

# 分层空时码检测算法的研究

刘 宁, 李 颖, 王新梅

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 分层空时码技术是提高无线信道传输速率的一种十分有效的方法. 迫零检测算法和最小均方误差检测算法是分层空时码体制中经常使用的两种检测算法, 它们都使用了通常的线性合并置零技术, 因此要求接收天线数不小于发射天线数, 即要求在接收机上安装较多的天线, 从而限制了分层空时码在移动环境下的应用. 本文引入分层空时码的最大似然检测算法, 突破了前两种算法对接收天线数的限制, 并分别针对单路径和多径衰落信道环境, 对分层空时码的三种检测算法的性能进行了仿真比较和分析, 从而提出了它们各自适合的应用环境.

**关键词:** 分层空时编码; 迫零检测; 最小均方误差检测; 最大似然检测

**中图分类号:** TN911. 22 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12-1754-04

## The Research on the Detection Algorithms for Layered Space-time Codes

LIU Ning, LI Ying, WANG Xinmei

(National Key Lab. of Integrated Services Network, Xidian Univ., Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** Layered space-time (LST) architecture is effective in achieving high data rate in wireless communication. Zero Forcing (ZF) and Minimum Mean Squared Error (MMSE) algorithms are two common detection algorithms for LST codes. However, both ZF and MMSE require the number of receive antennas to be no less than that of transmit antennas, thus greatly limits the application of LST codes in mobile communication. In this paper we introduce Maximum Likelihood (ML) detection algorithm for LST codes, which has no limit on the number of antennas, and compare the performance of the three detection algorithms for layered space-time codes over flat fading and Rayleigh fading channel. Their applicability is then pointed out respectively.

**Key words:** layered space-time codes; zero forcing algorithm; minimum mean squared error algorithm; maximum likelihood detection

## 1 引言

分层空时码 (LST: Layered Space-Time code) 是由 Bell 实验室的 Foschini 提出的最早的空时编码模型<sup>[1]</sup>, 由于其在提高频带利用率方面的巨大潜力而受到广泛关注. 它作为在 MIMO 系统中实现高速无线分组业务的一种解决方案, 显示出良好的应用前景.

分层空时码和网格空时码 (STTC: Space-Time Trellis Codes)、分组空时码 (STBC: Space-Time Block Codes) 都属于要求接收端能够准确的估计信道特性的一类空时码. 与另两者相比, 分层空时码以部分分集增益为代价来换取高频带利用率. 可以证明<sup>[2]</sup>, 如果接收端可以准确地估计信道信息, 并保证不同发射接收天线对之间的衰落相互独立, 对于一个拥有  $N$  个发射天线和  $M$  个接收天线的系统, 分层空时码能达到的信道容量将随着  $\min(N, M)$  的增加而线性增加. 分层空时码是目前已知唯一一种可以使频带利用率随着天线数线性增加的编码方式, 这使它在高速无线通信中的应用有着非常大的优势.

由于分层空时码无法获得最大分集增益, 接收端在检测信号时选用的检测算法对提高整个系统性能至关重要. 文献 [3] 中比较了分层空时码的两种编码方式: 水平分层空时码和对角分层空时码的性能, 并介绍了它们使用的两种检测算法: 迫零检测算法 (ZF) 和最小均方误差检测算法 (MMSE). 本文在文献 [3] 的基础上引入了分层空时码的最大似然检测算法 (ML), 然后采用 3GPP 协议的信道模型对它们在多径衰落环境下的性能进行了仿真和分析, 并对三种检测算法的适用性作了比较, 最后给出了它们各自适合的应用环境.

## 2 分层空时码模型

一个有  $N$  个发送天线、 $M$  个接收天线的分层空时码系统模型如图 1 所示. LST 对信道编码器输出序列的处理实际是实现一种映射关系, 根据映射方式的不同, LST 一般可以分为水平分层空时码、垂直分层空时码和对角分层空时码, 本文仅考虑垂直分层空时码 (VLST: Vertical Layered Space-Time codes).

