

Generador de microondas con un láser de Brillouin de fibra óptica estabilizado de bajo costo para sistemas de radio sobre fibra

J. L. Bueno Escobedo^a, M. C. Maya-Sánchez^{a,*}, S. V. Miridonov^a, A. A. Fotiadi^{b,c,d}, and V. V. Spirin^a

^aCentro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Carretera Ensenada-Tijuana No.3918, Zona Playitas, 22860 Ensenada, B.C., México.

^bUniversity of Mons, Boulevard Dolez 31, 7000 Mons, Belgium.

^cUlyanovsk State University, 42 Leo Tolstoy Street, Ulyanovsk, 432970, Russia.

^dIoffe Physico-Technical Institute of the RAS, 26 Polytekhnicheskaya Street, St. Petersburg 194021, Russia.

Received 3 June 2020; accepted 28 September 2020

Proponemos un nuevo oscilador optoelectrónico basado en la dispersión estimulada de Brillouin para generar una portadora de microondas, ultra estrecha y estable, como lo muestra su bajo ruido de fase. Un láser de Brillouin sub-kHz de anillo de fibra con estabilización activa y encadenamiento por inyección a su bombeo DFB (del inglés *Distributed Feedback Laser*) se propone como técnica básica para la generación de microondas. El oscilador optoelectrónico genera una señal portadora de ~ 10.946 GHz, con un ancho de banda de 300 Hz a 3 dB. Las señales armónicas parásitas están a ± 50 kHz, ± 450 kHz y ± 900 kHz, con un nivel de 45 – 50 dB desde el pico de la portadora. El ruido de fase está por debajo de -90 dBc/Hz a un desplazamiento de frecuencia de la portadora de 10 kHz; este nivel se observa en una transmisión de prueba a través de una fibra óptica de 20 Km de longitud.

Descriptores: Radio sobre fibra; encadenamiento por auto-inyección; oscilador optoelectrónico.

We have proposed a new optoelectronic oscillator to generate a stable ultra-narrow microwave carrier signal with low phase noise based on stimulated Brillouin scattering. A cost-effective sub-kilohertz Brillouin fiber ring laser with stabilized self-injection locked pump DFB (*Distributed Feedback Laser*) laser is offered as a key technique for microwave carrier generation. The full-width of generated microwave signal at -3 dB level is approximately equal to 300 Hz with a peak maximum at ~ 10.946 GHz. The strongest parasitic harmonics shifted from carrier signal peak on ± 50 kHz, ± 450 kHz, and ± 900 kHz are below the main peak on 45 – 50 dB. A phase noise below -90 dBc/Hz for a frequency offset above 10 kHz from the carrier after passing the 20 km length test fiber was achieved.

Keywords: Radio over fiber; self-injection locking; optoelectronic oscillator.

PACS: 42.81.-I; 84.40.-X; 42.79.-E

DOI: <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.67.109>

1. Introducción

Con la aparición del internet de las cosas (IoT) y la reciente generación de comunicaciones 5G, se tiene una alta demanda de acceso a sistemas de comunicaciones inalámbricas, además de la creciente necesidad de interconectar distintos servicios y dispositivos inteligentes, lo cual genera una alta velocidad de datos. La integración de redes inalámbricas/ópticas surge como una opción factible y de bajo costo que puede soportar la demanda actual y cubrir el creciente tráfico de datos, el surgimiento de nuevos servicios, así como la compatibilidad con múltiples estándares de comunicaciones inalámbricas; con ello, se presentan retos y oportunidades para las tecnologías de Radio sobre Fibra (RoF, del inglés *Radio over Fiber*) [1,2].

La generación de señales de microondas mediante señales ópticas es una técnica clave para obtener la transmisión de una portadora de alta calidad y bajo costo en sistemas de RoF. Una configuración óptica heterodina genera de forma automática portadoras de banda unilateral. En este sentido, se han presentado numerosas técnicas para la generación de señales de microondas, ondas milimétricas o en el rango de

terahertz, como la mezcla de dos láseres de longitud de onda distinta, la modulación de fase o de intensidad de ondas ópticas, mediante el fenómeno de óptica no-lineal, entre otras [3-6].

