

doi: 10.3788/gzxb20164502.0206007

湍流信道下激光器互调失真特性

陈丹, 柯熙政, 张璐

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

摘 要: 基于半导体激光器速率方程, 采用贝塞尔函数推导激光器非线性互调失真表达式. 在 Gamma-Gamma 湍流信道下, 针对无线光多路副载波二进制相移键控调制, 研究非线性互调失真对系统载波互调噪声比及误码率性能的影响, 并给出系统最佳调制指数的选取与非线性系数的对应关系. 结果表明, 同一湍流条件下, 调制指数小于最佳取值时, 随着调制指数增加载波互调噪声比上升、误码率下降, 而调制指数高于最佳取值时系统性能劣化. 当闪烁指数为 0.2, 最佳调制指数为 0.6 时, 获得的最大载波互调噪声比为 12.9 dB.

关键词: 无线光通信; 副载波调制; 互调失真; 载波互调噪声比; 误码率

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)02-0206007-5

Laser Intermodulation Distortion and Characteristic under the Turbulence Channel

CHEN Dan, KE Xi-zheng, ZHANG Lu

(School of Automation & Information, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on the rate equation of semiconductor laser, the expression of laser nonlinear intermodulation distortion was deduced by Bessel function. According to the Gamma-Gamma model under the turbulence channel, the influence of performance about carrier signal to intermodulation distortion and noise ratio and bit error rate was researched based multiple subcarrier binary phase shift keying modulation. The selection of optimal modulation index with the corresponding relation of nonlinear coefficient was given. The results show that under the same turbulence condition, carrier signal to intermodulation distortion and noise ratio increases and bit error rate decreases with the increasing of modulation index when the value of modulation index is less than the optimum index. However, when the value of modulation index is bigger the best index, system performance deteriorates. When the scintillation index is 0.2 and the optimum modulation index is 0.6, the maximum carrier signal to intermodulation distortion and noise ratio can get to 12.9 dB.

Key words: Wireless optical communication; Subcarrier modulation; Intermodulation distortion; Carrier signal to intermodulation distortion and noise ratio; Bit error rate

OCIS Codes: 060.2605; 200.2605; 010.1330; 140.5960; 060.5060

0 引言

无线光通信, 又叫自由空间光通信 (Free-Space Optical Communication, FSO) 是以激光束作为信息载体在空间进行传播, 能够实现语音、数据和多媒体图像

的高速全双工通信, 具有大带宽、体积小、成本低、安装方便灵活及抗干扰能力强等优点, 成为各国通信领域认可的高速大容量通信最佳解决方案. 激光器的非线性对激光传输的影响是无线光通信系统面临的关键问题之一, 其非线性失真主要是调制响应的非线性^[1], 影

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61377080)、陕西省自然科学基金 (Nos. 2013JQ8009, 2015JM6270)、陕西省教育厅科学研究计划 (No. 14JK1542) 和西安理工大学科技创新基金项目 (No. 2013CX014) 资助

第一作者: 陈丹 (1975—), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为大气激光通信、现代信号与信息处理. Email: chdh@xaut.edu.cn

收稿日期: 2015-08-25; **录用日期:** 2015-12-10

<http://www.photon.ac.cn>

响光传输系统的误码率. 2007年, Lisa Yong等^[2]通过半导体激光器单模速率方程, 采用 Volterra 级数, 对比分析了模拟光纤通信系统中副载波强度调制时, 激光器非线性互调失真 (Intermodulation Distortion, IMD) 性能, 发现调制指数偏大, 激光器非线性五阶互调失真使得接收端的光强度高于一阶互调失真. 2010年, X. Tang等^[3]基于对数正态分布模型, 研究了副载波二进制相移键控 (Binary Phase Shift Keying, BPSK) 调制的误码率 (Bit Error Rate, BER) 性能. 2012年, Song等^[4]在强湍流信道条件下, 研究了副载波强度调制下的误码率性能.

