

无线光通信中的空时编码研究进展(三)

柯熙政, 谌娟, 李征

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 空时编码利用多天线阵列提供的并行信道传输信息, 可以在保证通信质量的前提下进一步提高信息传输速率。介绍了笔者在正交空时码、空时网格码、酉空时码、差分空时码、混合空时码等方面的工作。采用类脉冲位置调制定义了负数、共轭、求补等运算, 将编码矩阵转化为一个用脉冲位置表示的实数矩阵。分析了不同发射天线/接收天线数目、大气湍流强度与系统误码率之间的关系。讨论了差分空时码、酉空时码在不同大气湍流条件下的误码率特性; 将分层空时码和空时分组码相结合, 对复用增益和分集增益进行合理的折中, 提出了一种适合于 IM/DD 式光通信的混合空时编码方案。

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)09-2496-09

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

Ke Xizheng, Chen Juan, Li Zheng

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

Abstract: Space-time coding transmission information by parallel channels of the multi-antenna array can further improving transmission rate while guarantee the quality of communication. The authors' work at orthogonal space-time block code, space-time trellis code, unitary space-time code, differential space-time code, hybrid space-time code and relevant aspects was introduced, by adopting various pulse position modulations defined negative, conjugate and complement operation, transform the coding matrix into real matrix expressed by pulse position. The relationship between system error rate and transmitting antenna/receiving antenna number, atmospheric turbulence intensity was analyzed. The error rate characteristics of differential space-time code and unitary space-time code under different atmospheric turbulence were discussed. Combination of layered space-time code and space-time block code, reasonable compromise the multiplexing gain and diversity gain, a hybrid space-time coding scheme suitable for IM/DD type optical communication was put forward.

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

收稿日期: 2013-01-22; 修订日期: 2013-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(60977054, 61377080); 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

空时分组码和空时网格码都是基于发射分集,为了进一步提高空时码的性能,抑制大气湍流效应,笔者对差分空时码进行了研究,介绍了在正交空时码、空时网格码、混合空时码、差分空时码和酉空时码方面的工作^[1-6]。空时编码(STC)将发射分集和编码集于一体,具有较好的频谱有效性和功率有效性,可增加系统容量和改善链路质量。空时网格编码(STTC, Space-Time Trellis Code)是用格状编码调制(TCM)构造的一种空时编码,它把编码和调制结合起来,综合考虑了分集增益和编码增益的影响,能够达到编译码复杂度、性能和频带利用率之间的最佳折中,是一种最佳码。空时分组编码(STBC, Space-Time Block Code)在分集技术中采用了简单的正交分组编码,其特点是各根天线发射的信号是正交的,这样使它可以获得最大的分集增益。但是,这是以编码增益和部分频带利用率为代价的。空时码(STC)、空时格码(STTC)、空时分组码(STBC)这3种空时编码在解码时都假设接收端知道信道状态(Channel State Information)的确切信息,需要在接收端进行信道估计。而在某些情况下接收端进行信道估计会非常困难,有时甚至根本无法估计。酉空时编码和差分空时编码就是根据这个要求提出的,不需要信道估计。酉空时编码(USTC, Unitary Space-Time Code)在形式上类似于STBC,是一种接收端不需信道估计的空时编码。差分空时编码(DSTBC)是将酉空时编码的思想推广到多天线信道。

1 正交空时编码

最早的空时编码结构是由 Alamouti 提出^[7],受到了人们广泛重视。空时分组码最初形式是 Alamouti 提出的空时码^[8], Trokh 将 Alamouti 提出^[9]的两天线发射分集方案推广到任意多副发射天线,可以获得满分集增益且译码比较简单。Simon 和 Vilnrotter 等人对经典的 Alamouti 码进行改进^[8],提出了一种适合于 IM/DD 式光通信的正交空时编码方案。在传统的 Alamouti 码中存在着负数和复数形式的信号,而复共轭和负数无法利用“on”和“off”表示。因为大气激光通信一般采用强度调制方式,所以参考文献[8]

对传统的 Alamouti 码进行了改进,提出了一种适合于 IM/DD 式大气湍流信道的空时编码方法。笔者将空时编码和调制技术相结合,利用二进制比特元之间的关系(即二进制码元“0”和“1”的补码关系)构造了在 Q-PPM 调制之前首先进行比特求补的一种编码方法(BCOSTBC)。

在系统总功率 E_s 不变、信道参数已知的情况下,利用 Monte Carlo 方法对 1×1 、 1×2 、 2×1 和 2×2 系统的误码性能进行了仿真。仿真参数为:光电转化效率 $\eta=0.5$,总发射功率 $R=1$ 。仿真结果如图 1-4 所示。

图 1 为闪烁因子 $SI=0.6$ 时 4-PPM 调制的 BCOSTBC 码误字率。可以看出: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 BCOSTBC 码的误字率 $P_s=10^{-2}$ 时,相对于 1×1 系统,采用 BCOSTBC 码后 2×1 和 2×2 系统的误码性能分别改善了约 8 dB 和 18 dB。

