

RAPPORT UIT-R M.2026

**Adaptabilité de la technologie de bande latérale unique à zéro réel
aux communications de données en ondes décimétriques**

(2001)

1 Introduction

Les systèmes de transmission automatisés à ondes décimétriques ont apporté un certain nombre de solutions novatrices à des problèmes que posaient depuis longtemps les liaisons radioélectriques à ondes décimétriques, comme par exemple le choix des canaux, le fonctionnement sans surveillance et l'interopérabilité; ces systèmes balayaient, rapidement et automatiquement, un ensemble de fréquences, à la recherche des tonalités modems transportant leurs indicatifs d'appel. Les systèmes d'établissement automatique de liaisons (EAL) ont été, en conséquence, mis au point après l'échec de plusieurs solutions industrielles, pour ensuite être essayés et recevoir la confirmation du marché [Johnson et autres, 1997]. La technique EAL, normalisée dans la MIL-STD-188-141A et la FED-STD-1045, est à l'étude à l'UIT-R. Une station de radiocommunication dotée de cette technique EAL comprend un contrôleur EAL, un équipement radioélectrique à bande latérale unique (BLU) pouvant être régulé et des équipements de transmission, comme des antennes, etc. Les stations automatisées plus avancées comportent en plus des modems de données à ondes décimétriques à grande vitesse, des contrôleurs de réseautique, etc.

Le système BLU, réalisé dans les années 1910, continue d'être très utilisé en radiocommunication à ondes décimétriques [Maslin, 1987]. Il offre en effet l'avantage particulier d'une faible largeur de bande, bien qu'il soit difficile de maintenir la transparence des signaux lorsqu'ils traversent des environnements propices aux évanouissements. Pour résoudre ce problème, les Postes britanniques ont mis au point dans les années 1960 le système Lincompex. Au cours du processus de démodulation, les systèmes BLU classiques, dont le Lincompex, doivent être pourvus d'un circuit de contrôle automatique de gain (CAG) pour annuler la dégradation en amplitude et d'un circuit clarificateur pour accorder la fréquence; sans ces deux circuits, le signal détecté est fortement dégradé.

Pour surmonter les inconvénients des systèmes BLU classiques, l'idée de zéro réel a été appliquée avec succès au Japon [Daikoku et Suwa, 1988] pour établir la technique de bande latérale unique à zéro réel (BLU à zéro réel (BLU ZR)) pour les bandes à ondes métriques et décimétriques. La BLU est en effet l'une des méthodes de modulation les plus prometteuses pour utiliser, de manière aussi efficace que possible, le spectre, limité, des fréquences radioélectriques.

Le présent Rapport expose en détail la technique BLU ZR qui semble bien se prêter à la transmission de données sur des liaisons radio à ondes décimétriques.

2 La technique BLU ZR

La technique BLU ZR combine deux techniques qui emploient le traitement numérique du signal, à savoir la modulation BLU et la réception par modulation de phase.

2.1 Conception de l'émetteur

Comme une porteuse joue des rôles importants dans le processus de détection de la BLU ZR, la BLU pourvue d'un signal multiplex réduit est adaptée en signaux émetteurs.

2.1.1 Génération du signal BLU

Pour générer des signaux BLU il existe trois méthodes: la méthode par filtre, la méthode de mise en phase (déplacement de phase) et la méthode de Weaver [Sabin et Schoenike, 1987], parmi lesquelles on choisit la méthode de mise en phase, étant donné que le signal BLU peut être généré sans utilisation d'un filtre passe-bande (BPF) se caractérisant par une forte atténuation qui entraîne une forte dégradation du signal d'information. La méthode de mise en phase exige toutefois la présence d'un transformateur Hilbert pour obtenir un signal d'information d'une précision raisonnable; étant donné qu'il est assez difficile de réaliser concrètement un transformateur Hilbert, on aura soin de fabriquer un circuit à intégration à grande échelle (LSI, *large scale integration*) utilisant le traitement numérique du signal.