本文基于半导体激光器的单模速率方程, 利用贝塞尔函数法分析激光器的非线性互调失真的振幅大小. 基于无线光多路副载波二进制相移键控调制研究通信系统中激光器非线性互调失真对载波互调噪声比 (Carrier Signal to Intermodulation Distortion and Noise Ratio, CINR)、系统误码率性能的影响, 给出了大气湍流强度下的载波互调噪声比、误码率与副载波调制指数间的关系, 为无线光副载波调制系统中激光器非线性失真补偿提供了理论基础.

1 激光器的非线性互调失真

激光器的非线性失真是由调制响应的非线性引起的. 在 LD 调制系统中, 采用单模振荡速率方程^[5-7], 分析激光器的非线性. 速率方程组为

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= S_n B - \frac{S}{\tau_p} \\ \frac{dn}{dt} &= \frac{J}{qV} - S_n B - \frac{n}{\tau_s} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, n 表示半导体激光器有源层内的载流子密度; S 表示半导体激光器腔内光子密度, S 和输出光强成正比, 因此也可表示为相对输出功率. τ_p 是光子寿命, τ_s 是载流子寿命, $B = (1/\tau_p n_s)$ 是爱因斯坦系数. J 是注入信号电流密度, 为

$$J(t) = J_0 + J \sum_{n=1}^N \cos(\omega_n t + \varphi_n(t)) \quad (2)$$

式中, 相位 $\varphi_n = \alpha_n \pi$, $\alpha_n = 0, 1$, ω_n 是载波频率.

利用 Sonine^[5] 的表达式

$$\exp(\alpha_n \cos \omega t) = I_0(\alpha_n) + 2 \sum_{q=1}^{\infty} I_q(\alpha_n) \cos q\omega t \quad (3)$$

式中, $I_q(\alpha_n)$ 是修正的 q 阶贝塞尔函数. 则光子密度 $S = C \exp(u)$ (其中, C 是常量, $u = \sum_{n=1}^N \alpha_n \cdot \cos(\omega_n t + \varphi_n(t))$)^[4] 变为

$$S = C \prod_{n=1}^N [I_0(\alpha_n) + 2 \sum_{q=1}^{\infty} I_q(\alpha_n) \cos(q\omega_n t + q\varphi_n(t))] \quad (4)$$

本文重点研究激光非线性互调失真, 仅考虑输入为交变电流^[8], 则由式(4)可得等振幅多路副载波在频

率 ω_r 处输出的振幅为

$$S_1 = 2CI_1(\alpha) [I_0(\alpha)]^{N-1} \quad (5)$$

同理, 频带内的互调产物因子 $2\omega_x - \omega_y$ 的振幅为

$$S_{21} = 2CI_2(\alpha) I_1(\alpha) [I_0(\alpha)]^{N-2} \quad (6)$$

频带内的互调产物因子 $\omega_x + \omega_y - \omega_z$ 的振幅为

$$S_{11} = 2C [I_1(\alpha)]^3 [I_0(\alpha)]^{N-3} \quad (7)$$

类似地, 其他互调产物因子的振幅可以由式(4)得出.

若传输带宽为一倍频程 (每一个频带的上限频率比下限频率高一倍, 即频率之比为 2), 二阶互调失真所产生的频率不在频带内, 所以不予考虑^[5], 频带内的互调产物因子只有三阶互调失真. 在频率处, 符合带宽内的三阶互调产物因子 $2\omega_x - \omega_y$ 和 $\omega_x + \omega_y - \omega_z$ 的个数^[9] 分别为

$$\begin{cases} N_{21} = \text{int} \left[\frac{N-k}{2} \right] + \text{int} \left[\frac{k-l}{2} \right], l \leq k \leq N \\ N_{111} = \text{int} \left[\frac{k-l}{2} \right] \text{int} \left[\frac{k-l-1}{2} \right] + (k-l) \times \\ (N-k) + \text{int} \left[\frac{N-k}{2} \right] \text{int} \left[\frac{N-k-1}{2} \right], \\ l \leq k \leq N \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\text{int} \lfloor x \rfloor$ 是一个取整函数, 其值小于或者等于 x ; l, N 分别表示初始载波及总载波个数; k 表示第 k 个载波. 则由式(6)~(8)推导出三阶互调失真振幅的表达式为

$$\text{IMD3} = S_{21} N_{21} + S_{111} N_{111} \quad (9)$$

频带内三阶互调失真方差^[10] 的表达式为

$$\sigma_{\text{IMD3}}^2 = \frac{1}{32} (\eta P_r)^2 m^6 (N_{21} + N_{111}) \quad (10)$$

式中, m 是激光器调制指数, η 是光电探测器量子效率, P_r 是平均接收光功率.

