

文章编号: 0253-2239(2010)07-1960-05

单边带光纤承载射频系统的最佳调制指数

赵建功 刘增基 刘香玲 尚 韬 岳 鹏

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要 研究了在采用光单边带(SSB)调制方式的光纤承载射频(ROF)系统中,射频(RF)信号对光载波的调制指数对调制产生的光载毫米波信号中光载波和光边带分量之间功率对比关系的影响。针对单边带光载毫米波信号中的光载波分量和光边带分量的功率相差较大时,ROF系统的接收灵敏度较低的问题,分析了决定光载波和光边带分量的功率的主要因素。并指出通过选择最佳的射频调制指数可以使光载波和光边带分量的功率平衡,给出了最佳调制指数的值。仿真结果证实了最佳射频调制指数能够使光载波和光边带分量的功率平衡,进而使微波光纤系统的光接收灵敏度达到最高。

关键词 光纤光学;光纤承载射频;调制器;单边带;调制指数

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103007.1960

Optimum Modulation Index for Single Sideband Radio over Fiber System

Zhao Jiangong Liu Zengji Liu Xiangling Shang Tao Yue Peng

(State Key Laboratory on Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract The influence of the modulation index of the radio frequency (RF) signal on the optical carrier on the relation between power of the carrier component and that of the sideband component of the optical millimeter-wave signal generated by single sideband (SSB) modulation in the radio over fiber (ROF) system is theoretically and numerically investigated. In order to address the problem that when the carrier component is much larger than the sideband component in the optical SSB millimeter-wave signal that the receiver sensitivity of the radio over fiber (ROF) system is relatively low, the determinant of the power of carrier component and sideband component is analyzed. It is shown that an optimum RF modulation index can bring on a balance between the powers of these two components. It is verified by simulation results that the optimum RF modulation index can make the power of sideband equivalent to that of carrier component, thus results in the best receiver sensitivity of the radio over fiber system.

Key words fiber optics; radio over fiber; modulators; single sideband; modulation index

1 引 言

光纤承载射频(ROF)是一种有潜力的大容量、宽带无线接入技术。ROF技术可以将光纤传输和毫米波的优势结合在一起,缓解无线毫米波系统传输距离受限的问题^[1~4]。高质量的毫米波信号产生技术是实现毫米波ROF系统的关键技术之一。目前产生毫米波信号的方式有很多种^[5~9],其中通过调制外调制器获得单边带(SSB)光载毫米信号的做

法倍受青睐。SSB信号有很多优点,如不受周期性传播衰落效应的影响,以及信道带宽只有普通强度调制信号带宽的一半^[10]等。

然而,SSB调制产生的光载微波/毫米波信号中的光载波分量过大,导致光接收恢复出的电信号中直流部分占了很大的比重,整个系统的光接收灵敏度较低。有研究指出,减小SSB信号中光载波和光边带的功率之差可以提高光接收机灵敏

收稿日期: 2009-07-13; 收到修改稿日期: 2009-09-28

基金项目: 高等学校学科创新引智计划(B08038)和国家重点实验室基金(ISN03080002)资助课题。

作者简介: 赵建功(1982—),男,博士研究生,主要从事光纤无线通信技术方面的研究。

E-mail: zhao_jian_gong@126.com

导师简介: 刘增基(1937—),男,教授,博士生导师,主要从事宽带通信网络技术方面的研究。E-mail: zjliu@xidian.edu.cn

度^[6,11]。为了解决光载波功率过高给光信号传输带来的影响,有研究者采用光纤布拉格光栅(FBG)抑制掉一部分光载波分量^[6,12],也有用半导体放大器使光边带获得比光载波更多的放大量^[13],还有利用受激布里渊散射(SBS)效应提高光边带的功率^[14],目的都是减小两者功率差异。不过光纤布拉格光栅(FBG)对温度变化比较敏感,因此需要有复杂的控制系统配合工作,从而会使系统的复杂性增加。采用半导体放大器存在着偏振敏感,价格昂贵,对温度变化敏感等重要问题。受激布里渊散射效应只能用于产生工作频率为 11 GHz(布里渊频率)的 RF 信号,应用范围受限。

本文对基于马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)调制器的 SSB 调制过程建立了准确的理论模型,在此基础上分析出射频信号对光载波的调制指数会直接影响 SSB 信号的光载波和光边带功率对比,并详细分析了两者功率之比随调制指数变化的趋势,指出存在一个最佳的调制指数可以使光载波和光边带的功率相等,调制指数高于或低于这个最佳值都会增大光载波和光边带的功率差异,进而导致整个系统的光接收灵敏度下降。仿真结果证实了理论分析部分得出的最佳调制指数可以使光载波和光边带的功率相等,且整个系统的光接收灵敏度达到最高。

