

基于 DPMZM 和 UTC-PD 的宽带太赫兹信号产生及传输研究

董洪建¹, 葛锦蔓^{2*}, 李琪²

(1.中国空间技术研究院,北京 100094;2.中国空间技术研究院西安分院 空间微波技术国家级重点实验室,西安 710100)

摘要:为了能够充分利用微波光子倍频优势并简化系统复杂度,提出一种基于双平行马赫-曾德尔调制器(DPMZM)和单行载流子光电二极管(UTC-PD)的宽带太赫兹矢量信号产生及光纤传输方案,通过适当地调整 DPMZM 直流偏压和调制指数,矢量信号被调制在光波的 +3 阶边带,本振信号被调制在光波的 -3 阶边带,并采用 VPI 软件对方案进行了仿真验证。仿真结果表明:当系统采用 36.7 GHz 的本振信号六倍频后,产生了载频为 220 GHz、码速率为 20 GSym/s 的正交相移键控的太赫兹矢量信号,经 1~4 km 的光纤传输,接收机功率损失小于 3 dBm。

关键词:太赫兹; 矢量信号; 单行载流子光电二极管; 双平行马赫-曾德尔调制器; 六倍频

中图分类号:TN929.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2022)01-0020-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.01.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Research on broadband terahertz signal generation and transmission based on DPMZM and UTC-PD

DONG Hongjian¹, GE Jinman^{2*}, LI Qi²

(1. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China; 2. National Key Laboratory of

Science and Technology on Space Microwave, China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710100, China)

Abstract: In order to make full use of the advantages of microwave photon frequency doubling and simplify the system complexity, a scheme of broadband terahertz vector signal generation and fiber transmission based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator (DPMZM) and uni-traveling-carrier photodiode (UTC-PD) is proposed in this paper. A vector signal is modulated in the positive third-order sideband of the light wave, and the local oscillator signal is modulated in the negative third-order sideband of the light wave. The scheme is simulated and verified by VPI software. The simulation results show that when the system adopts six times the frequency of 36.7 GHz local oscillator signal, a terahertz vector signal with orthogonal phase shift keying with carrier frequency of 220 GHz and code rate of 20 GSym/s is generated. After 1~4 km optical fiber transmission, the power loss of the receiver is less than 3 dBm.

Key words: terahertz, vector signal, uni-traveling-carrier photodiode, dual-parallel Mach-Zehnder modulator, frequency sextupling

0 引言

太赫兹通信系统常采用矢量信号调制格式,使用有限的带宽承载更高的信号速率。由于幅度和相位均

携带数据信息,因此常规的电子倍频技术难以直接产生宽带矢量信号。太赫兹信号也可以通过非线性光学频率变换的方法产生,主要方法包括采用太赫兹参量振荡器、差频探测,或者两者相结合^[1]。这些方法中双波长的相干特性直接决定了生成太赫兹信号的相位噪声,虽然可以通过锁相反馈的方式实现 2 个波长相干,但系统结构和算法复杂度较高。

微波光子学是结合了微波和光子技术的新兴学科,使用微波光子学技术产生微波信号,具有大带宽、低频率相关损耗及与光纤传输兼容等特点^[2]。目前,光电探测器带宽能力提升迅速,商用的单行载流子光电二极管(UTC-PD)输出频率可达 75 GHz~2.5 THz。在

收稿日期:2021-08-09。

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFB2203202)资助;国家自然科学基金项目(11904283)资助。

作者简介:董洪建(1979—),男,江苏赣榆人,硕士,高级工程师,主要研究方向是飞行器设计,负责完成了国家级、省部级课题 20 余项,获得国家级科技奖励 1 项,省部级以上科技奖励 5 项,发表学术论文 15 篇,出版专著 2 部。

