

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.11.007

无线紫外光 MIMO 湍流信道中 BCOSTBC 编码研究*

赵太飞 包鹤 马欣媛

(西安理工大学 自动化与信息工程学院 西安 710048)

摘要:针对在准确估计信道情况下无线紫外光 MIMO 湍流信道中如何有效地获得全分集增益这一问题。首先研究了无线紫外光通信的传输特性,然后研究了 MIMO 信道以及影响紫外光通信的主要因素。最后,采用比特补码式正交空时码(BCOSTBC)编码,推导出在弱湍流情况下直视(LOS)和非直视(NLOS)的误码率公式。实验结果表明,采用编码后 1×2 、 2×1 和 2×2 系统的误码率性能在 LOS 和 NLOS 情况下分别约改善了 3、6 和 9 dB。增加光电探测器数目可以提高分集增益,有益于系统性能的改善;其中, 2×2 系统需要的发射功率最小,传输的距离更远,数据传输速率更大,误码率更低;在 NLOS 条件下通过小角度收发仰角能够改善系统的误码率性能。

关键词: 日盲紫外光;MIMO 系统;BCOSTBC;湍流信道

中图分类号: TN929.1 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.20

Research on BCOSTBC for wireless UV MIMO communication turbulent channel

Zhao Taifei Bao He Ma Xinyuan

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Aiming at the problem of how to effectively obtain the full diversity gain in the wireless ultraviolet Multi-input Multiple-output (MIMO) turbulence channel in the case of accurate estimation of the channel, the transmission characteristics of wireless ultraviolet communication are firstly studied, and then the MIMO channel and the main factors affecting the ultraviolet communication are studied. Finally, the bit error rate formula of LOS and NLOS is derived by using bit complementary orthogonal space-time code (BCOSTBC) coding. The experimental results show that the bit error rate performance of 1×2 , 2×1 , 2×2 system is improved by 3, 6 and 9 dB respectively in LOS and NLOS. Increasing the number of photodetector can increase the diversity gain. The 2×2 system needs the least transmission power, the transmission distance is farther, the data transmission rate is bigger, the bit error rate is lower. In the NLOS condition, through the small angle transmission angle can improve the system bit error rate performance.

Keywords: blind UV; MIMO system; BCOSTBC; turbulent channel

0 引言

随着无线光通信技术的不断发展,无线紫外光通信固有的时延长、带宽窄和信道复用率低等缺点以及非直视通信的定向性,成为紫外光通信系统进一步发展的瓶颈^[1,2]。因此,无线紫外光散射通信也越来越受到人们关注。

然而,紫外光散射通信存在严重的衰减,而且信号发射功率又受到一定的限制,采用 MIMO 技术能在较低的发射功率情况下可大幅度地提高无线紫外光通信系统的性能^[3]。因此,无线紫外光 MIMO 通信技术需要深入研究^[4]。

芬兰奥卢大学 Roivainen 等人^[5]将双层 4×2 MIMO 空时分编码技术在瑞利信道进行了仿真,接收端的译码复杂度从 M^8 降低到 M^6 。在无线紫外光 MIMO 通信信道

收稿日期:2017-03 Received Date: 2017-03

* 基金项目:国家自然科学基金(U1433110)、陕西省教育厅产业化(2013JC09)培育项目、西安市碑林区科技计划(GX1617)资助项目

编码中引入空时分编码技术,可以提高散射通信的信号质量。维拉诺瓦大学的 Wang 等人^[6]在二次域扩展中使用两个发送天线设计了最优二次空时分组编码,该编码方式的平均误码率相比于其他空时编码在信噪比上增加了 0.5 dB。将多发天线和空时编码应用于无线紫外光 MIMO 通信中,将可以增加无线紫外光通信空时编码效率,提高通信距离并降低误码率。文献^[7]主要研究改善频谱和能源效率的大规模 MIMO 技术,在时分双工系统的上行链路中使用训练序列获得 CSI (channel state information),并将它用于下行链路信道估计,这种方法与理想的单天线系统相比可以在小尺度衰落情况下有效提高频谱效率,若将该方法运用到无线紫外光 MIMO 系统中必将明显提高光谱利用效率。文献^[8]分别针对紫外光通信系统中 Alamouti 码进行了研究,在 2×2 发射和接收系统中进行仿真和实验验证,Alamouti 码在准确估计信道可以有效地获得全分集增益。改进 Alamouti 仅适用于 OOK 和 2PPM 调制,对任意的 Q-PPM 调制(Q>2)已不在使用。将 MIMO 技术和空时分编码应用于无线紫外光通信中,能更好地降低误码率,提高通信距离、通信速率、信道容量、抗衰落性能等指标,所以本文采用一种无线紫外光 MIMO 通信系统中适合强度调制/直接检测式的 BCOSTBC 编码。

1 无线紫外光通信 MIMO 湍流信道中 BCOSTBC 编码

1.1 紫外光通信的传输特性

大气的散射和吸收实现信息传输的,分为直视通信(LOS)和非直视通信(NLOS)两种工作方式。

无线紫外光直视通信的单次散射模型如图 1 所示,则无线紫外光 LOS 链路的接收光功率的表达式^[10]如下:

$$P_{r,LOS} = \frac{P_t A_r}{4\pi r^2} e^{-K_r} \quad (1)$$

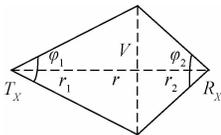


图 1 无线紫外光 LOS 通信单次散射模型^[9]
Fig.1 Wireless UV LOS single scattering communication model^[9]

