

一种基于 SVD 的射频收发天线选择算法

徐慧, 王文博, 汪剑锋, 郑侃

(无线信号处理与网络实验室 泛网无线通信教育部重点实验室 北京邮电大学, 北京 100876)



摘要: 基于线性检测的空间复用(SM)系统提出了一种射频天线选择算法, 该算法以最小化错误概率为目标, 利用信道矩阵的奇异值分解(SVD)所得到的左奇异和右奇异矢量实现发端和收端的射频天线选择, 且不需要改变系统原有的检测算法。该算法可以用于收发任一端或两端同时使用, 不采用遍历搜索, 与传统搜索算法相比实现复杂度低。仿真证明将该算法应用于链路任意一端相比与传统算法都可以获得更多的分集增益和阵列增益。

关键词: 射频天线选择; 奇异值分解; 空间复用; 线性检测

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2008) 14-3756-03

SVD-based RF Transceiver Antenna Selection Algorithm

XU Hui, WANG Wen-bo, WANG Jian-feng, ZHENG Kan

(Wireless Signal Processing and Network Lab, Key Laboratory of Universal Wireless Communication, Ministry of Education, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: A RF antenna selection algorithm for spatial multiplexing systems with linear receivers was proposed, which aimed at minimizing error probability. Based on Singular Value Decomposition (SVD), left and right singular vectors were used to enable the selection. The algorithm could be flexibly applied to either transmitter or receiver or both of them. Compared with conventional algorithms with exhaustive search, lower implement complexity was achieved for no search required. Simulations demonstrate that the proposed algorithm obviously outperforms the conventional algorithm in both diversity and array gain under any situations.

Key words: RF antenna selection; SVD; spatial multiplexing; linear detection

引言

在发射端和接收端使用多根天线构成的多入多出(MIMO)系统以其显著的容量或可靠性的提高而备受瞩目^[1]。但是 MIMO 技术实现的障碍之一是与多根天线相匹配的多个射频单元带来的高复杂度和高成本。天线选择是解决这一问题的有效途径, 传统的天线选择是在多根天线中选择出性能较好的一部分来减少射频单元的使用, 同时尽可能的保留由多天线带来的分集或复用方面的优势^[2]。然而收发天线数的减少不可避免的带来一定程度上的性能损失。

射频天线选择是传统天线方法的一种改进, 它通过在射频单元和天线间插入天线映射模块, 将小于天线数的数据流映射到全部天线上(发射端), 或进行反向映射(接收端), 从而减少射频单元的使用^[3]。因为其选择, 或者更准确的称为映射操作是在射频实现的, 因此被称为射频天线选择。这种方法由于利用了全部天线, 相比于传统算法可以获得更多的阵列增益。但无论是传统的天线选择还是射频天线选择, 大部分高性能的选择算法都是基于遍历式搜索的^[3-5], 实现复杂度较高。

收稿日期: 2007-02-02 修回日期: 2007-05-14

基金项目: 国家自然科学基金 (60572120)

作者简介: 徐慧(1982-), 女, 辽宁人, 硕士, 研究方向为 MIMO 天线选择; 王文博(1965-), 男, 河北人, 博导, 研究方向为无线通信; 汪剑锋(1981-), 男, 江西人, 博士, 研究方向为 MIMO 自适应技术; 郑侃(1974-), 男, 浙江人, 博士, 讲师, 研究方向为 MIMO-OFDM 技术。

本文提出了一种基于奇异值分解(SVD)的射频天线选择算法, 该算法以最小化错误概率为目标, 可以在线性检测的空间复用(SM)系统中实现最优性能, 并且不需要像传统方法一样建立在遍历搜索的基础上, 只需要利用一次 SVD, 复杂度有所降低; 该算法不影响原基带接收机, 可以灵活应用于收发两端或其中任意一端。仿真验证了该算法相比于传统的天线选择算法误比特率性能有显著改善。

1 系统模型

设一个具有 M_T 根发射天线和 M_R 根接收天线的空间复用系统, 其发射端和接收端分别配置有 L_T 和 L_R 个射频调制单元, 且 $L_T \leq M_T$, $L_R \leq M_R$ 。由于空间复用系统要求接收流数不小于发射的独立流数, 以便有足够的自由度恢复出发射流, 因此令 $L_T \leq L_R$ 。