***通信作者:**葛锦蔓(1984—),女,博士,工程师,主要研究方向为激光通信及航天光学精密测量技术。



现有大带宽光电器件的支撑下,应用微波光子倍频、混频等技术可产生大带宽、调制格式灵活的太赫兹矢量信号,并能够结合光纤低损耗传输优势,实现太赫兹矢量信号的馈送传输。

为了降低调制器、本振(LO)以及驱动电路的带宽需求,国内外研究者报道了诸多基于微波光子倍频的矢量信号产生技术方案^[3-15]。这些方案中,电信号被调制到各个光边带上,光边带在平方律检测后,幅度和相位均实现了倍频,出现了相位信息丢失、星座图混叠的问题^[6],因此这些倍频技术只适合简单的幅度或强度调制,不适合相位调制及高阶矢量调制。为了避免星座图混叠,文献[1]使用一个双平行马赫-曾德尔调制器(DPMZM)产生微波或毫米波矢量信号。然而,该方案只能实现二倍频,远远满足不了太赫兹的频段需求。文献[6]报道了一种基于 DPMZM 的微波光子四倍频矢量信号生成方案,为了避免星座重叠,该方案中电驱动信号的幅度和相位信息在倍频之前需要进行预编码,增加了驱动电路的复杂度。文献[8-9]通过五倍频和六倍频产生高频矢量信号,但需要 2 个级联 DPMZM,系统复杂度较高、系统损耗大,且稳定性不佳。

为了能够充分利用微波光子倍频优势并简化系统复杂度,本文提出一种基于 DPMZM 和 UTC-PD 的宽带太赫兹矢量信号生成方案。

1 方案原理

图 1 为本文所提出方案的原理图,主要包括半导体激光二极管(LD)、DPMZM、LO 信号源、低频矢量信号发生器(VSG)、电混频器、正交耦合器、掺铒光纤放大器(EDFA)、单模光纤(SMF)、UTC-PD 和矢量信号分析仪(VSA)。该方案中的 DPMZM 由主调制器(c-MZM)和子调制器构成。c-MZM 的上、下臂中分别嵌入了 2 个子 MZM(a-MZM 和 b-MZM)。2 个子 MZM 的半波电压为 $\pi/2$ 。为了抑制 DPMZM 后信号的偶数阶边带和光载波,2 个子调制器偏压均设置在最小传输点。

设 LD 输出的光场表示为 $E_m(t) = E_0 \exp(j\omega_c t)$, 其中, t 表示时间, E_0 和 ω_c 分别为光场的幅度和角频率。LO 信号可以表示为 $V_{LO} \sin(\omega_{LO} t)$, V_{LO} 和 ω_{LO} 分别为 LO 信号的幅度和角频率。图 1 中, LO 信号被功分为 2

路,其中一路通过电混频器被 VSG 输出的矢量信号调制。假设矢量信号的载波角频率为 ω_0 , 相位信息为 $\theta(t)$, 则上路产生的射频(RF)矢量信号可以表示为:

$$V_{RF}(t) = \sin[(\omega_{LO} + \omega_0)t + \theta(t)] + \sin[(\omega_{LO} - \omega_0)t - \theta(t)] \quad (1)$$

其中, $V_{RF}(t)$ 包含 RF 矢量信号的幅度信息。上路的 RF 矢量信号和下路的 LO 信号通过一个正交耦合器后, 输出 2 路信号分别送入 a-MZM 和 b-MZM 的射频端口。不考虑调制器的消光比问题, a-MZM 输出的光场可以表示为:

$$E_a(t) = \frac{E_0}{2\sqrt{2}} \exp(j\omega_c t) \times \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{p=-\infty}^{\infty} J_m(m_1) J_n(m_1) J_p(m_1) \times \exp\{j[(m+n+p)\omega_{LO} + (m-n)\omega_0]t + (p+1)\frac{\pi}{2} + (m-n)\theta(t)\} \times [-1 + (-1)^{m+n+p}] \quad (2)$$

其中, $m_1 = \max\{\pi V_{RF}(t)/(2V_{\pi})\}$, $m_2 = \pi V_{LO}/(2V_{\pi})$ 分别为 RF 和 LO 信号的调制指数; m, n, p 分别表示调制器的贝塞尔函数阶数。 $J_n(\cdot)$ 为第一类的 n 阶贝塞尔函数, 由于 m_1 通常非常小, 高阶贝塞尔函数可以忽略不计。类似地, b-MZM 输出的光场可以表示为:

$$E_b(t) = \frac{E_0}{2\sqrt{2}} \exp(j\omega_c t) \times \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{p=-\infty}^{\infty} J_m(m_1) J_n(m_1) J_p(m_2) \times \exp\{j[(m+n+p)\omega_{LO} + (m-n)\omega_0]t + (m+n+1)\frac{\pi}{2} + (m-n)\theta(t)\} \times [-1 + (-1)^{m+n+p}] \quad (4)$$

c-MZM 的偏置电压设置在正交点, 并在上臂和下臂之间引入 90° 的相移。因此, DPMZM 输出的光场可以表示为:

$$E_c(t) = E_a(t) + E_b(t) \times \exp(j\pi/2) =$$

$$\frac{E_0}{4} \exp(j\omega_c t) \times \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{p=-\infty}^{\infty} J_m(m_1) J_n(m_1) J_p(m_2) \times$$

