

## 基于受激布里渊散射的多波长光载波生成及应用

李奕晗<sup>1,2\*</sup>, 陈善卓<sup>1</sup>, 郭浩<sup>1</sup><sup>1</sup>北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191;<sup>2</sup>深圳北航新兴产业研究院, 广东 深圳 518063

**摘要** 微波光子和光通信等应用对多波长高相干的光载波有巨大需求。针对传统方案中载波频差与噪声难以兼顾的瓶颈, 本文介绍了基于共振泵浦的多波长共腔受激布里渊散射(SBS)激光技术。得益于共腔的激射结构、灵活的泵浦选择以及 SBS 对激光线宽的压窄效应, 该技术在生成频差可控、频相高相关的低噪光载波方面具有显著优势。本文结合已有和最新实验结果, 演示并验证了该技术在稳频低噪太赫兹载波生成、高速太赫兹通信、高效相干光通信等领域特定场景下的应用潜力。

**关键词** 光通信; 受激布里渊散射; 光纤激光器; 射频光子

**中图分类号** TN24 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL202249.1906003

## 1 引言

多波长光载波指的是在光频域内若干振荡频率不同的单频连续激光信号, 其主要的用户需求有二。一是在波分复用光通信中为数据信号提供光域的载频。这类应用普遍要求光载波的数量较多, 且对它们之间相干性的要求较低。常见光通信系统中的光载波阵列都由独立运行的单频激光器组成, 但近年来跨通道信号处理技术的发展提高了对载波间相干性的要求。二是在微波光子等应用中为微波、毫米波、太赫兹波等波段的拍频光生电载波提供光源。这类应用由于拍频的物理过程特性, 对光载波间的相干性和频差稳定性有着较高要求, 但除了多波段无线通信或雷达等特殊场景以外, 通常仅需要一对光载波。

针对上述两种主要应用需求的现有多波长光载波生成技术主要可分为图 1 所示的光频梳、光电振荡器与单频激光阵列。光频梳是在光频域上由一系列具有固定间隔的频率分量构成的光信号<sup>[1]</sup>, 按生成方式可分为谐振型与前馈型。谐振型光频梳的工作原理是在光谐振腔中由锁模、四波混频等效应产生多模振荡, 典型特征是具有较多的梳齿数量、较大的光谱覆盖范围以及较低的噪声。光信号向电信号转换过程中高达  $10^4$  的分频系数以及高品质的频率参考, 使得谐振型光频梳是超低噪声、超频稳微波信号合成的最佳方式<sup>[2]</sup>。基于光学超稳腔与稳频光梳, 高达 100 GHz 的微波频率合成已有报道, 其 10.5 GHz 的载波达到了约  $-150$  dBc/Hz (10 kHz 频偏) 的相位噪声与约

$10^{-15}$  的秒稳<sup>[3]</sup>; 但是谐振腔的存在使得这类光频梳的梳齿间距难以调整, 限制了微波频率合成的调谐性能, 同时, 庞大而复杂的参考与锁定模块也使其较难实现实际应用。与谐振型光频梳形成鲜明对比的是前馈型光频梳, 其工作原理是微波调制下的光域非线性边带生成<sup>[4]</sup>。由于梳齿间的频率间隔由调制微波信号决定, 前馈调制型光频梳光载波间的频差不仅能以 GHz 的频率进行调节, 而且较大的频率间隔可以支持通过光域滤波的方式选取高阶边带进行拍频, 从而生成超高频率的电信号。已有研究人员通过光电级联调制实现了超过 300 GHz 的频率合成, 并将其应用于超高速实时太赫兹无线通信等演示验证系统<sup>[5-6]</sup>。然而, 通过调制产生高阶边带在本质上仍是倍频过程, 生成的光载波的线宽(对应着生成微波的相位噪声)恶化与边带阶数(微波频率)呈平方关系, 有限的非线性转换效率也使得生成的光载波的信噪比受限, 无法输出频率特性优良的微波信号。

光电振荡器(OEO)于 20 世纪末由加州理工学院喷气动力实验室的 Yao 与 Maleki<sup>[7]</sup> 提出, 主要以高品质的一阶调制边带生成响应低噪单频微波合成需求。其典型结构与原理如图 1(c) 所示, 满足振幅和相位条件的微波信号在光电混合环路中反复振荡, 生成高品质的输出。由于使用了超低损耗的光纤作为储能部件, OEO 可以获得较长的储能时间, 支撑了线宽特性优良的光载波生成和对应超低相位噪声的微波生成。研究人员已在实验中实现了频率最高为 40 GHz、相位噪声最低为  $-139$  dBc/Hz (10 kHz 频偏, 约 10 GHz

收稿日期: 2022-05-18; 修回日期: 2022-06-27; 录用日期: 2022-07-11

基金项目: 国家自然科学基金 62171008, 61801014)

通信作者: \*yihanli@buaa.edu.cn

载波)的微波生成<sup>[8-9]</sup>,以及基于突破模场建立时间限制的新结构的线性调频信号生成<sup>[10]</sup>。然而,受限于核心器件特别是电学器件的带宽,OEO 在光载波频差范围(对应输出微波频率范围)等方面还面临较大挑战。