无线紫外光 NLOS 通信的单次散射模型如图 2 所示,则无线紫外光 NLOS 链路的接收光功率的表达式^[10]如下:

$$P_{r,NLOS} = \frac{P_t A_r K_s K_a \phi_2 \phi_1^2 \sin(\theta_1 + \theta_2)}{32\pi^3 r \sin\theta_1 (1 - \cos\frac{\phi_1}{2})} e^{-K_r(\sin\theta_1 + \sin\theta_2)/\sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad (2)$$

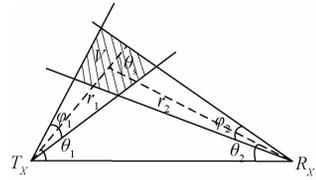


图 2 无线紫外光 NLOS 通信单次散射模型^[9]
Fig.2 Wireless UV NLOS single scattering communication model^[9]

式中:Tx表示发送端,Rx表示接收端,r为通信直,Pt为发送功率,λ为波长,Ks为大气的衰减系数,Ka为大气吸收系数,Ks为大气散射系数,Ar为接收孔径面积,Ps为散射角θs的相函数,φ1和θ1为发射端光源发散角和发射仰角,φ2和θ2接收端视场角和接收仰角;V为有效散射体区域。

1.2 MIMO 系统的 BCOSTBC 编码

在无线紫外光 MIMO 通信系统中,MIMO 技术就是利用多天线来抑制信道衰落。空时编码就是将空间域上的发射分集和时间域上的信道编码相结合的联合编码技术。空时编码对紫外光散射信号进行角度、空间和时间分集,达到抑制 MIMO 信道衰落和降低误码率,从而改善无线紫外光 MIMO 通信系统性能。根据接收端能够准确估计信道特性,所以对传统的 Alamouti 码进行改进,采用一种适合强度调制/直接检测式的 BCOSTBC 编码,通过求符号补码的方式来代替传统的 Alamouti 码存在负数和复数形式的信号,实现在每个符号上总功率不变的编码。如图 3 所示,无线紫外光的 MIMO 通信系统分为 3 部分,第一部分是发射器,在紫外发光二极管(LED)调制进行数据 BCOSTBC 编码。传播渠道是一种紫外光通信链路,通过 UV 光被散射。第三部分是接收器,两个光电倍增管(PMT)在 BCOSTBC 编码用于光检测。MIMO 将多径无线信道与发射、接收视为一个整体进行优化,从而实现高的通信容量和频谱利用率^[11]。

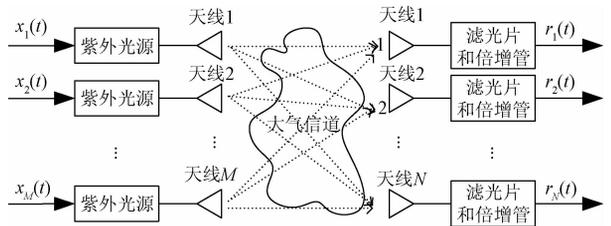


图 3 MIMO 紫外光通信系统的信道模型
Fig.3 Channel model of MIMO UV communication system

1) MIMO 信道

对于一个有 M 个紫外光源阵列和 N 个个滤光片和光电倍增管的 MIMO 光通信系统而言,其信道模型如图 3 所示,假设每个发射天线间的通道相互独立。第 i 个阵列发送的信号用 xi 来表示;第 j 个滤光片和光电倍增管

收到的光电流用 r_j 来表示。则它们之间满足^[12]：

$$r_j = \frac{\eta I_s}{M} \sum_{i=1}^M h_{ji} x_i + v_j, \quad i = 1, \dots, M; j = 1, \dots, N \quad (3)$$

式中： η 为光电转换效率， I_s 为无衰落时的最大接收光强， v_j 是均值为 0 方差为 $N_0/2$ 的高斯白噪声。 h_{ji} 表示从第 i 个发射天线到第 j 个接收天线的信道衰减系数。

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1M} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{N1} & h_{N2} & \dots & h_{NM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^2 & a_{12}^2 & \dots & a_{1M}^2 \\ a_{21}^2 & a_{22}^2 & \dots & a_{2M}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{N1}^2 & a_{N2}^2 & \dots & a_{NM}^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

定义无湍流存在时任意探测器每个符号的接收电能量为 $E_s = (\eta I_s)^2 T_p$ ；定义无湍流存在时每个符号的电信噪比： $SNR = E_s/N_0$ ；那么无湍流存在时每比特上的信噪比 γ 为^[13]：

$$\gamma = \frac{E_b}{N_0} = \frac{SNR}{R \log_2 Q} \quad (5)$$

式中： R 表示传输速率。

2) BCOSTBC 编码

无线紫外光的 MIMO 通信系统模型如图 4 所示。

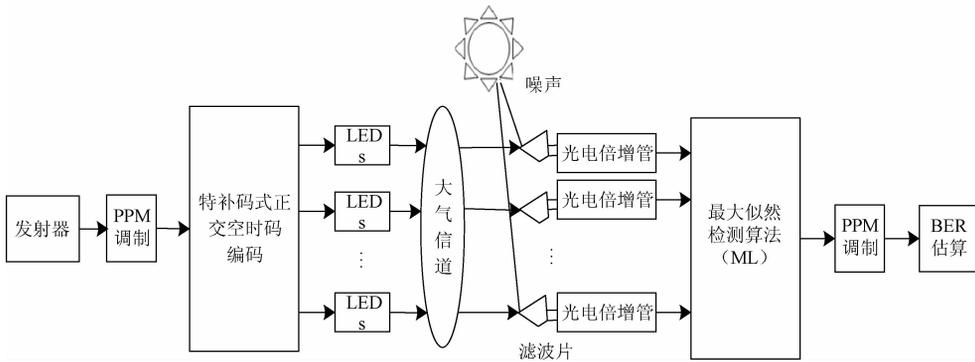


图 4 无线紫外光的 MIMO 通信系统的模型

Fig. 4 Model of MIMO communication system based on wireless ultraviolet

在发射端和接收端均采用多天线（或阵列天线），一个 $M \times N$ (M 表示发射天线数， N 表示接收天线数) 的 UV MIMO 散射通信系统中利用空时编码技术实现高度的空间复用和角度复用，获取高的信道编码增益和信道容量。BCOSTBC 编码方法步骤具体如下：

