

户外无线光通信中湍流信道下的分组马尔可夫叠加传输研究

朱锦顺¹, 马啸^{2,3}

(1. 中山大学电子与信息工程学院, 广东 广州 510006; 2. 中山大学数据科学与计算机学院, 广东 广州 510006;
3. 中山大学广东省信息安全重点实验室, 广东 广州 510006)

摘 要: 基于精灵辅助等效系统, 分析了分组马尔可夫叠加传输系统的性能下界, 推导了精灵辅助系统误比特率的联合界。该联合界可用于解决误比特率 (BER) 很低时蒙特卡洛仿真难以获知系统错误性能的问题。仿真结果表明, 在不同强度的湍流条件下, 分组马尔可夫叠加传输系统在低误比特率区域的错误性能与精灵辅助下界贴合。精灵辅助等效系统的联合界与其仿真结果也贴合。在 $BER=10^{-5}$ 时, 记忆长度为 2 的分组马尔可夫叠加传输系统的性能与香农限的距离在 1 dB 以内。

关键词: 无线光通信; 湍流效应; 分组马尔可夫叠加传输; 联合界; Gamma-Gamma 信道模型
中图分类号: TN929.12 **文献标识码:** A

Block Markov superposition transmission over turbulence channels in outdoor optical wireless communication

ZHU Jin-shun¹, MA Xiao^{2,3}

(1. School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China;
2. School of Data and Computer Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China;
3. Guangdong Key Laboratory of Information Security Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Based on the equivalent genie-aided system, the bit-error rate of the block Markov superposition transmission system was analyzed and the union bound of the bit-error rate of the genie-aided system was derived. When the bit-error rate was extremely low at which the Monte Carlo simulation was time-consuming, the union bound could be adopted to evaluate the performance of the block Markov superposition transmission system. Simulations under turbulence conditions from weak to strong are performed which show that, in the low bit-error rate region, performance of the block Markov superposition transmission system matches well with the lower bound. It is also illustrated that the derived union bound matches well with Monte Carlo simulation result. At the BER of 10^{-5} , block Markov superposition transmission system with transmission memory 2 performs within 1 dB away from the Shannon limit.

Key words: optical wireless communication, turbulence effect, block Markov superposition transmission, union bound, Gamma-Gamma channel model

1 引言

无线光通信 (OWC, optical wireless communication) 拥有高通信容量、高安全性、低能耗以及频谱资源免授权等诸多优点, 逐渐成为无线通信方

面的研究热点^[1]。户外 OWC 通常采用基于激光二极管 (laser diode) 的自由空间光 (FSO, free space optical) 系统, 商用 FSO 系统已实现 10 Gbit/s 的传输速率, 最近实验验证 FSO 系统可实现接近光纤的传输速率^[2,3]。户外 OWC 也可采用基于发光二极管

收稿日期: 2016-10-28; 修回日期: 2017-04-21

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划培育基金资助项目 (No.91438101); 广东省自然科学基金重大基础研究培育基金资助项目 (No.2016A030308008)

Foundation Items: The Major Research Plan of the National Natural Science Foundation of China (No. 91438101), The Basic Research Project of The Natural Science Foundation of Guangdong (No. 2016A030308008)

的可见光通信 (VLC, visible light communication) 系统, 可实现远距离的星地通信到近距离的车载通信^[4~7]。

OWC 有诸多与射频通信互补的优点, 是解决“最后一公里”接入问题的重要技术^[8]。但是, 与室内 OWC 中静态和稳定的信道相比, 室外 OWC 中光信号在传输路径中的折射系数会随着大气中的温度不均和气压波动而变化, 导致接收信号的幅度和相位出现随机波动, 即湍流效应, 也可称之为信道衰落。湍流效应会给户外 OWC 系统的性能带来严重损害, 尤其是在几百米以上的较长距离传输时^[8,9]。为了更好地研究和设计湍流条件下的可靠通信系统, 人们建立了描述湍流信道衰落特性的统计模型^[1,9], 其中, 对数正态分布模型通常可以用来模拟弱湍流条件下的衰落特性^[10], K 分布模型可以用来模拟强湍流条件下的衰落特性^[11], 而 Gamma-Gamma 分布模型可用来描述从弱到强的所有强度湍流场景的信道衰落特性^[9,12]。

信道编码技术是提高湍流条件下 OWC 系统传输可靠性的重要方式。文献[13~17]分别研究了 OWC 系统中卷积码、RS 码、turbo 码和 LDPC 码等多种编码技术在湍流信道条件下的性能。在误比特率 (BER, bit-error rate) 不是很低时, 编码系统的错误性能可以通过蒙特卡洛仿真来获知。但是, 当 BER 很低时, 蒙特卡洛仿真不能有效工作, 此时, 可以采用联合界技术来评估系统性能^[18]。文献[19,20]通过联合界技术, 分析了采用 Gamma-Gamma 湍流信道模型时 OWC 系统差错控制编码的错误性能。另外, 信道容量通常是设计传输方案的逼近目标和方案性能的参照标准。文献[21,22]分析了采用 Gamma-Gamma 湍流信道模型时 OWC 系统的遍历信道容量, 并对比了不同强度湍流条件对通信容量的影响。

当 OWC 系统采用的信道编码的纠错能力较弱时, 可以通过将编码后码字传输多次来进一步提升传输可靠性。重复传输可以提高传输可靠性, 但是, 会带来严重的码率损失, 大大降低传输效率。本文提出在 OWC 系统中采用分组马尔可夫叠加传输^[23] (BMST, block Markov superposition transmission) 机制来提升传输可靠性, 且几乎不带来码率损失。在 BMST 中, 先将信息序列通过基本码编码, 再将编码后序列 (以其交织形式) 重复传输多次来提高可靠性; 同时, 将编码后序列进行马尔可夫叠加来保证传输效率。BMST 是一种空间耦合技术^[24], 在

加性高斯白噪声 (AWGN, additive white Gaussian noise) 信道下有逼近信道容量的能力, 有简单且紧致的下界, 其编码 (在硬件资源允许的条件下) 可以与基本码保持相近的速度。BMST 有诸多优点, 但目前尚无相关工作研究和分析其在户外 OWC 系统中受湍流效应影响时的性能。

本文研究户外 OWC 系统中的 BMST 传输机制, 并通过其精灵辅助 (GA, genie-aided) 等效系统来分析 BMST-OWC 系统的性能下界。为了解决较低误比特率时蒙特卡洛仿真不能有效预测系统错误性能的问题, 推导了 GA 等效系统错误性能的联合界。随后给出了 BMST-OWC 系统的一般设计过程, 最后用卷积码作为基本码进行仿真实验, 分析了 BMST-OWC 系统的性能, 验证了不同强度湍流条件下 GA 性能下界与 GA 等效系统联合界的紧致, 以及 BMST-OWC 系统逼近香农容量限的潜力。

