

基于 LDPC 码和 MIMO 的无线光通信系统性能

郝士琦^{1,2} 冷蛟锋^{1,2}

(¹脉冲功率激光技术国家重点实验室(电子工程学院), 安徽 合肥 230037)
²安徽电子制约技术重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要 针对大气湍流严重影响无线光通信系统性能的问题,研究了基于低密度奇偶校验(LDPC)码和多输入多输出(MIMO)无线光通信系统性能,给出了基于 LDPC 码的空时编码 MIMO(ST MIMO)和重复编码 MIMO(rep MIMO)系统的解码算法,最后在对数正态模型和 K 分布模型下进行了仿真分析。仿真结果表明 rep MIMO 系统性能优于 ST MIMO 和单输入单输出(SISO)系统,ST MIMO 在强湍流情况下性能明显优于 SISO 系统,基于 LDPC 码的 ST MIMO 和 rep MIMO 能取得 10 dB 以上的编码增益,并且编码增益随着湍流强度的增大而增加,基于 LDPC 码和 rep MIMO 的无线光通信系统差错性能更加优异,可以有效提高系统抗干扰能力。

关键词 光通信;低密度奇偶校验码;多输入多输出;大气湍流

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s105006

Performance Analysis of Optical Wireless Communication Based on LDPC Codes and MIMO

Hao Shiqi^{1,2} Leng Jiaofeng^{1,2}

(¹ State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology (Electronic Engineering Institute),
Hefei, Anhui 230037, China)
(² Key Laboratory of Electronic Restriction of Anhui Province, Hefei, Anhui 230037, China)

Abstract Atmospheric turbulence produces fluctuations in the irradiance of the transmitted optical beam, severely degrading the performance over optical wireless links. Performance of optical wireless communication based on low-density parity-check (LDPC) codes and multiple-input multiple-output (MIMO) is investigated. Decoding algorithm of repetition coded MIMO (rep MIMO) and space-time coded MIMO (ST MIMO) based on LDPC codes is investigated, finally it is simulated in the atmospheric turbulence channel. Simulation results show that rep MIMO outperforms ST MIMO, and LDPC codes have excellent error correction capabilities and access to a larger coding gain. Therefore the scheme based on LDPC codes and rep MIMO can mitigate fading effectively.

Key words optical communications; low-density parity-check codes; multiple-input multiple-output; atmospheric turbulence

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 010.1330

1 引言

无线光通信具有无须申请频谱、安全保密、信息容量大、设备尺寸小、功耗低等优点,近年来已经成为通信领域的一个研究热点。但是由于大气衰减、大气湍流和自然光背景噪声等的干扰,无线光通信的系统性能受到严重影响^[1]。解决方案之一是引入差错控制编码技术,它可以极大地改善地面无线光通信的误

码性能^[2]。低密度奇偶校验(LDPC)码具有吞吐量、较低的错误平底、极具高速译码潜力等优点^[3],非常适合作为高传输速率通信系统的前向纠错(FEC)方案^[4],目前采用专用集成电路(ASIC)架构实现的 LDPC 码译码器吞吐率可达 47.7 Gb/s^[5],可较好满足无线光通信的码速率要求。文献[6~9]对 LDPC 码在无线光通信中的应用进行了研究,表

收稿日期: 2012-01-01; 收到修改稿日期: 2012-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(60902017)和安徽省自然科学基金(10040606Q60,10040606Q61)资助课题。

