

RECOMENDACIÓN UIT-R TF.1011-1

**SISTEMAS, TÉCNICAS Y SERVICIOS PARA LA TRANSFERENCIA
DE TIEMPO Y FRECUENCIA**

(Cuestión UIT-R 102/7)

(1994-1997)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) la constante necesidad de disponer fácil y rápidamente en todas las partes del mundo de señales normalizadas de referencia de frecuencia y tiempo;
- b) que se necesitan diferentes niveles de precisión y exactitud, que varían desde 1 s hasta aproximadamente 1 ns, para el gran número de diversas aplicaciones de tiempo y frecuencia;
- c) que en muchas aplicaciones de tiempo y frecuencia, la selección de un sistema o técnica de transferencia de tiempo y frecuencia debe también tener en cuenta otros factores, tales como disponibilidad, fiabilidad, capacidades de operación automática, comodidad de uso y coste;
- d) que, en el mundo entero, se han utilizado con éxito muchos sistemas, técnicas y servicios diferentes para satisfacer una gran variedad de usos relativos al tiempo y frecuencia;
- e) que sistemas en uso, técnicas y servicios incluyen los destinados a cubrir necesidades de tiempo y frecuencia y otros diseñados primordialmente para otras funciones, tales como navegación o comunicaciones,

recomienda

- 1** que al seleccionar una fuente adecuada de señales de referencia de tiempo y frecuencia o una técnica óptima para la transferencia de los mismos, se analice primero cuidadosamente cada aplicación en cuanto a la importancia relativa de: la exactitud y/o precisión, cobertura geográfica, disponibilidad (por ejemplo, proporción de tiempo en que la señal está disponible al nivel de calidad de funcionamiento indicado), facilidad de uso y costes de usuario;
- 2** que, de dicho análisis basado en los requerimientos específicos y su importancia relativa, podrían seleccionarse sistemas, técnicas o servicios adecuados de entre los enumerados en el Anexo 1*, en el que se han incluido sus características más importantes.

* Puede encontrarse información adicional en el Manual sobre Selección y utilización de sistemas de frecuencia y de tiempo con precisión del UIT-R.

ANEXO 1

CUADRO 1

Detalles de los diversos métodos de difusión y de comparación para aplicaciones de tiempo y frecuencia

Tipo	Capacidad típica de exactitud de tiempo en relación con el UTC	Capacidad típica de transferencia de frecuencia	Cobertura	Disponibilidad	Facilidad de uso	Coste relativo aproximado para el usuario (en dólares de los Estados Unidos, 1992)	Ejemplo de sistema	Comentarios (1992)
Emisión en ondas decamétricas	1 a 10 ms	10^{-6} a 10^{-8} (a lo largo de 1 día)	Mundial	Continua, pero dependiente del operador y la posición	Depende de la exactitud requerida	50 a 5 000	Muchos servicios mundiales	La exactitud depende de la distancia, la hora del día, la calibración del receptor, etc.
Emisión en ondas kilométricas	1 ms	10^{-10} a 10^{-11}	Regional	Continua	Automática	3 000 a 5 000	Véase la Recomendación UIT-R TF.768	Depende de la distancia desde la fuente y la propagación diurna (altura de la ionosfera)
Navegación en ondas kilométricas (por impulsos)	1 μ s	10^{-12}	Regional	Continua	Automática	12 000	LORAN-C	Cobertura del hemisferio septentrional. Estabilidad y exactitud basadas en la recepción por onda de superficie
Enlaces terrenales de emisión de televisión	10 ns para visión común	10^{-12} a 10^{-14} (a lo largo de 1 día)	Local	Dependiente del horario de emisión local	Automática	5 000		Se necesita calibración para la temporización
Satélite de navegación, emisión	50 a 500 ns	10^{-10} a 10^{-12}	Mundial	Continua	Automática	3 000 a 15 000	Sistema mundial de determinación de la posición (GPS) y GLONASS	Es necesaria promediación a lo largo de 1 día para satisfacer la capacidad de transferencia de frecuencia especificada. El mejor sistema de emisión disponible hoy día con receptores comerciales
Satélite de navegación, visión común	5 a 20 ns	10^{-13} a 10^{-15} 1 a 50 días	Intercontinental	Continua	Adquisición automática de datos. Requiere posprocesamiento	10 000 a 20 000 por emplazamiento	GPS y GLONASS	Método de sincronización temporal más exacto de extendida utilización disponible hoy día (1992) con receptores comerciales para líneas de base inferiores a 8 000 km
Satélite meteorológico, emisión	100 μ s	No recomendado para transferencia de frecuencia	Regional (huella del satélite)	Continua	Automática	4 000 a 5 000	Satélite geoestacionario operacional del medio ambiente (GOES)	Puede no estar disponible durante el eclipse del satélite

