

无线光通信中的空时编码研究进展(四)

柯熙政, 谌娟, 陈丹

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 级联编码是一种提高系统纠错能力以逼近香农限的高效编码方式。当信道编码与空时编码结合使用时性能会大大提升, 因此级联空时码研究成为空时编码研究的重要方向之一。笔者介绍了 RS 码、LDPC 码与空时码的级联方案, 以及在不同大气湍流条件下的误码率特性, 并对其进行了仿真分析。结果表明: 级联空时码可以极大地改善大气激光通信系统的性能, 抑制大气湍流效应, 有利于获得编码增益, 进一步改善系统的误码性能。

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)10-2765-07

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

Ke Xizheng, Chen Juan, Chen Dan

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

Abstract: Concatenated space-time code is one of the efficient encoding that can improve the error correction capability and approaching the Shannon limit. The performance will be greatly enhanced when channel coding and space-time coding combination used, thus the concatenated space-time code becomes one of the important direction in space-time coding research. In this paper, the RS code and LDPC code concatenate scheme with space-time code were introduced, and the bit error rate characteristics under different atmospheric turbulence condition were analyzed. The results show that the concatenated space-time code can significantly improve the performance of the MIMO system, inhibit atmospheric turbulence effects, conducive to obtain coding gain and further more improve the system BER performance.

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

收稿日期: 2013-02-10; 修订日期: 2013-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(61377080); 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项目(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

空时级联码主要研究各种不同码之间的级联方案及译码方法,以降低多级迭代译码算法的复杂度^[1-4]。一般将纠错码作为外码,空时码作为内码来构造级联空时码^[5]。级联码能够在不增加系统硬件实现复杂度的条件下,使系统的性能接近香农限。Forney 于 1966 年提出利用短分量码构造较长好码的串行级联编码技术^[6],它以非二进制、较长码作为外码,以二进制、较短码作为内码,在获得较好的误码特性同时译码复杂度也在可容许的范围。自从无线激光通信技术出现之后,人们一直在努力采用级联编码技术提高通信系统的性能。在信道编码理论上,法国学者 C.Berrou 等人 1993 年在参考文献[7]中首次提出了 Turbo 码,由于很好地应用了 Shannon 信道编码定理中的随机性编译码条件而获得了几乎接近 Shannon 理论极限的译码性能。A.F.Naguib 等^[8]指出在误帧率为 0.1 时通过与适当的 RS 码级联,空

时编码可以获得 1.5~3.5 dB 的编码增益。A.Stefanov^[9]采用较长的交织矩阵,在误比特率为 10^{-5} 时可获得较参考文献[3]中的 STTC 高 8 dB 的增益。Hsuai-JungSu^[10]提出了一种并行级联迭代空时码,获得了较好的结果。徐建武等^[11]在 2012 年提出了一种空时分组码级联的方案,其误码率特性明显优于空时码。文中介绍无线光 MIMO 中级联空时编码并分析其误码率特性。

1 级联正交空时编码

1.1 级联正交空时分组码模型

级联空时编码用两个或多个编码级联来增加总码长以期改善系统性能,同时并不增加系统硬件实现的复杂度。它尤其适合应用于大气激光通信系统。非二进制 RS 码是一种最大距离可分码且容易实现,因而作为外码是很自然的选择。级联空时分组编码的模型如图 1 所示,由 RS 码和正交空时编码级联得到。