2.1.2 Amplificateur de puissance linéaire

La solution la plus simple pour accroître la puissance du signal reçu est d'accroître la puissance de l'émetteur. L'opération peut toutefois provoquer des effets parasites au niveau du terminal d'émission et entraînera une aggravation de la pollution du spectre des fréquences radioélectriques. La contre-réaction en radiofréquence (RF) peut permettre de réduire la distorsion et de phase et d'amplitude, mais les techniques de contre-réaction RF classiques ont des limites: une certaine quantité du signal de sortie RF, exprimée comme une quantité scalaire, est simplement retournée au port d'entrée.

Récemment, une technique en boucle de contre-réaction cartésienne, dans le cadre de laquelle la valeur de contre-réaction est traitée dans la coordonnée (orthogonale) cartésienne à l'instar de ce qui est fait avec une quantité vectorielle, a été mise au point pour fabriquer un amplificateur linéaire pour les systèmes à bande étroite dans les bandes métriques et décimétriques [Nagata, 1989]. Comme la paire de circuits Hilbert est, par définition, orthogonale [Hahn, 1996], cette technique de la boucle de contre-réaction cartésienne peut être facilement utilisée pour fabriquer l'amplificateur linéaire destiné au système BLU.

2.1.3 Largeur de bande du signal d'information

La largeur de bande du signal d'information pour les systèmes BLU classiques va de 350 Hz à 2,7 kHz, avec un espacement des canaux de 3,0 kHz; par comparaison, la limite supérieure de la largeur de bande équivalente pour un système BLU ZR peut atteindre 3,4 kHz.

2.2 Conception du récepteur pour éviter toute dégradation due à une porteuse mal accordée et pour en assurer l'immunité contre les évanouissements

Étant donné que les systèmes BLU sont sensibles au phénomène de synchronisation des porteuses et à de forts évanouissements dans des environnements mobiles, on a recours, au niveau du processus de démodulation des systèmes BLU ZR, à deux techniques novatrices pour résoudre ces problèmes.

2.2.1 Nouvelle méthode de démodulation

La première est une nouvelle méthode de démodulation qui utilise les passages à zéro des signaux reçus. Le récepteur d'un système BLU classique emploie à la fois un circuit CAG et un clarificateur (ou oscillateur à haute stabilité), or ces circuits limitent leurs performances; les systèmes BLU ZR ont recours à une solution complètement différente pour obtenir une qualité de transmission supérieure, sans employer ces circuits limitant les performances du récepteur.

En 1977, M. Benjamin F. Logan des Laboratoires Bell a montré, en appliquant la théorie des fonctions entières, qu'il est possible de reconstituer l'information, sans aucune perte, à partir des passages à zéro des signaux de la bande passante, comme avec la BLU ZR [Logan, 1977],

c'est-à-dire qu'il est inutile, contrairement à ce qui est fait avec la BLU classique, de reconstituer le signal d'information à partir à la fois de l'enveloppe et de la phase du signal BLU reçu; un signal d'information peut donc être reconstitué indépendamment de l'amplitude du signal, comme en modulation de fréquence. M. Logan n'a toutefois pas démontré comment reconstituer le signal d'information à partir des passages à zéro et a indiqué dans sa communication qu'il serait «difficult and impractical» de le faire. La méthode de démodulation BLU ZR constitue une solution, simple et pratique, du problème. Les passages à zéro sont mathématiquement exprimés par des zéros réels, et non complexes; c'est pourquoi la technique décrite ici a été baptisée BLU ZR en hommage aux travaux théoriques de M. Logan.

