

9E4: Radiotélégraphie en ondes décamétriques

RECOMMANDATION UIT-R F.436-4

**DISPOSITION DES VOIES DE TÉLÉGRAPHIE HARMONIQUE À MODULATION
PAR DÉPLACEMENT DE FRÉQUENCE SUR LES CIRCUITS
RADIOÉLECTRIQUES À ONDES DÉCAMÉTRIQUES**

(Question UIT-R 145/9)

(1966-1970-1978-1994-1995)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) qu'un manque de normalisation dans la disposition des voies des systèmes de télégraphie harmonique multivoie peut susciter des difficultés lors de l'établissement de ces systèmes sur des circuits radioélectriques à ondes décamétriques;
- b) qu'il importe d'utiliser au mieux les fréquences radioélectriques, en vue de l'économie du spectre et de l'efficacité des circuits;
- c) que les systèmes à modulation par déplacement de fréquence sont utilisés sur de nombreuses liaisons;
- d) que la méthode de transmission par mutation de fréquence est utilisée sur des liaisons de grande longueur sujettes à des distorsions accentuées dues à la propagation par trajets multiples,

recommande

- 1** que l'on utilise, de préférence, la disposition des voies indiquée dans le Tableau 1 pour les systèmes arithmiques travaillant avec une rapidité de modulation de 50 Bd;
- 2** que l'on utilise, de préférence, la disposition des voies indiquée dans le Tableau 2 pour les systèmes synchrones travaillant avec une rapidité approximative de modulation de 100 Bd (96 Bd avec correction automatique d'erreurs);
- 3** que l'on utilise, de préférence, la disposition des voies indiquée dans le Tableau 3 pour les systèmes synchrones travaillant avec une rapidité approximative de modulation de 200 Bd (192 Bd avec correction automatique d'erreurs);
- 4** que, pour les systèmes à mutation de fréquence, les fréquences centrales des Tableaux 1, 2 et 3 soient associées par paires de la manière convenant le mieux aux conditions de propagation de la liaison. (Une disposition type consisterait à prendre des voies adjacentes, ce qui donnerait un espacement de 240 ou 340 ou 480 Hz entre les fréquences.);
- 5** que l'on doive se référer à l'Annexe 1 pour des informations additionnelles concernant les techniques de diversité.

NOTE 1 – Des travaux théoriques faits au Japon indiquent que, pour une rapidité de modulation de B (Bd), le déplacement de fréquence optimal est égal à $0,8 B$ (Hz). Ceci donnerait une largeur de bande minimale requise égale à B (Hz) aux points -3 dB. Des travaux de laboratoire et des mesures sur le circuit synchrone ARQ Francfort-Osaka confirment ces conclusions. Pour des circuits qui ne fonctionnent pas au voisinage de la MUF ainsi que pour des circuits asynchrones, certains résultats théoriques indiquent que la valeur optimale du déplacement de fréquence se situe entre B et $2B$.

TABLEAU 1

Fréquences centrales des voies de télégraphie harmonique, à modulation par déplacement de fréquence, avec un espacement de 120 Hz entre les voies et un indice de modulation d'environ 1,4 (Déplacement de fréquence: ± 35 Hz ou ± 30 Hz)

Position de la voie	Fréquence centrale (Hz)	Position de la voie	Fréquence centrale (Hz)
1	420	11	1 620
2	540	12	1 740
3	660	13	1 860
4	780	14	1 980
5	900	15	2 100
6	1 020	16	2 220
7	1 140	17	2 340
8	1 260	18	2 460
9	1 380	19	2 580
10	1 500	20	2 700

NOTE 1 – Voir la Recommandation UIT-T R.39.

TABLEAU 2

Fréquences centrales des voies de télégraphie harmonique, à modulation par déplacement de fréquence, avec un espacement de 170 Hz entre les voies et un indice de modulation d'environ 0,8 (Déplacement de fréquence: $\pm 42,5$ Hz ou ± 40 Hz)

Position de la voie	Fréquence centrale (Hz)	Position de la voie	Fréquence centrale (Hz)
1	425	8	1 615
2	595	9	1 785
3	765	10	1 955
4	935	11	2 125
5	1 105	12	2 295
6	1 275	13	2 465
7	1 445	14	2 635
		15	2 805

NOTE 1 – Voir la Recommandation UIT-T R.39.