La dispersión estimulada de Brillouin (del inglés *Stimulated Brillouin Scattering*, SBS) es uno de los fenómenos no-lineales más prometedores para dicho proceso [7,8]. SBS en la fibra óptica se caracteriza por un bajo umbral y un ancho de banda estrecho, beneficio para realizar filtros fotónicos de microondas de banda estrecha y osciladores optoelectrónicos de ultra-bajo ruido de fase [9-12]. Sin embargo, la generación de señales a frecuencias de ondas milimétricas para sistemas de RoF con SBS usualmente requiere un láser especial de bombeo a una frecuencia única de ancho de línea de estrecho [13-15].

Recientemente, hemos propuesto el uso del mecanismo de encadenamiento por auto-inyección en combinación con una simple retroalimentación optoelectrónica activa para el estrechamiento de un ancho de línea de un láser DFB comercial con una caída de aproximadamente 3 kHz y una disminución del ruido de fase del láser [16]. Una idea similar puede utilizarse para diseñar un láser de Brillouin comple-

tamente de fibra, donde el anillo resonador de fibra óptica, FORR (del inglés *Fiber Optical Ring Resonator*), usado como filtro en el trabajo previo, puede utilizarse para generar al mismo tiempo ondas de Stokes. Simultáneamente, este enfoque permite, reducir el umbral SBS y proveer un tono estable en frecuencia con bajo ruido de radiación de Stokes. El batimiento entre las radiaciones de Stokes y de bombeo da como resultado una portadora a ≈ 11 GHz, de tal forma que dicho láser puede ser una fuente prometedora para la generación de señales (portadoras) de microondas para diversas aplicaciones.

En este artículo se reporta por primera vez, hasta donde los autores sabemos, la generación de una portadora de microondas mediante el uso de un láser de Brillouin de fibra sub-kHz de modo único de bajo costo estabilizado mediante el encadenamiento por auto-inyección de bombeo de un láser DFB. El auto-encadenamiento provee un estrechamiento significativo del ancho de línea de un láser DFB que genera un bajo umbral de Stokes. Un microcontrolador basado en una retroalimentación optoelectrónica activa entrega una emisión de Stokes a una frecuencia única libre de saltos de modos. La configuración propuesta genera una portadora de microondas con muy bajo ruido de fase y bajo costo, que es útil para aplicaciones de RoF.

2. Propuesta experimental

El montaje experimental muestra un sistema eficiente para generar una portadora utilizando un láser de Brillouin de fibra con el bombeo de un láser DFB encadenado a un anillo resonador de fibra óptica corta, FORR, según se describe en la Fig. 1. La potencia de salida del láser DFB con aislador óptico incorporado de 30 dB, que opera a una longitud de onda cerca de 1535 nm, pasa por dos circuladores ópticos, OC1 y OC2, un acoplador óptico variable CV1 y un anillo resonador de fibra óptica. El ancho de línea del láser de bombeo DFB es de aproximadamente de 3.2 MHz con una potencia de salida de aproximadamente de 5 mW.

El FORR consiste de 2 acopladores 99/1, C3 y C4 y una fibra estándar de telecomunicaciones SMF-28 de 21.17 m de longitud. En general, la funcionalidad de FORR es similar a la cavidad lineal de Fabry-Perot con un 99 % de reflectividad de ambos espejos, donde el puerto C es equivalente al puerto

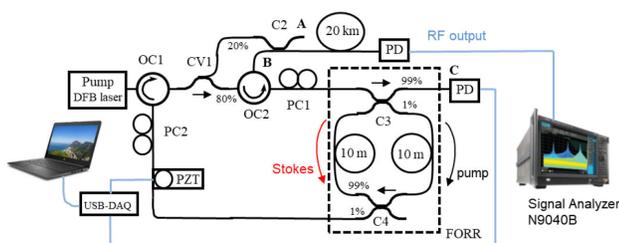


FIGURA 1. Configuración de montaje experimental: USB-DAQ -microcontrolador, PD -fotodetector, OC- circulador óptico, PC - controlador de polarización, CV1 - acoplador variable, C - acoplador, PZT-actuador piezoeléctrico de fibra óptica, FORR - anillo resonador de fibra-óptica.