Avec cette nouvelle méthode de démodulation, le récepteur de BLU ZR est radicalement différent de celui d'un système BLU classique. Le récepteur BLU ZR, de base, se compose d'un limiteur strict d'amplitude, d'un discriminateur de fréquence, d'un intégrateur et d'un linéarisateur. Un signal reçu, BLU à porteuse réduite, est d'abord traité pour relever le niveau de la porteuse afin de créer une BLU à porteuse complète, c'est-à-dire un signal BLU ZR, où l'information des passages à zéro ne peut être trouvée que dans la composante de phase. Pour détecter avec précision cette dernière, la variation d'amplitude doit être supprimée à l'aide d'un limiteur strict d'amplitude, dont la phase du signal produit est détectée à l'aide d'un discriminateur de fréquence et d'un intégrateur. Le signal intégré est ensuite traité par un linéarisateur qui reproduit exactement le signal d'information transmis. Le circuit le plus important pour un récepteur BLU ZR est le linéarisateur, circuit complexe dont la taille est réduite à celle d'un circuit intégré, la précision étant obtenue grâce à l'utilisation du dernier cri de la technique numérique du traitement du signal.

Dans le processus de démodulation BLU ZR nouvellement mis au point, la composante porteuse est toujours convertie en composante continue des signaux d'information. Le récepteur BLU ZR est donc totalement à l'abri de l'effet de dégradation causé par une porteuse mal accordée, c'est-à-dire des glissements de fréquence porteuse et/ou de phase, dégradation que subissent les récepteurs des systèmes BLU classiques qui doivent donc être dotés d'un clarificateur (ou d'un oscillateur à haute stabilité).

2.2.2 Technique anti-évanouissement

La deuxième innovation consiste à utiliser les techniques anti-évanouissement. Comme l'effet de l'évanouissement est multiplicatif, les deux composantes, d'amplitude et de phase, des signaux reçus sont dégradées par un fort évanouissement; malheureusement, dans les systèmes BLU classiques aucune solution n'a été trouvée pour compenser cette dégradation. Dans le processus de démodulation BLU ZR l'amplitude échappe en revanche à toute dégradation grâce à l'utilisation du limiteur strict, de même que l'on utilise un annuleur à modulation de fréquence aléatoire pour supprimer la dégradation de la composante de phase contaminée par l'évanouissement.

Dans le cas d'une réception d'une seule source, il suffit d'employer un annuleur de bruit à modulation de fréquence aléatoire dont la phase du signal de sortie est complètement indépendante de la phase du signal d'entrée provenant d'une antenne; dans le cas, correspondant à un système BLU ZR, d'une réception en double diversité utilisant une technique en combinaison à égalité de gain, la réception obtenue est dans une grande mesure à l'abri des évanouissements; toutefois, il est difficile d'obtenir l'espacement suffisant des antennes dans le dispositif de réception ou d'émission pour la bande à ondes décimétriques. Cela étant, la diversité en polarisation, plutôt qu'en espace, peut permettre de réduire les configurations d'antenne, ainsi que la taille des installations.

3 Essai en service réel de la BLU ZR

Il existe une grande différence entre les caractéristiques de propagation des bandes à ondes décimétriques et des bandes à ondes métriques. Il est prouvé que la BLU ZR, qui constitue une innovation remarquable par rapport à la BLU classique dans les bandes à ondes métriques, peut servir à surmonter les faiblesses, fondamentales et classiques, en communication à ondes décimétriques; pour ce faire, des essais en service réel, employant 4 fréquences à 3, 5, 8 et 11 MHz, sont effectués pour étudier si la BLU ZR se prête aux bandes à ondes décimétriques; ils s'attacheront en particulier à examiner si elle permet d'améliorer la qualité de transmission dans des environnements d'évanouissement et si elle se prête à la transmission de données dans les conditions techniques et réglementaires actuelles.

La qualité de transmission de la BLU ZR a fait l'objet d'examen approfondis dans le cadre de tests de laboratoire et d'essais en service réel utilisant des bandes à ondes métriques. Des expériences de laboratoire ont en outre été effectuées pour évaluer cette même qualité en utilisant des simulateurs de propagation mobiles qui peuvent simuler avec précision les environnements d'évanouissement caractéristiques des canaux radioélectriques mobiles et des environnements de bruit thermique. Ce système permet de tester les conditions d'émission et de réception de toute une gamme de signaux d'information (par exemple, tonalité, téléphonie, musique, modem à différents débits binaires, télécopie G3, image immobile, etc.).