(1) 先求出码字矩阵 $\mathbf{S}_{N_r} = T_N \times T$ ，其中发射天线数是 T_N ， T 表示一组编码符号的时间周期数，空时分组码定 \mathbf{S}_{N_r} 矩阵中的第 m 行第 t 个元素用 S_{mt} 表示。

(2) 为了达到全发射分集 NT ，比特补码式正交空时码的码字矩阵要满足下面的条件^[14]：

$$\mathbf{S}_{N_r} \mathbf{S}_{N_r}^H = \rho_s (S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_k^2) I_{N_r} \quad (6)$$

则码字矩阵是正交的，其中 ρ_s 是常数，即 X_{N_r} 的行是相互正交的，每组中的任意两根天线的信号序列正交。

(3) 求补码。在第 $t + T$ 时刻 x_2 所对应的比特为 $k = \log_2^0$ 。首先进行比特补救，然后进行 Q-PPM 调制以得到调制符号 x_2 。这样可以保证在发送 x_2 调制符号时，使每个符号上的总功率保持不变。

1.3 影响紫外光通信的主要因素

非直视紫外光通信以大气为传输介质，携带信号的紫外光在空间传输时，其通信质量、通信系统的性能、传输范围必然会受到：大气吸收、大气散射和大气湍流的影响。

考虑到紫外信道是弱湍流信道，所以用对数正态分

布衰落来建模，让信号的强度起伏服从对数正态分布，其概率密度函数为^[15]：

$$f_I(I) = \frac{1}{(2\pi\sigma_I^2)^{1/2} I} \exp\left(-\frac{\ln I + \frac{\sigma_I^2}{2}}{2\sigma_I^2}\right) \quad (7)$$

式中： I 为光强起伏， σ_I^2 为斜程传输的闪烁指数^[16]， $\sigma_I^2 = e^{4\sigma_\chi^2} - 1$ ， $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ， L 是传播路径长度， σ_χ^2 平面波对

数振幅方差， $\sigma_\chi^2 = 0.56k^{7/6} \int_0^L C_n^2(x) (L-x)^{5/6} dx$ 。

大气湍流存在下的非直视紫外 MIMO 模型，我们不能直接得出结论。然而，可以从 LOS 湍流模型指出，NLOS 由两个 LOS 路径： $r_{1,mn}$ 和 $r_{2,mn}$ 两个阶段。针对 NLOS 散射模型对于每个路径，在一定的假设下，我们可以使用对数正态分布 (Log-normal) 分布模型湍流，然后结合两 LOS 结果获得 NLOS 湍流分布。假设 $T_{x,m}$ 光束是足够小的，可以便共同的体积可以近似解析，并且散射体积中的闪烁是恒定的，并假定单次散射占主导地位。归一化信号强度分布概率密度函数可采用对数正态分布模型^[17]：

$$f_0\left(\frac{I}{\langle I \rangle}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_I} I / \langle I \rangle} \exp\left[-\left(\ln \frac{I}{\langle I \rangle} + \frac{1}{2}\sigma_I^2\right)^2 / 2\sigma_I^2\right] \quad (8)$$

式中： $\langle I \rangle$ 表示强度起伏均值， $I/\langle I \rangle$ 归一化的信号强度。

通过分析,随着大气湍流的增加,辐照度 I_{mn} 到达 V_{MN} 的 Log-normal 概率密度函数为^[18]:

$$f(I_{mn}^v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{mn}^v I_{mn}^v} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_{mn}^2} \left(\ln\left(\frac{I_{mn}^v}{\mu_{mn}^v}\right) + \frac{1}{2}\sigma_{mn}^2\right)^2\right) \quad (9)$$

由第 n 个接收器的概率密度函数^[18]:

$$f(I_{mn} | I_{mn}^v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{mn} I_{mn}} \exp\left(-\frac{\left(\ln\left(\frac{I_{mn}}{\mu(I_{mn} | I_{mn}^v)}\right) + \frac{1}{2}\sigma_{mn}^2\right)^2}{2\sigma_{mn}^2}\right) \quad (10)$$

根据 I_{mn} 和 I_{mn}^v , 衰落信道模型的信道系数从 m 发射孔径至 n 接收孔径的联合分布概率密度函数 $f(I_{mn}) = \int f(I_{mn} | I_{mn}^v) f(I_{mn}^v) dI_{mn}^v$, 其对数正态分布形式由式(9)和(10)得^[19]:

$$f(I_{mn}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{mn} I_{mn}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_{mn}^2} (\ln(I_{mn}) - \mu_{mn})^2\right) \quad (11)$$

其中, $\mu(I_{mn} | I_{mn}^v) = \frac{A_r e^{-k_r I_{mn}^v}}{r_2^2}$, C_n^2 大气折射率结构常数, 方差为 $\sigma_{mn}^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} (r_{1,mn}^{11/6} + r_{2,mn}^{11/6})$ 。 I_{mn} 的平均值为 $\mu_{mn} = -0.5\sigma_{mn}^2 - a_{mn} \ln 10/10 + \ln(I_{0,mn})$, 其中 $a_{mn} = 2\sqrt{23.17 C_n^2 k^{7/6} (r_{1,mn}^{11/6} + r_{2,mn}^{11/6})}$ 。 $I_{0,mn}$ 对应于在单个发射器功率的单散射假设下在没有湍流的情况下接收的辐照度, 如下^[20]:

$$I_{0,mn} = \frac{k_s P(\theta_s, m) A_r \exp(-k_e (r_{1,mn}^{11/6} + r_{2,mn}^{11/6})) v_{mn}}{2\pi [1 - \cos(\theta_{r,m}/2)] r_{1,mn}^2 r_{2,mn}^2} \quad (12)$$

