

RECOMMANDATION UIT-R TF.1011-1

**TRANSFERT DE SIGNAUX HORAIRES ET DE FRÉQUENCES ÉTALON:
SYSTÈMES, TECHNIQUES ET SERVICES**

(Question UIT-R 102/7)

(1994-1997)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que l'on a sans cesse besoin, partout dans le monde, de fréquences étalon et de signaux de référence de temps facilement utilisables;
- b) que différents niveaux de précision et d'exactitude, allant de la seconde à la nanoseconde environ, sont nécessaires pour les applications très diverses liées au temps et aux fréquences;
- c) que, dans de nombreuses applications liées au temps et aux fréquences, le choix d'un système ou d'une technique optimal(e) de diffusion de signaux horaires et des fréquences étalon doit également tenir compte d'autres facteurs comme la disponibilité, la fiabilité, les possibilités de fonctionnement automatique, la commodité d'utilisation et le coût;
- d) qu'on a utilisé dans le monde entier avec succès de nombreux systèmes, techniques et services différents pour satisfaire les besoins très divers liés au temps et aux fréquences;
- e) que les systèmes, techniques et services spécialement conçus pour satisfaire les besoins liés au temps et aux fréquences tout comme ceux qui sont conçus en premier lieu pour d'autres fonctions comme la navigation ou les télécommunications, présentent un grand intérêt pour les applications liées au temps et aux fréquences,

recommande

- 1** que, lors du choix d'une source appropriée de signaux de temps et de fréquence de référence ou d'une technique optimale de transfert de signaux horaires et de fréquences étalon, on examine tout d'abord avec soin chaque application, compte tenu des éléments suivants: importance relative de l'exactitude et/ou de la précision, couverture géographique, disponibilité (par exemple, fraction de temps pendant lequel le signal est disponible au niveau de performance indiqué), commodité d'utilisation et coût pour l'utilisateur;
- 2** que, à partir d'une analyse des besoins spécifiques et de leur importance relative, on choisisse éventuellement les systèmes, techniques ou services appropriés dans la liste de ceux figurant dans l'Annexe 1* et de définir leurs principales caractéristiques.

* On peut trouver des informations supplémentaires dans le Manuel de l'UIT-R sur la sélection et l'utilisation des systèmes de fréquence et de temps de précision.

ANNEXE 1

TABLEAU 1

Détails des diverses techniques de diffusion et de comparaison des signaux horaires et des fréquences étalon

Type	Précision de temps type, par rapport au temps universel coordonné (UTC)	Transfert de fréquences: type	Couverture	Disponibilité	Commodité d'utilisation	Coût approximatif relatif pour l'utilisateur (en \$E.U, 1992)	Exemple de système	Observations (1992)
Emission en ondes décimétriques	1 à 10 ms	10^{-6} à 10^{-8} (sur une journée)	Mondiale	En permanence, mais dépend de l'exploitant et de l'emplacement	Dépend des contraintes de précision	50-5 000	De nombreux services dans le monde entier	La précision dépend de la longueur du trajet, de l'heure de la journée, de l'étalonnage du récepteur, etc.
Emission en ondes kilométriques	1 ms	10^{-10} à 10^{-11}	Régionale	En permanence	Automatique	3 000-5 000	Voir la Recommandation UIT-R TF.768	Dépend de la distance depuis la source et de la propagation diurne (hauteur de l'ionosphère)
Navigation en ondes kilométriques (par impulsions)	1 μ s	10^{-12}	Régionale	En permanence	Automatique	12 000	LORAN-C	Couverture de l'hémisphère nord. La stabilité et la précision sont basées sur la réception de l'onde de sol
Emission télévisuelle liaisons de Terre	10 ns en mode «visibilité commune»	10^{-12} à 10^{-14} (sur une journée)	Locale	Dépend de l'horaire de radio-diffusion local	Automatique	5 000		Etalonnage nécessaire pour effectuer des mesures de temps
Satellite de navigation, émission	50 à 500 ns	10^{-10} à 10^{-12}	Mondiale	En permanence	Automatique	3 000-15 000	Système mondial de positionnement (GPS) et GLONASS	Une pondération sur une journée est nécessaire pour assurer le transfert de fréquences spécifié. Meilleur système de diffusion actuellement disponible; des récepteurs sont disponibles sur le marché
Satellite de navigation, «vue commune»	5 à 20 ns	10^{-13} à 10^{-15} 1 à 50 jours	Intercontinentale	En permanence	Acquisition de données automatique. Nécessite un post-traitement	10 000-20 000 par emplacement	GPS et GLONASS	Méthode de synchronisation temporelle largement utilisée, la plus précise disponible aujourd'hui (1992); il existe des récepteurs sur le marché pour des lignes de base inférieures à 8 000 km
Satellite de météorologie, émission	100 μ s	Pas recommandé pour le transfert de fréquence	Régionale (empreinte du satellite)	En permanence	Automatique	4 000-5 000	Satellite géostationnaire opérationnel d'étude de l'environnement (GOES)	Peut ne pas être disponible pendant une éclipse du satellite

