s$ et est identique à celui utilisé dans la section précédente.

Le format de la voie descendante

Le format de la voie descendante (parfois noté DF pour Downlink Format) est codé sur 5 bits et indique le type de la trame envoyée. Les valeurs particulières de ce format sont les suivantes

- 11 : message d'acquittement
- **17 : message de type ADS-B**
- 18 : message de type TIS-B (Traffic information service – broadcast)
- 19 : message de type ADS-B militaire (crypté)

Dans ce projet, nous nous intéresserons seulement aux trames avec **DF = 17**.

La capacité

La capacité est notée CA (pour CApacity). Elle est codée sur 3 bits et représente un sous-type de trame envoyée. Nous ne nous préoccuperons pas de sa signification.

L'adresse OACI de l'appareil

L'OACI est l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale, elle définit entre autre une immatriculation pour les aéroports, aérodromes et appareils volants. Dans les trames ADS-B, l'adresse OACI de l'appareil (parfois notée AA pour Aircraft Address) est codée sur 24 bits. Chaque appareil possède une adresse unique tout au long de sa vie, quelque soit sa compagnie ou son plan de vol.

Dans ce projet, il est primordial de pouvoir décoder correctement cette adresse car elle servira à connaitre de quel appareil proviennent les données décodées. Cette adresse sert aussi pour trouver un avion dans les bases de données des tours de contrôles, ou des radars virtuel (tels que `http://planefinder.net` ou `http://www.flightradar24.com`). On pourra donc se servir des radars virtuels afin d'avoir plus d'informations sur les appareils ayant transmis les signaux reçus.

Les données ADS-B

Dans le cadre de données envoyée pour ADS-B (DF = 17), les messages sont composés de 56 bits et durent $56\mu s$. Les messages pouvant être transmis sont répertoriés dans des registres. Le contenu de ces messages dépend du type de registre. On trouve entre autres des registres pour les informations de position au sol, de **position en vol**, de **signes d'identification** et de vitesse. Ceux qui vont nous intéresser sont ceux écrits en gras, les derniers étant des bonus.

Dans tous les cas, les registres sont constitués de 56 bits. Les 5 premiers bits du message constituent le code du format des données (FTC-Format Type Code en anglais). Ces bits indiquent si le message correspond à un message de position au sol, un message de position en vol ou un message d'identification. Les tables de correspondances entre les 5 bits et le type de message sont données dans les Tables 1 à 3 en Annexe A.

La structure des trames de position en vol est donnée dans la Table 1 ci-dessous. Pour la suite du projet, nous ne considérerons ni les 2 bits de *surveillance* ni le bit de *type d'antenne* ni le bit *indicateur de temps UTC*. L'encodage de l'altitude ainsi que ceux des latitude et longitude sont donnés en Annexe.

La structure des trames d'identification est donnée Table 2. L'identification de l'appareil est composée de 8 caractères, chacun étant encodé sur 6-bits. La table de correspondance entre les 6 bits et les caractères est donnée en Table 5 dans l'Annexe D.

TABLE 1 – Composition du message de position en vol

Index binaire	Champs
1	MSB
⋮	Format Type Code
5	LSB
6	MSB
	Surveillance Status
7	LSB
8	Indicateur de type d'antenne
9	MSB
⋮	Altitude
20	LSB
21	Indicateur de temps UTC
22	Indicateur de format CPR
23	MSB
⋮	Latitude encodée avec CPR
39	LSB
40	MSB
⋮	Longitude encodée avec CPR
56	LSB

Sous-tâches

Sous-tâche 1 *Quelles valeurs de FTC correspondent à des trames de position en vol ? Même question pour les messages d'identifications.*

Afin de rendre synthétique votre code MATLAB, un registre sera représenté par une structure possédant les champs `format` (contenant DF), `adresse` (contenant AA), `type` (contenant le Format Type Code-FTC), `nom` (contenant le nom de l'appareil), `altitude` (contenant l'altitude), `timeFlag` (contenant l'indicateur de temps UTC), `cprFlag` (contenant l'indicateur CPR), `latitude` (contenant la latitude) et `longitude` (contenant la longitude). La façon la plus simple d'initialiser cette structure est de de la forme suivante

```
registre = struct('adresse',[],'format',[],'type',[],'nom',[], ...
'altitude',[],'timeFlag',[],'cprFlag,[], ...
'latitude',[],'longitude',[], 'trajectoire', []);
```

Pour initialiser un des champs de cette structure vous utiliserez la syntaxe suivante

```
registre.nom = 'AF1234';
registre.altitude = 34000;
```

Tous les messages envoyés pour l'ADS-B ne comportent pas systématiquement toutes les informations. En effet, les informations transmises dépendent du type de registre en train d'être envoyé et donc de la partie "message" d'une trame ADS-B. La structure de cette partie "message" est donnée en Annexe pour des messages de position en vol, position au sol et d'identification de l'appareil.

