

基于 DDMZM 和 SBS 窄带光子滤波的镜像抑制微波光子混频器

牛广鹏*, 潘炜, 李沛轩, 白文林

西南交通大学信息科学与技术学院, 四川 成都 611756

摘要 设计并实验验证了一种基于双驱马赫-曾德尔调制器(DDMZM)和受激布里渊散射(SBS)窄带光子滤波的新型镜像抑制微波光子混频器结构。将射频(RF)和本振(LO)信号分别输入至 DDMZM 上下臂的射频端口,控制偏置电压,使得由 RF 和 LO 信号所引起的光边带之间满足等效相位调制关系,以抑制由 RF 同 LO 光边带拍频产生的带内干扰中频(IF)信号。进一步地,借助 SBS 损耗谱的窄带光子滤波特性,将有用 RF 光边带同 LO 光边带之间的等效相位调制关系转换为强度调制,实现了有用 IF 信号的产生。实验结果表明:该混频器的镜像抑制比(IRR)可达 43 dB,在 6~20 GHz 的 RF 信号以及 0.5~1.5 GHz 的 IF 信号工作频段,系统的 IRR 性能可分别保持在 35 dB~40 dB 的水平上。

关键词 光通信; 微波光子混频器; 双驱动马赫-曾德尔调制器; 受激布里渊散射; 镜像抑制

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1206002

Image Rejection Microwave Photonic Mixer Based on DDMZM and SBS Narrow-Band Photonic Filtering

Niu Guangpeng*, Pan Wei, Li Peixuan, Bai Wenlin

*School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University,
Chengdu, Sichuan 611756, China*

Abstract This study proposes and experimentally demonstrates a novel image rejection microwave photonic mixer structure based on a dual-driven Mach-Zehnder modulator (DDMZM) and stimulated Brillouin scattering (SBS) narrow-band photonic filtering. In this structure, the radio frequency (RF) and local oscillator (LO) signals are input to the RF ports of the DDMZM on the upper and lower arms, respectively. The optical sideband caused by the RF and LO signals satisfies the equivalent phase modulation relation by bias voltage control; hence, the in-band interference intermediate frequency (IF) signals generated by the frequency beating of the RF and LO optical sidebands can be rejected. Furthermore, with the narrow-band photonic filtering characteristic of the SBS loss spectrum, a useful IF signal is generated by converting the equivalent phase modulation to the intensity modulation relation between the useful RF and LO optical sidebands. The experimental results show that the image rejection ratio(IRR) of this mixer can reach 43 dB. The IRR performance of the system can be maintained at a 35 dB–40 dB level in the operating frequency band of the 6–20 GHz RF signal and the 0.5–1.5 GHz IF signal.

Key words optical communications; microwave photonic mixer; dual-driven Mach-Zehnder modulator; stimulated Brillouin scattering; image rejection

OCIS codes 060.4510; 060.5625; 290.5900

收稿日期: 2020-06-15; 修回日期: 2020-07-04; 录用日期: 2020-07-20

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2203204)、国家自然科学基金(61775185, 61922069)、四川省国际科技合作重点项目(2019JDJQ0022)

* E-mail: niuguangpeng@foxmail.com

1 引 言

混频器在现代通信中发挥着重要的作用,通过本振(LO)信号,可以将接收到的射频(RF)信号转换到中频(IF)频段^[1],以便于后续的分析 and 处理;也可将中频信号转换到射频频段^[2],以发挥高频段大带宽的优势。传统的电混频器因其工作带宽有限且隔离度不高^[3],不能很好地应对未来通信向更高频段发展所带来的挑战。微波光子混频器具有隔离度高、带宽范围大、抗电磁干扰等优点^[4-5],能够和其他的光子系统进行融合,应用于多普勒频移测量^[6]、激光三维成像^[7]、微波光子相移及雷达^[8-9]等方面,充分发挥了微波光子系统的优势^[10]。具有镜像(IM)抑制功能的微波光子混频器是其中一个重要研究方向。