En 1992, des essais en service réel de la BLU ZR ont été effectués dans la zone métropolitaine de Tokyo dans la bande 150 MHz; en 1995, des démonstrations ont en outre été effectuées sur le terrain à Washington DC et à Denver, Colorado, à l'aide de canaux dans la bande 220 MHz [Daikoku et Yamada, 1995], qui ont permis d'obtenir une excellente transmission d'images photographiques, dans des environnements d'évanouissement, au moyen d'un télécopieur G3 à 9,6 kbit/s.

La robustesse de la BLU ZR aux environnements de fort évanouissement en bande à ondes métriques, démontrée par des tests de laboratoire ainsi que par des essais en service réel, permet d'envisager une large gamme d'applications. La BLU ZR est la seule technique BLU capable d'émettre et de recevoir une image ainsi que de la musique de qualité élevée sans aucune dégradation due au mauvais calage d'une porteuse même dans des environnements de fort évanouissement.

4 Comparaison et conclusion

4.1 Système Lincompex contre BLU ZR

L'utilisation des ondes ionosphériques pour les communications grande distance présente un certain nombre d'inconvénients, par exemple: fort évanouissement, évanouissement de longue durée, distorsion de temps de propagation due à la multitude des trajets possibles, variation de l'altitude de la couche ionosphérique, déplacement entre l'émetteur et le récepteur, etc. Pour résoudre ces problèmes en bande à ondes décimétriques, le système Lincompex a été conçu, puis adopté comme norme UIT-R [(Recommandation UIT-R F.455-2 (1998) – Système de transmission amélioré pour circuits radiotéléphoniques sur ondes décimétriques)]. Le principe fondamental de la technique de traitement du signal utilisé dans ce système consiste à comprimer les variations de niveaux des signaux d'entrée à une amplitude constante aux fins d'émission; ces mêmes signaux sont, après réception, reconvertis à leurs niveaux originels sous l'effet d'un signal de commande émis séparément. Il est devenu maintenant possible de réaliser des systèmes Lincompex utilisant le dernier cri de la technique de traitement numérique du signal et de les intégrer dans des liaisons radioélectriques à ondes décimétriques.

Les systèmes Lincompex étant, par essence, destinés à améliorer la qualité de la transmission des signaux vocaux des services de radiotéléphonie mobile maritime en ondes hectométriques et décamétriques, il est naturel qu'ils ne soient pas en mesure de prendre en charge des signaux modem. Ces systèmes subissent encore les effets de dégradation causés par des facteurs tels que le mauvais calage de la porteuse, le décalage Doppler, le temps de propagation de groupe, etc. Par comparaison, la BLU ZR peut résoudre ces problèmes de dégradation, et ce quel que soit le degré souhaité, comme l'ont permis de le vérifier les tests de laboratoire et les essais en service réel qui ont été consacrés à l'examen de ses qualités de transmission dans les bandes à ondes métriques. Depuis son invention, la BLU ZR a permis un grand progrès de la technique BLU classique.

4.2 Avènement de la technique BLU ZR

La technique BLU ZR a réussi à résoudre les problèmes de fort évanouissement rencontrés dans les environnements mobiles et à obtenir une qualité de transmission supérieure. Comme sa largeur de bande disponible peut être étendue jusqu'à 3,4 kHz, comme celle des lignes téléphoniques classiques, la BLU ZR peut donc prendre en charge toute une gamme de signaux (téléphonie, musique, données, télécopie, ...) et permettre d'assurer des communications mobiles de qualité élevée avec une interface transparente avec le réseau téléphonique.

