

一种克服色度色散影响的四倍频光毫米波信号产生方法

朱子行¹ 赵尚弘¹ 么周石² 谭庆贵² 李勇军¹ 楚兴春¹ 赵顾颢¹ 王翔¹

(¹空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077
²空间微波技术国防科技重点实验室, 陕西 西安 710000)

摘要 提出一种克服色度色散影响的四倍频光毫米波信号产生方法。该方法使用一个双驱动马赫-曾德尔调制器,通过调整上、下两路射频信号的相位差、直流偏置点、调制系数以及基带信号增益,将数据信号仅调制到四倍频光毫米波信号的一个 2 阶边带上传输,解决了色度色散引起的码元走离问题,有效增加了传输距离。理论分析和仿真实验结果表明,信号在光纤中传输 120 km 后眼图仍然十分清晰,经过 60 km 传输后的功率代价约为 0.45 dB。另外,基于频率再用技术,没有调制数据的另一个 2 阶边带信号还可以作为全双工光纤无线通信(RoF)系统的上行链路光载波,简化了基站配置。仿真实验结果表明,双向 2.5 Gbit/s 数据信号在光纤中传输 40 km 后,功率代价小于 0.6 dB。

关键词 光通信;光纤无线通信系统;光生毫米波信号;色度色散;四倍频;马赫-曾德尔调制器

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0405004

Generation of Frequency Quadruple Optical Millimeter-Wave Signal to Overcome Chromatic Dispersion

Zhu Zihang¹ Zhao Shanghong¹ Yao Zhoushi² Tan Qinggui² Li Yongjun¹
Chu Xingchun¹ Zhao Guhao¹ Wang Xiang¹

¹Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China
²National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave Technology,
Xi'an, Shaanxi 710000, China

Abstract A scheme for generation of frequency quadruple optical millimeter-wave signal to overcome chromatic dispersion is proposed. With radio frequency signal phase, bias, modulation index, and base-band signal gain adjustment, a dual-drive Mach-Zehnder modulator is used to generate frequency quadruple optical millimeter-wave signal only carried by one second-order sideband which solves the problem of time shift of code caused by chromatic dispersion, so the transmission distance is extended greatly. Theoretical analysis and simulation results show that the eye diagram keeps open and clear even when the optical millimeter-wave signals are transmitted over 120 km and the power penalty is about 0.45 dB after fiber transmission distance of 60 km. Furthermore, due to one pure optical component carrying no signals, a full duplex radio-over-fiber (RoF) link based on frequency reuse is also built to simplify the base station. The bidirectional 2.5 Gbit/s data is successfully transmitted over 40 km standard single mode fiber with less than 0.6 dB power penalty in the simulation.

Key words optical communications; radio-over-fiber system; generation of optical millimeter-wave signal; chromatic dispersion; frequency quadrupling; Mach-Zehnder modulator

OCIS codes 060.2330; 060.4080; 060.5625

收稿日期: 2011-07-25; 收到修改稿日期: 2011-11-27

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z294)资助课题。

作者简介: 朱子行(1985—),男,博士研究生,主要从事微波光子方面的研究。E-mail: zhuzihang6@126.com

导师简介: 赵尚弘(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事卫星光通信与激光技术等方面的研究。

E-mail: zhaoshangh@yahoo.com.cn(中国光学学会会员号:7100044)

1 引言

微波光子学中的光纤无线通信(RoF)技术既有光纤通信带宽大、成本低的优势,又能发挥无线接入的便捷性,是未来超宽带无线接入最有前景的技术之一^[1]。为了简化 RoF 系统配置、降低系统成本,需要在光域直接产生频率高达 40~60 GHz 的毫米波信号。然而,受限于铌酸锂马赫-曾德尔调制器(MZM)的频率响应,直接将毫米波信号调制到光频上仍然面临着极大的挑战,而且产生后的光毫米波信号受光纤色度色散影响,传输容量和距离有限。

