

# 一种基于直扩码分多址系统的复信号空时扩频算法

卢 昉, 朱世华, 姚一佳

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

**摘要:** 基于直扩码分多址系统下行链路, 提出了一种针对复信号的空时扩频算法. 该算法采用发射分集技术, 将空时分组编码与直接序列扩频相结合, 依靠空时分组码和扩频码的双重正交特性以及复信号自身的特性, 充分利用了空域和时域资源设计出新的收、发和解码算法, 解决了复信号空时分组编码非正交所导致的解码复杂度过高的问题, 将最大似然检测简化为一个线性过程. 在独立瑞利衰落信道和给定收、发天线数的条件下, 能够实现系统所能达到的最大的分集增益. 理论分析及仿真结果表明, 与未加扩频的发射分集系统及现有的空时扩频算法相比, 该算法不仅能够显著提高数据传输速率, 增大系统容量, 还具有误码性能好, 解码复杂度低、接收机结构简单等优点.

**关键词:** 空时分组编码; 发射分集; 空时扩频; 码分多址

**中图分类号:** TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)06 - 0615 - 04

## New Space-Time Spreading Scheme of Complex Signals Based on Direct Sequence Code Division Multiple Access

Lu Fang, Zhu Shihua, Yao Yijia

(School of Electronics and Information Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China)

**Abstract:** A new scheme of space-time spreading of complex signals based on the downlink of direct sequence code division multiple access (DS-CDMA) systems is presented. Using transmit diversity techniques, the new scheme combines the space-time block code (STBC) with spreading codes. Depending on the characteristic of complex signals and the dual orthogonality of STBC and spreading codes, the scheme can utilize the resources of space and time efficiently, and it transfers the maximum-likelihood detection into a linear processing with a simplified decoding process to resolve the high complexity problem caused by the unorthogonality of the complex signal STBC. Over independent Rayleigh fading channels, this scheme can achieve the maximum possible diversity gain for a given number of transmit and receive antennas. Theoretical analysis and simulation results show that the proposed scheme outperforms the systems of transmit diversity without spreading and existing space-time spreading algorithms in terms of transmission rate, system capacity, bit error rate performance and implementation complexity.

**Key words:** space-time block coding; transmit diversity; space time spreading; code division multiple access

基于发射分集的空时分组编码 (Space-Time Block Coding, STBC) 技术可有效提高数据发送速率, 增大系统容量<sup>[1,2]</sup>, 其在直扩码分多址 (DS-CDMA) 系统中的应用日益受到关注. 文献[3] 针对

实信号系统及发送天线数为 2 的复信号系统提出了空时扩频 (Space-Time Spreading, STS) 算法, 而对于发射天线数大于 2 的复信号系统并未设计出可行的算法. 针对此局限, 本文提出了一种复信号空时扩

收稿日期: 2003 - 10 - 08. 作者简介: 卢 昉 (1979 ~), 女, 硕士生; 朱世华 (联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60372055; 60202007); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20020698024).

频(Complex Space-Time Spreading, C-STSS)算法,有效地解决了复信号空时分组编码在发射天线数大于2时因非正交性而导致的解码复杂度高的问题。

## 1 系统模型

考虑一个发射分集系统,采用  $N$  个发送天线,  $K$  个接收天线.若  $N$  个发射天线同时发送数据,则  $t$  时刻在接收天线  $j$  处的接收信号为<sup>[1,2]</sup>

$$r_t^{(j)} = \sum_{i=1}^N h_{i,j} c_t^{(i)} + n_t^{(j)} \quad (1)$$

式中:  $c_t^{(i)}$  ( $i=1, \dots, N$ ) 为在时间间隔  $t$  沿第  $i$  个发射天线发射的信号;  $h_{i,j}$  ( $i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, K$ ) 为发射天线  $i$  到接收天线  $j$  的复信道增益,其实部和虚部均服从均值为0、方差为0.5的高斯分布;  $n_t^{(j)}$  为  $t$  时刻在接收天线  $j$  处叠加的高斯白噪声.各收、发天线间为相互独立的 Rayleigh 平坦慢衰落信道,在一个数据分组发送周期信道增益不变,但在不同分组间改变.

假设  $b_i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) 为待发送数据,基于正交设计的空时分组编码矩阵  $B$  必须满足正交条件

$B^H B = I$ , 其中  $I = \sum_{i=1}^N |b_i|^2$ . 发射天线数  $N=4$  的实正交设计的空时分组编码矩阵为

$$B = \begin{bmatrix} b_1 & -b_2 & -b_3 & -b_4 \\ b_2 & b_1 & b_4 & -b_3 \\ b_3 & -b_4 & b_1 & b_2 \\ b_4 & b_3 & -b_2 & b_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$B$  的发送速率  $R=1$ .