其中大气信道衰减系数和散射系数分别为 k_e 和 k_s 。 $P(\theta_s, m)$ 表示散射相函数, 接收孔径 A_r 。

2 BCOSTBC 编码的误码性能分析

对一个 $M \times N$ 的无线紫外光 MIMO 通信系统, 假设每个信道相互独立, 则 BCOSTBC 码的符号错误率 P_s 可表示为:

$$P_s = 1 - P \quad (13)$$

式中: P 表示第 j 个光电探测器接收到 Q -PPM 符号的平均正确率。当 Q -PPM 调制符号的长度固定时, 一个字符只有 $Q-1$ 个空时隙, 则第 j 个探测器接收到 Q -PPM 符号的平均正确率的概率 P 可表示为:

$$P = \int (1 - P(\text{off} | \text{on}, I)) \cdot (1 - P(\text{on} | \text{off}, I))^{Q-1} \cdot f_A(I) dI \quad (14)$$

式中: $f_A^j(I)$ 表示 $\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{nm}^j$ 的概率密度函数, 服从 $\chi^2(t)$

分布。 $P(\text{on} | \text{off}, I)$ 和 $P(\text{off} | \text{on}, I)$ 分别为光强起伏为 I^2 时, 未发送信息脉冲而误判为信息脉冲的概率和发送信息脉冲而未被检测的概率。由于 BCOSTBC 编码的方法属于光 MIMO 技术, 滤光片间的距离仅相隔几十厘米, 也可近似认为衰减系数相等, 则第 j 个滤光片和光电倍增管上的平均符号正确概率为^[11]:

$$P = \frac{1}{2^Q} \cdot \int f_A(I) \left[1 + \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{N}{8M}} \cdot \text{SNR} \cdot I^2\right) \right]^{Q-1} \cdot \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{N}{8M}} \cdot \text{SNR} \cdot I^2\right) dI \quad (15)$$

则 BCOSTBC 码符号错误概率为:

$$P_{s1} = 1 - \frac{1}{2^Q} \int f_A(I) \left[1 + \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{N}{8M}} \cdot \text{SNR} \cdot I^2\right) \right]^{Q-1} \cdot \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{N}{8M}} \cdot \text{SNR} \cdot I^2\right) dI \quad (16)$$

根据误码率和符号错误概率之间的关系为:

$$P_s = \frac{Q}{2(Q-1)} P_{s1} \quad (17)$$

在紫外光 MIMO 通信过程中, 由于紫外光强烈的散射作用, 发射信号就会经过多条路径到达接收端, 多径合成波形有可能落在后续码元时间间隔内, 引起严重码间干扰。当信号时延扩展小于符号周期时, 利用频率平坦性衰落信道模型进行分析; 当信号时延扩展大于符号周期时, 利用频率选择性衰落信道模型进行分析。直视和非直视两种情况下, 紫外光信号的衰减是由两种衰落叠加的结果, 只是所占的比重不同。在同等条件下, 直视通信过程中, 接收到光子数比较多, 时延扩展窄, 频率平坦性衰落信道占主导地位; 非直视通信过程中, 接收到光子数比较少, 时延扩展宽, 频率选择性衰落信道占主导地位。所以将紫外光直视通信信道近似认为频率平坦性衰落信道, 紫外光非直视通信信道近似认为频率选择性衰落信道。

1) 紫外光 LOS 方式下 BCOSTBC 的误码性能分析

在紫外光 MIMO 通信过程中, LOS 方式下 BCOSTBC 的误码率由式(17)得:

$$P_s = \frac{Q}{2(Q-1)} P_{s1} \quad (18)$$

2) 紫外光 NLOS 方式下 BCOSTBC 的误码性能分析

在紫外光 MIMO 通信过程中, NLOS 方式下 BCOSTBC 的误码率由式(11)、(16)和(17)得:

$$P_s = \frac{Q}{2(Q-1)} \left(1 - \frac{1}{2^Q} \int f(I_{mn}) f(I) f_A(I) dI \right) \quad (19)$$

式中: $f(I) = \left[1 + \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{N}{8M}} \cdot \text{SNR} \cdot I^2\right) \right]^{Q-1} \cdot \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{N}{8M}} \cdot \text{SNR} \cdot I^2\right)$ 。

3 仿真分析

本文根据无线紫外光 MIMO 通信系统理论,定量分析了 LOS 和 NLOS 链路的性能。通过采用 PPM 调制方式,仿真分析 BCOSTBC 编码条件下系统参数(发射功率、通信距离、发散角、视场角、收发仰角)等对误码性能的影响。仿真过程中的部分参数如表 1 所示。

表 1 部分仿真系数

Table 1 Partial simulation coefficient

参数名称	数值
波长 λ	250 nm
接收孔径 A_r	1.77 cm ²
探测器的探测效率 η_r	0.2
光电探测器的增益 G	1.0 × 10 ⁶
大气散射系数	0.759 km ⁻¹
大气信道衰减系数 K_a	2.8 km ⁻¹
散射相函数 P_s	1
普朗克常数 h	6.626 × 10 ⁻³⁴
Q	4
C_n^2	1.0 × 10 ⁻¹⁵ m ^{-2/3}
光速 c	3.0 × 10 ⁸ m/s