镜像抑制微波光子混频器按其工作原理主要可以分为两类^[11]。一类参考了镜像抑制电混频器中常用的哈特雷结构^[12-18],先构造出一个 I/Q 微波光子混频器,然后将两路正交的中频信号通过一个 90°电混合器,从而达到镜像抑制的目的。如:Tang 等^[12]利用微波光子相移器实现了 I/Q 混频;Li 等^[13]通过级联相位调制器(PM)和偏振调制器(PoIM)构造出 I/Q 混频结构;Tang 等^[16]利用一个光 90°混合器实现了 I/Q 混频。这一类混频器都具有非常好的镜像抑制效果,其中有些还具有较好的可重构性。由于使用了 90°电混合器,此类混频器的信号带宽会受到一定的限制。还有一类混频器是采用微波光子滤波或预滤波来辅助实现镜像抑制^[19-20]。如:Kong 等^[19]采用级联相位调制器和马赫-曾德尔调制器(MZM)的方式使得 LO 边带和 RF 边带呈等效相位调制关系,并利用受激布里渊散射(SBS)效应的增益谱和衰减谱形成微波光子滤波来完成对镜像信号的抑制。该混频器有较好的镜像抑制和调谐能力,然而级联调制器结构存在结构复杂、系统损耗大等问题,同时 SBS 增益谱引入的自发辐射噪声^[21]会恶化系统的噪声性能。Albert 等^[20]采用 SBS 的衰减谱作为一个陷波滤波器,直接将 IM 边带滤除来实现镜像抑制。和文献[19]相比,该方案避免了 SBS 增益谱噪声,且采用单个集成双偏振调制器简化了系统结构,但其输入 RF 信号频率需大于布里渊频移,无法覆盖较低频段。

本文设计并实验验证了一种基于双驱动马赫-曾德尔调制器(DDMZM)和 SBS 窄带光子滤波的镜像抑制微波光子混频结构。该混频器使用单个 DDMZM 来同时调制 RF 和 LO 信号以提高系统的

集成度,降低系统的光功率损耗。结构中借助了 SBS 衰减谱的窄带光子滤波特性,避免了由 SBS 增益谱引入的自发辐射噪声。控制偏置电压,使得 RF 和 LO 光边带之间满足等效相位调制关系,实现对镜像干扰的抑制。

2 工作原理

2.1 镜像抑制混频器结构

本文设计的镜像抑制微波光子混频器结构如图 1 所示,它分为上下两个部分。由窄线宽激光器(TLS)产生的光载波,经过光耦合器(OC)均分成上下两路。在上路,光载波经过偏振控制器(PC)进入 DDMZM,通过 DDMZM 将有用 RF 信号、IM 干扰信号和 LO 信号调制到光载波上,并调节偏置电压 V_{DC} 控制 LO 边带的相位,然后已调光信号经过光隔离器(ISO)进入高非线性光纤(HNLF)。在下路,光载波经过 PC 进入抑制载波双边带调制(CS-DSB)模块,由可调光滤波器(TOF)将上边带滤出,并通过光放大器(EDFA)放大功率之后作为 SBS 泵浦光。下路产生的 SBS 泵浦光经过环形器进入 HNLF,最后环形器的输出信号进入光电探测器(PD)拍频得到中频信号。

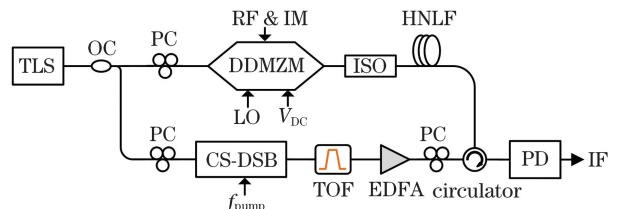


图 1 镜像抑制微波光子混频器结构图

Fig. 1 Structure schematic diagram of the image rejection microwave photonic mixer