系统的数据处理流程如图 1 所示: 输入的比特流首先进行星座映射, 之后分路复用成 L_T 个矢量符号流, 并分别被送入 L_T 个射频处理单元进行射频调制等操作, 得到射频信号 s 。在射频单元与发射天线之间插入一个射频映射模块, 它将射频信号 s 的 L_T 个流映射到 M_T 根发射天线上, 并最终由 M_T 根天线将信号发送到无线信道中进行传输。

接收端采用和发射端相反的处理流程, 在接收天线和接收射频单元之间同样插入一个射频映射模块将 M_R 路接收信号映射为 L_R 个信号流 y , 再经过解调, 线性天线检测(基于ZF 或 MMSE 准则), 复用和星座逆映射, 判决恢复出原始

的比特流。

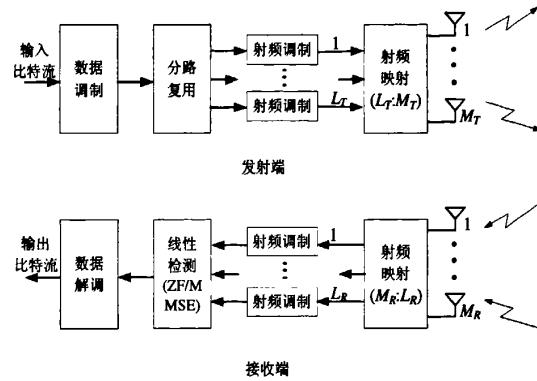


图1 带射频收发天线选择的SM系统框图

根据上述的系统模型，接收信号 y 可以表示为：

$$y = \sqrt{\frac{E_s}{M_T}} RHTs + Rn \quad (1)$$

其中 T 和 R 分别表示发射端和接收端的射频映射矩阵，其大小分别为 $M_T \times L_T$ 和 $L_R \times M_R$ ，且满足 $\|T\|=1$, $\|R\|=1$. H 代表 $M_R \times M_T$ 的信道矩阵，其元素服从独立同分布(i.i.d.)零均值单位方差的复高斯分布。假设接收端和发送端都理想已知信道信息。 n 表示加性的白高斯噪声，其元素服从 i.i.d.，均值为零，方差为 N_0 的复高斯分布，且 R 不影响其分布特性。 E_s 为一个符号时间内 M_T 根发射天线总的发射能量。

2 射频收发天线选择算法

天线选择可以以最大化系统容量为目标，也可以以最小化错误概率为目标，本文基于后者。由于采用射频天线选择，即将小于天线数的数据流映射到所有天线上进行传输(或相反的操作)，因此需要解决的问题就是找到最优的映射矩阵 T 和 R ，并使它们满足系统达到最小错误概率的要求。

由于目标为错误概率，因此令出发点为各流的后处理 SNR 。当信号传输模型如(1)所示时，线性ZF检测和MMSE检测的后处理 SNR 可以表示为(2)，其中 $k=1, \dots, L_T$ ：

$$\begin{aligned} SNR_k^{ZF} &= \frac{E_s}{M_T N_0 [T^* H^* R^* RHT]_{k,k}} \\ SNR_k^{MMSE} &= \frac{E_s}{M_T N_0 [T^* H^* R^* RHT + N_0 / E_s I_{M_R}]_{k,k}} - 1 \end{aligned} \quad (2)$$

将信道矩阵进行奇异值分解可以得到： $H=U\Sigma V^*$ ，其中 U 和 V 表示 H 的左奇异和右奇异矢量矩阵，分别为 $M_R \times M_R$ 和 $M_T \times M_T$ 的酉矩阵， $\Sigma \in \mathbb{R}^{M_R \times M_T}$ 为非负对角阵，其对角元素是由 H 从大到小排列的奇异值 λ_k , $k=1, \dots, L_T$ 所组成。因此，(2)中的矩阵 $T^* H^* R^* RHT$ 可以转化为：