为此,许多 RoF 系统使用外调制器将数据信号调制到光毫米波上,运用光外差法产生毫米波信号^[2~12]。其中,文献[2~4]利用载波抑制调制产生了二倍频光毫米波信号,它们将数据信号调制到光载波抑制信号的一个边带上,在光电探测器上差拍生成频率为射频本振信号 2 倍的毫米波信号。这种方法能够克服色度色散影响,但仅实现了二倍频调制,应用于 40~60 GHz 系统时对微波器件的要求依然较高。文献[5~8]基于载波抑制原理采用级联的 MZM 产生四倍频光毫米波信号,由于使用了多个调制器,增加了系统的复杂度。文献[9]使用单一调制器实现四倍频调制,将 MZM 的直流偏置点设为调制曲线的最高点生成抑制奇数阶边带信号,传输到基站后滤去光载波,在光电探测器上差拍生成频率为射频本振信号 4 倍的毫米波信号,但在光纤传输时会因色散而出现码元边沿的时间走离。文献[10]采用一个外部调制器和一个光纤布拉格光栅(FBG)滤波器产生四倍频光毫米波信号,由于生成的光毫米波信号为载波抑制信号,还是会出现码元走离。文献[11]使用一个双平行马赫-曾德尔调制器(DPMZM)实现四倍频的单边带调制,分别产生出载波边带和数据边带两个 2 阶边带,用光滤波器滤除光载波后得到四倍频光毫米波信号。这种方法虽然能够解决色散引起的码元走离问题,但是对滤波器的带宽提出了很高的要求,降低了系统的稳定性并增加了光功率损耗,容易受到上下两个调制器性能不一致的影响且实现复杂。

本文提出一种克服色度色散影响的四倍频光毫米波信号产生方法。该方法利用一个双驱动马赫-曾德尔调制器(DDMZM),通过调整上、下两路射频信号的相位差和直流偏置点产生抑制奇数阶边带信号,调整调制系数抑制载波产生四倍频光毫米波信号,调整基带信号增益将数据信号调制到两个 2 阶边带的一个边带上。与文献[2~4]相比,四倍频技

术避免了高频微波器件的使用;与文献[10]相比,将数据仅调制到四倍频光毫米波信号的一个 2 阶边带上传输解决了色散引起的码元走离问题,增加了传输距离;与文献[11]相比,功率代价低,且仅使用一个调制器,实现简单。另外,没有携带数据的另一个 2 阶边带信号还可以作为全双工 RoF 系统上行链路光载波,简化了基站配置,降低了系统成本。

2 理论分析

色散是限制四倍频光毫米波信号传输距离的主要因素。由于色散使不同频率的两个 2 阶边带在光纤中以不同的速度传输,造成码元时间走离,当时间走离等于一个码元周期 τ 时,眼图将完全闭合。因此,传输距离的限制为

$$z < \frac{\eta c}{4\lambda_c^2 D f_{RF}}, \quad (1)$$

对于占空比 $\eta=1$ 的非归零码,并且码元速率为 2.5 Gbit/s,即码元周期 $\tau=0.4$ ns。将色散参数 $D=17$ ps/(nm·km),中心波长 $\lambda_c=1552.52$ nm,射频本振信号频率 $f_{RF}=10$ GHz 代入到(1)式进行计算,得到最大传输距离为 73 km。

提出的克服色度色散影响的四倍频光毫米波信号产生方法如图 1 所示。激光二极管(LD)产生一个波长为 1552.5 nm(193.1 THz)、线宽为 10 MHz 的连续光波信号,2.5 Gbit/s 长度为 $2^{31}-1$ 的伪随机序列 $s(t)$ 相位调制到 10 GHz 射频本振(RFLO)信号上与增益为 7.5 的基带信号叠加进入 DDMZM 的一条臂,直流偏置电压(Bias a)设置为 0,同时伪随机序列相位调制到相移 π 的 10 GHz RFLO 信号上与增益为 7.5 的基带信号叠加进入 DDMZM 的另一条臂,直流偏置电压(Bias b)设置为 0。DDMZM 输出的四倍频光毫米波信号经过标准单模光纤(SMF)传输后到达基站,用光电探测器(PD)进行光电转换得到四倍频电毫米波信号,经过电放大器(EA)放大后,由带通滤波器(BPF)滤出 40 GHz 毫米波信号。在接收机中,令 40 GHz 本振与毫米波信号相乘进行相干解调,再通过低通滤波器(LPF)滤波还原出基带数据。

激光器产生的单频光载波可以表示为 $E_c(t) = E_c \exp(j\omega_c t)$,其中 E_c 为其幅度, ω_c 为其角频率。基带二进制数据信号可以表示为 $s(t) = \sum_n I_n g(t - nT)$,其中 $I_n \in \{0,1\}$ 为二进制序列, $g(t)$ 为码元波形函数, T 为码元周期。两个电增益器增益 $G=7.5$,