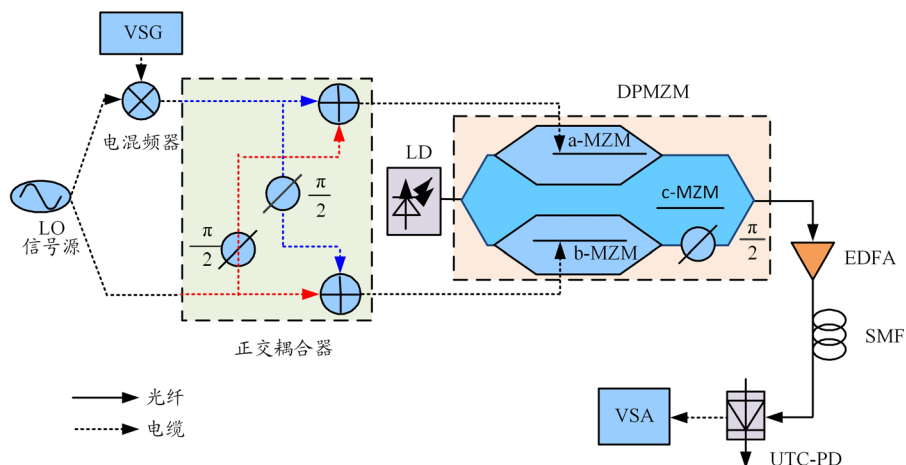


图 1 基于 DPMZM 和 UTC-PD 的太赫兹矢量信号光子产生原理图

$$\exp\{[(m+n+p)\omega_{10}+(m-n)\omega_0]t+(m+n)\theta(t)\} \times [-1+(-1)^{m+n+p}] \times (j^{p+1}+j^{m+n+2}) \quad (4)$$

当 c-MZM 处于正交传输点偏置时, 两臂中由矢量信号调制的-3 阶光学边带将相互抵消。同样地, 由 LO 信号调制的+3 阶光学边带也将在 DPMZM 的输出处相互抵消。

另外, 为了抑制光信号的+1 阶边带, 将 LO 信号的调制指数设置为 3.83 以使 $J_1(m_2)=0$ 。当 $m_2=3.83$ 时, $J_2(m_2) \approx -J_0(m_2)$, 此时-1 阶边带也可以被抑制。式(4)可以近似重写为:

$$E_c(t) \approx 2E_0 \exp(\omega_c t) \times \{J_1(m_1)[J_2(m_2)+J_4(m_2)] \times [\exp\left((3\omega_{10}+\omega_0)t+\theta(t)+\frac{\pi}{2}\right) + \exp(3\omega_{10}-\omega_0)t-\theta(t)+\frac{\pi}{2}]\} + J_3(m_2) \times \exp(-3\omega_{10}t) \quad (5)$$

由式(5)可以看出, DPMZM 输出的光信号主要包括+3 阶和-3 阶光边带, 其中+3 阶边带携带矢量信号, -3 阶边带不携带矢量信号。经过 UTC-PD 的平方律检测, 可以得到六倍频的矢量信号, 电流可以表示为:

$$I_{6\omega_{\text{RF}}}(t) = 4RJ_1(m_1)J_3(m_{31}) \times [J_2(m_2)+J_4(m_2)] E_0^2 \times \{\exp\left[(6\omega_{10}+\omega_0)t+\theta(t)+\frac{\pi}{2}\right] + \exp\left[(6\omega_{10}-\omega_0)t-\theta(t)+\frac{\pi}{2}\right]\} \quad (6)$$

