

# 基于单光频梳的卫星通信多频段变频方法

林 涛, 赵尚弘, 朱子行, 李 轩, 郑秋容, 屈 坤, 胡大鹏

空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077

**摘要** 提出一种基于单光频梳的简单、灵活和稳定的变频方法。该方法使用了双偏振正交移相器, 该调制器是一种集成调制器, 集成了两个双平行马赫-曾德尔调制器(DPMZM), 其中一个 DPMZM 作为光频梳产生器, 另一个进行载波抑制单边带调制产生单边带信号。从该调制器输出的信号是一个正交的耦合信号, 在偏振控制器和偏振片的控制下, 被转化为一个具有固定偏振角的信号, 最后送入光电探测器实现微波信号的产生。仿真结果表明, 通过适当调整该集成调制器中 6 个直流偏置点和外接的移相器, 可以实现多频段变频。比如 C 波段 3.8 GHz 的信号可以被变频到 X, Ku, K 和 Ka 波段; X 波段 9.6 GHz 的信号可以被下变频到 C 波段同时也可以被上变频到 Ku, K, Ka 波段。除此之外, 整个系统体现出对直流偏置点漂移的良好适应性, 具有很好的可操作性。

**关键词** 光学器件; 微波光子; 载波抑制单边带调制; 光频梳; 多频段变频; 变频性能

**中图分类号** TN929 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0623002

## Multi-Band Frequency Conversion Scheme Based on Single Optical Frequency Comb for Satellite Communication

Lin Tao, Zhao Shanghong, Zhu Zihang, Li Xuan, Zheng Qiurong, Qu Kun, Hu Dapeng

*College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China*

**Abstract** A simple, flexible and stable frequency conversion approach based on a single optical frequency comb (OFC) is proposed. In this method, a dual-polarization quadrature phase shift keying modulator (DP-QPSK) is employed. The DP-QPSK is an integrate modulator which integrates two dual-parallel Mach-Zehnder modulators (DPMZM). One DPMZM is working as an OFC generator. Another is working as carrier suppressive single sideband modulator to generate single sideband signal. An orthogonal and coupled signal is output from this modulator. This signal is converted to a signal with fixed polarization angle under the control of polarization controller and the polarizer. After the signal is put into the photoelectric detector, the microwave signal is generated. The simulation results show that multi-band frequency conversion can be realized by properly adjusting six direct current (DC) bias points of the proposed integrate modulator and disjunctive phase shifter. For example, the signal at C band 3.8 GHz can be converted to X, Ku, K and Ka bands. The signal at X band 9.6 GHz can be down-converted to C band or up-converted to Ku, K, Ka bands. In addition, the system emerges a good adaption to the DC bias points drafting and has a good operability.

**Key words** optical devices; microwave photonics; carrier suppression single sideband modulation; optical frequency comb; multi-band frequency conversion; frequency conversion performance

**OCIS codes** 230.3990; 060.4510; 130.3120

## 1 引 言

卫星通信急需一种容量大, 瞬时带宽宽, 并且能够处理更高频率, 覆盖更多波段信号的射频系统<sup>[1]</sup>。在传统的方法中, 为了解决频率拥塞, 轨道资源限制的问题, 通信卫星采用多天线的方式, 同时发射不同频率进

**收稿日期:** 2016-11-14; **收到修改稿日期:** 2017-01-17

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(61571461, 61401502)、陕西省自然科学基金(2016JQ6008)

**作者简介:** 林 涛(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事微波光子方面的研究。E-mail: ltzhineng@126.com

**导师简介:** 赵尚弘(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光空间信息技术方面的研究。

E-mail: zhaoshangh@aliyun.com(通信联系人)

行不同业务的通信,频率范围都在 C, Ku, Ka 甚至是 V 波段之间<sup>[2]</sup>。因此,设计一种能够实现多频段之间通信的射频系统成为人们关注的热点。

