

TRANSFERENCIA ULTRAPRECISA DE TIEMPO Y FRECUENCIA MEDIANTE FIBRA ÓPTICA

Héctor ESTEBAN PINILLOS

María del Carmen VÉLEZ LÓPEZ



CTUALMENTE, el avance tecnológico en los campos de las tecnologías de la información y la navegación está marcando el diseño y la construcción de relojes atómicos (1) de altas prestaciones cada vez más exactos. En esta línea, durante los últimos años se está llevando a cabo la realización de una nueva generación de relojes atómicos que operan en el rango óptico del espectro electromagnético (reloj óptico). Estos relojes suponen una tecnología de vanguardia para la metrología (2) de tiempo y frecuencia, ya que han mejorado la exactitud (3) y la estabilidad (4) en tres órdenes de magnitud (1.000 veces) respecto a los mejores relojes atómicos de microondas.

Metrológicamente hablando, exactitud y estabilidad son dos parámetros totalmente diferentes. Sin embargo, erróneamente, suelen considerarse similares. En la figura 1, el centro de la diana representa el valor verdadero, y los puntos, los resultados de varias medidas obtenidas en una serie de repeticiones.

(1) Reloj muy preciso que se basa en el conteo de las oscilaciones de los átomos entre dos estados de energía cuando éstos son excitados con la frecuencia de resonancia adecuada.

(2) Ciencia que se ocupa de la medida.

(3) Proximidad entre un valor medido y un valor verdadero.

(4) Proximidad entre los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto bajo las mismas condiciones.

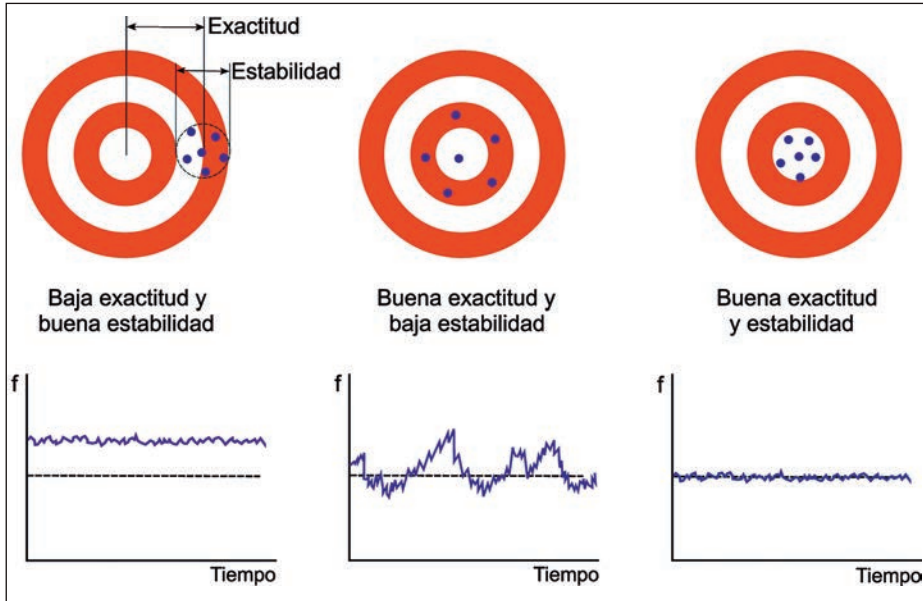


Figura 1. Conceptos de exactitud y estabilidad. (Elaboración propia)

Tan importante como el desarrollo de los relojes ópticos lo es conseguir una transferencia de tiempo y frecuencia (T/F) adecuada que permita explotar toda su capacidad. El principal aspecto a tener en cuenta a la hora de elegir una técnica de transferencia de la señal es la evaluación del grado de degradación que sufre la señal durante el proceso de transferencia, así como el nivel de susceptibilidad de la señal a sufrir perturbaciones. Por lo tanto, y atendiendo al criterio del nivel de ruido de fase del enlace/señal propagada, es necesario seleccionar los métodos apropiados de transferencia de T/F de una señal.

