

Conception d'un système de communications et de sensing basé sur la modulation en fréquence

François Horlin
Wireless Communications Group
Service OPERA

Table des matières

1	Introduction	1
2	Objectifs	2
3	Signal audio	2
3.1	Propriétés du signal	2
3.2	Etape 1 du projet	3
4	Système de sensing	3
4.1	Principe de fonctionnement	3
4.2	Estimation de la réponse fréquentielle de canal	4
4.3	Etape 2 du projet	4
4.4	Estimation de la réponse impulsionnelle du canal	5
4.5	Etape 3 du projet	6
5	Système de communications	7
5.1	Signal modulé en fréquence	7
5.2	Etape 4 du projet	7
5.3	Récepteur à corrélation	8
5.4	Etape 5 du projet	8
6	Etude de performance	9
6.1	Bruit blanc additif Gaussien	9
6.2	Etape 6 du projet	10
6.3	Etape 7 du projet	10

1 Introduction

L'objectif poursuivi par les concepteurs des systèmes de communications sans fil a été à l'origine de développer de nouvelles technologies permettant d'offrir des débits de communications de plus en plus élevés aux utilisateurs. Plus récemment, d'autres fonctionnalités ont été intégrées dans les systèmes, telles que la localisation d'émetteurs sans-fil actifs et le monitoring de l'environnement passif, appelé plus communément "sensing" en Anglais.

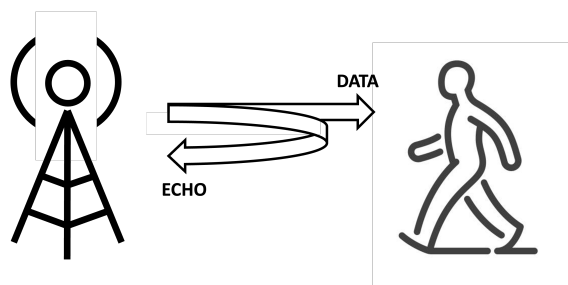


FIGURE 1 – Système de communications et de sensing de l’environnement.

Le principe de fonctionnement du sensing de l’environnement est similaire à celui d’un radar, utilisant cependant des signaux de communications plutôt que des signaux dédiés. En observant le signal reçu suite à la réflexion des signaux émis sur les personnes ou objets potentiellement en mouvement dans l’environnement, il est possible de construire une image de l’environnement physique.

Le partage des signaux et du matériel entre plusieurs fonctionnalités constitue une manière efficace de revaloriser les ressources utilisées. Aujourd’hui l’intégration du sensing est activement étudiée par les comités de standardisation des systèmes de communications sans-fil.

La Figure 1 illustre le scénario de base d’un système de communications et de sensing de l’environnement. Le modem envoie des informations utiles à l’utilisateur (système de communications). En observant le signal reçu suite à l’écho sur l’utilisateur en mouvement, le modem estime la position et la vitesse de cet utilisateur (système de sensing de l’environnement).

2 Objectifs

- Etudier les propriétés de la modulation en fréquence et comprendre son intérêt dans le cas des systèmes de communications et de sensing. Nous supposons que les deux fonctionnalités sont opérées avec le même type de signal, mais qu’elles se déroulent séquentiellement.
- Concevoir et analyser un système de sensing basé sur la mesure en fréquence du canal de propagation des ondes. Mettre le système en oeuvre avec des signaux audio afin de mesurer de la distance entre un ordinateur et un mur.
- Concevoir et analyser une chaîne de communications à modulation numérique en fréquence. Mettre le système en oeuvre avec des signaux audio afin de communiquer une image entre deux ordinateurs.
- Réaliser la simulation des deux systèmes à l’aide du logiciel Matlab afin d’étudier leur performance en présence de bruit blanc additif Gaussien.
- Plus généralement, se familiariser avec les notions fondamentales de télécommunications, telles que la bande passante, la densité spectrale de puissance, le bruit blanc additif Gaussien, le récepteur par corrélation...

3 Signal audio

3.1 Propriétés du signal

Un signal audio est réel, envoyé en bande de base. Son spectre est donc centré sur la fréquence nulle et symétrique par rapport celle-ci.