在一个多频段射频系统中,发射端、接收端、本振和处理器都有不同的频率需求<sup>[3]</sup>。最直接的方法就是在系统中集成多个独立的信号源,产生不同频率以满足需求,但是这种方法的代价很大而且使得系统十分复杂。在电的领域解决多频段通信问题,面临着代价高、体积大、结构复杂、效率低、带宽受限、灵活度受限等问题<sup>[4-5]</sup>。然而在光的领域,就可以有效克服这些问题。实现微波信号的产生与频率转换的技术有很多<sup>[5-11]</sup>。光频梳技术的产生,使得变频的方法得到更大的发展。许多基于光频梳的下变频方案被提出<sup>[12-18]</sup>。在文献<sup>[12-17]</sup>中,转换后的频率点落在所需要的频段上,但是这些方法都受到了光频梳频率间隔的限制,最终导致无法满足多频段通信的需求。为了克服这种缺点,基于双光频梳的方法被提出<sup>[18]</sup>。该方法会产生两个具有不同中心频率,不同频率间隔的光频梳,并进行耦合。通过波分复用技术,同时滤出多对边带,各对边带相互拍频,最后可以得到不同频段的频率。但是,对于双光频梳系统,整体结构很复杂,而且很难控制。同时,光滤波器的使用也限制了该系统的调谐性。

本文提出了一种基于双偏振正交移相器(DP-QPSK)集成调制器的灵活变频方案。这种方案使得结构更加简单,可以在无光滤波器的条件下实现单一频率同时向多频段变频。同时,系统性能更加稳定,频率调谐范围更大。仿真结果表明,本方案可以实现任意频率的上变频和下变频,而且结构简单,易于控制。

## 2 基本原理

图 1 展示了变频方案的结构图。本方案由一个激光器(LD),一个 DP-QPSK 调制器、一个移相器(PS)、一个偏振控制器(PC)、一个偏振片(POL)、一个掺铒光纤放大器(EDFA)和一个光电探测器(PD)组成。DP-QPSK 是一种集成调制器,由两个双平行马赫-曾德尔调制器(DPMZM)、一个光功分器、一个偏振合束器(PBC)和一个 90°偏振旋转器组成。由激光器产生的激光信号  $E_{in}(t) = E_{in} \cos(2\pi f_c t)$  在该调制器中被分成两路。x 路信号通过 DPMZM<sub>x</sub> 被所接收到的射频信号进行射频(RF)调制,该信号可表示为  $V_{RF}(t) = V_{RF} \cos(2\pi f_{RF} t)$ 。DPMZM<sub>x</sub> 是一个光频梳产生器<sup>[19]</sup>,所产生的光频梳中每根梳齿的频率可以表示为

$$f_{OFC}(i) = f_c + i f_{RF}, \quad (1)$$

式中,  $f_{RF}$  是射频信号的频率,参数  $i$  ( $-n \leq i \leq n$ ) 表示频梳(边带)相对于中心频率  $f_c$  的阶数,  $n$  是所产生光频梳的最大边带数。

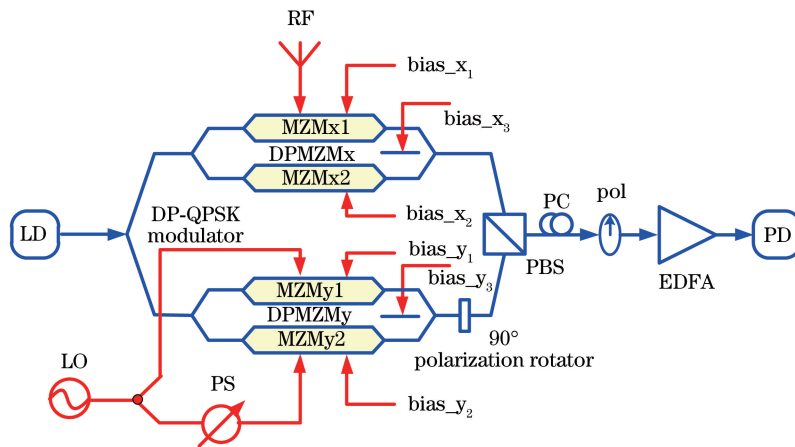


图 1 变频方案结构图

Fig. 1 Schematic diagram of frequency conversion

y 路信号在 DPMZM<sub>y</sub> 中进行载波抑制单边带调制(CS-SSB)。一个本振信号 LO 被功分器分成两路,下路信号接一个移相器。因此,这两路电信号可以分别表示为

$$V_1(t) = V_{LO} \sin(2\pi f_{LO} t), \quad (2)$$

$$V_2(t) = V_{LO} \sin(2\pi f_{LO} t + \Delta\varphi), \quad (3)$$

式中,  $V_{LO}$  和  $f_{LO}$  分别是本振信号的幅度和频率,  $\Delta\varphi$  表示移相器所提供的相移。DPMZM<sub>y</sub> 中的两个马赫-曾德尔调制器(MZM)分别被这两个电信号调制, 最后, 从 DPMZM<sub>y</sub> 输出的光信号可以表示为

