

无线光通信中的空时编码研究进展(二)

柯熙政,袁 蕾,李 芳

(西安理工大学 自动化与信息工程学院,陕西 西安 710048)

摘 要: 无线光 MIMO 技术结合了天线发射分集、接收分集与信道编码分集,可以显著提高信道容量。介绍了笔者在分层空时编码方面的若干研究进展,分析了误码率特性与发射/接收天线数目、检测算法之间的关系,比较了水平分层空时码、螺旋分层空时码、对角分层空时码和垂直分层空时码不同的编码方案,以及不同检测算法对不同的湍流强度的抑制作用。经分析得出:三种分层空时编码性能最好的是对角分层空时编码,其次是螺旋分层空时编码,最后是水平分层空时编码。

关键词: 无线光通信; 空时编码; 进展

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-2137-09

Research progress of space-time code in wireless optical communications (II)

Ke Xizheng, Yuan Lei, Li Fang

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

Abstract: The wireless optical MIMO technology which combined antenna transmit diversity, receive diversity and channel coding diversity, significantly improved the channel capacity. The author's research progress at layered space-time code was introduced, the relationship between error rate characteristics and transmitting/receiving antenna number, detection algorithm was analyzed, this paper compared the different coding scheme that including horizontally-layered space-time codes (H-BLSTC), threaded-layered space-time codes (T-BLSTC), diagonally-layered space-time codes (D-BLSTC) and vertical-layered space-time codes (V-BLSTC). Then, it's also analyse turbulence intensity inhibits effects due to different coding scheme and detection algorithm. Through the analysis of three kinds of layered space-time coding to get diagonally-layered space-time codes is own the best performance, followed by threaded-layered space-time codes, and at last is the horizontally-layered space-time codes.

Key words: wireless optical communication; space-time coding; progress

收稿日期:2012-12-18; 修订日期:2013-01-17

基金项目:国家自然科学基金(60977054);陕西省“13115”科技统筹计划(2011KTCQ01-31);

陕西省教育厅产业化培育基金(2010JC17);西安市科技成果转化基金(CX12165);

陕西省自然科学基金基础研究计划(2013JQ8011);陕西省教育厅科研计划(2013JK1104)

作者简介:柯熙政(1962-),男,教授,主要从事无线激光通信方面的研究。Email:xzke@263.net

0 引言

分层空时码(Layered Space-time Code)是由贝尔实验室提出的一种基于多人多出(MIMO)传输方式的空时码方案^[1-2],主要基于空分复用思想以提高系统频谱效率。因为是贝尔实验室 Foschini 最先提出的^[3],所以人们在英文缩写时都要加一个“B”,记为“BLAST”。贝尔实验室分层空时码(BLAST)是空时码的一种^[3],可同时在空间维度和时间维度上编码。它将输入的信息比特流分解成若干个比特流,独立地进行编码、调制、映射到多个发射天线上。在接收端采用特殊的处理技术,将这些一起到达接收天线的信号实施分离,然后送到相应的解码器^[4]。该技术将一维编码方法同空间维度的传输相结合,使得解码端的计算复杂度仅随天线数目的增加线性增长,而不像二维空时码一样呈指数增长。分层空时码要求接收天线数目不少于发射天线数目,这意味着在接收端需要安装多个天线,而射频通信要在移动终端上安装多个天线是相对困难的,这无疑会限制该技术在射频通信中的应用。在无线激光通信中,多个接收天线不再是一个难点。文中结合 PPM 调制方式,讨论了一种适合于大气激光通信的分层空时编码方案,并对其误码性能进行了分析。

1 分层空时编码模型

分层空时码有水平分层空时码(H-BLAST)、对角分层空时码(D-BLAST)、垂直分层空时码(V-BLAST)和螺旋分层空时码(T-BLAST)。

结合 OOK 和 PPM 两种强度调制方式构造了无线光信道中的分层空时编码方案^[5-8],发送模型如图 1 所示。其基本思想是把高速的数据业务分接为若干低速数据业务,分别送入 M 个相同的信道编码

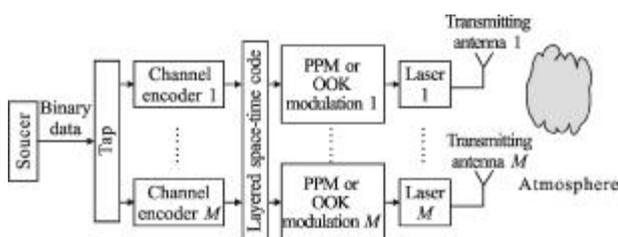


图 1 大气激光通信中分层空时编码的发送模型

Fig.1 Layered space-time coding sending model in atmospheric laser communication

器进行编码,信道编码是分组编码或卷积编码。经信道编码后对其进行分层次的空时编码,再经调制后由 M 个天线发射出去。接收模型如图 2 所示。在接收端采用 N 个天线进行分集接收,然后由线性判决反馈均衡器抵消分层的回馈干扰,再经分层空时译码后送入信道译码器。因为在译码过程中要用到信道传输特性,所以需要进行信道估计。