En este sentido, actualmente se considera la fibra óptica como el sistema de transferencia de T/F más satisfactorio para comparar relojes ópticos de altas prestaciones y poder resolver sus capacidades de forma adecuada.

Antecedentes históricos

El nacimiento del reloj atómico de haz de cesio (Cs) a mediados del siglo XX supuso la primera gran revolución en la medida del tiempo, siendo sustancialmente más preciso que su antecesor, el reloj de cuarzo. Desde entonces, tiene un gran impacto en la ciencia y la tecnología y actualmente prolifera como

oscilador de referencia, constituyendo la base de la definición de la unidad básica de tiempo (el segundo) desde 1967. Cabe destacar que también ha propiciado una gran innovación en las comunicaciones a larga distancia, al constituir el elemento clave en el desarrollo del Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

No obstante, a la vanguardia de la metrología de T/F del siglo XXI, y gracias a los avances en los últimos cinco años de las técnicas de enfriamiento láser de los átomos que conforman los relojes atómicos, ha sido posible llevar a cabo una nueva generación de relojes atómicos, con prestaciones sin precedentes, basados en átomos que operan en la región óptica del espectro electromagnético.

Paralelamente al desarrollo de estos relojes, en una sociedad altamente tecnificada, es inherente la necesidad de sincronización y sintonización precisa en múltiples ámbitos. Cada vez son más las aplicaciones y sistemas cuyo funcionamiento se basa en el uso de tiempo y frecuencia ultraprecisos y que requieren tomar la señal de referencia bien de un oscilador propio —normalmente costoso, difícil de adquirir y, sobre todo, de mantener— o de una fuente externa procedente de un instituto metrológico nacional mediante un sistema de transferencia adecuado.

En este ámbito, las técnicas de transferencia basadas en los Sistemas de Navegación Global por Satélite (GNSS) son los métodos adecuados para llevar a cabo la transferencia de señales por aire en el dominio de microondas. Hoy en día, la transferencia de T/F mediante estas técnicas satelitales sigue siendo el método empleado más extendido, ya que, en primer lugar, es idóneo cuando los enlaces físicos vía cable no están disponibles, como en el caso de los enlaces transoceánicos, y en segundo lugar, son sistemas de transferencia económicos, robustos y fiables que posibilitan llevar a cabo la diseminación y sincronización de los relojes de microondas remotos sin un incremento notable del nivel de ruido.

Sin embargo, y pese a las grandes ventajas de la tecnología GNSS, la propagación de las señales basada en satélites artificiales no es una técnica adecuada para la distribución de T/F de relojes ópticos en el nivel de precisión que hoy en día es demandado. Ello es debido a que en esta tecnología, además de los efectos atmosféricos que degradan la señal durante la propagación, es necesario multiplexar la señal en el transmisor para unir varios canales y hacerlos converger en un solo canal de transmisión y demultiplexar y amplificar la señal en el receptor para separarlos, lo que impacta directamente en la estabilidad y en la exactitud de la señal. Por lo tanto, si se realizara una sincronización de dos relojes ópticos mediante técnicas basadas en GNSS, el ruido de fase presente en el enlace enmascararía la señal y, de este modo, imposibilitaría una comparativa efectiva entre ambos relojes.

Como alternativa, las técnicas basadas en enlaces de fibra óptica son las más exactas para transferir señales de T/F y comparar relojes ópticos, ya que

ofrecen un nivel de sincronización inigualable al mejorar en más de cuatro órdenes de magnitud la resolución obtenida mediante técnicas por satélite.

