

宽带无线通信中的MIMO系统

付卫红, 杨小牛, 刘乃安, 曾兴雯

(西安电子科技大学ISN国家重点实验室 西安 710071)

【摘要】介绍了多入多出系统中的空时、空频编码技术,并在此基础上将OFDM技术与MIMO系统相结合,研究了STBC-OFDM、SFBC-OFDM及VBLAST-OFDM系统。对该系统性能进行了分析和仿真,结果表明VBLAST系统传输速率最高,其速率至少是分组码MIMO-OFDM系统的2倍,但是其误码性能相对较差,误码率为0.001时,VBLAST-OFDM系统所需的信噪比比分组码系统要高9.3 dB。

关键词 多输入多输出; 正交频分复用; 空频编码; 空时编码
中图分类号 TN914 文献标识码 A

MIMO Systems in Wideband Wireless

FU Wei-hong, YANG Xiao-niu, LIU Nai-an, ZENG Xing-wen

(State Key Lab. of Integrated Service Networks, Xidian University Xi'an 710071)

Abstract This paper introduces the space-time coding and the space-frequency coding technologies of a Multi-Input and Multi-Output(MIMO) system. We combine the Orthogonal Frequency divided Multiplex (OFDM) with MIMO system and research on several MIMO-OFDM systems, for example, Space-Time Block Coding (STBC) OFDM system, Space-Frequency Block Coding(SFBC) OFDM system, and Vertical Bell Laboratories Layered Space Time (VBLAST)-OFDM system. Analysis and simulation of these MIMO-OFDM systems' performance are examined. The results show that the data rate of the VBLAST-OFDM system is the highest, which is at least the twice as high as that of the STBC-OFDM or SFBC-OFDM system. However Bit Error Rate(BER) performance of the VBLAST-OFDM system is worse than that of the others. When BER is equal to 0.001, the required signal-noise ratio for VBLAST-OFDM system is 9.3dB more than that for the STBC or SFBC and OFDM system. On the other hand, the complexity of the VBLAST-OFDM system is higher than that of the STBC or SFBC and OFDM systems.

Key words multi-input multi-output; orthogonal frequency divided multiplex; space-frequency block coding; space-time block coding

为进一步增加无线通信系统容量,人们提出了多入多出(MIMO)系统。MIMO系统可在不增加系统带宽的情况下改善系统性能,提高数据速率。一般MIMO系统的研究主要集中在窄带无线信道环境即平坦衰落信道中。MIMO在一定程度上可以抗多径衰落,但对频率选择性衰落MIMO依然无力。目前对数据速率的要求越来越高,在数据通过多径信道传输时容易引起符号间干扰,即发生频率选择性衰落。解决MIMO系统中的频率选择性衰落问题,可引入正交频分复用(OFDM)技术。

OFDM技术可将频选衰落转化成平坦衰落,用在窄带平坦衰落信道中的MIMO技术就可用在宽带的频选衰落信道中。将MIMO与OFDM技术相结合,可以充分利用两者的优势,而又互相弥补不足。一方面,MIMO-OFDM系统不仅有很高的频谱利用率,

而且在OFDM基础上合理地开发了空间资源,可以提供更高的数据速率,提高系统容量,改善系统性能;另一方面,增加了OFDM调制技术的MIMO系统在抗多径方面表现出很大的优势,使得MIMO系统在频率选择性衰落信道中也能起作用。

1 MIMO系统中的空时编码技术

MIMO系统是在发射端和接收端同时安装多个天线的一种空间分集系统。MIMO是无线通信智能天线技术领域的重大突破,它能在不增加系统带宽的情况下成倍地提高通信系统容量和频谱利用率,将是新一代无线通信系统采用的关键技术。MIMO系统容量随着天线数目的增加成线性增加^[1],系统中的关键技术之一是空时编码技术,它在空间和时间两维方向上对信号进行编码。

收稿日期:2005-06-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60672038)

作者简介:付卫红(1979-),女,博士生,讲师,主要从事无线通信、信号处理方面的研究。

1.1 空时网格码(STTC)