3.1 紫外光 LOS 方式下仿真分析

图 5 针对无线紫外光 LOS 通信,闪烁方差 0.01 (图 5(a))和闪烁方差 0.5 (图 5(b))时,4-PPM 调制的 BCOSTBC 编码的误码率。在编码后,系统的误码性能明显优于 1 × 1 系统的误码性能。图 5(a)中当 BER = 10⁻² 时,相对于 1 × 1 系统,采用编码后 1 × 2, 2 × 1 和 2 × 2 系统的误码率分别约改善了 3, 6 和 9 dB。表明增加光电探测器数目可以提高分集增益,有益于系统的性能改善。由此可见该编码方法适用任意的 M × N 的紫外光通信系统。图 5(b)中所呈现的规律与图 5(a)基本相同,区别在于采用编码之后,系统的误码性能的改善有所差异。

图 6 仿真分析了 LOS 链路 1 × 1, 1 × 2, 2 × 1, 2 × 2 系统下发射功率、数据传输速率,通信距离对误码率的影响。闪烁方差 0.01 时,通信距离 $r = 300$ m (图 6(a)),数据传输速率 $R = 10$ Gb/s,发射功率从 0 ~ 40 mW,发射功率 20 mW (图 6(b)),通信距离与图 6(a)相同,传输速率从 0 ~ 40 Gb/s,数据传输速率 $R = 10$ Gb/s (图 6(c)),发射功率 30 mW,通信距离从 0 ~ 500 m。从图 6(a)中可以看出不同天线数下,误码率随着发射功率的增大而减小,当发射功率为 20 mW 时,2 × 2 系统的误码率最小。当误码率 $P_s = 10^{-8}$ 时,1 × 2, 2 × 1, 2 × 2 系统分别比 1 × 1 方式下节省了 4.77、8.45、10.41 dBm 的发射功率。从图 6(b)中可以发现不同的天线数的误码率随着数据传输速率的增大而增大,当传输速率为 14 Mb/s 时,2 × 2 系统

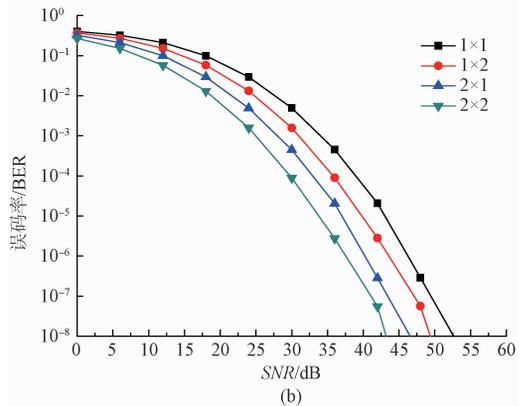
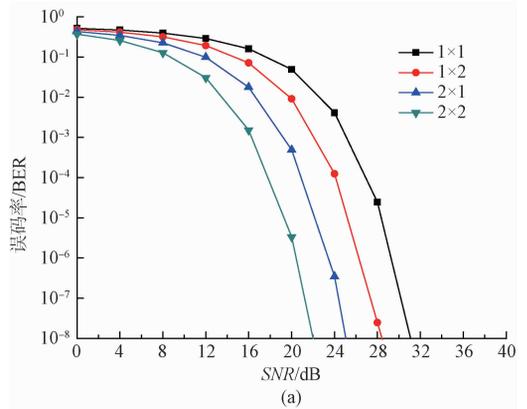
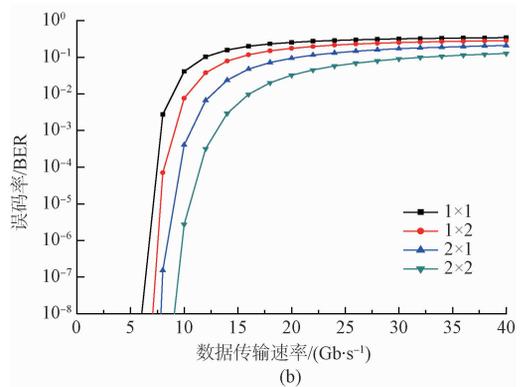
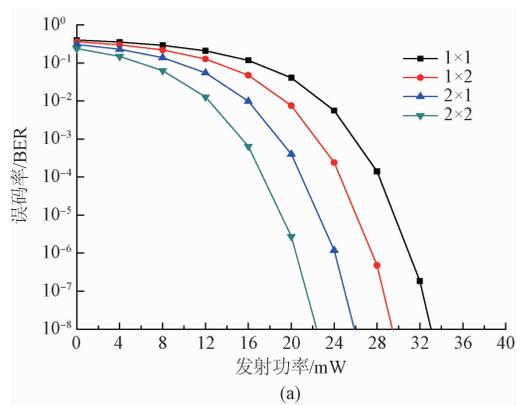


图 5 LOS 通信信噪比与误码率的关系

Fig. 5 The relationship between signal to noise ratio and bit error rate in Los communication



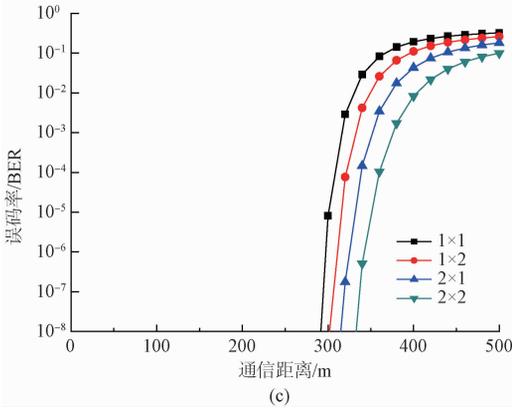


图6 LOS通信发射功率、传输速率和通信距离对误码率关系

Fig. 6 The relationship of transmission power, transfer rate and communication distance to bit error rate in LOS communication