发射天线多于2根时的复正交设计,必须依靠牺牲发送速率来保持编码的正交性<sup>[1]</sup>.发射天线数为4的复正交设计空时分组编码矩阵为  $C = [B \ B]^T$ , 发送速率  $R=1/2$ .

## 2 复信号空时扩频系统

考虑单用户基带 DS-SS-CDMA 发射分集系统,采用4根发射天线,在两个连续的符号周期内将待发送的4个复信号  $b = [b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4]^T$  发出.在第1个发送周期内,首先将待发送数据  $b$  按式(2)进行空时分组编码;然后,对于沿不同的发射天线及在不同的发射周期内发送的信号进行空时扩频.所采用的4个不同的归一化正交扩频码序列  $C = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4]$  满足  $C_i^H C_j = \delta_{ij}$  ( $i, j=1, 2, 3, 4$ ).空时扩频后得到发送矩阵

$$S_1 = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4]$$

$$B = \begin{bmatrix} (C_1 b_1 + C_2 b_2 + C_3 b_3 + C_4 b_4)^T \\ (-C_1 b_2 + C_2 b_1 - C_3 b_4 + C_4 b_3)^T \\ (-C_1 b_3 + C_2 b_4 + C_3 b_1 - C_4 b_2)^T \\ (-C_1 b_4 - C_2 b_3 + C_3 b_2 + C_4 b_1)^T \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

矩阵  $S_1$  的第  $i$  个元素 ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 是4个待发送符号经不同的正交扩频码扩频后的线性组合信号,从第  $i$  个天线发射出去,4个组合信号在一个符号周期内分别沿不同的发射天线同时发送.

在第2个发送周期,将待发送的数据取共轭,得到  $b^* = [b_1^* \ b_2^* \ b_3^* \ b_4^*]^T$ ,然后将  $b^*$  作为待发送数据,重复第一个发送周期的空时编码和空时扩频的步骤,得到发送矩阵

$$S_2 = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4] B^* \quad (4)$$

将这4个组合信号在第2个符号周期内分别沿不同的发射天线同时发送出去.

假定收、发天线间为 Rayleigh 平坦慢衰落信道,故在2个连续发送周期内发送的信号经过相同的信道衰落到达接收机.考虑单接收天线,接收周期  $i, i=1, 2$ , 的接收信号为

$$r_i = S_i h + n_i \quad (5)$$

式中:  $h = [h_1 \ h_2 \ h_3 \ h_4]^T$  为信道系数向量,  $h_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 是发射天线  $i$  到接收天线的复信道增益;  $n_1, n_2$  为接收端叠加的高斯白噪声.

将2个接收信号针对4个不同的正交扩频码分别进行解扩,得到

$$d^{(1)} = (d_1^{(1)} \ d_2^{(1)} \ d_3^{(1)} \ d_4^{(1)})^T = H b + n_1 \quad (6)$$

$$d^{(2)} = (d_1^{(2)} \ d_2^{(2)} \ d_3^{(2)} \ d_4^{(2)})^T = H b^* + n_2 \quad (7)$$

式中:  $d_i^{(j)} = r_j^T C_i$ ;  $n_j = r_j^T C$ ;  $i=1, 2, 3, 4; j=1, 2$ ;

$$H = \begin{bmatrix} h_1 & -h_2 & -h_3 & -h_4 \\ h_2 & h_1 & -h_4 & h_3 \\ h_3 & h_4 & h_1 & -h_2 \\ h_4 & -h_3 & h_2 & h_1 \end{bmatrix} \text{ 为信道矩阵.}$$

对2个解扩后的信号分别进行相关接收,相关矩阵为信道矩阵的共轭转置,得到

$$Y_1 = H^H d^{(1)} = H^H H b + n_1 \quad (8)$$

$$Y_2 = H^H d^{(2)} = H^H H b + n_2 \quad (9)$$

式中:  $n_j = H^H n_j$  ( $j=1, 2$ );  $H^H H = \sum_{i=1}^4 |h_i|^2 I + Q$

其中  $Q$  是对角元全为0、非对角元均为纯虚数的矩阵,它是由信道矩阵  $H$  的非正交性引入的.信道矩阵的非正交在同一用户的不同发射天线之间引入自干扰,从而使得最大似然检测不能简化为一个线性过程.此外,由于发送信号为复信号,  $Y_1, Y_2$  的实

部和虚部均包含了用于恢复发送数据的有用信息,从而无法像文献[3]中的实信号空时扩频系统那样简单地对式(8)、式(9)取实部,即无法在不损失任何有用信息的前提下完全消除同一用户多天线间的自干扰项。