同时,光电混合环路的结构特点与光/电滤波器的实际性能使得 OEO 光载波间的频差稳定性与准确性难以得到保障,无法建立控制信号与输出频率间精准且可重复的对应关系。

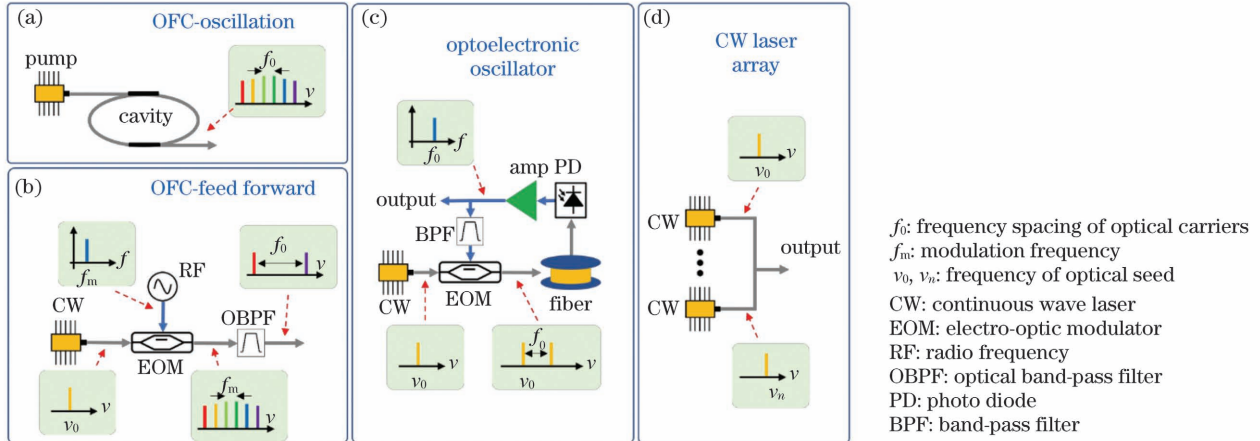


图 1 多波长光载波生成的主要技术途径。(a)(b)光频梳;(c)光电振荡器;(d)单频激光阵列  
Fig. 1 Main approaches for multi-wavelength optical carrier generation. (a)(b) Optical frequency comb (OFC); (c) optoelectronic oscillator; (d) single-frequency laser array

单频激光阵列的多波长光载波方案简单、易于实现,除了可在波分复用光通信中被广泛应用外,在微波信号生成方面也具有显著优势:1)输出信号的频率可覆盖微波甚至太赫兹频段;2)输出信号的相位噪声主要决定于激光的线宽,不随频率增大而显著恶化;3)光频域近乎所有的能量均用于光电转换,具有极高的能量利用率。基于双外腔激光器(ECL),研究人员在实验中已实现了光信噪比优于 40 dB 的 350 GHz 载波生成,并将其应用于复杂调制的太赫兹无线通信<sup>[11]</sup>。为了降低双波长激光之间的频漂以及精确控制频差,研究人员使用注入锁定与光电反馈等技术来增强双波长信号间的相干性,实现了 35 GHz 调谐范围、-95 dBc/Hz(10 kHz 频偏,45.9 GHz 载波)相位噪声、 $10^{-7}$  秒稳的微波频率合成<sup>[12]</sup>。但是,分立单频激光阵列的光载波振荡于不同的谐振腔,其频率与相位之间缺乏本征的关联机制,难以在不同的时间尺度下输出高相干的光载波。针对这一瓶颈,本文论述了一种基于受激布里渊散射(SBS)效应的多波长光载波生成方法<sup>[13]</sup>。该方法不仅可以在大频率范围内任意设

置光载波的个数与频差,还因共腔振荡和受激布里渊散射射线宽抑制效应而具备生成频相强相关的光载波的能力,可同时支撑高频率稳定与低相位噪声的光生电载波。稳频低噪太赫兹载波生成、高速太赫兹通信和高效相干光通信等方向的已有实验结果和最新的实验结果均可证实,这种多波长光载波生成方法在特定应用场景下可为相关系统带来明显的性能提升。

## 2 基本原理

### 2.1 多波长共腔受激布里渊散射激光

基于受激布里渊散射的共腔多波长光载波生成方法的基本原理如图 2 所示。光纤环腔在光频域内存在一系列等间隔的纵模,其模式间隔由环腔的自由光谱范围(FSR)决定。独立运行的  $N$  个单频连续激光器作为泵浦注入光纤环腔,在频率反馈控制模块的作用下分别与  $N$  个腔模式实现锁定。泵浦光与腔模式之间的共振会导致对应频率的光场强度在环腔中激增,进而以较小的泵浦光功率激发受激布里渊散射增益。在 1550 nm 波段的普通单模光纤中,受激布里渊散射

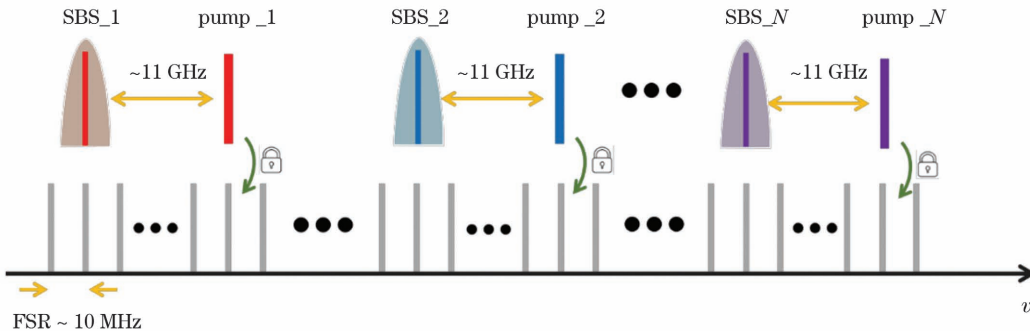


图 2 多波长光载波生成原理示意图  
Fig. 2 Illustration of principle of multi-wavelength optical carrier generation

增益谱宽约为 10 MHz, 出现在泵浦波长下频移约 11 GHz 处<sup>[14]</sup>。若此时增益谱内恰有光纤腔纵模, 则振荡激励条件得到满足, 在泵浦光注入的反方向形成受激布里渊散射激光。由于受激布里渊散射和高 Q 值( $10^9$ )光纤腔的等效滤波效应, 生成的受激布里渊散射激光将具有相较注入泵浦光更窄的线宽<sup>[15]</sup>。

从上述原理可以看出, 本文所提到的激光生成方式本质上并没有频率选择性或交叉调制效应, 因此可以通过并行注入多个泵浦来实现多波长的光载波输出, 也可以通过调整泵浦光之间的波长差来改变输出光载波间的频差。虽然泵浦的个数与波长的选择具有独立性, 但由于不同波长的光载波是在同一个谐振腔中通过受激布里渊散射增益形成的光场振荡, 因此多载波之间应具有稳定的频相关系, 即它们之间是相干的。这从原理上保证了这些光载波可以支撑后续的低噪电波生成等应用。