Sous-tâche 2 *- Matlab - Écrire la fonction MATLAB* `bit2registre` *qui prend en argument un vecteur de* 112 *bits et un registre à mettre à jour, qui extrait les informations du vecteur binaire et qui renvoie le registre mis à jour seulement si le CRC ne détecte pas d'erreur.*

TABLE 2 – Composition du message d'identification

Index binaire	Champs
1	MSB
⋮	Format Type Code
5	LSB
6	MSB
⋮	Catégorie de l'appareil
8	LSB
9	MSB
⋮	Caractère 1 de l'identifiant
14	LSB
15	MSB
⋮	Caractère 2 de l'identifiant
20	LSB
21	MSB
⋮	Caractère 3 de l'identifiant
26	LSB
27	MSB
⋮	Caractère 4 de l'identifiant
32	LSB
33	MSB
⋮	Caractère 5 de l'identifiant
38	LSB
39	MSB
⋮	Caractère 6 de l'identifiant
44	LSB
45	MSB
⋮	Caractère 7 de l'identifiant
50	LSB
51	MSB
⋮	Caractère 8 de l'identifiant
56	LSB

Vérification

Sous-tâche 3 - *Matlab - Afin de tester votre code, utilisez le fichier* `adsb_msgs.mat`. *Ce fichier contient les* 112 *bits suivant le préambule de plusieurs trames issues d'un même appareil à la fréquence d'échantillonnage* $F_e = 4$ *MHz (ces trames sont rangées en colonnes). Extrayez toutes les informations de ces trames et affichez la trajectoire de l'avion considéré. Vérifier que la trajectoire obtenue est comparable à celle représentée en Fig. 2.*

FIGURE 2 – Trajectoire obtenue à partir d'une trame

Validation

Faites valider votre travail par votre encadrant afin de passer à la tâche suivante.

Tâche 7 – Couche MAC ADS-B
Implémentation de la couche MAC
Durée 2h
Projet TS229 – Année 2019/2020

Guillaume Ferré, Romain Tajan et Baptiste Laporte-Fauret

Pré-requis

La **tâche 6** est nécessaire pour réaliser cette tâche.

Objectifs

Le but de cette partie est de d'améliorer la fonction développée en tâche 7 qui converti un vecteur de 112 bits et renvoi un registre en y incluant de nouvelles informations.

Sous-tâches

Sous-tâche 1 *En vous aidant des informations fournies en Annexe et dans la tâche 7, modifier votre fonction* `bit2registre` *pour y inclure la position au sol.*

Sous-tâche 2 *Sous-tâche identique à la précédente pour la vitesse de l'avion en vol.*

Sous-tâche 3 *En vous aidant de la documentation technique fournie, améliorer le calcul de la position en vol en relâchant l'hypothèse de proximité entre la radio de réception et l'avion.*

Vérification

Sous-tâche 4 - *Matlab - Afin de tester votre code, utilisez le fichier* `adsb_msgs.mat`. *Ce fichier contient les* 112 *bits suivant le préambule de plusieurs trames issues d'un même appareil à la fréquence d'échantillonnage* $F_e = 4$ *MHz (ces trames sont rangées en colonnes). Extrayez toutes les informations de ces trames et affichez les nouvelles données de l'avion considéré.*

Validation

Faites valider votre travail par votre encadrant afin de passer à la tâche suivante.

Tâche 8 – Application
Traitement de signaux réels
Durée 2h
Projet TS229 – Année 2019/2020

Guillaume Ferré, Romain Tajan et Baptiste Laporte-Fauret

Pré-requis

Les **tâche 3**, **tâche 4** et **tâche 6** sont nécessaires pour réaliser cette tâche.

Objectifs

On cherche maintenant à traiter des signaux issues d'acquisitions réelles avec un buffer supérieur à celui précédemment envisagé.