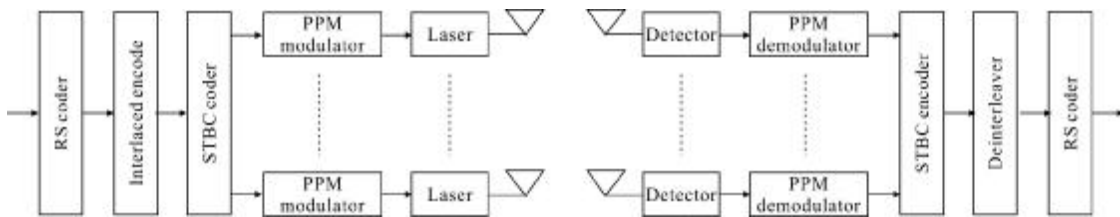


图 1 级联空时分组编码的原理

Fig.1 Diagram of concatenated group space-time code

信源经过串并变换后,PPM 调制符号可直接将外编码器的输出送入交织器进行交织;交织后的信息符号直接送入 STBC 编码器进行编码。接收端将接收到的 PPM 调制符号先送入 STBC 译码器,然后经解交织后直接进入 RS 译码器进行解码。交织技术可把突发性错误转化为随机性错误,可进一步提高系统的纠错能力。

1.2 级联正交空时编码的性能分析

对于能够纠正 t 个符号错误的 RS 码,其最小码距为 $d=2t+1$,监督元个数为 $r=2t$ 。若以 RS 码作为外码,则内码译码器只需输出符号判决^[12]。对一个能纠 t 个符号错误的 RS 码来说,译码后输出的误比特率具有的上限为^[13-14]:

$$P_s = (2(Q-1)/Q)P_b \quad (1)$$

参考文献[12,15-16]用 Monte Carlo 方法对 1×1 、 2×1 和 2×2 系统的误码性能进行了仿真。仿真参数 $\eta=0.5$ 。仿真结果如图 2~5 所示。

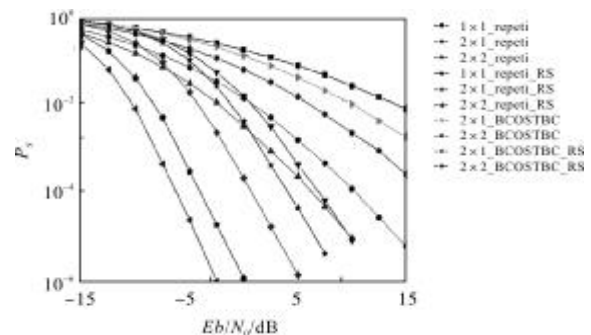


图 2 S.I.=0.4 时,级联 RS(15,7)码后 BCOSTBC 码和重复码的误率率
Fig.2 Bit error rate of BCOSTBC code and duplicate code after concatenated RS (15, 7) code at S.I.=0.4

图 2 为 $S.I.=0.4$ 时采用 16PPM 调制的级联 RS (15,7)码和重复码^[17-18]误字率。由图可见:(1) 通过级联 RS 码后,BCOSTBC 码和重复码的误字率明显下降。(2) 同一种系统中,两种空时编码级联后相对于级联前的性能差距明显减小。(3) 级联后,在发送孔径的数目相同的情况下,当增加接收孔径的数目,两种码间的误码性能差距明显减小。

图 3 为 $S.I.=1$ 时级联 RS(15,7)码后 BCOSTBC 码和重复码的误字率^[15],同样也采用 16PPM 调制。由图可见:图 3 所反映的规律和图 2 相同,只是此时信噪比的改善量更大。

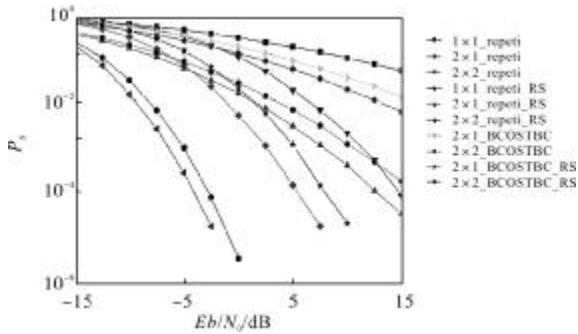


图 3 $S.I.=1$ 时,级联 RS(15,7)码后 BCOSTBC 码和重复码的误字率
Fig.3 Bit error rate of BCOSTBC code and duplicate code after concatenated RS (15, 7) code at $S.I.=1.0$

