

多天线阵列中基于矩阵求逆的 BLAST 和准正交 STBC 结合的 HARQ 算法研究^{*}

林宏志 朱光喜 刘应状 敖娟 王德胜

(华中科技大学武汉光电国家实验室 武汉 430074)

摘要 提出了多天线阵列中基于 BLAST 和准正交 STBC 结合的 HARQ 算法,并采用低复杂度的矩阵求逆方法进行解码。推荐的算法不是如传统的 ARQ 算法那样重传同样的信号,而是将数据组成准正交空时码发射矩阵,重传的时候传输发射矩阵的下一行,并和以前传输数据联合进行空时码解码。所以推荐的算法可以额外获得空时码的分集增益,而在信道条件好和信噪比高时,由于没有重传的发生而可以获得 BLAST 的复用增益。对于部分发射矩阵联合空时码解码,本文提出了采用矩阵求逆的解码算法。仿真表明该算法和最大似然算法的性能相近而复杂度下降很多。本算法结合了 BLAST 和 STBC 以及 HARQ 的优势并采用了低复杂度的矩阵求逆算法,是一个既能够提高系统传输速率也能够提高系统抗干扰性能 HARQ 方案。特别是本算法在所有接收天线数大于等于发射天线数的多天线阵列中有很强的实用性。

关键词 多输入多输出,贝尔实验室分层码,空时分组码,混和自动请求重传

Novel HARQ Scheme Based on BLAST Combine STBC in MIMO System

LIN Hong-zhi ZHU Guang-xi LIU Yin-zhuang AO Juan WANG De-sheng

(Wuhan Optical-Electronics National Laboratory, Huazhong Univ. of Sci. & Tech. Wuhan 430074, China)

Abstract This paper proposes a HARQ scheme based on comparison of BLAST and quasi-orthogonal STBC in MIMO system, also proposes a matrix inversion decode method. Different from traditional ARQ, the proposed method transfers the next line of data matrix and joint-decode them as STBC. It can get additional spatial diversity from the retransmission and get spatial multiplexing in good channel condition for no retransmission. This paper proposes a matrix inversion algorithm to joint-decode data matrix. The simulation result shows matrix inversion algorithm has similar performance to Maximum likelihood method, also has much lower complexity. The proposed method has the advantage of BLAST and STBC also HARQ, it is a HARQ scheme that can improve transmit rate and improve resistance of interference at same time. Specially, the proposed HARQ scheme can apply in any MIMO system that receiver more than transfer, it has extensive application.

Keywords MIMO, BLAST, STBC, HARQ

1 简介

为了在下一代无线通信系统实现更高的数据传输速率和更高的可靠性,必须克服无线信道的多径衰落特性对系统带来的影响。为解决这一问题, Tarokh 等人提出运用多天线获得分集增益的空时码^[1], 能够有效地对抗信道衰落; Foschini 等人提出基于空间复用的 VBLAST 结构^[2,3], 能极大地提高系统的频谱效率。但是系统往往需要在满足误码率的要求下使传输率尽可能地高, 而不是仅仅偏重一个方面, 这就需要多天线的分集增益和复用增益统一为空间增益进行调配, 为此将 BLAST 和 STBC 结合起来是一个现实的方法。虽然空间增益的统一能有效地对抗多径衰落, 但无线通信系统仍需要一种自动请求重传 (ARQ) 协议来保障数据包的可靠传输。在系统运用单纯的 ARQ 不能获得很高的容量的情况下, 几种不同类型的混合 ARQ 技术应运而生^[4,5], 包括 Type-I 型

HARQ、Type-II 型 HARQ、Type-III 型 HARQ。HARQ 主要有两种模式: chase 合并型和冗余递增型 (Incremental redundancy HARQ), 通过对传输失败的数据进行合并和增加冗余式处理, 使得之前传输失败的数据得到了充分的利用, 系统从而获得比传统的 ARQ 更优的性能。由于 HARQ 在保证数据的无差错传输的同时会大大降低系统的容量, 考虑将 HARQ 与空间增益结合将是十分有效和有意义的。多天线系统可以通过 BLAST 和 STBC 的结合在分集增益与复用增益做折衷, 而 HARQ 是以时延换取信噪比增益与分集增益, 显然二者可以实现平滑对接。另外, 由于 MIMO 所提供的多自由度, 有理由相信 HARQ 用于 MIMO 中将会提供优异的性能。