$$E_{DP_y}(t) = \frac{E_{in}(t)}{4} \left\{ \exp\left(j\frac{\pi}{V_\pi} V_{bias_{y_1}}\right) \exp\left(j\frac{\pi}{2V_\pi} V_1\right) + \exp\left(-j\frac{\pi}{2V_\pi} V_1\right) + \exp\left[j\frac{\pi}{V_\pi} (V_{bias_{y_2}} + V_{bias_{y_3}})\right] \cdot \exp\left(j\frac{\pi}{2V_\pi} V_2\right) + \exp\left(j\frac{\pi}{V_\pi} V_{bias_{y_3}}\right) \exp\left(-j\frac{\pi}{2V_\pi} V_2\right) \right\} \quad (4)$$

为了实现 CS-SSB 调制, 移相器、调制信号的幅度和三个直流(DC)偏置点电压都需要分别调整在一个合适的数值。当  $\Delta\varphi = -\pi/2$ , 直流偏置点  $V_{bias_{y_1}}$ ,  $V_{bias_{y_2}}$  和  $V_{bias_{y_3}}$  分别设为  $V_\pi$ ,  $V_\pi$  和  $-V_\pi/2$ , 其中,  $V_\pi$  是 DP-QPSK 的半波电压。经过 Jacobi-Anger 展开, (4)式可以表示为

$$E_{DP_y} = \frac{E_{in}(t)}{4} \left\{ -2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(m_y) \cos[2(2n-1)\pi f_{LO}t] - 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(m_y) \sin[2(2n-1)\pi f_{LO}t] \right\} \approx \frac{E_{in}(t)}{4} [4J_1(m_y) \exp(j2\pi f_{LO}t) + 4J_3(m_y) \exp(-j2\pi \cdot 3f_{LO}t) + \dots], \quad (5)$$

式中,  $J_n(m_y)$  是第一类贝塞尔函数的  $n$  阶表示,  $m_y = \pi V_{LO}/2V_\pi$  是 DPMZM<sub>y</sub> 的调制系数。从(5)式可以看出, 载波被消除, 奇数阶边带被保留。由调制信号所激发的高阶边带中, 三阶边带的功率是最高的, 因此, 如果能够有效提高一阶边带与三阶边带之间的功率差, 就能够有效抑制高阶杂散边带的影响, 从而达到保留一阶边带的目的, 即实现  $[J_1^2(m_y) - J_3^2(m_y)]$  的最大化。适当调整调制系数  $m_y$  可以实现较高的杂散边带抑制比。利用 Matlab 进行计算得到的结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 当  $m_y = 1.8$  时, 一阶边带与三阶边带的功率有最大的差值, 由此可以有效抑制高阶杂散边带的影响。抑制效果如图 3 所示, 从图 3 中可以看到, 载波被有效地抑制, 杂散边带抑制比达到 35.20 dB。同时, (5)式可以写成