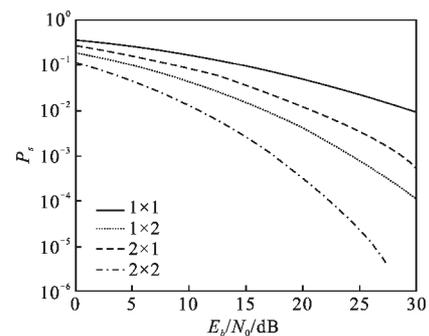


图 1 $SI=0.6$ 、采用 4-PPM 时 BCOSTBC 码的误字率

Fig.1 Bit error rate at $SI=0.6$ with 4-PPM of BCOSTBC code

图 2 为 $SI=1.0$ 时不同调制方式下 BCOSTBC 码的误字率。可以看出:在不同的调制方式下,随着信噪比的增加,系统的误字率逐渐减小,而且在同一种系统中,系统的误字率随着 Q 数量的增加而减小。

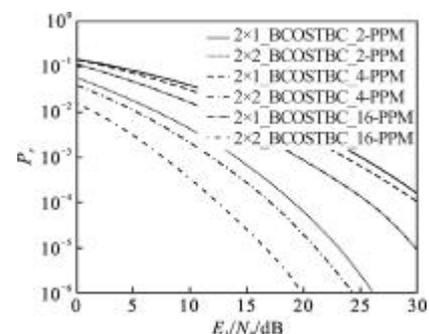


图 2 $SI=1.0$ 、采用不同调制时 BCOSTBC 码的误字率

Fig.2 Bit error rate at $SI=1.0$ with different modulation of BCOSTBC code

采用不同的脉冲位置来表示符号的复共轭和负数。例如, $Q=4$ 时, 当 $\mathbf{x} \rightarrow [1 \ 0 \ 0 \ 0]$, $\mathbf{x}^* \rightarrow [0 \ 0 \ 0 \ 1]$, $-\mathbf{x}^* \rightarrow [0 \ 0 \ 1 \ 0]$, $-\mathbf{x} \rightarrow [0 \ 1 \ 0 \ 0]$, 将编码矩阵转化为一个用脉冲位置表示的实数矩阵。这样就可以在 IM/DD 式的光通信中来传输了。

利用 Monte Carlo 方法对 1×1 、 1×2 、 2×1 和 2×2 系统的误码性能进行了仿真。在系统总功率 E_s 不变的情况下, 仿真参数为: $SI=0.6$, $\lambda=1550 \text{ nm}$, $\eta=0.5$, $Q=4$ 。

图 3 为无背景辐射、无衰落时的误码性能。可以看出:(1) 2×2 和 1×2 系统的误码性能明显优于 1×1 系统的误码性能。当 $P_s=10^{-6}$ 时, 相对于 1×1 系统, 2×2 和 1×2 系统的误码性能均约改善 3 dB。说明增加探测器的数量相当于增大了接收孔径, 有利于改善系统性能。(2) 1×1 系统和 2×1 系统的误码曲线重合, 1×2 和 2×2 系统的误码曲线重合。说明在总功率不变的情况下, 增加激光器的数目后系统的误码性能并未得到改善。

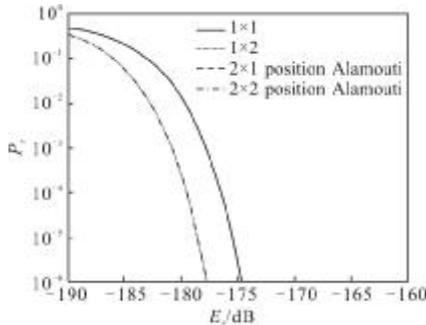


图 3 无背景辐射无衰落时的误码率

Fig.3 Bit error rate without background radiation and decline

图 4 为无背景辐射、有衰落时的误码性能, 假设 $SI=0.6$ 。可以看出:(1) 当激光器数目不变时, 增加探测器的数目有利于系统误码性能的改善。(2) 当激

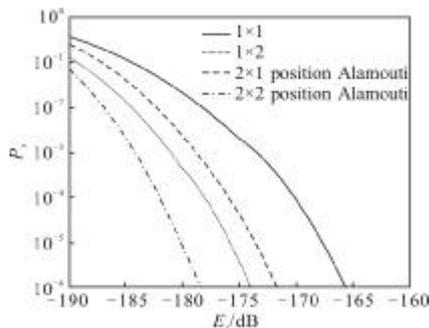


图 4 无背景辐射有衰落时的误码率

Fig.4 Bit error rate without background radiation but with decline

光器数目变化时, 随着激光器数目的增加, 系统的误码性能并未得到改善。这是因为在总功率不变的条件下, 增加激光器的数目 M 意味着每个激光器上的功率将减小 $1/M$ 倍, 而每个字符上引入的背景辐射将为 1×1 系统的 M 倍。

2 时空网格编码

1998 年, Tarokh 等^[10]通过将差错控制编码、调制、发射和接收分集等技术进行联合设计, 提出了时空网格码, 并且给出了基于平坦慢衰落及快衰落信道假设条件的时空网格码设计准则。