其中, R 为 UTC-PD 的响应度。平方律检波后太赫兹矢量信号的振幅和相位信息被保留, 不受 UTC-PD 非线性变换的影响。另外, 与传统的双边带调制相比, 该方案类似于单边带调制, 太赫兹矢量信号仅由一组对称光边带拍频产生, 因此避免了光纤传输常面临的功率衰落问题。

2 仿真结果与讨论

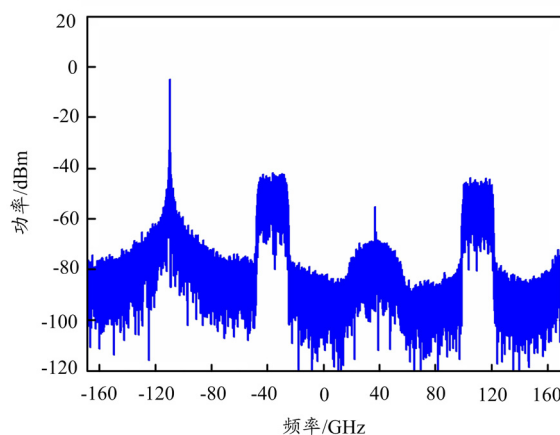
根据图 1 原理框图, 本文使用 VPI 软件包对该方案进行了仿真验证, 各个器件参数的设置情况如下: LD 的中心频率为 193.1 THz, 功率为 0 dBm, 线宽为 1 MHz, 相对强度噪声为 -140 dB/Hz; 2 个子 MZM 都工作在最小传输点, 半波电压为 3.5 V, 消光比设置为 35 dB, 插入损耗为 4 dB; 正弦信号发生器产生 36.7 GHz 的 LO 信号被功分器等分为 2 路, 一路被 VSG 调制以产生载频为 36.7 GHz、码速率为 20 Gsym/s 的正交相移键控 (QPSK) 信号, 另一路作为 LO 信号; 用于产生 I/Q 基带

信号的伪随机二进制序列 (PRBS) 序列长度为 $2^{14}-1$, 平方根升余弦滤波器的滚降因子为 0.18; 载频同为 36.7 GHz 的 RF 信号和 LO 信号一同被送入 90° 电桥 (即正交耦合器), 然后分别用于驱动 a-MZM 和 b-MZM; 调整 2 路耦合信号的幅度以实现 LO 信号的调制指数 ($m_2=3.83$); 调节 DPMZM 中 c-MZM 的直流偏压, 对 b-MZM 输出的光信号引入 $\pi/2$ 的相移, 然后与 a-MZM 输出的光信号耦合后输出 DPMZM。

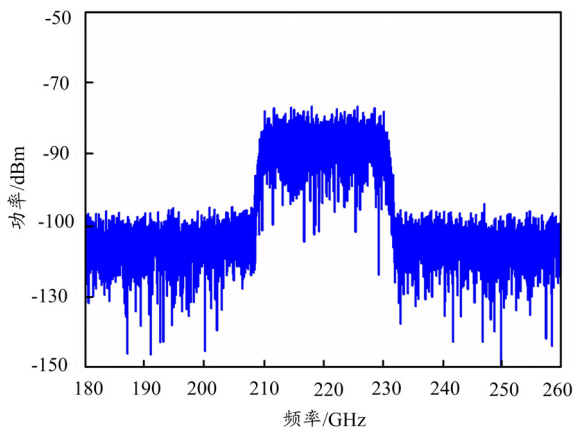
仿真中, DPMZM 输出的光谱包含一个位于 ± 3 阶边带 (193.1 THz+120 GHz) 上的 QPSK 信号和一个位于 -3 阶光边带 (193.1 THz-120 GHz) 上的纯净子载波, 如图 2(a) 所示。由于调制器有限的消光比和非线性残留, 该光谱存在 ± 1 阶残留。

在使用 SMF 传输前, 采用噪声系数为 4 dB 的 EDFA 将光功率放大到 0 dBm。经过响应度为 0.6 A/W 的 UTC-PD 后, 输出中心频率为 220 GHz、带宽约为 20 GHz 的 QPSK 信号, 如图 2(b) 所示。

