

# 光级联空时编码中的一种联合检测迭代译码算法

王惠琴<sup>1,2</sup> 王 粉<sup>1,2\*</sup> 曹明华<sup>1,2</sup> 柯熙政<sup>1</sup>

<sup>1</sup>兰州理工大学计算机与通信学院, 甘肃 兰州 730050

<sup>2</sup>西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

**摘要** 介绍了光多输入多输出(MIMO)系统的信道模型, 通过将低密度校验码(LDPC)高可靠性的译码结果反馈给分层空时编码(BLAST)译码器, 提出了一种适合于LDPC-VBLAST光级联空时编码系统的联合检测迭代译码算法。利用蒙特卡洛方法分析了该译码算法的误码性能, 并和简单级联译码算法的性能进行了对比。结果表明: 这种联合检测迭代译码算法的误码性能明显优于已有的简单译码算法。另外, 采用数值分析法分析了迭代次数对该译码算法性能的影响, 结果表明, 在折衷考虑系统误码性能和译码算法复杂度的情况下, 要合理选取迭代次数, 即迭代次数不宜选取过大。

**关键词** 光通信; 级联编码; 空时编码; 联合检测迭代译码算法

**中图分类号** O436

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.0806002

## A Joint Detection and Iterative Decoding Algorithm of Optical Concatenated Space-Time Code

Wang Huiqin<sup>1,2</sup> Wang fen<sup>1,2</sup> Cao Minghua<sup>1,2</sup> Ke Xizheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Computer & Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China

<sup>2</sup>College of Automation & Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

**Abstract** After introducing optical multiple input and multiple output (MIMO) channel model, by feed backing high reliability of low density parity check (LDPC) decoding results to BLAST decoder, a joint detection and iterative decoding algorithm suitable for LDPC-BLAST optical concatenated space-time coding system is proposed in this paper. Using Monte Carlo Method, the bit error rate (BER) of the proposed decoding algorithm is analyzed and compared with that of the originally simple concatenated decoding algorithm. It is showed that the BER of the proposed joint detection and iterative decoding algorithm is better than that of the existing simple decoding algorithm. Besides, the influence of iterative times on the proposed decoding algorithm performance is analyzed with numerical analysis method. The results show that the number of iteration should not be too large when the system BER and decoding algorithm complexity is eclectically considered.

**Key words** optical communication; concatenated coding; space-time code; joint detection and iterative decoding algorithm; bit error rate

**OCIS codes** 060.4510; 010.1330; 010.1300; 010.1290

## 1 引 言

大气激光通信具有保密性好、性价比优等优点, 因而成为一种新型的高速率宽带接入技术。但是当激光信号在大气信道中传输时, 大气湍流运动引起的光强闪烁、光束漂移、扩展与抖动等现象, 会使接收的光信号产生随机起伏, 这将严重影响光通信的可靠传输, 严重时甚至会导致通信中断。多输入多输出(MIMO)技术可以在不额外增加频谱资源和发射功率的情况下, 成倍提高现有系统的信道容量, 有效克服湍流效应,

收稿日期: 2015-01-21; 收到修改稿日期: 2015-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(61265003、61465007)、甘肃省青年科技基金(1310RJYA010)