2 信道模型

OWC 系统中通常采用强度调制/直接检测 (IM/DD, intensity modulation with direct detection), 本文采用最常用的强度调制方式——OOK 调制。在发送端, 长度为 K 的二进制序列 $\mathbf{u} = (u_0, u_1, \dots, u_{K-1})$ 经过信道编码, 得到编码后长度为 N 的码字 $\mathbf{c} = (c_0, c_1, \dots, c_{N-1})$, 再经过 OOK 调制, 得到信号序列 $\mathbf{x} = (x_0, x_1, \dots, x_{N-1})$, 其中, $0 \leq n \leq N-1$, $x_n = \sqrt{E_s} c_n$, E_s 为传输能量。

调制后的光信号序列 \mathbf{x} 经过湍流信道到达接收端。接收端在直接检测之后, 光电检测器输出的电信号序列可以表示为 $\mathbf{y} = (y_0, y_1, \dots, y_{N-1})$, $0 \leq n \leq N-1$ 。

$$y_n = \eta I_n x_n + z_n \quad (1)$$

其中, η 为接收端光电检测器的光电转换效率 (不失一般性, 本文假定 $\eta = 1$), I_n 表示光信号衰落系数, z_n 为服从 $(0, \frac{N_0}{2})$ 分布的加性高斯白噪声, N_0 为噪声的功率谱密度。

对于户外 OWC 链路中的湍流效应, 本文采用 Gamma-Gamma 统计信道模型。在从弱到强的湍流条件下, Gamma-Gamma 信道模型都能与实验中光信号的波动特点较好匹配^[12]。在 Gamma-Gamma 统计信道模型中, 光信号衰落系数 I_n 服从式(2)的 Gamma-Gamma 分布^[9,12], 对于 $I_n > 0$, Gamma-Gamma 函数如下

$$p(I_n) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I_n^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}I_n) \quad (2)$$

其中, $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数, $K_a(\cdot)$ 为第二类 a 阶修正贝塞尔函数。本文假定 OWC 系统中的光辐射为平面波形式, 式(2)中描述光强波动特性的参数 α 、 β 的计算式为^[9,12]

$$\alpha = \left[\exp \left(\frac{0.49\sigma_R^2}{\left(1 + 1.11\sigma_R^{\frac{12}{5}}\right)^{\frac{7}{6}}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (3)$$

$$\beta = \left[\exp \left(\frac{0.51\sigma_R^2}{\left(1 + 0.69\sigma_R^{\frac{12}{5}}\right)^{\frac{5}{6}}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (4)$$

其中, Rytov 方差 $\sigma_R^2 = 1.23C_n^2 k^{\frac{7}{6}} L_p^{\frac{11}{6}}$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ 为波长, L_p 为传输距离, C_n^2 为大气折射率结构常数。

参照文献[19,20], 本文假定接收端已知信道状态信息, 衰落系数 I_n 是相互独立的。接收端电信号的平均信噪比 $\bar{\gamma}_s$ 的定义为 $\bar{\gamma}_s = \frac{E_s E[I_n^2]}{N_0}$, 其中, $E[\cdot]$ 表示求数学期望, $E[I_n^2] = (1 + \frac{1}{\alpha})(1 + \frac{1}{\beta})$ 。

3 BMST-OWC 系统

3.1 编码/调制算法

令 $C[N, K]$ 是信息长为 K 、码长为 N 的二元码, 这里称之为基本码^[23], 假定基本码有快速的编码算法与有效的软入软出 (SISO, soft-in soft-out) 译码算法。令 $\mathbf{u}^{(0)}, \mathbf{u}^{(1)}, \dots, \mathbf{u}^{(L-1)}$ 为需要传输的 L 帧数据块, 其中, $0 \leq t \leq L-1$, $\mathbf{u}^{(t)} \in \mathbb{F}_2^K$, L 为耦合长度。记忆长度为 m 的 BMST-OWC 系统的编码/调制过程如图 1 所示。图 1 中, \boxed{C} 表示基本码 C 的编码器, $\boxed{\Pi_i}$ 表示第 i 个交织器, \boxed{D} 表示长度为 N 的寄存器, \oplus 表示模 2 加法器, \boxed{IM} 表示强度调制器。BMST-OWC 系统的编码/调制算法的具体描述如算法 1 所示。

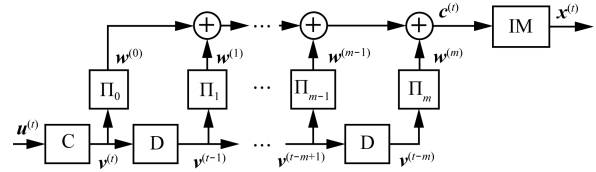


图 1 BMST-OWC 系统编码/调制过程

算法 1 BMST-OWC 系统的编码/调制算法

初始化 对于 $t > 0$, 设置 $\mathbf{v}^{(t)} = \mathbf{0} \in \mathbb{F}_2^N$ 。

循环 对于 $t = 0, 1, \dots, L-1$

1) 基本码编码: 用基本码 $C[N, K]$ 的编码算法将 $\mathbf{u}^{(t)}$ 编码成基本码码字 $\mathbf{v}^{(t)} \in \mathbb{F}_2^N$ 。

2) 交织: 对于 $0 \leq i \leq m$, 用第 i 个交织器 Π_i 将码字 $\mathbf{v}^{(t)}$ 交织成序列 $\mathbf{w}^{(i)} \in \mathbb{F}_2^N$ 。

3) 叠加: 计算 $\mathbf{c}^{(t)} = \sum_{0 \leq i \leq m} \mathbf{w}^{(i)}$, $\mathbf{c}^{(t)} \in \mathbb{F}_2^N$ 。

4) 调制: 用强度调制将 $\mathbf{c}^{(t)}$ 调制成符号序列 $\mathbf{x}^{(t)} = (x_0^{(t)}, x_1^{(t)}, \dots, x_{N-1}^{(t)})$, 对于 $0 \leq n \leq N-1$, $x_n^{(t)} = \sqrt{E_s} c_n^{(t)}$ 。

结束 对于 $t = L, L+1, \dots, L+m-1$, 设置 $\mathbf{u}^{(t)} = \mathbf{0} \in \mathbb{F}_2^K$, 按照前面步骤“循环”计算 $\mathbf{x}^{(t)}$ 。