TABLEAU 1 (suite)

Type	Précision de temps type, par rapport au temps universel coordonné (UTC)	Transfert de fréquences: type	Couverture	Disponibilité	Commodité d'utilisation	Coût approximatif relatif pour l'utilisateur (en \$E.U, 1992)	Exemple de système	Observations (1992)
Autres satellites géostationnaires de diffusion	20 μ s	5×10^{-10}	Régionale (empreinte du satellite)	En permanence	Automatique	4 000	INSAT	Peut ne pas être disponible pendant une éclipse du satellite
Satellite de télécommunication, dans les deux sens	1 à 10 ns	10^{-14} à 10^{-15}	Régionale (empreinte du satellite)	En permanence (comme prévu)	L'acquisition de données peut être automatique (selon le satellite). Un post-traitement est nécessaire	50 000 par emplacement	Un réseau nord américain et un réseau européen existent	Méthode d'exploitation la plus précise à ce jour
Code horaire diffusé sur le réseau téléphonique dans les deux sens	1 à 10 ms	10^{-8} (sur une journée)	Portée d'appel téléphonique	En permanence	Automatique	100	Europe et Amérique du nord	La ligne téléphonique doit avoir le même trajet dans les deux sens. On suppose qu'il existe un ordinateur et un logiciel disponibles
Fibre optique	10 à 50 ps	10^{-16} à 10^{-17}	Locale, moins de 50 km	En permanence	Automatique	Emetteur et récepteur, 30 000 par poste plus coût des câbles et des installations souterraines	Spécialisé dans le domaine de transfert des fréquences	La température du câble doit être stabilisée (câble enterré à 1,5 m de profondeur)
	100 ns	10^{-13} à 10^{-14} (sur une journée)	Longue distance 2 000 km	En permanence	Automatique	Sans objet. L'équipement fait partie d'un système de télécommunication spécifique	Hiérarchie numérique synchrone (HNS)	Partie d'un système de télécommunication numérique
Faisceau hertzien	1 à 10 ns	10^{-14} à 10^{-15}	Locale	En permanence	Automatique	50 000-75 000		Sensible aux conditions atmosphériques et aux effets de la propagation par trajets multiples. Exploitation dans les deux sens pour obtenir la précision et la stabilité requises
Câble coaxial	1 à 10 ns	10^{-14} à 10^{-15}	Locale	En permanence	Automatique	5-30 par mètre		Sensible à la température, au taux d'ondes stationnaires (TOS), à l'humidité et à la pression barométrique

Notes particulières concernant les diverses méthodes de diffusion/de comparaison

Il convient d'appeler l'attention sur le fait que l'étalonnage de l'équipement de l'utilisateur est souvent nécessaire pour obtenir les précisions voulues.