CUADRO 1 (Continuación)

Tipo	Capacidad típica de exactitud de tiempo en relación con el UTC	Capacidad típica de transferencia de frecuencia	Cobertura	Disponibilidad	Facilidad de uso	Coste relativo aproximado para el usuario (en dólares de los Estados Unidos, 1992)	Ejemplo de sistema	Comentarios (1992)
Otros satélites de emisión geoestacionarios	20 μ s	5×10^{-10}	Regional (huella del satélite)	Continua	Automática	4 000	INSAT	Puede no estar disponible durante el eclipse del satélite
Satélite de comunicación, bidireccional	1 a 10 ns	10^{-14} a 10^{-15}	Regional (huella del satélite)	Continua (con el horario previsto)	La adquisición de datos puede ser automática (dependiendo del satélite). Se requiere pos-procesamiento	50 000 por emplazamiento	Existen redes norteamericanas y europeas	Método operacional más exacto en la actualidad
Código horario telefónico, bidireccional	1 a 10 ms	10^{-8} (a lo largo de 1 día)	Alcance de llamada telefónico	Continua	Automática	100	Europa y América del Norte	La línea telefónica debe tener el mismo trayecto en ambos sentidos. Supone compatibilidad de computadores y de soporte lógico
Fibra óptica	10 a 50 ps	10^{-16} a 10^{-17}	Local inferior a 50 km	Continua	Automática	Transmisor y receptor 30k dólares de los Estados Unidos por aparato y costes de cable y de instalación subterránea	Dedicado a transferencia de frecuencias patrón	El cable debe de estar estabilizado en temperatura (por ejemplo, 1,5 m subterráneo)
	100 ns	10^{-13} a 10^{-14} (a lo largo de 1 día)	Larga distancia 2 000 km	Continua	Automática	No aplicable. El equipo forma parte de un sistema de comunicación específico	Jerarquía digital sincrona (JDS)	Parte de un sistema de comunicación digital
Enlace de microondas	1 a 10 ns	10^{-14} a 10^{-15}	Local	Continua	Automática	50 000 a 75 000		Sensible a las condiciones atmosféricas y a los efectos multitrayecto. Debe ser bidireccional para conseguir una exactitud y estabilidad determinadas
Cable coaxial	1 a 10 ns	10^{-14} a 10^{-15}	Local	Continua	Automática	5 a 30 por metro		Sensible a la temperatura, relación de onda estacionaria (ROE), humedad, presión barométrica

Notas especiales relativas a los diversos métodos de difusión/comparación

Debe llamarse la atención sobre el hecho de que para conseguir las exactitudes indicadas, se necesita a menudo calibración del equipo de usuario.

Emisiones en ondas decamétricas

Muchos de los servicios de emisión en ondas decamétricas utilizan frecuencias internacionalmente atribuidas al efecto a 2,5, 5, 10, 15, 20 y 25 MHz. Otros servicios de ondas decamétricas utilizan frecuencias de otras bandas a fin de reducir la interferencia mutua. Estos servicios proporcionan una exactitud de funcionamiento escasa, pero ofrecen ventajas tales como amplia cobertura geográfica, comodidad de utilización (para un nivel de exactitud de 1 s) y equipo de usuario barato. La Recomendación UIT-R TF.768 contiene información detallada sobre los formatos, horarios de emisión y otras características de la mayor parte de los servicios de tiempo y frecuencia en ondas decamétricas.

Emisiones en ondas kilométricas

Las emisiones de este tipo útiles para aplicaciones de tiempo y frecuencia son:

- diversos servicios dedicados de tiempo y frecuencia que operan en la banda 40-80 kHz; y
- emisiones de sistemas de radionavegación, tales como estaciones Loran-C a 100 kHz, que proporcionan transmisiones altamente estabilizadas y sincronizadas. Los servicios dedicados de tiempo y frecuencia incluyen modulaciones de fase y/o amplitud que proporcionan información completa de hora y fecha en forma codificada. Existe un gran número de estaciones Loran-C, principalmente en el hemisferio septentrional. Las ventajas principales son una buena exactitud de tiempo y frecuencia, disponibilidad de receptores relativamente baratos y comodidad de utilización. Un inconveniente es la aparición no detectada de deslizamientos de ciclo, que rebajan la exactitud. La Recomendación UIT-R TF.768 contiene información detallada sobre formatos, horarios de emisión y otras características de muchas transmisiones en ondas kilométricas.

