

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0191-07

毫米波光纤无线通信系统的色散分析

蔡尤美 李迎春 叶家骏 林如俭

(上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200072)

摘要 针对应用于毫米波光纤无线通信(ROF)系统的光学倍频毫米波生成方法,探讨了光纤色散造成的毫米波幅度衰落问题。提出使用双电极马赫-曾德尔光调制器(MZM)生成毫米波的方案:光波进入双电极 MZM 的两臂后分别由同频反相的微波信号调相,然后叠加完成相位-强度转换。已调光波经光纤传输后再经光电转换产生调相微波的高次谐波,实现所需毫米波的生成,其幅度的最大化只需调整调相指数即可完成。就两种不同偏置状态的毫米波生成系统的色散衰落特性进行比较,发现两臂直流偏置端都接地的双电极光调制器 ROF 系统的色散性能更好,光纤色散不会导致奇次谐波的出现,也不会出现偶次幅度衰落到 0 的情况。上述数学分析的结论通过仿真、实验得到了验证。

关键词 光通信;光纤无线电通信;色散;衰落

中图分类号 TN761 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0191

Dispersion Analysis of Millimeter-Wave Radio-over-Fiber System

Cai Youmei Li Yingchun Ye Jiajun Lin Rujian

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai, 200072, China)

Abstract This paper focuses on discussing the millimeter-wave amplitude fading problems caused by fiber chromatic dispersion for the millimeter-wave generated by optical frequency multiplication in the millimeter-wave radio-over-fiber (ROF) system. A novel millimeter-wave generation technique using dual-electrode Mach-Zehnder modulator (MZM) is proposed. Light-wave injected into dual-electrode MZM is split into two optical carriers, which are phase modulated by two microwave signals respectively and then combined together to fulfill the phase-intensity conversion and is transmitted through the fiber, and finally photo-detected to generate electrical signal consisting of harmonics of the microwave signal. The desired millimeter-wave signal is one of the harmonics and can be maximized just by adjusting the phase modulation index. The chromatic dispersion affection on millimeter-wave fading for two different bias states of the dual-electrode MZM is analyzed and compared. This study finds that the tolerance of ROF system to fiber chromatic dispersion is better when the two direct current (DC) biases of dual-electrode MZM are earthed. Optical fiber chromatic dispersion does not cause the appearance of odd harmonics, in addition, the amplitudes of even harmonics do not decline to zero. The conclusion of mathematical analysis has been verified by computer simulation and experiment.

Key words optical communications; radio-over-fiber; chromatic dispersion; fading

1 引 言

未来无线通信网将朝着高数据率和高系统容量的方向发展,而毫米波光纤无线电(ROF)技术以其

速率高、容量大等诸多优点越来越受到关注,已成为下一代高速移动通信网的候选方案之一^[1,2]。

ROF 系统由中心站、基站和无线终端组成,中

收稿日期: 2010-04-27; 收到修改稿日期: 2010-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(60877053)、上海市科技发展项目(08dz150010F)和上海市科委集成电路专项(08706201000)资助课题。

作者简介: 蔡尤美(1986—),女,硕士研究生,主要从事光通信方面的研究。E-mail: caiyoumei@shu.edu.cn

导师简介: 林如俭(1939—),男,教授,主要从事光通信方面的研究。E-mail: rujianlin@vip.sina.com

心站与多个基站之间由光纤连接,基站与无线终端之间是毫米波无线信道。显然,光毫米波产生技术是 ROF 系统的关键技术。至今为止,已提出的毫米波光学生成方法主要有 3 种:直接强度调制、外部强度调制和光外差技术。基于外部调制器的光毫米波产生方案具有较高的可靠性,可降低系统成本,因而最有可能成为 ROF 系统中产生毫米波的首选技术^[3,4]。

光学倍频法是一种产生毫米波的光学方法,由荷兰 Eindhoven 技术大学的 Koonen 等^[5,6]提出。用低频微波结合光电子技术产生毫米波,系统相对简单,但是该方法产生的毫米波幅度与光源频率、扫描微波频率和光滤波器时延参数都有关系,很难获得稳定的毫米波,为此出现了使用双电极马赫-曾德尔调制器(MZM)生成毫米波的方案^[7]。它的基本原理是光波在双电极调制器的两臂中分别被同频反相的微波信号调相,两臂输出干涉后,光波中含有一系列由调相微波造成的高次边带,它们在光探测器中相互差拍,产生低频微波的高次谐波,达到毫米波频率,同时激光器的相位噪声也被抵消。只要调整调相指数即可使所要的毫米波幅度达到最大。