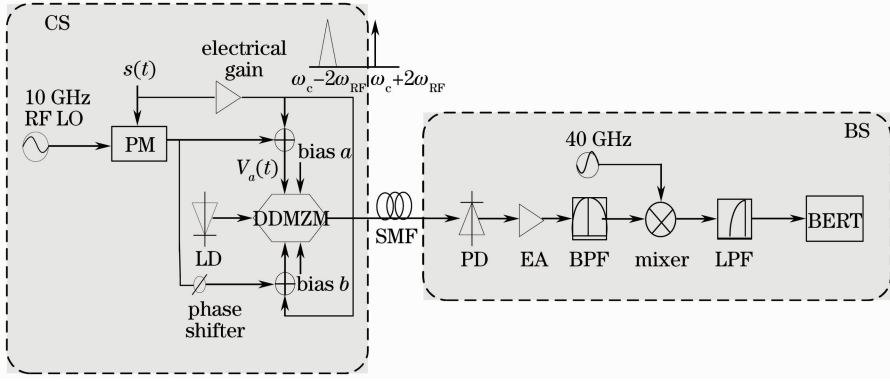


图1 克服色度色散影响的四倍频光毫米波产生方法

Fig.1 Approach of quadrupling-frequency optical millimeter-wave generation to overcome chromatic dispersion

移相器相移 π , DDMZM 分束比为 0.5, a, b 两点偏置电压都为 0, $V_{\pi\text{RF}} = 5 \text{ V}$ 为调制器半波电压。经过相位调制后的射频信号为

$$V_{\text{RF}}(t) = V_{\text{RF}} \cos\left[\omega_{\text{RF}}t + \frac{\pi}{4}s(t)\right] = V_{\text{RF}} \cos\left[\omega_{\text{RF}}t + \frac{\pi}{4} \sum_n I_n g(t - nT)\right], \quad (2)$$

式中 V_{RF} 为射频信号电压, ω_{RF} 为其角频率。

输入到 DDMZM 一臂的射频信号为

$$V_a(t) = V_{\text{RF}} \cos\left[\omega_{\text{RF}}t + \frac{\pi}{4}s(t)\right] + \frac{15}{2}s(t), \quad (3)$$

输入到另一臂的射频信号为

$$V_b(t) = V_{\text{RF}} \cos\left[\omega_{\text{RF}}t + \frac{\pi}{4}s(t) - \pi\right] + \frac{15}{2}s(t), \quad (4)$$

DDMZM 输出的光毫米波信号可以表示为

$$\begin{aligned} E(0, t) &= \frac{\alpha}{2} E_c \exp(j\omega_c t) \left\{ \exp\left\{j\pi \left[V_{\text{RF}} \cos\left[\omega_{\text{RF}}t + \frac{\pi}{4}s(t)\right] + \frac{15}{2}s(t) \right] / V_{\pi\text{RF}} \right\} + \right. \\ &\quad \left. \exp\left\{j\pi \left[V_{\text{RF}} \cos\left[\omega_{\text{RF}}t + \frac{\pi}{4}s(t) - \pi\right] + \frac{15}{2}s(t) \right] / V_{\pi\text{RF}} \right\} \right\} = \\ &\quad \frac{\alpha}{2} E_c \exp(j\omega_c t) \left\{ \exp\left\{j \left[m \cos\left[\omega_{\text{RF}}t + \frac{\pi}{4}s(t)\right] + \frac{3}{2}\pi s(t) \right] \right\} + \right. \\ &\quad \left. \exp\left\{j \left[m \cos\left[\omega_{\text{RF}}t + \frac{\pi}{4}s(t) - \pi\right] + \frac{3}{2}\pi s(t) \right] \right\} \right\} = \\ &\quad \frac{\alpha}{2} E_c \exp(j\omega_c t) \left\{ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} j^n J_n(m) \exp\left\{j \left[n\omega_{\text{RF}}t + \frac{3\pi}{2}s(t) + \frac{\pi}{4}ns(t) \right] \right\} + \right. \\ &\quad \left. \sum_{n=-\infty}^{+\infty} j^n J_n(m) \exp\left\{j \left[n\omega_{\text{RF}}t + \frac{3\pi}{2}s(t) + \frac{\pi}{4}ns(t) - n\pi \right] \right\} \right\} = \\ &\quad \frac{\alpha}{2} E_c \exp(j\omega_c t) \left\{ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(m) \exp\left\{j \left[n\omega_{\text{RF}}t + \frac{3\pi}{2}s(t) + \frac{\pi}{4}ns(t) + \frac{n\pi}{2} \right] \right\} + \right. \\ &\quad \left. \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(m) \exp\left\{j \left[n\omega_{\text{RF}}t + \frac{3\pi}{2}s(t) + \frac{\pi}{4}ns(t) - \frac{n\pi}{2} \right] \right\} \right\} = \\ &\quad \alpha E_c \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(m) \cos\left(\frac{n\pi}{2}\right) \exp\left\{j \left[\omega_c t + n\omega_{\text{RF}}t + \frac{(n+6)\pi}{4}s(t) \right] \right\}, \quad (5) \end{aligned}$$