由于结束操作, BMST 的码率为 $\frac{KL}{N(L+m)}$, 比

基本码 $C[N, K]$ 的码率略小, 但当 L 足够大时, 码率损失可以被忽略。

3.2 解调/译码算法

BMST-OWC 系统的解调/译码过程可以描述为一个正规图 (normal graph)^[25] 上迭代的消息处理/传递算法。图 2 为 $L = 4, m = 2$ 的 BMST-OWC 系统的正规图。在图 2 中, $\mathbf{X}^{(t)}, \mathbf{C}^{(t)}, \mathbf{V}^{(t)}$ 和 $\mathbf{U}^{(t)}$ 分别对应 $\mathbf{x}^{(t)}, \mathbf{c}^{(t)}, \mathbf{v}^{(t)}$ 和 $\mathbf{u}^{(t)}$ 的随机向量, 用 $\mathbf{X}_j^{(t)}, \mathbf{C}_j^{(t)}, \mathbf{V}_j^{(t)}$ 和 $\mathbf{U}_j^{(t)}$ 来表示相应随机向量的第 j 个分量。BMST-OWC 系统的正规图可以划分为多个层, 每层一般包括 $\boxed{=}$ 、 $\boxed{+}$ 、 $\boxed{\Pi}$ 和 \boxed{C} 共 4 种节点, 层内节点的处理/传递算法与文献[23]中相同。节点 $\boxed{=}$ 与节点 $\boxed{+}$ 的消息处理/传递算法分别和 LDPC 码中的等号节点与校验节点一样, 分别表示所有连接的变量都相等的约束以及所有连接的变量二元域叠加等于 0 的约束。而节点 $\boxed{\Pi_i}$ 表示第 i 个交织器, 对应的是交织或反交织处理。节点 \boxed{C} 表示的约束是 $\mathbf{V}^{(t)}$ 为基本码 C 的一个码字, 对应基本码的软入软出译码器。节点 \boxed{IM} 表示由强度调制引入的约束。调制信号序列 $\mathbf{x}^{(t)}$ 被发送至信道后, 经历信道衰落 $\mathbf{I}^{(t)}$, 对应的接收信号序列为

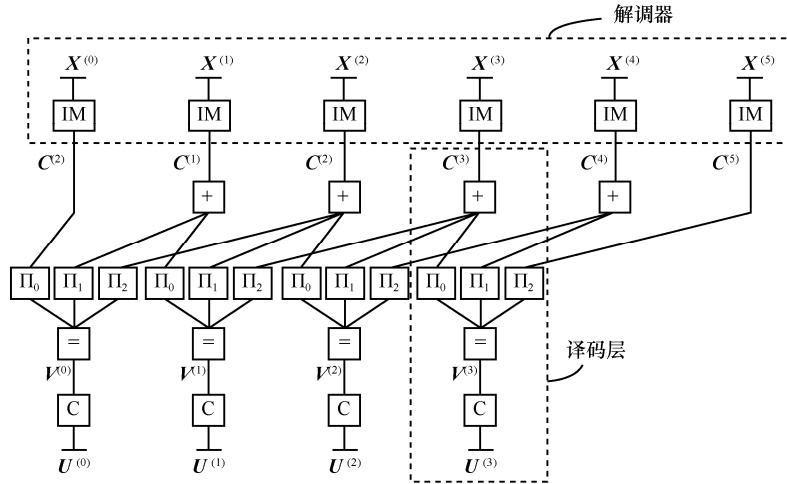


图 2 $L=4, m=2$ 的 BMST-OWC 系统的正规图

$\mathbf{y}^{(t)}$ 。接收端采用固定延迟为 d 的迭代滑窗解调/译码算法来恢复 $\mathbf{u}^{(t-d)}$ ，具体描述如算法 2 所示。

算法 2 BMST-OWC 系统的迭代滑窗解调/译码算法

全局初始化 假设接收端已收到 $\mathbf{y}^{(t)}$ ($0 \leq t \leq d-1$)，对于 $0 \leq n \leq N-1$ ， $u \in \mathbb{F}_2$ ，计算后验概率

$$\Pr(C_n^{(t)} = u | y_n^{(t)}, I_n^{(t)}) \propto \exp\left(-\frac{(y_n^{(t)} - I_n^{(t)} \sqrt{E_s} u)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

其中， $\sigma^2 = \frac{N_0}{2}$ 为噪声方差。正规图上当前层内部所有边上的消息及连接到其他层的所有边上的消息都按照均匀分布进行初始化。设置最大迭代次数 $J_{\max} > 0$ ，阈值 $\sigma_h > 0$ ，熵率 $h_0(\mathbf{Y}^{(t)}) = 0$ ，其中， $\mathbf{Y}^{(t)}$ 为对应 $\mathbf{y}^{(t)}$ 的随机向量。

滑窗译码 对于 $t=0, 1, \dots, L-1$

1) 局部初始化: 当 $t+d \leq t \leq L+m-1$ 时，对于 $0 \leq n \leq N-1$ 、 $u \in \mathbb{F}_2$ ，按照式(5)计算后验概率 $\Pr(C_n^{(t+d)} = u | y_n^{(t+d)}, I_n^{(t+d)})$ 。将第 $t+d$ 层内部所有边上的消息及连接到其他层的所有边上的消息按照均匀分布进行初始化。

2) 迭代: 对于 $J=1, \dots, J_{\max}$

① 前向递归: 对于 $i=0, 1, \dots, \min(d, L+m-1-t)$ ，正规图上第 $t+i$ 层消息处理/传递的顺序为

$$\boxed{+} \rightarrow \boxed{\Pi} \rightarrow \boxed{=} \rightarrow \boxed{C} \rightarrow \boxed{=} \rightarrow \boxed{\Pi} \rightarrow \boxed{+}$$

② 后向递归: 对于 $i=\min(d, L+m-1+t), \dots, 1, 0$ ，正规图上第 $t+i$ 层消息处理/传递的顺序为

$$\boxed{+} \rightarrow \boxed{\Pi} \rightarrow \boxed{=} \rightarrow \boxed{C} \rightarrow \boxed{=} \rightarrow \boxed{\Pi} \rightarrow \boxed{+}$$

③ 硬判决: 对 $\mathbf{U}^{(t)}$ 的消息做硬判决，得到 $\hat{\mathbf{u}}^{(t)}$ 。采用基于熵的迭代终止准则^[23] (entropy-based stopping criterion)，估计 $\mathbf{Y}^{(t)}$ 的熵率 $h_J(\mathbf{Y}^{(t)})$ ，如果满足 $|h_J(\mathbf{Y}^{(t)}) - h_{J-1}(\mathbf{Y}^{(t)})| \leq \sigma_h$ ，跳出迭代，将 $\hat{\mathbf{u}}^{(t)}$ 作为译码结果输出。

3) 干扰消除: 通过更新与 $\mathbf{C}^{(0)}, \dots, \mathbf{C}^{(t+m)}$ 关联的后验概率来移除所有层上 $\mathbf{v}^{(t)}$ 的影响。

3.3 译码时延和复杂度分析

考虑一个记忆长度为 m 、基本码为 $C[N, K]$ 的 BMST-OWC 系统。接收端采用固定延迟为 d 的迭代滑窗译码算法，译码窗口包含 $d+1$ 个译码层，每个译码层对应 N 个编码比特。由于恢复第 t 个译码层的信息需要第 $t+d$ 个译码层的接收序列，所以译码时延为 $(d+1)N$ bit。本文可以通过正规图来分析系统的译码复杂度。令 $Opt(A)$ 表示节点 A 上的运算次数。正规图中，每个译码层的运算主要是由度为 $m+2$ 的等号节点 $\boxed{=}$ 、度为 $m+2$ 的加号节点 $\boxed{+}$ 和基本码约束节点 \boxed{C} 带来的。每次迭代，每个译码层的总运算次数为 $Opt(\boxed{=}) + Opt(\boxed{+}) + Opt(\boxed{C})$ 。译码层的等号节点 $\boxed{=}$ 和加号节点 $\boxed{+}$ 的度为 $m+2$ ，与之相连的消息序列长度为 N 。在一次迭代中，等号节点 $\boxed{=}$ 和加号节点 $\boxed{+}$ 每次更新的运算复杂度为 $O(N(m+2))$ 。对于卷积码或短的分组码作为基本码的情况，本文可以用网格图来表示。假定网格图中每编码比特平均对应 a 个分支，那么，节点 \boxed{C} 采用 BCJR 软入软出译码算法^[26] 的计算复杂度为 $O(aN)$ 。当采用固定延迟为 d 的滑窗译码算法时，译码窗口包含 $d+1$ 个译码层，每次迭代有 $d+1$ 个