作者简介: 郝士琦(1963—),女,教授,主要从事卫星通信和大气激光通信等方面的研究。E-mail: liu_hsq@126.com

明采用 LDPC 编码的无线光通信系统可以获得优越的纠错能力并能获得较大的编码增益。上述研究都是基于大气弱湍流信道模型,但信号光在近地面水平长程传输中,即使是弱湍流条件,随着传播距离的增加,信号光到达接收孔径时依然会产生较强闪烁,而强湍流现象又大多发生在近地面,中强起伏会对无线光通信产生更加严重的影响,是严重制约大气无线激光通信发展应用的一个不利因素。文献[10]的研究表明基于 LDPC 码和非对称限幅光正交频分复用(OFDM)技术的无线光通信系统能够抑制强大气湍流的影响,但是 OFDM 的主要作用是抑制信道色散引起的码间串扰和频率选择性衰落^[11],因此 OFDM 在大气无线光通信中的应用较少^[12],多输入多输出(MIMO)系统能有效抑制大气湍流带来的影响^[1],特别是强大气湍流^[13],并且可以在不增加频谱带宽的条件下成倍地提高无线光通信系统的传输容量^[14],目前得到广泛关注。文献[14,15]提出了无线光通信中基于脉冲位置调制(PPM)的空时编码方案。文献[16]提出了基于开关键控(OOK)调制的空时编码方案。文献[17]研究了强湍流下重复编码 MIMO(rep MIMO)的中断概率。文献[18]指出基于 OOK 调制的空时编码方案性能略优于基于 PPM 的空时编码方案,因此本文基于 OOK 调制,首先分析空时编码 MIMO(ST MIMO)和 rep MIMO 无线光通信在弱湍流和强湍流下的性能,然后研究基于 ST MIMO 和 rep MIMO 的 LDPC 码置信传播译码算法,并分析了系统性能。

2 系统模型

综合考虑系统复杂度和可靠度,无线光通信系统一般采用强度调制/直接探测(IM/DD)方式^[19]。图 1 给出了基于 LDPC 码和 MIMO 的无线光通信系统方框图。信源产生的信息序列经 LDPC 编码

后进行交织,其中交织器一般选用块交织器^[20],然后进行空时编码,最后对光源进行强度调制,通过发射天线阵列送入大气信道,另外为了保证各发送信号之间是相互独立的,且能被接收端探测器探测到,要求任意两个激光发射器间的距离 d 满足 $\sqrt{\lambda L} < d < \theta L$,其中 θ 为光束的发散角, λ 为采用的光波长, L 为传输的距离^[21]。rep MIMO 与 ST MIMO 区别在于 rep MIMO 不需要空时编码,每个支路发射相同的信息比特。接收端通过光电探测器把光信号变成电信号,再通过计算比特置信度、解交织和信道解码还原出信息比特。地面无线光通信受大气影响,大气衰减主要影响无线光通信系统的通信距离,而湍流效应会使光波参量在传输过程中随机改变,影响系统的通信质量,因此,主要考虑湍流效应带来的影响^[2]。在一个 $P \times Q$ 的 MIMO 系统中,接收端的 N 个探测器在同一频带内接收信号,每个探测器都将接收来自 P 个激光器的信号。若接收端已知信道状态信息,则每个时隙光电探测器的检测输出电流信号可以表示为

$$r_q = \sum_{p=1}^P \alpha_{pq} x_p I_{pq} + z_q, \quad (1)$$

式中 ρ 为接收机光电转换效率, $x_p \in (0,1)$ 是发送的二进制信息, z_q 为第 q 个接收机的背景噪声场、光电转换过程以及接收机电路引入的噪声,可认为是独立同分布的高斯噪声^[22], I_{pq} 为无湍流状态下的第 q 个接收到来自第 p 个激光器的光强,一般认为在同一时隙对于任意 p 和 q 都有 $I_{pq} = I_0$, α_{pq} 表示第 p 个激光器到第 q 个接收机间大气湍流引起的乘性噪声,造成接收光强起伏,在弱湍流条件下,光强随机起伏服从对数正态分布^[14,20], α_{pq} 的概率密度为

$$p(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln\alpha}} \exp \left[-\frac{\left(\ln \alpha + \frac{1}{2}\sigma_{\ln\alpha}^2 \right)^2}{2\sigma_{\ln\alpha}^2} \right], \quad (2)$$

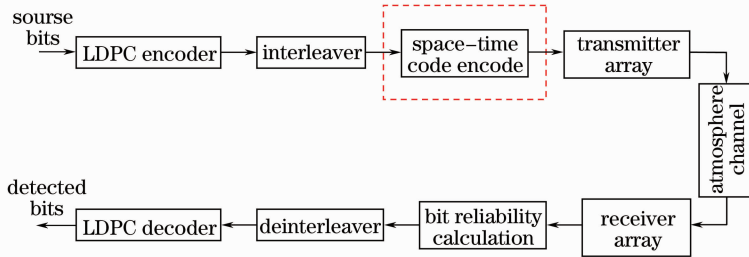


图 1 基于 LDPC 码和 MIMO 的无线光通信系统框图

Fig. 1 Block diagram of wireless optical communication based on LDPC codes and MIMO