图 4 为 $S.I.=1$ 时级联 RS(32,23)码后 BCOSTBC 码和重复码的误字率^[15]。随着信噪比的增加,级联 RS(32,23)码后两种空时编码所获得的编码增益有所增加。当信噪比较大时,级联 RS(15,7)码后两种空时编码所获得的编码增益较小。

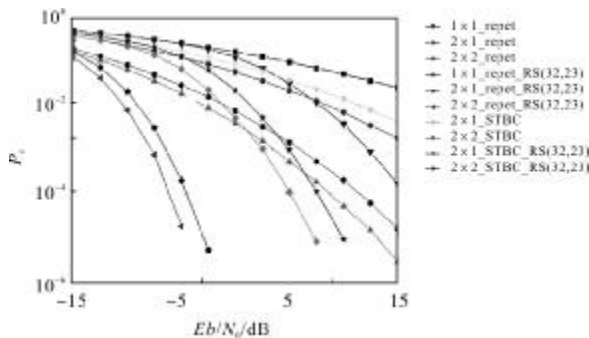


图 4 $S.I.=1$ 时,级联 RS(32,23)码后 BCOSTBC 码和重复码的误字率
Fig.4 Bit error rate of BCOSTBC code and duplicate code after concatenated RS (32, 23) code at $S.I.=1.0$

图 5 为 $S.I.=1$ 时级联等长 RS 码后 BCOSTBC 码和重复码的误字率。由图中曲线可以看出:(1) RS

码与空时分组编码的级联具有一定的优势。(2) 图中的曲线出现了交叉点。这是因为纠错所带来的好处未能弥补编码使其误字率升高的影响。

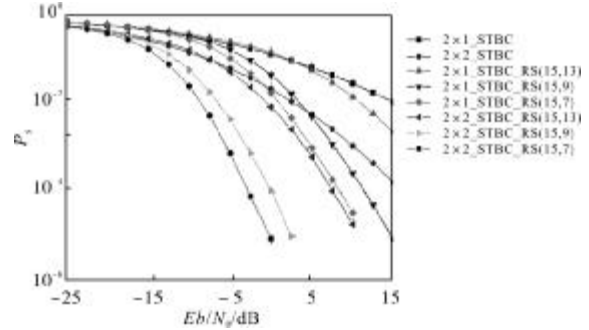


图 5 $S.I.=1$ 时,级联不同 RS 码后 BCOSTBC 码的误字率
Fig.5 Bit error rate of BCOSTBC code and duplicate code after concatenated different RS code at $S.I.=1.0$

2 级联分层空时码

2.1 级联分层空时码模型

图 6 是 LDPC-BLAST 系统的基本结构。信源发出信息 c 后,笔者对该信息进行 LDPC (low density parity-check, LDPC)编码,将 c 变成具有更好码距的码字 x 。对编码后的码字 x 进行串并转换后进行分层空时编码,随后依据 PPM 调制的原则对码字进行调制,之后通过 N 个激光器组成的阵列发射。在接收端,通过 M 个探测器接受信号,再对接收到的信号进行 PPM 解调,解调之后的信号再进行检测和译码得到码字,并串转换得到码字 y 后对码字进行 BP 译码算法得出最终的信息 c' 。最终比对信源发出的信息 c 和在接收端获得的信息 c' ,