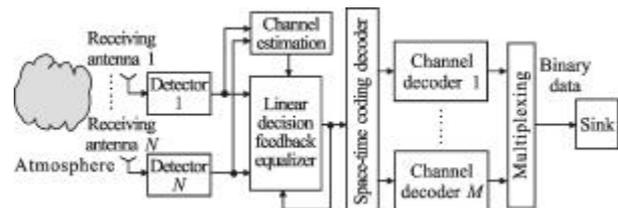


图 2 大气激光通信中分层空时编码的接收模型

Fig.2 Layered space-time coding receiving model in atmospheric laser communication

从图 2 中可以看出,每个接收孔径上的接收信号是不同发送孔径信号的叠加。实际在分层空时结构中,多发射天线用来实现高数据速率,多接收天线用来进行空间多路信号的干扰抵消。

2 分层空时码性能分析

以水平分层空时码、螺旋分层空时码和对角分层空时码为例对分层空时码的性能进行仿真分析。仿真的条件如下:(1) 假设总功率 ES 不变,取值为 1 (归一化);(2) 假设信道特性和噪声能够被接收端准确估计;(3) 光电转换效率为 0.6;(4) 弱湍流时大气信道服从对数正态分布,闪烁因子 SI 为 0.6,中强湍流和强湍流时大气信道服从 γ - γ 分布,闪烁因子 SI 分别为 1 和 3;(5) 系统采用脉冲位置调制,以 4-PPM 调制为例;(6) 取天线数分别为 2×2 、 2×4 、 4×4 和 4×6 的系统为例。采用迫零检测、最小均方误差检测算法、最大似然检测算法、串行干扰消除算法(SIC)和排序串行干扰消除(OSIC)算法对分层空时码的性能进行分析。

2.1 水平分层空时编码

图 3 和图 4 为 $SI=0.6$ 、大气信道服从对数正态分布的弱湍流情况下,迫零检测、最小均方误差检测算法、最大似然检测算法下的误码率曲线。可以看出:(1) 性能最好的检测算法是最大似然检测算法,

其次是最小均方误差检测算法, 最后是迫零检测算法, 仿真结果与理论分析是结果一致;(2) 分集增益与探测器数目有关, 例如图 4 所示。

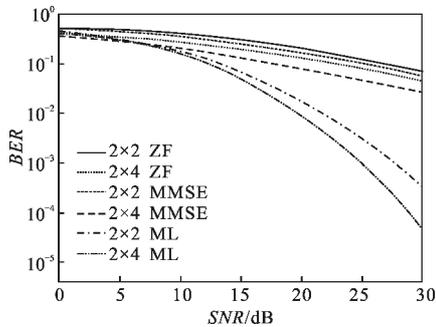


图 3 2x2, 2x4 的仿真图(SI=0.6)
Fig.3 Simulation diagram of 2x2, 2x4 (SI=0.6)

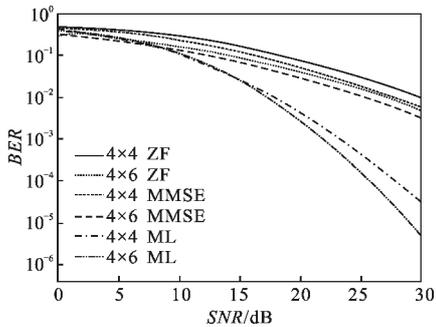


图 4 4x4, 4x6 的仿真图(SI=0.6)
Fig.4 Simulation diagram of 4x4, 4x6 (SI=0.6)

图 5 和图 6 为 SI=1、大气信道服从 $\Gamma-\Gamma$ 分布的强湍流情况下, 迫零检测、最小均方误差检测算法、最大似然检测算法的误码率曲线图。可以看出: 大气湍流在一定程度上影响了系统的性能, 但是在增加天线数目的情况下还是能够获得与弱湍流下相近的误码率特性。

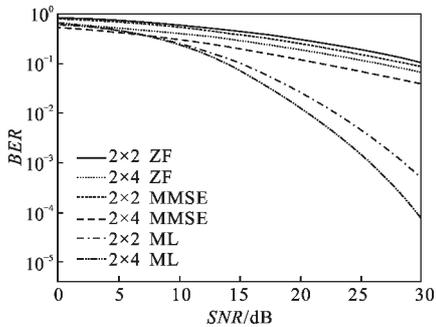


图 5 2x2, 2x4 的仿真图(SI=1)
Fig.5 Simulation diagram of 2x2, 2x4 (SI=1)

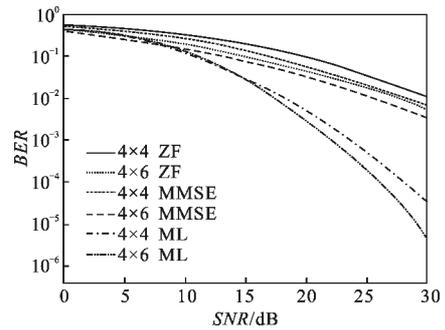


图 6 4x4, 4x6 的仿真图(SI=1)
Fig.6 Simulation diagram of 4x4, 4x6 (SI=1)

图 7 和图 8 为系统在强湍流情况下的误码率特性, SI=3。可以看出: 系统的误码率在两发多收和四发多收的情况下均受到了强湍流的影响, 误码率增大。但两发多收的系统误码率的增幅较大, 在 30 dB 时由接近 10^{-6} 上升到 10^{-4} ; 四发多收的系统误码率上升至 10^{-5} 。