式中 α 为调制器插入损耗, $m = \pi V_{\text{RF}} / V_{\pi\text{RF}}$ 为调制系数, $J_n(\cdot)$ 为 n 阶贝塞尔函数。从(5)式可以看出 $2n+1$ ($n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 阶边带分量被抑制。从图2可以看出, 当 $m = 2.4048, V_{\text{RF}} = 3.8274 \text{ V}$ 时, 0 阶贝塞尔函数的值为 0, 载波被抑制, 4 阶以上贝塞尔函数的值很小, 可以忽略。(5)式可以化简为

$$\begin{aligned} E(0, t) &= -\alpha E_c J_{-2}(m) \exp\{j[\omega_c t - 2\omega_{\text{RF}}t + \pi s(t)]\} - \alpha E_c J_2(m) \exp\{j[\omega_c t + 2\omega_{\text{RF}}t + 2\pi s(t)]\} = \\ &\quad -\alpha E_c J_{-2}(m) \exp\{j[\omega_c t - 2\omega_{\text{RF}}t + \pi s(t)]\} - \alpha E_c J_2(m) \exp\{j[\omega_c t + 2\omega_{\text{RF}}t]\}, \quad (6) \end{aligned}$$

从(6)式可以看出,DDMZM 输出了四倍频光毫米波信号,而且基带信号只调制到了角频率为 $\omega_c - 2\omega_{RF}$ 的边带分量上,在角频率为 $\omega_c + 2\omega_{RF}$ 的边带分量上没有调制基带信号。

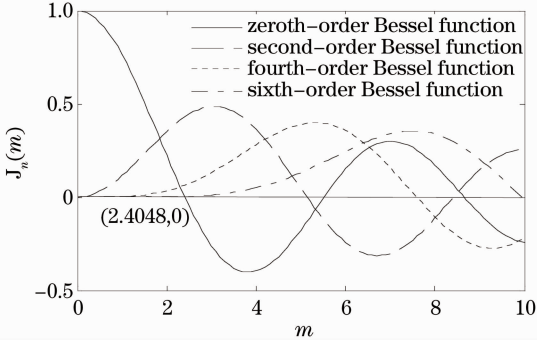


图 2 一类贝塞尔函数

Fig. 2 Bessel functions of the first kind

在背靠背(BTB)传输的情况下,经光电检测后的四倍频毫米波信号可以表示为

$$I(0, t) = \mu |E(0, t)|^2 = 2\mu\alpha^2 E_c^2 J_2^2(m) \times \{1 + \cos[4\omega_{RF}t - \pi s(t)]\}, \quad (7)$$

式中 μ 为光电探测器响应度。

当光毫米波信号经过光纤传输后,由于色度色散的影响,上、下 2 阶边带信号将会具有不同的群速度。传输距离 z 后的信号可以表示为

$$E(z, t) = -\alpha E_c J_{-2}(m) \exp\{j[\omega_c t - 2\omega_{RF}t - \beta(\omega_c - 2\omega_{RF})z + \pi s(t - t')]\} - \alpha E_c J_2(m) \times \exp\{j[\omega_c t + 2\omega_{RF}t - \beta(\omega_c + 2\omega_{RF})z]\}, \quad (8)$$

式中 $t' = (\omega_c - 2\omega_{RF})^{-1}\beta(\omega_c - 2\omega_{RF})z$, $\beta(\omega)$ 为光纤传输常数,在此忽略了光纤非线性的影响。对比(6)式可以看出,经过光纤传输后的信号频谱没有改变。经光电检测后的四倍频毫米波信号可以表示为

$$I(z, t) = \mu |E(z, t)|^2 = 2\mu\alpha^2 E_c^2 J_2^2(m) \{1 + \cos[4\omega_{RF}t - \beta(\omega_c + 2\omega_{RF})z + \beta(\omega_c - 2\omega_{RF})z - \pi s(t - t')]\}, \quad (9)$$