Emisiones en ondas métricas

Las emisiones en ondas métricas en la gama 10-30 kHz son de utilidad sobre todo en aplicaciones de frecuencia. Características de propagación estable y cobertura de larga distancia hacen de estas señales útiles para comparaciones de frecuencias al nivel 1×10^{-11} o mejor. Las emisiones en ondas métricas no contienen normalmente información completa de la hora del día. La Recomendación UIT-R TF.768 contiene información detallada sobre formatos, horarios de emisión y otras características de algunas transmisiones de utilidad en ondas métricas.

Radiodifusión de televisión

Se han ensayado diferentes métodos para utilizar emisiones de televisión para la difusión de tiempo y frecuencia, y para establecer comparaciones entre los mismos; algunos de estos métodos están actualmente en uso. Incluyen la inserción de información codificada de tiempo y frecuencia en la señal de televisión, la estabilización de frecuencias portadoras de televisión y de impulsos de sincronización, y la recepción por visión común de una transmisión de televisión única en una zona local. El método más comúnmente utilizado hoy día es el método de visión común, que permite la comparación de sistemas de temporización dentro de una zona de cobertura de estación local con una exactitud aproximada de unos 10 ns.

Satélite de navegación (radiodifusión)

Esta técnica emplea la recepción directa de información de temporización procedente de los sistemas de satélites de navegación tales como el sistema mundial de determinación de la posición (GPS) y el sistema GLONASS. Se incluye información en las señales de satélite que permite al usuario compensar aproximadamente los retardos de propagación y aplicar correcciones para diferencias entre el reloj del satélite local y el UTC. Son posibles exactitudes mejores que 500 ns para el tiempo y de 1×10^{-12} para comparaciones de frecuencia, incluso en presencia de degradación intencionada de las señales, conocida como disponibilidad selectiva. Las principales ventajas son: disponibilidad universal de los receptores comerciales; cobertura mundial desde múltiples satélites (21-24 por sistema); explotación automática; gran exactitud y utilización de patrones atómicos a bordo.

Satélite de navegación (visión común)

Con esta técnica se observa el mismo satélite GPS o GLONASS desde dos emplazamientos de temporización diferentes precisamente al mismo tiempo. Al sustraer los resultados de ambos emplazamientos se eliminan los efectos del reloj del satélite y se compensan al menos parcialmente los errores de efemérides. La degradación intencionada de las señales del satélite puede o no degradar las comparaciones de tiempo de visión común, dependiendo de la forma en que se implementen. Son posibles, en ejercicios de rutina, incertidumbres de comparación de tiempo mejores que 20 ns para emplazamientos muy separados. Este método ofrece una mejor exactitud que el método directo, pero exige disposiciones de coordinación especiales entre los emplazamientos que se comparan. El Bureau international des poids et mesures (BIPM) publica horarios para permitir la coordinación requerida. Para obtener una incertidumbre de 10^{-15} , se requieren tiempos de integración de hasta 50 días.

Satélite meteorológico

Desde 1974 se han utilizado dos satélites geoestacionarios operacionales del medio ambiente (GOES) para difundir un código de tiempo UTC a la región de América del Norte y del Sur y de las áreas oceánicas circundantes. Se transmite continuamente información completa de hora y fecha, así como información de posición de los satélites para que haya compensación automática de retardos de trayecto por parte del receptor del usuario. Normalmente pueden obtenerse incertidumbres de menos de 100 μ s. La cobertura geográfica con los satélites GOES puede quedar algo limitada más allá de América del Norte y del Sur hasta que la constelación de satélites se rellene con satélites más nuevos, previstos para el periodo 1994-1995.

Otros satélites de radiodifusión geoestacionarios

Se han utilizado otros sistemas de satélites para transmitir señales horarias en un modo unidireccional. Actualmente, los satélites multifunción INSAT transmiten un código horario completo a una zona de cobertura situada dentro y en torno al subcontinente indio. Se incluye también información de posición de los satélites en el formato, permitiendo a los usuarios que disponen de receptores automáticos compensar el retardo de trayecto con una exactitud de unos 20 μ s.