分别分析了在 2 根发射天线采用不同接收天线数时误码率随着信噪比的变化情况。仿真条件:(1) 在接收端信道特性和噪声能被准确估计;(2) 光电转换效率设为 0.8, SI 取 0.7 和 0.9 (SI 通常取 0.4~1 之间);(3) 假设同一时刻天线发射信号皆同步到达接收天线;(4) 系统调制采用 4-PPM;(5) 分析误码率时天线数取 $2 \times 2, 2 \times 3, 2 \times 4$;(6) 编码系数 $\mathbf{g}_1=[0 \ 2; 2 \ 0]$; $\mathbf{g}_2=[0 \ 1; 1 \ 0]$ 。

在图 5 和图 6 中仿真了不同接收天线和不同闪

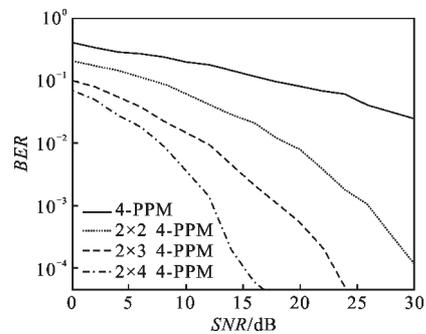


图 5 $SI=0.7$ 时误码率与信噪比的曲线

Fig.5 Curves of error rate and signal-to-noise ratio at $SI=0.7$

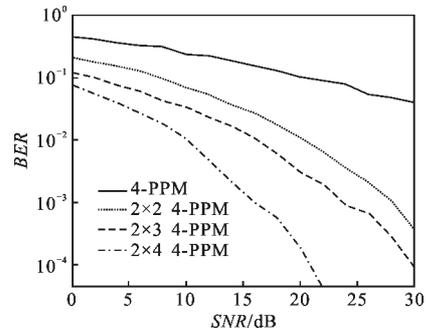


图 6 $SI=0.9$ 时误码率与信噪比的曲线

Fig.6 Curves of error rate and signal-to-noise ratio at $SI=0.9$

烁因子下的误码率曲线。可以看出,随着接收天线数的增加,误码率性能得到明显改善;同时在相同噪声情况下采用 STTC 4-PPM 系统能够取得比 4-PPM 调制更好的误码率性能;比较图 5 和图 6 可以看出,在 $SI=0.9, SNR=20\text{ dB}$ 时, 2×4 系统比 2×3 系统的误码率高出一个数量级。

针对 3 个激光器的无线光 STTC 系统分别分析了在 3 根发射天线采用不同接收天线数目时随着信噪比变化对误码率影响的仿真条件:(1) 光电转换效率设为 0.8, SI 取 0.7;(2) 假设同一时刻每个天线发射信号皆同步到达接收天线;(3) 系统调制采用 4-PPM;(4) 分析误码率时天线数分别为 $3\times 2, 3\times 3, 3\times 4$;(5) $g_1=[0\ 2\ 2; 1\ 2\ 3]; g_2=[2\ 3\ 3; 2\ 0\ 2]$ 。

从图 7 可以看出,3 天线系统也具有和 2 天线相同的优点。图 8 中将 2 发射天线系统和 3 发射天线系统进行直接比较,可以看出当接收天线数同为 3 时,在 $SNR=20\text{ dB}$ 时 3×3 系统比 2×3 系统的误码率性能提高了两个数量级,误码率随着发射天线数目的增加而减小。

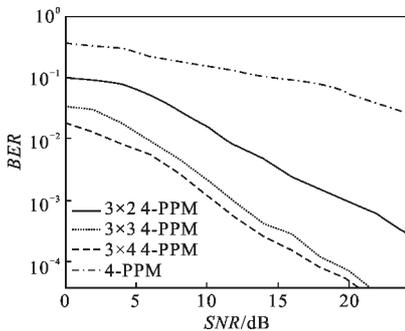


图 7 $SI=0.7$ 时 3 天线系统误码率与信噪比的曲线
Fig.7 Curves of error rate and signal-to-noise ratio at $SI=0.7$ with 3 antenna system

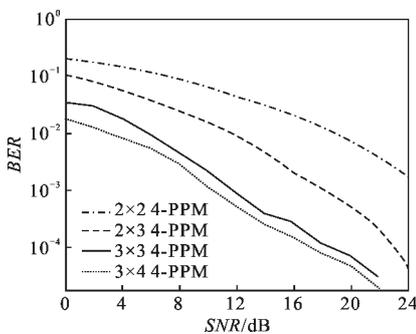


图 8 $SI=0.9$ 时 3 天线系统与 2 天线系统误码率比较
Fig.8 Curves of error rate comparison with 3 antenna system and 2 antenna system at $SI=0.9$

3 差分空时编码

2000 年, Tarokh 和 Jafarkhani 提出了基于正交设计的 2 天线差分空时分组编码^[11], 该方案是在 Alamouti 正交空时分组码的基础上进行改进的^[12]。此方案与传统的 2 天线的空时分组码(Alamouti 编码)相比会有 3 dB 的性能损失^[12], 且 QPSK 调制还存在信号扩展的问题。Tarokh 和 Jafarkhani 将参考文献[11]的结果进行了推广, 使其可以应用于多个发射天线的情况^[13]。2000 年, Hochwald 和 Huges 先后提出差分酉空时调制^[14]和差分空时调制^[15], 差分酉空时调制引入一类对角矩阵, 该矩阵的对角线上的符号为 PSK 调制信号; 而差分空时调制是在群码的基础上, 提出一种用于多发射天线的差分空时调制方案。