La fibra óptica como medio de transmisión posee unas características especiales que la hacen única. En concreto, es un medio de propagación que está muy bien aislado de la interferencia electromagnética externa, posee un gran ancho de banda y presenta bajas pérdidas. Todo ello se traduce en una mayor capacidad de transmisión de datos y un mayor alcance. Por otra parte, la fibra óptica puede ser empleada en modo bidireccional, ya que permite la transmisión simultánea de diferentes longitudes de onda por una misma fibra óptica mediante multiplexado denso por división en longitudes de onda (DWDM). Esta técnica es compatible con las aplicaciones de T/F y permite su uso en redes de telecomunicaciones existentes sin suponer un sobrecoste, compartiendo este medio de transmisión tanto para aplicaciones metrológicas como para comunicaciones en general, reduciendo así los costes de despliegue de la infraestructura posible gracias al uso dual de las mismas.

Desarrollo de la red de fibra óptica y grado de innovación

A rasgos generales, en los enlaces DWDM de fibra óptica de larga distancia es necesario emplear láseres ultraestables, multiplexores/demultiplexores ópticos, amplificadores ópticos y multiplexores ópticos de inserción/extracción (*add/drop*) de la señal, entre otros componentes, que hagan compatible la explotación óptima de la fibra óptica para comunicaciones convencionales con la reserva de canales para aplicaciones científicas. Todos los elementos introducidos tienen un impacto directo en la calidad de la señal transmitida, atenuándola y distorsionándola. Por lo tanto, y a pesar de ser la fibra óptica un medio de transmisión con excelentes características, está expuesta a factores físicos, como la atenuación, la dispersión cromática y las no linealidades que afectan directamente a la fase de la portadora, introduciendo fluctuaciones no deseadas. De esta manera, al llevar a cabo el diseño de las redes de fibra óptica para la transferencia de referencias ultraestables es necesario poner en práctica técnicas de compensación activa que amplifiquen y limpien la señal.

Otro punto interesante a analizar a la hora de implementar una red óptica es tener en cuenta que el uso de las tecnologías de sincronización de relojes ópticos mediante enlaces de fibra óptica permite la convergencia con otras tecnologías, como son los protocolos de transferencia de tiempo basados en redes Ethernet ópticas comerciales. En este contexto, el estándar IEEE 1588, también conocido como PTP (protocolo de tiempo preciso), es una tecnología relevante. Su mecanismo de sincronización está basado en el intercambio de mensajes entre relojes de una red sincrónica sobre la capa física, llegando a alcanzar niveles de precisión por debajo del microsegundo. Particularmente

interesante y como extensión del mismo, el protocolo IEEE 1588 en su versión de 2019 contiene un perfil de altas prestaciones, basado en el proyecto White Rabbit (WR). La tecnología WR-PTP aumenta la precisión de distribución de tiempo y frecuencia en un enlace de fibra puramente óptico con prestaciones mejores de un nanosegundo.

Actualmente, el ROA está inmerso en el estudio de la transferencia ultra-precisa de T/F en un enlace de fibra óptica de larga distancia a través de un proyecto de excelencia I + D + i otorgado por la Junta de Andalucía. El Proyecto SASFO (Solución Avanzada de Sincronismo mediante Fibra Óptica) es ambicioso y altamente novedoso; mediante él, se pretende llevar a cabo un estudio puramente metrológico de la transferencia de la portadora ultraestable de un reloj óptico y, simultáneamente, combinarlo con la tecnología electrónica de comunicaciones para la sincronización WR. El objetivo es conseguir lo mejor de ambas tecnologías: interoperabilidad y alta estabilidad en frecuencia en una red operacional no dedicada exclusivamente a fines científicos.