译码层参与。因此，每次迭代总译码复杂度为 $O((2(m+2)+a)(d+1)N)$ 。另外，需要指出的是，译码复杂度与迭代次数也有关系。在仿真中，若使用适当设置的迭代终止准则，本文发现在低误比特率区域滑窗译码的平均迭代次数约为 2~5 次。

4 性能分析

4.1 精灵辅助下界

在 BMST-OWC 系统中，本文通过交织与马尔可夫叠加操作将基本码编码后序列耦合在一起，试图通过引入这种新的约束来获得额外的性能增益。但是，马尔可夫叠加操作会带来基本码码字之间的干扰，从而可能导致在采用滑窗算法恢复信息时出现错误传播。与文献[23]相似，本文基于 GA 等效系统来获得 BMST-OWC 系统滑窗迭代解调/译码算法的性能下界。在 GA 等效系统中，假设在译目标译码层数据块 $\mathbf{u}^{(t)}$ 时，其他层的数据块都已知，也即在 $\mathbf{u}' = (\mathbf{u}^{(0)}, \dots, \mathbf{u}^{(t-1)}, \mathbf{u}^{(t+1)}, \dots, \mathbf{u}^{(L-1)})$ 已知的情况下，GA 等效系统对所有 t 和 j 计算 $\Pr\{U_j^{(t)} = u | \mathbf{u}', \mathbf{y}^{(0)}, \dots, \mathbf{y}^{(L+m-1)}, \mathbf{I}^{(0)}, \dots, \mathbf{I}^{(L+m-1)}\}$ ，其中， $u \in \mathbb{F}_2$ 。GA 等效系统的传输过程如图 3 所示，其编码/调制过程描述如下。

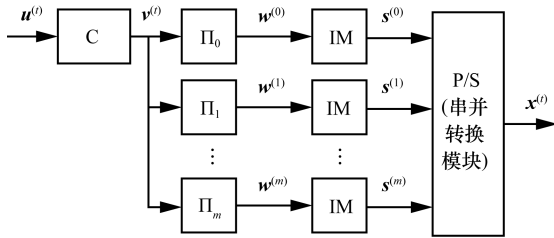


图 3 GA 等效系统的传输过程

- 1) 用基本码 $C[N, K]$ 的编码算法将 $\mathbf{u}^{(t)}$ 编码成基本码码字 $\mathbf{v}^{(t)}$ 。
- 2) 用 $m+1$ 个交织器 Π_0, \dots, Π_m 将码字 $\mathbf{v}^{(t)}$ 交织成 $\mathbf{w}^{(0)}, \dots, \mathbf{w}^{(m)}$ 。
- 3) 对于 $0 \leq i \leq m$ ，用强度调制将 $\mathbf{w}^{(i)}$ 映射成长度为 N 的序列 $\mathbf{s}^{(i)}$ 。
- 4) 将长度为 $N(m+1)$ 的序列 $\mathbf{x}^{(t)} = (\mathbf{s}^{(0)}, \dots, \mathbf{s}^{(m)})$ 作为发送信号在信道中传输。

相应的 GA 等效系统的正规图如图 4 所示。其中， $\mathbf{W}^{(i)}$ 和 $\mathbf{S}^{(i)}$ 分别为对应 $\mathbf{w}^{(i)}$ 和 $\mathbf{s}^{(i)}$ 的随机向量。接收端收到 $\mathbf{y}^{(t)}$ 后，对于 $0 \leq i \leq m$ ， $0 \leq j \leq N-1$ ， $u \in \mathbb{F}_2$ ，用类似式(5)计算 $\Pr(W_j^{(i)} = u | \mathbf{y}^{(t)}, \mathbf{I}^{(t)})$ 。这

里的 \square 节点与 BMST 译码时 \square 节点处理一样，经过 \square 节点处理可得

$$\Pr(V_j^{(i)} = u | \mathbf{y}^{(t)}, \mathbf{I}^{(t)}) \propto \prod_{i=0}^m \Pr(W_{\Pi_i(j)}^{(i)} = u | \mathbf{y}^{(t)}, \mathbf{I}^{(t)}) \quad (6)$$

其中， $\Pi_i(j)$ 表示第 i 个交织器 Π_i 中对应 j 的下标。然后将消息 $\Pr(V_j^{(i)} = u | \mathbf{y}^{(t)}, \mathbf{I}^{(t)})$ 输入基本码 C 的译码器， $0 \leq j \leq N-1$ ， $u \in \mathbb{F}_2$ ，恢复 $\mathbf{u}^{(t)}$ 。

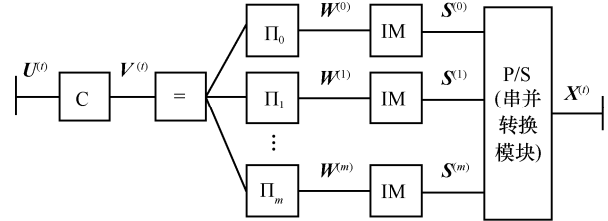


图 4 GA 等效系统的正规图

可以观察到，GA 等效系统的码率为 $\frac{K}{N(m+1)}$ 。令

$p_b = f_{\text{EquSys}}(\bar{\gamma}_b)$ 和 $p_b = f_{\text{BMST-OWC}}(\bar{\gamma}_b)$ 分别表示 GA 等效系统和 BMST-OWC 系统的性能函数，其中， p_b 为 BER， $\bar{\gamma}_b = \frac{E_b}{N_0} \triangleq \frac{\bar{\gamma}_s}{R}$ ， E_b 为平均每信息比特的接收能量， R 为对应系统的码率。假设 BMST-OWC 系统可以完全消除干扰效果，那么，在相同信噪比 $\bar{\gamma}_s$ 时，BMST-OWC 系统与 GA 等效系统的误比特率性能相同。令相同信噪比为 $\bar{\gamma}_s$ 时，假设完全消除干扰效果的 BMST-OWC 系统和 GA 等效系统的 $\frac{E_b}{N_0}$ 分别为 $\bar{\gamma}_b$ 和 $\bar{\gamma}'_b$ ，相应的误比特率性能为