Sous-tâches

Sous-tâche 1 - *Matlab - Récupérer les enregistrements issus de signaux réels et analyser leur structure afin d'adapter votre code.*

Vérification

Sous-tâche 2 - *Matlab - Vérifier que les avions obtenus à partir du fichier* `buffers.mat` *correspondent bien à ceux de la Fig. 1.*

Validation

Faites valider votre travail par votre encadrant afin de passer à la tâche suivante.

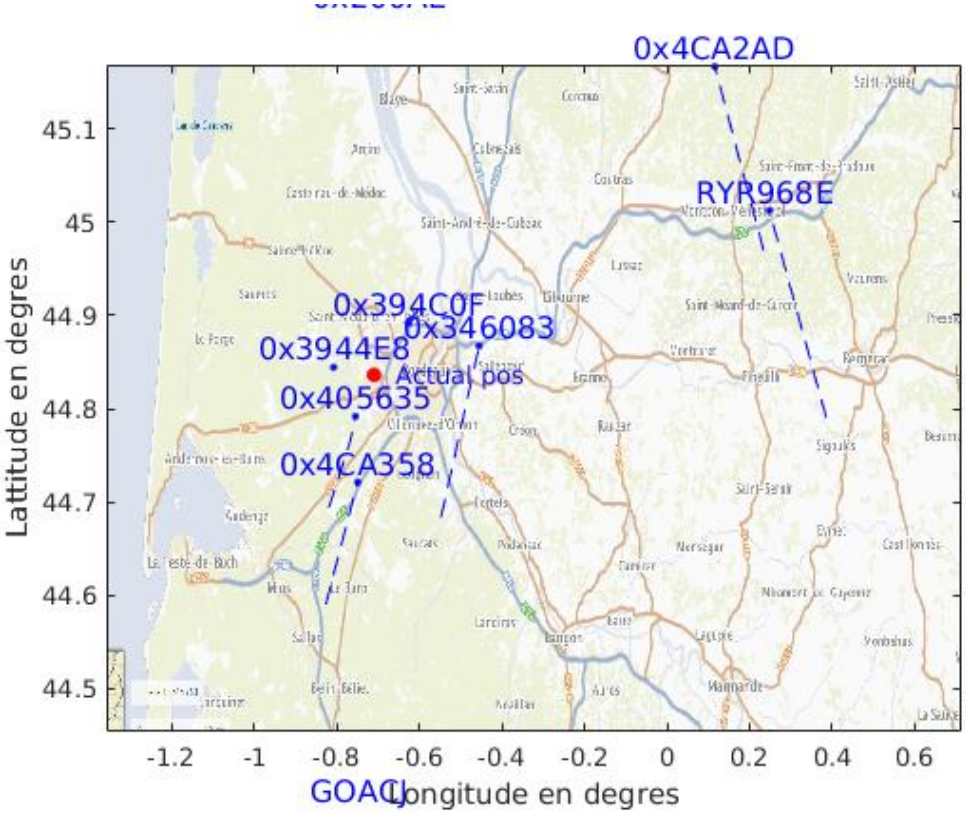


FIGURE 1 – Trajectoires obtenues à partir d'un buffer

Tâche 9 – Application
Mise en place du temps réel
Durée 2h
Projet TS229 – Année 2019/2020

Guillaume Ferré, Romain Tajan et Baptiste Laporte-Fauret

Pré-requis

La **tâche 8** est nécessaire pour réaliser cette tâche.

Objectifs

Le but de cette partie est de mettre en relation les différentes tâches réalisées afin de décoder en temps réel les trajectoires des avions.

Sous-tâches

Sous-tâche 1 - *Matlab - En vous aidant du code Matlab correspondant à la tâche, mettez en place votre récepteur avec les données issues de la radio logicielle présente dans la salle.*

Vérification

Sous-tâche 2 - *Matlab - Vérifier à l'aide de sites de tracker en ligne que votre code en temps réels affiche bien des avions semblables.*

Félicitations, vous venez de mettre en place un récepteur ADS-B en temps réel !

Validation

Faites valider votre travail par votre encadrant afin de passer à la tâche suivante.

Tâche 10 – Application
Prise en compte de l'ancienneté des trajectoires
Durée 2h
Projet TS229 – Année 2019/2020

Guillaume Ferré, Romain Tajan et Baptiste Laporte-Fauret

Pré-requis

La **tâche 9** est nécessaire pour réaliser cette tâche.

Objectifs

Le but de cette partie est de prendre en compte l'ancienneté des trajectoires.