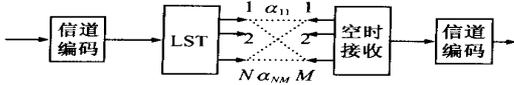


图 1 分层空时编码示意图

在平坦慢衰落信道下,第  $j$  个接收天线在时刻  $t$  收到的信号  $r_{jt} = 1, 2, \dots, M$  为:

$$r_{jt} = \sqrt{E_s} \sum_{i=1}^N A_{i,j} c_i + G \quad (1)$$

其中:  $A_{i,j}$  是均值为 0, 方差为 0.5 的复高斯随机变量;  $G$  是均值为 0, 方差为  $R^2 = N_0/2$  的复高斯随机变量;  $E_s$  为每个符号的能量. 为叙述方便, 以下讨论将忽略上标  $t$ . 并将式 (1) 写为矩阵形式:

$$r = Hc + G \quad (2)$$

其中:  $r = (r_1, r_2, \dots, r_M)$  是  $M$  维接收信号向量;  $c = (c_1, c_2, \dots, c_N)^T$  是  $N$  维发送信号向量;  $G = (G_1, G_2, \dots, G_M)^T$  是  $M$  维加性噪声向量;  $H$  为  $M \times N$  的信道矩阵.

LST 对信号序列的处理只是一种简单的串并转换且各天线发送的信号几乎是相互独立的, 所以接收端只能利用信道矩阵  $H$  提供的信息恢复信号. LST 三种检测算法各自提供了对信道矩阵的不同处理方法.

### 3 分层空时码的三种检测算法

#### 3.1 ZF 和 MMSE 检测算法

设  $S = \{k_1, k_2, \dots, k_N\}$  是整数  $1, 2, \dots, N$  的置换, 表示检测  $c$  的分量的顺序. 完整的检测算法可以描述为一个递推过程<sup>[1]</sup>. ZF 算法和 MMSE 算法都是根据某种性能准则 (ZF 或 MMSE) 对接收到的各子序列赋予不同的权值, 利用加权矢量消除乘性干扰. 不论 ZF 或 MMSE, 根本问题是如何根据接收信号和信道特性矩阵确定每个接收天线的权值, 不同的只是权值选取准则. 设接收端关于所有  $N$  个发送信号形成的权向量构成矩阵  $W = (w_1, w_2, \dots, w_N)^T$ . ZF 算法利用迫零准则选择  $N$  个  $M$  维迫零矢量  $w_k, k = 1, 2, \dots, N$ , 使其满足下式

$$w_k^T (H)_k = D_k = \begin{cases} 0, & j \neq k \\ 1, & j = k \end{cases} \quad (3)$$

即  $w_k$  必须正交于由  $r$  的各个未检测分量张成的子空间. 为了满足此条件, 在第  $k_i$  步对  $H$  取 Moore-Penrose 逆:  $G_k = H_{k_i}^{-1}$ . 其中  $H_{k_i}$  表示将  $H$  中的前  $k_i - 1$  列置零. 显然取  $G_k$  的第  $k_i$  行为  $w_k$ , 即可满足正交条件.

在 MMSE 检测算法中, 选择矩阵  $W$  时, 应该使均方误差  $E + c - Wr + 2$  最小, 此时有:

$$W_{MMSE} = H^* (HH^* + R^{-1})^{-1} \quad (4)$$

#### 3.1.2 最大似然(ML)检测算法

ML 译码在获得最小差错概率方面是最佳的. A. Stefanov 在文 [5] 中提出了一种在分组衰落信道下的 Turbo 码多天线的分集系统的 ML 译码方案. 该系统与以 Turbo 码作为外码的级联 VLST 基本结构相同, 因此其 ML 算法也可用于 VLST 的检测.