作者简介: 王惠琴(1972—), 女, 博士, 教授, 主要从事无线光通信理论与技术方面的研究。E-mail: whq1222@lut.cn

\*通信联系人。E-mail: wangfen0329@126.com

被用于光通信中改善系统的性能。

能够实现 MIMO 技术优势的一种行之有效的方法是采用空时编码<sup>[1]</sup>。常见的空时编码有空时网格码 (STTC)、空时分组码 (STBC) 和分层空时码 (LST)。相对空时网格码,空时分组码 (STBC) 和分层空时码 (LST) 具有译码复杂度低、硬件实现简单等优点,已经被应用于光通信。针对强度调制,文献[2-4]提出了适合于大气激光通信的空时分组编码方案。虽然这些编码方案获得了较大的分集增益,但由于未获得编码增益使得该方案的编码速率较低。由此可见,单一的空时编码不能满足高速率、大容量的需求,这不仅制约了空时编码技术的进一步应用和发展,而且使得光 MIMO 技术的优势难以充分体现。信道编码可以提供编码增益,从这一理论出发,针对多进制脉冲位置调制 (QPPM),文献[5]提出了一种基于 RS 码和空时分组码的简单级联编码方案,使得系统获得了较高的编码增益,有效抵御了大气湍流对光通信的影响。和 RS 相比,低密度校验码 (LDPC) 被证实是一种性能接近香农限的好码<sup>[6]</sup>,具有较高的编码增益。为此,文献[7-8]将 LDPC 码和 STBC 码相结合而提出了一种适合于强度调制的光级联空时编码方案。研究表明:相对于级联前而言,级联后的系统获得了较大的编码增益,使得系统的误码性能有了很大的改善。但是不论是单一的 STBC 系统还是级联后的 STBC,它们的频带利用率都较低,无法满足现代通信大容量高速率的要求。鉴于此,文献[9]提出了一种适合于光通信的垂直分层空时编码 (V-BALST) 系统,该系统虽然可以提高频带利用率,但其误码性能较高。为了在保证高速率的前提下,提高光通信系统的可靠性,文献[10]提出了一种 LDPC-BLAST 级联编码系统。和单一的 BLAST 编码系统相比较,LDPC-BLAST 级联编码系统的误码性能得到了较大的改善。但是,在该级联编码系统中,只是对 LDPC 码和 BLAST 码的简单级联,没有进行联合译码,使得 LDPC 码较强的纠错性能未得到充分利用。另外,无论是简单的 VBLAST 系统,还是级联以后的 VBLAST 系统,在采用连续干扰抵消过程中都存在先译出层的低分集度和错误传播现象,这将严重影响其他发送天线发送信号译出的正确性。因此,为了进一步改进级联编码系统的误码性能,本文联合考虑 LDPC 码和 VBLAST 码的译码,提出了一种适合于光 LDPC-VBLAST 空时级联编码系统的联合检测迭代译码算法。

## 2 信道模型

假设光 MIMO 系统是由  $N_t$  根发送天线和  $N_r$  根接收天线组成。 $x(t)=[x_1(t), x_2(t), \dots, x_{N_t}(t)]^T$  表示  $t$  时刻从  $N_t$  根发送天线发送的序列,  $x_i(t)$  表示第  $i$  根发送天线发送的信号,  $x_i(t) \in \{0, A\}$ ,  $A$  是无闪烁时的脉冲强度,信号  $y(t)=[y_1(t), y_2(t), \dots, y_{N_r}(t)]^T$  表示  $N_r$  根接收天线在相应  $t$  时刻的接收序列,  $y_j(t)$  表示第  $j$  根接收天线接收的信号。则光 MIMO 系统的信道模型为

$$y(t) = \eta \sqrt{E_s/N_t} H(t)x(t) + n(t), \quad (1)$$

式中  $\eta$  为光电转换效率,  $E_s$  是发送的总功率,  $n(t)=[n_1(t), n_2(t), \dots, n_{N_r}(t)]^T$  为  $t$  时刻的噪声向量,每维噪声  $n_j(t)$  均服从  $N(0, \sigma^2)$  的高斯分布;  $H(t)$  是  $t$  时刻的信道衰落系数矩阵,记为

$$H(t) = \begin{bmatrix} h_{1,1}(t) & h_{1,2}(t) & \cdots & h_{1,N_r}(t) \\ h_{2,1}(t) & h_{2,2}(t) & \cdots & h_{2,N_r}(t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{N_t,1}(t) & h_{N_t,2}(t) & \cdots & h_{N_t,N_r}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1}^2(t) & a_{1,2}^2(t) & \cdots & a_{1,N_r}^2(t) \\ a_{2,1}^2(t) & a_{2,2}^2(t) & \cdots & a_{2,N_r}^2(t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{N_t,1}^2(t) & a_{N_t,2}^2(t) & \cdots & a_{N_t,N_r}^2(t) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$h_{j,i}(t)$  表示从第  $i$  根发送天线到第  $j$  根接收天线之间的信道衰减系数,在一个发送符号间隔内假设其保持不变;  $h_i$  表示  $H$  的第  $i$  列;  $a_{j,i}$  表示从第  $i$  根发送天线到第  $j$  根接收天线之间的路径幅度增益,其近似服从对数正态分布<sup>[5]</sup>,即

$$f_A(a) = \frac{1}{(2\pi\sigma_x^2)^{1/2} a} \exp\left(-\frac{\ln a - \mu_x}{2\sigma_x^2}\right) \quad (a > 0), \quad (3)$$