在毫米波 ROF 系统中,光纤色散会对毫米波幅度造成衰落,即对于给定的光纤长度,有一系列射频频率成分的输出功率为零;或者对于给定的射频频率,系统的射频输出功率随光纤长度起伏,在一系列光纤长度上为零。在国际上,对这个问题的研究可以追溯到 1995 年,文献^[8~11]探讨了采用光自外差法生成毫米波时,由光纤色散决定的不同波长光波的相位偏移导致毫米波幅度衰落的问题。

本文针对光学倍频法毫米波 ROF 系统中的光

纤色散所造成的毫米波衰落问题做了详细的分析,并比较两种双电极调制器结构 ROF 系统的抗光纤色散的性能。

2 原理分析

2.1 毫米波 ROF 系统的光纤色散分析数学模型

为了对不同毫米波 ROF 系统的光纤色散性能做一个定量的比较,首先建立一个毫米波 ROF 系统色散分析的数学模型。因为中心站的已调光波的电场在频率域具有周期特性,故可展开为傅里叶级数^[12]

$$E_{in} = f(\omega_s t) \exp(j\omega_c t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} F_n \exp[j(\omega_c + n\omega_s)t], \quad (1)$$

式中 F_n 为傅里叶系数, $F_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\theta) \exp(-jn\theta) d\theta$, ω_c 是光源角频率, ω_s 是调制微波角频率, $f(\omega_s t)$ 是关于 $\omega_s t$ 的函数。

单模光纤的传递函数可表示为^[13]

$$H(\omega) = \exp[-jk(\omega)z], \quad (2)$$

式中 z 是光纤长度,传播常数 $k(\omega)$ 与光的角频率 ω 有关,可以将 $k(\omega)$ 以 ω_c 为中心作泰勒级数展开:

$$k(\omega) = k_0 + k_1(\omega - \omega_c) + \frac{k_2}{2}(\omega - \omega_c)^2 + \dots, \text{ 将 } k(\omega)$$

代入(2)式,得

$$H(\omega) = \exp\{-j[k_0 + k_1(\omega - \omega_c) + k_2/2(\omega - \omega_c)^2 + \dots]z\}. \quad (3)$$

(3)式的前两项是固定的相位偏移和传播时延,第三项是一阶光纤色散,而高次项可以忽略^[14]。输入光纤的光波由离散的一系列频率分量 $\omega_c + n\omega_s$ 组成,故(3)式可离散化为

$$H_n = H(\omega_c + n\omega_s) = \exp[-j(k_0 + k_1 n\omega_s + \frac{k_2}{2} n^2 \omega_s^2)z] = \exp[-j(k_0 z + k_1 n\omega_s z + n^2 \varphi)], \quad (4)$$

式中 $\varphi = \frac{k_2}{2} \omega_s^2 z$ 代表在工作波长和调制频率处的光纤色散。

一阶光纤色散常数 D 定义为^[14]

$$D = \frac{1}{z} \frac{dt_g}{d\lambda} = \frac{1}{z} \frac{d\left[z \frac{dk(\omega)}{d\omega} \right]}{d\lambda} = -k_2 \frac{2\pi c}{\lambda^2}, \quad (5)$$

式中 t_g 为群时延, c 代表真空中的光速,故 φ 可由色散常数 D 表示为 $\varphi = -\frac{\omega_s^2 D \lambda^2}{4\pi c} z$ 。

经过光纤传输后,光波电场的表达式为

$$E_{out}(\omega, t) = E_{in}(\omega, t) H_n = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n H_n \exp[j(\omega_c + n\omega_s)t]. \quad (6)$$

经光电转换后,光探测器产生的光电流为

$$i_d(t) \propto E_{out}(t)E_{out}^*(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n H_n \exp[j(\omega_c + n\omega_s)t] \sum_{m=-\infty}^{\infty} F_m^* H_m^* \exp[-j(\omega_c + m\omega_s)t] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} F_n F_m^* H_n H_m^* \exp[j(n-m)\omega_s t]. \quad (7)$$