Sous-tâches

Sous-tâche 1 - *Matlab - Améliorer le code en temps réel afin de supprimer les anciennes trajectoires. Une trajectoire ne doit être affichée que si sa dernière trame est plus récente qu'un certain paramètre à spécifier.*

Vérification

Sous-tâche 2 - *Matlab - Vérifier que les trajectoires sont bien effacées au cours du temps*

Validation

Faites valider votre travail par votre encadrant afin de passer à la tâche suivante.

Tâche 11 – Application
Calcul de la distance récepteur/avion
Durée 2h
Projet TS229 – Année 2019/2020

Guillaume Ferré, Romain Tajan et Baptiste Laporte-Fauret

Pré-requis

La **tâche 9** est nécessaire pour réaliser cette tâche.

Objectifs

Le but de cette partie est de calculer et afficher la distance séparant la radio réceptrice et l'avion.

Sous-tâches

Sous-tâche 1 - *Matlab - Améliorer le code en temps réel afin d'afficher la distance entre la radio et l'avion. Cette distance sera calculée en fonction des informations déjà reçues.*

Vérification

Sous-tâche 2 - *Matlab - Vérifier que les distances sont cohérentes en vous aidant de trackers en ligne ou de sites de cartographie.*

Validation

Faites valider votre travail par votre encadrant afin de passer à la tâche suivante.

Tâche 12 – Application
Vue 3D
Durée 2h
Projet TS229 – Année 2019/2020

Guillaume Ferré, Romain Tajan et Baptiste Laporte-Fauret

Pré-requis

La **tâche 9** est nécessaire pour réaliser cette tâche.

Objectifs

Le but de cette partie est de proposer une vue 3D à l'utilisateur lors de l'affichage en temps réels des trajectoires des avions.

Sous-tâches

Sous-tâche 1 - *Matlab - Développer une vue 3D à partir des outils Matlab permettant simultanément l'affichage en 3D des trajectoires et l'affichage d'une carte "au sol" pour le repérage en latitude et longitude des avions.*

Vérification

Sous-tâche 2 - *Matlab - Vérifier que les trajectoires affichées sont consistantes et que les altitudes sont cohérentes.*

Validation

Faites valider votre travail par votre encadrant afin de passer à la tâche suivante.

Contacts et Annexes
Projet TS229 – Année 2019/2020

Guillaume Ferré, Romain Tajan et Baptiste Laporte-Fauret

Contacts

— Guillaume Ferré - guillaume.ferre@ims-bordeaux.fr
— Romain Tajan - romain.tajan@ims-bordeaux.fr
— Baptiste Laporte-Fauret - baptiste.laporte-fauret@ims-bordeaux.fr

Annexe A Tableaux de Format Type Codes

TABLE 1 – Tableaux des valeurs du FTC pour FTC $\in [0, 8]$

TYPE Code	*Format*	*Horizontal protection limit (HPL)*	*95% Containment radius, μ and v, on horizontal and vertical position error*	*Altitude type (see §A.2.3.2.4)*	*NUC_P*
0	No position information			Barometric altitude or no altitude information	0
1	Identification (Category Set D)			Not applicable	
2	Identification (Category Set C)			Not applicable	
3	Identification (Category Set B)			Not applicable	
4	Identification (Category Set A)			Not applicable	
5	Surface position	HPL < 7.5 m	μ < 3 m	No altitude information	9
6	Surface position	HPL < 25 m	3 m ≤ μ < 10 m	No altitude information	8
7	Surface position	HPL < 185.2 m (0.1 NM)	10 m ≤ μ < 92.6 m (0.05 NM)	No altitude information	7
8	Surface position	HPL > 185.2 m (0.1 NM)	(0.05 NM) 92.6 m ≤ μ	No altitude information	6