式中 σ_{int}^2 为对数强度方差。在中强湍流信道条件下，光强起伏可以认为服从 K 分布^[13]

$$p_\alpha(\alpha) = \frac{2t^{(t+1)/2}}{\Gamma(t)} \alpha^{(t-1)/2} K_{t-1}(2\sqrt{t\alpha}), \alpha > 0 \quad (3)$$

式中 $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数, $K_{t-1}(\cdot)$ 为 $t-1$ 阶第二类修正 Bessel(贝塞尔)函数, t 为与闪烁指数 σ_{si}^2 有关的信道参数, $t=2/(\sigma_{\text{si}}^2-1)$ 。

当采用空时编码时,由于无线光通信采用 IM/DD 方式,其空时编码方式有别于无线电通信领域的 Alamouti 空时编码方式,以 $P=2, Q=1$ 为例,在每一次编码操作中将 2 个调制信号 x_1 和 x_2 进行编码,空时编码矩阵为^[15]

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} x_1 & \bar{x}_2 \\ x_2 & x_1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 $\bar{x}_2 = 1 - x_2$ 。利用大气湍流引起的乘性噪声在相邻两比特时间内不变这一事实,接收端的信号表达式为

$$\begin{aligned} r_1(1) &= \rho I_0(\alpha_{11}x_1 + \alpha_{21}x_2) + z(1), \\ r_1(2) &= \rho I_0(\alpha_{11}\bar{x}_2 + \alpha_{21}x_1) + z(2), \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $r_1(1), r_1(2)$ 表示第 1 个接收机在第 1 个和第 2 个比特时刻接收到的信号, z 是相应的噪声。无信道编码时, rep MIMO 和 ST MIMO 系统的译码算法分别参考文献[1,16]。

3 迭代译码

当基于 MIMO 的无线光通信系统采用 LDPC 码时,每个接收机在每一个时隙都对应一个软输出。

3.1 置信传播算法

LDPC 码的校验矩阵 \mathbf{H} 可以用 Tanner 图表示^[3], Tanner 图中包含 N 个变量节点和 M 个校验节点。假设 $N(m)$ 表示与校验节点 m 相连的所有变量节点集合, $M(n)$ 表示与变量节点 n 相连的所有校验节点集合; $N(m)/n$ 表示集合 $N(m)$ 中去掉变量节点 $n, M(n)/m$ 表示集合 $M(n)$ 中去掉校验节点 m 。在实际的 LDPC 解码硬件实现方案中,多采用基于对数似然比的置信传播算法(BP)^[3],定义 $R_{mm}^{(k)}$ 表示校验节点 m 向变量节点 n 传递的消息, $Q_{mm}^{(k)}$ 表示变量节点 n 向校验节点 m 传递的消息,其具体步骤如下:

1) 译码消息初始化。计算经过信道后接收到的初始对数似然比为

$$\lambda^{(0)} = \log \frac{p(x_i = 0 | y)}{p(x_i = 1 | y)}, \quad (6)$$

式中 x_i 是二进制信息比特, y 是从信道接收到的

信号。

2) 校验节点更新。对每个校验节点 m 和 $n \in N(m)$, 计算

$$\begin{aligned} R_{mm}^{(k)} &= \left[\prod_{n' \in N(m)/n} \text{sign}(Q_{mn'}^{(k-1)}) \right] \times \\ &\quad \Phi^{-1} \left[\sum_{n' \in N(m)/n} \Phi(|Q_{mn'}^{(k-1)}|) \right], \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $\text{sign}(\cdot)$ 是符号函数, $\Phi(x)$ 定义为: $\Phi(x) = \Phi^{-1}(x) = \log \frac{e^x + 1}{e^x - 1}$ 。

3) 变量节点更新。对每个变量节点 n 和 $m \in M(n)$, 计算

$$Q_{nm}^{(k)} = \lambda_n^{(0)} + \sum_{m' \in M(n)/m} R_{nm'}^{(k)}. \quad (8)$$

对于每个变量节点,计算伪后验对数似然比:

$$Q_n^{(k)} = \lambda_n^{(0)} + \sum_{m \in M(n)} R_{nm}^{(k)}. \quad (9)$$

4) 译码判决。一次迭代完成后,进行译码判决。由此可以得到关于译码码字的一个估计值 $\hat{y}(k)$,再计算伴随式 s_1 ,如果 $s_1 = 0$,那么译码成功,结束译码,并将作为 $\hat{y}(k)$ 有效输出值;否则转步骤 2)继续迭代,直至达到预定的最大迭代次数。