式中  $\mu_x$  和  $\sigma_x^2$  分别表示对数正态分布的均值和方差。在对数正态分布中,光强衰落的大小也可以用闪烁指数  $\beta = \exp(4\sigma_x^2) - 1$  来表示,其典型值为  $\beta \in [0.4 \sim 1.0]$ <sup>[9]</sup>。

### 3 联合检测迭代译码算法的研究

在简单的光空时级联编码方案中,只是依次将LDPC码和空时编码进行了简单的级联,使得LDPC码高可靠性的输出结果没有得到更好地利用。为充分利用该结果,将LDPC码的输出结果反馈到VBLAST译码器的输入端,通过引入这种外迭代构建了一种联合检测迭代译码算法,其结果如图1所示。图1中,联合检测迭代译码模块包括VBLAST译码器和LDPC译码器两部分。VBLAST译码器接收来自信号处理的电信号和LDPC译码器反馈的软估计信息,利用接收的信息计算出每个发送信号的外部软信息,并将其送入LDPC译码器进行译码。LDPC译码器一方面接收外部软信息作为其先验信息进行内迭代译码,另一方面将内迭代译码的结果反馈给VBLAST译码器进行下一次外迭代。

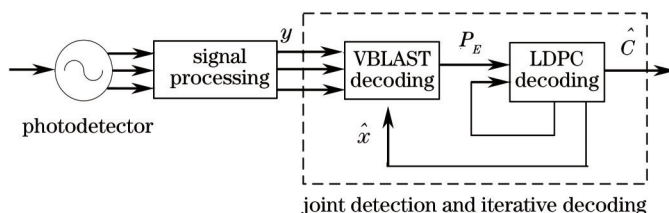


图1 LDPC-VBLAST光级联编码系统的译码原理图

Fig.1 Decoding block diagram of the LDPC-VBLAST concatenated system

在每次的外迭代过程中,VBLAST译码器采用最小平均方差(MMSE)高斯近似的软判决检测算法<sup>[11]</sup>计算每个发送信号的外部软信息。MMSE高斯近似的软判决检测算法单独考虑单根发送天线发送符号的检测,可以等效为由于干扰消除器和MMSE滤波器组成。假设检测第*i*根发送天线发送的符号  $x_i$ ,则来自LDPC反馈的其他  $N_i - 1$  根天线的软估计信号被看作是对  $x_i$  的干扰,从接收信号中消除干扰后得到可靠性较高的接收信号,此接收信号再经过MMSE滤波器后计算出每个发送信号的外部软信息。

取  $E_s = 1$ ,省去时间  $t$  后(1)式可以重新改写成

$$y = \eta \sqrt{1/N_i} Hx + n = Gx + n = g_i x_i + \bar{G}_i \bar{x}_i + n, \quad (4)$$

式中  $G = \sqrt{1/N_i} H$ ,  $g_i$  表示  $G$  的第  $i$  列,  $\bar{G}_i = Gd_i$ ,  $\bar{x}_i = d_i x$ ,  $d_i = \text{diag}(1, \dots, 1, 0, 1, \dots, 1)$ , 即对于  $N_i \times N_i$  的对角阵  $d_i$ , 主对角线上的第  $i$  行第  $i$  列的元素是 0, 主对角线上的其它元素均为 1。假设LDPC译码器反馈的发送符号序列进行的软估计为  $\hat{x} = (\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_{N_i})^T$ , 则消除其他发送天线上发送信号对第  $i$  根发送天线发送信号的影响后, 得到可靠性较高的接收向量  $y_i$  可表示为

$$y_i = y - \bar{G}_i \hat{x}_i = g_i x_i + \bar{G}_i (\bar{x}_i - \hat{x}_i) + n, \quad (5)$$

式中  $\hat{x}_i = d_i \hat{x}$ 。

$y_i$  经过MMSE滤波器后输出为

$$z_i = w_i^H y_i, \quad (6)$$

式中  $(*)^H$  表示矩阵的共轭转置运算, 检测器滤波向量  $w_i$  为

$$w_i = (GV_i G^H + \sigma^2 I)^{-1} g_i, \quad (7)$$

式中  $V_i = \text{diag}(1 - \hat{x}_1 \hat{x}_1, \dots, 1 - \hat{x}_i \hat{x}_i, \dots, 1 - \hat{x}_{N_i} \hat{x}_{N_i})$ ,  $I$  是  $N_i \times N_i$  维的单位阵。