Emissions en ondes décamétriques

Bon nombre de services de diffusion en ondes décamétriques utilisent les fréquences attribuées à cette fin au niveau international dans les bandes des 2,5, 5, 10, 15, 20 et 25 MHz. On utilise parfois des fréquences dans d'autres bandes pour réduire les brouillages mutuels. La précision obtenue est moyenne mais ces services offrent plusieurs avantages: large couverture géographique, commodité d'utilisation (pour un niveau d'une précision de 1 s), modicité du prix d'équipement de l'utilisateur. La Recommandation UIT-R TF.768 donne des précisions sur les formats, les horaires de radiodiffusion de la plupart des services de diffusion des signaux horaires et des fréquences étalon en ondes décamétriques.

Emissions en ondes kilométriques

Les émissions de ce type, utiles pour les applications liées au temps et aux fréquences sont assurées notamment par:

- divers services spécialisés de diffusion des signaux horaires et des fréquences étalon fonctionnant dans la bande 40-80 kHz; et
- des systèmes de radionavigation, comme les stations Loran-C à 100 kHz qui émettent des signaux très stables et synchronisés. Les services spécialisés de diffusion des signaux horaires et des fréquences étalon utilisent souvent des modulations de phase et/ou d'amplitude qui fournissent des informations d'heure et de date complètes sous forme codée. Les stations Loran-C sont très nombreuses et situées principalement dans l'hémisphère nord. Parmi les principaux avantages, on citera une bonne précision tant pour le temps que pour la fréquence, l'existence de récepteurs relativement peu onéreux et la commodité d'utilisation. L'apparition de glissements de cycle erratiques, qui nuisent à la précision, est un inconvénient. La Recommandation UIT-R TF.768 donne des précisions sur les formats, les horaires de radiodiffusion et d'autres caractéristiques de nombreuses transmissions en ondes kilométriques.

Emissions en ondes myriamétriques

Les émissions en ondes myriamétriques dans la gamme de fréquences 10-30 kHz sont utiles avant tout pour les applications liées aux fréquences. Etant donné qu'elles présentent des caractéristiques de propagation stables et assurent une couverture à longue distance, elles permettent d'effectuer des comparaisons de fréquences avec une précision supérieure ou égale à 1×10^{-11} . Les signaux émis en ondes myriamétriques ne contiennent pas, en règle générale, d'informations horaires complètes. La Recommandation UIT-R TF.768 donne des précisions sur les formats, les horaires de radiodiffusion et d'autres caractéristiques de certaines transmissions utiles en ondes myriamétriques.

Emissions de télévision

Un certain nombre de méthodes faisant appel à des émissions de télévision pour la diffusion et la comparaison de signaux horaires et de fréquences étalon ont été testées et certaines sont actuellement utilisées. Parmi celles-ci on peut citer l'insertion d'informations de temps et de fréquence codées dans le signal de télévision, le verrouillage de fréquences porteuses de télévision sur un étalon et la stabilisation des impulsions de synchronisation et enfin la réception en mode «visibilité commune» d'une émission de télévision en zone locale. La méthode la plus couramment utilisée aujourd'hui fait appel à la méthode «visibilité commune» qui permet de comparer deux systèmes de mesure du temps dans la zone de couverture d'une station locale avec une précision de l'ordre de 10 ns.

Satellite de navigation (radiodiffusion)

Cette technique utilise la réception directe d'informations de temps à partir de systèmes de navigation par satellite comme le système mondial de radiorepérage (GPS) et le système GLONASS. Les informations sont contenues dans les signaux émis par le satellite ce qui permet à l'utilisateur de compenser approximativement les temps de propagation et de corriger les différences entre l'horloge locale du satellite et le temps universel coordonné. On peut obtenir des précisions supérieures à 500 ns pour les comparaisons de temps et à 1×10^{-12} pour les comparaisons de fréquences même en cas de dégradation intentionnelle des signaux liée à la disponibilité sélective. Cette technique offre plusieurs avantages notamment la disponibilité de récepteurs, dans le monde entier, la couverture mondiale assurée par plusieurs satellites (21 à 24 par système), le fonctionnement automatique, la haute précision et l'utilisation d'étalons atomiques intégrés au satellite.