$$E_{DP_y}(t) \approx E_{in} J_1(m_y) \exp[j2\pi(f_c + f_{LO})t] \quad (6)$$

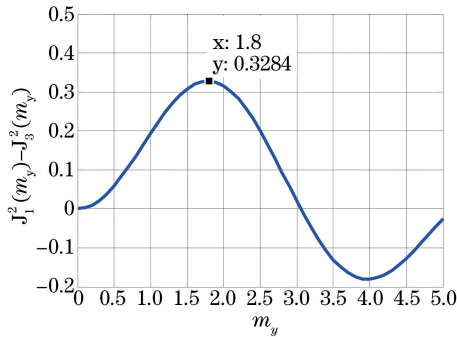


图 2 Matlab 的计算结果

Fig. 2 Calculation result of Matlab

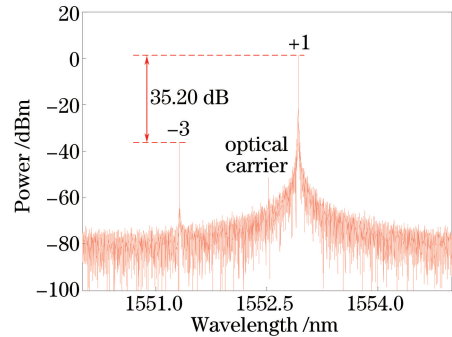


图 3 基于 DPMZM 的 CS-SSB 结果

Fig. 3 Result of CS-SSB modulation based on DPMZM

$x$  路产生的光频梳和  $y$  路产生的  $+1$  阶本振边带被 PBC 耦合, 成为一路正交的耦合信号, 可以表示为

$$E_{DP} = E_{DP_x}(t) \mathbf{e}_x + E_{DP_y}(t) \mathbf{e}_y, \quad (7)$$

式中,  $\mathbf{e}_x$  和  $\mathbf{e}_y$  是两个相互正交的方向矢量,  $E_{DP_x}(t)$  和  $E_{DP_y}(t)$  分别表示  $X$  路信号和  $Y$  路信号, 频谱示意图如图 4 所示。

接着, 正交耦合信号经过偏振控制器, 在偏振控制器的控制下,  $\mathbf{e}_x$  方向的信号与偏振片主轴之间的夹角为  $45^\circ$ 。在偏振片的作用下, 两路正交信号的偏振角度相同, 从偏振片输出的信号可以表示为

$$E_{POL}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} [E_{DP_x}(t) + E_{DP_y}(t)], \quad (8)$$

该信号送入光电探测器进行探测。最后得到落在不同波段的若干个信号, 可以用电域的滤波器将每个信号提取出来。

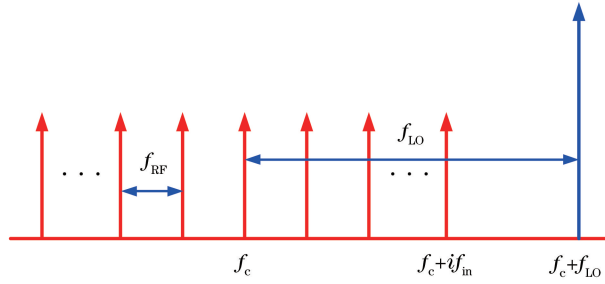


图 4 耦合信号的频谱示意图

Fig. 4 Schematic illustration of frequency spectrum of coupled signal

### 3 仿真结果与讨论分析

由于本实验室的条件限制,无法进行相关的实验验证。为了研究本方案的变频性能,在 Opti System 7.0上搭建如图 1 所示的结构。设置 LD 辐射出的激光中心频率为 193.1 THz,功率为 10 dBm。光信号在 DP-QPSK 调制器中被接收到的 RF 信号和本振信号 LO 共同调制。调制器的半波电压设为 4 V。

DPMZM<sub>x</sub> 是一个光频梳发生器。在文献[19]中提到,用射频信号 RF 直接调制 DPMZM<sub>x</sub> 中的 MZM<sub>x1</sub>, MZM<sub>x2</sub> 不接射频信号,通过适当调整三个直流偏置点,可以产生 5 根或者 7 根的光频梳。y 路光信号在 DPMZM<sub>y</sub> 中进行 CS-SSB 调制。将本振信号的频率设置为 15 GHz,移相器的相移设为  $\pi/2$ 。依照理论分析的结果,当三个直流偏置点分别设为  $V_{bias,y1} = V_{\pi}, V_{bias,y2} = V_{\pi}, V_{bias,y3} = -V_{\pi}/2$ ,可以得到所需要的 +1 阶本振边带。X 路和 Y 路信号在 PBC 中被耦合之后,经过偏振控制器调整耦合信号的偏振角度,使其与偏振片的主轴成 45°角。为了不超过光电探测器的饱和功率(现在的工艺可以达到 18 dBm),EDFA 的增益设为 15 dBm,在光电探测器的作用下得到所需的电信号。

图 5 展示了基于不同频梳数量的耦合信号的光谱和变频结果。在图 5(a)中, DPMZM<sub>y</sub> 由  $f_{RF} = 3.8$  GHz 的 RF 信号驱动,产生的 5 根光频梳具有 0.72 dB 的平坦度和 3.8 GHz 的频率间隔。与此同时,本振边带相对于光频梳具有 23.20 dB 的幅度差。将光信号送入探测器后得到变频后的微波信号,如图 5(b)所示,3.8 GHz 的信号被变频到 C 波段的 7.4 GHz, X 波段的 11.2 GHz, Ku 波段的 18.8 GHz, K 波段的