La fréquence d’échantillonnage du signal est fixée à $F_s = 48$ [kHz] dans votre simulation Matlab afin

de couvrir le domaine des signaux audibles. Comme le signal est échantillonné dans le temps, il est périodique en fréquence ; il est donc défini sur la bande de fréquences situées entre -24 et $+24$ [kHz].

3.2 Etape 1 du projet

L'objectif de cette étape est de se familiariser avec les fonctions Matlab utiles à la génération et à l'enregistrement de signaux audio.

- Générez un **pulse radio fréquence** (RF) de fréquence f_p et de durée T_p :

$$x(t) = \begin{cases} \cos(2\pi f_p t); & t \in [0, T_p] \\ 0; & \text{sinon} \end{cases} \quad (1)$$

Illustrez le signal temporel. Les valeurs suivantes des paramètres constituent un bon point de départ : $f_p = 8$ [kHz], $T_p = 10$ [ms], 1024 échantillons de signal.

- Évaluez la **transformée de Fourier** du pulse à l'aide de la fonction *fft* de Matlab. Le résultat fourni par Matlab est défini de 0 à 48 [kHz], et doit être recentré entre -24 et 24 [kHz] en ramenant la moitié supérieure du spectre devant la partie inférieure du spectre grâce à la fonction *fftshift*.

Illustrez le signal en fréquence. Discutez de l'impact des paramètres f_p et T_p en les faisant varier autour de leur valeur nominale.

- Générez un **signal audio** à partir du pulse et enregistrez ce signal simultanément sur le même ordinateur ou sur un ordinateur distant. Dans Matlab, il faut d'abord générer un objet audio à l'aide de la fonction *audioplayer* (*audiorecorder*) et ensuite utiliser la fonction *play* (*record*) pour générer (enregistrer) le signal audio.

Etant donné la très faible durée du pulse audio, il est difficile d'assurer manuellement que le récepteur soit synchronisé sur l'arrivée du pulse. Une astuce consiste à émettre le signal périodiquement (répétition des 1024 échantillons) et à enregistrer le signal sur au moins deux périodes ; il est ainsi possible de récupérer une version complète du pulse au récepteur sans se préoccuper du moment d'enregistrement. La même astuce sera appliquée pour implémenter le sensing et la communication.

4 Système de sensing

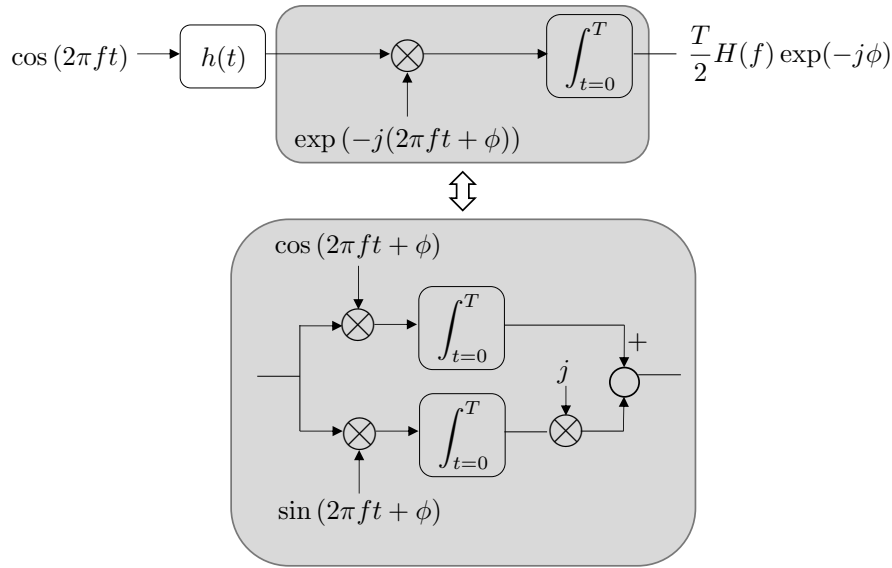
4.1 Principe de fonctionnement

Le système de sensing est composé d'un émetteur audio (ici le haut-parleur d'un ordinateur) proche d'un récepteur audio (ici le microphone du même ou d'un autre ordinateur). Il est placé à proximité d'un obstacle de grande dimension, tel qu'un mur, et évalue sa distance par rapport à cet obstacle.