利用泰勒级数展开 $\beta(\omega_c \pm 2\omega_{RF})$

$$\beta(\omega_c \pm 2\omega_{RF}) \approx$$

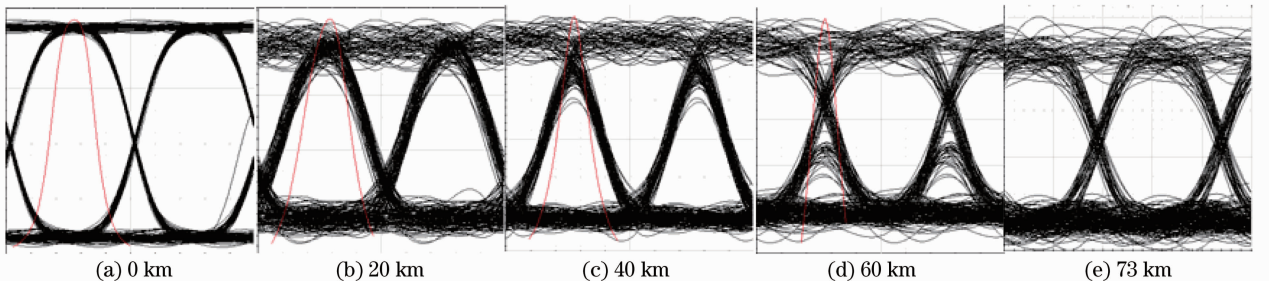


图 4 受色散影响解调得到的眼图

Fig. 4 Eye diagrams of demodulated signal under the influence of chromatic dispersion

$$\beta(\omega_c) \pm 2\omega_{RF}\beta'(\omega_c) + 2\omega_{RF}^2\beta''(\omega_c), \quad (10)$$

(9)式可以近似表示为

$$I(z, t) = \mu |E(z, t)|^2 = 2\mu\alpha^2 E_c^2 J_2^2(m) \{1 + \cos[4\omega_{RF}t - 4\omega_{RF}\beta'(\omega_c)z - \pi s(t - t')]\}. \quad (11)$$

从(11)式可以看出,数据信号除了受到光纤传输延时的影响外,并没有发生时间走离现象,因此可以实现远距离传输。

3 系统仿真实验及结果

在 OptiSystem 环境下建立如图 1 所示的 RoF 仿真系统。图 3 给出了克服色散影响的四倍频光毫米波信号频谱图。从图 3 中可以看出,载波得到抑制,未调 2 阶边带分量要比 4 阶边带分量高出 20 dB 左右。由于将基带数据仅调制到 -2 阶边带上, -2 阶边带的峰值功率低于 +2 阶边带的峰值功率,然而 -2 阶边带附近的频点较多,因此上、下两边带功率还是平衡的,不会对光毫米波信号传输性能造成影响。

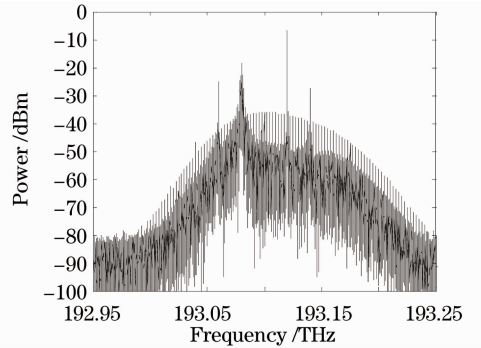


图 3 克服色散影响的四倍频光毫米波信号频谱图

Fig. 3 Spectrum of quadrupling-frequency optical millimeter-wave generation to overcome chromatic dispersion

图 4 为受色散影响的四倍频光毫米波信号经光纤传输不同距离后解调得到的眼图。从图中可以看出,随着传输距离的增加,码元宽度越来越窄,当距离为 73 km 时,眼图几乎闭合。图 5 为克服色散影