假设信号星座中共  $2^b$  个点, 星座符号集为  $\{c_i\}_{i=1}^{2^b}$ , 假设星座各信号点等概发送. 每时刻的发送符号向量为  $c = (c_1, c_2, \dots, c_N)$ . 在某时刻接收天线  $j$  共收到比特信息, 将其表示为  $b = (b_1, \dots, b_b)$ , 其中  $b_{(i-1)b+1}, \dots, b_{ib}$  表示第  $i$  根发射天线发送的星座点  $c_i, i = 1, 2, \dots, N$ .

由文 [5] 的推导可以得到在接收端用来判决  $b$  的第  $l$  比特信息的对数似然比

$$+(b_l) = \log \frac{\sum_{c, c=f(b), b_l=1} \prod_{j=1}^M \exp \left\{ - \left| r_{jt} - \sum_{i=1}^N A_{i,j} c_i \right|^2 / N_0 \right\}}{\sum_{c, c=f(b), b_l=0} \prod_{j=1}^M \exp \left\{ - \left| r_{jt} - \sum_{i=1}^N A_{i,j} c_i \right|^2 / N_0 \right\}} \quad (5)$$

其中  $f(b)$  为从  $b$  到  $c$  的映射. 利用式 (5) 得到的似然比对每一比特信息作判决即可检测出发送信号.

#### 3.1.3 三种检测算法的适用性比较

在 ZF 算法中, 为恢复第  $k_i$  个发送分量, 需满足式 (3) 的置零条件. 此条件通过求信道矩阵  $H_{M \times N}$  的 Moore-Penrose 广义逆  $H_{N \times M}^+$ ,  $H_{M \times N}^+$  并取的各行为权矢量  $w_k$  来满足. 此时正交条件相当于  $H_{N \times M}^+ H_{M \times N} = I_{N \times N}$ . 由于单位阵  $I_{N \times N}$  的秩  $R(I) = N$ , 同时  $R(I) = \min[R(H_{M \times N}^+), R(H_{M \times N})]$ , 所以  $H_{M \times N}$  必须为列满秩且  $M \geq N$ . 也就是说, 如果使用 ZF 检测算法, 要求接收天线数不能少于发送天线数. 通常在空时码体制中为取得高频带利用率, 发射天线往往在两根以上. 这意味着接收端也要有两根以上的天线. 然而由于接收天线半波长间距的限制, 在小巧的移动接收机上安装很多天线是不实际的. MMSE 算法也有类似限制条件. 因此目前分层空时码还仅限于分组数据业务中, 其在移动环境中的应用受到很大限制.

相比之下, 由式 (5) 可以看出, 利用 ML 算法检测信号并没有对接收天线数的限制. 当接收端只有一根天线时采用 ML 算法仍可以正确译码, 只是获得的分集增益相对减少. 另一方面, ML 算法复杂度随发送天线数成指数增加. 虽然它能够获得接近于最优的错误概率, 但当发送天线数较多时就具有很高的复杂度.

### 4 仿真结果

信道环境: 单路径和多路径瑞利衰落信道. 在多条路径衰落情况下仿真时, 采用 3GPP 协议中的 case1 信道. 系统传输速率为 144Kb/s, 有两条衰落路径且第二条路径的信号功率为第一条的十分之一.

外码采用 8 状态的码率为 1/3 的 Turbo 码. 调制方式采用 QPSK. 信噪比定义为  $SNR = NE_s/N_0$ ,  $N$  为发送天线数,  $E_s$  为每一接收符号的能量且  $E_s = 1$ . 信道的噪声为白高斯复噪声, 方差为  $N_0/2$ .