2.2 镜像抑制原理

设光载波的幅度和角频率分别为 E_0 、 ω_c 。射频信号、镜像干扰信号及本振信号的角频率分别为 ω_{RF} 、 ω_{IM} 和 ω_{LO} ，它们的调制指数分别为 β_{RF} 、 β_{IM} 和 β_{LO} ，其中调制指数的计算公式为 $\beta = \pi V / V_\pi$ 。控制 DDMZM 的下臂偏置电压 $V_{DC} = V_\pi / 2$ ，从而对下臂光信号产生 $\pi/2$ 的附加相移。故 DDMZM 输出光信号的表达式可以写为

$$E(t) \propto E_0 \exp(j\omega_c t) [\exp(j\beta_{RF} \cos \omega_{RF} t) + \exp(j\beta_{IM} \cos \omega_{IM} t) + \exp(j\beta_{LO} \cos \omega_{LO} t) \exp(j\frac{\pi}{2})]. \quad (1)$$

在小信号调制条件下利用雅可比式将(1)式展

开^[22],并忽略高阶边带,然后通过 SBS 衰减谱衰减 负一阶 RF 边带后,可得

$$E(t) \propto E_0 \exp(j\omega_c t) \left[J_0(\beta_{RF}) + J_0(\beta_{IM}) + jJ_0(\beta_{LO}) + J_1(\beta_{RF}) \exp\left(j\omega_{RF} t + j\frac{\pi}{2}\right) + J_1(\beta_{RF}) A(\omega_{RF}) \exp\left(-j\omega_{RF} t + j\frac{\pi}{2}\right) + J_1(\beta_{IM}) \exp\left(j\omega_{IM} t + j\frac{\pi}{2}\right) + J_1(\beta_{IM}) \exp\left(-j\omega_{IM} t + j\frac{\pi}{2}\right) + J_1(\beta_{LO}) \exp(j\omega_{LO} t + j\pi) + J_1(\beta_{LO}) \exp(-j\omega_{LO} t + j\pi) \right], \quad (2)$$

式中 $J_n(\beta)$ 为第一类 n 阶贝塞尔函数, $A(\omega_{RF})$ 为布里渊衰减系数^[17]。从 (2) 式可知,已调光信号中正负一阶 RF 边带和 IM 边带的相位均为 $\pi/2$,而正负一阶 LO 边带的相位均为 π ,如图 2(a)

所示。SBS 衰减谱对负一阶 RF 边带的衰减如图 2(c) 所示。

将 SBS 作用后的光信号注入 PD 拍频,则 PD 在中频处输出电信号的表达式可以表示为

$$i(t) \propto R J_1(\beta_{RF}) J_1(\beta_{LO}) \left\{ A(\omega_{RF}) \cos\left[(\omega_{RF} - \omega_{LO})t + \frac{\pi}{2}\right] + \cos\left[(\omega_{RF} - \omega_{LO})t - \frac{\pi}{2}\right] \right\} + R J_1(\beta_{IM}) J_1(\beta_{LO}) \left\{ \cos\left[(\omega_{LO} - \omega_{IM})t + \frac{\pi}{2}\right] + \cos\left[(\omega_{LO} - \omega_{IM})t - \frac{\pi}{2}\right] \right\}, \quad (3)$$

式中 R 为 PD 的响应度。从 (3) 式可以看出:由正负一阶 IM 边带和 LO 边带拍频产生的一对 IF 信号是等幅反相的,故它们可以相互抵消,如图 2(b)、(d) 中的圆形箭头所示;而由正负一阶