reflejado de la cavidad lineal [18]. Esta configuración del FORR se usa como el elemento selectivo en frecuencia en la retroalimentación óptica que provee al mismo tiempo un ancho de línea estrecho y un encadenamiento en frecuencia. Además, esta configuración FORR sirve como una cavidad para la generación de Stokes. El aislador y los circuladores ópticos evitan reflexiones de los detectores y de las terminaciones de las fibras. Cuando la frecuencia del láser DFB resuena con el FORR, se logra el máximo acoplamiento entre la radiación de entrada y la cavidad, lo que provoca un incremento de la potencia incidente al resonador. Cuando ocurre esta resonancia la potencia pasa libremente al FORR y libera la máxima potencia óptica retroalimentada para el encadenamiento por auto-inyección del láser DFB. Al mismo tiempo, la potencia reflejada al puerto C cae a su valor mínimo [17,18]. El ancho de línea del láser DFB encadenado se reduce drásticamente y coincide con el pico de la frecuencia de resonancia de FORR.

Para generar la cavidad resonante para ambas radiaciones de bombeo y Stokes se usaba el corte de ~ 20 m de fibra óptica pieza por pieza, con ello, se mantiene el control del umbral de la potencia de Brillouin después de cada cambio. Para la cavidad con longitud, $L \gg 20$ m, el pico de la resonancia de Stokes de la fibra óptica SMF-28 se traslapa y se logra la condición de doble resonancia [19]. Mientras tanto, con el corte en piezas pequeñas de la fibra (0.4 a 0.5 cm) se puede ajustar exactamente al máximo de la amplificación de Brillouin con el pico del modo de resonancia del FORR y se reduce el umbral de Brillouin. Finalmente, se encontró que, con una longitud, L de FORR igual a 21.17 m, se logra el umbral mínimo de Brillouin. En el experimento, cuando la potencia de entrada de bombeo excede 2 mW, la potencia de bombeo que circula en el sentido de las manecillas de reloj (CW) con dirección a la cavidad de anillo es lo suficientemente alta para soportar el laseo a la primera longitud de onda de Stokes en contrasentido a las manecillas del reloj (CCW).

El encadenamiento pasivo del láser de bombeo en el pico de resonancia del FORR a través del fenómeno de encadenamiento por auto-inyección está limitado por la falta de sintonía entre el láser y las frecuencias de resonancia de la cavidad; normalmente está en el rango de algunas décimas de MHz [20]. Más allá de este rango, una pequeña variación en los parámetros del medio ambiente puede sacar el sistema de la auto-estabilización; con ello, se genera un incremento y decrementos suaves de la señal transmitida y reflejada de potencia del FORR, además, se producirían saltos entre los modos de resonancia de la cavidad.

El objetivo de la retroalimentación electrónica complementaria es mantener la frecuencia de bombeo en el rango requerido para la auto-estabilización. Experimentalmente, se ha utilizado una retroalimentación basada en una sencilla y económica tarjeta de adquisición de datos (USB-DAQ), que se conecta a la PC para un ajuste preciso de la longitud de retroalimentación de la fibra óptica de acuerdo a los cambios generados por la potencia reflejada. La longitud de retroalimentación se controla mediante un actuador piezoeléctrico

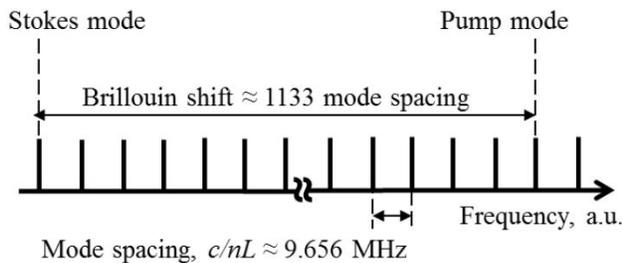


FIGURA 2. Modo de resonancia del FORR.

de fibra óptica (PFS) que contiene ~ 8.8 m de fibra óptica alargada por obleas de piezoeléctricos, Fig. 1. El algoritmo de control busca mantener al mínimo el valor de la potencia reflejada en el puerto C, excluyendo fluctuaciones comparativamente lentas. La técnica genera un encadenamiento estable de largo alcance de la frecuencia de bombeo del láser al centro del pico transmitido del FORR que resulta en la generación de Stokes con una potencia estable libre de saltos de modo.