文献[2]提出空时网格码, 空时编码系统中, 接收端解码需要多维向量维特比译码算法。空时网格码设计的码子在不损失带宽效率的前提下, 可提供一定的编码增益和分级增益。

考虑 M 个发射天线, N 个接收天线的MIMO系统。设每一个输入符号 s_l 通过空时编码器后产生 N 个码子符号 $c_{l_1}, c_{l_2}, \dots, c_{l_N}$, 它们同时从 N 个发射天线发送出去。定义码子向量 $c_l = [c_{l_1}, c_{l_2}, \dots, c_{l_N}]^T$ 。假设码子向量序列 $C = [c_1, c_2, \dots, c_L]$ 被发送。解码器解码出的错误码子序列 $\bar{C} = [\bar{c}_1, \bar{c}_2, \dots, \bar{c}_L]$, 定义 $N \times N$ 的错误矩阵 $A(C, \bar{C}) = \sum_{l=1}^L (c_l - \bar{c}_l)(c_l - \bar{c}_l)^*$, 如果在接收端可获得理想的信道状态信息 $H(l), l=1, 2, \dots, L$, 则发送码子为 C 时, 接收端解码出的码子为 \bar{C} 的概率上限为:

$$P(C \rightarrow \bar{C}) \leq \left(\prod_{i=1}^r \beta_i \right)^{-M} (E_s / 4N_0)^{-rM} \quad (1)$$

式中 E_s 是符号能量; N_0 是噪声功率谱密度; r 是错误矩阵 A 的秩; β_i 是错误矩阵 A 的非零特征值; g_r 表示系统通过空时码获得的编码增益 $(\prod_{i=1}^r \beta_i) = g_r$; $(E_s / 4N_0)^{-rM}$ 则表示系统获得的分集增益为 rM , 一般 $r < N$, 故空时编码系统可获得的分集增益小于等于 $M \times N$ 。因此在设计空时网格码过程中, 要求设计出来的码子 r 最大, 从而最大化分集增益, 同时要求 g_r 最大, 从而最大化编码增益。这就是空时网格码的设计准则。

1.2 空时分组码(STBC)

空时分组码虽然能获得很大的编码和分集增益, 但由于在接收端采用维特比译码, 其译码复杂度随着天线数和格码状态数的增加成指数增加, 实际中应用有些困难, 这就有了空时分组编码的出现。

空时分组码根据码子的正交原理构造空时码子。空时分组码提出了用两个发射天线的空时分组码机制^[3], 该机制支持最大似然检测算法。正是由于码子行列之间的正交性, 在接收端只需做简单的线性处理即可解码出原始数据。该码子设计机制后来被文献[4]推广到任意天线数的情况。空时分组码子的设计原则就是要求设计出来的码子各行各列之间满足正交性, 如当发射天线数为2、3时(考虑复信号星座点), 设计出来的空时分组码的码子分别为:

$$\zeta_{c_2} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2^* & x_1^* \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\zeta_{c_3} = \begin{bmatrix} x_1 - x_2 - x_3 - x_4 & x_1^* - x_2^* - x_3^* - x_4^* \\ x_2 & x_1 & x_4 & -x_3 & x_2^* & x_1^* & x_4^* & -x_3^* \\ x_3 & -x_4 & x_1 & x_2 & x_3^* & -x_4^* & x_1^* & x_2^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

因此可以看出, 当信号星座集是复数时, 只有发射天线数为2时, 设计出来的码子各行各列之间都满足正交性, 码子编码速率为1, 即表示两个天线的MIMO系统在单位时间内传输的符号数为1。而在发射天线数为3、4等其他值时, 设计出来的码子只有各行之间满足正交性, 而且码子的编码速率小于1, 式(2)~(3)中发射天线数为3的码子编码速率等于1/2)。当然, 在信号星座集是实数时(如BPSK调制时), 发射天线数为2、4、8等数值时, 总能设计出各行各列都正交的空时分组码, 而且编码速率为1。

1.3 分层空时码(BLAST)