2 系统描述

考虑一个 $P \times Q$ 的天线阵列, 其中 $P \leq Q$ 以满足 BLAST

^{*} 本文受国家“863”计划(编号 2003AA12331005 和 2006AA012277)和国家自然科学基金(编号 60496315)资助。林宏志 博士研究生, 研究方向为宽带无线通信、天线阵列数字信号处理等;朱光喜 教授, 博士生导师, 主要从事多媒体通信、无线通信等工作;刘应状 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为宽带无线通信系统、多媒体系统等;敖娟 硕士研究生, 研究方向为多天线通信系统;王德胜 博士, 副教授, 主要研究方向为宽带无线多媒体通讯、信号处理、区域网络关键技术等。

算法的要求。本文以 VBLAST 的传输模式为例分析算法性能,如果传输错误则进行简单的重传,那么重传 N 次以后,接收信号可以表示为

$$r_i = H_i s + w_i, i=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其中 $H_i = [h_{i,1}, h_{i,2}, \dots, h_{i,p}]$ 为第 i 次传输时的信道矢量, w_i 是加性白高斯噪声向量, N 为传输次数。对于慢衰落或是准静止衰落信道,可假设数据在重传期间,信道保持恒定,即 $H_i = H$ 。

采用线性迫零检测(LZF)对 VBLAST 进行检测,选择加权向量 $W = [H^H H]^{-1} H^H$, 即得到判决统计量 $y = W r$ 。经过 N 次传输后,得到软检测判决统计向量^[6]:

$$z_{pre} = F \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i \right] = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i \right)^{-1} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2)$$

其中, $x_i = H^H r_i$, $C_i = H^H H_i$ 因此可以得到系统的性能。

对于同样的 $P \times Q$ 的天线阵列,采用 BLAST 和准正交 STBC 结合的 HARQ 则是从发射矩阵中选择重传的数据。根据 Tarokh 等人的理论^[1],在发送天线数大于 2 时,不存在全速率的复正交码阵。因此,为了获得全速率,必须牺牲部分正交性和分集增益。以 4 天线为例考察准正交 STBC 的发射矩阵。

$$\begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ -x_2^* & x_1^* & -x_4^* & x_3^* \\ x_3 & x_4 & x_1 & -x_2 \\ -x_4^* & x_3^* & -x_2^* & x_1^* \end{pmatrix} \quad (3)$$

STBC 的工作方式是在对应时刻发送矩阵的对应行。显然,在第一时刻时,系统发射的数据和采用 VBLAST 方式发射的数据完全相同,又由于接收天线数目等于发射天线数目,因此系统可以采用 VBLAST 方式解码。这样的事实表明,系统可以首先传输第一行并采用 VBLAST 方式解码,从而获得最高的速率。出错进行 HARQ 时,没有必要重传同样的 BLAST 数据,而是沿着 STBC 的发射矩阵逐行重传,会获得分集增益而得到更好的结果。这样做的好处是能充分利用系统的空间复用增益和空间分集增益,因为 BLAST 虽然可以提供最高的复用增益,但是往往分集增益不够,从而系统容易出现误码。STBC 虽然有最高的分集增益,但是如果超出了系统所要求的程度,就会降低传输速率。推荐的 HARQ 方案,利用 BLAST 和 STBC 结构上的相关性,将 STBC 发射矩阵拆开作为 HARQ 的重传元素,使得系统获得足够的分集增益时就停止发送,降低了发送数据量于是等效的提高了系统容量。系统框图如图 1 所示。

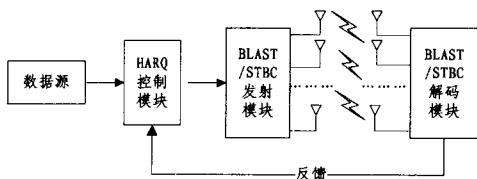


图 1 系统框图

数据源产生的数据由 HARQ 模块控制是发送矩阵中的第几行,并送到发射模块,经过发射天线发出并被接收天线收到。解码模块依据上次解码是否成功来判断采用什么方式解码。如果上次解码成功,则表明这是首次传输采用 BLAST 解码方式。上次解码失败则表明这次是重传数据则将接收数据和上次发送数据合并成接收矩阵,并采用矩阵求逆方式解码。解码模块要将本次解码正确与否反馈给发射端的 HARQ 模块以利于下一次传输的控制。