的误码率最小。当误码率 $P_s = 10^{-8}$ 时, $1 \times 2, 2 \times 1, 2 \times 2$ 系统分别比 1×1 系统的传输速率约增大 1、2、3 Gb/s。图 6(c) 中可以看出不同天线数下, 误码率随着通信距离的增大而增大, 当通信距离为 400 m, 2×2 的误码率最小。当误码率 $P_s = 10^{-8}$ 时, $1 \times 2, 2 \times 1, 2 \times 2$ 系统分别比 1×1 系统的通信距离约增大 10、30、50 m。

3.2 紫外光 NLOS 方式下仿真分析

图 7 所示为针对无线紫外光 NLOS 通信, 闪烁方差 0.01 (图 7(a)) 和闪烁方差 0.5 (图 7(b)) 时, 4-PPM 调制的 BCOSTBC 编码的误码率。采用 BCOSTBC 编码后, 系统的误码性能明显优于 1×1 系统的误码性能。当 $BER = 10^{-6}$ 时, 相对于 1×1 系统, 采用编码后 $1 \times 2, 2 \times 1$ 和 2×2 系统的误码率分别约改善了 3、6 和 9 dB, 表明增加光电探测器数目可以提高分集增益, 有益于系统的性能改善。由此可见该编码方法适用任意的 $M \times N$ 的紫外光通信系统。图 7(b) 中所呈现的规律与图 7(a) 基本相同, 区别在于采用编码之后, 系统的误码性能的改善有所差异。

图 8 仿真分析了 NLOS 链路 $1 \times 1, 1 \times 2, 2 \times 1, 2 \times 2$ 系统下发射功率、数据传输速率, 通信距离对误码率的影响。闪烁方差 0.01 时, 通信距离 $r = 300$ m (图 8(a)), 数据传输速率 $R = 100$ KB/s, 发射功率从 0 ~ 100 mW, 发射功率 $P_t = 40$ mW (图 8(b)), 通信距离与图 8(a) 相同, 传输速率从 0 ~ 400 Kb/s, 数据传输速率 $R = 1$ Mb/s (图 8(c)), 发射功率 30 mW, 通信距离从 0 ~ 100 m。从图 8(a) 中可以看出不同天线数下, 误码率随着发射功率的增大而减小, 当发射功率为 40 mW 时, 2×2 系统的误码率最小。当误码率 $P_s = 10^{-8}$ 时, $1 \times 2, 2 \times 1, 2 \times 2$ 系统分别比 1×1 方式下节省了 12.43、14.39、15.74 dBm 的发射功率。从图 8(b) 中可以发现不同的天线数的误码率

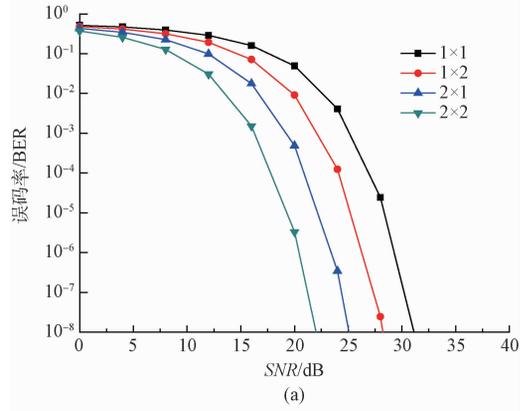


图7 NLOS情况信噪比与误码率关系

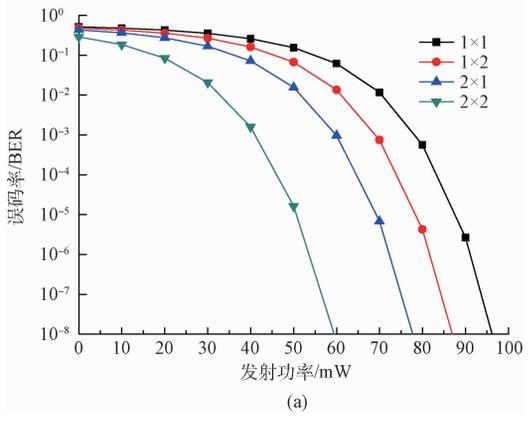
Fig. 7 The relationship between signal to noise ratio and bit error rate in NLOS communication

随着数据传输速率的增大而增大, 当传输速率为 1.5 Mb/s, 2×2 系统的误码率最小。当误码率 $P_s = 10^{-14}$ 时, $1 \times 2, 2 \times 1, 2 \times 2$ 系统分别比 1×1 系统的传输速率约增大 5、16、22 Kb/s。图 8(c) 中可以看出不同天线数下, 误码率随着通信距离的增大而增大, 当通信距离为 40 m 时 2×2 系统的误码最小。当误码率 $P_s = 10^{-8}$ 时, $1 \times 2, 2 \times 1, 2 \times 2$ 系统分别比 1×1 方式下通信距离约增大了 2.5、5、7.5 m。

3.2 紫外光 NLOS 方式下仿真分析

图 7 所示为针对无线紫外光 NLOS 通信, 闪烁方差 0.01 (图 7(a)) 和闪烁方差 0.5 (图 7(b)) 时, 4-PPM 调制的 BCOSTBC 编码的误码率。采用 BCOSTBC 编码后, 系统的误码性能明显优于 1×1 系统的误码性能。当 $BER = 10^{-6}$ 时, 相对于 1×1 系统, 采用编码后 $1 \times 2, 2 \times 1$ 和 2×2 系统的误码率分别约改善了 3、6 和 9 dB, 表明增加光电探测器数目可以提高分集增益, 有益于系统的性能改善。由此可见该编码方法适用任意的 $M \times N$ 的紫外光通信系统。图 7(b) 中所呈现的规律与图 7(a) 基本相同, 区别在于采用编码之后, 系统的误码性能的改善有所差异。