#### 4.1 单条衰落路径下的性能比较

图 2 给出了在单条衰落路径下三种算法的性能比较. 由图可以看出, ML 算法作为一种最佳译码方式, 相对于另两种算法的性能优势非常明显, 这是以牺牲设备复杂度为代价的. 另外, MMSE 算法相对于 ZF 算法可以获得约 2dB 的增益. 分析原因如下: ZF 算法和 MMSE 算法均是逐层进行的, 每一层

信号检测都会对下一层信号产生很大的影响. 这种情况下加性噪声的影响是逐层累加的. ZF 算法要求权矢量与信道特性矩阵正交, 使用置零准则消除信道乘性干扰, 但并不考虑加性噪声对权矢量选择的影响, 即丢失了一部分可以利用的信息; 而 MMSE 算法使用 MMSE 准则选取权矢量, 综合考虑了信道特性矩阵和接收信号中的噪声对系统性能的影响, 将在一定程度上缓解噪声累加的影响, 改善系统的性能.

#### 4.1.2 多条衰落路径下的性能比较

图 3 给出了采用两发两收天线的三种算法以及采用两发一收天线的 ML 算法在 3GPP case1 信道环境下的性能比较. 可以看出 ZF 算法和 MMSE 算法的性能曲线基本重合, MMSE 算法的优势在 3G 信道环境下并没有体现出来. 这是由于在

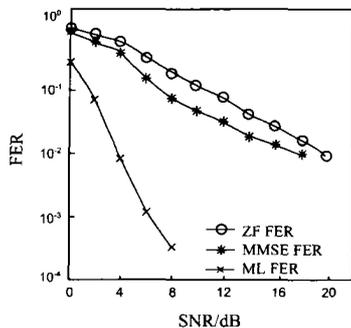


图 2 采用 2 发 2 收天线的三种算法在单条衰落环境下的性能

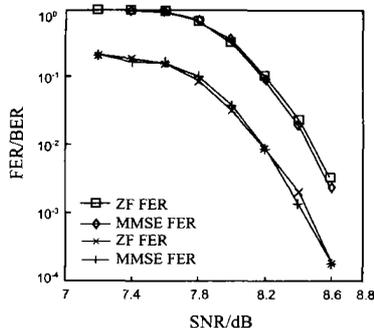


图 3 采用 2 发 2 收 MMSE 算法和 ZF 算法在 case1 信道的性能

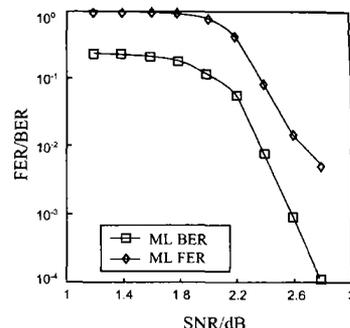


图 4 采用 2 发 2 收天线的 ML 算法 case1 信道环境下的性能

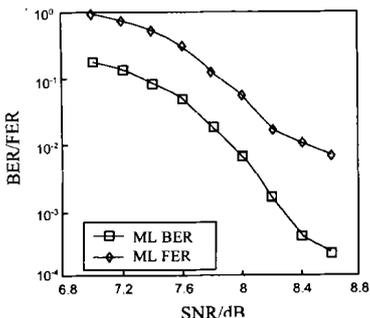


图 5 采用 2 发 1 收天线的 ML 算法在 case1 信道环境下的性能

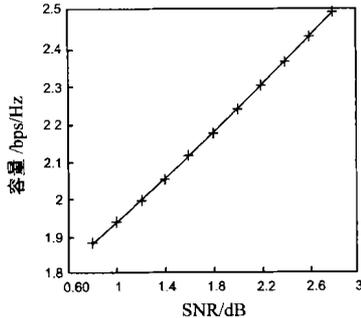


图 6 2 发 2 收天线系统的频谱效率

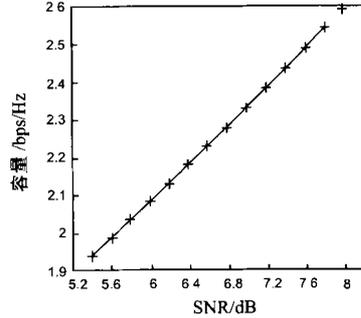


图 7 2 发 1 收天线系统的频谱效率

3GPP 信道环境下的多径衰落对信号的畸变常常要远大于加性噪声对信号的影响, 虽然采用 RAKE 接收机可以区分开不同路径, 但由于扰码本身的不理想使得各条路径间的干扰不能完全消除, 从而掩盖了 MMSE 算法对于 ZF 算法的优势.