TABLE 2 – Tableaux des valeurs du FTC pour FTC $\in [9, 18]$

9	Airborne position	HPL < 7.5 m	μ < 3 m	Barometric altitude	9
10	Airborne position	7.5 m ≤ HPL < 25 m	3 m ≤ μ < 10 m	Barometric altitude	8
11	Airborne position	25 m ≤ HPL < 185.2 m (0.1 NM)	10 m ≤ μ < 92.6 m (0.05 NM)	Barometric altitude	7
12	Airborne position	185.2 m (0.1 NM) ≤ HPL < 370.4 m (0.2 NM)	92.6 m (0.05 NM) ≤ μ < 185.2 m (0.1 NM)	Barometric altitude	6
13	Airborne position	370.4 m (0.2 NM) ≤ HPL < 926 m (0.5 NM)	185.2 m (0.1 NM) ≤ μ < 463 m (0.25 NM)	Barometric altitude	5
14	Airborne position	926 m (0.5 NM) ≤ HPL < 1 852 m (1.0 NM)	463 m (0.25 NM) ≤ μ < 926 m (0.5 NM)	Barometric altitude	4
15	Airborne position	1 852 m (1.0 NM) ≤ HPL < 3 704 m (2.0 NM)	926 m (0.5 NM) ≤ μ < 1 852 m (1.0 NM)	Barometric altitude	3
16	Airborne position	3.704 km (2.0 NM) ≤ HPL < 18.52 km (10 NM)	1.852 km (1.0 NM) ≤ μ < 9.26 km (5.0 NM)	Barometric altitude	2
17	Airborne position	18.52 km (10 NM) ≤ HPL < 37.04 km (20 NM)	9.26 km (5.0 NM) ≤ μ < 18.52 km (10.0 NM)	Barometric altitude	1
18	Airborne position	HPL ≥ 37.04 km (20 NM)	18.52 km (10.0 NM) ≤ μ	Barometric altitude	0

TABLE 3 – Tableaux des valeurs du FTC pour FTC $\in [19, 31]$

19	Airborne velocity	Not applicable	Not applicable	Difference between "Barometric altitude" and "GNSS height (HAE) or GNSS altitude (MSL)" (2.3.5.7)	N/A
20	Airborne position	HPL < 7.5 m	μ < 3 m and v < 4 m	GNSS height (HAE)	9
21	Airborne position	HPL < 25 m	μ < 10 m and v < 15 m	GNSS height (HAE)	8
22	Airborne position	HPL ≥ 25 m	μ > 10 m or v ≥ 15 m	GNSS height (HAE)	0
23	Reserved for test purposes				
24	Reserved for surface system status				
25 – 27	Reserved				
28	Extended squitter aircraft emergency priority status				
29	Reserved				
30	Reserved				
31	Aircraft operational status				

Annexe B Tableaux de structure des messages

TABLE 4 – Composition du message de position au sol

Index binaire	Champs
1	MSB
⋮	Format Type Code
5	LSB
6	MSB
	Indicateur de mouvement
12	LSB
13	Statut
14	MSB
⋮	Latitude encodée avec CPR
20	LSB
21	Indicateur de temps UTC
22	Indicateur de format CPR
23	MSB
⋮	Latitude encodée avec CPR
39	LSB
40	MSB
⋮	Longitude encodée avec CPR
56	LSB

Annexe C Encodage et décodage des altitudes, latitudes et longitudes

Décodage de l'altitude

L'altitude est encodée dans un mot $\mathbf{b}_a$ de 12 bits. Le 8^{me} bits de $\mathbf{b}_a$ étant inutile dans notre cas, il ne doit pas être considéré. Le registre obtenu finalement est le suivant

$$\mathbf{r}_a = [b_a^1, b_a^2, b_a^3, b_a^4, b_a^5, b_a^6, b_a^7, b_a^9, b_a^{10}, b_a^{11}, b_a^{12}].$$

On notera r_a la valeur entière non signée contenue de ce registre en considérant b_a^1 comme bit de poids fort. La valeur de l'altitude alt exprimée *en pieds* est obtenue comme

$$\text{alt} = 25r_a - 1000. \tag{1}$$

Décodage de la longitude et de la latitude

L'encodage des latitudes et longitudes dans les trames ADS-B est effectué suivant un format appelé Compact Position Reporting (CPR). Ce format permet d'encoder des positions précises sur peu de bits (34 bits seulement par trames de position en vol). L'encodage CPR admet intrinsèquement une imprécision de 180 nœuds nautiques par trames. Afin de décoder avec une plus grande précision les longitudes et latitudes, il est nécessaire d'avoir

— soit deux trames consécutives ayant des bits *indicateurs de format CPR* différents,

— soit une position de référence de l'appareil à moins de 180 nœuds nautiques.

Nous ne considérerons dans un premier temps que le second cas. Ce cas est justifié si on fait l'hypothèse que l'appareil détecté était proche de la position de l'antenne de réception.