## 2.2 多波长光载波生成演示系统

本文介绍的多波长光载波生成方法的验证系统结构如图 3 所示, 演示的是双波长的光载波输出。两个窄线宽单频连续激光器(1550 nm 波段, 约 10 dBm 输出功率)通过 50/50 光纤耦合器、掺铒光纤放大器(EDFA)和光纤循环器注入一个由 90/10 光纤耦合器和单模光纤组成的光纤环腔中, 光纤环腔的长度约为 20 m, 对应约 10 MHz 的腔 FSR, 以保证任何一个受激布里渊散射增益谱中有且仅有一个腔模式。在光纤腔的透射端输入反馈控制模块, 以实现两个泵浦激光器与光纤腔的频率锁定。频率反馈控制使用的是标准的 PDH 锁定技术, 相关器件(如泵浦激光器后的相位调制器等)在图 3 中未标出。当两束泵浦光分别与光纤锁定时, 激增的腔内光场会激发受激布里渊散射增益, 在泵浦光的反方向形成受激布里渊散射激光, 并从环形器的端口 3 输出, 总体能量效率约为 50% (泵浦光功率约 10 dBm, 输出受激布里渊散射激光功率约 5 dBm)。整体系统均采用保偏结构, 以在最大程度上消除机械振动对系统的干扰。

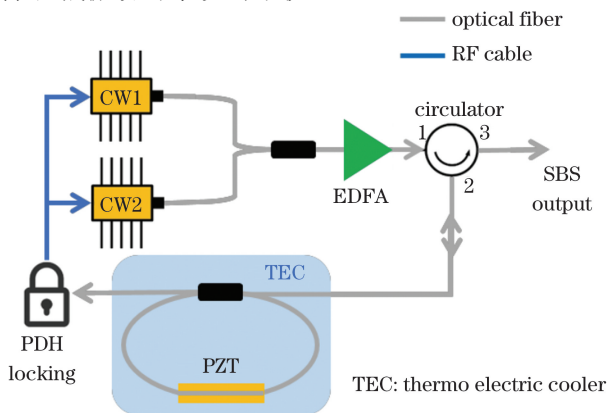


图 3 受激布里渊散射双波长光载波生成系统示意图  
Fig. 3 Schematic of simulated Brillouin scattering (SBS) dual-wavelength optical carrier generation system

由 2.1 节所述系统原理可知, 双波长光载波之间的频率差决定于对应光场振荡的光纤腔模式之间的频率差。因此, 在诸如稳频毫米波生成等对光载波频差有较高要求的应用场景中, 需要对光纤腔的模式频差, 即 FSR, 展开进一步的稳定控制。在图 3 所示的演示系统中, 双载波之间的频差通过光电探测器的拍频转化为电信号, 并与一个外部频率参考源进行比较, 将误差反馈到光纤腔长的促动器上。为了同时实现光纤腔 FSR 的快速和长效控制, 实验中设计了压电陶瓷(PZT)和温控两种光纤腔 FSR 反馈促动机制, 这两种机制分别通过机械(PZT)和热(温控/TEC)效应实现光纤腔长的伸缩, 完成输出双波长频差的精准控制。

## 3 多波长光载波的应用

### 3.1 稳频低噪太赫兹波生成

结合超大带宽的光电探测器, 多波长光载波的最直接应用之一就是高频微波的生成。生成系统结构相对简单, 如图 4(a) 所示, 直接将图 3 中生成的双波长光载波通入高速光电探测器, 在输出端即可获得频率为两光载波频差的电信号输出。实验中选取波长差约为 2.45 nm、对应频差约为 300 GHz 的两束泵浦激光, 光电探测器选用单行载流子型光电二极管(UTC-PD, NTT Electronics IOD-PMJ-13001)。在图 4(a) 中的 a 点对应生成的双波长受激布里渊散射激光的光谱图(由 Yokogawa AQ6370C 光谱仪测量)如图 4(b) 所示, 在图 4(a) 中的 b 点对应生成的太赫兹载波频谱图(由 R&S FSU26 频谱仪测量)如图 4(c) 所示, 测量所得载波频率约为 299.3 GHz。

为提高输出太赫兹载波的频率稳定性, 本课题组使用 2.2 节提到的光纤腔长反馈锁定方法等效地将频率参考源(Agilent N5181a)的频率稳定性通过光纤腔的 FSR 传导到输出的太赫兹载波上。通过使用模式为 Lambda、间隔为 1 s 的频率计数器(HP53132A)对频率锁定状态时反馈环内的基带信号进行频率测量, 以表征输出太赫兹信号的频率稳定性。在 60 min 的测量期间内, 基带信号的均方根(RMS)抖动仅为 0.47 mHz, 如图 5(a) 所示。此频率锁定模块的残余不稳定性用艾伦方差描述约为  $8 \times 10^{-12}$ , 可等效视为在 1 s 平均时间下约 0.4 mHz 的频率精度。如图 5(b) 所示, 将该频率精度对应到 300 GHz 的输出载波, 分数频率稳定性在 1 s 的平均时间下可达到  $10^{-15}$ , 并可进一步提升至约  $5 \times 10^{-17}$  (仅受限于反馈带宽)。

既然输出太赫兹载波的频率可以通过光纤腔的 FSR 受控于外接频率参考源, 那么理论上可以通过微调参考源的频率输出, 实现对输出太赫兹载波频率的精细控制。在验证实验中, 本课题组每隔 1 min 调整一次参考源的输出频率, 并一直记录对应太赫兹载波的频率。调频模式为: 首先以 10 mHz(参考源最低调频量)为步进上调频 2 次, 再先后进行一次 0.1 Hz 的