RF 边带和 LO 边带拍频产生的一对 IF 信号反相但不等幅,故得以保留,如图 2(d) 中的方形箭头所示。这样就实现了对 IF 信号中镜像干扰成分的抑制。

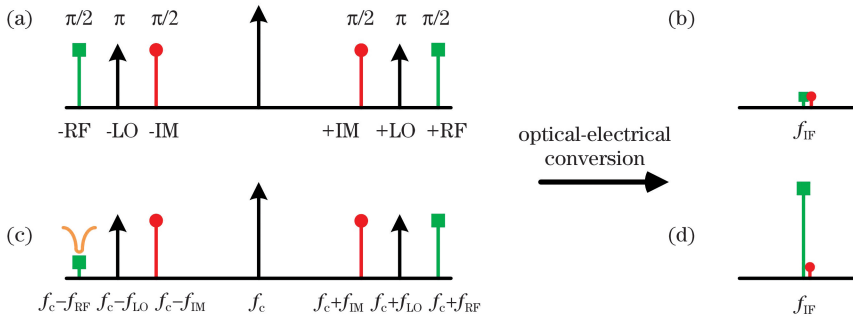


图 2 镜像抑制原理示意图。(a) DDMZM 输出光边带;(b)SBS 滤波前的中频信号;(c) SBS 滤波后的光边带;(d) SBS 滤波后的中频信号

Fig.2 Schematic of image rejection principle. (a) Optical sideband of the DDMZM output; (b) IF signal before SBS filtering; (c) optical sideband after SBS filtering; (d) IF signal after SBS filtering

2.3 射频调谐范围分析

本文设计的镜像抑制微波光子混频器具有很大的 RF 频率调谐范围,但是当待混频的 RF 信号频率较低时也有一些问题需要注意。假定混频器工作时 RF 信号的频率大于 LO 信号的频率,在这个条件下对低 RF 频率时混频器的工作情况进行分析。

先考虑只含一阶光边带的情况。给定一个 IF 频率 f_{IF} ,且任给一个 RF 频率 f_{RF} 时,LO 频率为 $f_{LO} = f_{RF} - f_{IF}$,IM 频率为 $f_{IM} = f_{RF} - 2f_{IF}$ 。一般

应有 $f_{IM} > 0$,即 $f_{RF} > 2f_{IF}$ 。如图 3(a)所示,当 $f_{IM} \leq f_{IF}$ 时,IM 边带和光载波拍频所得的信号频率小于等于 IF 频率,无法简单地用低通滤波器滤除,故应有 $f_{IM} > f_{IF}$,即 $f_{RF} > 3f_{IF}$,也就是说,混频器工作时,RF 信号频率应大于 3 倍中频频率。

再考虑含有二阶镜像边带的情况。二阶镜像频率为 $2f_{IM} = 2f_{RF} - 4f_{IF}$,通过推导可以得知二阶镜像边带的相位为 π 。当 $3f_{IF} < f_{RF} < 4f_{IF}$ 时,如图 3(b) 所示,此时二阶 IM 边带和一阶 LO 及 RF

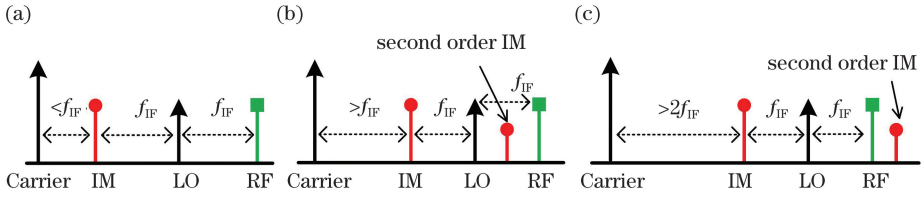


图 3 不同 RF 频率下光边带示意图。(a) $2f_{IF} < f_{RF} < 3f_{IF}$; (b) $3f_{IF} < f_{RF} < 4f_{IF}$; (c) $4f_{IF} < f_{RF} < 5f_{IF}$
 Fig. 3 Schematic of optical sidebands at different RF frequencies. (a) $2f_{IF} < f_{RF} < 3f_{IF}$; (b) $3f_{IF} < f_{RF} < 4f_{IF}$; (c) $4f_{IF} < f_{RF} < 5f_{IF}$

