

天线选择技术在 MIMO 中的应用

Applications of Antenna Selection in MIMO System

邵子韵^{*} 钱 钰^{**}

SHAO Zi-yun QIAN Yu

摘要 MIMO 系统是当今无线通信领域的重要技术,但是它存在一个严重的缺陷:随着天线数量增多,系统的复杂度和成本大大增加。天线选择技术被认为是降低 MIMO 系统复杂度的有力方案。本文详细阐述了天线选择技术在 MIMO 系统中的应用,它能在保证系统传输速率的同时降低复杂度和误码率。

关键词 天线选择 MIMO 分集 空间多路复用

Abstract Digital communications using Multiple Input Multiple Output (MIMO) system is one of the most significant technical breakthroughs in modern wireless communications. One crucial drawback of MIMO system is the increased complexity with the number of transmit and receive antennas. Antenna selection was considered as a powerful solution to reduce the complexity in MIMO systems. In this paper, we introduced the application of antenna selection in MIMO system, which achieved a high throughput, with a comparable lower complexity and a small degradation in BER performance.

Keywords Antenna selection MIMO Diversity Spatial Multiplexing

1 引言

多天线技术,又称多输入多输出(Multiple Input Multiple Output)技术,是现代通信的一个突破。相对单输入单输出(Single Input Single Output)而言,使用相同的信道带宽和发射功率,MIMO 系统拥有更高的信道容量和可靠性。

MIMO 通信系统的信道容量随着发送端和接收端天线数量的增长成线形增长。为了提高信道的容量和传输速率,MIMO 系统不可避免的要在发送端和接收端设置更多的天线。随着天线数量的增加和多进制调制的应用,天线射频链路的硬件(低噪声放大器、模数转换器等)成本不断增长。此外,空时编码、检测译码的复杂度也大幅增加。如何在相对低复杂度的系统中实现 MIMO 技术,并保证数据传输的高效可靠,成为无线通信领域的热点问题。近年来发展起来的天线选择(Antenna Selection)技术被认为是一种降低 MIMO 系统成本和复杂度的有效手段。

天线选择技术通过以下两种方法改进了无线通信技术,一是分集技术,二是空间多路技术。分集技术利用发送端与接收端的多个传输路径,提高通信系统的鲁棒性,但是系统必须处理多个天线之间的干扰。空间多路复用技术,利用无线空间的散射环境,接收器能够同时接收来自不同天线的数据流,系统的容量与天线的数量 $\min(M_t, M_r)$ 成正比。其中 M_r 为接收天线个数, M_t 为发送天线个数。

2 天线选择技术

2.1 系统模型

如图 1 所示,发送端有 M_t 个天线,接收端有 M_r 个天线。输入数据在空时编码器中编码,串并转换器将编码后的数据转换成 M_t 个并行的数据流。多路选择开关从 M_t 个天线中选出 L_t 个最佳天线,以特定的算法在 M_t 个天线中发射数据流。接收端收到 M_r 个并行信号,通过多路选择开关选出最佳的 L_r 个天线信号进行空时译码,还原成原始的数据流。

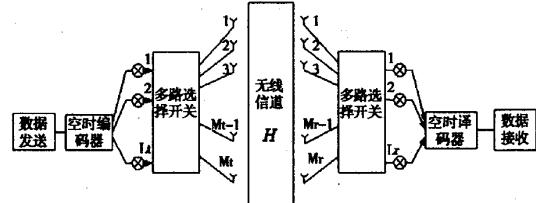


图 1 具有天线选择的 MIMO 系统模型

接收的信号的矢量式可以表示为^[1]

$$y[k] = Hx[k] + n[k] \quad (1)$$

其中 H 是一个 $M_r \times M_t$ 的矩阵, h_{ij} 为第 i 行第 j 列元素, 模拟第 i 个发送天线和第 j 个接收天线之间的无线空间衰落信道。 $x[k]$ 是一个 $M_t \times 1$ 的向量, 表示在 k 时刻的发送信号阵列。 $n[k]$ 则是一个 $M_r \times 1$ 向量, 为 k 时刻的加性高斯白噪声。

2.2 天线选择技术在分集技术中的应用。

天线选择技术利用分集来提高系统的信噪比。由于系统中各个信道衰落是相互独立的,因此可以通过多个信道的空间、时间、频率或者偏极化来分离信道。

2.2.1 接收天线选择

通过多个接收天线进行分集是传统接收分集的扩展。为了更好的获得分集增益,信号的合并是非常重要的。分集

* 香港科技大学电子与计算机系

** 英国帝国理工学院通信与信号处理系

合并方法可分为以下三种：选择分集合并（Diversity Combining），选择最高信噪比的路径进行信号检测，最大比合并（Maximal Ratio Combining），基于路径信号的最佳线性组合进行判决，等增益合并（Equal Gain Combining），将所有路径的同相信号简单叠加。相比较而言，最大比合并具有最高的性能，但算法复杂，而选择分集合并算法简单，性能却不如其他两种。图2仿真QPSK调制在瑞利衰落信道天线分集三种合并的比较，可以看出，最大比合并是最适宜的方法。