Este proyecto abre las puertas hacia una nueva etapa en el ámbito de la transmisión de T/F más allá de nuestras fronteras. Es por ello que en un futuro se plantean dos posibles soluciones, ambas ligadas a la infraestructura en buena parte existente de la red académica y de investigación española RedIRIS (5). La primera estaría en la línea de proyectos europeos, como CLONETS (6), que tiene por objeto implementar una red paneuropea sostenible de distribución

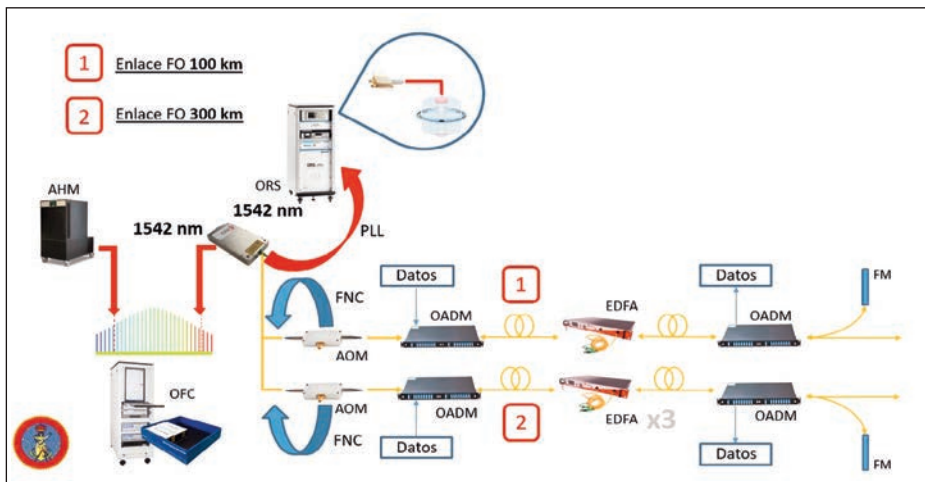
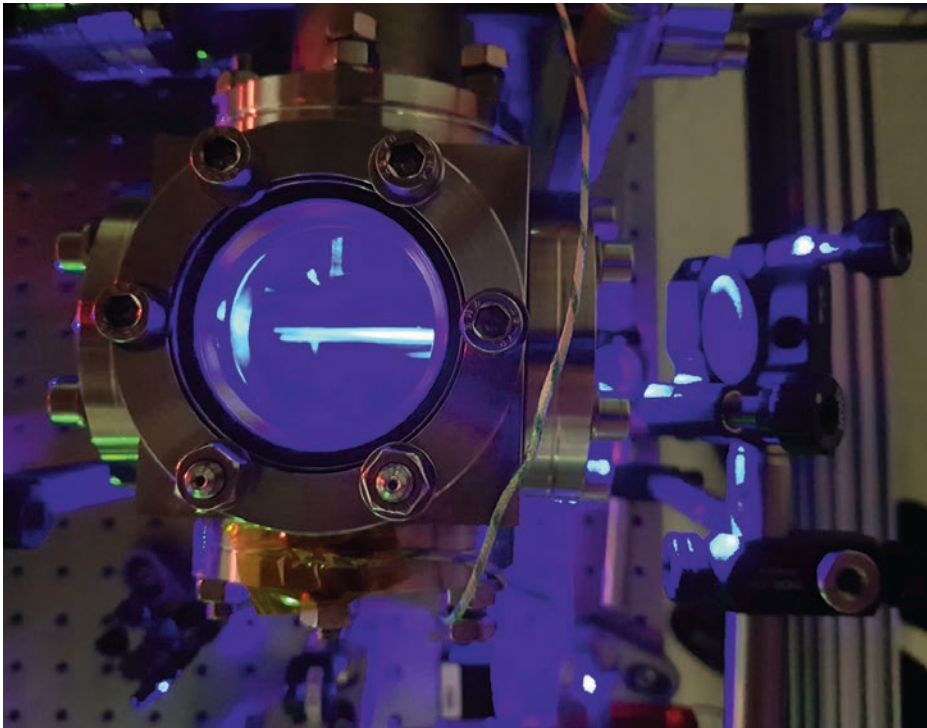


Figura 2. Esquema Proyecto SASFO. (Elaboración propia)

(5) Red Académica y de Investigación Española.