2 SSB 调制理论模型

以马赫-曾德尔调制器产生 SSB 光信号的 ROF 传输系统模型如图 1 所示,其中 LD 为激光器,D-MZM 为双臂马赫-曾德尔调制器,RF 为毫米波本振,PS 为相位调节器,DC 为直流偏置电压,SMF 为标准单模光纤,PD 为光电探测器,BWP 为带通滤波器,AT 为射频天线。

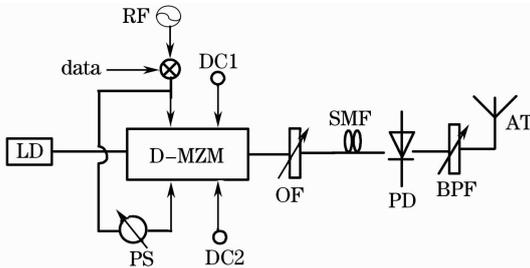


图 1 基于单边带调制的 ROF 系统结构

Fig. 1 Structure module of ROF system based on SSB modulation

激光器的输出可以表示为 $E(t) = E_0 \exp(j\omega_c t)$, 其中 E_0 和 ω_c 分别为光载波的幅度和角频率。加在 MZM 调制器两个臂上的电信号分别表示为

$$V_q(t) = V_{DCq} + V_{RFq} \cos(\omega_{RF} t + \Phi_{RFq}), \quad q = 1, 2 \quad (1)$$

式中 V_{DCq} 为加在两臂上的直流偏置电压, $V_{RF} \cos(\omega_{RF} t + \Phi_{RFq})$ 为加在两臂上的毫米波信号, V_{RF} , ω_{RF} 和 Φ_{RFq} 分别为毫米波信号的幅度、角频率和相位。

MZM 的每一个臂都可以看作一个调相器,通常 MZM 分路器的分光比例为 1:1,且两臂的平衡度为 1,马赫-曾德尔调制器的输出为

$$E_{MZM}(t) = \frac{E_0 \exp(j\omega_c t)}{\sqrt{2}} \exp\left[j\pi \frac{V_1(t)}{V_\pi}\right] + \frac{E_0 \exp(j\omega_c t)}{\sqrt{2}} \exp\left[j\pi \frac{V_2(t)}{V_\pi}\right], \quad (2)$$

式中 V_π 为马赫-曾德尔调制器半波电压。(2)式展开后得

$$E(0, t) = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \exp(j\phi_d) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \{2J_n(m) \cos(\phi_v + n\phi_e) \times \exp[j(\omega_c t + n\omega_{RF} t + n\phi_p + n\pi/2)]\}, \quad (3)$$

式中 $m = \pi V_{RF}/V_\pi$ 为调制指数, $J_n(x)$ 为第一类 n 阶贝塞尔函数,

$$\phi_d = \pi(V_{DC1} + V_{DC2})/2V_\pi,$$

$$\phi_v = \pi(V_{DC1} - V_{DC2})/2V_\pi,$$

$$\phi_p = (\Phi_{RF1} + \Phi_{RF2})/2,$$

$$\phi_e = (\Phi_{RF1} - \Phi_{RF2})/2.$$

当施加在马 ZM 上的两直流偏压相差 $0.5 V_\pi$, 两路毫米波信号有 90° 的相移,用光滤波器(OF)滤去高次谐波后可以获得 SSB 信号^[4],SSB 信号的表达式为

$$E_{SSB}(0, t) = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) J_0(m) \exp[j(\omega_c t + \phi_d)] + \frac{E_0}{\sqrt{2}} J_1(m) \exp[j(\omega_c t + \omega_{RF} t + \phi_d + \phi_p + \frac{\pi}{2})], \quad (4)$$

式中的第一项表示的是光载波分量,第二项表示的是光边带分量,可以发现两个分量之间的频率间隔就是毫米波本振的频率,即把毫米波信号搬移到了光载波频段。这种信号在光电探测器 PD(平方律器件)上拍频可恢复出毫米波信号。在背靠背系统中,上述光信号在 PD 上光/电转换(O/E)后恢复出毫米波信号

$$I_{SSB}(t) = \frac{E_0^2 J_0(m) J_1(m)}{2\sqrt{2}} \cos\left(\omega_{RF} t + \phi_p + \frac{\pi}{2}\right). \quad (5)$$