La radiación de Stokes en la fibra óptica SMF-28 está desplazada hacia abajo ~ 11 GHz [7]. Para una longitud de FORR, L , igual a 21.17 m y $n = 1.4679$ para una fibra SMF-28 [21] el espaciado del modo c/nL es ~ 9.656 MHz. Con la condición de doble resonancia, los Stokes y el láser de bombeo irradian en modos de resonancia del FORR separados por aproximadamente 1133 espacios de modos en nuestro experimento (Fig. 2). La señal de RF resulta de la mezcla de las radiaciones ópticas del láser de bombeo y de Stokes a la salida del acoplador óptico C2.

3. Resultados experimentales y discusión

En la Fig. 3 se muestra el espectro de RF, donde se observa el batimiento generado entre las radiaciones de Stokes y el bombeo medidos, a una temperatura de ~ 19°C, mediante un Analizador de Señales RF de 50 GHz, N9040B de Keysight,

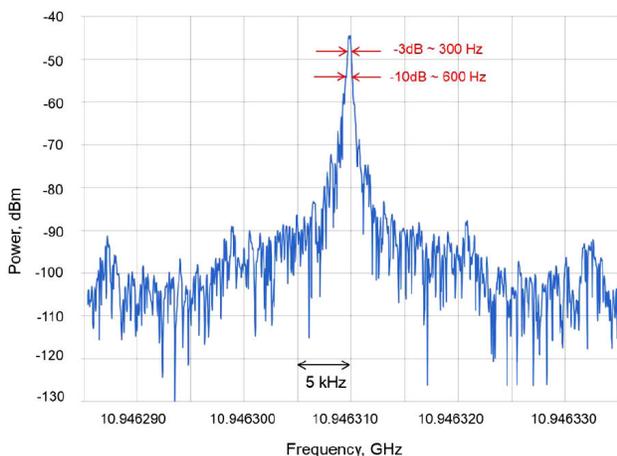


FIGURA 3. Espectro de la portadora generada alrededor de 10.946 GHz.

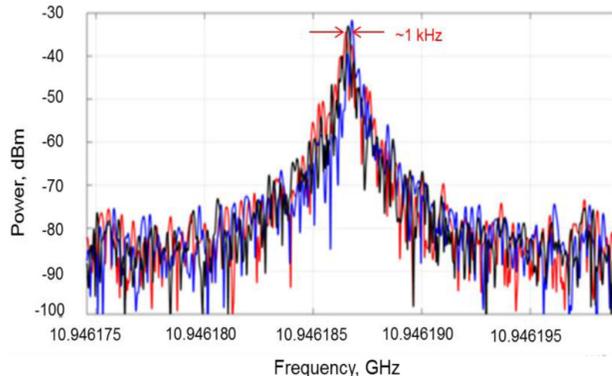


FIGURA 4. Deriva de la frecuencia de la portadora durante 10 min.

y un fotodetector de potencia óptica de 12 GHz. El pico máximo de batimiento (portadora) se encuentra en ~ 10.946 GHz y su ancho completo a -3 dB respecto del pico máximo es de aproximadamente 300 Hz.

Si se considera las diferencias significativas entre las frecuencias de radiación de Stokes y de bombeo, podemos ignorar el efecto de coherencia entre ellas. Dado que en el experimento el batimiento de las señales se produjo por el bombeo y las ondas de Stokes con potencias similares, el ancho de línea de ambas es de alrededor de 100 Hz. Es importante remarcar que el límite de resolución de nuestras medidas también es de 100 Hz.