Satellite de navigation (mode «visibilité commune»)

Avec cette technique, le même satellite GPS ou GLONASS est observé depuis deux sites de mesure de temps différents au même instant. Le calcul de la différence entre les mesures effectuées sur les deux sites permet d'éliminer les erreurs propres à l'horloge du satellite et compenser du moins partiellement, les erreurs liées aux éphémérides. Une dégradation intentionnelle des signaux émis par le satellite peut ou non fausser les comparaisons de temps effectuées en mode «visibilité commune» selon la façon dont elle est mise en œuvre. Il est habituellement possible d'obtenir des incertitudes de comparaisons de temps supérieures à 20 ns pour des sites très éloignés les uns des autres. Cette méthode offre une plus grande précision que la méthode directe mais nécessite une coordination particulière entre les sites sur lesquels portent les comparaisons. Le Bureau international des poids et mesures (BIPM) publie des calendriers qui permettent d'assurer la coordination requise. Pour obtenir une incertitude de 1×10^{-15} , il faut des temps d'intégration allant jusqu'à 50 jours.

Satellite de météorologie

Deux satellites géostationnaires du système à satellite géostationnaire opérationnel d'étude de l'environnement (GOES) ont été utilisés depuis 1974 pour diffuser un code horaire UTC vers la région de l'Amérique du Nord et de l'Amérique du Sud et les zones océaniques environnantes. Des informations de temps et de date complètes sont transmises en permanence ainsi que des informations sur la position du satellite, ce qui permet au récepteur de l'utilisateur d'effectuer automatiquement la compensation du temps de propagation. On peut, en principe, obtenir des incertitudes inférieures à 100 μ s. La couverture géographique assurée par les satellites GOES risque d'être quelque peu limitée au-delà de l'Amérique du Nord et de l'Amérique du Sud avant la mise en place de nouveaux satellites, prévue pour 1994-1995.

Autres satellites géostationnaires de diffusion

On a également utilisé d'autres systèmes à satellites pour émettre des signaux horaires en mode unidirectionnel. A l'heure actuelle, les satellites INSAT à fonctions multiples émettent un code horaire à destination d'une zone qui couvre le sous-continent indien et les régions voisines. Les informations relatives à la position du satellite sont contenues dans le format, ce qui permet aux utilisateurs disposant de récepteurs automatiques de compenser le temps de propagation avec une précision de l'ordre de 20 μ s.

Satellites de télécommunications (mode bidirectionnel)

L'échange bidirectionnel de signaux horaires via des satellites de télécommunication est actuellement la technique la plus précise permettant d'effectuer des comparaisons entre sites de mesure du temps éloignés les uns des autres. On a acquis aujourd'hui une grande expérience de cette technique dans le monde entier et des centres de mesure du temps toujours plus nombreux utilisent ou envisagent d'utiliser cette technique pour diffuser des signaux horaires internationaux avec une précision de l'ordre de la nanoseconde. Parmi les avantages, on peut citer la très grande précision, l'existence de nombreux satellites de télécommunication adaptés partout dans le monde. Il y a aussi des inconvénients, par exemple la nécessité pour les utilisateurs d'émettre et de recevoir des signaux horaires et le coût relativement élevé de l'équipement. A des niveaux de précision très élevés, l'étalonnage précis des temps de propagation de l'équipement de la station au sol, s'il est difficile, n'en est pas moins impératif. Des modems spécialement conçus pour la diffusion de signaux horaires de grande précision et de grande stabilité, sont en cours de mise au point pour des applications liées au temps. Il faut des temps d'intégration de dix jours pour obtenir une précision de 1×10^{-15} .

