

多天线系统中的天线选择技术 *

Antenna Selection Technology in Multiple Antenna System

赵 锐
肖征荣

近年来,多天线系统(也称为 MIMO 系统)引起了人们很大的研究兴趣,它可以增加系统的容量,改进误比特率(BER)。然而,获得这些增益的代价是硬件的复杂度提高,无线系统前端的复杂度、体积和价格随着天线数目的增加而增加。使用天线选择技术,就可以在获得 MIMO 系统优势的同时降低成本。

有两种改进无线通信的方法:分集方法、复用方法。分集方法可以提高通信系统的鲁棒性,利用发送和接收天线之间的多条路径,改善系统的 BER。在接收端,这种分集与 RAKE 接收提供的类似。分集也可以通过使用多根发射天线来得到,但是必须面对发送时带来的相互干扰。这一类主要是空时编码技术。

另外一类 MIMO 技术是空间复用,来自于这样一个事实:在一个具有丰富散射的环境中,接收机可以解析同时从多根天线发送的信号,因此,可以发送并行独立的数据流,使得总的系统容量随着 $\min(M_r, M_t)$ 线性增长,其中 M_r 和 M_t 是接收和发送天线的数目。这种容量随天线数目线性增长的可能性是令人吃惊的,尤其是在增加功率(SNR)只能导致容量对数增长时。这些增益来自于解析信道中的并行空间路径,故称为空间复用,典型例子包括 BLAST 结构。

SNR 和分集

分集是指存在两条或者更多条独立衰落信号路径时,系统可以获得的增益。当无线信道包括好几条路径,可以在空间、时间、频率或者极性上区分,就可以获得分集。由于几条路径的衰落系数是统计独立的,不可能它们同时发生深衰落,因此信号强度低于检测值的概率就很小。

1. 接收天线选择

通过多根接收天线获得分集是对传统的接收分集思想的直接推广,多天线接收分集的许多结果都和 RAKE 接收机的

* 国家自然科学基金资助(编号:60172051)。

类似。

分集接收系统中，接收机可收到发送信号的几个版本，每个都经历了不同的复数衰落系数和噪声。为了利用分集，这些信号必须以一种有益的方式结合。

分集合并可分三类：选择分集，选择来自于 SNR 最高的路径信号进行检测；最大比合并（MRC）基于路径信号的最佳线性组合进行判决；等增益合并（EGC）简单地将各条路径的信号相加。

假定路径系数是独立同分布的，幅度服从瑞利分布，相位服从均匀分布，平均路径 SNR 为 $\Gamma\gamma$ 。主要考虑平均接收 SNR，从 M_r 条路径中选出最佳者：

$$E[\gamma_s] = \Gamma \sum_{k=1}^{M_r} \frac{1}{k}$$

因此，增加分集路径导致 SNR 的减少。当路径数增加时，SNR 呈对数增长。

相比之下，MRC 和 EGC 的平均接收 SNR 随路径数线性增长，但是 MRC 的平均 SNR 更高。

图 1 是选择合并在接收天线选择中的应用，从多根接收天线中选择一根接收天线。由于只有一个 RF 分支，我们就面临着一个困境：为了进行最佳选择，需

要知道所有支路的 SNR，但是只有一个 RF 链，怎样才能同时知道所有的 SNR 呢？由于信道增益的准静态性，有几种方法能解决这个问题，例如，在发送数据的前缀中使用训练序列，通过扫描天线，寻找信道增益最高的天线，选择它来接收下一个数据。

在天线选择中有许多实际问题要考虑。例如，最佳的选择必须基于接收信号的 SNR，但是在实际中很难使用一个斜率监测器并检测 SNR 最高的信号。判决基于预检测或者后检测信号。

以前的讨论假定接收机只有一个 RF 链。可用 RF 链可能不只一条，但是少于 M_r 。在这种情况下，就选择接收天线的一个子集，进行信号合并。这称为广义选择，得到的增益称为广义选择分集，如图 2，也称为混合选择/最大比合并。选择路径的合并可通过 MRC 或 EGC 进行。MRC 有更好的性能，但是要和复数相乘。EGC 比较简单，但效率不高。