En la Fig. 4 se muestra la variación de la frecuencia de la portadora con fluctuaciones en temperatura a lo largo de 10 min. A pesar de que no se aplica ningún procedimiento en especial para estabilizar el FORR, la desviación o deriva en frecuencia es menor a 1 KHz, lo cual es razonable para aplicaciones de microondas, donde los valores reportados están dentro de este rango [22-23]; por ejemplo, para un generador comercial se consideran valores ¡0.1 ppm, es decir para una frecuencia de 11 GHz, la variación en frecuencia es de 1.1 KHz (= $0.1 \times 11 \times 10^9 \text{ Hz} / 1 \times 10^6$) [24]. Dicha deriva

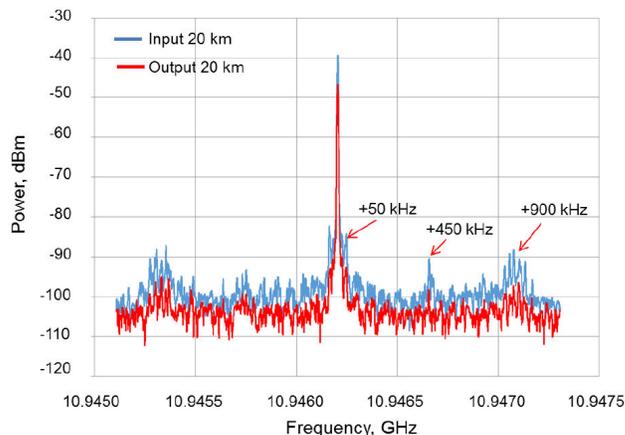


FIGURA 5. Espectro de la señal portadora y de sus componentes armónicas a la entrada y salida de un tramo de 20 km de longitud de fibra óptica.

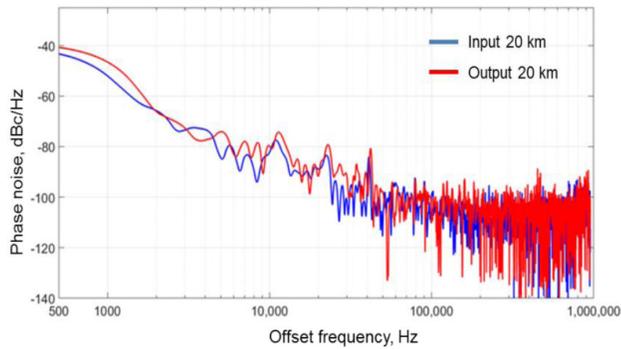


FIGURA 6. Ruido de fase a la entrada y salida del tramo de 20 km de longitud de fibra óptica.

puede disminuir significativamente con la estabilización de la temperatura y las condiciones ambientales de la cavidad de la fibra del láser.

Con la finalidad de estimar los cambios en los parámetros de la señal de RF, al pasar a través de 20 Km de longitud de fibra óptica, se midió el ruido de fase a la entrada y salida de dicha fibra. La Fig. 5 muestra el espectro de frecuencia, donde se observa la portadora y sus componentes armónicos a la entrada y salida del tramo de fibra óptica. Los picos de los componentes armónicos con mayor nivel se observan a ± 50 kHz, ± 450 kHz y ± 900 kHz a 45–50 dB por debajo del pico de la portadora. Estos niveles bajos de los componentes armónicos muestran muy buena pureza espectral. Comercialmente se reportan valores entre 30 y 60 dBc, según el rango de frecuencia de operación y un nivel superior a 0 dB de la portadora [24]. Experimentalmente, encontramos que el pico de la portadora permanece sin cambio en frecuencia, mientras que en amplitud se observa una atenuación entre 6–7 dB, que corresponde a las pérdidas asociadas a los 20 km de la fibra óptica y de las conexiones extras. Es importante señalar que, a la salida del tramo de fibra óptica, los niveles de los componentes armónicos caen prácticamente al mismo nivel del ruido de piso del espectro, por ello, son prácticamente despreciables.