由于功耗与三阶互调失真方差直接相关, 可有效的说明互调失真功率的强弱程度, 其表达式^[11] 为

$$r_{\text{imd}} = 10 \log \left(1 + \frac{\sigma_{\text{IMD3}}^2}{\sigma^2} \right) = 10 \log \left(1 + \frac{\sigma_{\text{IMD3}}^2}{\sigma_{\text{sh}}^2 + \sigma_{\text{th}}^2} \right) \quad (11)$$

式中, σ_{IMD3}^2 是三阶互调失真方差, σ_{sh}^2 和 σ_{th}^2 分别是散射噪声和热噪声.

图 1 为不同调制指数下激光器非线性三阶互调失真功耗, 图中加性噪声功率 $\sigma^2 = 10^{-2}$, $\eta = 0.8$, 平均接收光功率 $P_r = 5.8$ dBm 且 $k = l = 1$, 载波个数 N 分别取 8, 12, 16, 由图 1 可以看出, 随着调制指数的增大, 互调失真的功耗逐渐增强, 这是因为调制指数直接影响三阶互调失真的方差, 调制指数增大, 三阶互调失真方差增大, 使得互调失真功耗也随之增大. 当调制指数达到 0.6 时, 互调失真的功耗逐渐趋于平稳达到最大值 80 dB. 随着载波个数 N 的增加, 互调失真功耗也随之逐渐增加. 在功耗达到饱和后, 载波个数对 IMD 功耗几乎不产生影响, 都趋于平稳.

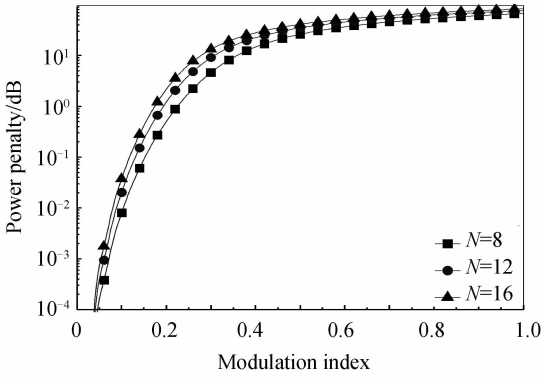


图1 IMD的功耗
Fig. 1 The IMD power penalty

2 激光器的非线性互调失真特性

无线光多路副载波 BPSK 调制是一种能够有效抑制大气湍流影响的调制方法,多路副载波信号调制激光器时存在非线性互调失真.激光器非线性失真将导致系统载波互调噪声比降低,误码率升高.本文在 Gamma-Gamma 湍流信道下,针对无线光多路副载波 BPSK 调制通信系统研究非线性互调失真对载波互调噪声比、误码率的影响.

Gamma-Gamma 概率密度分布函数定义为

$$p(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{(\alpha+\beta/2)-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}I), I > 0 \quad (12)$$

式中, $\Gamma(\cdot)$ 是 Gamma 函数, $K_n(\cdot)$ 是 n 阶修正的第二类贝塞尔函数, α, β 分别是外尺度和内尺度参量. SI 为闪烁指数, 定义^[12]为

$$SI = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\alpha\beta} \quad (13)$$

2.1 载波互调噪声比分析

副载波调制无线光通信系统中,激光器输出的功率及光强分别为

$$\begin{cases} P(t) = P_T \exp\left(m \sum_{n=1}^N \cos(\omega_n t + \varphi_n(t))\right) \\ I(t) = I[1 + m_1 x(t) + a_2 m^2 x^2(t) + \dots \\ \quad a_i m^i x^i(t) + \dots] \end{cases} \quad (14)$$