为了得到发送符号的概率值,将(6)式中的  $z_i$  用高斯分布来近似,其结果为

$$z_i = u_i x_i + \xi_i, \quad (8)$$

式中  $u_i = g_i^H (GV_i G^H + \sigma^2 I)^{-1} g_i = g_i^H w_i$ ,  $\xi_i$  为服从高斯分布  $N(0, \sigma_i^2)$  的噪声项,  $\sigma_i^2 = u_i (1 - u_i)$ 。

则  $z_i$  在  $x_i = 0$  和  $x_i = 1$  条件下的后验概率分别为

$$P_D(z_i | x_i = 0) = \frac{1}{\sqrt{\pi} \sigma_i} \exp\left(-\frac{z_i^2}{\sigma_i^2}\right), \quad (9)$$

$$P_D(z_i | x_i = 1) = \frac{1}{\sqrt{\pi} \sigma_i} \exp\left[-\frac{(z_i - u_i)^2}{\sigma_i^2}\right], \quad (10)$$

发送信号  $x_i = 0$  和  $x_i = 1$  在  $z_i$  已知条件下的后验概率可以表示为

$$P_D(x_i = 0|z_i) = \frac{P_D(z_i|x_i = 0)P(x_i = 0)}{P_D(z_i|x_i = 0) + P_D(z_i|x_i = 1)}, \quad (11)$$

$$P_D(x_i = 1|z_i) = \frac{P_D(z_i|x_i = 1)P(x_i = 1)}{P_D(z_i|x_i = 1) + P_D(z_i|x_i = 0)}, \quad (12)$$

(11)式和(12)式中的  $P(x_i = 0)$  和  $P(x_i = 1)$  分别表示发送符号  $x_i = 0$  和  $x_i = 1$  的先验信息,  $\frac{P(z_i|x_i = 0)}{P(z_i|x_i = 0) + P(z_i|x_i = 1)}$

和  $\frac{P(z_i|x_i = 1)}{P(z_i|x_i = 1) + P(z_i|x_i = 0)}$  分别表示在  $z_i$  已知条件下发送符号  $x_i = 0$  和  $x_i = 1$  的外部软信息, 分别记为

$P_E(x_i = 0|z_i)$  和  $P_E(x_i = 1|z_i)$ , 即

$$P_E(x_i = 0|z_i) = \frac{P(z_i|x_i = 0)}{P(z_i|x_i = 0) + P(z_i|x_i = 1)} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{u_i^2 - 2z_i u_i}{\sigma_i^2}\right)}, \quad (13)$$

$$P_E(x_i = 1|z_i) = \frac{P(z_i|x_i = 1)}{P(z_i|x_i = 1) + P(z_i|x_i = 0)} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{2z_i u_i - u_i^2}{\sigma_i^2}\right)}, \quad (14)$$

在得到所有发送天线上发送信号的外部软信息后, LDPC 译码器将其作为先验信息, 并利用 BP 概率译码算法(置信传播译码算法)<sup>[12-13]</sup>进行内迭代解码, 其过程简单概述为

1) 初始化: 在 LDPC 中, 对校验矩阵满足  $H_{ij} \neq 0$  的所有变量节点, 将变量节点的信息  $q_{ij}$  初始化为  $P_E$

$$q_{ij}(0) = P_E(x_i = 0|z_i), \quad (15)$$

$$q_{ij}(1) = P_E(x_i = 1|z_i), \quad (16)$$

式中  $q_{ij}(b)$  表示给定  $z_i$ , 除第  $j$  个校验节点外的所有与  $x_i$  相邻的校验节点提供外信息的条件下,  $x_i = b$ , ( $b \in \{0, 1\}$ ) 的条件概率。

2) 迭代计算:

a) 水平迭代: 对校验节点的信息  $r_{ji}$  进行更新, 定义

$$\delta q_{ij} = q_{ij}(0) - q_{ij}(1), \quad (17)$$

$$\delta r_{ji} = r_{ji}(0) - r_{ji}(1) = \prod_{i \in R(j) \setminus i} \delta q_{ij}, \quad (18)$$