$$T^* H^* R^* RHT = T^* V \Sigma^* U^* R^* R U \Sigma V^* \quad (3)$$

由文献[4]可知，系统的矢量误符号率(至少一个流存在错误符号的概率)主要取决于最小后处理 SNR 的大小，最小

后处理 SNR 越大，相应的错误概率就越小，这可以直观的理解为总的错误概率主要由最差的数据流所决定。因此要想使系统的错误概率最小就要使矩阵(3)的对角元素值最大，尤其是最小的对角元素值。为此可以将(3)式写作 $(T^* V \Sigma^* U^* R^* R U \Sigma V^* T)$ ，由于其中 U 和 V 都是酉矩阵，且 T 和 R 需要满足加权矩阵不增大功率的要求，即 $\|T\|=1$, $\|R\|=1$ ，因此可以得到：当且仅当矩阵(3)转化为对角阵 $\Sigma^* \Sigma$ 时，其对角元素值最大，此时等效于将能量全部集中在对角元素中。为实现上述转化，根据酉矩阵的特性： $UU^*=U^*U=VV^*=V^*V=I$ ，只需令 $T=V$, $R=U^*$ ，则(3)式就可以转化为对角阵 $\Sigma^* \Sigma$ 。但是 T 和 R 是具有天线选择意义的加权矩阵，其维度分别为 $M_T \times L_T$ 和 $L_R \times M_R$ ，这决定了矩阵(3)的维度只能是 $L_T \times L_T$ ，也就是在天线选择的意义下矩阵(3)可以达到的最大对角阵是 $\Sigma^* \Sigma$ 的前 L_T 个值组成的子对角阵。由于奇异值矩阵 Σ 的对角值本身就是由大到小排列的，即前 L_T 个就是最大的 L_T 个。因此，为了使(3)取得对角阵 $\Sigma^* \Sigma$ 的前 L_T 个值，加权矩阵 T 和 R 的形式分别应为：

$$T = [V_1 \dots V_{L_T}], \quad R = [U_1 \dots U_{L_R}]^* \quad (4)$$

即 T 是右奇异矢量矩阵 V 的前 L_T 列组成的子矩阵，而 R 是左奇异矢量矩阵 U 的前 L_R 列组成的子矩阵的共轭转置。经过(4)中的奇异矢量矩阵 T 和 R 的加权之后，矩阵(3)变为了由前 L_T 个最大的奇异值 $\lambda_1 \dots \lambda_{L_T}$ 的平方组成的 $L_T \times L_T$ 的对角阵，此时各流的后处理 SNR 为：

$$SNR_k^{ZF} = \frac{E_s}{M_T N_0} \lambda_k^2, \quad SNR_k^{MMSE} = \frac{E_s}{M_T N_0} \lambda_k^2 + \frac{1}{M_T} - 1 \quad (5)$$

对于线性ZF或MMSE检测，此时其最小后处理 SNR 即令(5)中的 $k=L_T$ ，而这一最小后处理 SNR 显然是在天线选择意义下可获得的最大值。因此对于线性检测来说，这是一种可以令错误概率最小化的最优天线选择算法。

另外还可以看到，此时系统的等效信道矩阵变为了 $RHT=\text{diag}(\lambda_1 \dots \lambda_{L_T})$ ，其中 diag 表示对角阵。因此该变换实际上完成了将 MIMO 信道转化为多个独立的 SISO 信道，从而完全消除了多天线的干扰，有利于容量和可靠性的提高。接收端此时仍可以根据该等效信道采用经典的 SM 系统的检测方法，并且此信道正是实际信道估计所得到的冲击响应，不必再做额外变换。因此，提出的射频选择算法所引入的复杂度增加只在于选择端加入的射频映射模块，与一般的穷举式天线选择算法(如最大化最小后处理 SNR ，最大化最小奇异值)相比它省去了繁琐的搜索步骤，只需要在选择端进行一次 SVD 分解以及乘以加权矩阵的操作，实现复杂度有所降低。而该算法的局限在于不适合应用于反馈选择方式(如 FDD 系统的发端选择)，因为这会带来巨大的反馈开销。

所提方法显然也可以只应用于链路的任意一个终端，此时只取 T 或 R 作映射矩阵即可。

3 仿真结果

为验证所提算法(A1)的性能,通过仿真将其与传统的天线选择算法(A2)作以对比。这里选用最大化最小奇异值算法作为传统算法的代表,这是因为它是一种典型的用于空间复用系统且采用遍历搜索的天线选择算法,且具有普遍适用性;它在传统算法中对于线性接收机的性能几乎是最优的^[4];它不依赖于检测准则(ZF或MMSE),并且与所提方法都是利用SVD。它的实现方法可以描述为:对所有待选的天线子集所对应的瞬时信道响应做SVD,比较它们的最小奇异值,并选择其中最大的所对应的天线子集。注意到这种方法需要对每种组合都进行一次SVD,而所提方法只需要进行一次,因此所提方法在算法复杂度上有较大优势。