Le principe de fonctionnement est d'estimer la réponse en fréquence $H(f)$ du canal audio en envoyant une série de signaux à des fréquences différentes et de calculer la réponse impulsionnelle $h(t)$ correspondante par transformée de Fourier inverse. Le canal audio étant principalement constitué du trajet direct, entre le haut-parleur et le microphone, et du trajet réfléchi sur l'obstacle, sa réponse impulsionnelle comporte deux deltas de dirac espacés dans le temps :

$$h(t) = \alpha_d \delta(t - \tau_d) + \alpha_r \delta(t - \tau_r) \quad (2)$$

où α_i et τ_i représentent l'atténuation et le délai des deux trajets ($i = d, r$). L'écart de délai entre les deux trajets est proportionnel à la distance d recherchée entre le radar et l'obstacle : $\tau_r - \tau_d = 2d/v$

FIGURE 2 – Estimation de la réponse en fréquence du canal à la fréquence f .

où v est la vitesse de propagation du son dans l'air égale à 340 [m/s]. Dans le cas d'un canal à deux trajets, la réponse en fréquence prend la forme :

$$H(f) = \alpha_d \exp(-j2\pi f\tau_d) + \alpha_r \exp(-j2\pi f\tau_r) \quad (3)$$

4.2 Estimation de la réponse fréquentielle de canal

Dans un premier temps, nous nous concentrons sur l'estimation de la réponse de canal à une seule fréquence. Le schéma de principe est donné à la Figure 2. Le canal audio à la fréquence f peut être estimé en envoyant un cosinus à cette fréquence, en multipliant le signal reçu par une exponentielle complexe à la même fréquence (autrement dit séparément par un cosinus et un sinus à la fréquence f) et en intégrant le résultat sur une période T supposée égale à un multiple de $1/f$. Une phase ϕ prenant une valeur quelconque sur l'intervalle $[0, 2\pi]$ est introduite dans l'exponentielle pour modéliser le fait que les oscillateurs locaux de l'émetteur et du récepteur ne sont pas nécessairement alignés en phase.

Dans un second temps, la réponse de canal est estimée simultanément sur une grille de fréquences. Comme illustré à la Figure 3, il est possible d'estimer la réponse du canal audio à deux fréquences simultanément en utilisant le même schéma à condition que l'écart entre les deux fréquences soit un multiple de $1/T$. Ce constat est aisément généralisé à un ensemble de fréquences réparties uniformément sur une grille. Les exponentielles complexes générées au récepteur sont toutes affectées de la même phase ϕ lorsque les fréquences sont dérivées d'un même oscillateur local, ce qui permet de déduire la réponse du canal à une phase près.

4.3 Etape 2 du projet

L'objectif de cette étape est d'estimer la réponse en fréquence d'un canal audio en présence d'un mur et de confronter le résultat à la réponse en fréquence théorique lorsque le canal est composé d'un trajet direct et d'un trajet réfléchi.

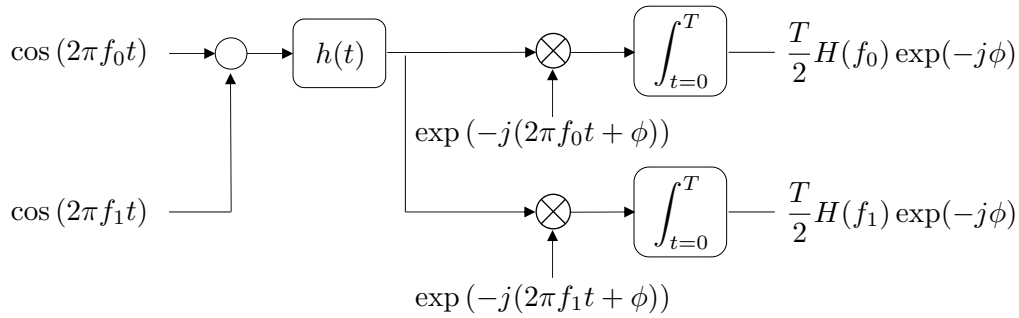


FIGURE 3 – Estimation de la réponse en fréquence du canal simultanément aux fréquences f_0 et f_1 choisies telles que $f_1 - f_0 = k/T$ avec k entier.