NOTE 2 – Des travaux théoriques faits au Japon indiquent que, pour une rapidité de modulation de B (Bd), le déplacement de fréquence optimal est égal à $0,8 B$ (Hz). Ceci donnerait une largeur de bande minimale requise égale à B (Hz) aux points -3 dB. Des travaux de laboratoire et des mesures sur le circuit synchrone ARQ Francfort-Osaka confirment ces conclusions. Pour des circuits qui ne fonctionnent pas au voisinage de la MUF ainsi que pour des circuits asynchrones, certains résultats théoriques indiquent que la valeur optimale du déplacement de fréquence se situe entre B et $2B$.

TABLEAU 3

**Fréquences centrales des voies de télégraphie harmonique, à modulation par déplacement de fréquence,
avec un espacement de 480 Hz entre les voies et un indice de modulation d'environ 0,8
(Déplacement de fréquence: ± 80 Hz)**

Position de la voie	Fréquence centrale (Hz)	Position de la voie	Fréquence centrale (Hz)
1	600	4	2 040
2	1 080	5	2 520
3	1 560	6	3 000

NOTE 1 – Voir la Recommandation UIT-T R.38A.

ANNEXE 1

Utilisation de la diversité de codage

1 Introduction

Il est nécessaire que les systèmes de transmission de données à ondes décamétriques fournissent un service fiable et efficace avec des modems multivoies MDF, tels que décrits dans la présente Recommandation, ou des modems multivoies MDP, tels que décrits dans la Recommandation UIT-R F.763. Pour compenser le phénomène d'évanouissement sélectif du support de transmission, qui est par nature défavorable, on utilise de manière généralisée la diversité de fréquence dans la bande ou sur d'autres fréquences.

La présente Annexe décrit une technique de codage qui permet d'améliorer le système avec diversité de fréquence dans la bande.

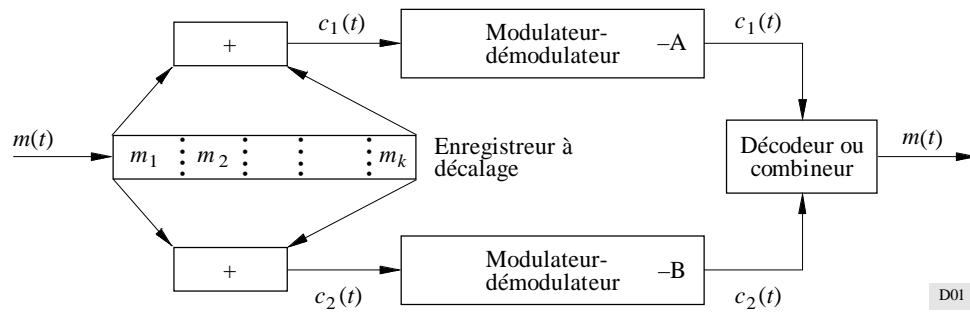
2 Description du système

Le schéma de transmission est indiqué sur la Fig. 1. Les données $m(t)$ provenant d'une source d'information binaire sont appliquées dans l'enregistreur à décalage de longueur K du codeur. Après chaque décalage du registre au débit de données de la source, le codeur produit deux bits de codage, $c_1(t)$ et $c_2(t)$, qui sont appliqués à leur tour aux modulateurs de données correspondants. Dans la pratique, la séparation de la fréquence centrale de ces modulateurs de données est habituellement de 1 kHz. Les données combinées provenant des modulateurs sont alors appliquées à un système de transmission BLU à ondes décamétriques.

Pour le fonctionnement avec diversité de fréquence, le système de la Fig. 1 est représenté sous sa forme la plus simple. Les bits de codage sont simplement des reproductions du bit d'information, c'est-à-dire $c_1(t) = c_2(t) = m(t)$. La décision quant à la valeur d'un bit d'information donné dépend de la valeur combinée des données provenant des deux modulateurs. Dans un contexte de théorie de l'information, on peut décrire la diversité de fréquence comme étant une technique de codage à répétition et à demi-débit qui utilise des décisions douces.