3.2 rep MIMO 的译码消息初始化

在 $P \times Q$ 的 rep MIMO 系统中,在同一时隙 Q 个激光器发送的信息比特 x_p 都是相同的。令 $R = (r_1, r_2, \dots, r_Q)$ 是某一时隙的 Q 个接收机的软输出序列,则

$$\begin{aligned} \lambda_0^{(0)} &= \log \frac{p(x=0 | R)}{p(x=1 | R)} = \\ &= \log \frac{p(R | x=0)p(x=0)}{p(R | x=1)p(x=1)}. \end{aligned} \quad (10)$$

由于发送的信息比特 x 是等概率的,即 $p(x=1) = p(x=0)$,并且发送信号间相互独立,可得 r_1, r_2, \dots, r_Q 相互独立,则

$$\begin{aligned} \lambda_0^{(0)} &= \log \frac{p(r_1 | x=0) p(r_2 | x=0) \dots}{p(r_1 | x=1) p(r_2 | x=1)} \\ &= \frac{p(r_Q | x=0)}{p(r_Q | x=1)}. \end{aligned} \quad (11)$$

当采用 OOK 调制时,对于任意 $q(0 \leq q \leq Q)$ 都有

$$\begin{aligned} \log \frac{p(r_q | x=0)}{p(r_q | x=1)} &= \\ &= \log \frac{\exp\left(-\frac{r_q^2}{2\sigma^2}\right)}{\exp\left[-(r_q - \sum_{p=1}^P \alpha_{pq} I_0)^2 / (2\sigma^2)\right]}, \end{aligned} \quad (12)$$

式中的参数含义与(1)式一致,把(12)式代入(11)式可得

$$\lambda_0^{(0)} = \sum_{q=1}^Q \left[-\frac{r_q^2 - \left(r_q - \sum_{p=1}^P \alpha_{pq} I_0 \right)^2}{2\sigma^2} \right]. \quad (13)$$

把(13)式与(6)~(9)式结合进行迭代运算就可以进行解码。

3.3 ST MIMO 的译码消息初始化

以 $P=2, Q=2$ 为例,在每一次编码操作中将 2 个调制信号 x_1 和 x_2 进行编码,空时编码矩阵如(4)式所示,当 $Q=2$ 时,接收端的信号表达式为

$$\begin{aligned} r_1(1) &= \rho I_0 (\alpha_{11} x_1 + \alpha_{21} x_2) + z_1(1), \\ r_2(1) &= \rho I_0 (\alpha_{12} x_1 + \alpha_{22} x_2) + z_2(1), \\ r_1(2) &= \rho I_0 (\alpha_{11} \bar{x}_2 + \alpha_{21} x_1) + z_1(2), \\ r_2(2) &= \rho I_0 (\alpha_{12} \bar{x}_2 + \alpha_{22} x_1) + z_2(2), \end{aligned} \quad (14)$$

式中 $r_q(h)$ 和 $z_q(h)$ 分别表示第 q 个接收机在 h 时隙接收到的信号和加性噪声。令 $R(1) = [r_1(1), r_2(1)]$, $R(2) = [r_1(2), r_2(2)]$ 则空时编码的初始化译码消息为

$$\begin{aligned} \lambda_1^{(0)} &= \log \frac{p[x_1 = 0 | R(1), R(2)]}{p[x_1 = 1 | R(1), R(2)]} = \\ &= \log \frac{p[R(1), R(2) | x_1 = 0]}{p[R(1), R(2) | x_1 = 1]}. \end{aligned} \quad (15)$$

式中分子分母的表达式具有对称性,下面只对分子部分的表达式进行分析

$$p[r_1(1), r_2(1), r_1(2), r_2(2) | x_1 = 0] = \prod_{j=1,2} p[r_i(j) | x_1 = 0]. \quad (16)$$

式中

$$\begin{aligned} p[r_i(j) | x_1 = 0] &= \frac{1}{2} p[r_i(j) | x_1 = 0, \\ &= 0] + \frac{1}{2} p[r_i(j) | x_1 = 0, x_2 = 1], \end{aligned} \quad (17)$$

$p[r_i(j) | x_1 = c, x_2 = c] [c \in (0, 1)]$ 的值可以由(14)式得到,如

$$p[r_1(1) | x_1 = 0, x_2 = 0] = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left\{ -\frac{[r_1(1)]^2}{2\sigma^2} \right\}. \quad (18)$$