Satélites de comunicaciones (modo bidireccional)

Actualmente, el intercambio bidireccional de señales de temporización a través de satélites de comunicación ofrece la técnica más exacta para comparar emplazamientos de temporización distantes entre sí. Se ha obtenido gran experiencia en todo el mundo con esta técnica, y un número creciente de centros de temporización están utilizando, o preparándose a hacerlo, esta técnica de transferencias de tiempo internacional, operacional hasta un nivel de exactitud que se acerca a 1 ns. Entre las ventajas se cuentan la elevada capacidad de exactitud y la disponibilidad de muchos satélites de comunicación adecuados en todas las regiones del mundo. Entre los inconvenientes figuran la necesidad de que los usuarios transmitan y reciban señales de temporización y los costes relativamente altos de los equipos. A los niveles de exactitud más elevados, la calibración cuidadosa de los retardos del equipo de estación en tierra es un requisito difícil, pero necesario. Están siendo desarrollados, para aplicaciones de temporización, módems de transferencia de tiempo especializados, optimizados para alta exactitud y estabilidad. Se necesitan 10 días de integración para obtener la exactitud 10^{-15} .

Código horario telefónico

Varios centros de temporización de América del Norte y Europa han establecido servicios destinados a difundir información horaria codificada por líneas telefónicas en modo automatizado. Los computadores y otros sistemas automatizados suelen estar programados para: marcar los números de dichos servicios a medida que los necesiten, recibir un código horario ASCII, reiniciar el reloj local y corregir automáticamente el retardo de trayecto correspondiente a través del sistema telefónico. La compensación del retardo de trayecto puede efectuarse utilizando el equipo del centro de temporización o en el emplazamiento del usuario. Son posibles en muchos casos exactitudes de 1 a 10 ms. Entre las ventajas figuran la sencillez, coste muy bajo para el usuario e idoneidad para sistemas automatizados. El principal inconveniente es la limitada exactitud.

Fibra óptica (local)

Se utilizan hoy día dos tipos de fibras (multimodo y monomodo). La multimodo se utiliza generalmente para transmitir datos digitales y bajas frecuencias en una distancia relativamente corta (por ejemplo, 1 km). La monomodo es la mejor para una distancia más grande (por ejemplo, 50 km) y es de banda ancha (por ejemplo, 5 MHz a 100 GHz). Se necesita fibra monomodo con un láser de 1 300 nm para lograr la calidad de funcionamiento indicada en el Cuadro 1. El coeficiente de retardo nominal con respecto a la temperatura es de $7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. A fin de satisfacer la calidad de funcionamiento indicada, el cable debe estar estabilizado en temperatura, es decir, enterrarse a 1,5 m para longitudes en exceso de 50 m. La pérdida de inserción es aproximadamente 0,5 dB/km.

Fibra óptica (distante)

Las exactitudes indicadas en el Cuadro 1 se han conseguido con fibras ópticas en un sistema de telecomunicación digital a lo largo de una distancia de 2 400 km. Si se minimiza la asimetría de la longitud del cable se puede lograr una exactitud de tiempo inferior a los microsegundos y una estabilidad de tiempo de 1 ns aproximadamente en el trayecto de transmisión de ida y retorno. El retardo del terminal de un sistema conforme a las Recomendaciones UIT-T G.707, UIT-T G.708 y UIT-T G.709 era inferior a 5 ns.

Enlace de microondas

Los enlaces de microondas están generalmente limitados a su utilización con visibilidad directa, a menos que se utilicen repetidores o reflectores planos. Generalmente, se requiere un canal dedicado más que multiplexión por división en el tiempo para explotación continua de corta duración. Para cumplir los requisitos indicados en el Cuadro 1, se requiere explotación bidireccional para anular las fluctuaciones de fase, lo cual significa un sistema de realimentación y un canal continuamente operativo. Los enlaces de microondas son sensibles a las condiciones atmosféricas (lluvia, nieve, vibración de la antena, etc.) y a los efectos multitrayecto.

Cable coaxial

Para satisfacer la calidad de funcionamiento indicada, deben considerarse factores tales como estabilidad de temperatura, longitud y tipo de cable coaxial. La pérdida de inserción es dependiente de la longitud y tipo del cable, y de la frecuencia correspondiente. Los cables de dieléctrico sólido tienen un coeficiente de retardo de 250×10^{-6} (o incluso mayor a 25°C); el dieléctrico de aire es de 15×10^{-6} , pero debe tener una presurización por nitrógeno seco con un regulador de presión de doble etapa en un entorno de temperatura controlada. La temperatura del cable debe estabilizarse instalando el cable enterrado a 1,5 m o en un entorno con una variación inferior a 1°C . Los cables coaxiales deben considerarse únicamente para pequeñas longitudes, inferiores a varios centenares de metros.