对广义选择分集，最佳的天线选择通过选择 L_t 分支获得，它具有最大的 SNR，无论是使用 MRC 还是 EGC 合并。使用 MRC 的广义选择合并的 SNR 可以按照下式计算：

$$\Gamma_{GSC} = \Gamma L \left(1 + \sum_{k=L+1}^M \frac{1}{k} \right)$$

2. 发天线选择

发天线选择与收天线选择不同，需要从接收端到发射端的反馈路径，如图 3。反馈速率很小，尤其是使用单天线选择时。除了这个差别以外，发天线选择和收天线选择很类似；选择提供最高接收 SNR 的天线。

为了研究多根发天线选择，假定有 L_t 个 RF 链和 M_t 根发天线 ($M_t > L_t$)，接收端只有一根收天线。我们要从 M_t 根发天线中选择最适合的 L_t 根天线。发送信号的相位和幅度，必须使接收端有最大的接收 SNR。这时，应该选择具有最高信道增益的 L_t 根发天线。这种方法等同于在所选择的天线上进行波束形成，这称为混合最大比传输。

混合最大比传输要求发射机不仅知道 L_t 根最适合的发天线，而且需要知道从每根发天线到接收机的复值信道增益。这比简单的选择分集需要更多反馈。

3. 收发联合选择

下一步是在发射端和接收端同时应用选择分集，如图 4。有 M_t 根发天线和 M_r 根接收天线，发送和接收端有 L_t 和 L_r 个 RF

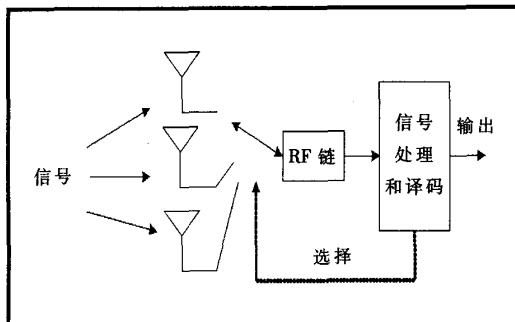


图 1 接收天线选择

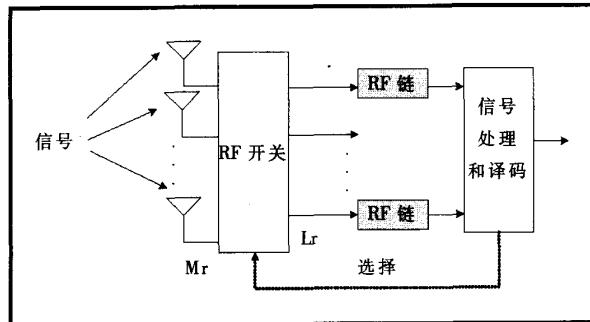


图 2 一般选择分集系统

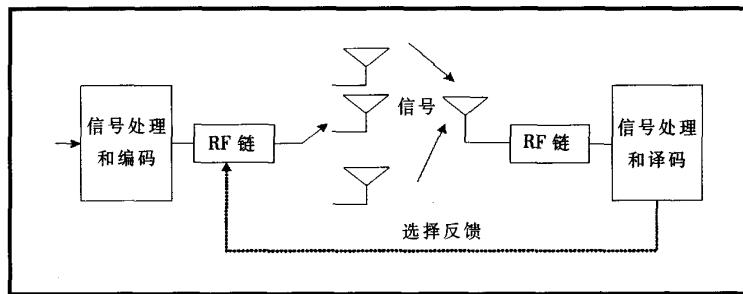


图3 发天线选择

链。可能发送 L_t 个并行的数据流,因此必须要使用空时码提供分集。总的 $M_r \times M_t$ 信道矩阵是 \mathbf{H} ,而 $L_t \times L_t$ 信道矩阵代表选择天线的信道矩阵 $\tilde{\mathbf{H}}$ 。假定使用正交空时分组码。这些码字译码器比较简单,等同于具有同样的信道增益的 SISO 信道:

$$h_{eq} = \sqrt{\frac{1}{L_t} \sum_{i=1}^{L_t} \sum_{j=1}^{L_t} |\tilde{h}_{ij}|^2}$$

