

信息选择天线技术提高多天线系统信道容量的研究

杨玉丽, 焦秉立

(北京大学信息科学技术学院, 北京 100871)

摘 要: 在多天线系统中, 将一部分信源信息映射于发射天线的选择, 可以有效提高系统的传输效率. 本文介绍了这种以信息选择发射天线的传输模式, 并从信息理论的角度对其信道容量进行了分析, 得到了解析表达式. 理论分析的数值结果表明, 与相同天线结构的随机选择发射天线系统相比, 信息选择发射天线系统能够达到更高的信道容量.

关键词: 信道容量; 多天线系统; 随机选择天线; 信息选择天线

中图分类号: TN911.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2006)10-1868-04

Capacity Gain by Information-Guided Channel Hopping Scheme in Cycling Transmission System

YANG Yu-li, JIAO Bing-li

(School of Electronics Engineering & Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: This paper dealt with the capacity behavior of a new transmission technique for the multi antenna system, which was proposed based on the fact that multiple independent channels as well as the points in modulation constellation can be mapped by the input of information data. An analytic expression of the channel capacity for the new transmission technique was derived and the numerical results proved that compared to the traditional random transmit antenna selection technique with the same antenna structure, the new transmission technique can achieve more channel capacity gain.

Key words: capacity; ergodic capacity; multiple antenna system; transmit antenna selection

1 引言

多天线系统的提出, 打破了以往点对点无线通信系统中只能以增加频带宽度或发射功率来提高传输效率的思路, 开始了利用若干相互独立并行无线链路的探索^[1-6]. Foschini 和 Gans 在文献[2]中介绍了一种随机选择发射天线的系统, 并分析了其信道容量. 该系统每次在多个发射天线中任选其一完成信号传输, 避免了单天线系统中信号一直在同一信道上传输时持续遭遇到的深衰落, 因此, 这种系统的信道容量较单天线系统有了很大提高. 另外, 作为构建多天线系统可供选择的技术之一, 随机选择发射天线的传输模式不仅具有易于实现的特点, 而且由于每次只有一条链路传输数据, 能够避免多条链路同时传输数据造成的相互干扰, 从而使得接收端的信号检测计算复杂度较低. 然而, 通过对于这种传输模式的研究, 我们发现, 如果在选择发射天线时进一步利用额外的信源信息, 则既能保证发射天线选择的随机性, 又能提高系统的传输效率.

基于以上考虑, 为了充分利用各信道之间的独立性、实现其与额外信源信息之间的有效联系, 我们提出了一种以信息

选择发射天线的传输模式^[7,8], 本文将从信息理论的角度阐明, 与相同天线结构的随机选择发射天线系统相比, 信息选择发射天线系统能够达到更高的信道容量.

2 信息选择发射天线系统简介

信息选择发射天线系统的基带传输模型如图1所示, 系统中设有 M 个发射天线和 1 个接收天线, 形成了 M 条相互独立的并行信道, 后文将这种天线结构的系统记作 $(M, 1)$ 系统. 假设各信道是平坦衰落的, 而且接收机能够获得各信道完全准确的状态信息^[2].

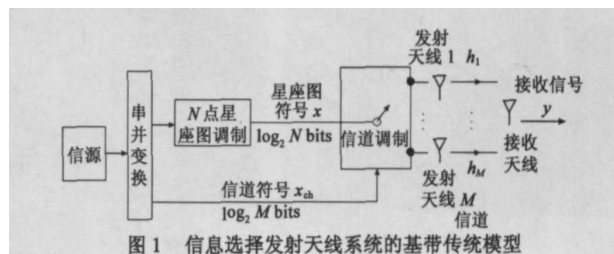


图1 信息选择发射天线系统的基带传输模型

在发射端, 信源信息被分为两部分: 一部分映射于传统调制中的星座图, 另一部分映射于发射天线(也即信道)的选择.

我们将这两部分的信息映射分别称为星座图调制和信道调制, 而将相应映射后得到的符号分别称为星座图符号(记作 x)和信道符号(记作 x_{ch})。

下面, 我们以 QPSK 调制的 (2, 1) 系统为例, 说明信息选择发射天线的工作流程, 该系统结构如图 2 所示。

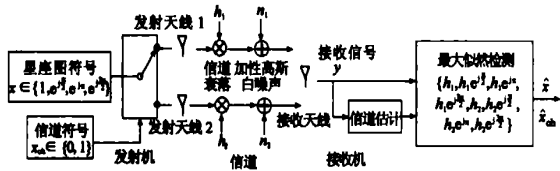


图 2 信息选择发射天线的 QPSK 调制 (2,1) 系统模型

图 2 中, 星座图调制即为传统的 QPSK 调制, 生成的星座图符号 $x \in \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$, 其中, $s_1 = 1, s_2 = \exp(j\pi/2), s_3 = \exp(j\pi) = -1, s_4 = \exp(j3\pi/2) = -j$; 而信道调制则是对于两个发射天线的选择, 对应的信道符号 $x_{ch} \in \{a_1, a_2\}$, 其中, $a_1 = 0, a_2 = 1$ 。如果 $x_{ch} = a_1$, 则由发射天线 1 传送星座图符号, 接收信号为 $y = h_1x + n_1$; 如果 $x_{ch} = a_2$, 则由发射天线 2 传送星座图符号, 接收信号为 $y = h_2x + n_2$, 其中, h_m 和 $n_m (m = 1, 2)$ 分别表示被信道符号 x_{ch} 选中的信道上的衰落因子和加性高斯白噪声。