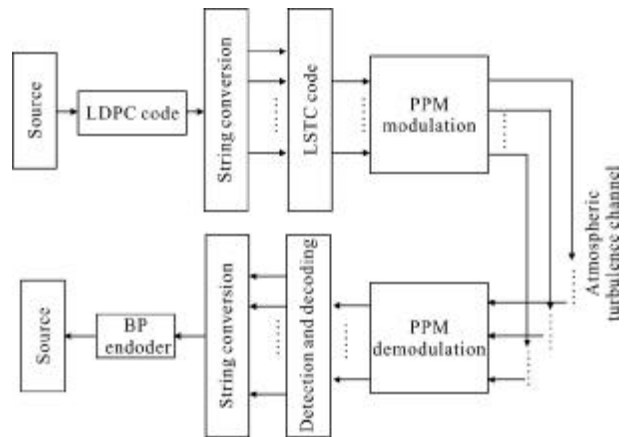


图 6 LDPC-BLAST 系统模型
Fig.6 System model of LDPC-BLAST

计算出相应的误码率，根据误码率的来判断该系统的性能。

2.2 级联分层空时码分析

低密度奇偶校验码是基于稀疏校验矩阵的线性分组码,由于它在编码端采用伪随机编码方式,且在译码端采用基于迭代译码“和积”算法,因此它在性能上接近香农限,且译码相对较为容易。LDPC 码以其能够达到香农容量极限的高纠错能力及易实现性成为与空时分组码结合的首选信道编码。而如何有效地把空时分组码与 LDPC 码级联的方法也就随之成为目前研究的热点。

分别采用最大似然检测算法、迫零检测算法和最小均方误差检测算法对 D-BLAST 与 T-BLAST 编码的 LDPC+BLAST 级联系统进行仿真分析。仿真条件:(1) 假设总功率 E_s 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) 弱湍流下大气信道服从对数正态分布,闪烁因子 $S.I.=0.6$,中强湍流和强湍流时大气信道服从 γ - γ 分布,闪烁因子分别取 1 和 3;(5) 系统采用单脉冲位置调制,即 4-PPM。(6) 选用二元域规则的 LDPC 码进行编码,其码率为 1/2,码长为 2016 bit,采用概率 BP 译码算法,迭代次数为 100。(7) 取天线数对分别为 2×2 、 2×4 、 4×4 和 4×6 的系统为例。

(1) LDPC+D-BLAST 系统的仿真

图 7 和图 8 在闪烁因子 $S.I.=0.6$ 时的系统仿真图^[6],也就是 LDPC+D-BLAST(LDPC 码与 D-BLAST 级联)系统在弱湍流情况下的误码率与信噪比的曲线图。可以看出:四发多收的系统在信噪比为 25 dB 时,误码率已经为 10^{-6} ,而两发多收的系统需要信噪

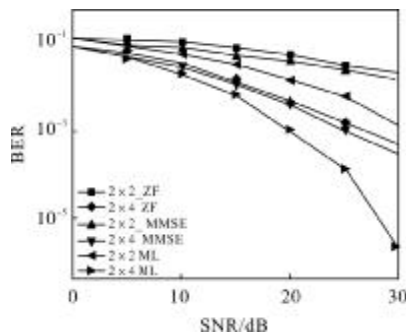


图 7 LDPC+D-BLAST 系统的 2×2 、 2×4 仿真图($S.I.=0.6$)
Fig.7 Simulation diagram of 2×2 、 2×4 with LDPC+D-BLAST system($S.I.=0.6$)

比加大到 30 dB 时误码率才能达到 10^{-6} 。与未加 LDPC 编码的 D-BLAST 系统相比,LDPC+D-BLAST(LDPC 码与 D-BLAST 级联)系统在弱湍流的情况下,系统的性能更好,对信噪比的要求也更低。

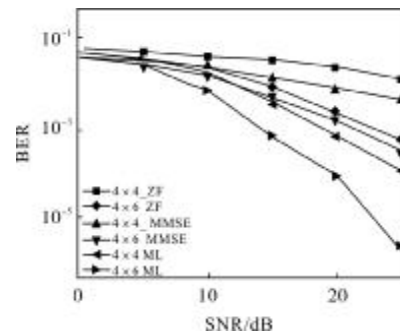


图 8 LDPC+D-BLAST 系统的 4×4 、 4×6 的仿真图($S.I.=0.6$)
Fig.8 Simulation diagram of 4×4 、 4×6 with LDPC+D-BLAST system($S.I.=0.6$)

图 9 和图 10 在闪烁因子 $S.I.=1$ 时的系统仿真结果,也就是 LDPC+D-BLAST 系统中强湍流情况下的误码率与信噪比的曲线。可以看出:闪烁因子增强后对误码率产生比较大的影响。LDPC+D-