其中, h_{ij} 表示 $\tilde{\mathbf{H}}$ 中的元素。信道的 SNR 与所选择信道的 Frobenius 范数成正比:

$$||\tilde{\mathbf{H}}||^2 = \sum_{ij} |\tilde{h}_{ij}|^2$$

因此,联合发送/接收选择机制必须选择的行和列形成一个子集,最大化接收信道增益的幅度平方和。这并不容易实现,例如,连续选择最好的接收机,然后选择发射机并不一定会得到总的最佳选择。实际上,除了耗尽搜索,现在还没有更好的联合发送天线选择的系统方案。有效的(最优的或者次优的)联合发送和接收天线选择依然是一个待解决的问题。

4.信道特征和性能

迄今为止讨论的所有选择方法的分集为 M_r, M_t 。天线选择和一般天线选择,尽管复杂度不

同,提供的分集阶数都是相同的。在一个给定的信道条件下,一般选择比单天线选择有更好的性能。

选择分集技术要求信道条件信息,发天线选择时在发射机端需要,收天线选择时在接收机端需要。信道状态信息的估计和反馈需要时间,在这期间要求信道状态是不变的。因此,通常使用的是块衰落模型。

如果信道状态不是静态的,或者信道状态的估计是不准确的,选择分集的性能就会受到影响。在时变或者噪声信道的情况下,现在还没有对天线选择技术的性能进行分类的研究成果。

分集接收计算时假定独立的路径,但是实际中路径可能是相关的。空间相关减少了空间分集技术的增益,包括选择分集。空

间相关信道的影响研究表明,分集阶数不能超过信道空间相关矩阵的秩。

选择合并和一般合并的性能分析是一个研究热点。尤其是 Alouini 和 Simon 分析了瑞利衰落信道下,使用矩阵生成函数法的一般选择合并,后来扩展和简化了独立但是非同分布瑞利路径下的表达式。Mallik 和 Win 分析了相关 Nakagami 衰落情况下的一般选择合并,这个领域还有很多工作可以做。

空间复用

如前所述,在一个有丰富散射的无线衰落信道中,使用 MIMO 系统可能达到十年前无法想象的容量。当无线信道有充足的自由度,从多个发天线发出的数据流可以区分,得到并行数据路径。这种情况下无线信道容量随着 $\min(M_r, M_t)$ 增长,即随天线数目线性增长。从分集或者 BER 的角度看,前一部分集中在 MIMO 信道的天线选择。这部分在空间复用情况下,从 MIMO 系统容量的角度讨论天线选择。

一个有 M_t 根发天线和 M_r 根接收天线的多天线系统(见图 4)。

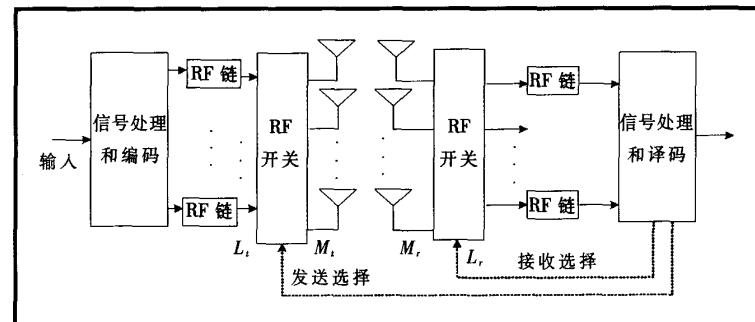


图4 使用联合收发选择的MIMO系统

信道矩阵 \mathbf{H} 是一个 $M_r \times M_t$ 复数矩阵。假定块衰落模型,信道是瑞利或者莱斯,接收端还有AWGN。目的是从 M_t 根接收端选择最好的 L_t 根天线,发射端从 M_r 根天线中选择 L_r 根最好的天线,以使得系统的容量最大。假定天线都是等功率发射,容量是信道矩阵的函数:

$$C = \log_{10} \left(I + \frac{\rho}{L_t} \tilde{\mathbf{H}}^* \tilde{\mathbf{H}} \right)$$

其中, ρ 是接收的 SNR, $\tilde{\mathbf{H}}$ 是所选择的信道矩阵, I 是单位矩阵, $\tilde{\mathbf{H}}^*$ 是 $\tilde{\mathbf{H}}$ 的 Hermitian 变换。理想的天线选择技术从 \mathbf{H} 中选出 $\tilde{\mathbf{H}}$,以使得上述表达式最大化。