式中, $\{a_n\}_{n=2}^{\infty}$ 是激光器的非线性系数,一般为常量.若激光器不存在非线性,则 $\{a_n\}_{n=2}^{\infty}$ 等于零.当采用 PSK 调制多路副载波时,调制函数 $x(t) = \sum_{i=1}^N \cos(\omega_i t + \varphi_i)$.考虑传输带宽为一倍频程,所以激光器非线性的二阶互调失真不在频带范围内,频带内的互调产物只考虑三阶互调失真.由于光强闪烁非常慢,接收到的光信号经光电转换为电信号时,只考虑交变电流信号^[8]

$$i(t) = \eta \text{Im}\left(\sum_{n=1}^N \cos(\omega_n t + \varphi_n)\right) + n(t) \quad (15)$$

将式(14)代入式(15),得到的载波功率和加性白噪声功率分别为

$$\begin{cases} S_p = \frac{\eta^2 I^2}{2} \left[m + \frac{3}{4} a_3 m^3 (2N-1) \right]^2 \\ \sigma^2 = \sigma_{Sh}^2 + \sigma_{Th}^2 \end{cases} \quad (16)$$

2.1.1 无湍流信道下的载波互调噪声比性能

在不考虑湍流情况下无线光通信系统接收端的载波互调噪声比(CINR)表达式^[13]为

$$CINR = \frac{S_p}{\sigma^2 + \sigma_{IMD}^2} \quad (17)$$

将式(10)、(16)代入式(17),得到接收端的 CINR 表达式为

$$CINR = \frac{S_p}{\sigma^2 + \sigma_{IMD}^2} = \frac{16R^2 I^2 \left[m + \frac{3}{4} a_3 m^3 (2N-1) \right]^2}{32\sigma^2 + (\eta P_r)^2 a_3^2 I^2 m^6 (N_{21} + N_{111})} \quad (18)$$

图2为不同频率组合的三阶互调产物下,调制指数与系统载波互调噪声比的关系.仿真中载波个数 $N=16$ 、噪声功率 $\sigma^2 = 10^{-2}$ 、三阶非线性系数取 $a_3 = 0.1$ 且 $k=l=1$.从图2可以看出,若只考虑三阶互调 $2\omega_x - \omega_y$ 对通信系统的影响,调制指数 $m=1.0$ 时, CINR 达到最大值 56.1 dB;而考虑三阶互调 $\omega_x + \omega_y - \omega_z$ 时,当调制指数 $m=0.6$ 时, CINR 达到最大值 13.6 dB.对比图中的两条曲线发现,在调制指数 $m=0.6$ 时,激光器非线性三阶互调产物因子 $\omega_x + \omega_y - \omega_z$ 影响下 CINR 为 13.6 dB,而三阶互调产物因子 $2\omega_x - \omega_y$ 对应的 CINR 为 33 dB,前者互调失真类型对系统的影响明显大于后者.这是因为非线性互调失真对系统影响主要取决于互调产物因子在频带内的数量.当载波个数 $N=16$ 时,三阶互调产物个数 $N_{111} \gg N_{21}$,因此非线性三阶互调产物 $\omega_x + \omega_y - \omega_z$ 影响下系统的 CINR 小.

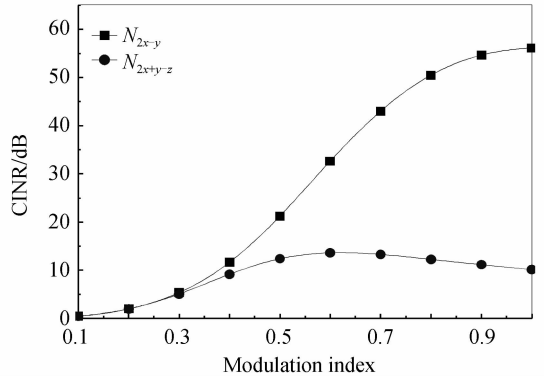


图2 无湍流下的载波互调噪声比 ($N_{2x-y} = N_{21}$, $N_{x+y-z} = N_{111}$)

Fig. 2 The CINR in no atmospheric turbulence ($N_{2x-y} = N_{21}$, $N_{x+y-z} = N_{111}$)