- Démontrez d'abord analytiquement le principe d'estimation de la réponse de canal à une seule fréquence tel qu'illustré à la Figure 2. Etendez votre démonstration à l'estimation simultanée sur plusieurs fréquences comme illustré à la Figure 3.
- Définissez une première **grille en fréquences** vous permettant d'observer la réponse du canal suffisamment finement. Discutez le choix du paramètre T , de l'écart entre les fréquences successives et de la gamme de fréquences couverte (fréquences minimum et maximum).
- Calculez analytiquement le **module de la réponse en fréquence** donnée à l'équation (3). Illustrez le résultat en décibels pour des valeurs raisonnables des paramètres du canal (rapport d'amplitude et écart de délai entre les deux trajets).
- Générez le **signal temporel** résultant de l'envoi simultané des cosinus définis sur la grille de fréquences. Le signal est émis suffisamment longtemps pour permettre un enregistrement manuel sur une durée supérieure à T au récepteur. Placez votre radar audio dans un scénario stable où le trajet réfléchi est clairement identifié. Évaluez le module de la réponse en fréquence sur la grille de fréquences choisie et montrez la pertinence du résultat par rapport à votre calcul analytique.

4.4 Estimation de la réponse impulsionnelle du canal

L'objectif de cette étape est de calculer la réponse impulsionnelle du canal audio à partir de sa réponse en fréquence par transformée de Fourier inverse. La distance entre le radar et l'obstacle pourra en être directement déduite. Quelques précautions liées à l'échantillonnage des signaux dans le temps et en fréquence sont à prendre en considération.

Etant donné que la réponse de canal est échantillonnée dans le temps, elle est périodique en fréquence et répétée aux multiples de la fréquence d'échantillonnage F_s . La réponse de canal est par ailleurs classiquement évaluée sur une grille de fréquences uniforme donnée par :

$$f_k = k \frac{F_s}{Q}; \quad k = -\frac{Q}{2}, \dots, \frac{Q}{2} - 1 \quad (4)$$

où Q est le nombre de fréquences total considéré. La réponse de canal est donc également échantillonnée en fréquence, la rendant aussi périodique dans le temps et répétée tous les Q échantillons. La Figure 4 illustre l'effet de l'échantillonnage dans les deux dimensions. L'algorithme "fast Fourier transform" (FFT) et son inverse permettent de passer d'un domaine à l'autre en travaillant sur une période à chaque fois. Dans Matlab, les opérateurs FFT/IFFT sont non centrés, définis sur les indices de 0 à $Q - 1$.

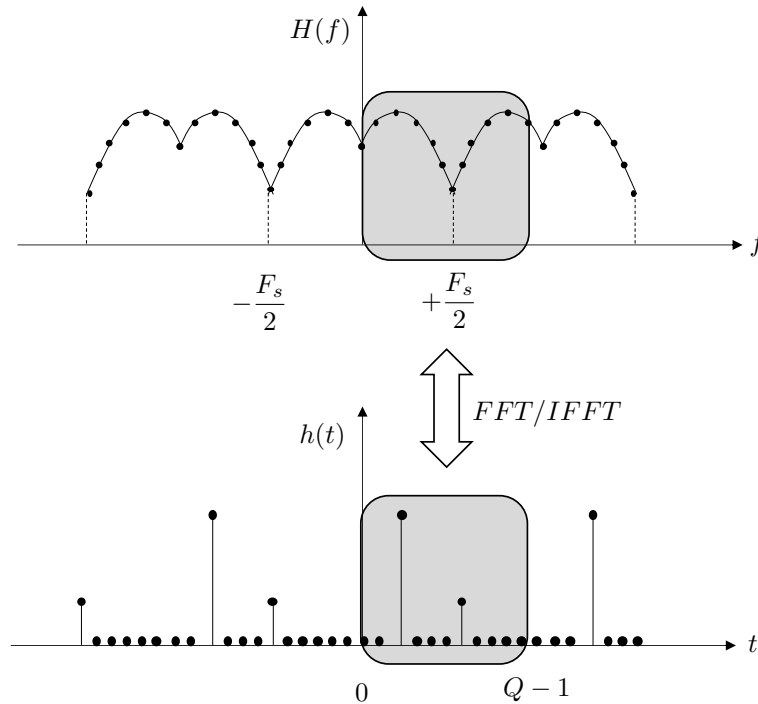


FIGURE 4 – Echantillonnage de la réponse de canal en fréquence et dans le temps. Algorithme de FFT/IFFT appliqué sur une période.