$f'_{\text{BMST-OWC}}(\bar{\gamma}_b)$ 和 $f_{\text{EquSys}}(\bar{\gamma}'_b)$ 。考虑信噪比 $\bar{\gamma}_s$ 与 $\frac{E_b}{N_0}$ 之间的转换，有 $\bar{\gamma}_s = \bar{\gamma}_b + 10 \lg R_{\text{BMST-OWC}} = \bar{\gamma}'_b + 10 \lg R_{\text{EquSys}}$ 。所以，当 $\bar{\gamma}'_b = \bar{\gamma}_b + 10 \lg(m+1) - 10 \lg(1 + \frac{m}{L})$ 时，BMST-OWC 系统与 GA 等效系统有相同的错误性能，即 $f'_{\text{BMST-OWC}}(\bar{\gamma}_b) = f_{\text{EquSys}}(\bar{\gamma}'_b)$ 。

易知，实际 BMST-OWC 系统的 BER 性能 $f_{\text{BMST-OWC}}(\bar{\gamma}_b) \geq f'_{\text{BMST-OWC}}(\bar{\gamma}_b)$ 。与文献[23]类似，BMST-OWC 系统的 BER 性能下界可以由 GA 等效系统的性能、记忆长度 m 以及耦合长度 L 来预测，

$$f_{\text{BMST-OWC}}(\bar{\gamma}_b) \geq f_{\text{EquSys}}\left(\bar{\gamma}_b + 10 \lg(m+1) - 10 \lg\left(1 + \frac{m}{L}\right)\right) \quad (7)$$

当 L 很大时, 式(7)中 $10\lg(1 + \frac{m}{L})$ 趋于 0, 与 GA 等效系统相比, BMST-OWC 系统有潜在的 $10\lg(m+1)$ 的性能增益。

4.2 联合界

从上文可知, 记忆长度为 m 的 BMST-OWC 系统的性能可以通过其 GA 等效系统的性能来预测, 而 GA 等效系统的性能可以通过蒙特卡洛仿真或者分析界来获知。在 BER 很低 (如 $BER < 10^{-15}$) 的区域, 由于需要非常大的统计量, 蒙特卡洛仿真难以获知系统的性能, 而分析界依然可以有效地获知系统的错误性能。

本文考虑基本码 C 为线性码。GA 等价系统可看成基本码编码后, 再级联码率为 $m+1$ 的重复码, 因此, 也为线性码。不失一般性, 假设发送码字为全 0 码字。为了计算 GA 等效系统 BER 的联合界, 本文先计算成对错误概率 (PEP, pairwise error probability) $P(C^0, \hat{C}^h)^{[19]}$ 。 $P(C^0, \hat{C}^h)$ 表示发送码字为全 0 码字 C^0 , 接收端译成另一重量为 h 的码字 $\hat{C}^h = (\underbrace{1, \dots, 1}_h, \underbrace{0, \dots, 0}_{M-h})$ 的概率, 其中, M 为编码后序列长度。假定在接收端 CSI 完全已知, 即接收端已知衰落系数 $\mathbf{I} = (I_0, I_1, \dots, I_{M-1})$, 加性高斯白噪声服从分布 $(0, \frac{N_0}{2})$ 。PEP 的计算如下

$$P(C^0, \hat{C}^h | \mathbf{I}) = Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{2N_0} \sum_{j=0}^{h-1} I_j^2}\right) \quad (8)$$

$$= \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \prod_{j=0}^{h-1} \exp\left(-\frac{\gamma_s I_j^2}{4 \sin^2 \theta}\right) d\theta \quad (9)$$

其中, $\gamma_s = \frac{E_s}{N_0}$, $Q(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \exp\left(-\frac{x^2}{\sin^2 \theta}\right) d\theta$ 为互补累计分布函数。为了获得非条件的 PEP, 对式(9)关于 I_j 求期望为

$$P(C^0, \hat{C}^h) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \prod_{j=0}^{h-1} E_{I_j} \left[\exp\left(-\frac{\gamma_s I_j^2}{4 \sin^2 \theta}\right) \right] d\theta \quad (10)$$

$$= \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[\int_0^{+\infty} \exp\left(-\frac{\gamma_s \mathbf{I}^2}{4 \sin^2 \theta}\right) p(\mathbf{I}) d\mathbf{I} \right] d\theta \quad (11)$$

其中, $E[\cdot]$ 表示求期望, $p(\mathbf{I})$ 为式(2)中的 Gamma-Gamma 函数。

基本码 C 的输入输出码重枚举函数 (IOWEF,

input-output weight enumerator function) ^[18] 为

$$A^C(W, Z) = \sum_{h=h_{\min}}^{h_{\max}} \sum_{w=1}^K A_{w,h}^C W^w Z^h \quad (12)$$

其中, h_{\min} 与 h_{\max} 分别为码重 h 的最小值和最大值, K 为基本码 C 的信息序列长度, $A_{w,h}^C$ 表示基本码 C 中输入信息序列的汉明重量为 w 、输出码字的汉明重量为 h 的码字个数, W 和 Z 为 2 个哑变量。基于式(12), 可得到 GA 等效系统的 IOWEF 为

$$A^{\text{EquSys}}(W, Z) = \sum_{h=h_{\min}}^{h_{\max}} \sum_{w=1}^K A_{w,h}^C W^w Z^{h(m+1)} \quad (13)$$

对于一个特定的码重为 h_0 的基本码码字, 其对应的信息序列的汉明重量为 w_0 , 其对应的 GA 等效系统编码后序列 $\hat{C}^{h_0(m+1)}$ 的重量为 $h_0(m+1)$ 。假设 GA 等效系统发送的序列为全 0 序列 C^0 , 接收端译错成重量为 $h_0(m+1)$ 的序列 $\hat{C}^{h_0(m+1)}$ 。此时, 成对错误概率 $P(C^0, \hat{C}^{h_0(m+1)})$ 可以按照式(11)得到, 错误比特数为 w_0 , 比特错误率为 $\frac{w_0}{K} P(C^0, \hat{C}^{h_0(m+1)})$ 。进一步, 可得 GA 等效系统 BER 的联合界为

$$P_b \leq \sum_{h=h_{\min}}^{h_{\max}} \sum_{w=1}^K \frac{w}{K} A_{w,h}^C P(C^0, \hat{C}^{h(m+1)}) \quad (14)$$

$$\text{令 } g(\theta) = \int_0^{+\infty} \exp\left(-\frac{\gamma_s \mathbf{I}^2}{4 \sin^2 \theta}\right) p(\mathbf{I}) d\mathbf{I}, \text{ 联合式(11)}$$

和式(14), 可得到 GA 等效系统 BER 的联合界计算式

$$P_b \leq \sum_{h=h_{\min}}^{h_{\max}} \sum_{w=1}^K \frac{w}{\pi K} A_{w,h}^C \int_0^{\frac{\pi}{2}} g(\theta)^{h(m+1)} d\theta \quad (15)$$

4.3 设计 BMST-OWC 系统的一般过程

由式(7)知, 当 L 较大时, $10\lg(1 + \frac{m}{L}) \approx 0$, 式(7)

可以近似写成

$$f_{\text{BMST-OWC}}(\bar{\gamma}_b) \geq f_{\text{EquSys}}(\bar{\gamma}_b + 10\lg(m+1)) \quad (16)$$