令 $p=n-m$, 并将 F_n 和 H_n 代入, 得

$$i_d(t) \propto \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} F_{m+p} F_m^* H_{m+p} H_m^* \exp(jp\omega_s t) = \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\pi \sim \pi} f(\theta_1) f^*(\theta_2) \exp[-j(m+p)\theta_1] \times \exp(jm\theta_2) d\theta_1 d\theta_2 \exp[-j(p^2 + 2mp)\varphi] \exp[jp\omega_s(t - k_1 z)] = \sum_{p=-\infty}^{\infty} \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\pi \sim \pi} f(\theta_1) f^*(\theta_2) \exp(-jp\theta_1) \times \sum_{m=-\infty}^{\infty} \exp[jm(\theta_2 - \theta_1 - 2p\varphi)] d\theta_1 d\theta_2 \exp(-jp^2\varphi) \exp[jp\omega_s(t - k_1 z)]. \quad (8)$$

利用周期性抽样函数的傅里叶关系式 $\delta_T(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \delta(t-lT) = \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \exp jm \frac{2\pi}{T} t$, 并令 $t = \theta_2 - \theta_1 - 2p\varphi$, $T = 2\pi$ 代入, (8)式可进一步化简为

$$i_d(t) \propto \sum_{p=-\infty}^{\infty} \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\pi \sim \pi} f(\theta_1) f^*(\theta_2) \exp(-jp\theta_1) 2\pi \sum_{l=-\infty}^{\infty} \delta(\theta_2 - \theta_1 - 2p\varphi - 2\pi l) d\theta_1 d\theta_2 \exp(-jp^2\varphi) \times \exp[jp\omega_s(t - k_1 z)] = \sum_{p=-\infty}^{\infty} \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\theta - p\varphi) f^*(\theta + p\varphi) \exp(-jp\theta) d\theta \times \exp[jp\omega_s(t - k_1 z)] = \sum_{p=-\infty}^{\infty} I_p \exp[jp\omega_s(t - k_1 z)]. \quad (9)$$

由此可见经光纤传输后,光探测器输出的调制微波的各次谐波的幅度为

$$I_p = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\theta - p\varphi) f^*(\theta + p\varphi) \exp(-jp\theta) d\theta. \quad (10)$$

因此,光电流中的第 p 次谐波为

$$F_p = I_p \exp(jp\omega_s t) + I_{-p} \exp(-jp\omega_s t), \quad (11)$$

式中 p 为大于 0 的整数。(11)式中忽略了光纤造成的固定延时 $k_1 z$ 。

2.2 双电极调制器结构 ROF 系统的光纤色散分析

ROF 系统如图 1 所示,单模激光器发出的激光在双电极 MZM 中被分成两路光波。该光调制器可

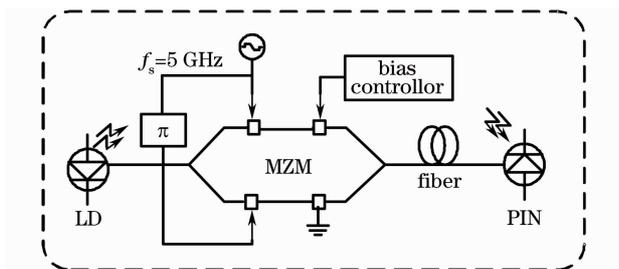


图 1 ROF 系统框图

Fig. 1 Block diagram of radio-over-fiber system

看成是两个并行的光调相器,分别对两路光波进行相位调制。在调制器两臂的射频电极加两个同频但反相的微波余弦信号,并且一偏压电极接地,另一偏压电极接直流偏压。

2.2.1 方案一

当直流偏压为零时,调制器输出光波信号的电场表达式为

$$E_{in} = E_c \exp[j\omega_c t + j\beta \cos(\omega_s t)] + E_c \exp[j\omega_c t - j\beta \cos(\omega_s t)] = f(\omega_s t) \exp(j\omega_c t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} F_n \exp[j(\omega_c + n\omega_s)t], \quad (12)$$

式中 E_c 为输入光波电场振幅, β 为调相指数, $\beta = \pi V_M / V_\pi$, V_M 是微波电压振幅, V_π 为调相器半波电压, $f(\theta) = E_c [\exp(j\beta \cos \theta) + \exp(-j\beta \cos \theta)]$ 。

将 $f(\theta)$ 代入(10)式得光纤传输后,光探测器输出的各次谐波的幅度为

$$I_p = E_c^2 \{ J_p [2\beta \sin(p\varphi)] + J_p [-2\beta \sin(p\varphi)] + \exp(jp \frac{\pi}{2}) \{ J_p [2\beta \cos(p\varphi)] + J_p [-2\beta \cos(p\varphi)] \} \}. \quad (13)$$

