

Comment ça marche ?

Les transmissions radio-numériques

1 - Historique et généralités

Par le radio-club F6KRK

Cet article démarre une nouvelle série de "Comment ça marche ?" sur les transmissions numériques. Nous allons commencer par démythifier ce qualificatif de "numérique" qui, en ce qui concerne les transmissions en général est un mode bien plus ancien que le mode analogique.

Historique

Les transmissions numériques entre êtres vivants existent depuis la nuit des temps et pour les humains, elles sont apparues bien avant le langage parlé. Tous les êtres vivants expriment le besoin de communiquer avec leurs semblables et en particulier à une distance supérieure au contact visuel ou auditif. Alors le problème posé consiste à transmettre des informations à distance avec les moyens dont on dispose.

Quantification de l'information

La plus petite information que l'on puisse imaginer est binaire : oui/non, présence/absence, allumé/éteint, bruit/silence, etc. On exprime mathématiquement ce "bit" d'information élémentaire à l'aide d'un nombre en base 2 qui peut prendre deux états : "0" = "rien" et "1" = "quelque chose". Si nous avons besoin de transmettre une information plus complexe (contenant plusieurs bits), nous aurons deux possibilités : soit transmettre une suite d'informations à deux états, soit utiliser un système qui permette de discriminer un plus grand nombre d'états. Voyons tout cela avec un exemple "préhistorique".

Soient deux hommes de Néandertal A et B qui "habitent" sur deux collines différentes. Quand ils rentrent chez eux, leur premier souci est de le signaler en ranimant leur feu avec beaucoup de fumée. Ainsi chacun sait quand l'autre est chez lui : fumée = présence = "1" et rien = absence = "0". La durée nécessaire pour que l'on soit sûr que le signal soit bien identifié est appelée "durée symbole".

Maintenant supposons que, A étant tout seul sur sa colline, B cohabite avec C et qu'ils veulent faire savoir à A s'ils sont présents l'un ou l'autre ou ensemble. Nous avons maintenant à transmettre une information à quatre états : rien, B seul, C seul ou B et C. Nous pouvons le faire de plusieurs manières.

Avec la première, B et C peuvent faire un feu avec une fumée différente selon leur présence : une fumée blanche pour B, une fumée grise pour C et une fumée noire pour B+C. A la réception par A, nous avons la table de vérité suivante :

- aucune fumée : ni B, ni C ne sont présents
- une fumée blanche : seul B est présent
- une fumée grise : seul C est présent
- une fumée noire : B et C sont présents

Ainsi avec la durée d'un seul symbole nous avons transmis deux bits d'information (quatre états possibles). Mais cette augmentation d'information a un prix : il est nécessaire que l'opacité de la fumée soit bien précise et que le ciel ne vienne pas la modifier au point que A ne puisse la discriminer. En termes radioélectriques, le décodage d'un symbole à quatre états (2 bits) demande un rapport signal/bruit plus important que pour un symbole à deux états (1 bit).

Avec la seconde manière, pour diminuer le rapport S/B nécessaire, on peut utiliser deux symboles en série de 1 bit chacun. L'un concernera B avec une fumée blanche et le deuxième C avec une fumée noire. Nous avons alors la table de vérité suivante :

- aucune fumée : ni B, ni C ne sont présents
- une seule fumée blanche : seul B est présent
- une seule fumée noire : seul C est présent
- une fumée blanche suivie d'une fumée noire : B et C sont présents.

On peut encore gagner sur le rapport S/B en augmentant le nombre de symboles avec une fumée de densité quelconque (mais tranchant quand-même sur le fond de ciel). Nous aurons par exemple la table de vérité suivante :

- premier symbole à "1" = présence de quelqu'un
- deuxième symbole à "0" = présomption que c'est B

Si le processus s'arrête, il n'y a que B, sinon :

- troisième symbole à "1" = ce n'est pas B ou pas tout seul
- quatrième symbole à "0" = présomption qu'il y a C (et peut-être B)

Si le processus s'arrête, il n'y a que C, sinon :

- cinquième symbole à "1" = ce n'est pas C tout seul
- sixième symbole à "0" = il y a B et C.

Nous avons ici le système le plus robuste mais aussi le plus long. Le décodage consiste à compter le nombre de paquets de fumée. Ce système est dit "asynchrone" car les durées de symboles peuvent être quelconques (donc système bien adapté à nos Néandertaliens).

On peut raccourcir la durée de transmission en utilisant des symboles d'une durée constante.

Nous avons alors le processus suivant :

- premier symbole à "1" = présence de quelqu'un
- deuxième symbole à "0" = pour la mesure de la durée du premier symbole qui sert de référence de temps
- troisième symbole à "1" si B présent, sinon "0"
- quatrième symbole à "1" si C présent, sinon "0"
- cinquième symbole à "0" sans limite de durée, bien supérieure à celle d'un symbole.