针对上述问题,本文利用复信号的特点,提出了一种可有效消除天线间自干扰项的检测算法,如图1所示。

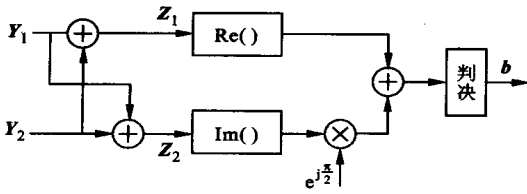


图1 C-STS系统解码算法框图

将解相关信号  $Y_1$  和  $Y_2$  联合处理,并分别对发送信号的实部和虚部进行恢复,得到

$$\text{Re}(Y_1 + Y_2) = 2 \sum_{i=1}^4 |h_i|^2 \text{Re}(b) + n_1''' \quad (10)$$

$$\text{Im}(Y_1 - Y_2) = 2 \sum_{i=1}^4 |h_i|^2 \text{Im}(b) + n_2''' \quad (11)$$

式中:  $n_1''' = \text{Re}(n_1 + n_2)$ ;  $n_2''' = \text{Im}(n_1 - n_2)$ 。

由式(10)和式(11)看出,如上所述的检测方案可以在不明显增加系统复杂度的基础上,完全消除多天线间的自干扰,分别得到关于发送信号实部和虚部的判决变量,系数均为  $2 \sum_{i=1}^4 |h_i|^2$ ,服从自由度为8的  $\chi^2$  分布,实现的最大分集增益为4。将式(10)、式(11)合并为一个复信号向量作为对发送数据的判决变量,采用最大似然检测<sup>[3]</sup>,即可恢复发送数据。

当有  $K > 1$  个接收天线时,每个接收天线独立地进行如上的操作,然后将各接收天线对发送数据的判决变量进行最大比合并(MRC)<sup>[3]</sup>,采用最大似然检测<sup>[4]</sup>即可恢复发送数据。

### 3 性能分析

假设采用  $N$  个发送天线,  $K$  个接收天线,根据式(10)、式(11),将关于发送信号实部和虚部的判决变量合并为一个复信号,得到发送信号的判决变量

$$Y = 2 \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^N |h_{i,j}|^2 b + n \quad (12)$$

式中:  $h_{i,j}$  为发射天线  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 到接收天线  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, K$ ) 的复信道增益,其实部和虚部均是均值为0、方差为  $\frac{2}{h}$  的独立同分布高斯变量;  $n$

为高斯白噪声,服从均值为0、方差为  $\frac{2}{h} = 2^{-2}$  的高斯分布,其中  $\frac{2}{h}$  为接收机端叠加的高斯白噪声的方差,  $n = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^N |h_{i,j}|^2$ ,服从自由度为  $2NK$  的  $\chi^2$  分布,其概率密度函数(PDF)为

$$p(\cdot) = \frac{1}{(\frac{2}{h})^{NK} 2^{NK} (NK)} e^{-n/2} \quad (13)$$

对于 Mpsk 信号,当  $M = 4$  时,误符号率的近似闭式形式的表达式为<sup>[5]</sup>

$$P_M = 2Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{n}} \sin(\pi/M)\right) \quad (14)$$

式中:  $E_s = 4^{-2}$  为每符号能量;  $Q(x) = \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ 。

关于  $P_M$  对误符号率求期望,并且根据  $Q$  函数的性质<sup>[6,7]</sup>,得到

$$P_e = \frac{1}{2^{NK-1}} \left[ 1 - (\Lambda^2 + 1)^{-\frac{1}{2}} \right]^{NK} \sum_{k=0}^{NK-1} 2^{-k} C_{NK-1+k}^k \left[ 1 + (\Lambda^2 + 1)^{-\frac{1}{2}} \right]^k \quad (15)$$

式中:  $\Lambda^2 = \frac{2}{h} \left( 2 \sum_{i=1}^4 |h_i|^2 \sin^2(\pi/M) \right)$ 。

根据 Varhid 计算分集增益的准则<sup>[1,2]</sup>,采用正交空时分组编码的 C-STS 算法,对于收、发天线数分别为  $N$  和  $K$  的收发系统,当收、发天线间存在的路径为相互独立的瑞利衰落信道时,可以获得系统所能实现的最大的分集增益  $N \times K$ 。

### 4 仿真结果

考虑单用户基带 DS-CDMA 系统,4 根发射天线,各收、发天线间为 Rayleigh 平坦慢衰落信道,采用扩频增益为 32 的 Hadamard 正交扩频码。

图2给出了发送数据分别采用 8PSK 和 QPSK 调制的 C-STS 算法在发送天线数为 4、接收天线数分别为 1、2、4 时的误码率曲线,由图可见仿真结果和理论分析结果完全符合。随着接收天线数增加,系统的最大分集增益增大,误码性能有明显的改善。对于单接收天线系统,当输入信噪比为 4 dB 时,8PSK 和 QPSK 调制的误码率分别达到了  $10^{-3}$  和  $10^{-4}$ ,故 C-STS 系统可采用单天线接收,这样既能够获得良好的误码性能,还可大大降低接收机的复杂度及成本。