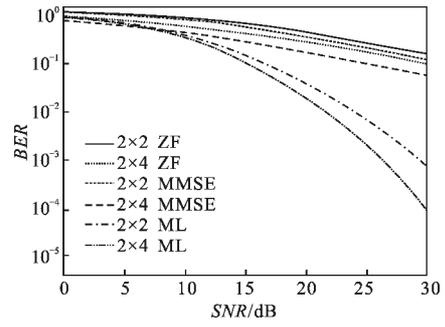


图 7 2x2, 2x4 的仿真图(SI=3)
Fig.7 Simulation diagram of 2x2, 2x4 (SI=3)

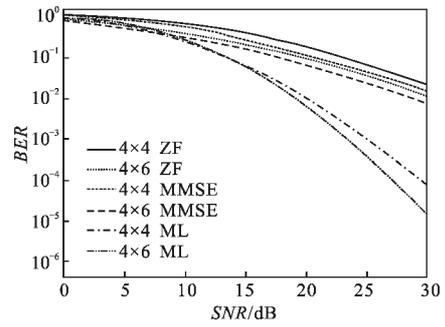


图 8 4x4, 4x6 的仿真图(SI=3)
Fig.8 Simulation diagram of 4x4, 4x6 (SI=3)

水平分层空时编码由于自身编码的特性不佳, 不能有效抑制大气湍流对系统的影响。图 9 为水平分层空时编码系统中 ZF、SIC-ZF 和 OSIC-ZF 三种检测算法的比较。可以看出: SIC-ZF 和 OSIC-ZF 均比 ZF 的算法性能要好, 在一定程度上提高了对水平

分层空时编码的系统性能。图 10 为水平分层空时编码系统中 MMSE、SIC-MMSE 和 OSIC-MMSE 三种检测算法的结果比较。可以看出:排序串行干扰消除(Ordered Successive Interference Cancellation, OSIC)算法提高了 MMSE 检测算法的性能,并且提高的幅度要高于串行检测算法。

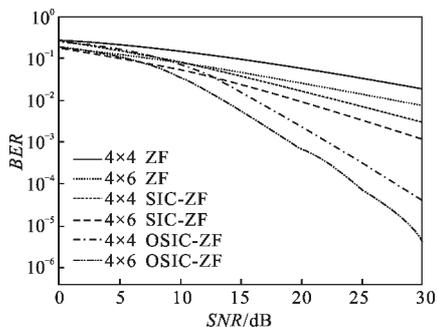


图 9 ZF、ZF-SIC 和 ZF-OSIC 的仿真

Fig.9 Simulation diagram of ZF, ZF-SI and ZF-OSIC

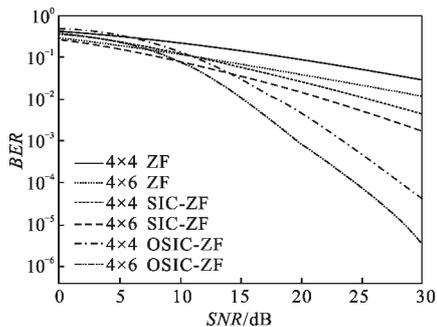


图 10 MMSE、MMSE-SIC 和 MMSE-OSIC 的仿真

Fig.10 Simulation diagram of MMSE, MMSE-SIC and MMSE-OSIC

2.2 对角分层空时码

分别考虑不同收发天线、不同噪声水平在不同的大气闪烁因子参数下,分析对角分层空时编码对系统的误码率的影响^[9]。

比较图 11 和图 13,在两发多收的情况下,SI 分别

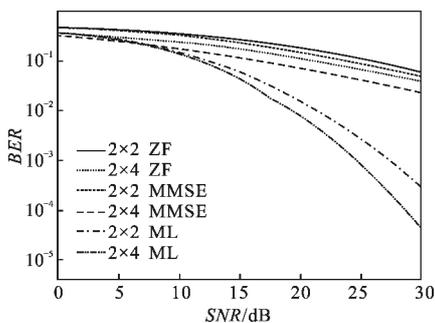


图 11 2x2, 2x4 的仿真图(SI=0.6)

Fig.11 Simulation diagram of 2x2, 2x4 (SI=0.6)

为 0.6 和 1 时,随着闪烁因子的增大,在中湍流的情况下系统的误码率略有增大,说明系统在此情况下不能很好地抑制大气的湍流影响。

对比图 12 和图 14,在四发多收的情况下,湍流的强度增强并没有影响系统的误码率,在中强湍流下增加天线数目增强了系统抑制大气湍流的能力。可见采用 D-BLAST 系统对大气湍流引起的闪烁效应是具有一定的抑制能力的。

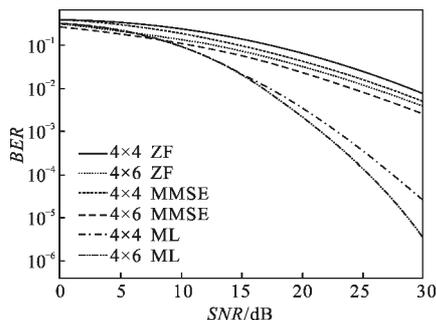


图 12 4x4, 4x6 的仿真图(SI=0.6)

Fig.12 Simulation diagram of 4x4, 4x6 (SI=0.6)