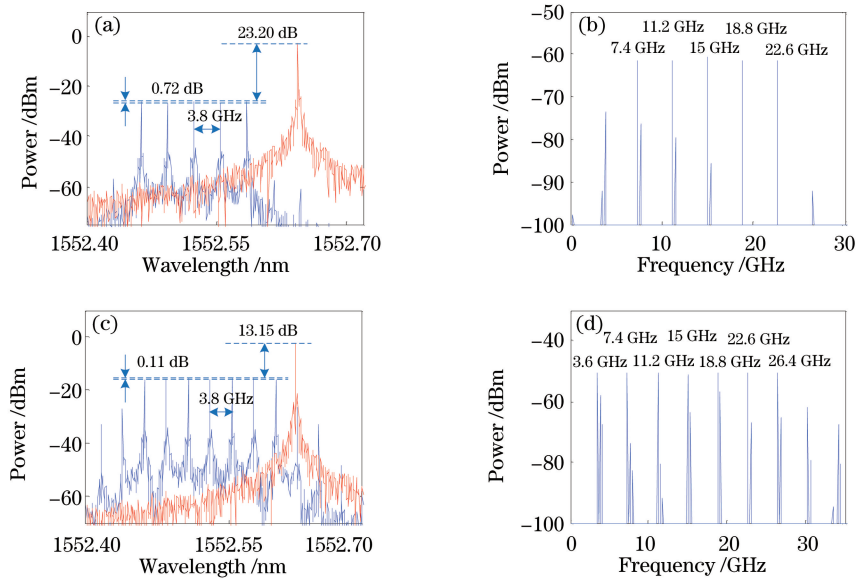


图 5 基于 5 根光频梳的(a)耦合信号光谱和(b)变频后的电谱;基于 7 根光频梳的(c)耦合信号光谱和(d)变频后的电谱

Fig. 5 (a) Optical spectrum of coupled signal and (b) electrical spectrum of converted signal, when comb number is 5; (c) optical spectrum of coupled signal and (d) electrical spectrum of converted signal, when comb number is 7

22.6 GHz。频率范围覆盖 C 到 K 波段。除此之外,如图 5(c)所示,同样由  $f_{RF}=3.8$  GHz 的射频信号驱动,通过调整直流偏置点,产生的 7 根光频梳具有 0.11 dB 的平坦度和 3.8 GHz 的频率间隔。从图 5(d)中可以看出,相对于 5 根光频梳的变频结果,其频率覆盖范围更广,额外产生出 S 波段的 3.6 GHz 和 Ka 波段的 26.4 GHz 信号。

为了证明此种方案的任意频率变频能力,选择  $f_{RF}=5.3$  GHz 和  $f_{RF}=9.6$  GHz 的射频信号分别作为驱动信号。当  $f_{RF}=5.3$  GHz 时,产生频率间隔为 5.3 GHz 的光频梳,具有 0.76 dB 的平坦度,耦合信号的频谱图如图 6(a)所示,变频结果如图 6(b)所示,可以得到 C 波段的 4.4 GHz 信号,X 波段的 9.7 GHz 信号,K 波段的 20.3 GHz 和 25.6 GHz 信号,频率的覆盖范围从 C 波段到 K 波段。当  $f_{RF}=9.6$  GHz 时,产生频率间隔为 9.6 GHz 的光频梳,频谱和变频结果如图 6(c)和(d)所示。可以看到,产生出 C 波段的 4.2 GHz 和 5.4 GHz 信号,K 波段的 24.6 GHz 信号,Ka 波段的 34.2 GHz 信号。相对 5.3 GHz 信号的变频结果,覆盖范围更大。