图 8 仿真分析了 NLOS 链路 $1 \times 1, 1 \times 2, 2 \times 1, 2 \times 2$ 系统下发射功率、数据传输速率, 通信距离对误码率的影响。闪烁方差 0.01 时, 通信距离 $r = 300$ m (图 8(a)), 数据传输速率 $R = 100$ KB/s, 发射功率从 0 ~ 100 mW, 发射功率 $P_t = 40$ mW (图 8(b)), 通信距离与图 8(a) 相同, 传输速率从 0 ~ 400 Kb/s, 数据传输速率 $R = 1$ Mb/s (图 8(c)), 发射功率 30 mW, 通信距离从 0 ~ 100 m。从图 8(a) 中可以看出不同天线数下, 误码率随着发射功率的增大而减小, 当发射功率为 40 mW 时, 2×2 系统的误码率最小。当误码率 $P_s = 10^{-8}$ 时, $1 \times 2, 2 \times 1, 2 \times 2$ 系统分别比 1×1 方式下节省了 12.43、14.39、15.74 dBm 的发射功率。从图 8(b) 中可以发现不同的天线数的误码率



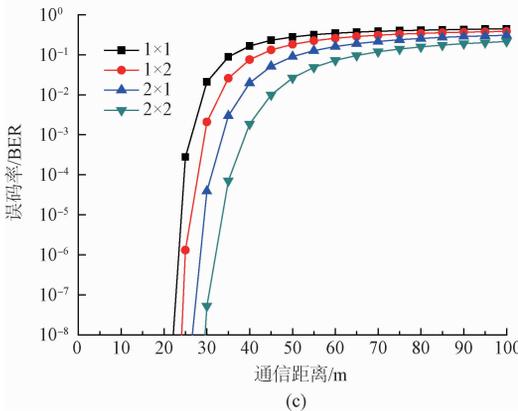
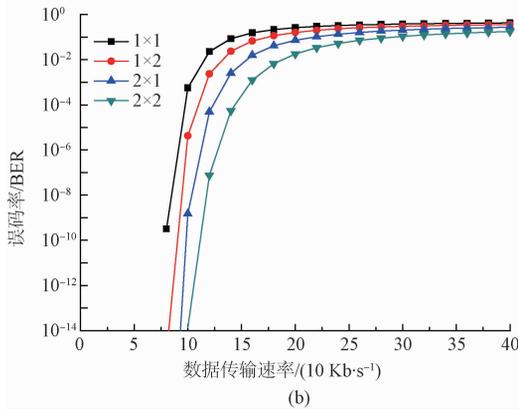


图 8 NLOS 情况发射功率、传输速率和通信距离对误码影响

Fig. 8 The influence of transmission power, transfer rate and communication distance on bit error rate in NLOS communication

图 9 仿真分析了 NLOS 链路 $1 \times 1, 1 \times 2, 2 \times 1, 2 \times 2$ 系统下发射仰角、接收仰角对误码率的影响。闪烁方差 0.01 时,其中通信距离 $r = 300 \text{ m}$,数据传输速率 $R =$

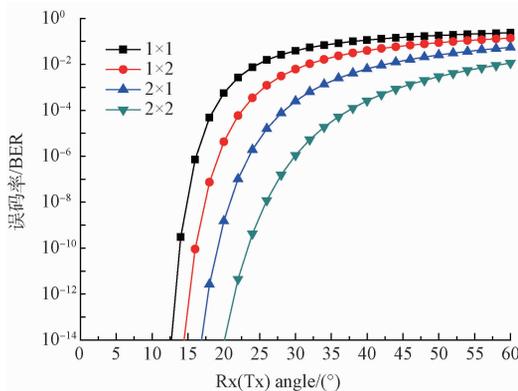


图 9 NLOS 情况发射和接收仰角对误码率影响

Fig. 9 The influence of transmission and reception elevation on bit error rate in NLOS communication

10 Kb/s, 发散角和视场角分别固定在 $\phi_1 = 10^\circ, \phi_2 = 30^\circ$, θ 范围从 $0^\circ \sim 60^\circ$ 。仿真结果表明不同天线数下,相同仰角时误码率随着发射(接收)仰角的增大而增大,当发射(接收)仰角为 30° 时, 2×2 系统的误码率最小。当发射(接收)仰角 $< 40^\circ$ 时,误码率随着发射(接收)仰角的增大,其增长趋势比较快,当 $> 40^\circ$ 时,误码率随着发射(接收)仰角的增大,其增长趋势变小。

4 总 论

根据接收端能够准确估计信道特性,本文研究改进后 Alamouti 的 BCOSTBC 编码技术在无线紫外光 MIMO 通信系统的应用研究,推导出了 LOS 和 NLOS 情况下的误码率,并通过仿真分析了在 LOS 和 NLOS 情况下获得分集的效率增益和不同紫外系统性能的不同情况误码率的影响。仿真结果表明,在 LOS 和 NLOS 情况:相同条件下, 2×2 系统需要的发射功率最小,传输的距离更远,数据传输速率最大,误码率更低。通过小角度收发仰角能够极大提高误码率。在通过 BCOSTBC 编码后,误码率明显的降低,并且获得分集的效率增益。因此无线紫外光通信采用 LEDs 阵列光源和多探测器接收,多发多收系统更好地降低误码率和提高分集增益。此研究仅供参考。

参考文献

[1] 李霁野, 邱柯妮. 紫外光通信在军事通信系统中的应用[J]. 光学与光电技术, 2005, 3(4):19-21.
LI J Y, QIU K N. Application of ultraviolet communication in military communication system [J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2005, 3 (4) : 19-21.