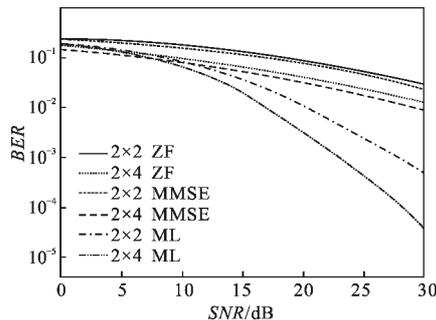


图 13 2x2, 2x4 的仿真图(SI=1)

Fig.13 Simulation diagram of 2x2, 2x4 (SI=1)

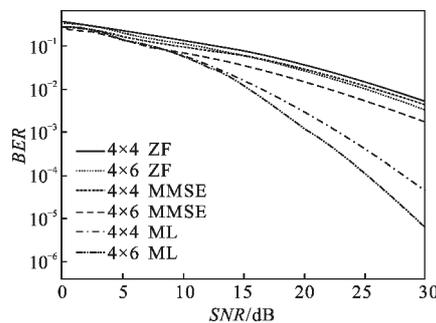


图 14 4x4, 4x6 的仿真图(SI=1)

Fig.14 Simulation diagram of 4x4, 4x6 (SI=1)

在 D-BLAST 编码系统中,选用不同的检测算法对系统的性能也有很大的影响。如图 14 所示,在 SI=1、信噪比约为 30 dB 时,天线数分别为 4x4 和 4x6 的系统,ZF 的误码率分别为 3×10^{-2} 和 1×10^{-2} ,

使用 MMSE 的误码率分别为 8×10^{-2} 和 5×10^{-3} , 使用 ML 的误码率分别为 1×10^{-4} 和 4×10^{-6} 。在 D-BLAST 编码系统中, ML 的性能要远远优于 MMSE 和 ZF 的性能。

图 15 和图 16 为系统在强湍流情况下误码率与信噪比的曲线图, 此时 $SI=3$ 。可以看出: 强湍流的情况下, 两发多收系统的误码率有所增加, 在 30 dB 时由接近 10^{-6} 上升到 10^{-5} ; 但在四发多收的情况下系统误码率变化幅度不大, 增加天线数后的系统能够在一定程度上抑制大气湍流所带来的影响。

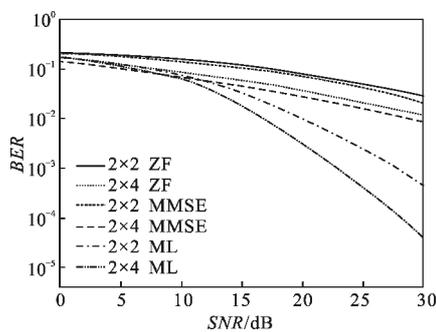


图 15 2x2, 2x4 的仿真图(SI=3)

Fig.15 Simulation diagram of 2x2, 2x4 (SI=3)

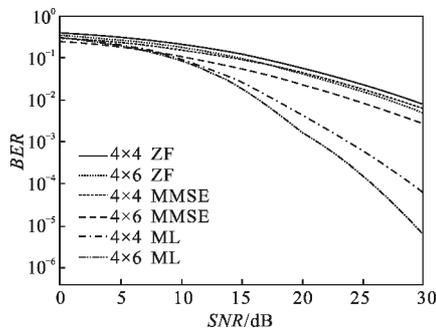


图 16 4x4, 4x6 的仿真图(SI=3)

Fig.16 Simulation diagram of 4x4, 4x6 (SI=3)

如图 17 和图 18 所示, ZF-SIC、ZF-OSIC、MMSE-

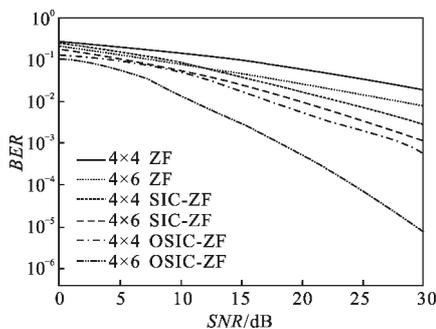


图 17 ZF、ZF-SIC 和 ZF-OSIC 的仿真图

Fig.17 Simulation diagram of ZF, ZF-SIC and ZF-OSIC

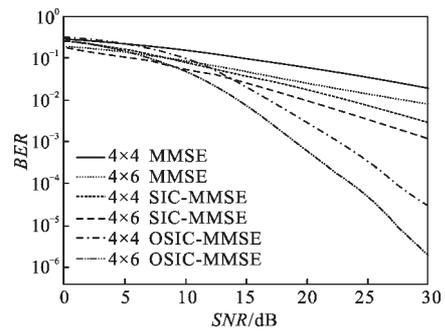


图 18 MMSE、MMSE-SIC 和 MMSE-OSIC 的仿真图

Fig.18 Simulation diagram of MMSE, MMSE-SIC and MMSE-OSIC

SIC 和 MMSE-OSIC 这四种检测算法的性能要明显优于 ZF 和 MMSE, 系统的误码性能均能得到明显改善, OSIC 比 SIC 在改善性能的方面表现更加突出。例如, 当误比特率 BER 为 10^{-2} 时, 采用 MMSE-OSIC 算法的系统要比使用 MMSE 算法的系统的信噪比提高约 15 dB; 使用 MMSE-SIC 算法的系统的信噪比提高约 10 dB。