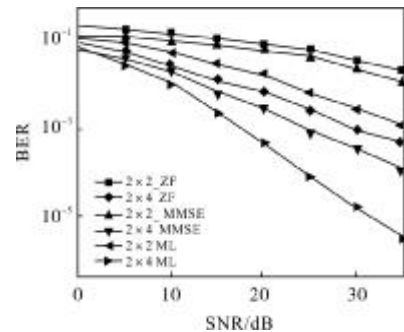


图 9 LDPC+D-BLAST 系统的 2×2 、 2×4 仿真图($S.I.=1$)
Fig.9 Simulation diagram of 2×2 、 2×4 with LDPC+D-BLAST system($S.I.=1$)

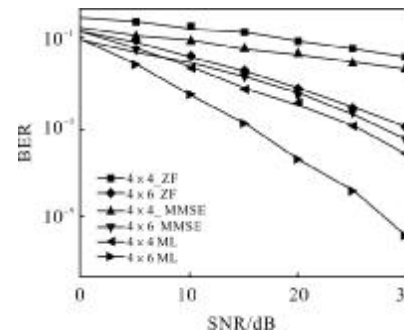


图 10 LDPC+D-BLAST 系统的 4×4 、 4×6 的仿真图($S.I.=1$)
Fig.10 Simulation diagram of 4×4 、 4×6 with LDPC+D-BLAST system($S.I.=1$)

BLAST 系统需要增加系统的信噪比才能获得弱湍流情况时的误码率,即两发多收系统信噪比为 35 dB 时的误码率才能接近 10^{-6} ,这就增加了系统对发射端功率的要求。

图 11 和图 12 为在闪烁因子 $S.I.=3$ 时的系统仿真结果^[16],也就是 LDPC+D-BLAST 系统在强湍流情况下的误码率与信噪比的曲线。可以看出:相同信噪比时,强湍流情况下系统的误码率比弱湍流下的误码率要大得多(信噪比 $SNR=25$ dB 时,弱湍流下的误码率为 10^{-6} ,强湍流下的误码率为 10^{-4})。在强湍流时需要加大发射端的发射功率,加大信噪比至 40 dB,才能将系统的信噪比减小到接近 10^{-6} 。

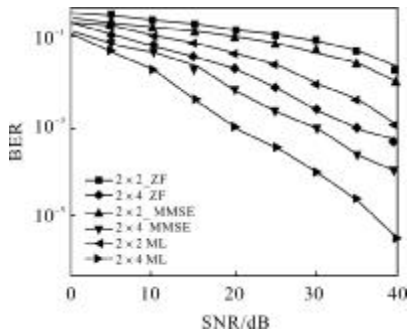


图 11 LDPC+D-BLAST 系统的 2x2, 2x4 仿真图(S.I.=3)
Fig.11 Simulation diagram of 2x2, 2x4 with LDPC+D-BLAST system(S.I.=3)

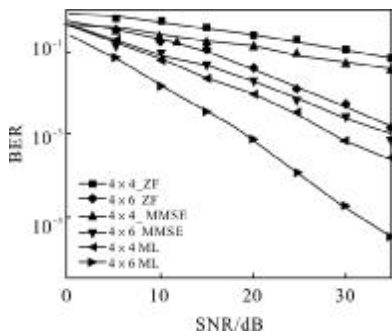


图 12 LDPC+D-BLAST 系统的 4x4, 4x6 的仿真图(S.I.=3)
Fig.12 Simulation diagram of 4x4, 4x6 with LDPC+D-BLAST system(S.I.=3)

(2) LDPC+T-BLAST 系统

图 13 和图 14 为在闪烁因子 $S.I.=0.6$ 时的系统仿真结果^[16],也就是 LDPC+T-BLAST 系统在弱湍流情况下的误码率与信噪比的曲线。可以看出:与 LDPC+D-BLAST 系统相似,在弱湍流的情况下,两发多收的系统在信噪比为 30 dB 时的误码率接近 10^{-6} ,比 LDPC+D-BLAST 系统的误码率略小,这是