图3是  $4 \times 1$  的 MIMO 系统中采用 8PSK 和 QPSK 调制时 C-STS 算法、未加扩频的发射分集(STBC)算法<sup>[1~3]</sup>、实信号空时扩频(STS)算法文献[3]提到的每个发射天线使用不同正交扩频码

的发射分集算法(SSDC)之间的误码性能比较.由图3可见,8PSK和QPSK调制的C-STC算法与相应的STBC算法的误码性能基本相同,但其发送速率是STBC算法的4倍,采用8PSK调制的C-STC算法的误码性能略优于STS和SSDC算法,且比特传输速率是STS算法的1.5倍、SSDC算法的6倍.

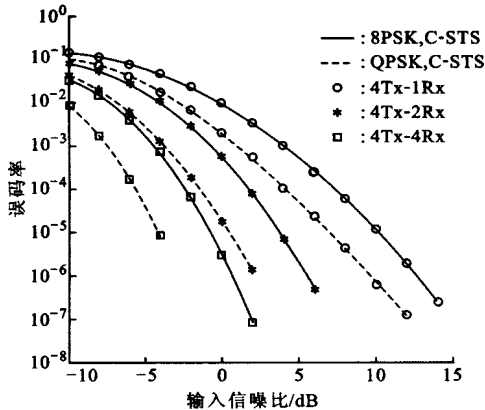


图2 8PSK和QPSK调制的C-STC算法的误码率曲线

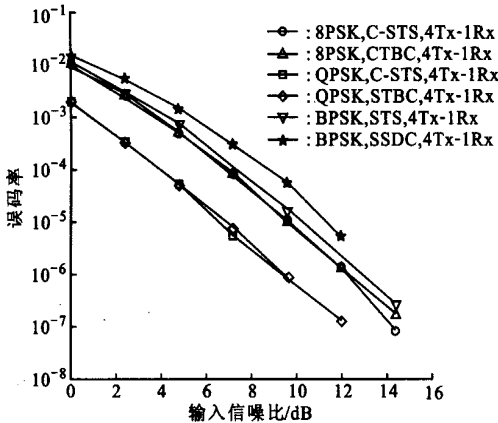


图3 C-STC算法与其他算法的误码性能比较

## 5 结论

本文针对DS-CDMA系统下行链路提出了一

种复信号空时扩频方案.该方案将空时分组编码与扩频技术有机结合,针对空时分组码和扩频码的双重正交特性以及复信号的自身特点,设计出新的收发机制,合理地利用了空域、时域及码域资源,实现了最大分集增益.理论分析及仿真结果表明,C-STC算法具有误码性能良好、数据传输速率高、系统实现复杂度低等优点.

## 参考文献:

- [1] Tarokh V, Jafakhani H, Calderbank A R. Space-time block codes from orthogonal designs [J]. IEEE Trans Inform Theory, 1999, 45(5): 1~3.
- [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(2): 1~6.
- [3] Hochwald B, Marzetta T L, Papadias C B. A transmitter diversity scheme for wideband CDMA systems based on space-time spreading [J]. IEEE J Select Areas Commun, 2001, 19(1): 1~5.
- [4] Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications [J]. IEEE J Select Areas Commun, 1998, 16(8): 3~5.
- [5] Proakis J G. Digital communications [M]. 4th ed. New York: McGraw Hill, 2001.
- [6] Li J J, Fan P Y, Cao Z G. Space time spreading in forward links of the multicarrier DS CDMA system[A]. Intl Conf on Info-tech and Infor-net, Beijing, 2001.
- [7] Verdu S. Multiuser detection [M]. London: Cambridge University Press, 1998.

(编辑 刘杨)

## [文摘预登]

### 一种智能混合优化策略及其应用

冯远静, 冯祖仁, 彭勤科

(西安交通大学系统工程研究所, 710049, 西安)

通过结合蚁群算法的并行搜索结构和模拟退火算法的概率突跳性,提出了一种有效的混合优化策略,并将该策略应用于FSP调度问题.在该策略中,蚁群系统的一个周游路线为模拟退火算法提供一系列初始解,在每个退火温度进行抽样准则检验并产生新解,然后更新信息激素;蚁群算法再利用模拟退火算法产生的新解进行并行搜索.同时,根据此策略构建并实现了针对FSP问题求解的具体混合算法.基于典型FSP问题的仿真结果表明,混合算法弥补了各自单一算法的缺点,增强了单一算法的全局搜索能力.与其他算法相比较,该算法在求解FSP调度问题上的性能要优于其他算法.