2.3 螺旋分层空时编码

如图 19 中, 在信噪比为 30 dB、检测算法为 ML 时, 误码率分别为 1×10^{-3} 和 1×10^{-4} ; 当信噪比较小时, ZF 和 MMSE 系统的性能差距较大, MMSE 检测算法在信噪比较低时性能要更好一些。

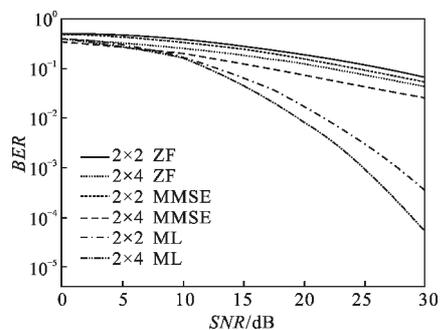


图 19 2x2, 2x4 的仿真图(SI=0.6)

Fig.19 Simulation diagram of 2x2, 2x4 (SI=0.6)

由图 20 可以看出, 在 T-BLAST 编码的系统中使用最大似然检测算法, 当信噪比为 30 dB 时系统的误码率从 1×10^{-4} 降至接近 1×10^{-6} 。最大似然检测算法的性能要优于 MMSE 和 ZF 检测算法的性能。

比较图 20 和图 21, SI 分别为 0.6 和 1, T-BLAST 系统为了降低误码率就需要增加收发天线的个数。T-BLAST 编码与 D-BLAST 编码的 FSO MIMO 系统一样, 也能很好地克服中强湍流对系统的影响。

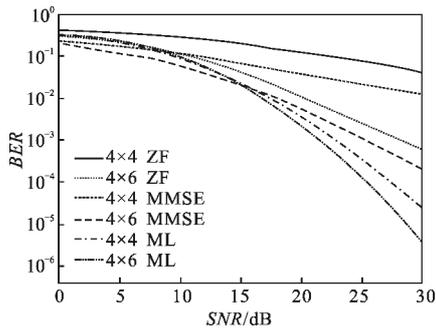


图 20 4x4, 4x6 的仿真图(SI=0.6)

Fig.20 Simulation diagram of 4x4, 4x6 (SI=0.6)

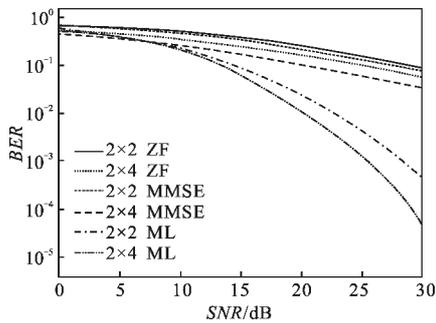


图 21 2x2, 2x4 的仿真图(SI=1)

Fig.21 Simulation diagram of 2x2, 2x4 (SI=1)

图 22 和图 23 为系统在强湍流情况下的误码率与信噪比仿真曲线, SI=3。可以看出:在强湍流情况

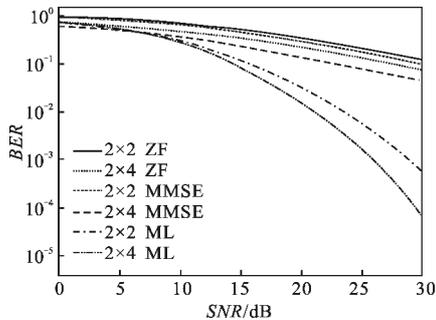


图 22 2x2, 2x4 的仿真图(SI=3)

Fig.22 Ssimulation diagram of 2x2, 2x4 (SI=3)

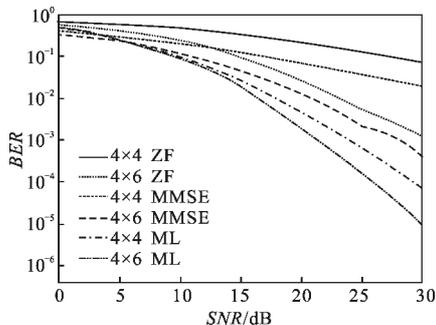


图 23 4x4, 4x6 的仿真图(SI=3)

Fig.23 Simulation diagram of 4x4, 4x6 (SI=3)

下,系统会受到大气强湍流的影响。两发多收的系统下误码率会有一定的增大,在 30 dB 时误码率由接近 10^{-6} 增大到 10^{-4} ;增加收发天线的个数会在一定程度上抑制湍流对系统性能的影响。

图 24 和图 25 为采用 T-BLAST 编码的串行干扰消除算法(SIC)和排序串行干扰消除(OSIC)的仿真结果。可以看出:采用螺旋分层空时编码的系统误码率同样接近 10^{-6} 。同时也说明采用改进的 ZF-SIC 和 ZF-OSIC 以及 MMSE-SIC 和 MMSE-OSIC 检测算法的性能要明显优于 ZF 和 MMSE 检测算法,其误码率接近采用最大似然检测算法的误码率。系统采用 T-BLAST 编码与 D-BLAST 一样能够获得较低的误码率,虽然没有 D-BLAST 的误码率低,但是其编码复杂度要比 D-BLAST 低很多。