边带均能拍频产生频率小于 f_{IF} 的信号,无法通过低通滤波器滤除。当 $f_{RF} = 4f_{IF}$ 时,二阶 IM 边带和一阶 RF 边带重合。当 $4f_{IF} < f_{RF} \leq 5f_{IF}$ 时,如图 3(c)所示,二阶 IM 边带和一阶 RF 边带可拍频产生频率小于等于 f_{IF} 的信号,无法通过低通滤波器滤除。

以上三种情况均会导致混频器不能正常工作,因此应有 $f_{RF} > 5f_{IF}$,即当二阶边带功率不可忽略时,为了保证混频器能够正常工作,RF 信号的频率应大于 5 倍中频频率。

3 实验研究和结果分析

为了对所设计的混频器进行进一步的研究和分析,基于图 1 所示的结构搭建了实验链路。实验中激光器(Teraxion, PS-TNL)输出光的中心波长为 1550 nm,功率为 12 dBm,线宽小于 1 kHz。由任意波形发生器(Keysight, M9502A)和信号源(Anritsu, MG3694B)分别产生 RF 和 LO 信号注入 DDMZM(Fujitsu, FTM7937EZ)中。在下路中采用一个偏振调制器结合偏振控制器和起偏器作为 CS-DSB 调制模块。所用高非线性光纤的布里渊频移 f_B 约为 9.073 GHz。实验中产生的 SBS 泵浦光功率约为 11 dBm。输出光信号经环形器进入 PD(Agilent, 11982A)拍频后,通过信号分析仪(Anritsu, MS2840A)观察输出中频信号的情况。

首先把 RF 信号的频率设置为 16 GHz,功率设为 3.9 dBm,LO 信号的频率设置为 15 GHz,功率为 10 dBm,则中频为 1 GHz,IM 干扰频率为 14 GHz。此时施加在偏振调制器上的泵浦频偏应按照 $f_{pump} = f_{RF} + f_B$ 的关系设为 25.073 GHz,然后通过光滤波器滤出上光边带作为 SBS 泵浦光。此时 SBS 衰减谱的中心频率恰好对准负一阶 RF 边带,从而对其功率进行衰减。实验测得混频器输出的中频信号如图 4 所示,其中 RF 信号混频得到的中频信号功率约为 -40 dBm,IM 干扰所得的中频信号功率约为

-83 dBm,故此时混频器的镜像抑制比(IRR)约为 43 dB,转换效率约为 -44 dB。

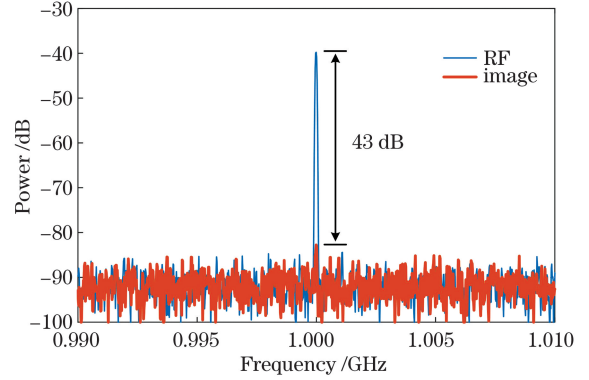


图 4 RF 和 IM 信号混频后的电谱
 Fig. 4 Electrical spectra of RF and IF signals after mixing

由于所设计的混频器利用了 SBS 效应,因此 SBS 泵浦光功率对混频器的镜像抑制性能有重要的影响。下面将研究 SBS 泵浦光的功率为 2.85 dBm、4.06 dBm、6.62 dBm、8.86 dBm、11.64 dBm 时的情况。在不同的 SBS 泵浦功率下,混频器的镜像抑制比变化情况如图 5 所示。随着 SBS 泵浦功率的增大,混频器 IRR 也相应增大。并且因为采用了 HNLF 作为 SBS 介质,当 SBS 泵浦功率低至 2.85 dBm 时,混频器仍可以有 30 dB 以上的镜像抑制比。