为简明的描述光毫米波信号的光单边带调制原理,(1)式中没有包含毫米波所携带的数据信号。携带数据信号时,只需根据数据信号的调制格式(例如幅度键控或相位键控)对(1)~(5)式做相应的修改即可。

3 边载比分析

光边带分量和光载波分量的功率差异主要由贝塞尔函数的阶数差异 $[J_0(m)$ 和 $J_1(m)]$ 以及两路毫米波信号的相移(90°)所引入的 $\sqrt{2}/2$ 倍的幅度差异引起。光边带和光载波的功率之比(简称边载比, SCR)为

$$f_{\text{SCR}} = 20\lg \left| \frac{J_1(m)}{\cos\left(\frac{\pi}{4}\right)J_0(m)} \right|, \quad (6)$$

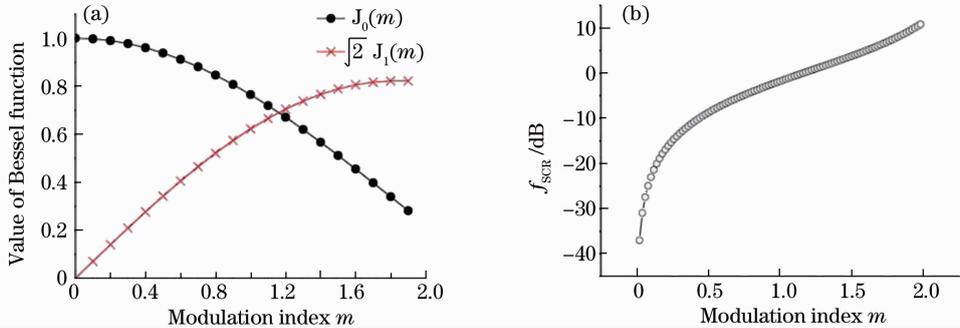


图 2 (a) $J_0(m)$ 、 $\sqrt{2}J_1(m)$ 和(b) f_{SCR} 随调制指数 m 的变化

Fig. 2 Variation of (a) $J_0(m)$ 、 $\sqrt{2}J_1(m)$ and (b) f_{SCR} with the modulation index m

光通信系统的接收灵敏度通常定义为使系统误码率达到某一量级(比如 10^{-9})时所需要的最小接收光功率,该最小接收光功率的值越小则接收灵敏度越高,通信链路的性能也就越好。图 1 所示的 ROF 系统中,PD 接收到的光功率主要由光载分量的功率 P_c 和光边带分量的功率 P_s 相加而得。由 (4) 式可以得知, P_c 和 P_s 可以分别表示为

$$\begin{cases} P_c = \left[\frac{E_0}{\sqrt{2}} \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) J_0(m) \right]^2, \\ P_s = \left[\frac{E_0}{\sqrt{2}} J_1(m) \right]^2. \end{cases} \quad (7)$$

显然,当 (4) 式中的 $\frac{E_0^2 J_0(m) J_1(m)}{2\sqrt{2}}$ 项一定时,要使 $\left[\frac{E_0}{\sqrt{2}} \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) J_0(m) \right]^2 + \left[\frac{E_0}{\sqrt{2}} J_1(m) \right]^2$ 的值最小,必然有 $\cos\left(\frac{\pi}{4}\right) J_0(m) = J_1(m)$, 此时 m 的值为 1.16。因此当调制指数 m 取值为 1.16 时,整个系统的光接收灵敏度将达到最高。

4 仿真结果

为进一步分析调制指数对光毫米波信号两个分量功率之比的影响。本文进行了模拟仿真,系统的结构如图 3 所示。图中 OSG 为光单边带信号生成,

$J_0(m)$ 、 $J_1(m)$ 以及 SCR 随调制指数 m 变化的情况如图 2 所示。文献[15]指出 $m=0.1, 1, 1.7$ 时分别代表低、中、高调制指数,所以图 2 中调制指数 m 的范围选在了 $0 \sim 2$ 之间。

f_{SCR} 的变化趋势说明,当调制指数很小时,光边带的功率会远小于光载波分量的功率,当 m 逐渐增大时两者功率的差距逐渐缩小,当 m 增至 1.16 时两者的幅值相等($f_{\text{SCR}}=0$),当 m 继续增长时,两者的功率差异又将加大。

DPSK 为差分相移键控,EDFA 为掺铒光纤放大器,LP 为低通滤波器,BPF 为带通滤波器,DL 为延迟线,BERT 为误码测试仪。激光器的波长 1553.6 nm (193.10 THz),激光器的 3 dB 带宽为 10 MHz。MZM 调制器的半波电压为 5 V,毫米波的载频 40 GHz(故光边带分量的中心波长会在 193.14 THz 处),光电探测器输出的电信号经中心波长为 40 GHz 的带通滤波器滤波。