Si nous connaissons avec précision la durée symbole, nous pouvons faire l'économie d'un deuxième symbole à zéro. Alors quatre symboles suffisent pour transmettre les trois données : présence d'un habitat, présence de B, présence de C. Le premier symbole est appelé "bit de start" (toujours à "1") les deuxième et troisième, "bits de données" ("0" ou "1") et le quatrième, "bit de stop" (toujours à "0").

Et s'il n'y a personne, c'est-à-dire si les bits de données sont toujours à zéro ? Alors le système ne transmet que des symboles uniques à "1" séparés par plusieurs symboles à zéro. Ce signal de "présence" émis en permanence est appelé "signal de repos" ou "signal d'attente" (idle). Il permet de savoir pour le Néandertalien qu'il y a un habitat sur la colline en face et pour l'OM que le canal est occupé et en attente.

Maintenant, B et C peuvent vouloir transmettre à A d'autres informations que leur présence, par exemple si leur chasse a été bonne, une invitation à leur festin etc. Ils devront alors transmettre des "mots" d'informations, chaque mot ayant une signification particulière. Si les mots demandent plus d'un symbole pour leur transmission, il sera nécessaire de connaître avec certitude leur début de transmission (bit de "start"). Le codage de chaque mot, leur

signification, l'ordre de leur transmission, constitue ce qu'on appelle un "protocole". Ainsi il existe un protocole des feux maritimes générés par les phares et les bouées (feux colorés à éclats ou à occultations, plus le code de leur indicatif, comme pour les radiobalises). Noter qu'ici, rien n'a changé depuis l'Antiquité (ni même depuis la préhistoire avec l'exemple des Néandertaliens).



Ambiguïté du zéro

Pour le symbole élémentaire, nous avons défini le zéro comme signifiant "rien" par opposition au "un" qui signifie "quelque chose". En réalité, ce n'est pas le chiffre zéro qui signifie "rien", mais le mot "zéro" (dont tous les chiffres sont à zéro). Donc, quand on rencontre un symbole à zéro (blanc, silence), il faut analyser le contexte pour savoir s'il signifie "rien" ou quelque chose de différent du "un". Nous avons vu qu'un mot "numérisé" pouvait être exprimé avec un seul symbole à n états ou avec n symboles successifs à m états ($m = 2$ pour un symbole élémentaire). Nous allons avoir besoin d'un codage particulier de notre mot "numérique" pour lever l'ambiguïté du zéro. Prenons deux cas de transmission d'un mot de deux bits. Nous avons les valeurs suivantes en binaire : 00, 01, 10 et 11.

1^{er} cas : Transmission à l'aide d'un symbole à 4 états

Nous pouvons utiliser un signal à quatre niveaux d'amplitude (0, 1, 2 et 3). A la détection, le niveau "0" seul signifie qu'il n'y a rien (pas d'émission). Par ailleurs, sans étalonnage du récepteur, il est impossible de différencier les autres niveaux (de "1" à "3"). Cela amène deux contraintes : commencer la transmission par un état non nul et transmettre une séquence préalable d'étalonnage. Par exemple, une série de niveaux alternés entre "2" et "3" ⁽¹⁾. Cette série est appelé "préambule" ou "synchronisation bit", car elle permet de déterminer les instants du début et de la fin des symboles (pour pouvoir les échantillonner). Ensuite nous avons besoin de connaître le début de la transmission des données ce qui se fait à l'aide d'un mot de "synchronisation trame", par exemple ici "0033" (niveaux). A partir de là, les zéros ont une signification numérique.

2^{ème} cas : Transmission à l'aide de symboles élémentaires à 2 états

Il nous faudra deux symboles successifs pour transmettre la donnée. Mais ils ne pourront pas être isolés, car on ne distinguerait pas la donnée "01" de la donnée "10" (un seul état à 1). Par ailleurs on a vu que la donnée "00" toute seule ne codait "rien". On va donc être amené à utiliser un préambule constitué alternativement de "1" et de "0" (synchro bit) suivi de deux états successifs à "1" (synchro trame). A partir de là, les zéros seront significatifs pour les données.

Cas particulier du RTTY

C'est une modulation à deux états par déplacement de fréquence (F1 = "0") et F2 = "1"). Mais logiquement, on a un système à quatre états en considérant pour F1 et F2 deux modulations à deux états ON/OFF. Nous avons à l'émission :

F1 et F2 = "OFF" = absence

F1 = "ON" et F2 = "OFF" = valeur numérique "0"

F1 = "OFF" et F2 = "ON" = valeur numérique "1"

F1 et F2 "ON" = interdit

On pourrait se dire que ce système redondant entraîne un gâchis, en doublant la bande de fréquence et la puissance moyenne. Mais avec une fréquence permanente "ON", on a une info d'occupation et on peut caler en fréquence le récepteur dans l'attente du bit de "start". Cela reste une préoccupation radioamateur car maintenant avec la précision des fréquences des émetteurs et des récepteurs, le calage sur un canal donné est automatique. Par ailleurs, si F1 et F2 simultanément "ON" est interdit à l'émission, on peut le rencontrer à la réception en cas de parasites, par exemple. Alors grâce à l'ajout d'un contrôle de parité, on peut lever l'ambiguïté entre les valeurs "01" et "10". Mais le procédé a ses limites. Malgré tout la modulation 2FSK utilisée par le RTTY est encore employée par la radiotéléphonie de 2^{ème} génération (GMSK), mais avec quelques optimisations. A l'origine, son principal avantage était d'être parfaitement compatible avec une transmission en modulation de fréquence et alors il ne nécessitait pas de développement de composants spéciaux ⁽²⁾.