La BLU ZR, dans laquelle des signaux d'information émis sont extraits des passages à zéro du signal reçu, présente les deux grandes caractéristiques suivantes: premièrement, cette méthode de démodulation échappe, par essence, aux effets de dégradation dus au mauvais calage de la porteuse, ce qui constitue l'un des principaux inconvénients des systèmes BLU classiques; deuxièmement, la robustesse de la BLU ZR aux évanouissements peut être obtenue même pour un cas de réception d'une seule source par l'installation dans le récepteur d'un annuleur de bruit à modulation de fréquence aléatoire. Il convient d'ajouter qu'une double diversité dans l'espace avec une combinaison à égalité de gain permet d'améliorer de façon spectaculaire la qualité de transmission pour différents signaux d'information. Sans l'adoption de ces deux techniques novatrices dans la BLU ZR, il ne serait pas possible d'offrir une qualité de transmission supérieure pour une gamme aussi large de signaux d'information.

4.3 Utilisation efficace du spectre

4.3.1 Utilisation du spectre des fréquences radioélectriques

L'utilisation de la bande à ondes décamétriques, ressource mondiale, est soumise aux dispositions du Règlement des radiocommunications, élaboré par l'UIT. Jusqu'ici, des efforts considérables ont été déployés pour améliorer la qualité des liaisons à ondes décamétriques en recourant à des innovations logicielles ou matérielles.

L'emploi d'un amplificateur linéaire, avec une boucle de contre-réaction cartésienne, en communication à ondes décamétriques peut en effet déboucher sur de nouveaux gains d'efficacité dans l'utilisation qui est faite actuellement du spectre: un amplificateur de ce type permet de supprimer le rayonnement hors bande dans le canal adjacent et de réduire les rayonnements non essentiels à un niveau aussi bas que possible, ce qui permet d'obtenir un spectre de modulation compact; il est en conséquence inutile d'occuper de la largeur de bande pour des émissions à l'extérieur du canal et il devient ainsi possible d'attribuer une fréquence porteuse voisine d'autres fréquences.

4.3.2 Transmission de données

Etant donné que le système BLU classique, lorsqu'il était utilisé pour la transmission de données dans la bande à ondes décamétriques, n'était pas d'une robustesse suffisante pour un débit élevé, des études approfondies ont été effectuées en vue d'améliorer la qualité de fonctionnement des modems

utilisés dans des environnements d'évanouissement: au fil des ans, on a mis au point, pour satisfaire aux conditions de transmission des données dans la bande à ondes décimétriques, divers signaux modems, comme par exemple dans les modems FSK, à tonalité en parallèle, à tonalité unique, etc., équipements qui se prêtent à une utilisation avec la BLU ZR. Lorsque l'on applique en conséquence cette dernière à la transmission de données dans la bande à ondes décimétriques, on obtient la même robustesse qu'avec la mise en oeuvre des deux techniques novatrices mentionnées précédemment, robustesse qui permet à son tour d'obtenir un accroissement du débit propre à une transmission de données dans la bande à ondes décimétriques.

Références Bibliographiques

- JOHNSON, E. E. et autres [1997] *Advanced high-frequency radio communications*. Artech House, Boston, Etats-Unis d'Amérique.
- MASLIN, N. [1987] *HF communications: A system approach*. Plenum Press New-York, Etats-Unis d'Amérique.
- DAIKOKU, K. et SUWA, K. [novembre 1988] RZ SSB transceiver with equal-gain combiner for speech and data transmission. *IEEE Globecom '88*, p. 26, § 4.1-§ 4.5.
- SABIN, W. E. et SCHOENIKE, E. O. [1987] *Single-sideband systems and circuits*. McGraw-Hill Book Company, New-York, Etats-Unis d'Amérique.
- NAGATA, Y. [mai 1989] Linear amplification technique for digital mobile communications. *Proc. 39th IEEE Veh. Tech. Conf.*, p. 159-164.
- HAHN, S. L. [1996] *Hilbert transforms in signal processing*. Artech House, Boston, Etats-Unis d'Amérique.
- LOGAN, B. F. [avril 1977] Information in the zero crossings of bandpass signals. *Bell Syst. Tech. J.*, Vol. 56, 4, p. 487-510.
- DAIKOKU, K. et YAMADA, K. [août 1995] RZ SSB Very narrow-band technology for the information age, *Radio Resources Magazine*, p. 42-46.
-