图3为三阶非线性系数不同时载波互调噪声比图.仿真中 a_3 分别取 0.01、0.1 及 1.0,噪声功率 $\sigma^2 = 10^{-2}$ 及载波数 $N=16$ ($N_{21}=7, N_{111}=49$), $k=l=1$.由图3看出,随着非线性系数的增大,要获得最大载波互调噪声比所对应的最佳调制指数减小.当 $a_3=0.01$ 时,调制指数高于 1.0, CINR 达到最大值; $a_3=0.1$ 时,调制指数 $m=0.6$, CINR 达到最大值 14.1 dB, $a_3=1.0$ 时,调制指数 $m=0.3$, CINR 达到最大值 7.35 dB.三阶

非线性系数 $a_3 = 0.01$ 时, 调制指数较大, 可得到较大的光功率输出, 使 CINR 增大, 但调制指数过大, 会造成削波失真。

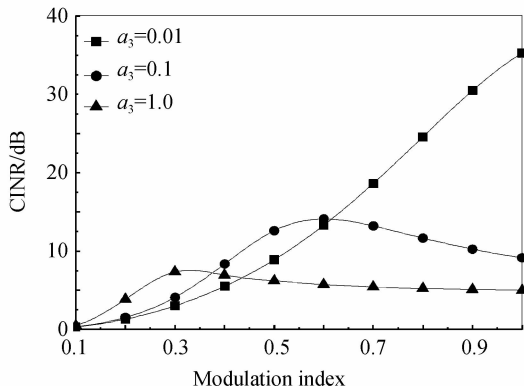


图 3 不同三阶非线性系数下的载波互调噪声比与调制指数的关系

Fig. 3 The relationship between CINR and modulation index under the different third-order nonlinear coefficient

2.1.2 大气湍流信道下载波互调噪声比性能

当考虑无线光通信中大气湍流影响^[14]时, 系统载波互调噪声比记为 $CINR_{ave}$, 由式(18)可知表达式^[12]为

$$CINR_{ave} = \int_0^{\infty} CINR \times p(I) dI \quad (19)$$

本文大气湍流光强起伏分布采用 Gamma-Gamma 模型^[12,15-16], 该模型不同于对数正态分布模型, 它的适用范围更加广泛. 不仅适用于弱湍流, 中等强度湍流及强湍流情况下也适用, 则式(19)变为

$$CINR_{ave} = \frac{32R^2 \left[m + \frac{3}{4} a_3 m^3 (2N-1) \right]^2 (\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times \int_0^{\infty} \frac{I^{(\alpha+\beta/2)+1}}{32\sigma^2 + Km^6 I^2 a_3^2} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}I) dI \quad (20)$$

式中, $K = (\eta P_r)^2 (N_{111} + N_{21})$.

根据式(20)对在不同湍流条件下的载波互调噪声比进行仿真, 如图 4. 从图 4 中可以看出, 当考虑 $\sigma^2 = 10^{-2}$, $k=l=1$, $a_3=0.1$ 以及 $N=16(N_{21}=7, N_{111}=49)$ 时, 弱湍流条件下, $\alpha=11.6, \beta=10.1$ (SI=0.), 调制指

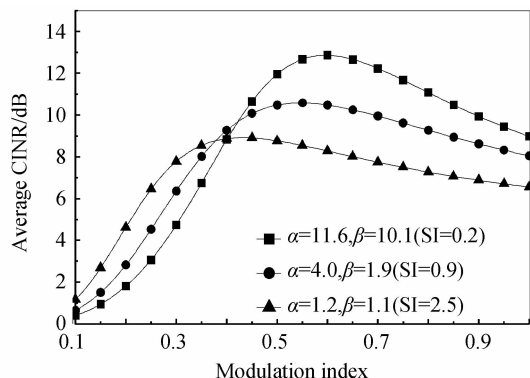


图 4 大气湍流下的载波互调噪声比

Fig. 4 The CINR in the atmospheric turbulence

数 $m=0.6$ 时, CINR 达到最大值 12.9 dB; 中等湍流条件下, $\alpha=4.0, \beta=1.9$ (SI=0.9), 调制指数 $m=0.55$ 时, CINR 达到最大值 10.6 dB; 强湍流条件下, $\alpha=1.2, \beta=1.1$ (SI=2.5), 调制指数 $m=0.43$, CINR 达到最大值 8.9 dB.