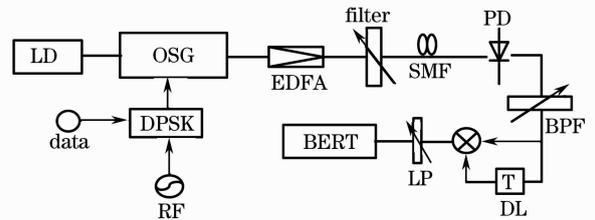


图 3 ROF 传输系统的仿真结构

Fig. 3 Simulation scheme of ROF transmission system

仿真过程分两个步骤,第一步对毫米波信号不携带数据的情况进行仿真,调制指数 m 取 0.25, 0.5, 1, 1.16, 1.5, 1.7 时,随着调制指数的增加出现了光边带分量的功率小于、等于、大于光载波功率的情况。图 4 显示了调制指数为 0.25, 1.16, 1.7 时光毫米波信号的光边带分量和光载波分量的功率对比情况。

第二步对毫米波信号携带数据的情况进行仿

真,数字基带信号的类型选择长度为 $2^{31} - 1$ 的不归零(NRZ)编码伪随机码,基带信号以 DPSK 方式调制到毫米波信号上,数据的速率为 $155 \text{ Mb/s}^{[5]}$,光电探测器 PD 恢复出的携带数据的毫米波信号送入差分解调器(不需要相干载波)进行解调,解调出的基带信号送至误码测试仪进行误码分析。研究中通

常把光电探测器接收的光功率和误码率(BER) R_{BE} 的对应关系作为衡量链路性能的一个指标,调制指数分别为0.25,0.5,1,1.16,1.5,1.7时,传输系统中误码率与光电探测器接收光功率的对应关系如图5所示。图5中给出了光纤长度为0(背靠背)和40 km两种场景下误码率与接收光功率的对应关系。

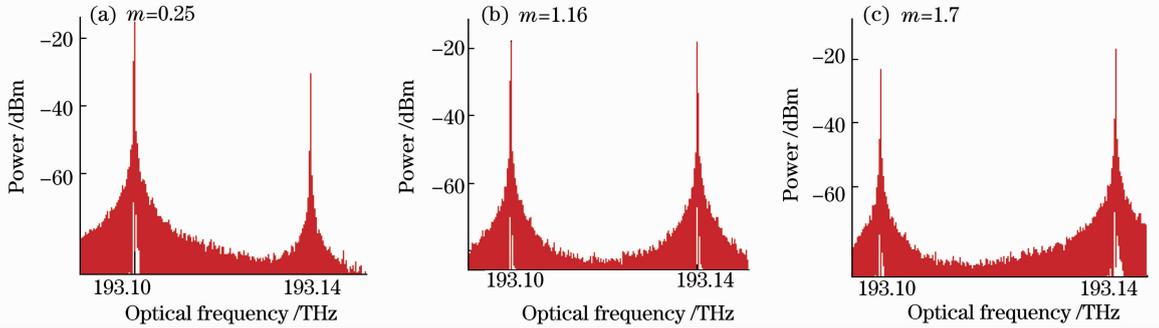


图4 不同的调制指数下光载波和光边带功率的相对关系

Fig. 4 Comparison of the power of optical carrier and that of the sideband for different modulation index

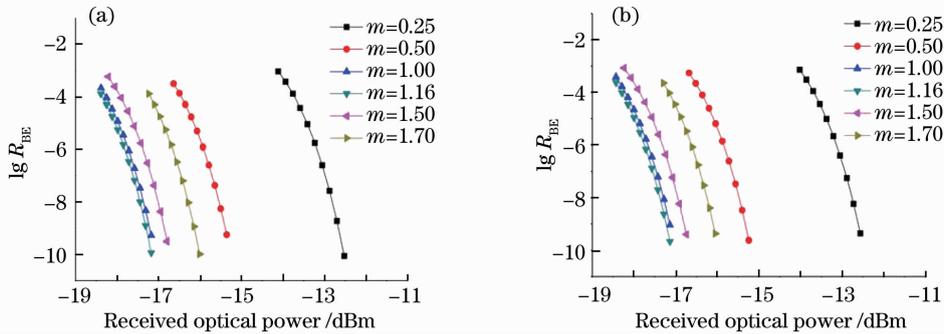


图5 不同调制指数下误码率随接收光功率变化。(a)背靠背;(b)光纤长40 km

Fig. 5 Variation of BER with the optical power received for different modulation. (a) back-to-back; (b) fiber length of 40 km