4.5 Etape 3 du projet

L'objectif de cette étape est d'estimer la réponse impulsionnelle du canal audio et d'en déduire les paramètres de l'environnement, tels que la distance à un mur dans notre cas.

- Choisissez le nombre de fréquences Q et définissez la **grille uniforme de fréquences** entre -24 et 24 [kHz]. Le paramètre Q doit être une puissance de 2 pour que l'implémentation de l'algorithme FFT soit efficace, et suffisamment grand pour éviter les ambiguïtés lors du calcul de la transformée de Fourier inverse. Un bon point de départ est $Q = 4096$.
- Générez le **signal temporel** résultant de l'envoi simultané des cosinus définis sur la grille de fréquences. La réponse impulsionnelle du canal étant réelle, la réponse en fréquence est telle que $H(-q) = H^*(q)$. Il est donc suffisant d'évaluer $H(f)$ sur les fréquences positives (indices de 0 à $Q/2$), et de déduire les valeurs aux autres fréquences.

Lorsque tous les cosinus ont les mêmes amplitude et phase, le signal temporel prend la forme d'un delta de Dirac présentant un risque de saturer l'émetteur. Pour éviter cet effet, on multiplie les cosinus par une séquence binaire aléatoire de ± 1 et on compense cette opération du côté récepteur en ré-appliquant la même multiplication. Comparez les signaux émis avec et sans multiplication des cosinus par la séquence binaire.

- Placez votre radar audio dans un scénario stable où le trajet réfléchi est clairement identifié. Évaluez la **réponse en fréquence** du canal audio sur la grille en fréquences. Illustrez la **réponse impulsionnelle** du canal audio obtenue par transformée de Fourier inverse. Évaluez finalement l'écart de délai entre les deux trajets principaux et déduisez la distance entre le radar et l'obstacle. Le premier trajet a un délai quelconque puisque le récepteur n'est pas synchronisé temporellement sur l'émetteur.

5 Système de communications

5.1 Signal modulé en fréquence

La communication d'une image noir-et-blanc entre deux ordinateurs distants dans un environnement dégagé est réalisée en modulant une porteuse audio en fréquence (Frequency Shift Keying, FSK). La séquence binaire correspondant aux pixels de l'image noir-et-blanc est décomposée en une succession de blocs de b bits. Pour chaque bloc n , un signal de fréquence f_m sélectionnée parmi un ensemble prédéfini de $M = 2^b$ fréquences en fonction de l'information binaire est émis pendant la durée d'un symbole T :

$$s_m(t) = \cos(2\pi f_m t); \quad t \in [nT, (n+1)T] \quad (5)$$

L'ensemble des M fréquences utilisables est défini par :

$$f_m = f_0 + m\Delta f \quad (6)$$

avec $m \in [0, M-1]$. L'écart de fréquence Δf est un multiple entier de $1/2T$ pour que les signaux émis soient orthogonaux entre eux :

$$\int_{t=0}^T s_{m_1}(t) s_{m_2}(t) dt = \delta_{m_1-m_2} \quad (7)$$

La communication consiste comme dans le cas du sensing en l'envoi d'un ensemble de cosinus répartis sur une grille uniforme de fréquences. Pour chaque symbole, un seul cosinus est activé cependant à la différence du système de sensing qui active toutes les fréquences simultanément.

5.2 Etape 4 du projet

L'objectif de cette étape est de générer le signal audio modulé en fréquence afin de transmettre une image noir-et-blanc.