因为对角分层空时编码的性能要优于螺旋分层空时编码。但在四发多收的系统中,信噪比只要 25 dB 就能获得接近 10^{-6} 的误码率。这说明增加收发天线数目可以使系统的性能得到明显改善。

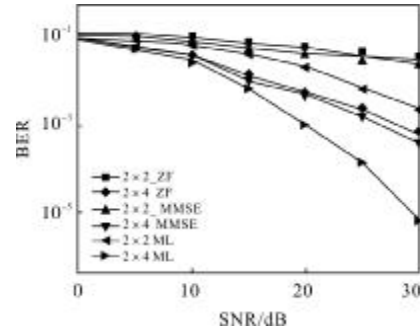


图 13 LDPC+T-BLAST 系统的 2x2, 2x4 的仿真图(S.I.=0.6)

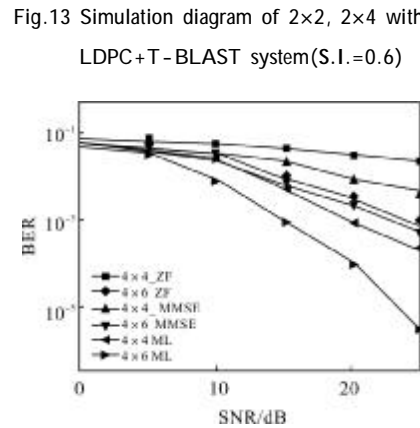


图 14 LDPC+T-BLAST 系统的 4x4, 4x6 的仿真图(S.I.=0.6)
Fig.14 Simulation diagram of 4x4, 4x6 with LDPC+T-BLAST system(S.I.=0.6)

图 15 和图 16 在闪烁因子 $S.I.=1$ 时的系统仿真结果^[16],也就是 LDPC+T-BLAST 系统中强湍流情况下的误码率与信噪比的曲线。可以看出:大气湍流的强度会在一定程度上影响系统的性能,在两发多

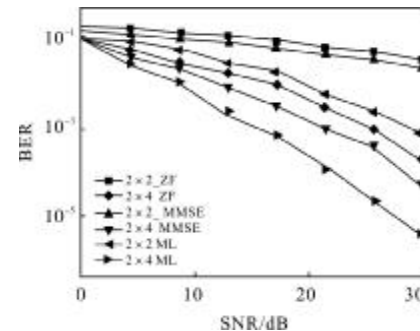


图 15 LDPC+T-BLAST 系统的 2x2, 2x4 的仿真图(S.I.=1)
Fig.15 Simulation diagram of 2x2, 2x4 with LDPC+T-BLAST system(S.I.=1)

收的系统中需要增加信噪比才能获得弱湍流情况下的最小误码率 (图 15); 中强湍流下信噪比为 35 dB 时系统的误码率接近 10^{-6} 。在四发多收的系统中误码率也有所增大, 增加信噪比到 30 dB 时误码率能下降至 10^{-6} 左右。

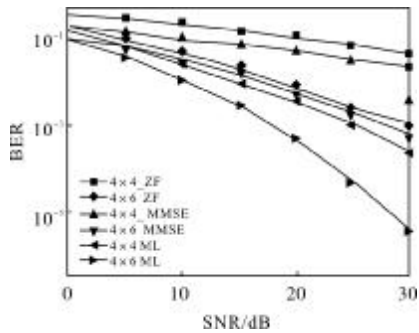


图 16 LDPC+T-BLAST 系统的 4x4, 4x6 的仿真图(S.I.=1)

Fig.16 Simulation diagram of 4x4, 4x6 with LDPC+T-BLAST system(S.I.=1)

图 17 和图 18 为在闪烁因子 $S.I.=3$ 时的系统仿真结果^[16], 也就是 LDPC+T-BLAST 系统在强湍流情况下的误码率与信噪比的曲线。可以看出: 强湍流

