

MIMO 系统的非相干天线选择算法

宋高俊^① 周正中^②

^①(安徽理工大学电子工程系 淮南 232001)

^②(电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054)

摘要 该文提出了多天线传输系统的非相干天线选择(NON-AS)算法,将广义似然比检验(GLRT)与天线选择结合应用于U码传输系统,天线选择和信号检测无需信道状态信息。与相干检测的天线选择相比,NON-AS算法不需要估计信道,大大降低了系统复杂性。该文只考虑了接收天线选择,天线选择的准则是基于每个天线接收到的信号向量F-2范数。仿真结果表明,在高信噪比条件下,选择有最大范数的接收天线子集,系统能实现和使用全部接收天线的U码传输系统渐近相同的分集增益。

关键词 非相干天线选择, 广义似然比检验, 信号相关度, 分集增益

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)03-0437-03

Noncoherent Antenna Selection Algorithm for MIMO System

Song Gao-jun^① Zhou Zheng-zhong^②

^①(Dept. of Electronic Engineering, Anhui University of Technology, Huainan 232001, China)

^②(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract This paper presents a NON-coherent Antenna Selection (NON-AS) algorithm for multi-antenna transmission system. The combination of Generalized Likelihood Ratio Test (GLRT) and Antenna Selection (AS) is applied to Unitary (U)signal transmission system, and antenna selection and signal detection do not require Channel State Information (CSI). Therefore, the NON-AS algorithm, compared with coherent antenna selection, can greatly reduce system complexity. This paper only discusses the selection of receiving antenna. Selection criterion is based on the Frobenius-2 norm of received signal vector at each receiving antenna. Simulation results indicate that under the condition of high Signal to Noise Ratio (SNR), by selecting a set of receiving antennas which observe the largest Frobenius-2 norm of received signal vector, the same diversity gain as the one obtained by using all the receiving antennas can be achieved.

Key words Non-coherent antenna selection, Generalized Likelihood Ratio Test(GLRT), Signal correlation order, Diversity gain

1 引言

无线传输系统的容量和性能在很大程度上受到信道衰落和干扰的限制,近年来的研究表明,使用多个天线发送和接收(MIMO)能极大地提高无线系统的性能和频谱效率。增加天线数提供了更多的空间自由度或是通过空间复用增加数据速率,或是通过空时编码增加分集改善系统的性能。然而,多天线系统所付出的代价是需要更多的射频链路,这会导致系统成本和复杂性上升。因此,在收发两端射频链路数限定的情况下,如何提高系统的性能,是一个重要的研究领域。其中采用天线选择技术是一种可行而有效的方法,受到人们的关注。

目前已提出了多种天线选择方案,包括发射天线选择^[1,2]、接收天线选择^[3]和发射接收混合选择等方法^[4,5]。然而

这些方法都假设了在发射机或接收机处能准确地获得信道参数属于相干检测的天线选择。在系统天线较多和信道快衰落的情况下,信道的估计是很困难的,即使能实现,系统也将是非常复杂,并且需要更多的训练时间,这导致系统传输效率降低。本文提出了非相干的天线选择(NON-AS)算法,将广义似然比检验(GLRT)方法和天线选择相结合,对信道和数据信号实施联合似然估计,天线选择不需要信道信息。其中天线的选择是基于计算各天线接收信号向量的范数,选择范数最大的接收天线子集。最终,通过仿真研究了算法的性能。

2 系统模型和算法

2.1 系统模型

考虑一个平瑞利衰落的无线通信环境,系统有 N 个发射天线和 M 个接收天线。假设系统有 N 个发射和 $L(L < M)$ 个接收射频链路,即本文只研究接收天线选择问题。根据接收

到的信号和天线选择准则,从 M 个接收天线中选择 L 个接收天线并连接到接收射频链路。假设发射机和接收机都无信道状态信息,采用文献[6]的非相干编码调制方法,则信号模型为

$$\mathbf{Y} = \sqrt{\frac{\gamma}{N}} \mathbf{S} \mathbf{H} + \mathbf{W} \quad (1)$$