- Choisissez une image de taille raisonnable (50 x 50 pixels par exemple), et convertissez la en une **séquence binaire**. Dans Matlab, la fonction *imread* permet de lire une image dans un fichier et de la convertir en une matrice de nombres entiers de valeur entre 0 et 255 selon l'échelle de gris. Un seuil peut alors être appliqué pour obtenir une image noir-et-blanc.
- Formez le **signal FSK** et illustrez le en fonction du temps. Considérez les valeurs suivantes des paramètres du système comme un point de départ réaliste : $f_0 = 8$ [kHz], $\Delta f = 400$ [Hz], $M = 16$. Discutez de l'impact des paramètres sur la capacité de communication.
- Dans le cas d'un système de communications, le signal émis est un processus aléatoire. Déterminez la **densité spectrale de puissance** du signal émis par la méthode de Welch implémentée par la fonction *pwelch* dans Matlab. Elle consiste à découper le signal en un ensemble de segments, calculer la transformée de Fourier sur chaque segment, et moyenner le module carré obtenu à chaque fréquence sur l'ensemble des segments.
- Implémentez la communication du **signal audio** en utilisant les mêmes fonctions Matlab que celles utilisées dans le cas du pulse RF. L'objectif ici est de mettre en oeuvre une communication en environnement dégagé, sans obstacle majeur, entre deux ordinateurs distants. Les répliques du signal envoyées sont espacées dans le temps pour permettre d'identifier le moment d'arrivée du signal après enregistrement.

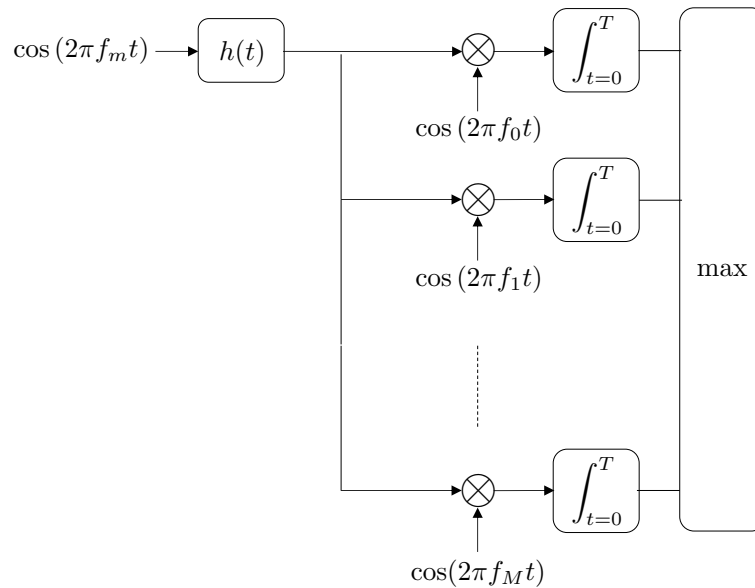


FIGURE 5 – Récepteur M-FSK cohérent.

5.3 Récepteur à corrélation

Le récepteur corrèle chaque segment du signal reçu correspondant à un symbole avec l'ensemble des signaux possibles à toutes les fréquences et sélectionne la fréquence qui maximise la corrélation. On considère la communication en ligne de vue, sans obstacle majeur, de telle sorte que le canal de propagation puisse être supposé idéal, $h(t) = \delta(t)$.

Les oscillateurs locaux chargés de générer les fréquences porteuses en émission et en réception n'ont pas de raison d'être synchronisés en phase à-priori. Pour cette raison, une différence de phase ϕ est introduite dans le modèle mathématique du récepteur.

Un récepteur cohérent suppose que la différence de phase est pré-compensée avant que la démodulation n'ait lieu ; la phase ϕ est donc nulle lors de la communication. Le signal reçu est alors directement corrélé avec les cosinus aux différentes fréquences et la décision est basée sur la comparaison de l'amplitude des corrélations comme illustré à la Figure 5.

Un récepteur non-cohérent fonctionne correctement malgré la présence d'une phase ϕ non nulle et ne nécessite donc pas de pré-compensation de phase avant l'étape de démodulation. Afin d'assurer de ne pas perdre d'information lors de l'opération de corrélation à cause de la phase ϕ , le signal reçu est plutôt corrélé avec des exponentielles complexes aux différentes fréquences et la décision est basée sur la comparaison du module des corrélations comme illustré à la Figure 6.