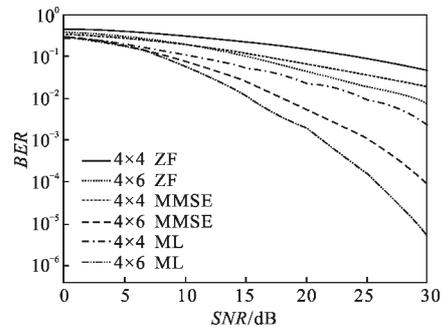


图 24 ZF、ZF-SIC 和 ZF-OSIC 的仿真图

Fig.24 Simulation diagram of ZF, ZF-SIC and ZF-OSIC

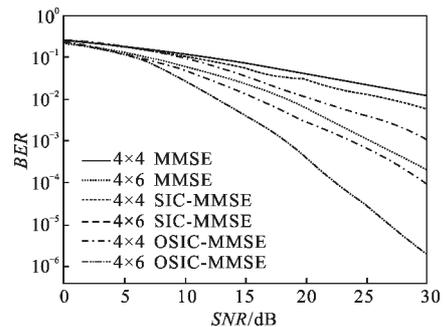


图 25 MMSE、MMSE-SIC 和 MMSE-OSIC 的仿真图

Fig.25 Simulation diagram of MMSE, MMSE-SIC and MMSE-OSIC

2.4 垂直分层空时码(V-BLAST)性能分析

为了具体分析采用 V-BLAST 分层码后不同译码算法在大气激光通信中的误码性能,同样采用 Monte Carlo 方法进行系统仿真,分别分析收发天线数、噪声及大气闪烁对误码率的影响,并和未编码(即 1x1)的大气激光通信系统的性能进行了对比^[10-15]。

仿真条件为:(1) 设总发送功率 E_s 不变,取 $E_s=1$

(归一化值);(2) 设信道特性和噪声能够被准确估计;(3) 光电转换效率 $\eta=0.5$;(4) 光强闪烁服从对数正态分布, 闪烁因子 $SI=0.6、1.0$;(5) 设信号完全同步;(6) 系统采用 Q-PPM 调制, $Q=4$;(7) 取天线数分别为 $1\times 1、1\times 2、1\times 4、2\times 2、2\times 3、4\times 4$ 和 4×5 的系统为例。

2.4.1 最大似然译码算法的性能分析

图 26 为 $SI=0.6$ 时的最大似然译码算法的误码率与信噪比曲线。可以看出:(1) 相对于 1×1 而言, 其他系统的误码性能均得到明显改善, 说明采用分层空时编码能有效克服大气湍流所引起的闪烁效应。(2) 分集增益的获得与探测器数目有关, 而且探测器数目越多所获得的分集增益就越大, 误码性能的改善效果就越明显。当误码率为 10^{-3} 时, 相对于 1×1 系统, 1×2 和 1×4 系统的信噪比分别改善了约 6 dB 和 14 dB; 当误码率为 10^{-3} 时, 2×3 和 2×2 系统相比较, 信噪比改善了约 4.5 dB。(3) 当探测器数目相同时, 激光器数目多的系统要比激光器数目少的系统性能差。这是因为垂直分层空时编码不是基于发送分集的, 它没有获得发送分集增益, 而且更为重要的是空间干扰增加了。

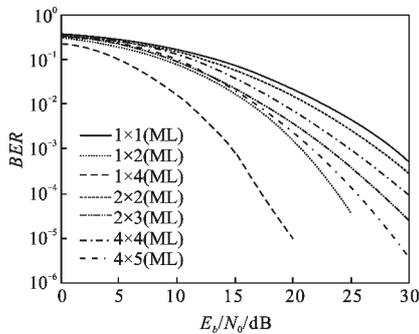


图 26 $SI=0.6$ 时最大似然译码算法的误码率与信噪比曲线
Fig.26 Maximum bit error rate of likelihood decoding algorithm and signal-to-noise ratio curve at $SI=0.6$

图 27 为 $SI=1.0$ 时的最大似然译码算法的误码率与信噪比曲线。可以看出:随着闪烁因子的增加, 相对于 1×1 系统, 同一系统信噪比的改善量明显增加;当误码率为 3×10^{-2} 时, 相对于 1×1 系统, 1×4 和 1×2 系统的信噪比分别改善了约 8 dB 和 15 dB。尤其是 $2\times 2、2\times 3、4\times 4、4\times 5$ 等系统获得的分集增益更大。这说明当闪烁越强时, MIMO 系统所获得分集增益的效果就越明显, 致使光强起伏被明显抑制。

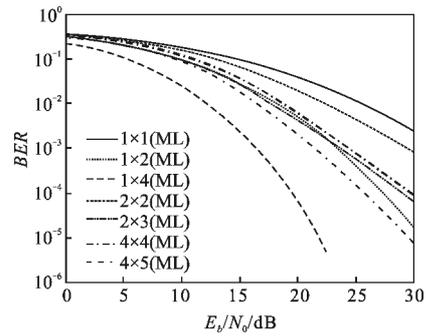


图 27 $SI=1.0$ 时最大似然译码算法的误码率与信噪比曲线
Fig.27 Maximum bit error rate of likelihood decoding algorithm and signal-to-noise ratio curve at $SI=1.0$