在给定湍流条件的 OWC 场景中, 假设现在在本文设计一个给定码率的较好的 BMST-OWC 传输方案, 实现目标 BER 性能 p_{target} 。可以按照以下过程来实现。

- 1) 选择一个给定码率的基本码 C 。为了逼近信道容量, 可以将码长 N 设置得较长, 如设置 $N = 10\,000$ 。
- 2) 找到给定强度湍流场景下不同 m 时 GA 等

效系统的性能曲线 $f_{\text{EquSys}}(\bar{\gamma}_b)$ 。从曲线中找到 BMSF-OWC 系统在不同 m 时满足 $f_{\text{EquSys}}(\bar{\gamma}_m) \leq p_{\text{target}}$ 的 $\bar{\gamma}_m$ ，即实现目标 BER 需要的 $\frac{E_b}{N_0}$ 。

3) 找到给定强度湍流场景下对应码率的香农限，表示为 $\bar{\gamma}_{\text{lim}}$ 。

4) 通过 $10\lg(m+1) \geq \bar{\gamma}_m - \bar{\gamma}_{\text{lim}}$ 来决定 BMST-OWC 系统的记忆长度，选择满足该式的最小记忆长度 m 。

5) 生成 $m+1$ 个随机交织器。

上面的设计过程不需要优化，因此，可以很方便地实现，唯一需要解决的问题是怎样获得 $f_{\text{EquSys}}(\bar{\gamma}_b)$ 的性能曲线。一种方法是采用 4.1 节中描述的方法，通过蒙特卡洛仿真来获得 GA 等效系统的性能。另一种方法是采用 4.2 节中的联合界来获得 GA 等效系统的性能。在低 BER 区域，第二种方法更加可靠，而且可以在蒙特卡洛仿真不能工作的较低的 BER 区域工作。

5 仿真结果及分析

本节给出不同湍流条件下 BMST-OWC 系统错误性能的仿真结果及分析。仿真采用 Gamma-Gamma 湍流信道模型。Rytov 方差通常用来描述湍流强度。在文献[9]中，弱湍流描述为 $\sigma_R^2 < 1$ ；中等强度湍流描述为 $\sigma_R^2 = 1$ ；强湍流描述为 $\sigma_R^2 > 1$ 。在仿真中，本文分别用 Rytov 方差 $\sigma_R^2 = 0.2, 1.0, 4.0$ 来描述由弱到强的不同强度湍流信道。系统采用 S-随机交织器^[27]，其参数设置为 $S = \left\lfloor \sqrt{\frac{N}{4}} \right\rfloor$ ，其中， $\lfloor x \rfloor$ 为对 x 向下取整操作。

$m+1$ 个交织器在随机生成之后固定不变。基本码 C 为一个结尾的非系统 4 状态(2, 1, 2)卷积码，其多项式生成矩阵为 $\mathbf{G}(D) = [1+D^2, 1+D+D^2]$ ，其中， D 表示延迟， D 的幂表示延迟单元数。基本码译码采用 BCJR 软入软出译码算法。接收端迭代滑窗解调/译码算法的参数设置为最大迭代次数 $J_{\text{max}} = 18$ ，基于熵的迭代中止准则的阈值 $\sigma_h = 10^{-5}$ 。

图 5 给出了耦合长度 $L = 19$ ，记忆长度 $m = 1$ 的 BMST-OWC 系统在弱湍流条件下的错误性能。Gamma-Gamma 湍流信道中，Rytov 方差设置为 0.2，相应的参数 $\alpha = 11.65$ ， $\beta = 10.12$ 。系统中基本码 C 的信息位长度 $K = 50$ ，码字长度 $N = 104$ 。接收端

收到所有 $\mathbf{y}^{(l)}$ 之后开始译码，即迭代滑窗解调/译码算法的时延 $d = 19$ 。从图 5 中可以看出，与基本码相比，GA 等效系统在 $BER = 10^{-5}$ 时大约有 1.3 dB 的性能增益。如 4.1 节所描述，GA 等效系统完全消除了原 BMST-OWC 系统中叠加带来的干扰，可视作为在基本码编码后再级联码率为 $\frac{1}{m+1}$ 的重复码。而

考虑码率损失（以 $\frac{E_b}{N_0}$ 为横坐标）时，重复码在

AWGN 信道下不能带来性能增益，即 AWGN 信道下 GA 等效系统的性能与基本码的性能一样^[23]。因此，本文称这 1.3 dB 增益为 GA 等效系统在湍流信道下所获得的分集增益。从图 5 中可以看出，在低 BER 区域，GA 等效系统错误性能的联合界与其蒙特卡洛仿真结果能够很好地重合，这表明 4.2 节推导的联合界在低 BER 区域是紧密的。从图 5 中也可以看到，在低 $\frac{E_b}{N_0}$ 区域，迭代滑窗解调/译码算法不

能有效工作，性能比基本码还要差，这是由差错传播造成的。而在较低 BER 区域，BMST-OWC 系统的错误性能与 GA 性能下界几乎完全贴合，这说明在较低 BER 区域通过迭代滑窗解调/译码几乎完全消除了叠加导致的干扰的影响。如式(7)所示，相对 GA 等效系统，BMST-OWC 系统有 $10\lg(m+1) - 10\lg(1 + \frac{m}{L}) = 10\lg(2) - 10\lg(\frac{20}{19}) \approx 2.8$ dB 的性能增益。与 GA 等价系统简单的重复相比，BMST-OWC 系统通过叠加降低了码率的损失，而这 2.8 dB 增益是由 BMST-OWC 系统中交织后的马尔可夫叠加带来的，本文称之为编码增益。编码增益只与记忆长度 m 和耦合长度 L 有关。相对基本码，在较低 BER 区域，BMST-OWC 系统可获得两部分增益，一部分是重复带来的分集增益，另一部分是交织后马尔可夫叠加带来的编码增益。在 $BER = 10^{-5}$ 时，与基本码相比， $m=1$ 的 BMST-OWC 系统大约有 4.1 dB 的总增益。

在下面的仿真实验中，本文考虑不同强度湍流条件下耦合长度 $L = 1000$ 的 BMST-OWC 系统。系统中基本码 C 的信息位长度 $K = 5000$ ，码字长度 $N = 10004$ ，迭代滑窗解调/译码算法的延迟 $d = 3m$ 。本文选择较大的耦合长度 L 来使 BMST 几乎不带来码率损失，另外，选择较大的基本码码长 N 来逼近香农限。由文献[23]可知，当译码延迟选择为 $d = 3m$ 时的滑窗译码的性能已经足够好。