Dans les messages de position en vol, la latitude et la longitude de l'appareil sont encodées sur des mots de 17 bits. Ces registres sont notés $\mathbf{r}_{lon} = \left[r_{lon}^1, \ldots, r_{lon}^{17}\right]$ et $\mathbf{r}_{lat} = \left[r_{lat}^1, \ldots, r_{lat}^{17}\right]$. Aussi, nous noterons LAT et LON les valeurs entières contenues respectivement dans $\mathbf{r}_{lon}$ et $\mathbf{r}_{lat}$ avec r_{lon}^1 et r_{lat}^1 comme bits de poids fort.

Nous commencerons par le calcul de la **latitude**. Ce calcul comporte trois étapes.
1) calcul de la grandeur D_{lat_i} :

$$D_{lat_i} = \frac{360^\circ}{4N_Z - i} \tag{2}$$

où $N_Z = 15$ est le nombre de latitudes géographiques considérées entre l'équateur et un pôle et i est le bit *indicateur de format CPR*.

2) Calcul de j :

$$j = \left\lfloor \frac{lat_{ref}}{D_{lat_i}} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{1}{2} + \frac{\text{MOD}\left(lat_{ref}, D_{lat_i}\right)}{D_{lat_i}} - \frac{\text{LAT}}{2^{N_b}} \right\rfloor \tag{3}$$

où $N_b = 17$ est le nombre de bits constituant le registre de latitude $\lfloor x \rfloor$ est la fonction renvoyant le plus petit entier k tel que $k \leq x$ et $\text{MOD}(x, y) = x - y \left\lfloor \frac{x}{y} \right\rfloor$.

3) Calcul de la latitude lat :

$$lat = D_{lat_i} \left(j + \frac{\text{LAT}}{2^{N_b}} \right) \tag{4}$$

Nous finissons par le calcul de la **longitude**. Ce calcul comporte aussi trois étapes.
1) calcul de la grandeur D_{lon_i} :

$$D_{lon_i} = \begin{cases} \frac{360^\circ}{N_L(lat)-i} \text{ si } N_L\,(\text{lat}) - i > 0 \\ 360^\circ \text{ si } N_L\,(\text{lat}) - i = 0 \end{cases} \tag{5}$$

où i est le bit *indicateur de format CPR*, lat est la latitude calculée précédemment et $NL(x)$ est la fonction suivante

$$N_L(x) = \left\lfloor 2\pi \left[\arccos\left(1 - \frac{1 - \cos\left(\frac{\pi}{2N_Z}\right)}{\cos^2\left(\frac{\pi}{180^\circ}\,|x|\right)} \right) \right]^{-1} \right\rfloor \tag{6}$$

pour la plupart des x à l'exception des points suivants :

$$\begin{aligned} &N_L(0) = 59 \\ &N_L(87) = 2 \\ &N_L(87) = 2 \\ &N_L(x) = 1 \text{ si } |x| > 87. \end{aligned}$$

Afin de garantir une implémentation efficace pour le temps réel, la fonction $N_L(x)$ est en général tabulée. Pour vous permettre de gagner du temps, cette fonction est fournie dans l'archive `projet_adsb.zip` et se nomme `cprNL`.

2) Calcul de m :

$$m = \left\lfloor \frac{lon_{ref}}{D_{lon_i}} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{1}{2} + \frac{\text{MOD}\,(lon_{ref}, D_{lon_i})}{D_{lon_i}} - \frac{\text{LON}}{2^{N_b}} \right\rfloor \tag{7}$$

où $N_b = 17$ est le nombre de bits constituant le registre de latitude $\lfloor x \rfloor$ est la fonction renvoyant le plus petit entier k tel que $k \leq x$ et $\text{MOD}(x, y) = x - y \left\lfloor \frac{x}{y} \right\rfloor$.

3) Calcul de la longitude lon :

$$lon = D_{lon_i} \left(m + \frac{\text{LON}}{2^{N_b}} \right) \tag{8}$$

Annexe D Tableaux des caractères

TABLE 5 – Tableaux des caractères

				b_6	0	0	1	1
				b_5	0	1	0	1
b_4	b_3	b_2	b_1					
0	0	0	0			P	SP	0
0	0	0	1		A	Q		1
0	0	1	0		B	R		2
0	0	1	1		C	S		3
0	1	0	0		D	T		4
0	1	0	1		E	U		5
0	1	1	0		F	V		6
0	1	1	1		G	W		7
1	0	0	0		H	X		8
1	0	0	1		I	Y		9
1	0	1	0		J	Z		
1	0	1	1		K			
1	1	0	0		L			
1	1	0	1		M			
1	1	1	0		N			
1	1	1	1		O			