分层空时码(BLAST)是由贝尔实验室提出的一种MIMO系统的空时编码技术。分层空时码有对角分层空时码D-BLAST和垂直分层空时码V-BLAST, 本文要讨论的是处理起来比较简单的V-BLAST系统。它在发射端进行空时编码时, 只做简单的串并变换, 然后在各个发射天线上同时传输不同的数据符号。在接收端, 采用迫零加符号取消信号检测算法将各个天线上发送的信号分离并检测出来^[5]。

2 MIMO-OFDM系统

下面将讨论用在宽带频率选择性衰落信道中的MIMO系统, 即MIMO-OFDM系统。OFDM系统能将频选衰落信道转化成平坦衰落信道, 因此传统MIMO系统空间处理技术就能用在频选衰落信道中的MIMO-OFDM系统中。前面讨论的三种空时编码技术都是在空域和时域两维方向上进行编码, 引入OFDM后, 由于OFDM是一个多载波的调制技术, 也可以将频域和时域结合起来联合编码, 即空频编码。同样为了简单, 可以仿效空时分组码的原理, 进行空频分组编码。空频分组码的编码原理、解码算法和空时分组码类似, 都是采用最大似然检测算法, 本文不再赘述。

MIMO-OFDM系统可分为: 空时分组码(STBC)OFDM、垂直分层空时码(VBLAST)OFDM、空频分组码(SFBC)OFDM和空时网格码(STTC)OFDM系统。本文主要讨论前三种系统。

2.1 STBC-OFDM系统

下面介绍STBC-OFDM系统的工作原理和过程, 以两发两收系统为例。STBC-OFDM系统原理框图如图1所示。图中系统发射端信号经过编码映射

后,再经过串并变换,如果OFDM调制时的子载波数是 M ,则输入信号经过 $1/M$ 的串并变换,变成含有 M 个元素的向量序列 $X(n)$ 。根据空时编码原理^[1],将向量序列进行空时编码后对每一个天线上要发送的信号进行OFDM调制,并通过多个天线发送出去(本例是两个天线)。这时的空时码子如式(2)~(3)所示,即空时编码器同时取两个数据向量 $X(n)$ 、 $X(n+1)$,并以如下方式传输:天线1在时刻 t 传输 $X(n)$,时刻 $t+T_s$ 传输 $-X^*(n+1)$ 。天线2在时刻 t 传输 $X(n+1)$,时刻 $t+T_s$ 传输 $X^*(n)$ 。 $X(n)$ 和 $X(n+1)$

分别表示第 n 、 $n+1$ 个OFDM符号,它们是包含 M 个元素的向量,每个元素对应一个子载波; T_s 表示OFDM符号周期。空时码OFDM系统中的接收信号模型和一般的空时码相似,只是OFDM系统中编、解码的对象是向量,每一个向量中包含 M 个数据元素。因此在接收端对每个天线收到的信号进行OFDM解调,将解调后的信号送入空时解调器中,根据估计出的信道参数进行解码。其解码算法可用最大似然检测算法,因为发送端空时码子的正交性,在接收端使用最大似然检测算法可大大降低算法的运算复杂度。