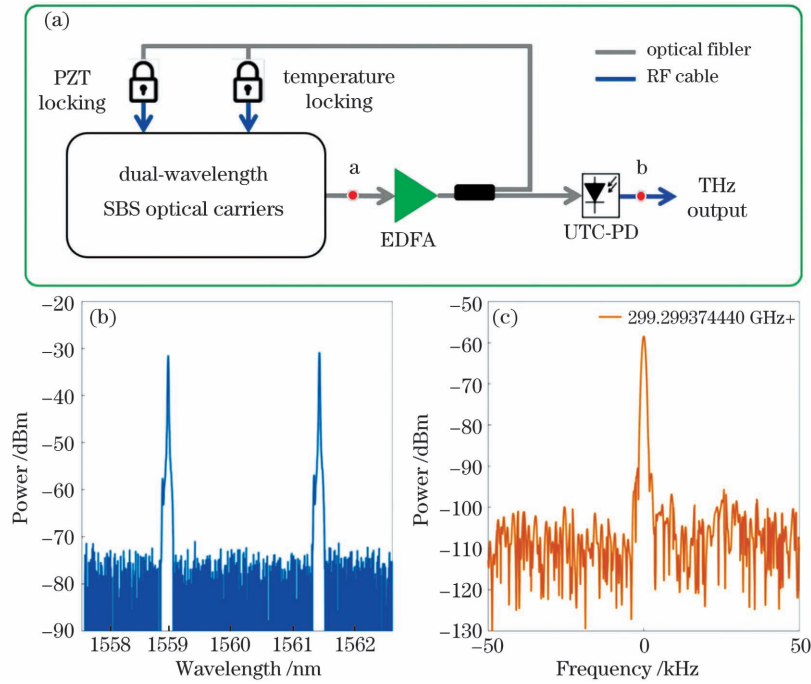


图 4 稳频低噪光生太赫兹载波。(a)实验装置示意图;(b)光载波光谱图;(c)太赫兹载波频谱图

Fig. 4 Frequency-stabilized low-noise optically generated terahertz carrier. (a) Experimental apparatus; (b) spectrum of optical carrier; (c) frequency spectrum of terahertz carrier

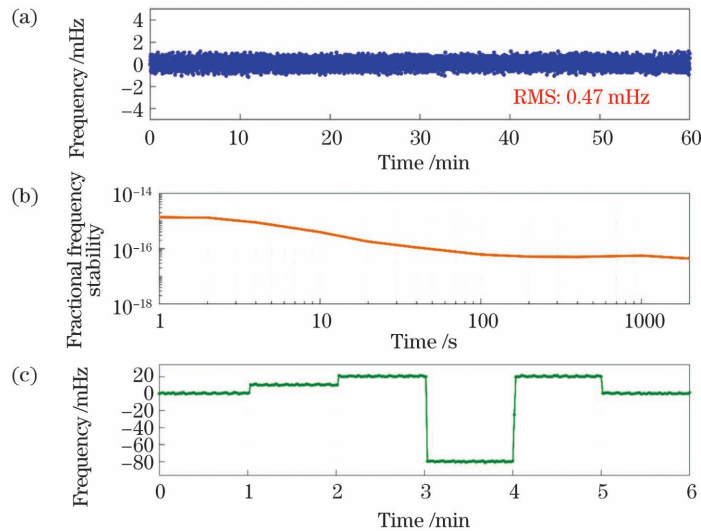


图 5 低噪太赫兹载波频率稳定性与微调能力,依据文献[13]重绘。(a)输出频率散点图;(b)艾伦方差图;(c)输出频率微调结果图  
Fig. 5 Frequency stability and tunability of low-noise THz carrier, reproduced from Ref. [13]. (a) Output frequency scatter diagram; (b) Allan deviation; (c) output frequency under fine tuning

下调频、0.1 Hz 的上调频以及 20 mHz 的下调频。对应的太赫兹载波频率如图 5(c)所示,此结果验证了本文介绍的基于多波长受激布里渊散射激光的太赫兹载波生成系统精确调整输出频率的能力。

本课题组又进一步验证了输出太赫兹信号的相位噪声特性,验证方案如图 6(a)所示,通过一个由参考频率源(R&S SMF100A)、倍频器和混频器组成的下变频模块将太赫兹载波转换到基频,使用频率分析仪(Keysight N9030B)进行相位噪声测量。图 6(b)中描绘出了测量所得的 300 GHz 载波的相位噪声曲线以及对应 25 GHz 频率参考的相位噪声曲线,可以看出,

在 10 kHz 频偏以上,相位噪声的测量受限于 25 GHz 频率参考信号。因此,此种方法仅可以在 1~10 kHz 频偏之间真实地反映太赫兹载波的相位噪声(1 kHz 以下受限于频率控制的反馈环路)。为了消除频率参考的相位噪声带来的测量噪底,本课题组通过调整其中一台泵浦激光器的波长,使输出频率降为 11 GHz,这样就可以直接用相位噪声分析仪测量相位噪声(不需要通过下变频模块)。此方法测得的相位噪声曲线如图 6(b)所示,此时相位噪声进一步下降至受限于测量仪器底噪的 -130 dBc/Hz (1 MHz 频偏)。对比 300 GHz 和 11 GHz 载波的相位噪声曲线可以发现,

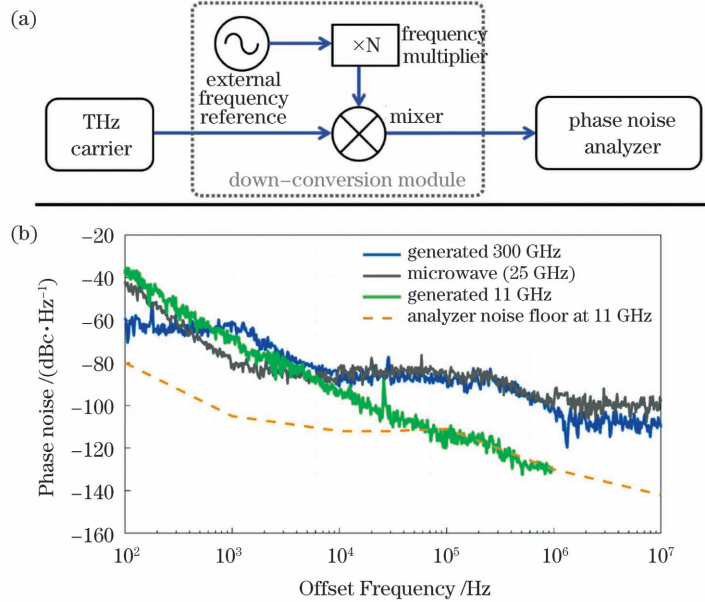


图 6 光生太赫兹载波相位噪声测量。(a)实验装置示意图;(b)测量的相位噪声曲线

Fig. 6 Phase noise measurement of optically generated terahertz carrier. (a) Schematic of experimental apparatus; (b) measured phase noise curves