2.4.2 线性译码算法的性能分析

线性译码算法包括迫零算法和最小均方误差算法, 分别对这两种译码算法下的误码性能进行仿真。

(1) 迫零译码算法

为了更好地描述采用迫零译码算法(ZF)时分层空时编码的误码性能, 对该算法的误码性能进行了仿真分析, 其结果如图 28 和图 29 所示。图 28 为 $SI=0.6$ 时的 ZF 和 ML 译码算法的误码率与信噪比曲线。可以看出:采用 ZF 译码算法后, 随着激光器和探

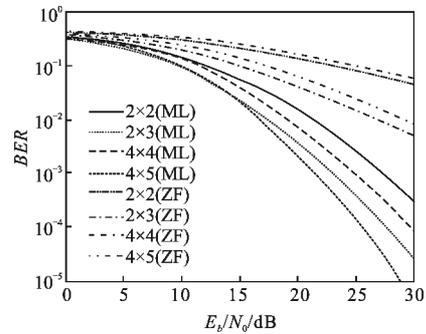


图 28 $SI=0.6$ 时 ZF 和 ML 译码算法的误码率曲线
Fig.28 ZF and ML decoding algorithm error rate curve at $SI=0.6$

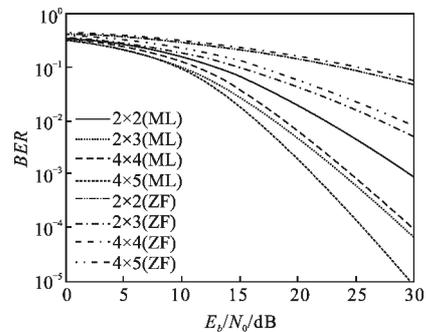


图 29 $SI=1.0$ 时 ZF 和 ML 译码算法误码率曲线
Fig.29 ZF and ML decoding algorithm error rate curve at $SI=1.0$

测器数目的增加,系统的误码率随着信噪比的增加逐渐减小,说明将 ZF 译码算法用于大气激光通信 V-BLAST 码的译码中是可行的。但是此时所呈现出的规律和最大似然译码算法 (ML) 有一些差异:(1) 采用 ZF 译码算法后,由探测器数目增加所引起误码性能的改善十分明显。当误码率为 6×10^{-2} 时,相对于 4×4 系统, 4×5 系统的信噪比改善了约 7.5 dB; 相对于 2×2 系统, 2×3 系统的信噪比改善了约 11.5 dB。这是因为探测器数目的增加相当于增大了接收孔径,说明该系统能有效克服大气湍流所引起的闪烁效应。(2) 采用 ZF 译码算法后, 4×5 系统的误码性能比 2×3 系统的误码性能差, 4×4 系统的误码性能比 2×2 系统的误码性能差,这是因为发端采用复用技术后,各路信号间的空间干扰增加。

图 29 为 $SI=1.0$ 时的 ZF 和 ML 译码算法的误码率与信噪比曲线。可以看出:此时所反映的规律和图 28 相同,区别仅在于 2×2 和 4×4 , 2×3 和 4×5 等系统间的性能差距明显减小。这再次说明当闪烁越强时, MIMO 系统所获得分集增益的效果就越明显。

(2) 最小均方误差译码算法

图 30 为 $SI=0.6$ 时采用 MMSE 和 ML 译码算法的误码率曲线。可以看出:采用 MMSE 译码算法后,随着激光器和探测器数目的增加,系统的误码率随着信噪比的增加逐渐减小。

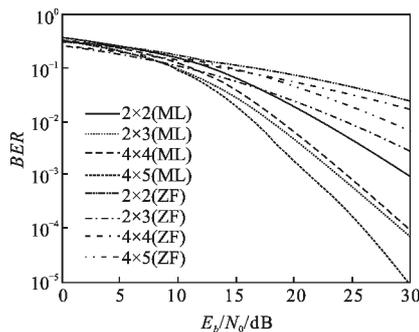


图 30 $SI=0.6$ 时 MMSE 和 ML 译码算法的误码率与信噪比曲线
Fig.30 MMSE and ML decoding algorithm error rate curve at $SI=0.6$

图 31 为 $SI=1.0$ 时,采用 MMSE 和 ML 译码算法的误码率与信噪比曲线。该图所反映的规律和图 30 相同,区别在于系统误码率的改善量不同。尤其是在强闪烁下,相对于经典系统(SISO)而言,采用最小均方误差译码算法时, 2×2 和 4×4 系统误码率的改善量更大。

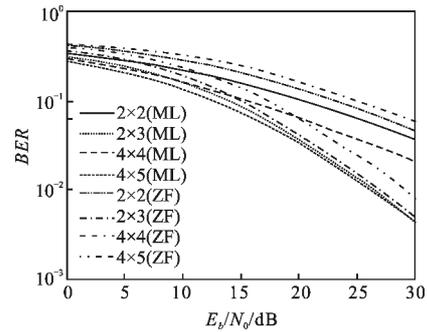


图 31 $SI=1.0$ 时 MMSE 和 ML 算法的误码率与信噪比曲线
Fig.31 MMSE and ML decoding algorithm error rate curve at $SI=1.0$