(6) CLOck NETwork Services.

de tiempo por fibra óptica, resolviendo en buena medida el problema de la precisión que se requiere en metrología, así como la vulnerabilidad de las soluciones vía satélite, abriendo un camino por el que difundir tiempo a largas distancias y de muy alta precisión, pero a la vez robusto y fiable. En esta solución hay ocho países europeos trabajando en la actualidad (7), aprovechando la red europea de investigación, educación e innovación GÉANT, así como sus propias redes informáticas científicas y docentes (NREN). Una segunda solución, aún más exigente, iría en la línea seguida por varios países europeos que están desarrollando y optimizando en la actualidad sus propios relojes ópticos, conformando otra red paralela a la anterior, soportada por una infraestructura ya existente y basada en una tecnología puramente óptica, usando técnicas coherentes y fibras ópticas dedicadas (fibras oscuras), o rangos dedi-



Fluorescencia de los átomos del reloj óptico de estroncio 87 desarrollado en el ROA.
(Fotografía facilitada por el autor)

(7) Alemania, Finlandia, Francia, Holanda, Italia, Polonia, Reino Unido y República Checa.

cados del espectro (canales). Esta solución, aunque altamente precisa, requiere elementos de amplificación, redireccionamiento y de regeneración de la señal intermedios (cada 70-100 km), lo que conlleva un alto coste material y personal, por lo que su despliegue masivo se considera muy complejo. Ejemplo de ello sería el proyecto REFIMEVE+, en desarrollo en Francia.

Aplicaciones

Actualmente el ROA es el organismo que custodia, conserva y mantiene el patrón de la unidad básica de tiempo y elabora la escala de tiempo base de la hora legal española (8). Por lo tanto, actúa como vértice de la pirámide metroológica nacional en el ámbito del tiempo y la frecuencia, y es el eslabón que posibilita que el tiempo y la frecuencia precisos se difundan por todo el territorio español con trazabilidad a los patrones internacionales. Así, y ante la más inminente redefinición del «segundo» del Sistema Internacional de Unidades (SI) a favor de los relojes ópticos, previsiblemente para la próxima década, el ROA trabaja desde el año 2016 en el desarrollo de un reloj óptico de estroncio 87. El desarrollo de relojes ópticos, así como su sistema de transferencia mediante fibras ópticas, no sólo está revolucionando el mundo de la metrología, sino que también supone una revolución y un impacto en la ciencia y la tecnología de la sociedad actual. A continuación, se relacionan unos ejemplos representativos de aplicaciones en las que la sincronización de relojes ópticos en sistemas de diseminación ultraprecisa de T/F en fibra óptica tendrían un impacto directo en nuestra sociedad:

- En los centros de investigación y universidades, donde se requieren T/F ultraprecisos para desarrollar su labor investigadora en estudios geodésicos, pruebas de relatividad especial y general, comprobaciones de física fundamental (9), radioastronomía (10) y en la resolución de cuestiones ligadas al transporte de señales y datos que necesitan sincronismos del orden de un nanosegundo.
- En una red eléctrica inteligente o *smart grid*, donde es necesario que todos los dispositivos de red estén sincronizados para compartir una noción de tiempo común en los procesos de captura y generación de eventos. Esta sincronización debe realizarse con la mayor fiabilidad y

(8) Ley 32/2014, de 22 de diciembre, de Metrología, y R. D. 1.308/1992, de 23 de octubre.

(9) Variación temporal de las constantes fundamentales, entre otras.

(10) Ejemplo de ello es la Red Europea de Interferometría de Muy Larga Base (EVN), en la que participa el radiotelescopio de 40 m de diámetro del Observatorio de Yebes, propiedad del Instituto Geográfico Nacional (IGN), o el proyecto Square Kilometre Array (SKA), en el que el ROA participa junto a la Universidad de Granada.

precisión posible hasta alcanzar los niveles requeridos. A este respecto, el requisito de sincronismo más estricto a día de hoy implica precisiones por debajo de los 10 ns. Destacar que cualquier desfase de la señal de referencia, por pequeño que sea, conlleva pérdidas de energía y una mayor susceptibilidad de averías.