Dans la transmission avec diversité de fréquence, deux bits de codage seulement contiennent des informations sur un bit d'information quelconque. Avec une probabilité non nulle, ces deux bits peuvent être simultanément corrompus par un évanouissement, des brouillages ou du bruit, de sorte qu'une décision incorrecte est prise concernant le bit d'information. En pareil cas, il n'est pas possible de corriger l'erreur en utilisant les valeurs des autres bits de codage. Il semble donc souhaitable de coder la séquence d'information de façon que plus d'un couple de bits de codage ait un rapport avec un bit d'information quelconque. C'est ce qui permet le système de la Fig. 1 qui adapte la séquence d'information avant la transmission.

FIGURE 1
Structure générale d'une technique avec diversité



DOI

On pourrait utiliser n'importe quel code de correction des erreurs à demi-débit dans la transmission avec diversité de fréquence codée, mais les codes de convolution sont particulièrement appropriés car leur structure de codage s'adapte à celle des systèmes de transmission avec diversité de fréquence et l'on peut utiliser l'algorithme Viterbi pour réaliser efficacement un codage à décision douce. Les données provenant des démodulateurs sont appliquées à des convertisseurs analogique/numérique dans un décodeur Viterbi qui remplace le fonctionnement combiné du système avec diversité de fréquence.

3 Résultats expérimentaux

On a comparé la diversité de fréquence et la diversité de codage d'après les résultats obtenus pendant une émission. On a choisi des codes de convolution de longueur imposée $K = 5$ et 7 et les données provenant du codeur étaient appliquées à un modulateur multivoies MDF utilisant les fréquences centrales de $1\ 105$ et $2\ 125$ Hz avec une excursion de $\pm 42,5$ Hz. Le débit de données de chaque voie synchrone était de 75 bit/s. Le signal en l'œil à partir de chaque démodulateur a été numérisé à l'aide d'un échantillon provenant du centre de la période de l'œil. Les équipements radioélectriques à ondes décimétriques comprenaient un émetteur de 100 W, des antennes à large bande et un récepteur de communication synthétisé. On a utilisé une combinaison de taux maximum pour les expériences de réception avec diversité et un décodeur Viterbi en temps réel, mis en œuvre sur un microprocesseur universel à 8 bits avec logiciel approprié pour les expériences de codage.

Trois séries d'essais d'émission ont été effectuées à partir d'Ottawa, sur une courte distance de 60 km avec une onde de sol faible, sur une distance moyenne à 400 km de Toronto et à bord d'un navire se trouvant au large de la côte est du Canada. Le navire se déplaçait de la ville de Québec vers le Grand Nord, ce qui a permis d'effectuer des essais sur des distances comprises entre 400 et $2\ 500$ km. Vers la fin de la période d'essai, la liaison à ondes décimétriques a traversé la ceinture aurorale et un évanouissement rapide était souvent présent. On a effectué les expériences à courte et moyenne distances avec diverses fréquences de la gamme $3-9$ MHz et les expériences à bord du navire dans les bandes de fréquences $5-15$ MHz.

On a analysé les schémas d'erreur dans le cas de la diversité de fréquence et dans celui de la diversité de codage. On a observé que les deux jeux de données présentaient les caractéristiques d'erreurs par paquets d'une voie à ondes décimétriques; toutefois, dans le cas de la diversité, la transition entre les paquets et les périodes de taux d'erreur plus faible était progressive. Les erreurs étaient aléatoires la plupart du temps, mais des erreurs isolées étaient fréquentes. Les données obtenues avec la diversité de codage présentaient des paquets denses ayant un début et une fin abruptes, des intervalles plus longs sans erreur et aucune erreur simple ou double. Les paquets étaient en général plus longs que ceux du système de diversité. Après un long paquet, le décodeur a besoin d'un certain délai pour se rétablir, ce qui explique que le taux d'erreur binaire dans la séquence décodée peut être en fait plus élevé que celui que l'on obtient dans le système avec diversité de fréquence dans la bande. Tel n'est pas le cas en ce qui concerne le taux d'erreur sur les blocs.