3 结论

文中对无线光通信中的分层空时编码进行了仿真分析,研究了不同分层空时编码在不同天线配置下的性能;比较了不同的译码算法在不同湍流情况下的误码率特性,并分析了其译码复杂度。研究结果表明:对角分层空时码的性能是这三种编码中最好的,螺旋分层编码次之,水平分层空时编码最差;对角分层空时编码在湍流增强时的误码率并没有很大变化,变化最大的是水平分层空时编码,这也说明了对角分层空时编码的系统能够抑制大气中强湍流对系统的影响。不管是在弱湍流还是强湍流的情况下,收发天线的个数逐步增大时,三种分层空时编码性能最好的是对角分层空时编码,其次是螺旋分层空时编码,最后是水平分层空时编码。水平分层空时编码没有在空间域编码,所以性能较差;螺旋分层空时编码相对角分层空时编码的优势在于其编码复杂度较低且不存在冗余,较好地利用了空间和时间;对角分层空时编码虽然性能最优,且充分利用了空间及时间这两个域的资源,但是因为其存在 $n(n-1)/2$ 的冗余量,所以该编码是增加了编码的冗余而获得较高的编码性能。级联分层空时编码也是空时码发展的一个方向。该系列论文之“三”将详细分析正交空时码、混合空时码及网格空时编码的编码性能。

参考文献:

- [1] Ma Liang. Wireless Communication of the Smart Antenna-IS95 and Third Generation CDMA Application [M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 20-31. (in Chinese)
马凉. 无线通信中的智能天线-IS95 和第三代 CDMA 应用

- [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 20-31.
- [2] Huang Haoxue, Wu Siliang. An algorithm for estimating DOA and Doppler frequency of signals incident on uniform circular array [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2001, 29(5): 619-620. (in Chinese)
黄浩学, 吴嗣亮. 基于均匀圆阵的信号源 DOA 和多普勒频率估计算法[J]. *电子学报*, 2001, 29(5): 619-620.
- [3] Khalighi M A, Brossier J M, Jourdain G V, et al. Water filling capacity of Rayleigh MIMO channels [C]//*Personal Indoor and Mobile Radio Communications, 12th IEEE International Symposium on Oct*, 2001, 1: 156-158.
- [4] Gao Jie. Applying MIMO technology in the ultra wide band system [D]. Xi'an: Xidian University, 2008: 10-11. (in Chinese)
高洁. MIMO 技术在超宽带系统中的应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008: 10-11.
- [5] Li Ting. The research on layered space-time code for FSO system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012.
- [6] Chen Dan, Ke Xizheng, Li Tie. FSO MIMO system in layered detection algorithm of space-time code[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1550-1555. (in Chinese)
陈丹, 柯熙政, 李铁. FSO MIMO 系统中分层空时码检测算法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1550-1555.
- [7] Wang Huiqin, Ke Xizheng. Serial interference cancellation algorithm of layered space-time code in free space optical communication[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(2): 91-95. (in Chinese)
王惠琴, 柯熙政. FSO 中分层空时编码的串行干扰消除算法[J]. *光电工程*, 2010, 37(2): 91-95.
- [8] Wang Huiqin, Ke Xizheng. Atmosphere laser communication in MIMO channels and its key techniques[J]. *Laser Journal*, 2008, 16(3): 52-54. (in Chinese)
王惠琴, 柯熙政. MIMO 大气激光通信及其关键技术[J]. *激光杂志*, 2008, 16(3): 52-54.
- [9] Chen Juan, Ke Xizheng, Li Ting. Research of D-BLAST in the free space optical communication [J]. *Laser Journal*, 2012, 33(2): 29-31. (in Chinese)
谌娟, 柯熙政, 李婷. 无线光通信中对角分层空时编码的研究[J]. *激光杂志*, 2012, 33(2): 29-31.
- [10] Wang Huiqin, Ke Xizheng. Free space optical communication based on vertical bell labs layered space-time [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(6): 874-878. (in Chinese)
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.
- [11] Wang Huiqin, Cao Minghua, Jia Kejun, et al. Research and realization of V-BLAST in atmosphere laser communications [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2012, 23(3): 495-500. (in Chinese)
王惠琴, 曹明华, 贾科军, 等. 大气激光通信中垂直分层空时码的研究与实现[J]. *光电子·激光*, 2012, 23(3): 495-500.
- [12] Ke Xizheng, Yang Lihong, Ge Ziyue. Vertical Bell Labs layered space-time for FSO MIMO system and hardware simulation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 473-476, 536. (in Chinese)
柯熙政, 杨利红, 葛子叶. FSO MIMO 垂直空时分层码研究及硬件仿真 [J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(3): 473-476, 536.
- [13] Ke Huanhuan. The research on vertical bell LABS layered space-time for FSO MIMO system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011. (in Chinese)
柯欢欢. FSO MIMO 垂直分层空时码译码算法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2011.
- [14] Ge Ziyue. The research on vertical bell labs layered space-time for FSO MIMO system and hardware achievement [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011. (in Chinese)
葛子叶. FSO MIMO 垂直分层空时码研究及实现 [D]. 西安: 西安理工大学, 2011.
- [15] Ke Xizheng, Wang Huiqin. FSO MIMO system base on vertical bell labs layered space-time: China, 200810018222 [P]. 2012. (in Chinese)
柯熙政, 王惠琴. 基于垂直分层空时编码的自由空间 MIMO 光通信系统: 中国, 200810018222[P]. 2012.