式中  $R(j)$  表示与第  $j$  个校验节点相邻的变量节点的集合,  $R(j) \setminus i$  表示从  $R(j)$  中除去第  $i$  个变量节点的节点集合。则

$$r_{ji}(0) = \frac{1}{2}(1 + \delta r_{ji}), \quad (19)$$

$$r_{ji}(1) = \frac{1}{2}(1 - \delta r_{ji}), \quad (20)$$

式中  $r_{ji}(b)$  表示  $x_i = b$ , ( $b \in \{0, 1\}$ ), 参加第  $j$  个校验方程的其他比特满足概率  $q_{ij}$  ( $i \neq i$ ) 的条件下, 该校验方程成立的概率。

b) 垂直迭代: 对变量节点的信息进行更新

$$q_{ij}(0) = \alpha_{ij} P_E(x_i = 0|z_i) \prod_{j \in C(i) \setminus j} r_{ji}(0), \quad (21)$$

$$q_{ij}(1) = \alpha_{ij} P_E(x_i = 1|z_i) \prod_{j \in C(i) \setminus j} r_{ji}(1), \quad (22)$$

式中  $\alpha_{ij}$  是归一化因子, 其目的是为了保证  $q_{ij}(0) + q_{ij}(1) = 1$ 。  $C(i)$  表示与第  $i$  个变量节点相邻的校验节点的集合,  $C(i) \setminus j$  表示从  $C(i)$  中除去第  $j$  个校验节点的节点集合。

3) 尝试译码: 首先计算发送符号的后验概率  $Q_i$

$$Q_i(0) = \alpha_i (1 - p_i) \prod_{j \in C(i)} r_{ji}(0), \quad (23)$$



$$Q_i(1) = \alpha_i p_i \prod_{j \in C(i)} r_{ji}(1), \quad (24)$$

式中  $Q_i(b)$  表示发送符号为  $x_i = b$  的后验概率,  $b \in \{0, 1\}$ ;  $p_i$  表示第  $i$  个发送符号是 1 的概率;  $\alpha_i$  是归一化因子, 其目的是为了保证  $Q_i(0) + Q_i(1) = 1$ 。根据判决准则  $\begin{cases} c_i = 1, & Q_i(1) \geq 0.5 \\ c_i = 0, & \text{否则} \end{cases}$  可得译码序列的结果为  $\hat{c} = [c_1, c_2, \dots, c_n]$ 。

4) 判决: 当校验矩阵  $H$  和译码结果  $\hat{c}$  满足  $H\hat{c}^T = 0$  时, 结束整个联合迭代译码过程, LDPC 的译码结果  $\hat{c} = [c_1, c_2, \dots, c_n]$  就是整个系统的最终译码结果。当不满足  $H\hat{c}^T = 0$ , 且内迭代次数没有达到最大时, 返回第二步进行下一次内迭代。当不满足  $H\hat{c}^T = 0$ , 但内迭代次数已经达到最大时停止内迭代, 根据第三步输出的后验概率计算出信号的软估计值, 并通过串并转换为  $\hat{x} = (\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_N)^T$ , 其中  $\hat{x}_i = E[x_i] = Q_i(1)$ 。将处理结果  $\hat{x}$  反馈给 VBLAST, 进行下一次外迭代。直到达到最大的外迭代次数时终止整个迭代译码过程。该译码方法充分利用了 LDPC 译码器反馈的高可靠性的估计信息, 从而降低了不同发送天线发送信息之间的相互干扰, 提高了 VBLAST 译码器译码结果的准确性, 较好地改善了 LDPC-VBLAST 级联空时编码的误码性能。

### 4 性能仿真分析

为了研究联合检测迭代译码算法的性能, 在大气湍流条件下, 利用蒙特卡罗方法对  $2 \times 2$ 、 $2 \times 3$ 、 $4 \times 4$  级联编码系统的误码性能进行了仿真分析, 其结果如图 2、3、4 和 5 所示。仿真条件是: (1) LDPC 码的编码方法采用  $\pi$  旋转编码算法<sup>[14-15]</sup>, 码率和码长分别是  $\frac{1}{2}$  和 2000; (2) 假设接收端已知信道参数; (3) 采用开关键控 (OOK) 调制方式。

合理地选取 LDPC 码的内迭代次数对验证联合检测迭代译码算法的性能至关重要, 为此首先研究了不同内迭代次数时简单 LDPC-VBLAST 级联编码系统的误码性能, 其结果如图 2 和 3 所示 (此时内迭代次数分别为 5 次、10 次和 15 次)。