定义无湍流时每个探测器每个符号的接收能量为 $E_s=(\eta I_s)^2 T_s$, 其中 $T_s=T/Q$ 为时隙长度, Q 为调制阶数, T 为字符周期。假设系统总功率归一化为 $E_s=1$, 根据 Taylor 冻结湍流大气理论, 假定信道系数在相邻的两个发送码矩阵内保持不变。信道衰落系数在连续的两个发送矩阵块保持不变, 即信道是慢衰落信道。利用 Monte-Carlo 方法分别对 $2\times 1, 2\times 2, 2\times 3, 4\times 1, 4\times 2, 4\times 3, 4\times 4$ 系统的误比特率进行了仿真。仿真参数 $SI=0.5$, 采用二进制脉冲位置调制(BPPM)调制方式, 即 $Q=2$, 二进制数据流样本值为 1 000 000。

图 9 为采用对数正态分布模型、 $SI=0.4$ 时 2 根发射天线的差分空时编码的误比特率。可以看出, 随着接收孔径数目的增加, 系统的性能也在逐渐改善, 在误比特率为 10^{-3} 的情况下, 2 个接收孔径相对于单个的减少了约 8.5 dB; 3 个接收孔径相对于单个和 2 个的分别减少了约 13 dB 和 4.5 dB。

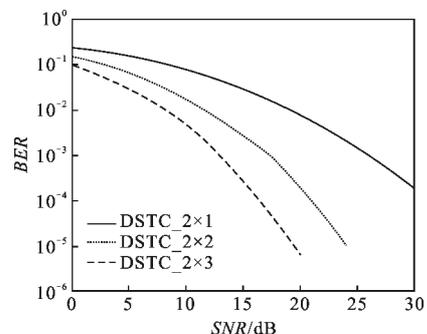


图 9 $SI=0.4$ 采用 BPPM 调制时差分空时编码的误比特率
Fig.9 Differential space-time coding bit error rate with BPPM modulation method at $SI=0.4$

图 10 为湍流模型采用 $\Gamma-\Gamma$ 分布模型、 $SI=0.9$ 时 2 根发射天线的差分空时编码的误比特率。可以看出,在误比特率为 10^{-2} 的情况下,2 个接收孔径相对于单个的减少了约 10 dB;3 个接收孔径相对于单个和 2 个的分别减少了约 15 dB 和 5 dB。

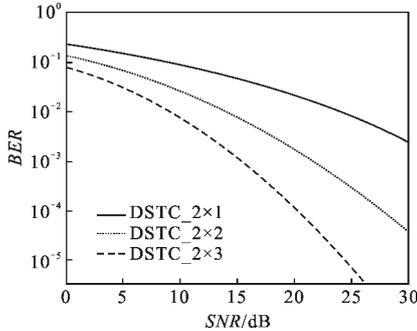


图 10 $SI=0.9$ 、采用 BPPM 调制时差分空时编码的误比特率
Fig.10 Differential space-time coding bit error rate with BPPM modulation method at $SI=0.9$

图 11 为湍流模型采用 $\Gamma-\Gamma$ 分布模型, $SI=1.12$ 时 2 根发射天线的差分空时编码的误比特率。可以看出,在误比特率接近 10^{-2} 情况下,2 个接收孔径相对于单个的减少了约 14 dB;3 个接收孔径相对于单个和 2 个的分别减少了约 20 dB 和 6 dB。

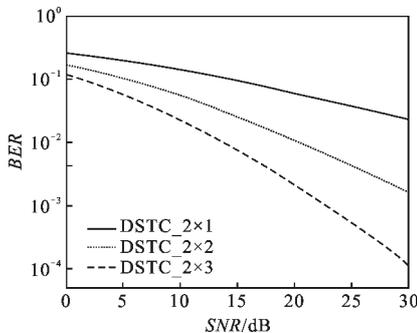


图 11 $SI=1.12$ 、采用 BPPM 调制时差分空时编码的误比特率
Fig.11 Differential space-time coding bit error rate with BPPM modulation method at $SI=1.12$

图 12 为湍流模型采用 $\Gamma-\Gamma$ 分布模型, $SI=0.9$ 时差分空时编码和由 Simon 和 Vlnrotter 改进后的 Alamouti 码^[16]的误比特率对比。可以看出,差分空时编码方法和改进的 Alamouti 编码方法的性能曲线平行,说明差分方案可以实现和改进的 Alamouti 编码^[16]完全的发射分集;在误比特率为 10^{-2} 的情况下,差分编码和改进的 Alamouti 编码^[16]相比约差 5 dB,但差分编码方案的 2x1,2x2 系统明显优于未使用