如果我们有 M_r 个接收天线，则能防止强衰落的分集级数为 M_r ，也就是说， M_r 与输出信噪比的斜率和信噪比的平均值有关系。

图3是一个MIMO系统，天线分集接收使用性能最佳的最大比合并。如图所示，当接收天线数量越大时，输出信噪比的斜率越大，而达到相同误码率时需要的信噪比平均值越小。

瑞利衰落信道天线分集（QPSK调制）

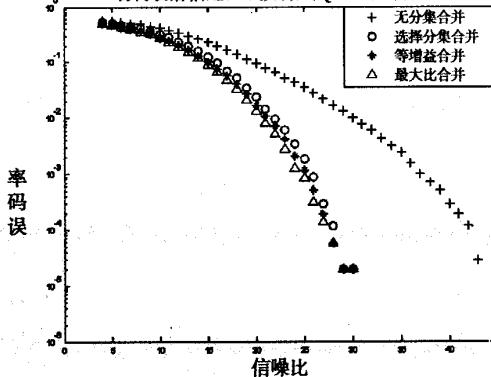


图2 瑞利衰落信道天线分集（QPSK调制）

瑞利衰落信道天线分集技术最大比合并（QPSK调制）

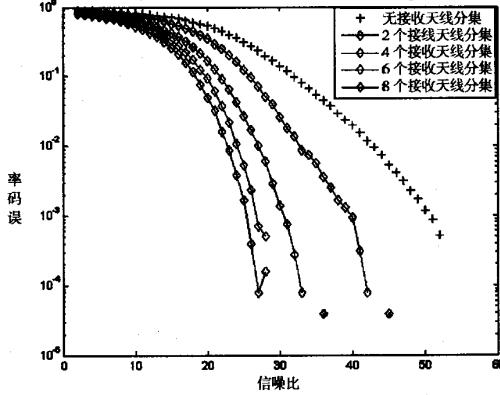


图3 瑞利衰落信道天线分集—最大比合并（QPSK调制）

2.2.2 发送天线选择

与接收天线选择不同的是，发送天线需要接收天线的反馈。除此以外，发送天线和接收天线非常类似，选择具有最高增益的 L_t 个天线。当发射机知道信道信息时，我们可以将多个发送天线与信道匹配，得到与接收天线相同的增益。如果发射机不知道信道信息，我们运用其他的策略，如延迟分集、空时编码来获得增益。但是，这样我们只有较高的分

集级数，却不能改进平均信噪比。

2.2.3 收发联合选择

收发联合选择是在发射端和接收端同时应用选择分集。如有 M_t 个发送天线， M_r 个接收天线，那么分集级数能达到 $M = M_t \times M_r$ 。因此，结合天线选择的MIMO系统能够在恶劣的环境下高质量地传输单个数据流。

2.3 天线选择技术在空间多路复用中的应用。

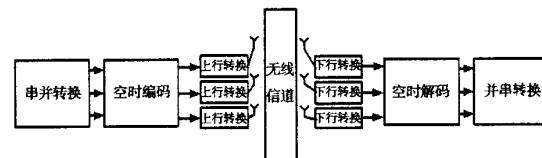


图4 天线选择空间多路复用技术

空间多路复用的原理如图4所示，不同的数据流在不同的天线中并行传输。在接收端，多个接收天线可以分离不同的数据流。设系统中有 M_t 个发送天线和 M_r 个接收天线，选择 L_t 个最佳的发送天线和 L_r 个最佳接收天线。如果信道状态正常， M_r 个接收信号表现呈线性独立叠加。只要 $M_t \leq M_r$ ，我们就能恢复发送的信号。这个方法的优点是随着发送天线的个数 M_t 增加，不需要多余的带宽，数据传输速率却能提高。

假设每个天线的传输功率相等，信道容量表达式给出^[2,3]

$$C = \log_{10} \left[I + \frac{P}{L_t} \tilde{H}^H \tilde{H} \right] \quad (2)$$

其中 P 为接收信噪比， \tilde{H} 为 $L_t \times L_r$ 的选择信道矩阵， I 是 $L_t \times L_r$ 的特征矩阵， \tilde{H}^H 是 \tilde{H} 的厄密共轭矩阵。

2.3.1 接收天线选择

要从 M_r 个接收天线中选择出 L_r 个最佳天线，难题在于如何从矩阵 H 中丢弃其中的 $M_r - L_r$ 行，得到矩阵 \tilde{H} ，使得信道的容量最大。如今最好办法是通过穷举搜索（Exhaustive Search），却十分耗费时间。下面将给出两种比较好的方法。

第一种是基于规范天线选择（Norm-based Antenna Selection）。在低信噪比的情况下，天线选择算法能够简单地得到规范最优天线阵列。也就是说，在低信噪比的情况下，为了分集增益和为了信道容量的天线选择都能使用相同的策略。在高信噪比的情况下，基于规范天线选择却不一定是最优的。尽管如此，由于算法简单，这种天线选择方法也具有应用前景。

连续选择（Successive Selection），通过奢侈的算法来提高信道容量。因此，严格来说连续选择未必是最佳的算法。但是，连续选择却能达到接近最优的效果，并且为MIMO系统提供完全的分集。