把(16)~(18)式代入(15)式就可得 (2×2) ST MIMO 系统中的初始化译码消息,再结合(6)~(9)式就可以进行迭代译码。

4 仿真实验

图 2 给出了在未采用信道编码时,弱湍流条件下 ST MIMO 和 rep MIMO 的系统性能,其中 $\sigma_{inl}^2 =$

0.2。由图可知 (2×2) rep MIMO 系统性能最好,在误码率(BER)为 10^{-5} 时,相对于 (2×2) ST MIMO, (2×1) rep MIMO, (2×1) ST MIMO 和 SISO 系统有 3, 5, 8, 8.5 dB 的性能优势,值得注意的是在弱湍流信道模型下 (2×1) ST MIMO 相对于 SISO 系统在低信噪比区域没有性能优势,但随着信噪比 (R_{SN}) 的增大, (2×1) ST MIMO 的性能逐渐优于单输入单输出(SISO)的系统性能。

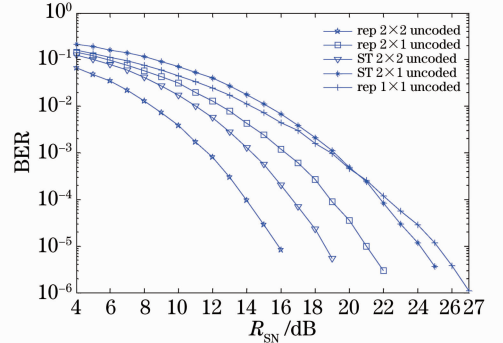


图 2 弱湍流条件下 ST MIMO 和 rep MIMO 系统性能比较

Fig. 2 Performance comparison of ST MIMO and rep MIMO for weak turbulence channel

图 3 给出了弱湍流条件下,基于 LDPC 码的 ST MIMO 和 rep MIMO 的系统性能,仿真中采用的码长为 3200,码率为 0.5,最小环为 6 的比特填充 LDPC 码,最大迭代次数为 100 次。从图中可以看出 (2×2) rep MIMO 性能明显优于 (2×2) ST MIMO, (2×1) rep MIMO, (2×1) ST MIMO 和 SISO 系统性能,但是 (2×2) ST MIMO 相对于 (2×1) rep MIMO 和 SISO 系统的优势并不明显,在 BER 为 10^{-5} 时, (2×2) ST MIMO 相对于 (2×1) rep MIMO 和 SISO 系统只有 0.5 和 1 dB 的优势,另

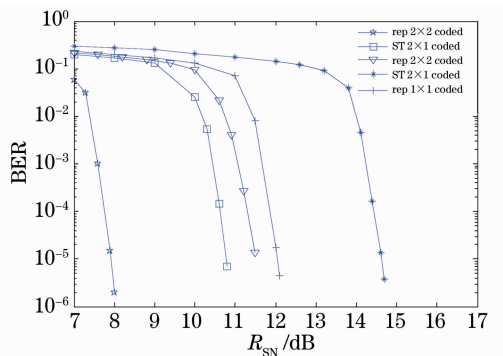


图 3 弱湍流条件下基于 LDPC 码的 ST MIMO 和 rep MIMO 系统性能比较

Fig. 3 Performance comparison of LDPC coded ST MIMO and rep MIMO for weak turbulent channel

外(2×1)ST MIMO 系统性能相对于 SISO 系统有 3 dB 的信噪比损失,也就是说(2×1)ST MIMO 相对于 SISO 系统既增加了系统的复杂度又损失了系统的性能。对比图 2 可以发现基于 LDPC 码的 MIMO 系统相对于未编码的 MIMO 系统有 10 dB 左右的编码增益。

图 4 给出了强湍流条件下未采用信道编码的 ST MIMO 和 rep MIMO 的误码率曲线,其中闪烁指数 $\sigma_{\text{si}}^2 = 8/3$ 。可以发现在相同的 P 和 Q 情况下,rep MIMO 相对于 ST MIMO 有 4 dB 的优势;(2×2)MIMO 系统性能相对于(2×1)MIMO 随着信噪比的增加系统性能优势也随之增大;对比图 2 可知,强湍流条件下 rep MIMO 的系统性能相对于 ST MIMO 系统更有优势。