因此,从(11)式得出光电流中调相微波的第 p 次谐波为

$$F_p = 2E_c^2 [1 + (-1)^p] J_p [2\beta \sin(p\varphi)] \cos(p\omega_s t) + 2E_c^2 [1 + (-1)^p] J_p [2\beta \cos(p\varphi)] \cos\left(p\omega_s t + p \frac{\pi}{2}\right) \quad (14)$$

当 p 为偶数, 即 $p=2n, n=1, 2, 3, \dots$ 时

$$F_{2n} = 4E_c^2 J_{2n} [2\beta \sin(2n\varphi)] \cos(2n\omega_s t) + 4E_c^2 J_{2n} [2\beta \cos(2n\varphi)] \cos\left(2n\omega_s t + 2n \times \frac{\pi}{2}\right) = 4E_c^2 \{J_{2n} [2\beta \sin(2n\varphi)] + (-1)^n J_{2n} [2\beta \cos(2n\varphi)]\} \cos(2n\omega_s t). \quad (15)$$

当 p 为奇数, 即 $p=2n-1, n=1, 2, 3, \dots$ 时

$$F_{2n-1} = 0. \quad (16)$$

2.2.2 方案二

当直流偏压为 $V\pi/2$ 时, 调制器输出光波信号的电场表达式为

$$E_{in} = E_c \exp\left[j\omega_c t + j\beta \cos(\omega_s t) + j \frac{\pi}{2}\right] + E_c \exp[j\omega_c t - j\beta \cos(\omega_s t)] = f(\omega_s t) \exp(j\omega_c t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} F_n \exp[j(\omega_c + n\omega_s)t], \quad (17)$$

式中 $f(\theta) = E_c \left[\exp\left(j\beta \cos \theta + j \frac{\pi}{2}\right) + \exp(-j\beta \cos \theta) \right]$.

此时, 光电流中第 p 次谐波为

$$F_p = I_p \exp(jp\omega_s t) + I_{-p} \exp(-jp\omega_s t) = 2E_c^2 [1 + (-1)^p] J_p [2\beta \sin(p\varphi)] \cos(p\omega_s t) - 2E_c^2 [1 - (-1)^p] J_p [2\beta \cos(p\varphi)] \sin\left(p\omega_s t + p \frac{\pi}{2}\right). \quad (18)$$

当 p 为偶数即 $p=2n, n=1, 2, 3, \dots$ 时

$$F_{2n} = 4E_c^2 \times J_{2n} [2\beta \sin(2n\varphi)] \cos(2n\omega_s t). \quad (19)$$

当 p 为奇数即 $p=2n-1, n=1, 2, 3, \dots$ 时

$$F_{2n-1} = 4E_c^2 (-1)^n \times J_{2n-1} \{2\beta \cos[(2n-1)\varphi]\} \cos[(2n-1)\omega_s t]. \quad (20)$$

3 实验结果

方案一中 ROF 系统的参数设置如下: LD 工作在 1550 nm 波长, 线宽为 10 MHz, 功率为 40 mW。双电极 MZM 的半波电压为 4.6 V, 两直流偏置端都接地。5 GHz 微波信号的振幅为 7 V, 调相指数为 4.8, 这样可使 8 次谐波大于其他谐波。双电极调制器产生的光谱如图 2 所示。

不经过光纤传输时, 基站光探测器输出射频信号的频谱如图 3 所示; 经过 5 km 光纤传输时, 基站

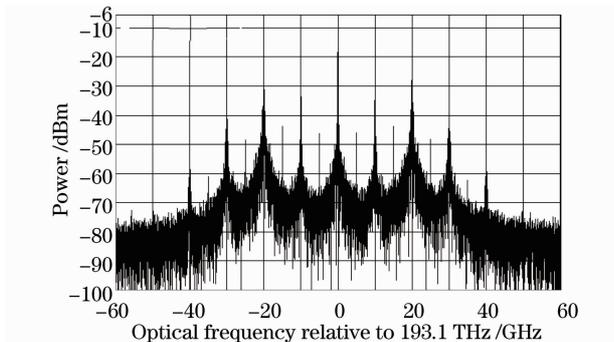


图 2 调制器输出光谱图

Fig. 2 Optical spectrum at modulator output

光探测器输出图 4 的结果, 可见光纤色散不会导致奇次谐波的出现, 只对偶次谐波的幅度有影响, 满足 (15), (16) 式。而且 8 次谐波 (频率为 40 GHz) 的谱线是最高的, 这是恰当选取调相指数的结果。