- En el campo de la telefonía móvil, donde se ha experimentado un vertiginoso avance durante los últimos años, particularmente con la llegada del 5G, que requiere una mejor sincronización, pasando de los 1,5 μ s de la tecnología precedente a tener que estar por debajo de los 65 ns para poder implementar las técnicas de agregación de portadora. Además, se prevé que con su evolución natural hacia la tecnología 6G se utilicen bandas de frecuencia más altas con muy baja latencia de comunicación, por lo que se requerirá una precisión en el entorno de un nanosegundo, no alcanzable como hasta ahora mediante dispositivos GNSS.
- En el sector financiero, en el que la exigencia es algo menor. Sin embargo, a través de la Ley de Mercado de Valores para adaptar la normativa MiFID II al mercado español se plantean importantes retos para este sector, introduciendo, entre otras cuestiones, las reglas sobre negociación algorítmica y de alta frecuencia y la mejora de la transparencia y la supervisión de los mercados financieros. Todo ello requiere un nivel de sincronismo para los operadores del mercado de valores de 100 μ s y una granularidad en el etiquetado de tiempo igual o menor a un microsegundo.
- Respecto al posicionamiento, donde una mejora en la sincronización implica directamente una geolocalización más precisa. Ambos conceptos están íntimamente ligados, por lo que se espera que los sistemas GNSS sean capaces de proporcionar una precisión subcentimétrica una vez se desarrollen los nuevos patrones ópticos para su uso en el espacio.
- En los campos relacionados con la seguridad en las comunicaciones. Los relojes atómicos se sincronizan regularmente mediante satélite (por ejemplo, las torres de telefonía móvil verifican y ajustan sus relojes con los de los satélites GNSS), pero si la señal se pierde, no es posible realizar la operación. Por otro lado, las señales de GNSS son lo suficientemente vulnerables y débiles como para que puedan ser suplantadas e interferidas (*spoofing* y *jamming*) y provocar que se degrade sustancialmente la información procedente de uno o varios satélites. Por lo tanto, existe un interés añadido en la construcción de relojes más estables y robustos (relojes ópticos) que sean capaces de permanecer sincronizados durante largos períodos de tiempo de manera autónoma.

- En la generación de escalas de tiempo, particularmente la escala de referencia internacional de Tiempo Universal Coordinado (UTC), cuya estabilidad se vería mejorada por la participación de un entramado de relojes primarios ópticos de mejores prestaciones conectados mediante una red de fibra óptica.

Todo lo expuesto son sólo algunos ejemplos del vertiginoso futuro que conlleva el desarrollo y la diseminación de esta novedosa tecnología.

Conclusiones

El desarrollo de patrones ópticos, así como su sistema de transferencia mediante fibras ópticas, no sólo está revolucionando el mundo de la metrología, sino que también supone un impacto considerable en el mundo de la ciencia, de la tecnología de la sociedad actual y, por ende, de la militar.



Figura 3. Alcance de los sistemas de diseminación ultraprecisa de T/F.
(Elaboración propia)

En una sociedad tan avanzada tecnológicamente como la nuestra, por muy precisos y estables que sean los relojes ópticos, éstos necesitan ser comparados (sincronizados). Es aquí donde los enlaces de fibra óptica se convierten en herramientas extremadamente potentes para la diseminación de frecuencias ultraprecisas a escala continental, donde nuevos escenarios serán posibles a través de extensas redes de fibra óptica conectando estos relojes y formando un gran entramado óptico.

Finalmente, concluir el proyecto SASFO con éxito significaría alcanzar una solución de altas prestaciones con un nivel de madurez y operatividad significativamente superior a otras aproximaciones científicas actuales. De esta manera, se abre un amplio abanico de oportunidades para entablar relaciones internacionales con los diferentes laboratorios y organismos públicos y privados que, de algún modo, necesitan de T/F de altas prestaciones.