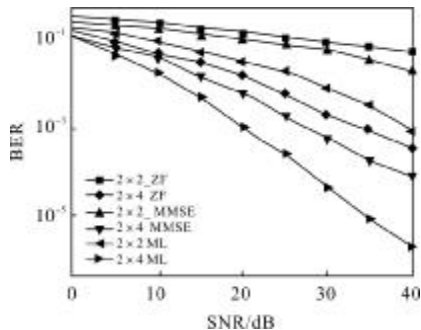


图 17 LDPC+T-BLAST 系统的 2x2, 2x4 的仿真图(S.I.=3)

Fig.17 Simulation diagram of 2x2, 2x4 with LDPC+T-BLAST system(S.I.=3)

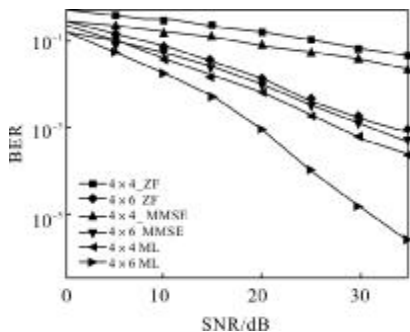


图 18 LDPC+T-BLAST 系统的 4x4, 4x6 的仿真图(S.I.=3)

Fig.18 Simulation diagram of 4x4, 4x6 with LDPC+T-BLAST system(S.I.=3)

情况下系统的性能变差了很多, 同样的信噪比下的误码率值有所增加。在信噪比为 25 dB 时两发多收系统的误码率由 10^{-4} 增加到 10^{-3} , 而 4x4 系统的误码率由 10^{-5} 增加到 10^{-4} 。为了改善强湍流对系统的影响需要增加系统的发射功率, 也就是增加信噪比; 在两发多收系统中信噪比需要增加到 40 dB 时, 系统的误码率接近 10^{-6} , 而四发多收系统的信噪比则需要增加到 35 dB。

LDPC 码的加入虽然增加了系统的复杂度, 但 LDPC+BLAST 系统的误码率明显下降。说明 LDPC 码能够很明显地改善系统的误码率, 使该系统优于单一的 BLAST 系统。弱湍流下在信噪比为 30 dB 时, 两发多收系统的误码率从 10^{-4} 降到 10^{-6} , 说明加入 LDPC 编码的系统能够更好的克服噪声对系统的干扰, 提高系统传输信息的可靠性。并且误码率随着信噪比的不断增加, LDPC-BLAST 系统的误码率 (BER) 曲线的下降曲线的斜率很大, 说明误码率的下降的速度快。

3 结束语

空时编码技术结合了信道编码与分集技术, 获得分集增益, 成为宽带移动通信系统中传输高速数据的有效编码方案。级联编码是近年来广泛采用的提高系统纠错能力以逼近香农限的高效编码方式^[18], 构造了 RS 码级联空时码和 LDPC 码级联空时码, 与参考文献[19-20]不同的是笔者将系统拓展到了 4x4, 4x6。级联空时码在不同的大气湍流环境下, 都能提高系统的误码率。如何降低级联编码的运算复杂度, 提高运算效率, 是今后进一步需要研究的课题。

参考文献:

- [1] Li Jinghua. Research of PPM-based Reed-solomon concatenate codes modulation in optical wireless communications [J]. Optical Communication Technology, 2012, 8(4): 30-32. (in Chinese)
李精华. 无线光通信中 PPM 的 RS 级联编码调制研究[J]. 光通信技术, 2012, 8(4): 30-32.
- [2] Pan Yan, Pang Weizheng, Wang Xuehuan, et al. The algorithm for differential concatenated decoding based on Turbo coding[J]. Applied Science and Technology, 2006, 33(6): 57-59. (in Chinese)