Comparaison analogique-numérique

Prenons un exemple simple avec un thermomètre analogique mesurant le courant traversant une thermistance. Nous transmettrons notre mesure en modulant en amplitude une porteuse radio en fonction du courant mesuré ⁽³⁾. Si le galvanomètre mesurant la tension HF reçue a suffisamment de résolution, nous pourrions avoir une grande précision (fraction de degré) ⁽⁴⁾. Si du bruit vient entacher la transmission, cela aura pour seul effet de diminuer la précision, d'autant plus que le rapport S/B diminue. Mais on aura encore une mesure proche de la réalité. Maintenant numérisons la mesure, par exemple sur 16 bits. Nous pourrions la transmettre avec un seul symbole à 65536 états. Dans ce cas, rien de changé par rapport à l'analogique. Mais en pratique, on ne sait générer et décoder simplement que des symboles à 16 états (4 bits par symboles) ⁽⁵⁾. Alors il nous faudra 4 symboles pour transmettre notre mesure, auxquels il faudra ajouter au minimum un symbole de "start" et un symbole de contrôle (parité, par exemple). Concernant la précision, l'effet de la diminution du rapport S/B sera totalement différent. En effet, une seule erreur dans un symbole rend la mesure inexploitable, car on ne sait pas où l'erreur a eu lieu. Nous avons un effet de seuil : au dessus d'un certain rapport S/B nous avons une mesure avec la précision optimale et en dessous, une mesure sans signification, alors qu'en analogique AM, c'est seulement la précision qui change avec le rapport S/B ⁽⁶⁾.

Pour diminuer les effets du bruit, on fait subir au signal des traitements : mise en paquets de données, ajout d'un code correcteur d'erreurs, redondance des données essentielles, entrelacement, etc. On parle "d'habillage des données". L'habillage a pour résultat d'augmenter la quantité de données allant jusqu'au doublement. On a donc intérêt à coder les données en ne transmettant que celles qui sont nécessaires pour pouvoir reconstituer l'information dans sa totalité (codages "**jpeg**", "**mpegn**", **mpn**, **vocodeurs**, **LZW**, pour ne citer que les plus connus). Mais plus le codage est performant, et donc moins redondant, moins il tolère les erreurs. Nous avons affaire à un serpent qui se mord la queue. Le choix du procédé dépend des conditions extérieures : type d'information à transmettre et qualité du canal de transmission. Les performances dépendent de l'adéquation du procédé aux conditions extérieures et pas du procédé lui-même.

Ainsi, dire qu'un procédé est meilleur qu'un autre ne signifie pas grand-chose s'ils sont optimisés. Dans le domaine du numérique, comme dans celui des antennes, on peut être enclin à croire à des solutions "miracle". Mais il n'y en n'a pas, tout se paie. On ne peut avoir à la fois le beurre et l'argent du beurre !

Dans les prochains "Comment ça marche" nous développerons tout ceci et nous verrons que c'est grâce aux progrès technologiques en complexité et en vitesse de fonctionnement associés aux avancées dans le traitement du signal que les transmissions numériques ont pu reprendre le dessus sur les transmissions analogiques.

La Rubrique "Comment ça marche" est une activité collective du radio-club F6KRK (<http://www.f6krk.org>). Pour une correspondance technique concernant cette rubrique : "f5nb@orange.fr".

Notes :

- 1) *En théorie, un couple suffirait, mais on en transmet plusieurs pour effectuer une moyenne. Par ailleurs, on prend les niveaux élevés pour bénéficier du meilleur rapport S/B.*
- 2) *C'est aussi la raison pour laquelle le nFSK est employé par plusieurs modes numériques radioamateur*
- 3) *Nous prendrons un temps de transmission constant, juste nécessaire pour obtenir la précision souhaitée en l'absence de bruit.*
- 4) *On suppose que l'on a précédemment transmis un signal étalonné et que les conditions n'ont pas changé entre les deux mesures.*
- 5) *Maximum 256 états (256QAM).*
- 6) *Nous avons un exemple avec la TNT par réception satellite. Si un nuage grossit progressivement entre le satellite et la parabole et diminue le rapport S/B, nous conservons d'abord une image parfaite, puis brusquement elle se fige (mémoire de la dernière image décodée) mais le son continue, car il tolère un rapport S/B plus faible. Si le nuage s'obscurcit encore, le son cesse également brusquement. Avec la TV analogique en AM, l'image et le son se dégradent progressivement et l'information reste "lisible" de plus en plus difficilement jusqu'à ce que la synchro finisse par "décrocher".*