1. 接收天线选择

为了进行接收天线选择,假定有 $M_t=L_t$ 根发天线和发射 RF 链, M_r 根接收天线和 L_r 个接收 RF 链, 其中 $L_r < M_r$ 。因此,问题是从来 \mathbf{H} 中选择 M_r 行, 得到矩阵 $\tilde{\mathbf{H}}$, 以使得容量最大化。现在还没有一种简单有效的方法,现有的方法是穷举法,但是这比较耗时间。下面讨论两种近似方法。

对 $\log(\cdot)$ 进行 Taylor 展开, 我们发现在 SNR 较低时, 容量与 $\|\tilde{\mathbf{H}}\|^2$ 成正比。因此, 在低 SNR 时, 使用分集增益和容量的天线选择算法都有同样的机制。

在其他情况下, 基于范数的选择可能不是最优的。然而, 可以使用基于范数的选择, 因为其计算复杂度比较低, 统计特性也是已知的。为了得到次优的选择, Gorokhov 建议使用递减选择算法, 其中, 从满信道矩阵开始, \mathbf{H} 的行逐行丢掉, 使得每一步容量损失最小。进一步的工作表明递增算法复杂度更小, 有与最优选择类似的容量。

递增选择算法如下: 开始选择有最大范数的行矢量。在每一步, 投影每个余下的行矢量, 选择有最大幅度的投影, 直到 L_r 根天线被选择。

连续选择是一种贪婪算法, 能最大化容量。因此, 连续选择可能不是严格最优的。然而, 仿真表明连续选择的遍历容量与真实的最优是不能区分的。

2. 发天线选择

在空间复用情况下(最大化容量), 发天线选择与收天线选择有很多类似的地方。主要的区别, 是在发天线选择的时候必须存在一条反馈路径, 以通知发射机选择天线。这个反馈, 就给发射机提供了一些信道信息。众所周知, 有 CSI 的无线信道容量比没有 CSI 的要高。换句话说, 发射机知道信道信息, 可以得到一些额外的容量。当发射机知道所有的信道系数时, 将会获得最大的容量(通过注水算法)。

天线选择需要的反馈只是全部信道状态信息的一部分。全部信道状态信息涉及到几个复值变量, 但是对发送选择, 只取决于 $O(L_t \log M_t)$ 的阶数(反馈信息是必须的)。有趣的是, 这个最小量的反馈足够获得最佳容量(有 CSI) 的很大一部分。

结语

天线选择可以减少硬件的复杂度和成本, 获得全部的分集, 在发天线选择时, 获得增益速率(容量)。这些增益以计算复杂度为代价来获得。天线选择有两种方法: 基于范数的选择和连续选择。前一种方法比较适合 SNR 较

低的时候, 后一种适合高 SNR。这两种方法都可以用于发送/接收天线选择。

天线选择有一些内在的限制。一个最大的限制是, 当系统带宽比信道相干带宽大时。不同频率有不同的信道响应, 表明在每个波段有不同最优天线选择机制。因此, 当信道是高度频率选择性衰落的, 有很多不相关的频段, 进行天线选择就不是很容易, 用处也不大。然而, 在中等频率选择性衰落信道, 天线选择仍然能够提供很大的增益。

天线选择也存在几个实际的问题, 例如, 现有的技术很难实现 RF 开关, 这会抵消天线选择带来的好处。很大的一个缺点是: 实际的开关有转换损耗, 这必须通过在发射机的放大器中使用更大的发射功率, 和在接收端使用更敏感的低噪声放大器来补偿。

天线选择还存在几个未解决的问题。天线选择的码字设计和分析仍需要更多的研究。而且最佳的联合发送和接收天线选择问题还没有解决。在接收端没有信道信息时, 天线选择的性能评估仍是一个重要而未解决的问题。

赵锐 北京邮电大学电信工程学院博士研究生

Zhao Rui Doctor Candidate, School of Telecommunication Engineering, BUPT

肖征荣 北京邮电大学电信工程学院博士研究生

Xiao Zhengrong Doctor Candidate, School of Telecommunication Engineering, BUPT

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>