Il est prévu de se servir de ce système dans un environnement à protocole ARQ (demande de répétition automatique) qui exclut l'utilisation d'un système avec diversité dans le temps ou avec entrelacement. On a démontré que ces systèmes permettent d'améliorer le taux d'erreur binaire mais qu'ils nécessitent des délais correspondant à la transmission de l'ordre de plusieurs centaines de bits. Dans les transmissions par bloc, les blocs sont refusés en raison des erreurs simples ou multiples, ce qui est le cas de la diversité de fréquence alors que dans la diversité de codage, le refus des blocs est moindre en raison du moindre nombre d'erreurs isolées. Les essais ont été effectués avec des blocs de 128 et 512 bits, ce qui est habituel pour un système destiné à la diversité de codage.

Le Tableau 4 compare le taux d'erreur sur les blocs obtenu avec les deux techniques. Il indique l'augmentation en pourcentage de la probabilité de réception d'un bloc sans erreur avec la technique de codage par rapport à la technique avec diversité de fréquence. L'amélioration obtenue varie de satisfaisant à insignifiant et on observe une plus grande amélioration pour un bloc de 512 bits. Dans certains cas, la transmission avec diversité de fréquence dans la bande est quasiment exempte d'erreur et il y a donc peu de marge pour une amélioration; dans d'autres cas, la voie était si médiocre qu'aucun des systèmes n'a assuré un taux d'erreur utilisable. Il n'y a pas eu de cas où la qualité du codage avec convolution était nettement moins bonne que celle du système avec diversité de fréquence dans la bande.

TABLEAU 4

Résultats expérimentaux relatifs au taux d'erreur sur les blocs (BLER)

a) Longueur des blocs = 128 bits

Numéro de l'essai	Longueur imposée	Technique avec diversité BLER	Technique avec codage BLER	Nombre total de bits	Amélioration (%)
1	$K = 7$	0,293	0,201	1 430 000	13,0
2	$K = 7$	0,217	0,127	506 000	11,5
3	$K = 5$	0,321	0,227	352 000	13,8
4	$K = 7$	0,084	0,015	217 000	7,5
5	$K = 7$	0,083	0,019	217 000	6,5

b) Longueur des blocs = 512 bits

Numéro de l'essai	Longueur imposée	Technique avec diversité BLER	Technique avec codage BLER	Nombre total de bits	Amélioration (%)
6	$K = 7$	0,548	0,406	1 430 000	31,4
7	$K = 7$	0,378	0,223	506 000	24,9
8	$K = 5$	0,570	0,420	352 000	34,9

4 Caractéristiques de la mise en œuvre

La technique de codage décrite dans cette Annexe comporte un certain nombre de limitations pratiques et elle ne remplacera pas un combineur universel avec diversité de fréquence dans toutes les applications. Par exemple, elle est incompatible avec les systèmes de transmission de données asynchrone.

Néanmoins, elle serait éventuellement utile avec des systèmes ARQ utilisant la transmission synchrone sous réserve que la transmission ne soit pas courte au point que l'amélioration du rendement soit annulée par l'augmentation des bits auxiliaires nécessaires pour un fonctionnement satisfaisant du décodeur Viterbi. Le «préambule» occupe 4 fois les K bits (où K est la longueur imposée) nécessaires au début de la transmission, plus un «postamble» de $K - 1$ bit à la fin de la transmission.

5 Conclusions

Un système de contrôle des erreurs fondé sur la diversité de fréquence codée avec convolution a été mis à l'essai et comparé avec une transmission de données avec diversité de fréquence dans la bande. Les résultats expérimentaux montrent que ce système offre de meilleurs résultats que les systèmes avec diversité de fréquence dans la bande en ce qui concerne le taux d'erreur sur les blocs. La technique de codage convient aux systèmes qui utilisent actuellement la diversité de fréquence associée à un protocole ARQ synchrone.