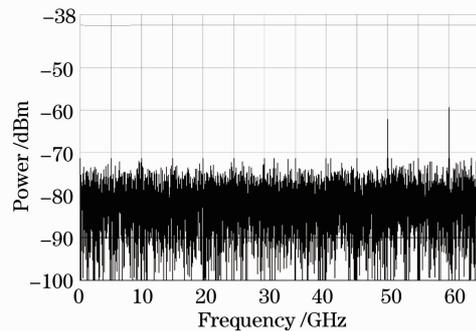


图 3 经过 0 km 光纤的各次谐波幅度

Fig. 3 Harmonic map with 0 km fiber

根据 (15), (16) 式, 偶次谐波幅度受色散影响的因子为 $J_{2n} [2\beta \sin(2n\varphi)] + (-1)^n J_{2n} [2\beta \cos(2n\varphi)]$, 图 5 是各偶次谐波幅度随光纤传输距离变化的关系曲线, 光纤色散常数 $D=17$ (ps/km/nm), $c=3.0 \times 10^8$ m/s, $f_s=5$ GHz, 每条曲线各自取最佳调相指数, 由图 5 可知, 偶次谐波的幅度随着光纤传输距

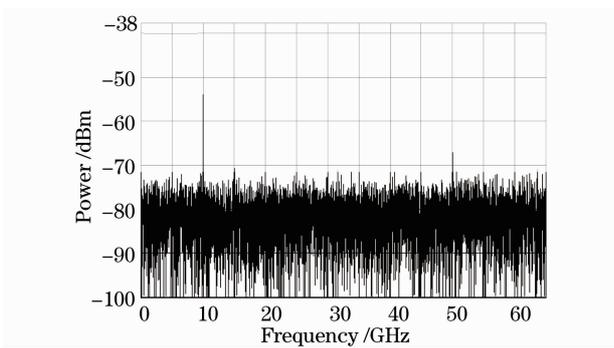


图 4 经过 5 km 光纤的各次谐波幅度
Fig. 4 Harmonic map with 5 km fiber

离周期性地起伏,第 4 谐波在光纤距离为 0 km 处幅度较小,但随着光纤长度的加长在某处仍可达到最大值,这说明光纤色散也可加强所要谐波的产生。特别有趣的是,次数为 4 的整数倍的谐波(如图 5 中的第 4 次,第 8 次,第 12 次谐波)不会出现幅度衰落到 0 的情况。

MZM 的两臂直流偏置端都接地,这样的双电极光调制器毫米波生成方法的抗光纤色散性能是最好的,光纤色散不会导致奇次谐波的出现,某些偶次谐波的幅度,不会衰落到 0,而且在特定的参数设置下,可使某个偶次谐波的幅度达到最大。

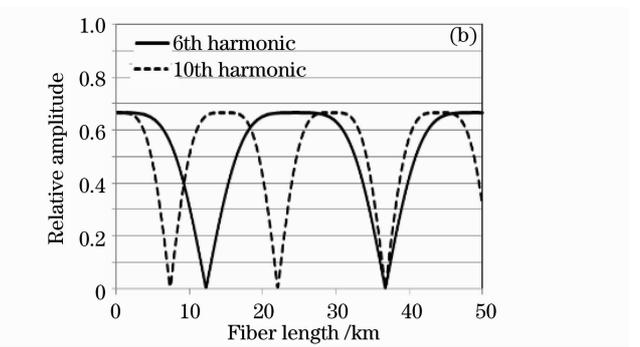
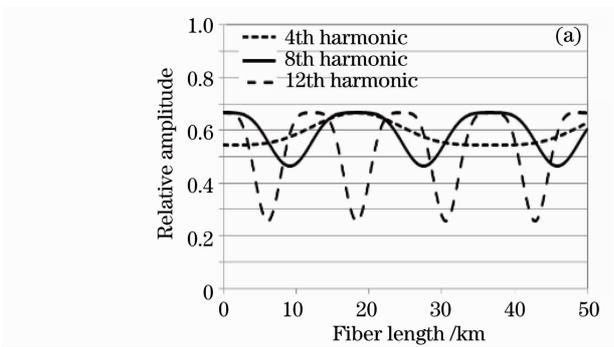