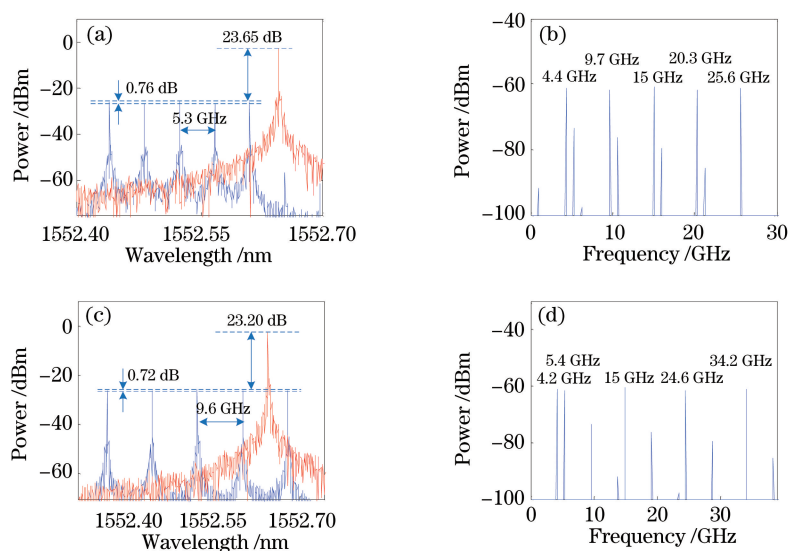


图 6 频率间隔为 5.3 GHz 的耦合信号(a) 频谱和(b) 变频结果;频率间隔为 9.6 GHz 的耦合信号(c) 频谱和(d) 变频结果

Fig. 6 (a) Frequency spectrum and (b) frequency conversion result of coupled signal when frequency spacing is 5.3 GHz; (c) frequency spectrum and (d) frequency conversion result of coupled signal when frequency spacing is 9.6 GHz

在此方案中使用的 DP-QPSK 调制器有 6 个直流偏置点,通过调整这 6 个偏置点,可以实现任意频率的多频段变频。然而,对于电光调制器,直流偏置点的漂移对调制器的影响是不可忽视的。因此,为了探寻直流漂移对本方案变频增益的影响,选择频率间隔为 3.8 GHz 的 5 根光频梳作为研究对象,首先独立分析 DPMZM<sub>x</sub> 和 DPMZM<sub>y</sub> 的直流偏置点漂移对最后变频性能的影响。从图 7(a)中可以看出,在 DPMZM<sub>x</sub> 的直流偏置点的偏离度从 -3%~3% 的过程中,所有信号的变频性能变化都不超过 1 dB,展现出了对直流偏置点漂移的有效适应性。同样,对 DPMZM<sub>y</sub> 的直流偏置点进行独立研究,从图 7(b)中可以得出,直流偏置点的漂移对最后的变频性能产生了一定的影响,但是变化幅度依然不超过 1 dB,同样展现出了对直流偏置点漂移的适应性。

最后,对整个集成调制器中的直流偏置点漂移进行研究。从图 8 可以看出,当直流偏置点在 -3%~3% 范围偏移时,所有频率的变频性能变化幅度都不超过 1 dB。从仿真结果可以看出,直流偏置点的漂移对整个系统的影响很小。

## 4 结 论

提出了一种基于 DP-QPSK 调制器,且不使用任何光滤波器的变频方案。仿真结果表明,本方案可以将低频段信号同时向多个高频段信号转换。比如 C 波段的 3.8 GHz 信号可以被转化到 X, Ku, K 和 Ka 波段。

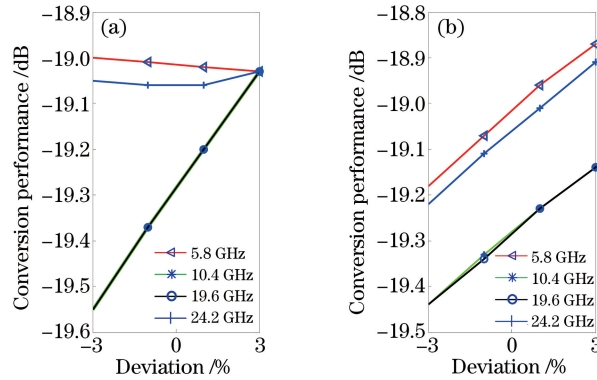
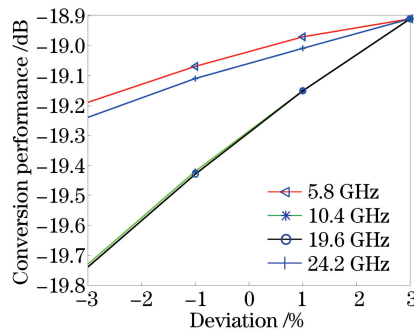
图 7 (a) DPMZM<sub>x</sub> 和 (b) DPMZM<sub>y</sub> 的直流偏置点对变频性能的影响Fig. 7 Impact of DC bias points of (a) DPMZM<sub>x</sub> and (b) DPMZM<sub>y</sub> on frequency conversion performance