除了伺服转角导致的些许偏差外,二者在 1~10 kHz 的频偏之间几乎重合,验证了本文所描述的双波长拍频方法生成载波的相位噪声与频率无关的优良特性。同时,300 GHz 和 25 GHz 载波相位噪声曲线在 1 MHz 频偏以上约 10 dB 的强度差也显示了本方案因使用了两个单频激光拍频而获得的高信噪比。

### 3.2 高效光子太赫兹通信

光子太赫兹通信相较于电子方案最大的优势是可以利用光通信器件大带宽的本征优势最大限度地将太赫兹频段广阔的频谱资源转化为通信容量,光载波质量的高低是光子太赫兹通信系统传输能力的决定性因素之一<sup>[16]</sup>。本文多波长光载波生成系统在光子太赫兹应用方向的演示实验如图 7 所示。在发射端,频率间隔在目标波段(~300 GHz)的受激布里渊散射双波长光载波经过光放大器和波分解复用器(WDM)后分成上下两路,其中上路作为光“基带载波”通过宽带的

电光 I-Q 调制器接收数据信息,数据为随机数序列,调制格式为 QPSK,波特率为 5~15 Gbaud。承载了数据信息的上路光“基带”信号与下路光“通带载波”信号合束后通入高速单行载流子光电二极管,输出载波频率为光载波频差(~300 GHz)的太赫兹数据传输信号通过喇叭天线辐射到自由空间。在接收端,接收天线捕捉到的太赫兹信号经过下变频模块(包含微波频率源、微波放大器、倍频器和二次谐波混频器)转换到基带,使用实时示波器和计算机等效实现模数转换、采样与信号处理。此外,实验中还使用了电光频率梳作为对照光载波源,其工作原理可简单概括为使用单频微波源对单频光载波进行非线性多谐波调制,并使用光滤波器选择出对应的高阶边带,以实现光载波生成。

图 8(a)中列出了此光子太赫兹无线通信演示系统的误码率(BER)随太赫兹发射功率变化的曲线图,其中包含本文所述受激布里渊散射多波长光载波源以

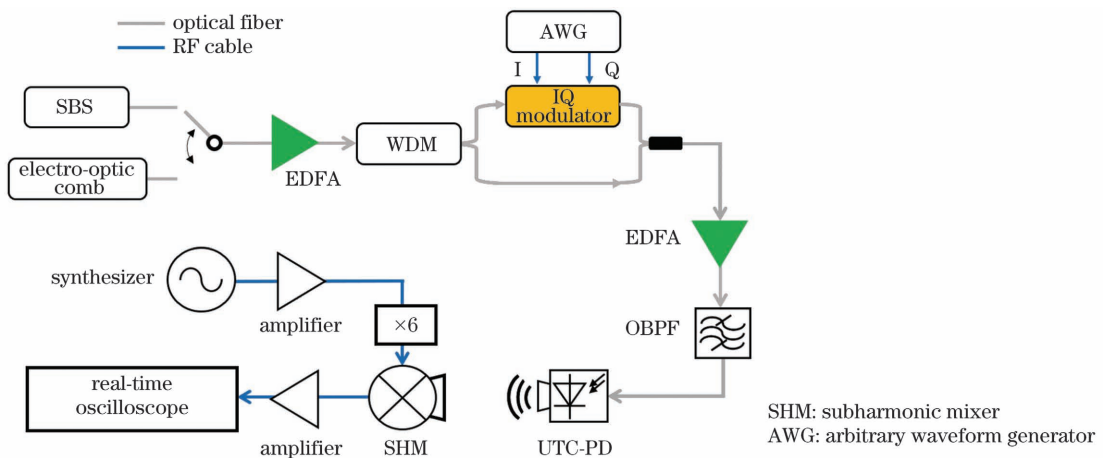


图 7 光子太赫兹无线通信演示系统示意图,依据文献[17]重绘

Fig. 7 Experimental setup for photonic terahertz wireless communication demonstration, reproduced from Ref. [17]

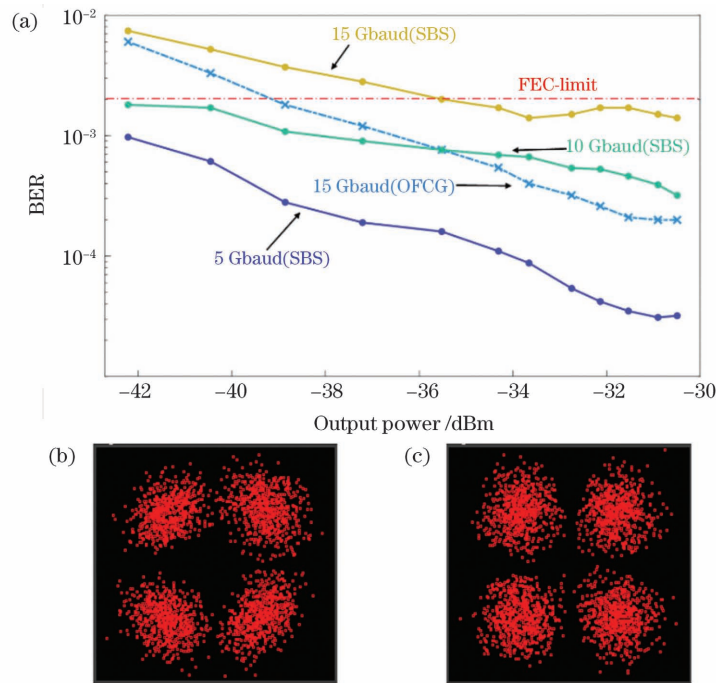


图 8 光子太赫兹无线通信系统传输性能对比,依据文献[17]重绘。(a)不同波特率下两光源误码率对比;(b)电光梳光载波源星座图;(c)受激布里渊散射光载波源星座图

Fig. 8 Transmission performance comparison of photonic terahertz communication systems, reproduced from Ref. [17].