- 潘岩, 庞伟正, 王学寰, 等. 基于 Turbo 码的差分级联译码算法[J]. 应用科技, 2006, 33(6): 57-59.
- [3] Wang Hua, Xiao Jianming, Kuang Jingming. Performances of P TCM Concatenating with RS Codes[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1999, 19(1): 67-71. (in Chinese)
王华, 肖建明, 匡镜明. RS 码和 P-TCM 级联性能[J]. 北京理工大学学报, 1999, 19(1): 67-71.
- [4] Wang Duanyi, Yue Guangxin. A new concatenated coding system using multilevel inner codes [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 1994, 17(1): 1-8. (in Chinese)
王端怡, 乐光新. 一种新的多级码级联编码系统 [J]. 北京邮电大学学报, 1994, 17(1): 1-8.
- [5] Li Ying, Guo Xudong, Wang xinmei. The design of serially concatenated space-time codes [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2005, 27(11): 54-58. (in Chinese)
李颖, 郭旭东, 王新梅. 串行级联空时码的设计 [J]. 电子与信息学报, 2005, 27(11): 54-58.
- [6] Forney G D. Coneatenated Codes [M]. Cambridge: MIT Press, 1966.
- [7] Tarokli V, Seshadri N, Calderbank A R. Space-time codes for high data rate wireless communication:pergormance criterion and codes construction [J]. IEEE Trans on IT, 1998, 44(2): 744-765.
- [8] Naguib A F, Tarokh V, Seshadri N, et al. A space-time coding modem for high-data-rate wireless communications [J]. IEEE Trans On J, SC, 1998, 16(2): 1462-1478.
- [9] Stefanov A, Duman T M. Turbo coded modulation for systems with transmit and receive antenna diversity [C]// Globecom, Rio De, Janeiro, Brazil, 1999: 2336-2340.
- [10] Hsuai-JungSu, Geraniotis E. Spaee-time turb Code swith full antenna diversity [J]. IEEE Trans On Communications, 2001, 49(1), 47-57.
- [11] Xu Jianwu, Wang Hongxing. A cascade space-time coding method based on TPC and OSTBC in FSO communication systems [J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(10): 1596-1601. (in Chinese)
徐建武, 王红星. 无线光通信中一种 TPC+ OSTBC 的级联空时编码方法[J]. 电讯技术, 2012, 52(10): 1596-1601.
- [12] Wang Huiqin, Cao Minghua, Jia Kejun. Concatenated space-time block code in atmosphere laser communication [J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(12): 116-121. (in Chinese)
王惠琴, 曹明华, 贾科军. 大气激光通信中的级联空时分组码[J]. 光电工程, 2010, 37(12): 116-121.
- [13] George C, Clark Jr. Error-Correction Coding for Digital Communications[M]. US: Plenum Press, 1981.
- [14] Yuan Dongfeng, Zhang Lijun. A theoretical method for estimating the performance of concatenated codes in Rayleigh fading channel [J]. Journal on Communications, 2000, 21(10): 86-89. (in Chinese)
袁东风, 张立军. 一种在 Rayleigh 信道中计算级联码性能的理论方法[J]. 通信学报, 2000, 21(10): 86-89.
- [15] Wang Huiqin. Research of space-time code in atmosphere laser communication [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010. (in Chinese)
王惠琴. 大气激光通信中空时编码技术的研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2010.
- [16] Li Ting. The research on layered space-time code for FSO system [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012, (in Chinese)
李婷. 分层空时编码在无线激光通信中的仿真研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2012.
- [17] Wilson S G, Brandt-Pearce M, Cao Q. Optical MIMO transmission with Q-ary PPM for atmosphere channel [J]. IEEE Transactions Communications, 2004, 53(8): 1090-1094.
- [18] Xiao Haiwei, Wang Yang, Zhang Jiliang, et al. Concatenated coding based on LDPC codes and super quasi-orthogonal STBC [J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(9): 2122-2125. (in Chinese)
肖海微, 汪洋, 张继良, 等. 基于 LDPC 码与星座旋转准正交 STBC 的级联编译码方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(9): 2122-2125.
- [19] Choi C S, Shin J H. Construction and performance analysis of thecombined system of STBC and LDPC code achieving data rate [J]. Coding and Information Theory Lab, 2007, 43(2): 1763-1768.
- [20] Futaki H, Ohtsuki T. LDPC-based space-time transmit diversity schemes with multiple transmit antennas[C]//Proc of the 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, 2003: 2589-2593.