采用低频 VSG 对太赫兹矢量信号的星座图进行



(a) DPMZM 输出光谱



(b) UTC-PD 输出的电频谱

图 2 DPMZM、UTC-PD 输出的光谱图和电频谱图

了测试,并对误差矢量幅度(EVM)进行了评估。为了探索射频信号的最佳调制指数,仿真了EVM性能随射频调制指数 m_1 的关系曲线,如图3所示。可以看出,当 $m_1=0.7$ 时EVM为

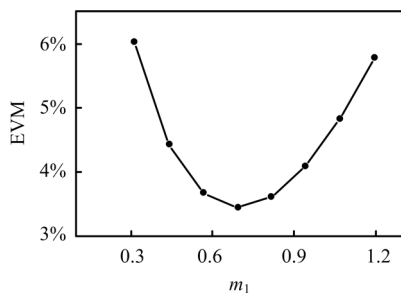


图3 射频信号不同调制指数下的EVM曲线

最小值;当 $m_1<0.7$ 时,EVM随 m_1 的增大而减小;当 $m_1>0.7$ 时,系统的非线性占主导地位,当功率增加时,检测到的射频信号的功率几乎没有增加,却产生了严重的互调失真,因此EVM随 m_1 的增大而增大。

该方案中的太赫兹矢量信号仅由高纯度2个边带拍频产生,类似于单边带调制,因此可以避免常规双边带调制存在的功率衰落问题。仿真中,光纤的色散系数为 $17 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km}^{-1})$,经过长度分别为0 km、1 km、2 km和4 km的SMF传输时,依次改变进入UTC-PD的光功率,测量最终太赫兹矢量信号的误符号率(SER),得到接收机的SER曲线如图4所示。

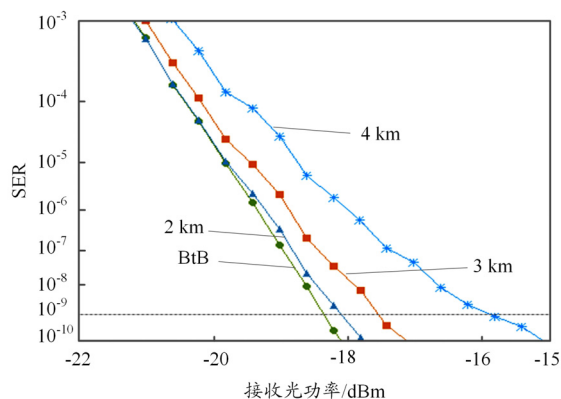


图4 接收端的SER曲线

在背靠背(BtB),即0 km传输模式下,信号误码主要由系统噪声引起,包括光源的相对强度噪声、UTC-PD的散弹噪声、热噪声以及EDFA引入的信号自拍频噪声^[8]。另外,光纤色散也会导致误码。由图4可知,与BtB情况相比,经过1 km、2 km和4 km的SMF传输之后,在SER为 10^{-9} 处的接收器功率损失均小于3 dBm,表明该系统所产生的太赫兹矢量信号具有良好的光纤传输性能。在接收光功率为-17 dBm时,不同光纤传输距离下,接收机解调得到的典型星座图如图5所示,4种情况下的星座图质量较好。