(a) Bit-error-rate (BER) comparison for two light sources under different baud rates; (b) constellation with electro-optic comb as light source; (c) constellation with SBS carriers as light source

及电光梳光载波源在不同波特率下的传输结果。从图中可以清晰地看出,在 5 Gbaud 波特率下,达到相同的误码率时,使用受激布里渊散射光载波源的发射功率要比使用电光梳光载波源的发射功率低 6 dB。其主要原因是:受激布里渊散射光载波源的输出仅包含两个光载波,经光电探测器转换后具有极高的能量转换效率,生成的太赫兹信号的信噪比高;而电光梳由于高阶调制本征的低效特性以及滤波过程的能量损耗,对应的太赫兹信号信噪比偏高。此外,图 8(a)中还展示了受激布里渊散射光载波源在波特率为 10 Gbaud 和 15 Gbaud 时的误码率曲线,误码率均低于前向纠错码所要求的阈值。

实验中还进一步对比了传统电光梳光载波源和新型受激布里渊散射光载波源在通信星座图上的区别。图 8(b)和图 8(c)展示了在 5 Gbaud 波特率和前向纠错极限情况(误码率为  $2 \times 10^{-3}$ )下,电光梳光载波源和受激布里渊散射光载波源对应的接收端星座图。其中,图 8(b)所示的电光梳光载波源星座图呈现出明显的椭圆特性,其主要原因是电光梳的高阶调制过程放大了调制信号的相位噪声,使得对应生成的太赫兹信号的相位噪声发生明显恶化,并且这种恶化是随着频率的增大呈平方增加的。对比来看,受激布里渊散射光载波源的星座图仍为典型的圆形,表明这种光载波源与对应的太赫兹载波具有较好的相位噪声特性。值得注意的是,虽然图 8(b)和图 8(c)中星座图的扩散程度大体相同,但受激布里渊散射光载波源的发射功率

比电光梳光载波源的发射功率约高 6 dB,故在同等发射功率下受激布里渊散射光载波源对应的星座图的各星座点将更为集中。由于星座点的扩散程度主要取决于信号的幅度噪声,因此,可通过将所有光纤光学器件进行统一封装从而降低环境对光系统的扰动来进一步提高星座点的集中程度。

### 3.3 参量共享相干多波长光通信

本文介绍的受激布里渊散射多波长光载波生成技术还可以直接应用于光通信,通过参量共享的方式降低数字信号处理的复杂度<sup>[18-19]</sup>,演示系统如图 9(a)所示。数据信息在发射端通过 I-Q 电光调制器被加载到多波长光载波上,并被发送到接收端进行波分解复用。接收端使用另一套受激布里渊散射多波长光载波作为本振,经过同样的波分解复用后与对应波长信道的数据信号进行拍频相干接收,同时进行后续的采样与数字信号处理。实验中选取的调制格式为 QPSK,调制波特率为 20 MBaud。通信实验中使用的双波长光载波的光谱图在图 9(a)中以插图形式给出,光载波源三波长输出的光谱图展示于图 9(b)。

实验中分别采用传统的各通道独立数字处理方法和多通道参数共享方法对相干接收得到的数据进行恢复。在传统的各通道独立数字处理方法中,各信道独立地进行标准的相干光通信后处理流程,包括 I-Q 正交化补偿(IQ OC)、时序校准(CS)、均衡(EQ)、频偏估计(FOE)和相位估计(PE)。演示实验中两通道发射端与接收端之间通过数字信号处理估计出的相位抖动