响的四倍频光毫米波信号经光纤传输不同距离后解调得到的眼图。从图中可以看出,随着传输距离的增加,眼图的形状几乎没有改变,甚至在传输120 km

后眼图还是睁开并比较清晰的。因此,提出的方法增加了信号传输距离,极大地提高了 RoF 链路的性能。这与第 2 节理论分析得出的结论是一致的。

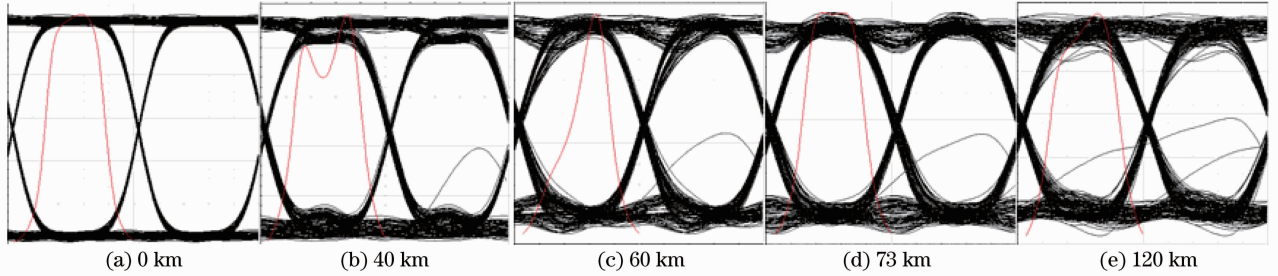


图 5 克服色散影响解调得到的眼图

Fig. 5 Eye diagrams of demodulated signal overcome the influence of chromatic dispersion

图 6(a)、(b)分别为有无色散影响下 2.5 Gbit/s 数据传输不同距离后系统的误码率(BER)曲线。从图 6(a)可以看出,有色散影响时,在 BER 为 10^{-10} 条件下,经过 20 km 光纤传输后的功率代价为 0.5 dB,经过 40 km 传输后的功率代价为 3.5 dB,而经过 60 km 传输后会在 BER 为 10^{-2} 处出现误码平层,这是由长距离传输后码元的时间走离造成的。从

图 6(b)可以看出,克服色散影响时,在 BER 为 10^{-10} 条件下,经过 20 km 光纤传输后的功率代价为 0.28 dB,经过 40 km 传输后的功率代价为 0.35 dB,经过 60 km 传输后的功率代价为 0.45 dB。文献 [11]提出的克服色散方法,1 Gbit/s 数据经光纤传输 20 km 后,功率代价已经达到了 0.8 dB,可见本文方法优于文献[11]的方法。

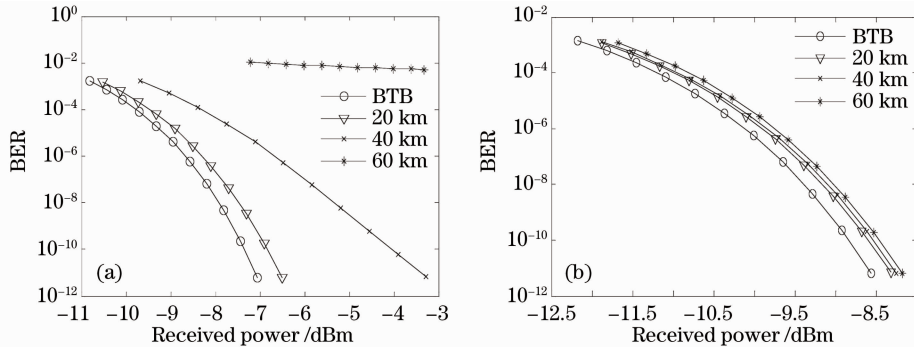


图 6 色散影响下(a)和克服色散影响后(b)的误码率曲线

Fig. 6 BER curves under (a) and overcome (b) the influence of chromatic dispersion

4 基于频率再用的全双工 RoF 系统方案

在实际应用中,RoF 系统需要在上、下行链路同时发送数据。利用提出的四倍频方法,结合频率再用可以将没有调制数据的一个 2 阶边带信号分为两路:一路与下行链路另一个 2 阶边带信号拍频产生四倍频电毫米波信号,另一路作为上行链路传输光载波。具体方案如图 7 所示。中心站发出的光载波抑制信号到达基站后,2 阶边带信号经反射率为 5%的 FBG 分为两路。在 FBG 前后 A、B 两点的下行链路信号的频谱如图 8(a)、(b)所示。在下行链路,四倍频光毫米波信号经 PD 转换为电毫米波信号,经 EA 放大后相干解调,由误码率测试仪

(BERT)测试性能。在上行链路,基带数据直接调制到没有调制下行数据的 2 阶边带信号上,这一边带信号是由 FBG 反射回来的,它通过掺铒光纤放大器(EDFA)放大来补偿光环形器和滤波器带来的插入损耗。反射回来的 2 阶边带信号频谱(测试点 C 的信号)以及调制后的上行链路信号频谱(测试点 D 的信号)分别如图 8(c)、(d)所示。从图中可以看出,再用的频谱是纯净的,没有对上行链路数据传输造成明显影响。

从理论分析和仿真的结果来看,下行链路四倍频光毫米波信号在传输过程中能克服色散的影响,上行链路信号只有一个很窄的峰值,受色散的影响也很小。图 9 为上、下行链路 BER 曲线,从图中可