[2] 赵太飞, 康博伦. 日盲紫外光霾粒子光散射测量方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(9):1432-1437.
ZHAO T F, KANG B L. Research on light scattering measurement method of haze particles at blind UV [J]. Journal of electronic measurement and instrumentation, 2016, 30(9):1432-1437.

[3] 柯熙政, 谌娟, 邓莉君. 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) : 1882-1889.
KE X ZH, CHEN J, ZHENG L J. Research progress of space-time code in wireless optical communications [J]. Infrared & Laser Engineering, 2013, 42 (10) : 1882-1889.

[4] 胡峰, 周德扬. MIMO 正交空时分组码技术 [J]. 中国传媒大学学报:自然科学版, 2011, 18(4):24-30.
HU F, ZHOU D Y. Orthogonal space-time block coding (OSTBC) for MIMO systems [J]. Journal of

- Communication University of China, 2011, 18(4): 24-30.
- [5] ROIVAINEN A, KYROLAINEN J, JUNTTI M. New double layer space-time block code for distributed 4×2 MIMO systems [C]. Wireless Communications and Networking Conference, IEEE, 2012:232-235.
- [6] WANG G, ZHANG J K, AMIN M. Space-time block code designs based on quadratic field extension for two-transmitter antennas [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(6):4005-4013.
- [7] ALBDRAN S, MATIN M. Channel capacity of next generation large scale MIMO systems [C]. SPIE Optical Engineering Applications, 2016:99701F.
- [8] HAN D. Simulation and experimental research on the Alamouti code for ultraviolet communication [J]. Optical Engineering, 2016, 55(1):015101.
- [9] 赵太飞, 刘园, 王玉, 等. 直升机助降湍流信道中紫外光通信性能分析 [J]. 西安理工大学报, 2016, 32(2): 163-168.
- ZHAO T F, LIU Y, WANG Y, et al. Analysis of ultraviolet communication performance in helicopter assisted landing [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2016, 32(2):163-168.
- [10] XU Z. Approximate performance analysis of wireless ultraviolet links [C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE, 2007, 4(15):15-20.
- [11] 王惠琴, 柯熙政, 赵黎, 等. 大气激光通信中的正交空时块码 [J]. 光学学报, 2009, 29(S2): 63-68.
- WANG H Q, KE X ZH, ZHAO L, et al. Orthogonal space-time block code in atmosphere laser communication [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(S2): 63-68.
- [12] NAVIDPOUR S M, UYSAL M, KAVEHRAD M. BER performance of free-space optical transmission with spatial diversity [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(8):2813-2819.
- [13] 程婷. FSO MIMO 系统中的差分空时码仿真研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2013.
- CHENG T. Simulation of differential space-time codes in FSO MIMO system [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2013.
- [14] SHAW G A, SIEGEL A M. Recent progress in short-range ultraviolet communication [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2005:214-225.
- [15] GUPTA A, BRANDT-PEARCE M. Receiver design for shot noise limited MIMO FSO/UV communication systems [C]. GLOBECOM Workshops, IEEE, 2012: 1183-1187.
- [16] DING H, CHEN G, MAJUMDAR A K, et al. Turbulence modeling for non-line-of-sight ultraviolet scattering channels [J]. SPIE, 2011, 8038(1):73-81.
- [17] WANG P, XU ZH Y. Characteristics of ultraviolet scattering and turbulent channels [J]. Optics Letters, 2013, 38(15):2773-2775.
- [18] DING H, CHEN G, XU Z. Channel modelling and performance of non-line-of-sight ultraviolet scattering communications [J]. Communications of IET, 2012, 6(5): 514-524.
- [19] HAN D, LIU Y, ZHANG K, et al. Theoretical and experimental research on diversity reception technology in NLOS UV communication system [J]. Optics Express, 2012, 20(14):15833-42.
- [20] NOSHAD M, BRANDT-PEARCE M, WILSON S G. NLOS UV communications using many spectral-amplitude-coding [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(4):1544-1553.

作者简介



赵太飞, 1978 年出生, 博士后, 教授。2007 年于成都电子科技大学获博士学位, 2008~2010 年完成西安理工大学电子科学与技术博士后流动站工作, 现在西安理工大学自动化学院电子系工作。主要从事紫外光通信技术、路由技术、网络抗毁性技术、物联网技术等方面的研究。

E-mail: zhaotaifei@163.com

Zhao Taifei was born in 1978, and received Ph. D. from University of Electronic Science and Technology of China in 2007. And he is a professor in Xi'an University of Technology now. His present research interests include ultraviolet communication, and internet of things and so on.



包鹤, 1990 年出生, 2014 年于安康学院获得学士学位, 现为西安理工大学硕士研究生, 研究方向为紫外光通信技术。

E-mail: baohe2017@xaut.edu.cn

Bao He was born in 1990, and received B. Sc. from Ankang University in 2014. And now she is a M. Sc. candidate in Xi'an University of Technology. Her present research interest is ultraviolet communication.



马欣媛, 1992 年出生, 2015 年于西安交通大学城市学院获得学士学位, 现为西安理工大学硕士研究生, 研究方向为物联网通信技术。

E-mail: mxy2017@xaut.edu.cn

Ma Xinyuan was born in 1992, and received B. Sc. from City College of Xi'an Jiaotong University in 2015. And she is a M. Sc. candidate in Xi'an University of Technology now. Her present research interest is ultraviolet communication.