编码的 1x1,1x2 系统。

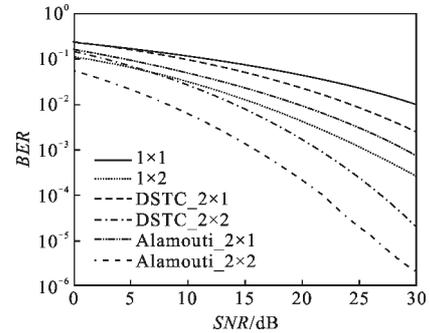


图 12 $SI=0.9$ 、采用 BPPM 调制时差分空时编码和 Alamouti 码的误比特率对比
Fig.12 Bit error rate contrast of differential space-time coding and Alamouti code at $SI=0.9$ with BPPM modulation

图 13 为采用对数正态分布湍流模型、 $SI=0.4$ 时 2 根发射天线和 4 根发射天线的差分空时码误比特率对比。可以看出:(1) 在误比特率为 10^{-3} 时,4x1 系统的误码性能相对于 2x1 的系统改善了约 6 dB;在误比特率为 10^{-4} 时,4x2 系统的误码性能相对于 2x2 系统改善了约 3.5 dB。(2) 在误比特率为 10^{-3} 时,2x2 系统的误码性能性对于 2x1 系统改善了约 8 dB;在误比特率为 10^{-4} 时,4x2 系统的误码性能相对于 4x1 系统改善了约 7.5 dB。(3) 对于两个不同的 MIMO 系统,在发射天线数 M 与接收天线数 N 的乘积 MN 相等的情况下,采用 2x2 系统的差分空时码的误比特性能明显优于 4x1 系统。在误比特为 10^{-4} 时,2x2 系统的误码性能相对于 4x1 系统改善了约 3 dB。图 14 为采用 Γ -分布湍流模型、 $SI=0.9$ 时 2x4 的差分空时码误比特率对比。

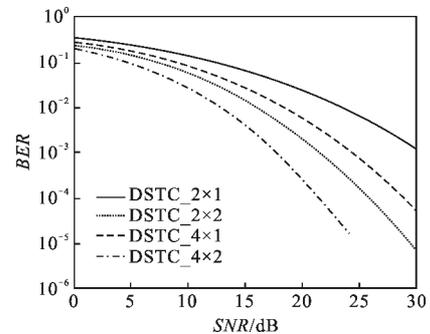


图 13 $SI=0.4$ 、发射天线数分别为 2 和 4 时差分空时码的误比特率对比
Fig.13 Bit error rate of differential space-time coding with 2 and 4 transmitting antenna at $SI=0.4$

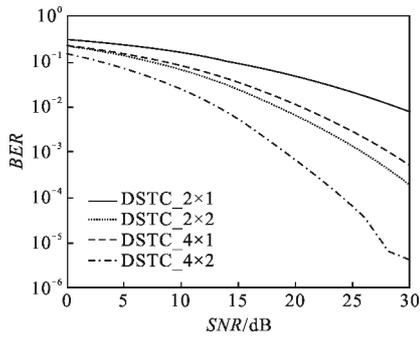


图 14 SI=0.9、发射天线数分别为 2 和 4 时差分空时码的误比特率对比

Fig.14 Bit error rate of differential space-time coding with 2 and 4 transmitting antenna at SI=0.9

图 15 的性能相对于图 13 和图 14 明显差了许多,由图 15 可以看出:在强湍流条件下,差分空时码采用 4×2 系统相对于 2×2,4×1,2×2 系统的差距明显增大。在信噪比为 20 dB 时,4×2 系统相对于 2×2 系统的误比特率性能有一个数量级的提升;而在信噪比为 40 dB 时,4×2 系统相对于 2×2 系统的误比特率性能有 3 个数量级的提升。

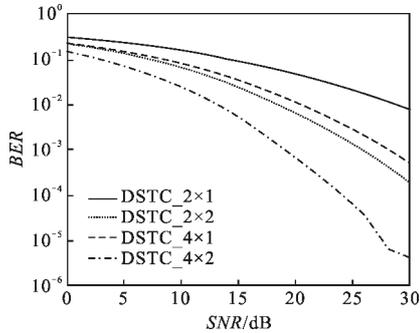


图 15 SI=1.12、发射天线数分别为 2 和 4 时差分空时码的误比特率对比

Fig.15 Bit error rate of differential space-time coding with 2 and 4 transmitting antenna at SI=1.12

图 16 为湍流模型采用对数正态分布模型、SI=0.6 时,发射天线数为 4、接收天线数分别为 1、2、3 和 4 时的差分空时码的误比特率随信噪比的曲线图。可以看出,随着接收天线数目的增加,系统的性能越好;在信噪比为 15 dB 时,4×4 系统的误比特率性能相对于 4×1 系统提升了 3 个数量级,4×4 系统的误比特率性能相对于 4×2 系统提升了 2 个数量级,4×4 系统的误比特率性能相对于 4×3 系统提升了 1 个数量级。