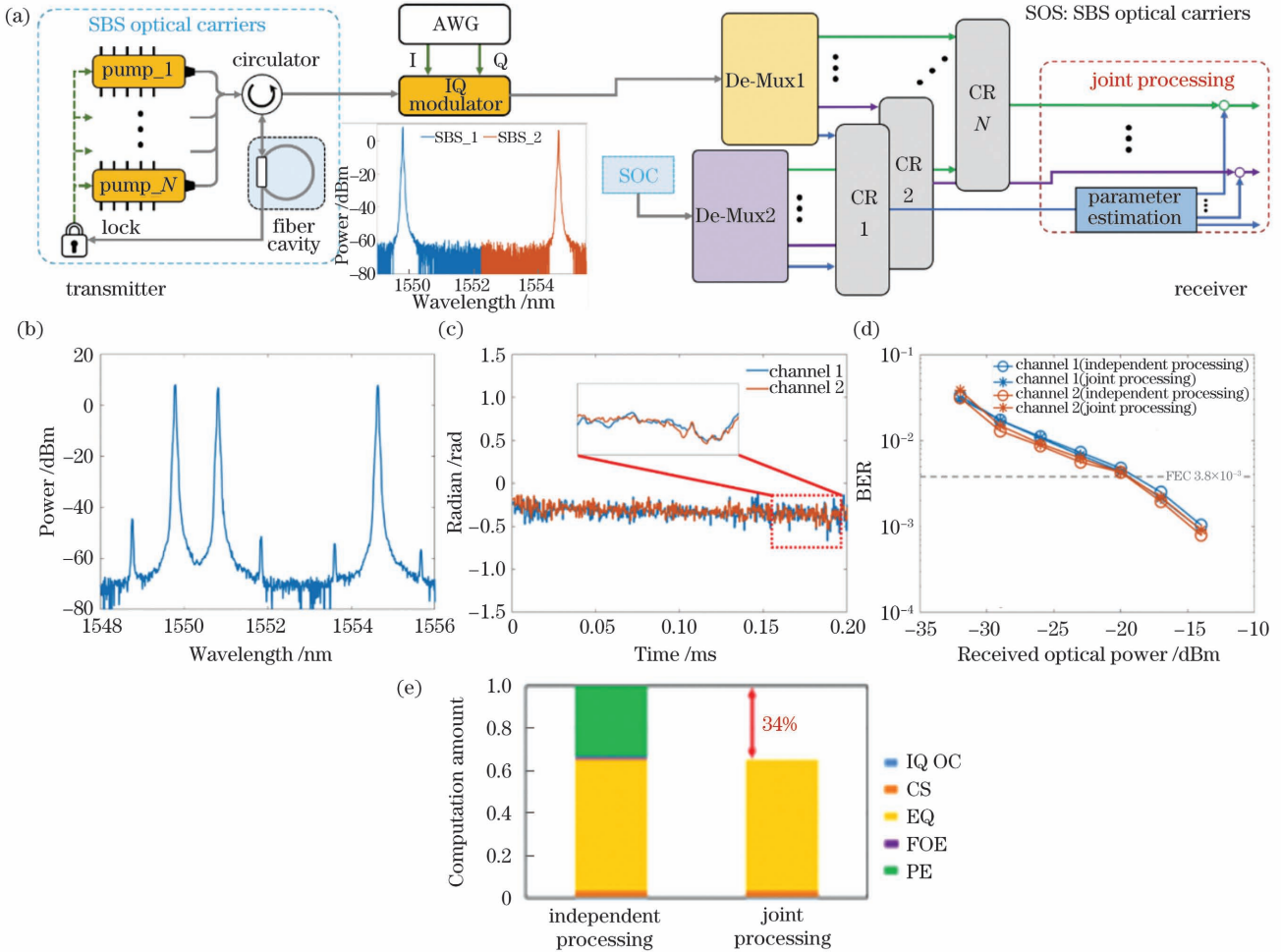


图 9 参数共享多波长光通信系统。(a)实验系统示意图,插图为双波长受激布里渊散射光载波光谱图;(b)三波长受激布里渊散射光载波光谱图;(c)两信道相位补偿对比图;(d)各通道独立处理和共享处理误码率对比;(e)独立处理与共享处理运算量对比  
Fig. 9 Multi-wavelength optical communication system with parameter sharing. (a) Schematic of experimental apparatus, where the inset is spectrum of dual SBS carriers; (b) spectrum of tri-wavelength SBS carriers; (c) phase compensation comparison of two communication channels; (d) bit-error-rate (BER) comparison for both channels under independent and joint processing; (e) comparison of computation amount required by independent and joint processing

如图 9(c)所示,从图中可以清楚地看到,尽管两通道的相位抖动均随时间发生明显变化,但两通道之间的变化基本保持一致,相关系数约为 70%~90%。这种现象可以归结于受激布里渊散射光载波源各光载波之间的高相干性,即,光场振荡发生在同一个谐振腔(光纤环腔)中,因此大部分频相噪声均为共模噪声。在多通道参数共享方法中,一个信道的频偏和相位补偿处理将使用另一个信道单独处理产生的各项关键参数,从而将该信道对应步骤的迭代优化需求完全消除。图 9(d)展示了两个信道的传输误码率随光信号强度的变化趋势,从该图中可以清晰地看出,无论是使用传统的各通道独立数字处理方法还是使用多通道参数共享方法,对应信道的传输误码率均保持一致。但图 9(e)所示数据清楚地展现了多通道参数共享方法的整体运算量要比传统方案少 34%,验证了基于本文介绍的高相干多波长光载波源和多通道参数共享方法可使光通信数字信号处理复杂度大幅降低。

## 4 结 论

本文介绍了一种基于共振泵浦的多波长共腔受激布里渊散射激光技术。得益于共腔的激射结构、灵活的泵浦选择以及受激布里渊散射对激光线宽的压窄效应,该技术相较于现有的多波长光载波生成方案,具有频差可控、频相高相关、低噪声等优势。在相关应用领域的演示实验中,该技术实现了高达 300 GHz 的低噪稳频太赫兹载波生成,相位噪声和频率稳定度分别为  $-90$  dBc/Hz(10 kHz 频偏)以及  $10^{-15}$  秒稳;在光子太赫兹无线通信应用中,该技术抑制了载波相位噪声并提高了信噪比,使得无线传输的发射功率需求降低了 6 dB,实现了 300 GHz 波段 30 Gbit/s 的实时高速通信。本文验证了跨通道参数共享式波分复用相干光通信技术在非光频梳光源系统中的适用性,实现了数字信号处理复杂度的降低(相比传统方法降低了 34%),亦从应用方面反证了该多波长光源的高相干性。本文所介绍的方法具有系统结构简单、功能灵活

等特点,结合近年来高速发展的集成光子技术,预期可为宽带频率合成、高速高效通信等相关应用场景提供低尺寸功耗、高实用性的相干多波长光载波源。

### 参 考 文 献

- [1] Diddams S A. The evolving optical frequency comb[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B51-B62.
- [2] Diddams S A, Jones D J, Ye J, et al. Direct link between microwave and optical frequencies with a 300 THz femtosecond laser comb[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(22): 5102-5105.
- [3] Fortier T M, Rolland A, Quinlan F, et al. Optically referenced broadband electronic synthesizer with 15 digits of resolution[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(5): 780-790.
- [4] Murata H, Morimoto A, Kobayashi T, et al. Optical pulse generation by electrooptic-modulation method and its application to integrated ultrashort pulse generators[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(6): 1325-1331.
- [5] Nagatsuma T, Oogimoto K, Yasuda Y, et al. 300-GHz-band wireless transmission at 50 Gbit/s over 100 meters[C]//2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), September 25-30, 2016, Copenhagen, Denmark. New York: IEEE Press, 2016.
- [6] Jia S, Yu X B, Hu H, et al. THz wireless transmission systems based on photonic generation of highly pure beat-notes[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(5): 7905808.
- [7] Yao X S, Maleki L. Optoelectronic microwave oscillator[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1996, 13(8): 1725-1735.
- [8] Peng H F, Guo R, Xu Y C, et al. Ultra-low phase noise and frequency agile X-band frequency synthesizer based on a phase locked optoelectronic oscillator[C]//2019 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum, April 14-18, 2019, Orlando, FL, USA. New York: IEEE Press, 2019.
- [9] Shi M Y, Yi L L, Wei W, et al. Generation and phase noise analysis of a wide optoelectronic oscillator with ultra-high resolution based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16113-16124.
- [10] Hao T F, Cen Q Z, Dai Y T, et al. Breaking the limitation of mode building time in an optoelectronic oscillator[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 1839.
- [11] Lu Z J, Wang S W, Li W, et al. 26.8 m 350 GHz wireless transmission of beyond 100 Gbit/s supported by THz photonics[C]//2019 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), November 2-5, 2019, Chengdu, China. New York: IEEE Press, 2019.
- [12] Suelzer J S, Simpson T B, Devgan P, et al. Tunable, low-phase-noise microwave signals from an optically injected semiconductor laser with opto-electronic feedback[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(16): 3181-3184.
- [13] Li Y H, Rolland A, Iwamoto K, et al. Low-noise millimeter-wave synthesis from a dual-wavelength fiber Brillouin cavity[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(2): 359-362.
- [14] Boyd R W. *Nonlinear optics* [M]. 4th ed. Amsterdam: Academic Press, 2020.
- [15] Loh W, Green A A S, Baynes F N, et al. Dual-microcavity narrowlinewidth Brillouin laser[J]. *Optica*, 2015, 2(3): 225-232.
- [16] Nagatsuma T, Ducournau G, Renaud C C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(6): 371-379.
- [17] Yi L, Iwamoto K, Yamamoto T, et al. 300-GHz-band wireless communication using a low phase noise photonic source[C]//2019 49th European Microwave Conference (EuMC), October 1-3, 2019, Paris, France. New York: IEEE Press, 2019: 816-819.
- [18] Lundberg L, Mazur M, Mirani A, et al. Phase-coherent lightwave communications with frequency combs[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 201.
- [19] 瞿思炜, 杨彦甫, 向前, 等. 频偏条件下的低复杂度主从载波盲相位搜索算法[J]. *光学学报*, 2021, 41(17): 1706003.  
Qu S W, Yang Y F, Xiang Q, et al. Low-complexity blind phase search algorithm for master-slave carrier under frequency offset conditions [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(17): 1706003.