从图 4 可以看出, 在同一湍流条件下, 调制指数小于最佳取值时, CINR 随着调制指数的增加而上升, 调制指数大于最佳取值时, CINR 随着调制指数的增大而下降, 表明激光器非线性互调失真对系统载波互调噪声比影响与调制指数选取有密切关系. 对比图中 3 条曲线看出, 当调制指数高于 0.38, 在一定调制指数下闪烁指数越大 CINR 越小, 弱湍流获得最大载噪比与强湍流相比, 高 4.0 dB. 因此, 随着闪烁指数增加, 要获得系统最大 CINR, 所对应的最佳调制指数选取需要越小.

2.2 误码率

在大气湍流信道下, 采用 PSK 调制产生激光器非线性互调失真的 FSO 系统, 误码率表示^[17-18]为

$$P_e(m) = \int_0^{\infty} Q(\sqrt{CINR}) p(I) dI = \int_0^{\infty} Q(\sqrt{CINR}) \frac{2(a\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{(\alpha+\beta/2)-1} \times K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}I) dI \quad (21)$$

图 5 为不同湍流强度下, 副载波 BPSK 调制无线光通信系统的 BER 特性曲线, 仿真中, 令 $\sigma^2 = 10^{-2}$, $k=l=1, a_3=0.1$ 以及 $N=16(N_{21}=7, N_{111}=49)$. 在调制指数小于最佳取值时, 误码率随着调制指数的增加而下降, 表明此时非线性失真对系统性能影响较小, 但是调制指数一旦大于最佳取值时, 激光器非线性失真对系统产生严重影响, 调制指数增加, 误码率上升. 从图 5 中可以看出, 在调制指数等于 0.38 时, 三种湍流条件下的误码率值均为 $1.5e-3$, 调制指数大于 0.38 时, 同一调制指数下, 闪烁指数越大, BER 越高, 严重影响通信系统的稳定性和可靠性, 随着调制指数进一步增大, 非线性失真饱和, 误码率也趋于饱和.

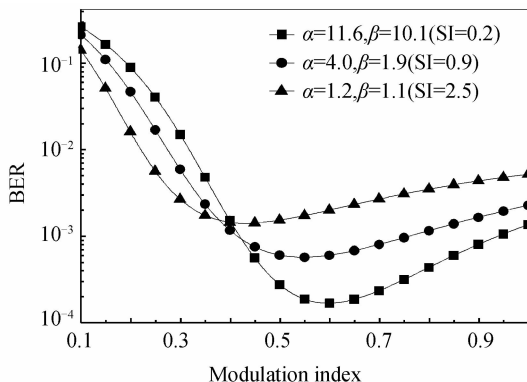


图 5 大气湍流下的误码率

Fig. 5 The BER in the atmospheric turbulence

3 总结

本文研究了大气湍流信道下的激光器非线性互调失真及其特性,推导了不同湍流条件下,副载波 BPSK 调制无线光通信系统的载波互调噪声比及误码率公式,并进行了仿真分析.不考虑大气湍流影响时,激光器非线性互调失真对 FSO 系统 CINR 的影响主要与频带内三阶互调产物因子 $\omega_x + \omega_y - \omega_z$ 的个数相关.相同调制指数下,非线性系数越大,对应的 CINR 越小,但非线性系数太小会造成信号削波失真.同一大气湍流条件下,调制指数小于最佳取值时,CINR 随着调制指数的增大而上升、误码率下降;调制指数高于最佳取值时,调制指数增大,CINR 下降、误码率上升.湍流强度越大,要获得最大 CINR,则调制指数的选取越小.三种不同强度湍流中,弱湍流时最佳的调制指数 ($m=0.6$),可获得最大的 CINR=12.9 dB.湍流信道下最佳调制指数的选取,可以有效地改善无线光通信系统的载波互调噪声比及误码率性能.