其中 γ 是每个接收天线的信噪比, $\mathbf{S} \in \mathbb{C}^{T \times M}$ 是 T 个符号间隔发射的编码信号矩阵,满足正交关系 $\mathbf{S}^H \mathbf{S} = \mathbf{I}_M$, 其中上标 'H' 表示共轭转置。 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N \times L}$ 是未知的信道系数矩阵, $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{T \times L}$ 是加性高斯噪声。假设发射天线和接收天线相互独立, \mathbf{W} 和 \mathbf{H} 的矩阵元是独立同分布的均值为 0、方差为 1 的复高斯随机变量。将 \mathbf{Y} , \mathbf{W} 和 \mathbf{H} 写成列向量形式, $\mathbf{y} = \text{vec}(\mathbf{Y})$, $\mathbf{h} = \text{vec}(\mathbf{H})$ 和 $\mathbf{w} = \text{vec}(\mathbf{W})$, 则式(1)可以变换为

$$\mathbf{y}(k) = \sqrt{\frac{\gamma}{N}} (\mathbf{I}_L \otimes \mathbf{S}) \mathbf{h}(k) + \mathbf{w}(k) = \mathbf{A} \mathbf{h}(k) + \mathbf{w}(k) \quad (2)$$

式中 $\mathbf{A} \square \sqrt{\gamma/N} (\mathbf{I}_L \otimes \mathbf{S})$, \otimes 表示 Kronecker 积, k 表示

$G = \binom{M}{L}$ 种接收天线组合中的第 k 种选择(子集)。

2.2 天线选择和信号检测算法

根据式(2),对于某一接收天线子集 k ,采用广义似然比检验(GLRT)估计发射信号,则有

$$\hat{\mathbf{S}} = \arg \min_{\mathbf{S} \in \mathcal{V}} \min_{\mathbf{h}} \|\mathbf{y}(k) - \mathbf{A} \mathbf{h}(k)\|^2 \quad (3)$$

其中 \mathcal{V} 是所有不同的发射信号矩阵集合。在设定 \mathbf{S} 的情况下, $\mathbf{h}(k)$ 的最佳估计为^[7]

$$\hat{\mathbf{h}}(k) = [\mathbf{A}^H \mathbf{A}]^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{y}(k) \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)中并考虑到 \mathbf{S} 的正交关系,可得信号估计算法为

$$\hat{\mathbf{S}} = \arg \max_{\mathbf{S} \in \mathcal{V}} \left[\mathbf{y}^H(k) (\mathbf{I}_L \otimes \mathbf{S} \mathbf{S}^H) \mathbf{y}(k) \right] \quad (5)$$

以上的信号估计性能与天线子集 k 有关,下面讨论如何选择天线子集,以使系统性能最好。根据判决测度式(5),可导出成对符号错误概率表达式为^[8]

$$P(\mathcal{S}_1 \rightarrow \mathcal{S}_2 | \mathbf{h}(k)) \leq \exp(-\mathbf{h}^H(k) \mathbf{F} \mathbf{h}(k)) \quad (6)$$

其中

$$\mathbf{F} \square \frac{\gamma}{N} (T^2 \mathbf{I}_{LN} - \mathbf{I}_L \otimes \mathbf{S}_1^H \mathbf{S}_2 \mathbf{S}_2^H \mathbf{S}_1) \quad (7)$$

上式中 \mathcal{S}_1 和 \mathcal{S}_2 是两个不同的信号, T 是信号矩阵的长度。根据式(6),显然最佳天线子集 k_0 应是

$$k_0 = \max_k |\mathbf{h}(k)|^2 \quad (8)$$

从而使系统的符号错误概率最小。然而在信道状态信息 \mathbf{h} 未知的情况下,最佳选择天线是不可能的,本文考虑了下面的次最佳方法。根据式(2)

$$|\mathbf{y}(k)|^2 \approx \frac{T\gamma}{N} |\mathbf{h}(k)|^2 + R_e(\mathbf{w}^H \mathbf{A} \mathbf{h}) \quad (9)$$