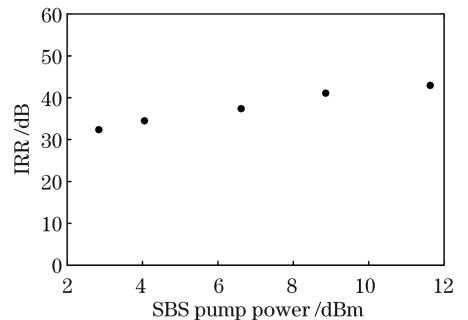


图 5 不同 SBS 泵浦功率时的 IRR
 Fig. 5 IRR at different SBS pump powers

该混频器工作时需要调节 DDMZM 的偏置电压,使 LO 边带的相位为 π 。但是当偏置电压漂移时正、负 IM 边带产生的 IF 信号之间会出现相位不平衡,影响混频器的镜像抑制比。对此采用 VPI Photonics 软件进行了仿真,研究了这种相位不平衡对 IRR 的影响,其结果如图 6 所示。当相位不平衡度为 0° 时,混频器 IRR 最大,此时 IF 信号中的 IM 干扰成分功率基本接近噪声本底,如图 4 所示。当相位不平衡度在 5° 以内增大时,IRR 显著下降。因此若要提高混频器的 IRR 稳定性,可通过加装反馈回路来控制 DDMZM 的偏置电压。

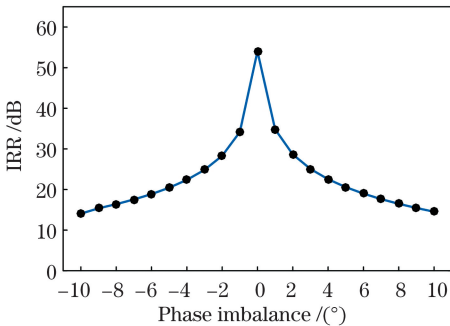


图 6 IRR 随相位不平衡度变化情况的仿真结果

Fig. 6 simulation results of IRR versus the degree of phase imbalance

该混频器工作时输入 RF 信号的功率对 IRR 和转换增益的影响如图 7 所示。图 7(a)显示,当输入 RF 信号的功率增大时,IRR 也随之增大。这是因为 RF 功率增大会引起已调光信号中 RF 边带功率增大,导致输出 IF 信号的功率增大,而 IF 信号中 IM 干扰成分基本不变。图 7(b)为混频器的转换增益随着输入 RF 功率的变化情况,从图中可以看出转换增益随输入 RF 功率增大略微下降,没有明显变化。这是因为在小信号调制下 $J_1(\beta)$ 的导数随调制指数 β 变大而变小,使得 RF 信号的功率变大时,RF 边带功率虽然不断增大但趋势变缓。

接下来对该混频器的调谐性进行了研究,其中包括 RF 频率和 IF 频率两方面的调谐性。

首先研究了 RF 频率的调谐性。将 IF 固定为 1 GHz,调谐 RF 在 6~20 GHz 范围内的变化,观察 IRR 和转换增益的变化情况,分别如图 8(a)、(b)所示。从图 8(a)可以看出,当 RF 频率变化时,混频器的镜像抑制比在 40 dB 上下浮动。图 8(b)所示为转换增益随 RF 频率的变化情况,当输入 RF 频率变化时,转换增益呈下降趋势。这种情况应当是调制器的调制效率随输入 RF 频率增大而降低所致。