2.3.2 发送天线选择

如前文所述，发送选择需要根据反馈路径的信息来做出选择而接收天线选择不需要。反馈信息给出了信道的状态等信息。发送端知道信道状态信息（CSI）的无线信道的容量

远比不知道信息的时候高。但是完全的信道状态信息是非常复杂的，在天线选择时，发送端只需要知道一部分的信道状态信息便可。

3 天线选择的具体应用

3.1 天线选择算法

最佳选择算法是穷举所有可能的天线阵列组合，选出能达到最佳信噪比的天线（对于分集），或者是最大信道容量的天线（对于空间多路复用）。然而所需的计算量为 $\binom{N_t}{L_t} \binom{N_r}{L_r}$ ，这是不切实际的。因此人们提出很多简单的算法，最简单的一种是基于接收信号的能量。对于分集来说，这种算法非常有效；但是对于空间多路复用来说，这种算法失去意义：只有50%的情况能达到较好的信道容量，而其他情况下，信道容量浪费非常严重。因为如果两个天线具有高相关性，就很难将数据流分离。

基于这些考虑，Y. S. Choi 等人提出了一种新的算法^[4]。假设矩阵 H 中有两行是相同的，因为这两行携带着相同的信息，我们可以删去其中一行。如果两行的能量不同，则删除能量小的那行。当没有相同信息的行后，这种算法开始搜索具有高相关性的两行，并删去能量较低的一行。这样便可以得到一个具有最小相关性和最大能量的选择信道矩阵 H 。这种方法只需要很小的单位带宽速率便能够获得很大的信道容量。

3.2 硬件问题

下面讨论硬件对于系统性能的影响。在前面的章节中，我们假设使用理想的射频开关，它们具有下列的性质：

- a、它们没有使发送和接收信号衰减变形。
- b、它们能够同时处理所有的交换。

（上接第35页）（“Microsoft.XMLDOM”）；

```
objStyle.load(Server.MapPath("text_source.xsl"));
objStyle.async = false;
var strContent = objSource.transformNode(objStyle);
%>
```

4 总结

本文针对当前C/S、B/S架构的网络教学平台应用系统设计的不足，基于Web Service的分布式设计架构的优势，设计并开发了一种新的面向服务的三层分布式网络教学Web平台系统，并在系统的实施和应用中均收到了良好的效果。这些都足以说明，与传统的设计模式相比，基于Web Service的分布式应用系统架构能更好的适应现代Web应用的飞速发展，更好的体现面向对象思想，也更适用于异构平台的Web应用系统的实施与集成。

参考文献：

- [1] IEEE Learning Technology Standards Committee LTSC).

c、它们具有相同的转移函数。

在实际应用中，这些条件并不能完全实现。开关对信号造成的衰减一般在0.1dB到10dB之间，取决于开关的尺寸大小、通过的信号能量大小和开关的速率。

4 结论

天线选择技术降低了硬件的复杂度和成本，使系统达到完全分集，并且提高了传输速率（信道容量）。天线选择技术还存在以下问题：天线选择算法的复杂度、天线选择的编码设计和分析等。

参考文献：

- [1] “Space – time codes and MIMO Systems” Mohinder Jankiraman. Boston ,London, Artech House.
- [2] S. Sanaye, A. Nosratinia, “Antenna Selection in MIMO Systems”, in IEEE Communications Magazine, pp. 68 – 73, Oct. 2004.
- [3] A. F. Molisch, M. Z. Win, and J. H. Winters, "Capacity of MIMO systems with antenna selection," in Proc. Int. Conf. Commun. , vol. 2, pp. 570 – 574, Jun. 2001.
- [4] A. F. Molisch; M. Z. Win, “MIMO systems with antenna selection,” in IEEE Microwave Magazine, vol. 5, Issue 1, pp. 46 – 56, Mar 2004.

[作者简介] 邵宇韵，女，现就读香港科技大学电子与计算机系，硕士研究生。研究方向为无线通信MIMO系统。

钱钰，女，毕业于英国帝国理工学院通信与信号处理系，硕士研究生。研究方向为无线通信

（收稿日期：2007-01-10）

- (The Architecture and reference model standard[EB/OL].
<http://ieeeltsc.org/>, 2005.3.
- [2] 教育部现代远程教育资源建设委员会. 现代远程教育资源建设技术规范[EB/OL]. <http://www.cve.com.cn/>, 2000.5.
- [3] 柴晓路, 梁宇路. Web Service 技术、架构和应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.1.
- [4] 程炜, 杨宗凯. 基于 Web Service 的一种分布式体系结构[J]. 计算机应用研究, 19(3):1052 ~ 1071, 2002.
- [5] 林弘之. Web Service 原理与开发实务[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.11.
- [6] 孙一中. XML 理论和应用基础[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2000.5.

[作者简介] 刘洋(1980~),女,山东省济南市人,助教,硕士,主要研究方向:软件工程、数据库应用;邵林,女,助教,自动控制;郝晓艳,女,讲师,数据库应用。

（收稿日期：2006-12-22）

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>