图 5 各偶次谐波幅度随光纤传输距离变化的关系曲线

Fig. 5 Curves of even harmonics amplitude changing with the optical fiber transmission distance

在 ROF 实验平台进行验证,参数设置为: 5 GHz 微波信号的功率为 -2.1 dBm,通过一个双路输出、互为倒向的放大器,放大增益为 29 dBm,分别对无光纤和光纤长度为 5 km 两种情况进行测试,其他参数与仿真时一样。光谱图如图 6 所示, PIN 管输出的频谱如图 7,8 所示。图 7 显示当光纤长度为零时光探测器的输出只有偶次谐波。当光纤长度不为零时,由于环境温度等外部影响,在实际系统中调节直流偏压无法保证 MZM 两臂的相位差被精确地控制到 0°,故图 8 中会出现部分奇次谐波。

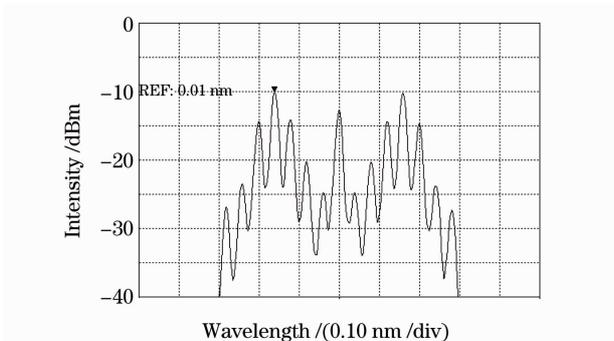


图 6 经过 5 km 光纤后的输出光谱图
Fig. 6 Optical spectrum with 5 km fiber

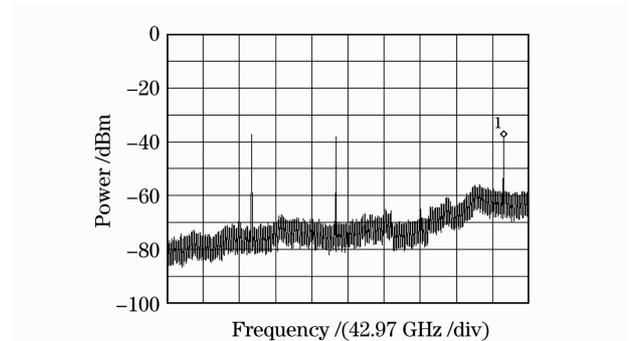


图 7 经过 0 km 光纤的 PIN 管输出
Fig. 7 PIN output with 0 km fiber

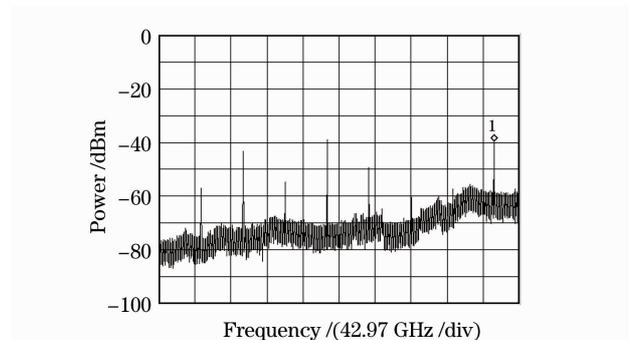


图 8 经过 5 km 光纤的 PIN 管输出
Fig. 8 PIN output with 5 km fiber

方案二中 ROF 系统的参数设置如下:双电极 MZM 的半波电压为 4.6 V,一直流偏置电压为 2.3 V,5 GHz 微波信号的振幅为 6.3 V,调相指数为 4.3,其他参数设置同上,这样可使 7 次谐波大于其他谐波。双电极调制器产生的光谱如图 9 所示。经过 0 km 和 5 km 的光纤,光探测器输出射频信号的频谱分别如图 10,11 所示。可见当光纤长度为 0 km 时,不存在偶次谐波,只有奇次谐波;当光纤长度不为零时,奇次、偶次谐波同时出现,满足(19),(20)式,且第 7 次谐波(频率为 35 GHz)的谱线是最高的。