En la Fig. 6 se muestra el ruido de fase de la señal portadora a 11 GHz a la entrada y salida del tramo de 20 km de longitud de fibra óptica, a un offset de frecuencia hasta 1 MHz. Se observa que el ruido de fase incrementa ligeramente, solo 1–2 dB, después de pasar a través del tramo de fibra óptica. En ambos casos se observa que el ruido de fase está por debajo -90 dBc/Hz para un offset de frecuencia superior a 10 kHz; este valor es razonable para aplicaciones de microondas [3-6,24]. En el experimento, el ruido de fase de la señal de batimiento está limitado principalmente por una condición de inestabilidad del ambiente en el laboratorio, porque los Stokes no pueden hacer un seguimiento rápido de alguna variación en la frecuencia del bombeo ocasionada por una variación en la temperatura. Otra importante fuente para

reducir el ruido de fase es reducir las pérdidas internas en la cavidad y mejorar los parámetros de control del sistema. De acuerdo con los resultados, se observa que el generador de la portadora que se propone puede adecuarse para aplicaciones de sistemas de fibra sobre radio.

En este artículo presentamos la generación de una señal portadora de microondas a ~ 11 GHz, la cual es resultado del batimiento entre las radiaciones ópticas del láser de bombeo y el primer Stokes. Sin embargo, al incrementar la potencia de bombeo, el primer Stokes comienza a operar como bombeo del segundo Stokes desfasado ~ 11 GHz del primero. Entonces, el segundo Stokes opera como bombeo del tercer Stokes y así sucesivamente. Usualmente se pueden obtener de 5–6 órdenes de Stokes en un láser de Brillouin de fibra óptica [25]. El batimiento de la señal entre las radiaciones de bombeo y el segundo Stokes, genera una señal de microondas a ~ 22 GHz; el batimiento entre el bombeo y el tercer Stokes genera una señal a 33 GHz y así sucesivamente.

4. Conclusión

En conclusión, se propuso un nuevo oscilador optoelectrónico para generar una señal portadora de microondas ultra estrecha y estable con bajo ruido de fase basado en SBS. La técnica efectiva y de bajo costo para la generación de la portadora utiliza como elemento clave un láser Brillouin sub-kHz de anillo de fibra óptica con estabilización activa y autoencadenamiento por inyección a su bombeo DFB. El láser Brillouin con anillo resonador de fibra óptica corta (FORR) resuena simultáneamente para las radiaciones de bombeo y de Stokes, generando un batimiento con un umbral de 2 mW, alta pureza espectral y bajo ruido de fase. El ancho completo del pico de batimiento a -3 dB respecto al nivel del pico máximo es ~ 300 Hz y la frecuencia del pico máximo es ~ 10.946 GHz, encontrándose sus armónicos parásitos más fuertes desplazados en ± 50 kHz, ± 450 kHz y ± 900 kHz a 45–50 dB por debajo del nivel pico principal. Su ruido de fase está por debajo -90 dBc/Hz, para un desplazamiento de frecuencia de la portadora de 10 kHz, después de pasar por la fibra óptica de prueba de 20 km de longitud, hace que la configuración propuesta sea prometedora para aplicaciones avanzadas de radio sobre fibra que necesitan una solución rentable.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por los proyectos: INFR-2016-01 No. 269927 de CONACYT, México. Russian Science Foundation (18-12-00457) y Russian Foundation for Basic Research (18-42-732001R-MK). J. L. Bueno Escobedo es patrocinado por CONACYT como posdoctorado.