#### 4.1.3 ML 算法在移动环境下的性能

从图 4 可以看出: ML 检测算法可以大幅度提高系统的抗衰落性能. 在 case1 信道环境下, 当误帧率为  $10^{-2}$  时, ML 算法比 MMSE 和 ZF 有近 5.5 dB 的增益; 而从图 5 可以看出, 同样采用 ML 算法的/ 两发一收 0 系统所需要的信噪比比/ 两发两收 0 约高 5.7 dB. 这主要是由于/ 两发一收 0 系统缺少接收分集增益造成的. 图 6 为两发两收天线的频谱效率. 图 7 为两发一收天线系统的频谱效率.

## 5 结论

综上所述, MMSE 检测算法比较适于在平坦慢衰落信道环境月分层空时码系统中使用较多天线的情况, 如 4 根或 8 根天线, 此时可获得非常高的信息传输速率和频带利用率. 相比之下, 由于 ML 算法具有较高的计算复杂度, 所以不适合在天线数较多的分层空时码系统中使用. 而在多径衰落信道环境下的分层空时码检测中, 当接收端为体积较小、天线数很少的移动台时, ML 算法由于没有接收天线数不小于发射天线数的限制, 所以比 ZF 和 MMSE 算法具有更好的性能和适用性. 在实际应用中应该根据不同的环境特点选择不同的检测算法. 例如, 在高速无线分组接入网中, 可以使用 MMSE 算法来提高信息传输速率和频带利用率, 以实现用户设备的高速接

入. 而在移动通信网中的分层空时码体制可以使用 ML 算法在移动台利用很少的接收天线来检测信号, 实现在移动通信网中的高速数据业务.

#### 参考文献:

[ 1 ] G J Foschini. Layered spacetime architecture for wireless communication in fading environment when using multiple antennas [ J ]. Bell Labs Technical Journal, 1996, Autumn: 41- 59.  
 [ 2 ] G J Foschini, M J Gans. On limits of wireless communication fading environment when using multiple antennas [ J ]. Wireless Personal Communications, 1998, 6: 311- 335.  
 [ 3 ] 李佳, 李颖, 王新梅. 分层空时码研究新进展 [ J ]. 西安电子科技大学学报, 2002, 4.

- [ 4 ] P W Wohiansky, G J Foschini, G D Golden, R A Valenzuela. V2 BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich scattering wireless channel [ A ]. Proc. 1998 [ C ]. Int. Symp. On Advanced Radio Technologies, Boulder, Colorado, USA. 9- 11 September 1998.
- [ 5 ] Andrej Stefanov, Tolga M Duman. Turbo coded modulation for systems with transmit and receive antenna diversity over block fading channels: system model, decoding approaches, and practical considerations [ J ]. IEEE J. Select. Areas Comm, 2001, 19( 5 ): 958- 968.
- [ 6 ] G J Foschini Jr, M J Gans. On limits of wireless communication in a fading environment when using multiple antennas [ J ]. Wireless Personal Communication, 1998, 3: 311- 335.

#### 作者简介:



李 颖 女, 1973 年生于山东菏泽, 1995 年于西安电子科技大学通信工程学院获学士学位, 现为西安电子科技大学博士研究生, 主要研究方向为移动通信及信道编码技术。

刘 宁 男, 1979 年 7 月生于陕西西安, 2000 年于西安电子科技大学通信工程学院获学士学位, 现为西安电子科技大学通信与信息系统专业硕士研究生, 主要研究方向为无线通信和信道编码技术。