式(9)中已忽略了高阶噪声项。显然, $|\mathbf{y}(k)|^2$ 可以看作 $T\gamma |\mathbf{h}(k)|^2 / N$ 渐近无偏估计,使 $|\mathbf{h}(k)|^2$ 最大近似等于使 $|\mathbf{y}(k)|^2$ 最大。因此式(8)的最佳天线选择算法可修正为

$$k_0 = \max_k |\mathbf{y}(k)|^2 \quad (10)$$

从而得到信道状态信息未知情况下,天线选择系统的次最佳信号估计算法为

$$\hat{\mathbf{S}} = \arg \max_{\mathbf{S} \in \mathcal{V}} \left[\mathbf{y}^H(k_0) (\mathbf{I}_L \otimes \mathbf{S} \mathbf{S}^H) \mathbf{y}(k_0) \right] \quad (11)$$

比较算法式(11)和文献[6]的非相干似然检测算法,显然形式上是相同的,当 $G=1$ 时,即无天线选择时,两种算法完全等价。这也表明在多天正交信号设计的系统中,非相干似然检测和 GLRT 检测是等价的。下节将通过仿真研究本文提出的非相干天线选择算法的性能。

3 仿真分析

仿真采用的性能衡量标准是编码信号的帧错误率(FER),每帧信号是 T 个符号间隔传输的编码符号,使用了文献[6]的编码方法,取 $T=8$,码速是 1bit/(s·Hz),因此每帧信号的状态数是 256。在后面的分析中,使用 (N,M,L) 表示天线选择系统, (N,M) 表示使用全部天线的完全复杂性系统。

实验 1 天线选择系统的性能分析

大量仿真结果表明,在高信噪比情况下,采用 NON-AS 算法的系统分集增益与采用全部天线的完全复杂性系统的分集增益相同。图 1 是(2,2,1)和(2,2)系统以及(2,3,1)和(2,3)系统的性能曲线比较。显然,在高信噪比时,天线选择系统和完全复杂性系统的性能曲线斜率相同,这表明两类系统有相同的分集增益。这一结论从图 2 中也能得到验证。由于非天线选择的 U 码传输系统的分集增益是 MN ,因此,对于一般的 $(N,M,1)$ 系统, NON-AS 算法能实现的分集增益是 MN ,

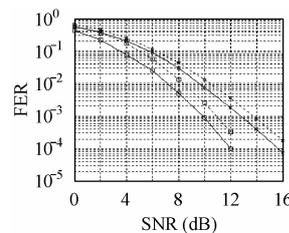


图 1 天线选择系统和完全复杂性系统的分集增益比较 $N=2$

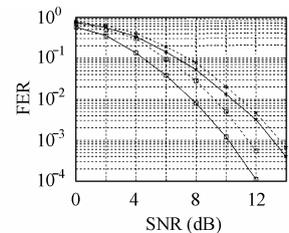


图 2 天线选择系统和完全复杂性系统的分集增益比较 $N=3$

在仿真实验 3 中将证明这一结论也适合于 (N, M, L) 系统。

图 3 给出了接收天线数不同时, NON-AS 系统的性能比较。显然, 随着接收天线数的增加, 与非天线选择的 $(2, 1)$ 系统比较, NON-AS 算法的性能明显提高。如信噪比为 14dB 时, $(2, 1)$ 的帧错误率是 0.01^[6], 而 $(2, 5, 1)$ 的帧错误率减小到 0.0000045。图 3 中我们还注意到另一性能特征, 随着接收天线数的增多, 性能的相对增加趋于饱和。如在帧错误率为 0.01 时, $(2, 2, 1)$ 相对 $(2, 1)$ 性能提高了约 4dB, 而 $(2, 5, 1)$ 相对 $(2, 4, 1)$ 性能提高仅约 0.2dB。因此, 从提高系统性能与复杂性的比考虑, 天线数和性能要综合考虑。图 3 表明, 只需采用 2~3 个天线的选择就能实现大部分分集增益, 而且系统简单。

实验 2 信号相关度对系统性能的影响

在这个仿真实验中, 选用了 3 种不同相关度的信号, 相关系数分别为 0.29, 0.37 和 0.46(他们的奇异值都不等于 1), 其中相关系数 ρ 定义为 $\max_{S_i \neq S_j} |S_i^H S_j| / T$ 。图 4 的仿真结果表明, 在高信噪比条件下, 信号相关对 NON-AS 系统的分集增益没有影响, 因为不同相关度的性能曲线是平行的。信号相关只影响系统的编码增益, 相关的增加降低了系统的编码增益, 从而造成系统总体性能的下降。