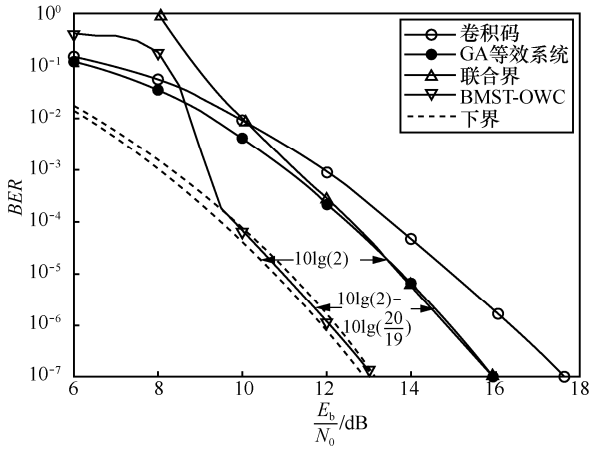


图 5 弱湍流条件下, $L = 19$ 、 $m = 1$ 时 BMST-OWC 系统的错误性能

图 6 给出了 $L = 1000$ 时 BMST-OWC 系统在弱湍流条件下的错误性能。Gamma-Gamma 湍流信道中, Rytov 方差设置为 0.2, 相应的参数 $\alpha = 11.65$, $\beta = 10.12$ 。从图 6 中可以看出, 与基本码相比, GA 等效系统可获得的分集增益随 m 的增大而增大, 在 $BER = 10^{-5}$ 处, $m = 1、2、3$ 时, 分别可以获得 1.4 dB、1.9 dB、2.2 dB 的分集增益。在较低 BER 区域, GA 等效系统性能的联合界与其仿真结果能够很好地贴合。从图 6 中也可以看出, 在低 $\frac{E_b}{N_0}$ 区域, 基于迭代滑窗解调/译码

算法的 BMST-OWC 系统无法有效工作, 这是由严重的错误传播导致的。而基本码的 BER 性能大约为 0.05 时, 迭代滑窗检测/译码算法开始工作, 可有效消除干扰带来的影响。在较低 BER 区域, BMST-OWC 系统迭代滑窗解调/译码算法的错误性能与 GA 性能下界几乎完全贴合。如式(16)所描述, 相对 GA 等效系统, BMST-OWC 系统有 $10\lg(m+1) - 10\lg(1 + \frac{m}{L}) \approx 10\lg(m+1)$ 的编码增益, 即在 $m = 1, 2, 3$ 时分别有 $10\lg(2)$ 、 $10\lg(3)$ 、 $10\lg(4)$ 的增益。图 6 中本文也给出了弱湍流条件下码率为 0.5 的香农限^[20]。在 $BER = 10^{-5}$ 时, $m = 2$ 的 BMST-OWC 系统即可达到距离香农限大约为 0.88 dB 的性能。

图 7 和图 8 分别给出了 $L = 1000$ 时 BMST-OWC 系统在中等强度湍流与强湍流条件下的错误性能。当为中等强度湍流条件时, Rytov 方差设置为 1.0, 相应的参数 $\alpha = 4.39$, $\beta = 2.56$; 当为强湍流条件时, Rytov 方差设置为 4.0, 相应的参数 $\alpha = 4.34$, $\beta = 1.31$ 。从图 7 和图 8 中可以看出, 与弱湍流条件时情况相

同,

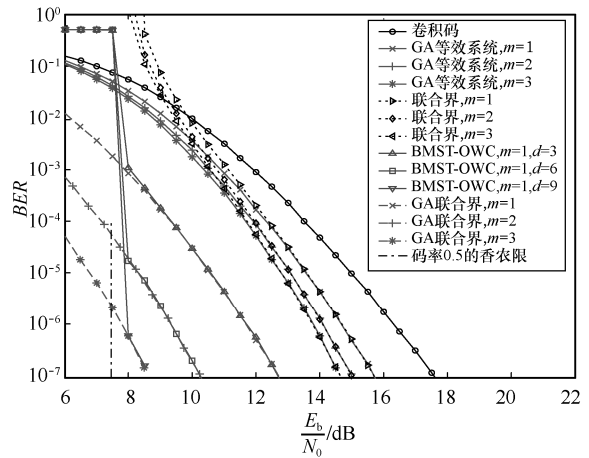


图 6 弱湍流条件下, $L = 1000$ 时 BMST-OWC 系统的错误性能

系统在低 $\frac{E_b}{N_0}$ 区域不能有效工作, 而在基本码的 BER 性能大约为 0.05 时, 迭代滑窗检测/译码算法开始有效工作。在低 BER 区域, BMST-OWC 系统的错误性能与 GA 性能下界很好地重合。从 2 幅图中也可以看出, GA 等效系统的联合界与其仿真结果重合。这意味着在从弱到强的湍流条件下, 本文可以通过联合界来间接地预测和估计低 BER 时 BMST-OWC 系统的错误性能。对比图 6~图 8 可以看到, 当记忆长度 m 相同时, 随着湍流强度的增强, BMST-OWC 系统的错误性能会变差, 但相对基本码可获得更多的分集增益。另外, 在中等强度湍流和强湍流条件下, 记忆长度 $m = 2$ 的 BMST-OWC 系统在 $BER = 10^{-5}$ 时分别可达到距离香农限大约 0.8 dB 和 0.86 dB 的性能。

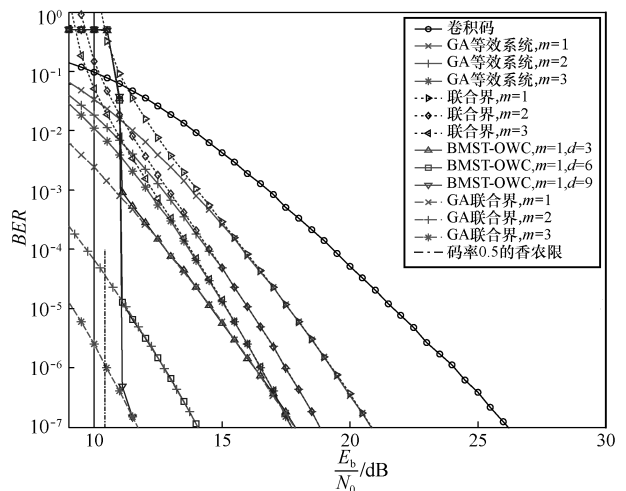


图 7 中等强度湍流条件下, $L = 1000$ 时 BMST-OWC 系统的错误性能

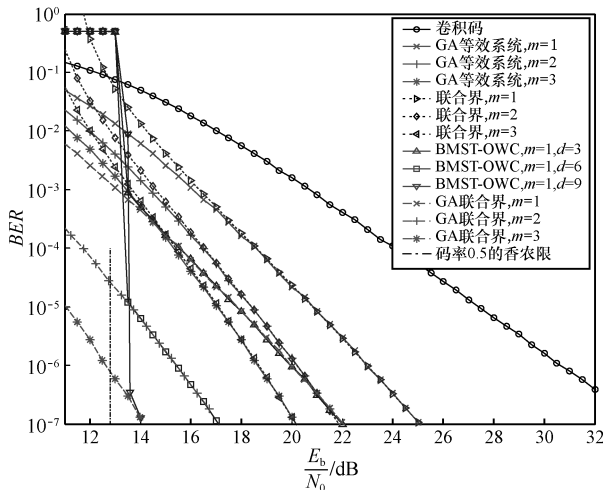


图8 强湍流条件下, $L = 1000$ 时 BMST-OWC 系统的错误性能

6 结束语

本文研究了湍流条件下 OWC 系统中的 BMST 传输机制, 基于 GA 等效系统分析了系统的性能下界。为解决 BER 很低时蒙特卡洛仿真难以获知系统错误性能的问题, 推导了 GA 等效系统的联合界。仿真结果表明, BMST-OWC 系统在不同强度湍流条件下都能有效工作, 在较低 BER 区域, 其迭代滑窗解调/译码算法的错误性能与 GA 下界可以很好地贴合, 对应 GA 等效系统的联合界与其仿真结果能很好地贴合。不同强度湍流条件下, BMST-OWC 系统都可获得距离香农限 1 dB 以内的性能。