## Generation and Application of Multi-Wavelength Optical Carriers Based on Stimulated Brillouin Scattering

Li Yihan<sup>1,2\*</sup>, Chen Shanzhuo<sup>1</sup>, Guo Hao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Electrical and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

<sup>2</sup> Shenzhen Institute of Beihang University, Shenzhen 518063, Guangdong, China

### Abstract

**Objective** Multi-wavelength optical carriers play a critical role in applications such as wavelength-division multiplexing (WDM) optical commutation, photonic generation of radio-frequency signals, and photonic wireless communications. Conventional approaches are limited by either the insufficient coherence between optical carriers (*e. g.*, using an independent-running laser array) or the poor flexibility in choosing the number of optical tones and their spacing in the spectral domain, such as in an optical frequency comb. In this study, we present a technique for generating highly coherent multi-wavelength optical carriers and verify the superiority of the synthesized signals through demonstrative applications in low-noise THz-wave generation, photonic THz wireless communication, and jointly processed WDM optical communication.

**Methods** For a single-wavelength output, a continuous-wave pump laser is frequency-locked to an optical cavity consisting of a fiberized coupler and a spool of standard single-mode fiber. As the frequency of the pump laser is in resonance with one of the longitudinal modes, the optical field inside the optical cavity accumulates exponentially,



reaching the threshold of the stimulated Brillouin scattering (SBS), which would otherwise require a much higher pump power if the pump laser is not locked to the cavity mode. A Brillouin spectral gain would appear  $\sim 10$  GHz redshifted from the pump wavelength, and if the free spectral range (FSR) of the cavity matches the width of the spectral gain, only one cavity mode will start to oscillate and produce a narrow-linewidth SBS output in the direction opposite to the pump. For a multi-wavelength output, pump lasers with the desired wavelengths and spectral separations are pumped into the same optical cavity. Through independent frequency locking, the one-to-one correspondence described above allows the generation of the same number of SBS signals while maintaining the frequency separation of the pumps. Coherence between the output optical tones is ensured because the oscillations originate from the same optical cavity. The linewidth of the output is significantly reduced compared with that of the pump owing to the equivalent spectral filtering from the SBS gain and high  $Q$  of the optical cavity.

**Results and Discussions** The proposed multi-wavelength SBS optical carrier generation technique is validated in three different applications. In synthesizing frequency-stabilized low-noise THz waves, two optical carriers separated by  $\sim 300$  GHz are generated by the proposed SBS system and subsequently transformed to a THz wave through a large-bandwidth uni-travelling-carrier photodiode, as shown in Fig. 4. To stabilize the frequency of the THz wave, the FSR of the SBS fiber cavity is locked to an external frequency reference through both mechanical and thermal feedback, resulting in an root-mean-square (RMS) frequency drift of only 0.47 mHz in 60 min and Allen deviation of  $\sim 10^{-15}$  at an average time of 1 s, as shown in Fig. 5. Moreover, by comparing the electrical waves generated at 300 and 11 GHz, the phase noise is confirmed to not be governed by the quadratic dependence on the frequency and stays at the same level of  $\sim -90$  dBc/Hz at 10 kHz offset (Fig. 6). In real-time photonic THz wireless communication, two-wavelength optical carriers generated by the proposed SBS system are used to replace the conventional light source generated by the electro-optic frequency comb. As the bit-error-rate traces and constellation diagrams shown in Fig. 8 indicate, the novel multi-wavelength SBS optical carriers reduce the required THz power at the transmitter by 6 dB at the same baud and bit error rates as the conventional source and remove the ellipse of the constellation diagram owing to the improved phase noise. Multi-wavelength optical carriers are also applied in the WDM optical communication demonstration, where the inter-channel joint signal processing technique is adopted. Owing to the high coherence between the SBS tones, the independent phase estimations of each communication channel standard in the WDM post signal processing can be replaced by only one estimation of a master channel shared with other channels, effectively reducing the computation requirements by 34%, as shown in Fig. 9. Such alleviation of the digital signal processing (DSP) complexity can considerably boost the communication capacity in scenarios where the computation power is restricted.

**Conclusions** This study proposes a method for generating multi-wavelength optical carriers. Owing to the in-resonance pumping of the high- $Q$  optical fiber cavity, arbitrary selection of pumping wavelength, and spectral filtering of the SBS effect, this technique is advantageous compared with the conventional approaches in terms of coherence, phase noise, and adjustability. In the experiments, the proposed method allows the synthesis of frequency-stabilized low-noise THz waves, whose phase noise does not scale up quadratically with the output frequency, and the efficient photonic THz wireless data transmission, where the required transmitted power decreases by 6 dB. The optical carriers generated by the proposed method also enable the application of joint DSP in WDM optical communication, which has only been demonstrated with light sources from an optical frequency comb. The high performance and low system complexity of the proposed method are expected to assist in the development of research fields such as broadband signal synthesis and high-efficiency communication, where highly coherent, narrow-linewidth optical carriers are desired.

**Key words** optical communication; stimulated Brillouin scattering; fiber lasers; radio-frequency photonics