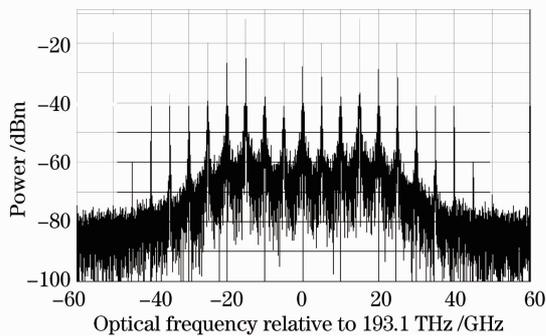


图 9 调制器输出光谱图

Fig. 9 Optical spectrum at modulator output

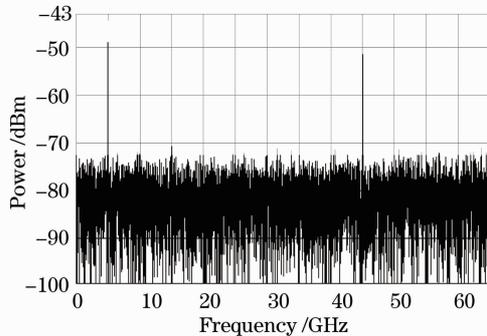


图 10 经过 0 km 光纤的各次谐波幅度

Fig. 10 Harmonic map with 0 km fiber

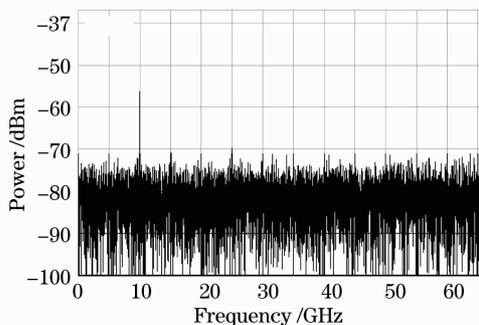


图 11 经过 5 km 光纤的各次谐波幅度

Fig. 11 Harmonic map with 5 km fiber

根据(19),(20)式,奇次谐波的幅度受光纤色散影响的因子为 $J_{2n-1}\{2\beta\cos[(2n-1)\varphi]\}$,偶次谐波的幅度受光纤色散影响的因子为 $J_{2n}[2\beta\sin(2n\varphi)]$ 。图 12 是第 6 次谐波、第 7 次谐波幅度随光纤传输距离变化的关系曲线(调相指数分别取 $\beta=3.8, \beta=4.3$)。由图 12 可知,第 6 次谐波、第 7 次谐波的幅度随光纤传输距离周期性地起伏。第 6 谐波在光纤距离为 0 km 处幅度为零,证明光纤长度为零时,不存在偶次谐波。第 6,7 次谐波在某些光纤长度上会出现幅度为 0 的情况,不适宜用于通信。

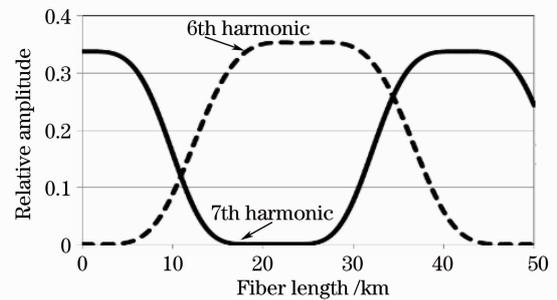


图 12 第 6 次、第 7 次谐波幅度随光纤传输距离变化的关系曲线

Fig. 12 Curve of the 6th,7th harmonic amplitude changing with the optical fiber transmission distance

在 ROF 实际实验平台进行验证,参数设置为:5 GHz 微波信号的功率为 1.6 dBm,通过一个双路输出、互为倒向的放大器,放大增益为 29 dBm,分别对无光纤和光纤长度为 5 km 两种情况进行测试。光谱图如图 13 所示,PIN 管输出的频谱如图 14,15 所示。

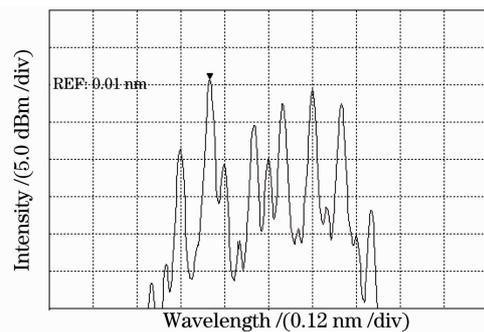


图 13 经过 5 km 光纤后的输出光谱图

Fig. 13 Optical spectrum with 5 km fiber

4 结 论

针对两种光学倍频法毫米波 ROF 系统的抗色散性能进行比较,发现基于两臂直流偏置端都接地的双电极光调制器的 ROF 系统的抗色散性能更好,光纤色散不会导致奇次谐波的出现,次数为 4 的整数倍的谐波的幅度衰落很小,不会出现幅度衰落