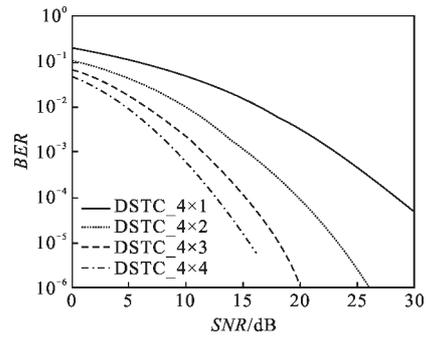


图 16 SI=0.6、发射天线数为 4 且接收天线数不同时差分空时码的误比特率

Fig.16 Bit error rate of differential space-time coding with 4 transmitting antenna and different number of receiving antennas at SI=0.6

4 酉空时编码

在信道特性快速变化的移动环境中进行有效的信道估计是很困难的,有时甚至是不现实的。因此,研究接收端无需信道估计的空时编码具有很大的实用价值。Hughes、Hochwald 和 Marzetta 等学者^[17-19]研究了接收端没有信道参数估计的盲的空时块码,Hochwald^[14]等人根据信息论中瑞利衰落信道的信道容量推导出了酉空时码,它要求发送码块为酉矩阵,接收端可以在不知道信道状态的情况下进行最大似然译码。

设总发射功率 E_s 不变,取归一化值 $E_s=1$,根据泰勒的冻结场理论,假定信道参数在连续的两个发送码矩阵块内保持不变,光电转换效率 $\eta=0.5$,取样本数为 100 000。采用上述两种方法分别在 SI=0.4(弱湍流)和 0.8(中湍流)的情况下对 4×2 和 4×1 系统进行了误码率的测试。仿真结果如图 17~图 20 所示。

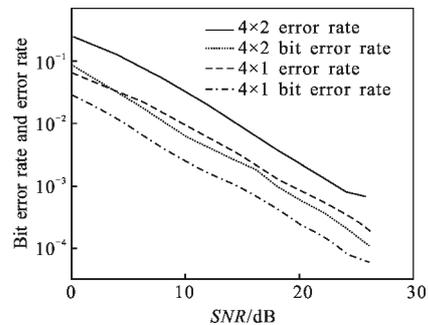


图 17 SI=0.4 时不需要信道估计的酉空时编码误码性能
Fig.17 Performance of unitary space-time coding at SI=0.4 without channel estimation

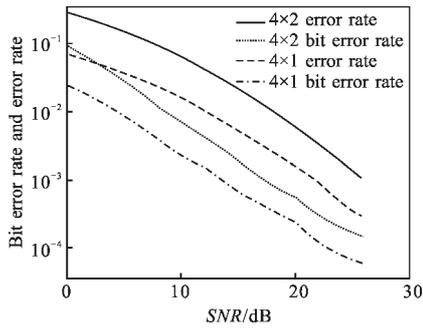


图 18 SI=0.8 时不需要信道估计的酉空时编码误码性能

Fig.18 Performance of unitary space-time coding at SI=0.8 without channel estimation

如图 17 所示,在 SI=0.4、误比特率为 10^{-4} 的情况下,4×2 系统和 4×1 系统的信噪比相差 5 dB。表明随着接收机孔径数目的增加,酉空时编码方案的性能有很大改善。

由图 17 和图 18 可以看出,在 SI=0.4、误比特率为 10^{-3} 时,4×1 系统的信噪比几乎保持在 19 dB,4×2 系统的信噪比在 15 dB。而在 SI=0.8、误比特率为 10^{-3} 时,4×1 系统的信噪比为 23 dB,与 SI=0.4 时相比相差了 4 dB;4×2 系统的信噪比为 14 dB,与 SI=0.4 时相比相差了 1 dB。

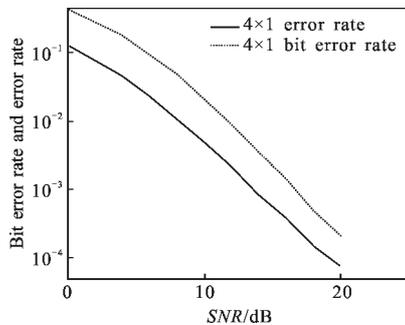


图 19 SI=0.4 时需要信道估计的酉空时编码误码性能

Fig.19 Performance of unitary space-time coding at SI=0.4 with channel estimation

比较图 17 和 18 可以看出,当信噪比取 25 dB 时,无论是弱湍流情况下还是中湍流情况下,4×1 系统的误比特率在 10^{-3} ~ 10^{-4} 之间,4×2 系统的误比特率在 10^{-4} 以下,两种湍流情况下系统的误比特率相差不多。而比较图 19 和 20 可以看出,当信噪比取 20 dB 时,在弱湍流情况下,4×1 系统的误比特率在 10^{-4} 以下;在中湍流情况下,4×1 系统的误比特率在 10^{-3} ~ 10^{-4} 之间,与需要信道估计的误比特性能相比

明显较差。表明需要信道估计的系统抑制湍流影响能力强。

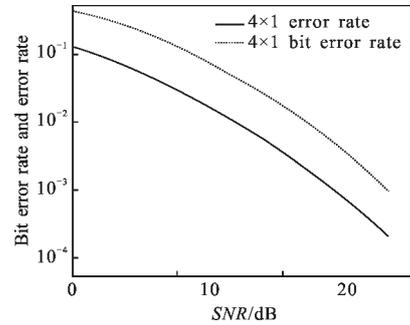


图 20 SI=0.8 时需要信道估计的酉空时编码误码性能

Fig.20 Performance of unitary space-time coding at SI=0.8 with channel estimation