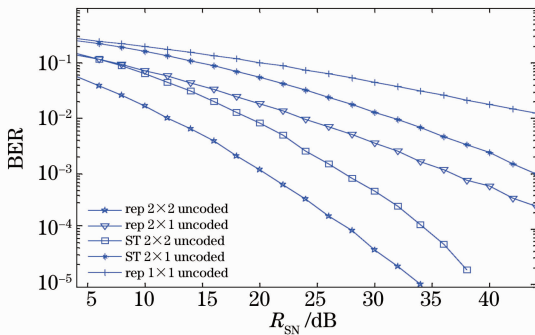


图 4 强湍流条件下 ST MIMO 和 rep MIMO 系统性能比较

Fig. 4 Performance comparison of ST MIMO and rep MIMO for strong turbulence channel

图 5 为强湍流条件下基于 LDPC 码的 ST MIMO 和 rep MIMO 的系统性能,LDPC 码的仿真参数与图 3 所采用的参数一致。由图可知, (2×2) rep MIMO 和 (2×2)ST MIMO 性能差别不大,在 BER 为 10^{-5} 时,两者只有 1 dB 的差异;它们都明显

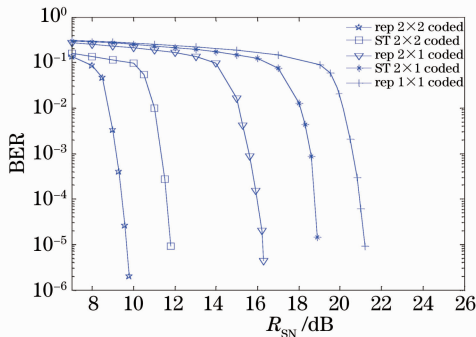


图 5 强湍流条件下基于 LDPC 码的 ST MIMO 和 rep MIMO 系统性能比较

Fig. 5 Performance comparison of LDPC coded ST MIMO and rep MIMO for strong turbulent channel

优于单接收天线的系统;(2×1)ST MIMO 相对于 SISO 系统性能有 2 dB 的性能优势,这是因为随着湍流强度的增大, (2×1)ST MIMO 的分集作用更加明显;相对于未编码的 MIMO 系统,能获得 20 dB 以上的编码增益,远超过弱湍流情况取得的编码增益。

5 结 论

分析了 ST MIMO 和 rep MIMO 在无线光通信系统中的应用,将 LDPC 码作为信道编码技术应用到无线光通信系统中,并且提出了将 MIMO 技术和 LDPC 码相结合的系统方案,给出了相应解码算法。仿真结果表明 rep MIMO 性能优于 ST MIMO 性能;LDPC 码具有优越的纠错能力,并获得较大的编码增益,结合 rep MIMO 和 LDPC 码能对光强闪烁有很好的抑制作用。

参 考 文 献

- Ma Dongtang, We Jibo, Zhuang Zhaowen. Performance evaluation and channel modeling of multiple-beam propagation for atmospheric laser communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1020~1024
马东堂, 魏急波, 庄钊文. 大气激光通信中的多光束传输性能分析和信道建模[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1020~1024
- Chen Dan, Ke Xizheng. Analysis on error rate of wireless optical communication using subcarrier modulation on Turbo code[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2859~2863
陈丹, 柯熙政. 基于 Turbo 码的无线光通信副载波误码性能分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2859~2863
- Yuan Dongfeng, Zhang Haigang. The Principle and Application of Low-Density Parity-Check Codes [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2008. 1~15
袁东风, 张海刚. LDPC 码理论与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008. 1~15
- Yoshikuni Miyata, Rui Sakai, Wataru Matsumoto. Reduced-complexity decoding algorithm for LDPC codes for practical circuit implementation in optical communications [C]. OFC, 2007, OWE5
- Zhengya Zhang, Venkat Anantharam, Martin J. Wainwright *et al.*. A 47 Gb/s LDPC decoder with improved low error rate performance[C]. IEEE Symposium on VLSI Circuits, 2009, **28**(1): 286~287
- Wang Yong, Yu Lei, Cao Jianian. Performance of optical Wireless communication system basing on the sub-carrier PSK intensity modulation and LDPC code[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3295~3298
王勇, 于蕾, 曹家年. 基于副载波相移键控强度调制和低密度奇偶校验码的光无线通信系统性能[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3295~3298
- Zhang Guangyi, Su Yanqin, Wang Hongxing *et al.*. Performance analysis for LDPC in PPM of ALC under weak turbulence[J]. *Control & Automation*, 2008, **24**(9-3): 252~253, 270
张光轶, 苏艳琴, 王红星等. 弱湍流下基于 LDPC 码和 PPM 的性能分析[J]. *微计算机信息*, 2008, **24**(9-3): 252~253, 270
- Jia Kejun, Ke Xizheng, Peng Duo *et al.*. Design of π -rotation LDPC for atmospheric laser communication system and its