BMST 传输机制可以选取码率可变的基本码来实现码率灵活可调, 如在 BMST 传输机制中采用重复码和单奇偶校验码的笛卡尔积作为基本码, 可实现任意码率, 且在 AWGN 信道下可逼近香农限^[28]。下一步将研究码率可调的 BMST-OWC 系统, 以实现给定信噪比约束条件下, 不同湍流强度时的可靠通信。另外, 户外 OWC 系统也通常采用高阶调制技术, 如脉冲位置调制 (PPM, pulse position modulation)、多脉冲位置调制 (MPPM, multipulse PPM) 等。下一步也将联合 BMST 技术与高阶调制技术来研究户外 OWC 系统中的 BMST 传输问题。

参考文献:

[1] UYSAL M, CAPSONI C, GHASSENMLYOY Z, et al. Optical wireless communications: an emerging technology[M]. New York: Springer, 2016.

[2] CIARAMELLA E, ARIMOTO Y, CONTESTABILE G, et al. 1.28 Terabit/s (32×40 Gbit/s) WDM transmission system for free space optical communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(9):1639-1645.

[3] PARCA G, SHAHPARI A, CARROZZO V, et al. Optical wireless transmission at 16-Tbit/s (16×100 Gbit/s) for next-generation convergent urban infrastructures[J]. Optical Engineering, 2013, 52(11): 116102.

[4] LOURENCO N, TERRA D, KUMAR N, et al. Visible light communication system for outdoor applications[C]//IEEE 8th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP). 2012: 1-6.

[5] NAKAJIMA A, SAKO N, KAMEMURA M, et al. ShindaiSat: a visible light communication experimental micro-satellite[C]//The International Conference on Space Optical Systems and Applications. 2012.

[6] WANG Y, HUANG X, TAO L, et al. 1.8-Gb/s WDM visible light communication over 50-meter outdoor free space transmission employing CAP modulation and receiver diversity technology[C]//Optical Fiber Communication Conference and Exhibition (OFC). 2015: 1-4.

[7] ZHANG M, ZHAO P, JIA Y. A 5.7 km visible light communications experiment demonstration[C]//IEEE 7th International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). 2015: 58-60.

[8] BORAH D K, BOUCOUVALAS A C, DAVIS C C, et al. A review of communication-oriented optical wireless systems[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012, 91: 1-28.

[9] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Laser beam propagation through random media[M]. Bellingham: SPIE Press, 2005.

[10] ZHU Y, SUN Z, ZHANG J, et al. Training receivers for repetition coded MISO outdoor visible light communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, PP(99):1-11.

[11] KIASALEH K, BAGROV A V, LUKIN V P, et al. Performance of coherent DPSK free-space optical communication[J]. IEEE Transactions on Communications, 2006, 54(4):604-607.

[12] AL-HABASH M, ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media[J]. Optical Engineering, 2001, 40(8):1554-1562.

[13] 宋效正, 刘璐, 汤俊雄. 无线光通信卷积交织与编码的实验及仿真研究[J]. 通信学报, 2007, 28(4):13-17.

SONG X Z, LIU L, TANG J X. Experimental and simulation study on convolutional interleaving with coding for optical wireless communication system[J]. Journal on Communications, 2007, 28(4): 13-17.

[14] XU F, KHALIGHI A, CAUSSE P, et al. Channel coding and time-diversity for optical wireless links[J]. Optics Express, 2009, 17(2): 872-887.

[15] CVIJETIC N, WILSON S G, ZARUBICA R. Performance evaluation of a novel converged architecture for digital-video transmission over optical wireless channels[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(11):3366-3373.

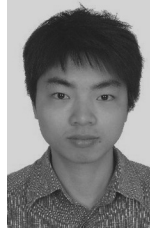
[16] DJORDJEVIC I B, DENIC S, ANGUIA J, et al. LDPC-coded MIMO optical communication over the atmospheric turbulence channel[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(5):478-487.

[17] 冷蛟锋, 郝士琦, 吕旭光, 等. 基于低密度奇偶校验码的比特符号映射及系统性能研究[J]. 光学学报, 2012, 32(4):1-7.

LENG J F, HAO S Q, LU X G, et al. Study on bit-symbol mapping method of MPPM and system performance based on low density parity check codes[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 1-7.

- [18] SASON I, SHAMAI S. Performance analysis of linear codes under maximum-likelihood decoding: a tutorial[M]. Hanover: Now Publishers Inc, 2006.
- [19] UYSAL M, LI J, YU M. Error rate performance analysis of coded free-space optical links over Gamma-Gamma atmospheric turbulence channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(6):1229-1233.
- [20] GAPPMAIR W, FLOHBERGER M. Error performance of coded FSO links in turbulent atmosphere modeled by Gamma-Gamma distributions[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(5):2209-2213.
- [21] ANGUITA J, DJORDJEVIC I, NEIFELD M, et al. Shannon capacities and error-correction codes for optical atmospheric turbulent channels[J]. Journal of Optical Networking, 2005, 4(9):586-601.
- [22] ZHANG J, DAI L, HAN Y, et al. On the ergodic capacity of MIMO free-space optical systems over turbulence channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(9):1925-1934.
- [23] MA X, LIANG C, HUANG K, et al. Block Markov superposition transmission: construction of big convolutional codes from short codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 61(6): 3150-3163.
- [24] HUANG K, MA X. Performance analysis of block Markov superposition transmission of short codes[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(2):362-374.
- [25] FORNEY G D J R. Codes on graphs: normal realizations[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(2):520-548.
- [26] BAHL L, COCKE J, JELINEK F, et al. Optimal decoding of linear codes for minimizing symbol error rate[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1974, 20(2): 284-287.
- [27] DOLINAR S, DIVSALAR D. Weight distributions for turbo codes using random and nonrandom permutations[R]. TDA Progress Report 42-122, Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 1995.
- [28] HU J, MA X, LIANG C. Block Markov superposition transmission of repetition and single-parity-check codes[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(2): 131-134.

作者简介:



朱锦顺 (1987-), 男, 湖南邵阳人, 中山大学博士生, 主要研究方向为信道编码技术、编码调制技术、无线光通信。



马啸 (1968-), 男, 河南焦作人, 博士, 中山大学教授、博士生导师, 主要研究方向为信息与编码理论、编码调制技术、无线通信、光通信等。