5 混合空时编码

分层空时编码(LSTC)^[20-22]和空时分组码(STBC)^[23-25]是两种重要的空时编码方法。虽然 LSTC 误码性能较差,但能获得较高的频谱利用率。STBC 码利用正交性实现了系统的发射分集,性能明显优于 LSTC 码,但编码矩阵中的冗余信息使得其传输效率较低^[26-28]。因此对于 STBC 码,提高其传输速率是需要解决的首要问题。对复用增益和分集增益进行合理的折中,提出了一种适合于 IM/DD 式光通信的混合空时编码方案^[29-32]。

在总发送功率不变、信道衰减系数确定的条件下,利用 Monte Carlo 方法对 4×4 系统的误码性能进行了仿真。仿真参数为:Q=4,SI=0.6,η=0.5,混合编码方案中采用一个 2×2 的 STBC 编码块。仿真结果如图 21、22 所示。

图 21 为不同系统采用不同编码方式时的误码性能。可以看出:(1) 对比 2×2 的 STBC 系统和 4×4 的 ZF_BLAST 系统,在 STBC 和 BLAST 的误码率之间存在一个很宽的范围,而且 STBC 系统的误码率曲线比 BLAST 系统的更陡峭,说明 STBC 系统在损失了部分复用增益的情况下能获得较大的分集增益。(2) 4×4 混合空时编码系统的误码性能介于 2×2 STBC 系统和 4×4 ZF_BLAST 系统之间,可见混合空时编码的误码性能明显优于传统的 BLAST 码的性能。当误码率为 4×10^{-2} 时,相对于 4×4 ZF_BLAST 系统,4×4 混合空时编码系统的性能改善了约 14 dB,说明在分层空时编码中引入 STBC 码后增加了最

先译出层的分集度,保证了首层的正确性,减小了错误传播。(3)与 4×5 ZF_BLAST、 4×6 ZF_BLAST的系统相比, 4×4 混合空时编码系统的误码性能介于二者之间,说明 4×4 混合空时编码系统既获得了接收分集增益,又获得了发送分集增益。

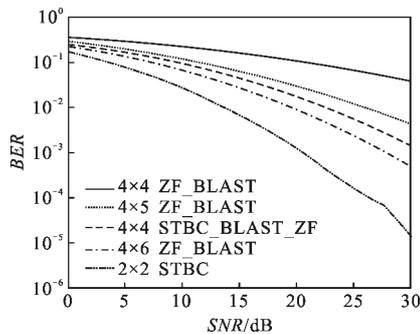


图 21 不同系统采用不同编码方式时的误码性能

Fig.21 Bit error rate performance of different system with different coding methods

对传统BLAST系统和混合空时编码系统分别采用MMSE和ZF检测算法进行分析,其误码性能如图22所示。可以看出:(1)在混合空时编码系统中采用MMSE译码算法时,也体现出该方案的误码性能明显优于传统BLAST系统的误码性能。(2)在传统的BLAST系统中,MMSE算法由于考虑了噪声对信号的影响,采用MMSE算法时的性能明显优于采用ZF算法时的性能。但是在混合空时编码系统中,采用两种算法时的误码性能非常接近。当误码率为 2×10^{-3} 时,两种算法的误码性能相差不到0.5 dB。

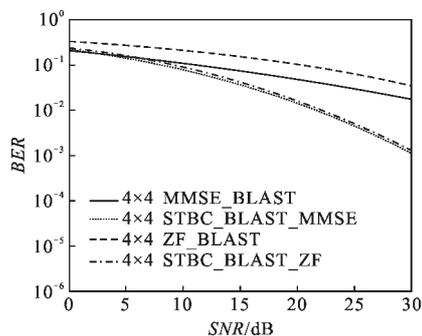


图 22 两种系统采用不同译码算法时的误码性能

Fig.22 Bit error rate performance of two system with different coding methods

6 结论

邱绍峰^[33]等利用多模光纤的模式色散构建了光

纤信道MIMO模型;李季碧等^[34]对光纤信道MIMO的迫零(ZF)检测算法、最小均方误差(MMSE)检测算法、最大似然(ML)检测算法在垂直分层空时编码(V-BLAST)进行了理论分析。结果表明,在多模光纤链路中,ZF算法性能较低;MMSE算法较ZF算法有所改进;ML算法可获得原符号的最小差错概率,其性能最好。赵顾颖等^[35]对无线光空时编码的信道容量进行了分析,邢雪峰等^[36]研究了一种准正交空时编码,可见在无线光通信领域,空时编码逐渐引起了人们的重视。从2007年开始致力于无线光通信中的空时编码研究^[30-32],借鉴前人在射频领域中空时编码的研究结果,将其推广到无线光通信领域。今后努力的方向是根据信道的变化情况自适应地进行编码,以提高信道容量;适应信道的特性变化加入纠错编码,提高无线光通信的可靠性。该系列论文之“四”将详细介绍级联空时码的编码方法及其性能。