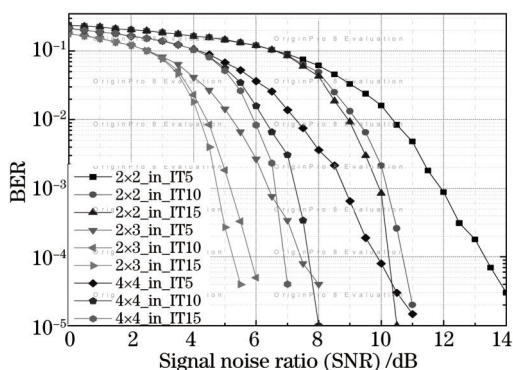


图 2  $\beta = 0.4$  时, 简单级联译码算法的误码性能

Fig.2 Bit error rate (BER) of the simple concatenated decoding algorithm when  $\beta = 0.4$

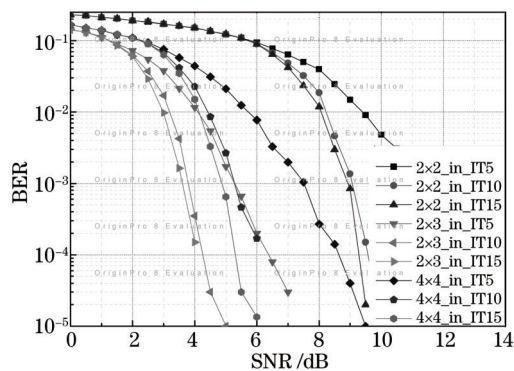


图 3  $\beta = 1.0$  时, 简单级联译码算法的误码性能

Fig.3 Bit error rate of the simple concatenated decoding algorithm when  $\beta = 1.0$

采用级联空时编码方案后, 系统的误码性能得到了较好地改善, 且随着内迭代次数的增加, 级联空时编码系统的误码性能越来越好; 但当内迭代次数增加到一定程度时, 随着内迭代次数的增加级联系统性能也在增加, 但其改善量却在逐渐减小。当  $R_{BER} = 1.0 \times 10^{-2}$  时, 对于  $2 \times 2$  的级联编码系统, 内迭代 10 次的误码性能比迭代 5 次的误码性能改善了约 1.4 dB, 迭代 15 次比迭代 10 次的误码性能改善了约 0.2 dB, 对于  $4 \times 4$  的级联编码系统, 迭代 10 次的误码性能比迭代 5 次的误码性能改善了约 1.2 dB, 迭代 15 次误码性能比迭代 10 次的误码性能改善了约 0.3 dB。当  $R_{BER} = 1.0 \times 10^{-3}$  时, 对于  $2 \times 3$  的级联编码系统, 迭代 10 次的误码性能比迭代 5 次的误码性能改善了约 0.8 dB, 迭代 15 次误码性能比迭代 5 次的误码性能改善了约 0.2 dB。(2) 级联编码系统的性能依次是  $2 \times 3$  最好,  $4 \times 4$  次之,  $2 \times 2$  最差。主要是因为和  $2 \times 3$  系统相比较,  $4 \times 4$  系统虽然获得了较高的接收分集增益, 但是由于发端采用复用技术, 使得  $4 \times 4$  系统中各路信号间引入的空间干扰比  $2 \times 3$  系统更大, 所以  $4 \times 4$  系统的误码性能比  $2 \times 3$  系统的误码性能差。和  $2 \times 2$  系统相比较,  $4 \times 4$  系统获得

的接收分集增益比  $2 \times 2$  系统获得的接收分集增益要大,所以性能要好。

图3所示的为  $\beta = 1.0$  时简单级联译码算法的误码性能,此时呈现出的规律和  $\beta = 0.4$  时的规律相似,只是此时系统性能的改善量更大。虽然内迭代次数的增加会带来系统性能改善量的增加,但此时译码算法的复杂度会随着迭代次数的增加而增大。因此,需要折衷考虑系统的误码性能和译码算法的复杂度,选取每次外迭代中内迭代次数为10次来分析联合检测迭代译码算法对级联编码系统的影响。

为了较好地说明改进后联合检测迭代译码算法的性能,分别在给定总内迭代次数分别为10次、20次和30次的情况下对  $2 \times 2$  和  $2 \times 3$  级联编码系统的性能进行了仿真分析(外迭代次数分别是1次、2次和3次),并和简单译码算法(外迭代次数为0)时的性能进行了对比,其结果如图4和5所示。