3 采用矩阵求逆的 BLAST 和准正交 STBC 结合的 HARQ 算法

考察式(3)所列的发射矩阵,其中第一行可以采用 BLAST 方式解码,完整的矩阵可以采样 STBC 方式解码,但是中间状态没有成熟的解码方式,本文提出在中间状态时采用矩阵求逆的方式进行解码。下面以准正交发射矩阵第一和第二行联合进行矩阵求逆译码以及最大似然译码算法为例说明解码过程。仍以 4×4 的天线阵列为例,第一行数据为 $X = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T$,第二行数据为 $X' = (-x_2^*, x_1^*, -x_4^*, x_3^*)^T$,因此发送数据为 $S = [X \ X']^T$ 。假设在传输的过程中信道保持不变,即 $\tilde{H} = \begin{bmatrix} H \\ H \end{bmatrix}$, H 是 4×4 天线阵列的信道

矩阵,用 r_1 和 r_2 分别表示接收信号的第一和第二行数据向量,则接收信号可以表示为 $\tilde{r} = [r_1 \ r_2]^T$,并且满足

$$\tilde{r} = \tilde{H} x + v' \quad (4)$$

其中 v' 表示白噪声,则通过矩阵求广义逆可以得到:

$$\hat{X} = Q(\text{pinv}(\tilde{H}) * \tilde{r}) \quad (5)$$

其中 pinv 表示求伪逆运算,而 Q 运算表示进行星座图量化以实现硬判决。

而最大似然译码则为要求从所有可能的发送序列中找出 \hat{X} ,使得满足

$$\hat{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T = \underset{X \in C}{\text{argmin}} \| \tilde{r} - \tilde{H} S \|^2 \quad (6)$$

下面以 4×4 天线阵为例说明基于矩阵求逆的 BLAST 和准正交 STBC 结合的 HARQ 算法流程。

(1)将新的发送数据组成发送矩阵,并在接收端清空 4×4 接收矩阵的存储空间;

(2)发送模块发送矩阵的第一行;

(3)接收端接收数据并判断接收矩阵存储空间第一行是否为空。如果为空,表明这不是重传数据,解码模块对接收的数据使用 BLAST 解码;如果解码成功,则转到 1;如果解码失败,则将接收数据存储到第一行并向发送端反馈重传请求并转到 4;如果不为空,表明接收的数据是重传的数据,解码模块将接收数据和存储的接收矩阵第一行合并,然后采用矩阵求逆解码;如果解码成功,则转到 1;如果解码失败,则用合并的数据更新第一行同时请求重传然后转到 4;

(4)发送模块依据重传请求发送矩阵的第二行;

(5)接收端接收数据并判断接收矩阵存储空间第二行是否为空。如果为空,解码模块将第一行数据和接收数据联合采用矩阵求逆解码;

如果解码成功,则转到 1;如果解码失败,则将接收数据存储到第二行,并向发送端反馈重传请求并转到 6;如果不为空,解码模块将接收数据和存储的接收矩阵第二行合并,然后对接收矩阵数据采用矩阵求逆解码;如果解码成功,则转到 1;如果解码失败,则用合并的数据更新第二行同时请求重传然后转到 6;

(6)发送模块依据重传请求发送矩阵的第三行;

(7)接收端接收数据并判断接收矩阵存储空间第三行是否为空。如果为空,解码模块将第一二行数据和接收数据联合采用矩阵求逆解码;如果解码成功,则转到 1;

如果解码失败,则将接收数据存储到第三行并向发送端反馈重传请求并转到 8;如果不为空,解码模块将接收数据和存储的接收矩阵第三行合并,然后对接收矩阵数据采用矩阵

求逆解码;如果解码成功,则转到 1;如果解码失败,则用合并的数据更新第三行同时请求重传然后转到 8;

(8)发送端发送模块依据重传请求发送矩阵的第四行;

(9)接收端接收数据并判断接收矩阵存储空间第四行是否为空:如果为空,解码模块将第一二三行数据和接收数据联合采用矩阵求逆解码;如果解码成功,则转到 1;如果解码失败,则将接收数据存储在第四行并向发送端反馈重传请求并转到 2;如果不为空,解码模块将接收数据和存储的接收矩阵第四行合并,然后对接收矩阵数据采用矩阵求逆解码;

如果解码成功,则转到 1;

如果解码失败,则用合并的数据更新第四行同时请求重传然后转到 2。

通过以上步骤完成 HARQ 流程并使系统的误码率低于限定。在传输过程结束后,由总的正确传输数量除以时隙数,也就是本系统每个时隙可以传输的符号数,同时记录下平均重传次数。其他天线个数的算法流程类似,只是更复杂一点而已。