参考文献:

- [1] Wang Huiqin. Research of space-time code in atmosphere laser communication[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [2] He Hua. The research on the key of wireless ultraviolet communication and networking [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] Gao Haitao. The research on spc-time trellis code for WOC MIMO system [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [5] Ge Ziyi. 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)
- [6] Zhao Li. The research on the key of FSO-OFDM system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [7] Luo Tao, Le Guangxin. Multiple Antenna Wireless Communication Principle and Application [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005. (in Chinese)
- [8] Simon M K, Vilnrotter V. Alamouti type space-time coding for free-space optical communication with direct detection[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(1): 35-39. (in Chinese)
- [9] Vahid Tarokh, Nambi Seshadri, Calderbank A R. Space-time

- codes for high data rate wireless communications: performance criterion and code construction [J]. *IEEE Trans Inform Theory*, 1998, 44(3): 744-765.
- [10] Tarokh V, Seshadri N, Calderbank A R. Space-time codes for high data rate wireless communication performance criterion and code construction [J]. *IEEE Trans Inform Theory* Mar, 1998, 44(2): 744-765.
- [11] Tarokh V, Jafarkhani H. A differential detection scheme for transmit diversity [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Com*, 2000, 18(7): 1169-1174.
- [12] Alamouti S M. A simple transmit diversity scheme for wireless communication [J]. *IEEE J Sel Areas Commun*, 1998, 16(8): 1451-1458
- [13] Tarokh V, Jafarkhani H. Multiple transmit antenna differential detection from generalized orthogonal designs [J]. *IEEE Trans Information Theory*, 2001, 47(6): 2626-2631.
- [14] Hochwald M B. Differential unitary space-time modulation [J]. *IEEE Transactions on Com*, 2000, 48(12): 2041-2052.
- [15] Hughes B L. Differential space-time modulation [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(7): 2567-2578.
- [16] Simon M K, Vlnrotter V. Alamouti-type space-time coding for free-space optical communication with direct detection [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(1): 35-39.
- [17] Hughes B L. Differential space-time modulation [J]. *IEEE Trans on Information Theory*, 2000-11, 46(7): 2567-2578.
- [18] Hochwald B M, Marzetta T L, Richardson T, et al. Systematic design of unitary space-time constellations [J]. *IEEE Trans Information Theory*, 2000, 46(6): 962-1973.
- [19] Hochwald B M, Marzetta T L. Unitary space-time modulation for multiple-antenna communications in Rayleigh flat fading [J]. *IEEE Trans Information Theory*, 2000, 46(2): 543-564.
- [20] 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)
- [21] Wolniansky P W, Foschini G J, Golden G D. V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel [C]//1998 ISSSE Pisa Italy, 1998: 295-300.
- [22] Chen Jing, Xue Haizhong, Liu Xuewen. Experiment of low-power laser jamming free space optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1266-1270. (in Chinese)
- [23] Maité Brandt-Pearce, Stephen Wilson, Qianling Cao, et al. Code design for optical MIMO systems over fading channels [C]//Proceedings of the 38th Asilomar conference on signals, systems & computers, Monterey CA, 2004: 871-875.
- [24] Simon M K, Vlnrotter V. Alamouti-type space-time coding for free-space optical communication with direct detection [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(1): 35-39.
- [25] Syed Ali Raza Zaidi, afees M. Cross layer design for orthogonal space time block coded optical MIMO systems [C] //Wireless and Optical Communications Networks, 2008: 1-5.
- [26] Wilson S G, Brandt-Pearce M, Cao Q, et al. Optical repetition MIMO transmission with multipulse PPM [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(9): 1901-1910.
- [27] Luo Tao, Le Guangxin. Multiple Antenna Wireless Communication Principle and Application [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005. (in Chinese)
- [28] Wang Huiqin, Ke Xizheng, Zhao Li. Free space optical communication in MIMO base on orthogonal space-time block codes [J]. *Science China (F: Scientia Sinica Informations)*, 2009, 39(8): 896-902. (in Chinese)
- [29] Wang Huiqin, Ke Xizheng. Hybrid space-time code for free space optical communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 132-137. (in Chinese)
- [30] Li Ting. Research on layered space-time code for FSO system [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [31] Zhang Nan. Iteration detection and decoding algorithms in FSO MIMO communication system [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [32] Pei Guoqiang. Performance research on multi-beam transmission and multi-aperture reception in turbulence atmosphere [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [33] Dong Ran, Ai Yong, Xiao Yongjun, et al. Design and communication experiment of fine tracking system for space optic [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2718-2722.
- [34] Li Jibi, Ren Wei, Qiu Saofeng. Detection algorithm in V-BLAST optical MIMO system [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2011, 32(1): 96-98, 104. (in Chinese)
- [35] Zao Guhao, Zao Shanghong, Li Yongjun et al. Free space optical multiple-input multiple-output communication based on intensity superposition code [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 62-67. (in Chinese)
- [36] Xin Xuefeng, Li Hongzuo. Space laser communications based on quasi-orthogonal space-time block coding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012(5): 156-162. (in Chinese)