图4所示的为  $\beta = 0.4$  时采用联合检测迭代译码算法的误码性能。由图4可见:(1)联合检测迭代译码算法的误码性能比简单译码算法的性能有了明显的改善。在内迭代次数为10,外迭代次数为1的情况下,当  $R_{\text{BER}} = 1.0 \times 10^{-2}$  时,在  $2 \times 2$  级联编码系统中,采用联合检测迭代译码算法的信噪比比采用简单译码算法时的信噪比改善了约3dB;当  $R_{\text{BER}} = 1.0 \times 10^{-2}$  时,在  $2 \times 3$  级联编码系统中,采用联合检测迭代译码算法时的信噪比比采用简单译码算法时的信噪比改善了约2.6 dB。(2)采用联合检测迭代译码算法时,级联编码系统的误码性能随着外迭代次数的增加不断被改善。但随着外迭代次数的增加,虽然级联编码系统的误码性能逐渐被改善,但其改善量却在逐渐减小。当  $R_{\text{BER}} = 1.0 \times 10^{-2}$  时,在  $2 \times 2$  级联编码系统中,外迭代2次时联合检测迭代译码算法的误码性能比外迭代1次的误码性能改善了约0.6 dB,外迭代3次时联合检测迭代译码算法的误码性能比外迭代2次的误码性能改善了约0.2 dB。在  $2 \times 3$  级联编码系统中,外迭代2次时联合检测迭代译码算法的误码性能比外迭代1次的误码性能改善了约0.3 dB,外迭代3次时联合检测迭代译码算法的误码性能比外迭代2次的误码性能改善了约0.1 dB。同时也可以看出,虽然外迭代次数的增加会带来系统性能的改善,但此时译码算法的复杂度也会随着外迭代次数的增加而增大。同样,折衷考虑系统的误码性能和译码算法的复杂度,合理的选取外迭代次数。显然,在该系统中,选取外迭代次数为1次时更为合理。

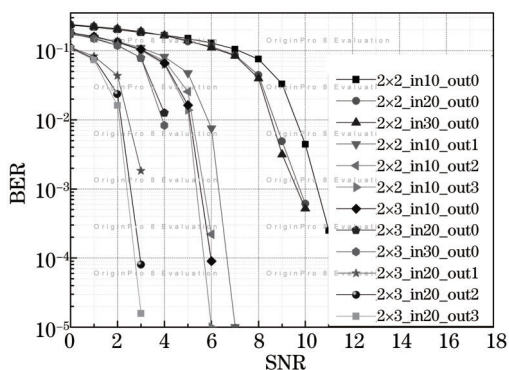


图4  $\beta = 0.4$  时,联合检测迭代译码算法时的误码性能

Fig.4 BER of the joint detection and iterative decoding algorithm when  $\beta = 0.4$

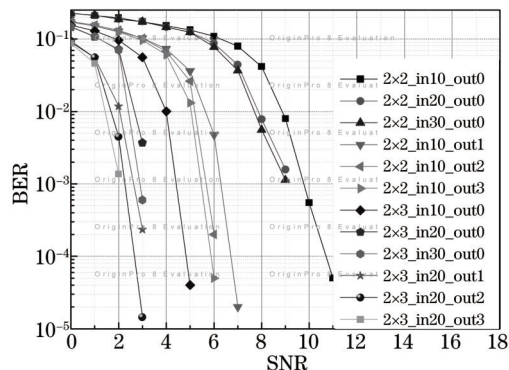


图5  $\beta = 1.0$  时,联合检测迭代译码算法时的误码性能

Fig.5 Bit error rate of the joint detection and iterative decoding algorithm when  $\beta = 1.0$

图5所示的为  $\beta = 1.0$  时采用联合检测迭代译码算法的误码性能。由图5可见:此时系统呈现的规律和图4相似。只是在强湍流下,采用联合检测迭代译码算法时系统性能的改善量比弱湍流下的更大。这就说明联合检测迭代译码算法更适用于强湍流信道。

## 5 结 论

光信号在大气信道中传输时,大气湍流引起的光强闪烁将会严重影响光通信的可靠性,甚至会导致通信中断。为了克服这种严重的影响,提高光通信的质量,人们将LDPC码和BLAST码相结合构建了适合于光通信的级联编码方案。为了使系统获得更好的误码性能,将LDPC码的译码结果反馈给VBLAST译码器,通过引入外迭代提出了一种适合于光空时级联编码系统的联合检测迭代译码算法,分析了其误码性能,并和简单级联译码算法的性能进行了对比。研究表明:和简单级联译码算法相比较,采用这种联合检测迭代译码算法后的误码性能有了较大的改善。在强湍流下,当  $R_{\text{BER}} = 1.0 \times 10^{-3}$  时,在  $2 \times 2$  级联编码系统中,外