仿真中以不编码的误比特率(BER)作为衡量标准,采用QPSK调制,天线选择的含义是4根天线配置2个射频单元。这里只给出了线性ZF检测的结果,采用MMSE准则的结果与其一致,因此不再重复。

图2是发端采用天线选择的仿真结果,可以看到所提方法相比于传统的最大化最小奇异值方法不仅存在阵列上的增益,而且还有一定的分集增益,BER=10⁻³时的增益约有1.5dB。图3是收端采用天线选择的仿真结果,此时两种方法都可以达到原系统的分集度,但是所提选择算法几乎与原系统的性能一样,即实现了性能最优,此时增益约有2dB(BER=10⁻³)。图4仿真了收发两端同时采用天线选择的性能,此时收发天线数相等,线性接收机的分集性能较差,因为其分集度近似为 $M_R - M_T + 1$,但是可以看到由于采用了射频天线选择,无论是误比特率性能还是分集度都有了巨大的提高,甚至超越了具有同样天线数的2发6收的系统性能,此时相比于传统方法的性能增益约有3dB(BER=10⁻³)。这是因为所提算法完全消除了多天线之间的干扰,因此即使是在收发天线数相等时采用线性检测也可以获得较大的增益。

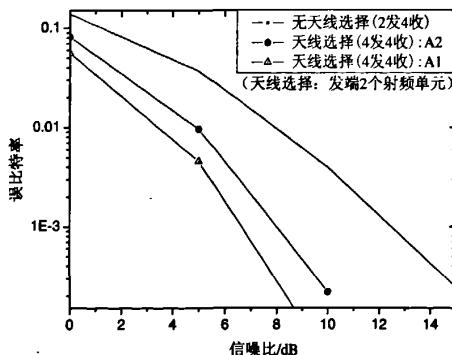


图2 发射端射频天线选择与传统天线选择性能对比

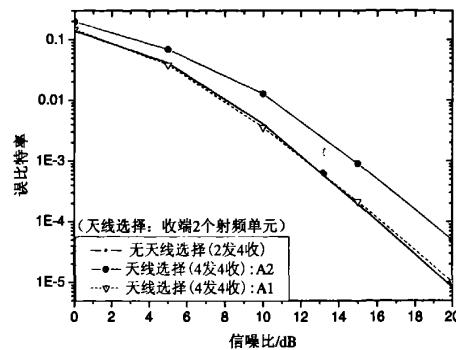


图3 接收端射频天线选择与传统天线选择性能对比

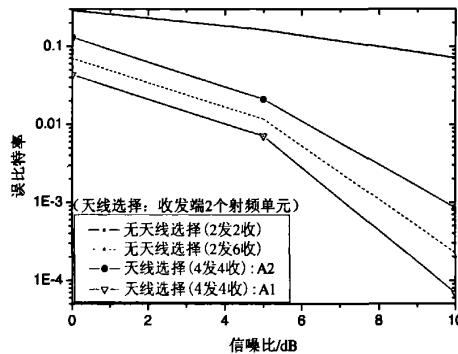


图4 收发端射频天线选择与传统天线选择性能对比

4 结论

本文基于线性检测空间复用(SM)系统提出了一种射频天线选择算法,该算法由于使用了SVD和全部天线可以获得最优的性能,并能灵活应用于链路两端,复杂度相比于遍历搜索算法有所降低,适合应用于TDD系统,同时其实现的最优性能对于衡量其他天线选择算法具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] Telatar I E. Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels [J]. European Transactions on Telecommunications (S1124-318X), 1999, 10(6): 585-595.
- [2] Sanayei S, Nosratinia A. Antenna Selection in MIMO Systems [J]. IEEE Communication Magazine (S0163-6804), 2004, 24(10): 68-73.
- [3] Molisch A F, Win M Z, Choi Y, et al. Capacity of MIMO Systems with Antenna Selection [J]. IEEE Trans on Wireless Commun (S1536-1276), 2005, 4(4): 1759-1772.
- [4] Heath R W, Paulraj A. Antenna Selection for Spatial Multiplexing Systems with Linear Receivers [J]. IEEE Communication Letters (S1089-7798), 2001, 5(4): 142-144.
- [5] Zhang Xinying, Molisch A F, Kung S Y. Variable-Phase-Shift-Based RF-Baseband Codesign for MIMO Antenna Selection [J]. IEEE Transaction on Signal Processing (S1053-587X), 2005, 53(11): 4091-4013.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>