4 仿真结果

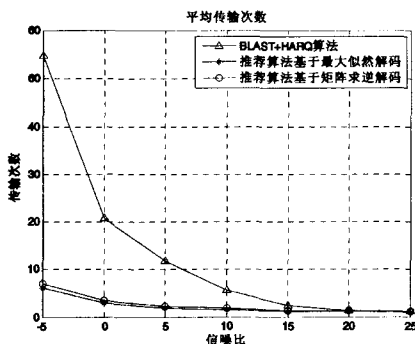


图2 传输次数的比较

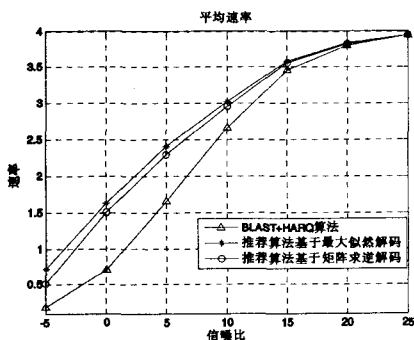


图3 系统传输速率的比较

仿真比较了推荐的 BLAST 与准正交 STBC 结合的 HARQ 算法采用矩阵求逆解码算法和采用最大似然解码算法的性能差异,同时以单纯 BLAST 重传合并 HARQ 为参照。本文采用重传次数和平均传输速率来衡量算法性能,重传次数的大小反映了系统的时延情况,传输速率表明了系统传输数据能力的大小。这两个是 HARQ 的重要指标,基本上能表征算法性能的优劣。仿真采用的是瑞利衰落信道,由于是以 4×4 天线阵列为例进行的仿真,在极高信噪比下,所有方法仅仅传输一次就可以成功接收。考察空时码发射矩阵的第一行,可知算法速率极限为 4。仿真结果也验证了这一点。

仿真曲线列于下图,图 2 是传输次数比较,图 3 是平均传输速率的比较。

从仿真结果我们可以得出如下结论:

在低信噪比 -5dB 情况下,推荐的算法比参照的算法好很多,重传次数只有参照算法的 1/10 左右,同时传输速率也比参照算法高 1 倍以上。而基于矩阵求逆和基于最大似然的性能差别很小。在中信噪比 5dB 情况下,推荐的算法仍然优于参照算法,和低信噪比的情况类似。

在高信噪比 20dB 及以上情况下,所有的算法都趋近性能上限,传输速率趋近理论上限 4,传输次数趋近理论下限 1。此时,由于几乎不出现误码,在第一次传输的时候就可以成功接收,因此 HARQ 本身也几乎不工作,各种算法的性能趋同。

综合来看,推荐的算法要明显优于参照算法,而推荐的算法相对性能最优的最大似然译码只有轻微下降,复杂度显然要远远低于最大似然译码。因此,推荐的采用矩阵求逆的 BLAST 和准正交 STBC 结合的 HARQ 算法具有低复杂度、高性能的优点。

结束语 通过理论推导和仿真验证,推荐的基于矩阵求逆的 BLAST 和准正交 STBC 结合的 HARQ 算法相对于采用最大似然译码的性能只有微微下降,但是解码复杂度有大幅下降。但是,相对于参照的 BLAST+HARQ 性能有大幅提升,同时译码复杂度基本相同,特别是在中低信噪比下相对于参照算法性能有很大提升,在高信噪比下推荐算法仍然优于参照算法。而在极高信噪比下,由于任何算法都会接近传输极限,因此性能差别很小。不过,考虑到在极高信噪比下几乎没有误码也就不需要进行重传来控制差错率, HARQ 算法也就失去了意义。这样,从实用的角度讲,实际系统都处于中低信噪比的环境,因此推荐的两种算法性能优异而具有很高的实用价值。综上所述,推荐的基于矩阵求逆的 BLAST 和准正交 STBC 结合的 HARQ 算法不失为一种简单有效的优良算法。

参考文献

- [1] Tarokh, Space-Time Codes for High Data Rate Wireless Communication; Performance Criterion and Code Construction. IEEE Transactions on Information Theory, 1998, 44(2): 744-765
- [2] Wolniansky P W, Foschini G J, Golden G D, et al. V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel, 1998; 295-300
- [3] Foschini G J, Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. Wireless Pers. Commun., 1998, 6: 311-335
- [4] Lin S, Yu PS. A hybrid ARQ scheme with parity retransmission for error control of satellite channels. IEEE Trans. Commun., 1982, 30: 1701-1719
- [5] Babich F, Valentinuzzi E, Vatta F. Performance of hybrid ARQ schemes for the LEO satellite channel // Proc. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBE-COM' 01). 2001; 2709-2713
- [6] Onggosanusi E N, Dabak A G, Hui Yan, et al. Hybrid ARQ Transmission and Combining for MIMO Systems. IEEE, 2003