迭代1次时的联合检测迭代译码算法的误码性能比简单译码算法时的性能改善了约4.2 dB。另外,在联合检测迭代译码算法中,采用数值分析法分析了迭代次数对级联系统性能的影响。结果表明:随着迭代次数的增加,级联编码系统的性能越来越好,但随着迭代次数的增加,系统性能的改善量却在逐渐减小,这为迭代次数的合理选取提供了一定的理论依据。

## 参 考 文 献

- 1 Li Ming, Cao Yang, Li Shuming, *et al.*. Study on the repetition space-time codes for multiple-input multiple-output free-space optical systems[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0405004.  
黎明,曹阳,李书明,等.多输入多输出空间光通信中的循环空时编码研究[J].中国激光,2013,40(4):0405004.
- 2 Xing Xuefeng, Li Hongzuo. Space laser communication based on quasi-orthogonal space-time block coding [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0505004 .  
邢雪峰,李洪祚.基于准正交空时分组编码的空间激光通信[J].中国激光,2012,39(5):0505004.
- 3 Chen Juan, Ke Xizheng, Cheng Ting. Differential space time code for space optical multiple input multiple output system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0206004.  
谌娟,柯熙政,程婷.自由空间光多输入多输出系统中的差分空时码[J].光学学报,2013,33(2):0206004.
- 4 M Niu, J Cheng, J F Holzman. Alamouti-type STBC for atmospheric optical communication using coherent detection[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(1): 2302807.
- 5 Wang Huiqin, Cao Minghua, Jia Kejun. Concatenated space-time block code in atmosphere laser communication[J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(12): 116-121.  
王惠琴,曹明华,贾科军.大气激光通信中的级联空时分组码[J].光电工程,2010,37(12):116-121.
- 6 Liu Jialin, Hao Shiqi, Zhou Jianguo, *et al.*. Performance study of the diversity reception system based on LDPC codes[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013(10): 100604.  
刘加林,郝士琦,周建国,等.基于LDPC码的分集接收系统性能研究[J].激光与光电子学进展,2013(10):100604.
- 7 I B Djordjevic, S Denic, J Anguita, *et al.*. LDPC-coded MIMO optical communication over the atmospheric turbulence channel[J]. IEEE J Lightwave Technol, 2008, 26(5): 478-487.
- 8 B Barua, D Barua, Analysis the performance of a LDPC coded FSO system with Q-ary pulse-position modulation[C]. 2011 3rd International Conference on Computer Research and Development (ICCRD), 2011(1): 339-343.
- 9 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.基于垂直分层空时码的自由空间光通信[J].中国激光,2008,35(6):874-878.
- 10 Ke Xizheng, Chen Juan, Chen Dan. Research progress of space-time code in wireless optical communication[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(10): 2765-2771.  
柯熙政,谌娟,陈丹.无线光通信中的空时编码研究进展[J].红外与激光工程,2013,42(10):2765-2771.
- 11 X Wang, V Poor. Iterative (TURBO)soft interference cancellation and decoding for coded CDMA[J]. IEEE transactions on communication,1999,47(7): 1046-1061.
- 12 Sha Li, Chongxiu Yu, Zhe Kang. 160-Gb/s NRZ-DQPSK optical transmission system employing QC-LDPC code[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(1): 010604.
- 13 D Declercq, M Fossorier. Decoding algorithms for non-binary LDPC codes over GF(q)[J]. IEEE Transactions on Communications, 2007, 55(4): 633-643.
- 14 Rich Echard, Shih-Chun Chang. Deterministic  $\pi$ -rotation low-density parity-check codes[J]. Electronics Letters, 2002, 38(10): 464-465.
- 15 Bi Wei, Xi Lixia, Zhang Xiaoguang, *et al.*. Performance enhancement of 100 Gb/s polarization diversity multiplexing differential quadrature phase shift keying optical communication system with  $\pi$ -rotation low-density parity-check codes[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0105002.  
毕伟,席丽霞,张晓光,等.用 $\pi$ 旋转型低密度奇偶校验码提升100 Gb/s偏振复用差分正交相移键控光通信系统性能[J].中国激光,2014,41(4):0105002.

栏目编辑:刘丰瑞