Il est aisé d'implémenter les deux versions du récepteur dans votre simulation afin d'en comparer les performances. Pour implémenter la communication audio, seul le récepteur non-cohérent sera considéré pour éviter de devoir gérer la phase ϕ en pratique.

5.4 Etape 5 du projet

L'objectif de cette étape est d'implémenter le récepteur à corrélation non-cohérent pour démoduler le signal audio modulé en FSK.

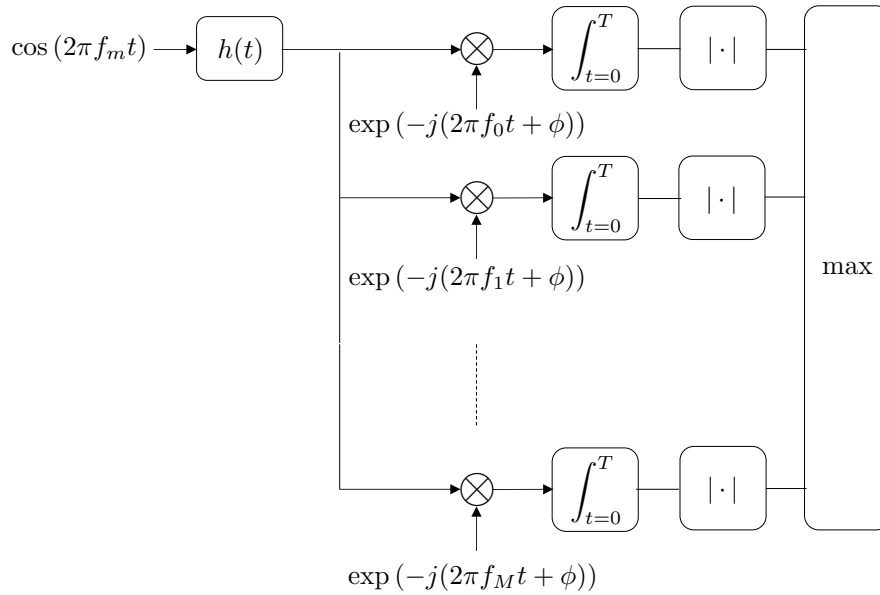


FIGURE 6 – Récepteur M-FSK non-cohérent.

- Démontrez analytiquement que la performance du récepteur cohérent est fort dégradée pour certaines valeurs de ϕ alors que celle du récepteur non-cohérent est préservée pour toutes les valeurs de ϕ . Revisitez le choix de l'écart entre les fréquences Δf défini à l'équation (6) dans le cas des deux récepteurs.
- Implémentez les **récepteurs à corrélation cohérents et non-cohérents**. Dans un premier temps, vérifiez le fonctionnement des deux récepteurs en démodulant le signal FSK émis (avant passage par le canal audio donc). Comparez les deux séquences binaires estimées à celle envoyée et assurez vous qu'il n'y ait pas d'erreurs.
- Récupérez le signal audio reçu à l'étape précédente et déterminez le **timing des symboles** par inspection du signal. Nous supposons que le signal audio est suffisamment puissant par rapport au bruit environnant, de telle sorte que l'estimation de son temps d'arrivée peut simplement se faire en sélectionnant la fenêtre du signal qui maximise l'énergie reçue. Démodulez le signal reçu et comparez la séquence binaire estimée avec le récepteur non-cohérent à celle envoyée. Il est intéressant d'illustrer le **nombre d'erreurs** en fonction de la distance séparant le récepteur de l'émetteur.
- Reformez l'image noir-et-blanc de départ. La fonction Matlab *imshow* est utile à cet effet.

6 Etude de performance

6.1 Bruit blanc additif Gaussien

Le signal au récepteur est corrompu par des signaux qui interfèrent avec le signal utile et par un ensemble d'imperfections dans le comportement des éléments électroniques. Ces perturbations étaient bien sûr présentes lors de l'implémentation du radar ou de la communication audio dans les étapes précédentes. Cependant, nous n'avons testé les deux systèmes qu'un petit nombre de fois et il est difficile de certifier leur bon fonctionnement si on reproduit l'expérience. Il est possible de simuler les deux systèmes sur un grand nombre de réalisations par simulation numérique uniquement, en adoptant un modèle statistique des perturbations du signal reçu.