1. C. Lim *et al.*, Evolution of radio-over-fiber technology, *J. Lightwave Technology*, **37** (2019) 1647.
2. R. Singh *et al.*, A review on radio over fiber communication system, *Int. J. Enhanced Research in Management & Computer Applications*, **6** (2017) 23.
3. J. Yao, Microwave photonics, *J. Lightwave Technol.* **27** (2009) 314.
4. M. Merklein *et al.*, Widely tunable, low phase noise microwave source based on a photonic chip, *Opt. Lett.* **41** (2016) 4633. <https://doi.org/10.1364/OL.41.004633>
5. Z. Xie *et al.*, Tunable dual frequency optoelectronic oscillator with low intermodulation based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator, *Opt. Express* **24** (2016) 30282. <https://doi.org/10.1364/OE.24.030282>
6. T. Schneider *et al.*, Generation of millimetre-wave signals by stimulated Brillouin scattering for radio over fibre systems, *Electronics Lett.* **40** (2004) 1500. <http://dx.doi.org/10.1049/el:20046461>
7. G. P. Agrawal, *Nonlinear fiber optics*, 3rd ed. (Academic Press, San Diego, 2001).
8. X. S. Yao, High-quality microwave signal generation by use of Brillouin scattering in optical fibers, *Opt. Lett.* **22** (1997) 1329. <https://doi.org/10.1364/OL.22.001329>
9. M. Shi *et al.*, Generation and phase noise analysis of a wide optoelectronic oscillator with ultra-high resolution based on stimulated Brillouin scattering, *Opt. Express* **26** (2018) 16113. <https://doi.org/10.1364/OE.26.016113>
10. M. Shi *et al.*, Brillouin-based dual-frequency microwave signals generation using polarization multiplexing modulation, *Opt. Express* **27** (2019) 24847. <https://doi.org/10.1364/OE.27.024847>
11. V. V. Spirin *et al.*, Intensity noise in SBS with injection locking generation of Stokes seed signal, *Opt. Express* **14** (2006) 8328. <https://doi.org/10.1364/OE.14.008328>
12. S. Preussler y T. Schneider, Stimulated Brillouin scattering gain bandwidth reduction and applications in microwave photonics and optical signal processing, *Opt. Eng.* **55** (2015) 031110. <https://doi.org/10.1117/1.OE.55.3.031110>
13. Y. Liu *et al.*, Single-longitudinal-mode triple-ring Brillouin fiber laser with a saturable absorber ring resonator, *J. Lightwave Technol.* **35** (2017) 1744. <https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2664071>
14. W. Itoh, Dual-microcavity narrow-linewidth Brillouin laser, *Optica* **2** (2015) 225. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.2.000225>
15. L. Rossi *et al.*, Analysis of enhanced-performance fibre Brillouin ring laser for Brillouin sensing applications, *Opt. Express* **27** (2019) 29448. <https://doi.org/10.1364/OE.27.029448>
16. V. V. Spirin *et al.*, Stabilizing DFB laser injection-locked to an external fiber-optic ring resonator, *Opt. Express* **28** (2020) 478. <https://doi.org/10.1364/OE.28.000478>
17. V. V. Spirin *et al.*, Single-mode Brillouin fiber laser passively stabilized at resonance frequency with self-injection locked pump laser, *Laser Physics Lett.* **9** (2012) 377.
18. C. A. López-Mercado *et al.*, Locking of the DFB laser through fiber optic resonator on different coupling regimes, *Opt. Commun.*, **359** (2016) 195. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.09.076>
19. V. V. Spirin *et al.*, Single cut technique for adjustment of doubly resonant Brillouin laser cavities, *Opt. Lett.* **38** (2013) 2528. <https://doi.org/10.1364/OL.38.002528>
20. D. A. Korobko *et al.*, Self-injection-locking linewidth narrowing in a semiconductor laser coupled to an external fiber-optic ring resonator. *Opt. Commun.*, **405** (2017) 253. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.08.040>
21. <http://www.corning.com/opticalfiber/index.as>
22. A. Done *et al.*, Active Frequency Stabilization Method for Sensitive Applications Operating in Variable Temperature Environments, *Adv. Elect. Comp. Eng.*, **18** (2018) 21. <https://doi.org/10.4316/AECE.2018.01003>
23. C. S. Park *et al.*, *Multiple RF-carrier Generation Using the Wavelength-dependent Stokes Shift and Selective Amplification of Stimulated Brillouin Scattering*, Int. Topical Meeting on Microwave Photonics (Conference 2005, Seoul, Korea, Korea). <https://doi.org/10.1109/MWP.2005.203612>
24. Microwave Signal Generators, Keysight Technologies <https://www.keysight.com/mx/en/home.html>
25. V. Spirin *et al.*, Optical locking of two semiconductor lasers through high-order Brillouin Stokes components in optical fiber. *Laser Physics*. **22** (2012) 760. <https://doi.org/10.1134/S1054660X12040214>