参考文献

[1] GORDON G S D, CRISP M J, PENTY R V, *et al.* High-order distortion in direct modulated semiconductor lasers in high-loss analog optical link with large of dynamic range[J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(23): 3577-3586.

[2] YONG L, SUAIDI M K, CHAIA K N, *et al.* Fifth order versus third order intermodulation distortion[C]. *IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics Proceeding*, 2007; 1-5.

[3] TANG X, RAJBHANDARI S, POPOOLA W O, *et al.* Performance of BPSK subcarrier intensity modulation free-space communication using a log-normal atmospheric turbulence mode [C]. *IEEE*, 2010; 1-4.

[4] SONG Xue-gui, CHENG Ju-lian. Optical communication using subcarrier intensity modulation in strong atmospheric turbulence[J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(22): 3483-3493.

[5] BIHAN J L, YABRE G F M. IM intermodulation distortion in directly modulated single-mode semiconductor laser [J]. *IEEE, Journal of Quantum Electronic*, 1994, **40**(4): 899-903.

[6] KELVIN S C Y, MANAS K Haldar, JEFFREY F W. Harmonic and intermodulation distortion indirect intensity modulated quantum cascade lasers [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2014, **32**(20): 3735-3741.

[7] ZHANG Ming-jiang, LIU Tie-gen, LI Jing-xia, *et al.* Effect of line width enhancement factor on the nonlinear period-one oscillation of semiconductor laser with external optical injection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 542-546.

张明江,刘铁根,李静霞,等.线宽增强因子对外光注入半导体激光器非线性单周期振荡特性的影响[J]. *光子学报*, 2011, **40**(4): 542-546.

[8] SAMIMI H, AZMI P. Subcarrier intensity modulated free-space optical communication in K-distributed turbulence channels [J]. *IEEE Journal of Optical Communications and Networking*, 2010, **2**(8): 625-632.

[9] DALY J C. Fiberoptic intermodulation distortion [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1982, **30**(8): 1954-1958.

[10] HUANG W, NAKAWAGA M. Nonlinear effect of direct sequence CDMA in optical transmission [C]. *IEEE 3rd Intermodulation Symposium on Spread Spectrum Techniques & Applications*, 1994: 588-592.

[11] BARMAN A D, BASU P K. Incoherent in-band crosstalk induced power penalty in amplified WDM networks: a comparative study using gaussian and chi-squared probability density functions [J]. *IET Circuits Devices & Systems*, 2008, **2**(1): 139-143.

[12] GHASSEMLOOY Z, POPOOLA W O, LEITGIB E. Free-space optical communication using subcarrier modulation Gamma-Gamma atmospheric turbulence [C]. *IEEE 9th International Conference on Transparent Optical Networks*, 2007; 150-160.

[13] WAKAFUJI K, OHTSUKI T. Performance analysis of atmospheric optical subcarrier multiplexing systems and atmospheric optical subcarrier modulated code-division multiplexing system [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2005, **23**(4): 1676-1682.

[14] XING Jian-bin, XU Guo-liang, ZHANG Xu-ping, *et al.* Effect of the atmospheric turbulence on laser communication system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1850-1852.

邢建斌,许国良,张旭苹,等.大气湍流对激光通信系统的影响 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(12): 1850-1852.

[15] UYSAL M, LI Jing. Error rate performance of coded free-space optical link over Gamma-Gamma turbulence channels [C]. *IEEE International Conference Communication Society*, 2004; 3331-3335.

[16] YU Lin-tao, SONG Lu, HAN Cheng, *et al.* Analysis and simulation of link power and communication performance in space-ground optical communication [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(5): 543-547.

于林韬,宋路,韩成等.空地激光通信链路功率与通信性能分析与方针 [J]. *光子学报*, 2013, **42**(5): 543-547.

[17] BEKKLALI A, NAILA C B, KAZAURA K, *et al.* Transmission analysis of OFDM based wireless services over turbulent ratio-on FSO links modulated by Gamma-Gamma distortion [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2010, **2**(3): 510-520.

[18] POPOOLA W O, GHASSEMLOOY Z. BPSK subcarrier intensity modulated free-space optical communications in atmospheric turbulence [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(8): 967-973.