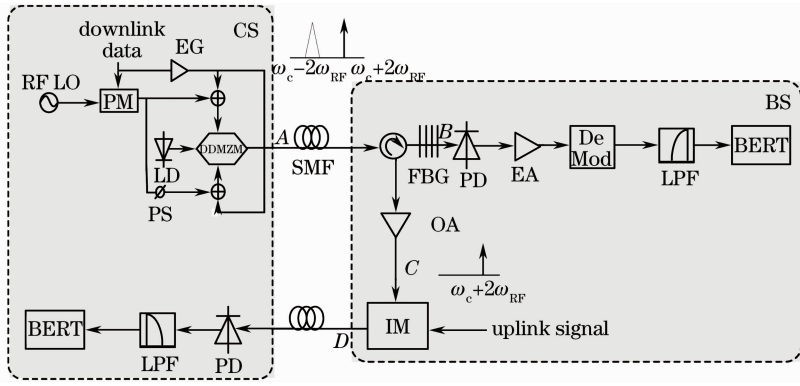


图 7 基于频率再用的四倍频全双工 RoF 系统

Fig. 7 Diagram of the full duplex RoF system based on wavelength reuse

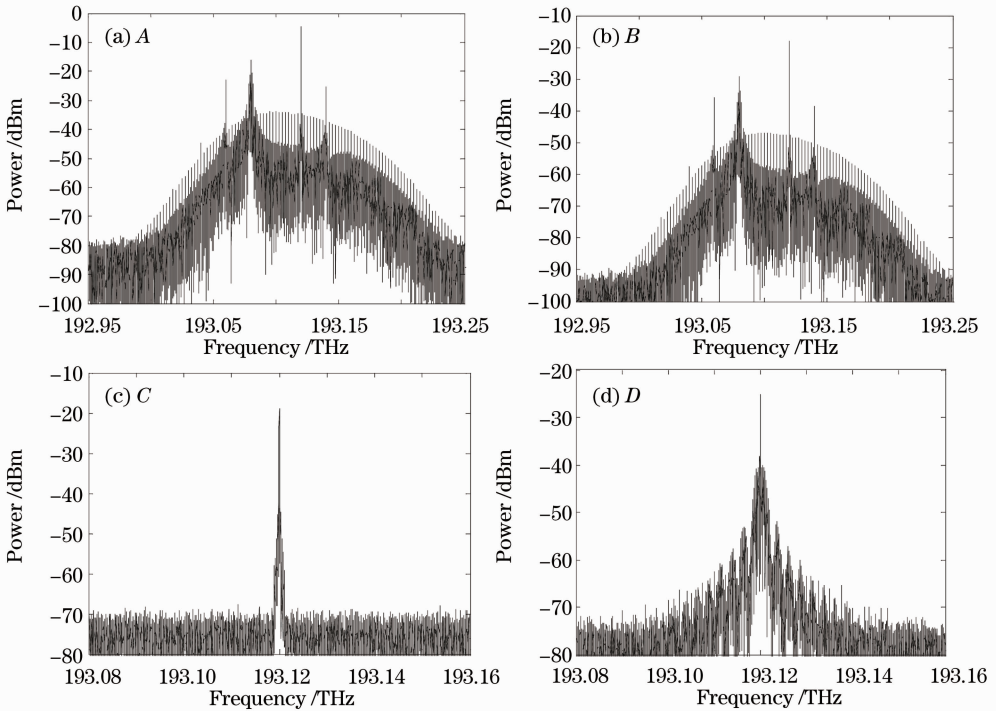


图 8 A, B, C 和 D 点信号频谱

Fig. 8 Spectra of point A, B, C and D

可以看出,在 BER 为 10^{-10} 条件下,上行链路传输时,经 20 km 光纤传输后的功率代价几乎可以忽略,经过 40 km 传输后的功率代价约为 0.6 dB。下行链路传输时,经过 20 km 光纤传输后的功率代价也可以忽略,经过 40 km 传输后的功率代价约为 0.45 dB。与图 6(b)相比,在全双工 RoF 系统中,下行链路探测器灵敏度下降了约 0.8 dB,那是因为 +2 阶边带信号被反射作为上行链路光载波,从而导致下行链路四倍频光毫米波信号两个边带功率不平衡。因此,下行链路性能与单向链路相比略有不同。但从总体上看,单向 RoF 系统的下行链路和双向 RoF 系统都具有良好的性能。