Code horaire diffusé sur le réseau téléphonique

Plusieurs centres de diffusion de signaux horaires en Amérique du Nord et en Europe ont mis en place des services conçus pour diffuser des informations de temps codées sur des lignes téléphoniques en mode automatique. En règle générale, des ordinateurs et d'autres systèmes automatisés sont programmés pour se connecter automatiquement à ces services selon les besoins, recevoir un code horaire ASCII, régler de nouveau l'horloge locale et corriger automatiquement le temps de propagation lié au système téléphonique. La compensation du temps de propagation peut être effectuée soit par l'équipement du centre de diffusion du temps soit chez l'utilisateur. Dans de nombreux cas, il est possible d'obtenir des précisions allant de 1 à 10 ms. Parmi les avantages on peut citer la simplicité, le coût modique pour l'utilisateur et le fait que cette technique se prête à l'utilisation de systèmes automatisés. Le principal inconvénient est la précision limitée.

Fibres optiques (à courte distance)

On utilise actuellement deux types de fibres (les fibres monomodes et les fibres multimodes). Les fibres multimodes servent généralement à transmettre des données numériques et des signaux à bande étroite sur des distances relativement courtes (par exemple, 1 km). Les fibres monomodes conviennent bien pour des distances plus longues (par exemple, 50 km) et offrent de grandes largeurs de bande (par exemple, 5 MHz à 100 GHz). Il faut une fibre monomode et un laser de 1 300 nm pour atteindre les performances indiquées dans le tableau. Le coefficient nominal de temps de propagation en fonction de la température est de $7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Pour atteindre les performances indiquées, la température du câble doit être stabilisée: en d'autres termes, le câble doit être enterré à une profondeur de 1,5 m sur une longueur suffisante (par exemple 50 m ou plus). L'affaiblissement d'insertion est de l'ordre de 0,5 dB/km.

Fibres optiques (à longue distance)

On a pu atteindre les précisions indiquées dans le Tableau 1 avec des fibres optiques et un système de télécommunication numérique, sur une distance de 2 400 km. En minimisant soigneusement l'asymétrie de longueur du câble sur le trajet aller et retour, on arrive à une précision de temps inférieure à la microseconde et à une stabilité temporelle d'environ 1 ns. On a constaté que la durée totale, dans un système particulier conforme aux dispositions des Recommandations UIT-T G.707, UIT-T G.708 et UIT-T G.709, ne dépassait pas 5 ns.

Faisceaux hertziens

Les faisceaux hertziens sont en général limités aux faisceaux hertziens en visibilité directe sauf si l'on utilise des répéteurs ou des réflecteurs plans. En général, un canal spécialisé est préférable à un multiplexage temporel pour une exploitation à court terme et continue. Pour satisfaire les exigences indiquées dans le Tableau 1, un fonctionnement dans les deux sens est nécessaire pour annuler les fluctuations de phase. En d'autres termes, il faut donc un système à contre réaction et un canal fonctionnant en permanence. Les faisceaux hertziens sont sensibles aux conditions atmosphériques (pluie, neige, vibration de l'antenne, etc.) et aux effets de la propagation par trajets multiples.

Câbles coaxiaux

Pour atteindre les performances requises, il faut tenir compte de différents facteurs comme la stabilité de la température, la longueur et le type de câble coaxial. L'affaiblissement d'insertion dépend de la longueur et du type de câble ainsi que de la fréquence. Des câbles à diélectrique solide ont un coefficient de temps de propagation de 250×10^{-6} (voire supérieur à 25°C); lorsque le diélectrique est de l'air, le coefficient est de 15×10^{-6} mais le câble doit être pressurisé à l'azote sec avec un régulateur de pression à deux étages dans un environnement thermostaté. La température du câble doit être stabilisée. Pour cela il faut enterrer le câble à 1,5 m de profondeur ou dans un environnement où les variations thermiques ne dépassent pas 1°C . L'utilisation de câbles coaxiaux ne devrait être envisagée que pour des longueurs raisonnablement courtes, inférieures à quelques centaines de mètres.