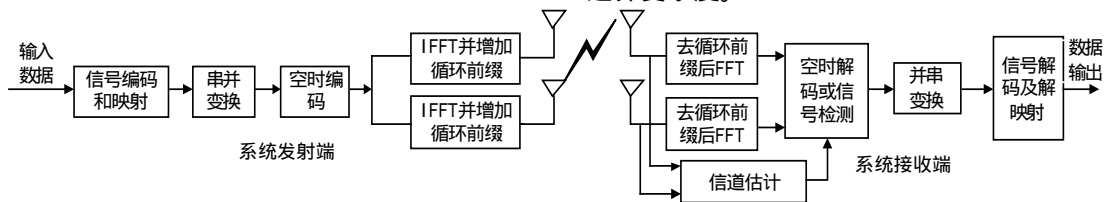


图1 STBC-OFDM系统原理框图

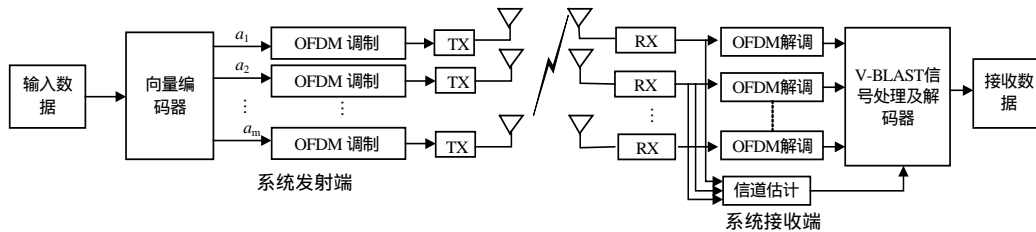


图2 VBLAST-OFDM系统框图

2.2 VBLAST-OFDM系统

设有 m 个发射天线、 n 个接收天线时VBLAST-OFDM系统框图如图2所示。图中系统发射端、输入数据经过向量编码器变换成 m 个子数据流,每一个子数据流被编码成符号串,经过OFDM调制之后送到各自的发射端发射出去。在该系统的接收端,各天线收到的信号经过OFDM解调后一起送入信号处理单元,并根据信道估计单元估计出的信道参数,检测出原始发送信号。VBLAST系统中采用的信号检测算法是迫零加符号取消的方法^[5],加了OFDM调制技术后,由于工作原理及过程相似,因此VBLAST-OFDM系统中的信号检测算法仍可以采用迫零加符号取消算法。

2.3 SFBC-OFDM系统

同样以两发两收系统为例。SFBC-OFDM系统框图与图1中所示的STBC-OFDM系统相似,只需将图1中的空时编、解码模块换成空频编、解码模块。输入信号经过编码和映射后,信号经过串并变换可进行空频编码,产生的码子被分配到不同的发射天线上,分别进行OFDM调制后发射出去。在接收端,接收信号通过OFDM解调后,根据信道估计获得的

信道参数进行空频解码,以获得原始数据。该系统中的解码算法也采用最大似然检测算法,其过程和原理与STBC-OFDM系统类似。

3 MIMO-OFDM系统的性能分析和仿真结果比较

由MIMO-OFDM系统编码规则可以看出,VBLAST-OFDM系统的数据速率最高,该系统中数据只做简单的串并变换,各天线上传输的信息没有冗余。而STBC-OFDM和SFBC-OFDM编码速率最多为1,此时各天线发送的数据有冗余,因此其数据速率最多只有VBLAST-OFDM系统的一半。系统传输速率和误码性能是一对矛盾,数据速率高了,误码性能必然恶化,故VBLAST-OFDM系统的误码性能比分组码OFDM系统的差。分组码OFDM系统接收时,只需作简单的线性操作,处理复杂度较低,而VBLAST系统中,信号检测算法采用迫零加符号取消的原则,算法复杂度较高。由于STBC-OFDM和SFBC-OFDM的编码原理和解码算法类似,其误码性能及总的传输速率条件相同时差别不大。

(下转第206页)

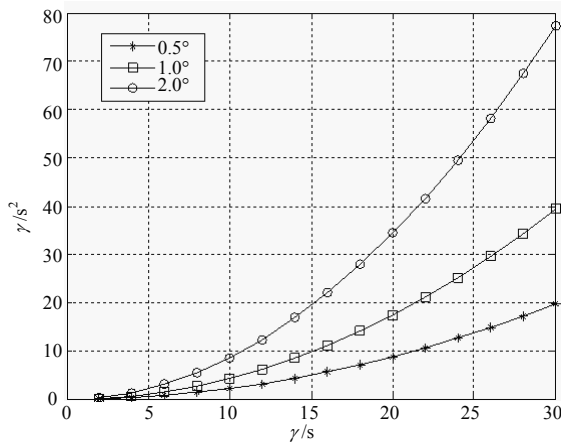


图7 角度解算精度、角速度与角加速度间的约束关系

(4) Δt_1 的测量可由控制系统中的单片机完成。由式(9)可知,在该段时间内,飞行体平均旋转角速度的最大值受 Δt_1 的测量精度的限制。

3 结论

本文对进动小、速度高的旋转飞行体进行较精确的姿态识别,并对其飞行轨道或落点的智能控制

(上接第178页)