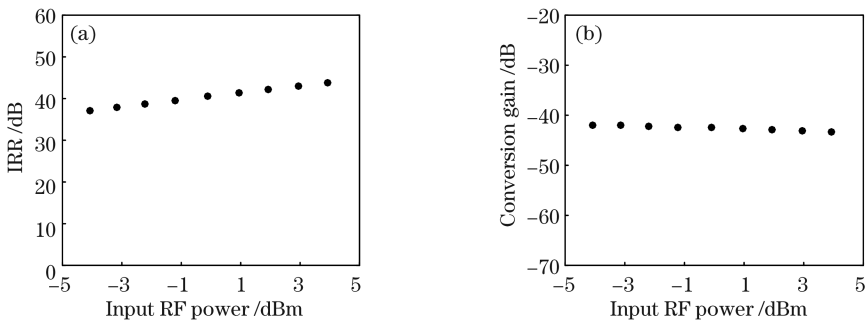


图 7 IRR 和转换增益随输入 RF 功率的变化。(a) IRR;(b)转换增益

Fig. 7 IRR and conversion gain versus input RF power. (a) IRR; (b) conversion gain

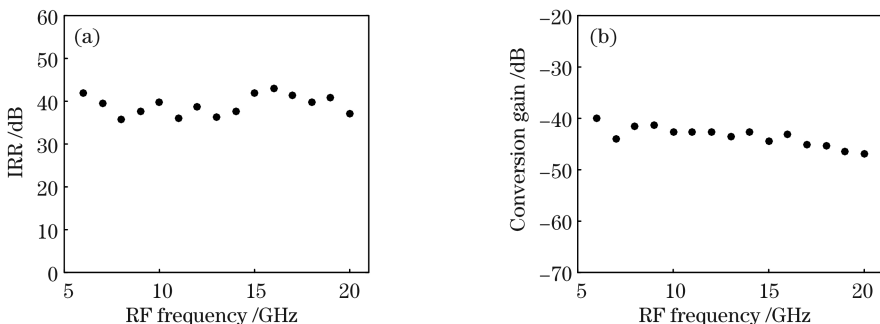


图 8 IRR 和转换增益随 RF 频率的变化。(a) IRR;(b)转换增益

Fig. 8 IRR and conversion gain versus RF frequency. (a) IRR; (b) conversion gain

将 RF 频率固定为 16 GHz, 在 14.5~15.5 GHz 范围内调谐 LO 频率, 使得 IF 在 0.5~1.5 GHz 范围内变化, 观察 IRR 随中频频率的变化情况, 此时混频器的镜像抑制比如图 9 所示。当 IF 频率变化时, 大多数情况下混频器的 IRR 能保持在 40 dB 以上。

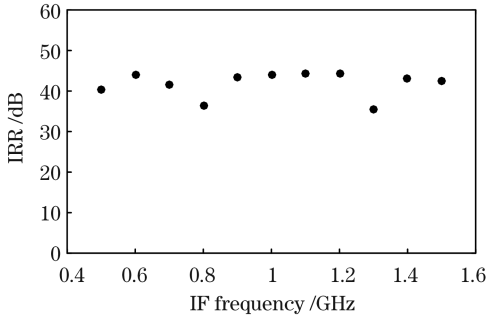


图 9 IRR 随 IF 频率的变化情况
Fig.9 IRR versus IF frequency

4 结 论

基于 DDMZM 和 SBS 窄带光子滤波设计并实验验证了一种镜像抑制混频器结构。该结构使用单个 DDMZM 将 RF 和 LO 信号调制到光域, 通过控制偏置电压使 RF 和 LO 光边带满足等效相位调制关系, 实现了对 IM 干扰的抑制。借助 SBS 衰减谱, 对有用 RF 和 LO 光边带进行相位调制到强度调制关系的转换, 实现了有用 IF 信号的生成。该混频器具有结构紧凑的特点, 同时可避免 SBS 增益谱引入的自发辐射噪声。实验结果表明, 该混频器 IRR 可达 43 dB。通过调节 SBS 泵浦频偏, 实现了 RF 信号 6~20 GHz 范围的调谐。在 0.5~1.5 GHz 的 IF 信号工作频段, IRR 保持在 40 dB 的水平上。