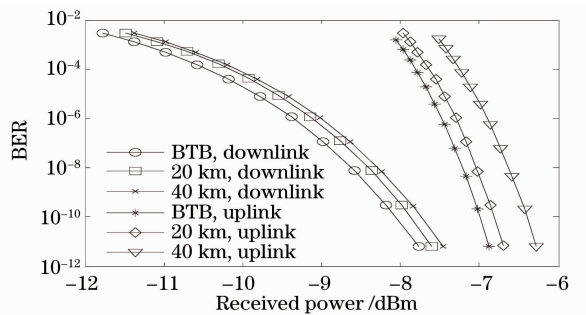


图 9 上、下行链路误码率曲线

Fig. 9 BER curves for both downlink and uplink datas

5 结 论

提出一种使用 DDMZM 产生四倍频光毫米波信号的新方法。四倍频技术避免了高频微波器件的

使用,将基带数据调制到四倍频光毫米波信号的一个2阶边带传输,解决了码元走离问题,增加了传输距离,并且该方法仅使用一个调制器。另外,基于频率再用技术,没有调制数据信号的另一个2阶边带信号还可以作为全双工RoF系统的上行链路光载波,简化了基站配置。理论分析和仿真实验结果表明,单向RoF系统下行链路中,承载2.5 Gbit/s基带数据的40 GHz光毫米波信号经60 km标准单模光纤传输的功率代价仅为0.45 dB。全双工RoF系统中,双向2.5 Gbit/s基带数据经40 km传输后功率代价小于0.6 dB。

参 考 文 献

- 1 Fang Zujie, Ye Qing, Liu Feng *et al.*. Progress of millimeter wave subcarrier optical fiber communication technologies [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 481~488
方祖捷,叶青,刘峰等.毫米波副载波光通信技术的发展[J].中国激光,2006,**33**(4): 481~488
- 2 Chen Luoxiang, Huang Cheng, Chen Lin. A modified scheme for optical millimeter-wave generation based on optical carrier suppression modulation [J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(6): 659~662
陈罗湘,黄诚,陈林.一种改进的光载波抑制产生光毫米波的方法[J].激光技术,2008,**32**(6): 659~662
- 3 Hu Liliang, Chen Lin, Yun Jianjun *et al.*. A novel scheme for optical millimeter-wave generation based on double-sideband modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 238~242
胡黎亮,陈林,余建军等.一种改进的双边带调制产生光毫米波的方案[J].光学学报,2008,**28**(2): 238~242
- 4 Xiangling Liu, Zengji Liu, Jiandong Li *et al.*. Generation of optical carrier suppression millimeter-wave signal using one dual-parallel MZM to overcome chromatic dispersion [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(16): 3129~3135
- 5 Ying Zhao, Xiaoping Zheng, He Wen *et al.*. Simplified optical millimeter-wave generation configuration by frequency quadrupling using two cascaded Mach-Zehnder modulators [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(21): 3250~3252
- 6 Zhu Chuanhu, Lu Jia, Dong Ze *et al.*. Radio-over-fiber system with frequency quadruple optical millimeter-wave generation utilizing cascaded phase modulator along with an intensity modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 321~325
朱传湖,卢嘉,董泽等.采用级联相位调制器和强度调制器产生四倍频光载毫米波的光纤无线通信系统[J].光学学报,2010,**30**(2): 321~325
- 7 Chen Luoxiang, Lu Jia, Dong Ze *et al.*. A radio over fiber system based on two external modulator for optical millimeter generation with photonic frequency quadruple [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1910~1913
陈罗湘,卢嘉,董泽等.采用两个级联外部调制器产生四倍频光载毫米波的光纤无线通信系统[J].中国激光,2008,**35**(12): 1910~1913
- 8 Hao Chi, Jianping Yao. Frequency quadrupling and upconversion in a radio over fiber link [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(15): 2706~2711
- 9 J. He, L. Chen, Z. Dong *et al.*. Full-duplex radio-over-fiber system with photonics frequency quadruples for optical millimeter-wave generation [J]. *Optical Fiber Technology*, 2009, **15**(3): 290~295
- 10 Liu Limin, Dong Ze, Pi Yazhi *et al.*. Radio-over-fiber system for frequency-quadruple millimeter-wave generation by external modulator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 148~153
刘丽敏,董泽,皮雅稚等.采用外调制器产生四倍频的光载毫米波光纤无线通信系统[J].中国激光,2009,**36**(1): 148~153
- 11 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
- 12 Mohmoud Mohamed, Xiupu Zhang, Bouchaib Hraïmel *et al.*. Analysis of frequency quadrupling using a single Mach-Zehnder modulator for millimeter-wave generation and distribution over fiber systems [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(14): 10786~10802

栏目编辑:谢婧