图3是三种MIMO-OFDM系统的仿真结果,从图中可以看出在误码率为0.001时,VBLAST-OFDM系统所需的信噪比比两种分组码系统要高9.3 dB。从分析结果可以看出,三种MIMO-OFDM系统中,数据速率的提高是以系统误码性能和系统复杂度为代价的。因此在实际应用中可根据系统要求,选用不同的MIMO-OFDM系统,以在系统误码性能、数据速率、实现复杂度方面取得最佳平衡效果。

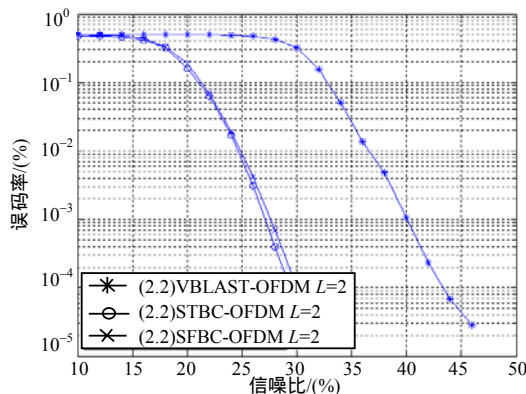


图3 不同MIMO-OFDM系统在相同仿真条件下的性能比较

4 结论

本文主要研究了三种MIMO-OFDM系统,并对

进行了研究。该方法实现的电路系统成本低、体积小、抗过载能力强,在航空、特种侦察和高新技术弹药研制等领域具有潜在的应用价值。

参考文献

- [1] 王颂康,朱鹤年. 高新技术弹药[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1997.
- [2] 舒金龙,陈良瑜,朱振福. 末制导炮弹的研究现状与发展趋势[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(4): 443-446.
- [3] 韩秀容,王泉水. 灵巧炮弹的发展[J]. 舰载武器, 1997, (4): 24-28.
- [4] 汪 渤,石永生,宫德晶,等. 姿态稳定用双轴陀螺仪[J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(3): 390-392.
- [5] 薛文胜. 浅析几种新型陀螺的发展动态[J]. 电子科技大学学报, 1995, 24(5): 485-489.
- [6] 史金光,王中原,刘 巍,等. 简易控制修正力技术研究[J]. 弹道学报, 2006, 18(1): 14-17.
- [7] 5, 896, 106. Method for determining the roll attitude of a rolling flying object[P]. United States Patent, 1999.
- [8] 4, 742, 356. Method and apparatus for determining remote object orientation and position[P]. United States Patent, 1988.

编辑 黄 莘

其性能进行了仿真和分析比较,结果表明VBLAST系统传输速率最高,其速率至少是分组码MIMO-OFDM系统的2倍。但是其误码性能相对较差,误码率为0.001时,VBLAST-OFDM系统所需的信噪比比分组码系统要高9.3 dB,另外VBLAST-OFDM系统的运算复杂度也较高。

参考文献

- [1] FOSCHINI G J, GANS M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. Wireless Personal Commun, 1998, 6(3): 311-335.
- [2] 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, 1998, 44(3): 744-765.
- [3] ALAMOUTI S. Space block coding: A simple transmitter diversity technique for wireless communications[J]. IEEE J. Select. Areas. Commun., 1998, 16(10): 451-458.
- [4] TAROKH V, JAFARKHARI H, CALDERBANK. A R space-time block codes from orthogonal designs[J]. IEEE Trans. Inform Theory, 1999, 45(7): 1456-1467.
- [5] GOLDEN G D, FOSCHINI C J R A. Valenzuela detection algorithm and initial laboratory results using V-blast space-time communication architecture[J]. Electronics Letters, 1999, 35(1): 14-16.

编辑 刘文珍