参 考 文 献

- [1] Wang Y X, Li J N, Wang D Y, et al. Ultra-wideband microwave photonic frequency downconverter based on carrier-suppressed single-sideband modulation [J]. *Optics Communications*, 2018, 410: 799-804.
- [2] Yin C J, Li J Q, Li B Y, et al. Microwave photonic frequency up-converter with frequency doubling and compensation of chromatic-dispersion-induced power fading [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 1-7.
- [3] Chan E H W, Minasian R A. Microwave photonic downconverter with high conversion efficiency [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(23): 3580-3585.
- [4] Huang C J, Chan E H W, Albert C B. A compact photonics-based single sideband mixer without using high-frequency electrical components [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(4): 1-9.
- [5] Li P X, Pan W, Zou X H, et al. High-efficiency photonic microwave downconversion with full-frequency-range coverage [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(4): 1-7.
- [6] Chen W, Wen A J, Li X Y, et al. Wideband Doppler frequency shift measurement and direction discrimination based on a DPMZM [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 1-8.
- [7] Bu Y M, Zeng Z Y, Du X P, et al. Research progress of photoelectric mixing technology in laser three-dimensional imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(8): 080002. 卜禹铭, 曾朝阳, 杜小平, 等. 激光三维成像中光电混频技术的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(8): 080002.
- [8] Li Q, Du C, Li X, et al. Microwave photonic down-conversion system based on stimulated Brillouin scattering effect [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0701006. 李强, 都聪, 李想, 等. 基于受激布里渊散射效应的微波光子下变频系统 [J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0701006.
- [9] Li C X, Zhang B F, Lu L, et al. Microwave photonic frequency conversion and phase-shifting technology of photoelectric oscillator loop [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0101001. 李诚鑫, 张宝富, 卢麟, 等. 光电振荡环路的微波光子变频与移相技术研究 [J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0101001.
- [10] Capmany J, Mora J, Gasulla I, et al. Microwave photonic signal processing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(4): 571-586.
- [11] Zhu D, Pan S L. Photonics-based microwave image-reject mixer [J]. *Photonics*, 2018, 5(2): 6.
- [12] Tang Z Z, Pan S L. Image-reject mixer with large suppression of mixing spurs based on a photonic microwave phase shifter [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(20): 4729-4735.
- [13] Li P X, Pan W, Zou X H, et al. Image-free microwave photonic down-conversion approach for fiber-optic antenna remoting [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2017, 53(4): 1-8.
- [14] Gao Y, Wen A, Jiang W, et al. All-optical and broadband microwave fundamental/sub-harmonic I/Q down-converters [J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 7336-7350.
- [15] Lipkowitz S T, Horton T U, Murphy T E.

- Wideband microwave electro-optic image rejection mixer [J]. *Optics Letters*, 2019, 44 (19): 4710-4713.
- [16] Tang Z, Pan S. Reconfigurable microwave photonic mixer with minimized path separation and large suppression of mixing spurs [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(1): 33-36.
- [17] Chen W J, Zhu D, Xie C X, et al. Microwave channelizer based on a photonic dual-output image-reject mixer [J]. *Optics Letters*, 2019, 44 (16): 4052-4055.
- [18] Xiao K, Jin X F, Jin X D, et al. Tunable OEO-based photonic RF receiver with image frequency rejection [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(8): 2127-2131.
- [19] Kong X, Yu Y, Tang H T, et al. Microwave photonic image-reject mixer based on a tunable microwave photonic filter with high rejection [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(6): 1-11.
- [20] Albert C B, Huang C J, Chan E H W. Brillouin-assisted notch filtering based all-optical image rejection mixer [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(2): 1-12.
- [21] Feng C, Preussler S, Schneider T. Sharp tunable and additional noise-free optical filter based on Brillouin losses [J]. *Photonics Research*, 2018, 6 (2): 132-137.
- [22] Jiang H Y, Yan L S, Pan W, et al. Ultra-high speed RF filtering switch based on stimulated Brillouin scattering [J]. *Optics Letters*, 2018, 43 (2): 279-282.