Nous supposons que le signal est corrompu par un bruit blanc additif Gaussien au récepteur (additive white Gaussian noise, AWGN). Dans le cas du système de sensing, la performance est évaluée en terme de probabilité de détection manquée de l'obstacle et probabilité de fausse alarme, pour différentes valeurs de rapport de puissance entre le signal reçu et le bruit (signal-to-noise power ratio, SNR). Dans le cas du système de communication, la performance est évaluée en terme de taux d'erreurs binaires (bit error rate, BER), donné par le nombre d'erreurs moyen divisé par le nombre de bits envoyés, en fonction du rapport énergie du bit sur densité spectrale de puissance de bruit.

6.2 Etape 6 du projet

L'objectif de cette étape est d'évaluer la performance du système de sensing en présence de bruit blanc additif Gaussien.

- Construisez une **chaîne de simulations numériques du système de sensing** complet sans bruit. Nous supposons un canal de propagation tel que donné à l'expression (2). Choisissez des valeurs réalistes pour les amplitudes et délais relatifs entre les deux trajets.
- Ajoutez le bruit de puissance déterminée par le rapport puissance de signal sur puissance de bruit souhaité. Pour ce faire, estimez d'abord la **puissance du signal reçu** à l'entrée du récepteur en moyennant le signal élevé au carré sur la durée du signal T_r :

$$P = \frac{1}{T_r} \int_{t=0}^{T_r} r^2(t) dt \quad (8)$$

Générez ensuite un vecteur de bruit blanc Gaussien à l'aide de la fonction *randn* de Matlab et multipliez le par la racine carrée de la **puissance de bruit souhaitée**. Un bon point de départ est de simuler un SNR égal à 10 dB.

- Évaluez la performance du système de sensing. La présence d'une cible est détectée en appliquant un seuil de puissance sur chaque échantillon de la réponse impulsionnelle estimée pris au carré. Pour une valeur de SNR donnée, évaluez la **probabilité de fausse alarme** (détecter une cible sur les échantillons où il n'y en a pas) et de **détection manquée** (ne pas détecter la cible représentée par le second trajet) en faisant varier la hauteur du seuil de puissance. Illustrez ensuite la probabilité de détection manquée en fonction de la probabilité de fausse alarme. Produisez cette courbe pour différentes valeurs du SNR exprimé en décibels.

6.3 Etape 7 du projet

L'objectif de cette étape est d'évaluer la performance du système de communications en présence de bruit blanc additif Gaussien.

- Construisez une **chaîne de simulations numériques du système de communications** complet sans bruit. Nous supposons l'envoi d'une séquence binaire suffisamment longue à travers un canal de propagation idéal (en omettant la conversion de l'image noir-et-blanc en séquence binaire). Discutez du choix de la longueur de la séquence binaire.
- Ajoutez le bruit de puissance déterminée par le rapport énergie du bit sur densité spectrale de puissance de bruit souhaité. L'**énergie d'un bit** est obtenue en intégrant le signal (5) élevé au carré sur une durée symbole et en divisant le résultat par le nombre de bits par symbole :

$$\mathcal{E}_b = \frac{1}{\log_2 M} \int_{t=0}^T s_m^2(t) dt = \frac{T}{2 \log_2 M} \quad (9)$$

Générez ensuite un vecteur de bruit blanc Gaussien à l'aide de la fonction *randn* de Matlab et multipliez le par la racine carrée de la puissance de bruit. La puissance de bruit est égale à

la **densité spectrale de puissance** $N_0/2$ multipliée par la bande passante de la simulation égale à F_s . Un bon point de départ est de simuler un rapport \mathcal{E}_b/N_0 égal à 4 dB.

- Évaluez la performance du système de communications. Le **taux d'erreurs binaires**, évalué en divisant le nombre d'erreurs sur les bits estimés par le nombre total de bits envoyés, est illustré en échelle logarithmique en fonction du rapport \mathcal{E}_b/N_0 exprimé en décibels. Il est intéressant de comparer la performance des récepteurs cohérent et non-cohérent.