背靠背 ROF 系统中的调制指数, f_{SCR} 以及系统误码率达到 10^{-9} 所需的接收光功率如表1所示。光纤长度为40 km时,三个参数的对应关系与表1类似,不再赘述。

表1 调制指数, f_{SCR} 以及误码率 10^{-9} 所对应的接收光功率

Table 1 Modulation index, f_{SCR} and the received optical power for BER of 10^{-9}

Modulation index	f_{SCR}/dB	Received optical power /dBm
0.25	-15	-12.67
0.5	-8.1	-15.39
1	-2.2	-17.20
1.16	0	-17.31
1.5	3.8	-16.84
1.7	5.2	-16.14

可见随着调制指数的增加,光载波和光边带分量之间的功率差距逐渐缩小,并在调制指数增至

1.16时相等,而当 m 继续增加时,两者之间的功率差距又将增大。

对比图5(a)和图5(b)可以发现,在各种调制指数下,误码率与接收光功率的对应关系没有随链路长度的增加而发生明显改变。最优的射频调制指数在有光纤链路的情况下都能使系统的接收机灵敏度达到最佳。光纤中的色散、非线性等效应并没有对系统误码率性能带来明显影响。

5 结 论

采用SSB调制方式的ROF系统经常面临光边带分量和光载波分量功率差别较大,导致接收灵敏度较低的问题。本文通过理论分析结合仿真验证的方法指出,毫米波信号对光载波调制指数的变化直接影响到光边带和光载波的功率对比,且调制指数为 $m=1.16$ 可以使两种的功率相等。在最优的调

制指数下,光边带和光载波的功率相等,且整个系统的接收灵敏度达到最高。

参 考 文 献

- 1 J. X. Ma, J. Yu, C. G. Yu *et al.*. Fiber dispersion influence on transmission of the optical millimeter-waves generated using LN-MZM intensity modulation [J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(11): 3244~3255
- 2 Jiang Tao, Huang Dexiu, Zhang Xinliang *et al.*. A full-duplex 60 GHz-band radio over fiber system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 37~42
江 涛, 黄德修, 张新亮 等. 全双工 60 GHz 的光纤无线通信系统[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 37~42
- 3 Hu Liliang, Chen Lin, Yu Jianjun *et al.*. A novel scheme for optical millimeter-wave generation based on double-sideband modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 239~242
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): 239~242
- 4 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
- 5 J. J. Yu, Z. S. Jia, L. L. Yi *et al.*. Optical millimeter-wave generation or up-conversion using external modulators[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(1): 265~267
- 6 C. Lim, C. Lin, M. Attygalle *et al.*. Analysis of optical carrier-to-sideband ratio for improving transmission performance in fiber-radio links [J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2006, **54**(5): 2181~2187
- 7 H. H. Lu, W. S. Tsai, H. C. Peng *et al.*. A comparison between optical SSB transmitter/filter in a full-duplex radio-over-fiber transport system [J]. *IEEE Commun. Lett.*, 2005, **9**(7): 649~651
- 8 Fei Huang, Xue Feng, Xiaoming Liu. Quadruple-frequency millimeter-wave generation using second-order rational harmonic mode-locking technique [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(8): 588~590
- 9 Tao Wang, Qingjiang Chang, Yikai Su. Generation of linearized optical single sideband signal for broadband radio over fiber systems[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(4): 339~343
- 10 H. Kim. EML-based optical single sideband transmitter [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(4): 243~245
- 11 Jianjun Yu, Mingfang Huang, Zhensheng Jia *et al.*. A novel scheme to generate single-sideband millimeter-wave signals by using low-frequency local oscillator signal [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(7): 478~480
- 12 M. Attygalle, C. Lim, G. J. Pendock *et al.*. Transmission improvement in fiber wireless links using fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(1): 190~192
- 13 P. C. Peng, C. T. Lin, W. J. Jiang *et al.*. Improvement of transmission in fibre wireless system using semiconductor laser amplifier[J]. *Electron. Lett.*, 2008, **44**(4): 520~521
- 14 S. T. Goldstein, D. Dolfi, J. P. Huignard *et al.*. Stimulated Brillouin scattering for microwave signal modulation depth increase in optical links [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(11): 944~946
- 15 C. Q. Wu, X. Zhang. Impact of nonlinear distortion in radio over fiber systems with single-sideband and tandem single-sideband subcarrier modulations [J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(5): 2076~2090