图 8 基于集成调制器的变频性能示意图

Fig. 8 Schematic diagram of frequency conversion performance based on integrated modulator

除此之外,高频段信号可以被下变频或者上变频到多个频段。比如,X波段的9.6 GHz信号可以被下变频到C波段,也可以被上变频到Ku,K和Ka波段。从仿真结果来看,此种方案可以有效克服直流偏置点的影响,从而得到稳定的变频增益。所提出的方案具有简单的结构,灵活的多频段变频能力和稳定的变频增益,在未来的可重构卫星通信载荷中具有很大的潜在应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Tavakoli G C, Hiltner C L, Evins J B, *et al.* The advanced multifunction RF concept[J]. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2005, 53(3): 1009-1020.
- [2] Panagopoulos A D, Arapoglou P D M, Cottis P G. Satellite communications at Ku, Ka, and V bands: propagation impairments and mitigation techniques[J]. *IEEE Commun Survays Tuts*, 2004, 6(3): 2-14.
- [3] Mallette L A. Atomic and quartz clock hardware for communication and navigation satellites[C]. *Proceedings of the 39th Annual Precise Time and Time Interval Meeting*, 2007: 45-58.
- [4] Yao J P. Microwave photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 314-335.
- [5] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds[J]. *Nat Photonics*, 2007, 1(6): 319-330.
- [6] Chang W S C. RF photonic technology in optical fiber links[M]. New York: Cambridge University Press, 2002: Chap. 10.
- [7] Gopalakrishnan G K, Burns W K, Bulmer C H. Microwave-optical mixing in LiNbO<sub>3</sub> modulators[J]. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 1993, 41(12): 2383-2391.
- [8] Juodawlkis P, Hargreaves J, Younger R, *et al.* Optical down-sampling of wide-band microwave signals[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(12): 3116-3124.
- [9] Yang B, Jin X F, Chen Y, *et al.* Photonic microwave up-conversion of vector signals based on an optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Photonics Tech Lett*, 2013, 25(18): 1758-1760.
- [10] Xu Gang, Zheng Xiaoping, Zhang Hanyi. Frequency quadrupling for single-sideband optical millimeter wave up conversion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3386-3390.

- 徐 刚, 郑小平, 张汉一. 基于四倍频技术的单边带光载毫米波上变频[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3386-3390.
- [11] Li Zhifeng, Wang Hongjie, Wang Wenrui, *et al.* Up-conversion by vertical cavity surface emitting laser injection locking[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0206001.  
李知峰, 王红杰, 王文睿, 等. 利用垂直腔表面发射激光器注入锁定实现上变频[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0206001.
- [12] Pagán V R, Haas B M, Murphy T E. Linearized electro optic microwave down-conversion using phase modulation and optical filtering[J]. Opt Express, 2011, 19(2): 883-895.
- [13] Lam A K M, Fairburn M, Jaeger N A F. Wide-band electro optic intensity modulator frequency response measurement using an optical heterodyne down-conversion technique[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2006, 54(1): 240-246.
- [14] Zhao Y G, Pang X D, Deng L, *et al.* Ultra-broadband photonic harmonic mixer based on optical comb generation[J]. IEEE Photonics Tech Lett, 2012, 24(1): 16-18.
- [15] Wiberg A O, Liu L, Tong Z, *et al.* Photonic preprocessor for analog-to-digital-converter using a cavity-less pulse source[J]. Opt Express, 2012, 20(26): B419-B427.
- [16] Hamidi E, Leaird D E, Weiner A M. Tunable programmable microwave photonic filters based on an optical frequency comb[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2010, 58(11): 3269-3278.
- [17] Huang C B, Park S G, Leaird D E, *et al.* Nonlinearly broadened phase-modulated continuous-wave laser frequency combs characterized using DPSK decoding[J]. Opt Express, 2008, 16(4): 2520-2527.
- [18] Yang X W, Xu K, Yin J, *et al.* Optical frequency comb based multi-band microwave frequency conversion for satellite applications[J]. Opt Express, 2014, 22(1): 869-877.
- [19] Wang Q, Huo L, Xing Y F, *et al.* Ultra-flat optical frequency comb generator using a single-driven dual-parallel Mach-Zehnder modulator[J]. Opt Lett, 2014, 39(10): 3050-3053.