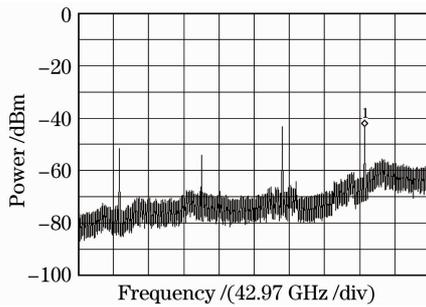


图 14 经过 0 km 光纤的 PIN 管输出
Fig. 14 PIN output with 0 km fiber

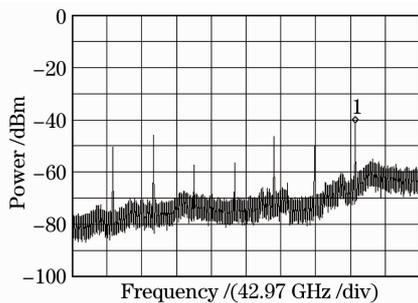


图 15 经过 5 km 光纤的 PIN 管输出
Fig. 15 PIN output with 5 km fiber

到 0 的情况,而且在特定的参数设置下,可使某个偶次谐波的幅度达到最大,这有利于建立一个可靠性高的毫米波 ROF 系统。理论分析的结果通过仿真和实验得到了验证。

参 考 文 献

1 Kuri Toshiaki, Kitayama Ken-Ichi. Optical heterodyne detection technique for densely multiplexed millimeter-wave-band radio-on-fiber systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21** (12): 3167~3179
2 Kim Ajung, Joo Young Hun, Kim Yungsoo. 60 GHz wireless communication systems with radio-over-fiber links for indoor wireless LANs[J]. *IEEE Trans. Consumer Electronics*, 2004, **50**(2): 517~520

3 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. 毫米波副载波光纤通信技术的研究进展[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 481~488
4 R. P. Braun, G. Grosskopf, D. Rohde *et al.*. Optical millimetre-wave generation and transmission experiments for mobile 60 GHz band communications [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32** (7): 626~628
5 Ton Koonen, Anthony Ng'oma, Peter Smulders *et al.*. In-house networks using multimode polymer optical fiber for broadband wireless services[J]. *Photonic Network Communications*, 2003, **5**(2): 177~187
6 Ton Koonen, Anthony Ng'oma, Maria Garcia Larrocle *et al.*. Novel cost-effective techniques for microwave signal delivery in fiber-wireless networks [C]. In (Ed.), Proc. ECOC2004, Stockholm, Sweden, 120~123
7 Rujian Lin, Meiwei Zhou, Zheyun Zhou *et al.*. New progress of mm-wave radio-over-fiber system based on OFM [J]. *Frontier of Optoelectronics in China*, 2009, **2**(4): 368~378
8 H. Schmuck. Comparison of optical millimeter-wave system concepts with regard to chromatic dispersion[J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(21): 1848~1849
9 U. Gliese, S. Norskov, T. N. Nielson. Chromatic dispersion in fiber-optic microwave and millimeter-wave links [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Technologies*, 1996, **44** (10): 1716~1724
10 G. H. Smith, D. Novak, Z. Ahmed. Techniques for optical SSB generation to overcome dispersion penalties in fibre-radio systems [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(1): 74~75
11 J. Park, W. V. Sorin, K. Y. Lau. Elimination of the fiber chromatic dispersion penalty on 1550 nm millimeter-wave optical transmission[J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(6): 512~513
12 N. G. Walker, D. Wake, I. C. Smith. Efficient millimeter-wave signal generation through FM-IM conversion in dispersive optical fibre links [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28** (21): 2027~2028
13 A. F. Elrefaie, R. E. Wagner, D. A. Atlas *et al.*. Chromatic dispersion limitation in coherent lightwave transmission systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **6**(5): 704~709
14 Govind P. Agrawal. Theory and Applications of Nonlinear Fiber Optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 41~55
Govind P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2002. 41~55