- performance analysis[J]. *J. Lanzhou University of Technology*, 2008, **34**(4): 109~113
- 贾科军, 柯熙政, 彭 铎 等. 大气激光通信系统中 π -旋转 LDPC 码的设计与性能分析[J]. 兰州理工大学学报, 2008, **34**(4): 109~113
- 9 Chen Jiajie, Li Xiaofeng. Belief propagation decoding of low-density parity-check codes for atmospheric turbulent optical PPM communication systems[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 405~409
- 陈佳杰, 李晓峰. 大气湍流光 PPM 通信系统中 LDPC 码的置信传播译码[J]. 光子学报, 2009, **38**(2): 405~409
- 10 Wang Yong, Cao Jianian. Performance analysis of atmospheric laser communication system basing on asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing intensity modulation and lower density parity check code[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3031~3036
- 王 勇, 曹家年. 基于低密度奇偶校验码和非对称限幅光正交频分复用技术的大气激光通信系统性能[J]. 中国激光, 2010, **37**(12): 3031~3036
- 11 Zhao Li, Ke Xizheng, Wang Huiqin. A free space optical communication-orthogonal frequency division multiplexing model based on time frequency code[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(10): 2757~2762
- 赵 黎, 柯熙政, 王惠琴. 基于时频编码的自由空间光通信-正交频分复用系统模型[J]. 中国激光, 2009, **36**(10): 2757~2762
- 12 Jean Armstrong. OFDM for optical communications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(3): 189~204
- 13 Theodoros A. Tsiftsis, Harilaos G. Sandalidis, George K. Karagiannidis *et al.*. Optical wireless links with spatial diversity over strong atmospheric turbulence channels [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, **8**(2): 951~957
- 14 Wang Huiqin, Ke Xizheng. Hybrid space-time code for free space optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 132~137
- 王惠琴, 柯熙政. 自由空间光通信中的混合空时编码[J]. 光学学报, 2008, **28**(1): 132~137
- 15 Chadi Abou-Rjeily, Wissam Fawaz. Space-time codes for MIMO ultra-wideband communications and MIMO free-space optical communications with PPM[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, **26**(6): 938~947
- 16 Marvin K. Simon, Victor A. Vilnrotter. Alamouti-type space-time coding for free-space optical communication with direct detection[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, **4**(1): 35~39
- 17 Antonio Garc'ia-Zambrana, Carmen Castillo-V'azquez, Beatriz Castillo-V'azquez. Outage performance of MIMO FSO links over strong turbulence and misalignment fading channels[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(14): 13480~13496
- 18 Wang Huiqin, Ke Xizheng, Zhao Li. MIMO free space optical communication based on orthogonal space time block code[J]. *Science in China, F Information Science*, 2009, **39**(8): 896~902
- 王惠琴, 柯熙政, 赵 黎. 基于正交空时块编码的 MIMO 自由空间光通信[J]. 中国科学, F 辑: 信息科学, 2009, **39**(8): 896~902
- 19 Ke Xizheng, Yin Zhiyun. Coding Theory of Free Space Laser Communication Systems [M]. Beijing: Science Press, 2009. 71~79
- 柯熙政, 殷致云. 无线激光通信系统中的编码理论[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 71~79
- 20 Yaoqiang Han, Anhong Dang, Yongxiang Ren *et al.*. Theoretical and experimental studies of turbo product code with time diversity in free space optical communication [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(26): 26978~26988
- 21 Wang Huiqin, Ke Xizheng. Free space optical communication based on vertical bell labs layered space-time [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 874~878
- 王惠琴, 柯熙政. 基于垂直分层空时编码的自由空间光通信[J]. 中国激光, 2008, **35**(6): 874~878
- 22 Hyuncheol Park, John R. Barry. Trellis-coded multiple-pulse-position modulation for wireless infrared communications [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2004, **52**(4): 643~651

栏目编辑:殷建芳