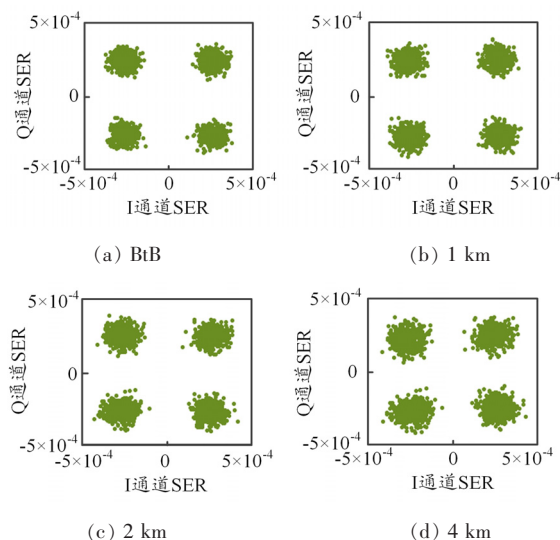


图5 光纤传输后信号解调得到的星座图

3 结束语

本文提出并仿真分析了一种基于DPMZM和UTC-PD的太赫兹矢量信号产生方案。通过适当调整调制器的直流偏置和LO信号的调制指数来抑制杂散光分量,在接收端直接检测后,矢量信号的幅相信息不受非线性失真的影响,且可以避免因色散引起的功率衰落问题出现。仿真时,通过36.7 GHz的LO信号产生了载频、带宽和比特率分别为220 GHz、20 GHz和40 Gb/s的太赫兹QPSK信号,并对矢量信号的最佳调制指数进行了分析。光信号经过1 km、2 km和4 km的SMF传输后,探测得到的太赫兹矢量信号接收机功率损失小于3 dBm。该方案仅利用一个DPMZM实现六倍频技术,可以显著降低对电光调制器、LO信号和驱动电路的带宽要求,并降低系统复杂度。因此,该方案在未来太赫兹通信系统中极具应用潜力。

参考文献:

- [1] HE Y, WANT Y, XU D, et al. High-energy and ultra-wideband tunable terahertz source with DAST crystal via difference frequency generation[J]. Applied Physics B, 2018, 124(1): 1-8.
- [2] LIN C T, SHIH P T, JIANG W J, et al. Photonic vector signal generation at microwave/millimeter-wave bands employing an optical frequency quadrupling scheme [J]. Optics Letters, 2009, 34(14): 2171-2173.
- [3] 蒋均. 基于肖特基二极管太赫兹高次倍频源关键技术研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2017.
- [4] GAO F, LI Y, CONG Z, et al. Injection-seeded terahertz parametric oscillator with a ring-cavity configuration[J]. Crystals, 2020, 10(9): 732-739.
- [5] WANG W, ZHANG X, WANG Q, et al. Multiple-beam output of a

董洪建, 葛锦蔓, 李琪: 基于 DPMZM 和 UTC-PD 的宽带太赫兹信号产生及传输研究

surface-emitted terahertz-wave parametric oscillator by using a slab MgO: LiNbO₃ crystal[J]. Optics Letters, 2014, 39(4): 754–757.

[6] YANG Z, WANG Y, XU D, et al. High-energy terahertz wave parametric oscillator with a surface-emitted ring-cavity configuration[J]. Optics Letters, 2016, 41(10): 2262–2265.

[7] LIU P, ZHANG X, YAN C, et al. Widely tunable and monochromatic terahertz difference frequency generation with organic crystal 2-(4-hydroxystyryl)-5, 5-dimethylcyclohex-2-enylidene malononitrile[J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(1): 011104-1–011104-3.

[8] PAN S L, YAO J P. Photonics-based broadband microwave measurement[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(16): 3498–3513.

[9] GENG H J, HAO S Q, ZHAO Q S, et al. Research on the technology of microwave generation with photonic frequency sextupling by cascaded external modulators[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2015, 26(2): 272–276.

[10] ZHOU W, ZOU X H, PAN W, et al. Photonic generation of microwave signals with a 24 multiplied frequency using cascaded Mach-Zehnder modulators and four-wave mixing[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2013, 24(12): 2332–2337.

[11] YING X Y, XU T F, LIU T J, et al. Photonic generation of

millimeter-wave signal via frequency 24-tupling based on dual-parallel MZM and four-wave-mixing in HNLF[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2016, 27(8): 814–818.

[12] LIN C T, DAI S P, CHEN J, et al. A novel direct detection microwave photonic vector modulation scheme for radio-over-fiber system[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(13): 1106–1108.

[13] LIN C T, WONG E Z, JIANG W J, et al. 28 Gb/s 16QAM OFDM radio-over-fiber system within 7 GHz license-free band at 60 GHz employing all-optical up-conversion[EB/OL][2021-08-09]. <https://www.osapublishing.org/viewmedia.cfm?uri=CLEO-2009-CPDA8&seq=0>.

[14] SHIH P T, LIN C T, JIANG W J, et al. Transmission of 20 Gb/s OFDM signals occupying 7 GHz license-free band at 60 GHz using a RoF system employing frequency sextupling optical up-conversion, Optics Express, 2010, 18(12): 12748–12755.

[15] CHARLES M, MICHAEL B, JEFF W, et al. Measurement of SFDR and noise in EDF amplified analog RF links using all-optical down-conversion and balanced receivers[C]// SPIE. Proceedings of Defense and Security Symposium, International Society for Optics and Photonics. Florida: SPIE, 2008: 69750Q-1–69750Q-12.