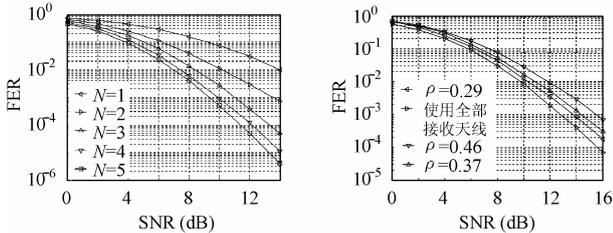


图 3 不同接收天线的性能比较, 图 4 信号相关对系统性能的影响, 选择方式为 $(2, N, 1)$

实验 3 天线子集数对系统性能的影响

图 5 显示了天线子集数 L 对 NON-AS 系统性能的影响。显然, 增加天线子集数 L 并没有改变 NON-AS 系统的分集增益, 只是增大了编码增益。随着 L 的增大, NON-AS 系统的性能趋于完全复杂性系统的性能。此外, 图 5 中各条曲线都是平行的(包括完全复杂性系统的性能曲线)更进一步说明了天线选择系统能实现满分集增益 MN 。

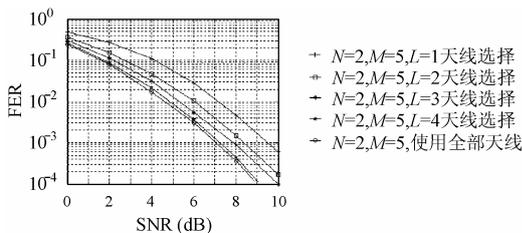


图 5 天线子集 L 数对系统性能的影响

4 结束语

本文提出了非相干的天线选择算法。将广义似然比检验 (GLRT) 和天线选择 (AS) 结合起来, 应用于 U 码传输系统联合检测信号, 天线的瞬时选择不需要信道信息。因此, 与相干天线选择系统比较, 由于不需要信道估计, 大大降低了系统复杂性。仿真结果表明, 通过天线选择, NON-AS 系统能实现和完全复杂性系统同样的分集增益。此外, 增加子集数能增加系统的编码增益, 但不改变系统的分集增益。

参考文献

- [1] Thoen S, Perre L, Gyselinckx B, et al.. Performance analysis of combined transmit-SC/receive-MRC[J]. *IEEE Trans. on Commun.* 2001, 49(1): 5 – 8.
- [2] Chen Z, Vucetic B, Yuan J, et al.. Analysis of transmit antenna selection/Maximal-ratio combining in rayleigh fading channels[C]. in Proc. IEEE ISTT03, Yokohama, Japan, 2003: 94.
- [3] Bahceci I, Duman T M, Altunbasak Y. Antenna selection for multiple antenna transmission systems : performance analysis and code construction[J]. *IEEE Trans. on Info. Theory*, 2003, 49(10): 2669 – 2881.
- [4] Cai X, Giannakis G B. Performance analysis of Combined transmit selection diversity and receive generalized selection combining in Rayleigh fading channels[J]. *IEEE Trans. on Wireless Communication*, 2004, 3(6): 1980 – 1983.
- [5] Gore D A and Paulraj A J. MIMO antenna subset selection with space-time coding [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2002, 50(10): 2580 – 2588.
- [6] Hochwald B M, Marzetta T L, Richardson T J, et al.. System design of unitary space time constellations[J]. *IEEE Trans. on Info. Theory*, 2000, 46(6): 1962 – 1973.
- [7] Steven M. Kay. 罗鹏飞等译. 统计信号处理基础——估计与检测理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 742.
- [8] 宋高俊. 无线 MIMO 信道的分集技术研究. [博士论文], 电子科技大学, 2005, 3.

宋高俊: 男, 1959 年生, 副教授, 研究方向为无线通信、信号处理等。
周正中: 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为信号检测与估计、信号处理等。