若不考虑加性噪声的影响, 发射的 QPSK 星座图经历不同的衰落信道后, 由于幅度衰落和相位旋转的不同, 将在接收端形成不同的星座图, 如图 3 所示。

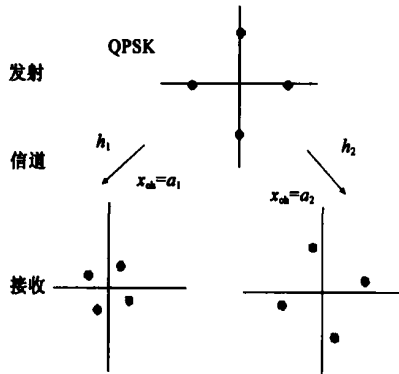


图 3 (2,1) 系统中, 信道调制前后的 QPSK 星座图比较

根据图 3 下方接收到的星座图, 接收端可以采用最大似然准则对星座图符号和信道符号同时进行检测, 即: 对于任意 $m \neq m' (m, m' = 1, 2), n \neq n' (n, n' = 1, 2, 3, 4)$, 当且仅当

$$d^2(y, h_m s_n) \leq d^2(y, h_{m'} s_{n'}) \quad (1)$$

时, 判决 $\hat{x} = s_n, \hat{x}_{ch} = a_m$ 。其中, $d^2(u, v) = (u - v)(u^* - v^*)$ 表示信号 u 与 v 之间 Euclidean 距离的平方, 而 $*$ 表示复共轭。

上面的例子可以推广到设置更多发射天线的系统或者系统采用其它调制方式的情况。不失一般性, 如果系统采用 N 点星座图调制, 而 M 个发射天线用于信道调制, 那么, 信息选择天线系统每一次可以传输 $\log_2(M \cdot N)$ 比特信息, 其中, $\gamma_c = \log_2 M$ 比特源于信道调制, $\gamma_s = \log_2 N$ 比特源于星座图调制, 而相应的随机选择天线系统每一次只能传输源于星座图调制的 $\gamma_s = \log_2 N$ 比特信息。将信息选择天线系统与随机选择天线系统的传输效率之比记作 η , 则有

$$\eta = \frac{R_{\text{信息选择天线}}}{R_{\text{随机选择天线}}} = \frac{\gamma_c + \gamma_s}{\gamma_s} \quad (2)$$

易知, $\eta > 1$, 而且, η 将随发射天线个数的增多而升高。所以, 我们有理由期望信息选择天线的发射模式能够达到高于随机选择天线所实现的信道容量。

3 信息选择发射天线系统的信道容量分析

本节, 我们将对信息选择发射天线系统的信道容量进行分析, 并给出其解析表达式。所要分析的系统模型如图 1 所示, 需要用到的一些数学表示如下: $I(U; V)$ 表示信号空间 U 与 V 之间的互信息, 而 $I(U; V|W)$ 则表示在 W 已知的条件下信号空间 U 与 V 之间的互信息; 另外, 大写字母表示信号空间, 对应的小写字母表示该信号空间中的任意一个样本。

在信息选择发射天线的系统中, 我们定义两个相互独立的发射信号空间 X 和 X_{ch} , 分别表示星座图符号的信号空间和信道符号的信号空间; 同时, 定义接收信号空间为 Y 。于是, 该系统发射信号空间与接收信号空间之间的互信息可以表示为^[9]

$$I(X, X_{ch}; Y) = I(X; Y|X_{ch}) + I(X_{ch}; Y) \quad (3)$$

信道容量即为系统输入与输出之间互信息的最大值。所以, 我们的信道容量分析将基于式(3)展开、逐步计算其等号右边的两项。

显然, 信道符号集 $\{a_1, a_2, \dots, a_M\}$ 中各元素出现的概率是相等的, 因此, 各发射天线被选中的概率也是相等的。所以, 在各平衰落信道 h_1, h_2, \dots, h_M 一定的条件下, 式(3)中等号右边第一项所对应的瞬时信道容量如下^[2, 6, 10]:

$$C_1 = \max_{p(x)} I(X; Y|C_{ch}) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \log_2(1 + \rho |h_m|^2) \quad (4)$$

式中, $\rho = \sigma_X^2 / \sigma_N^2$ 是接收到的平均信噪比, 其中, σ_X^2 表示星座图符号的能量, 而 σ_N^2 表示噪声功率。

可以注意到, 式(4)与随机选择发射天线系统的瞬时信道容量公式^[2]具有相同的形式, 也就是说, 式(3)第一项所对应的信道容量等于随机选择发射天线系统的信道容量, 而式(3)第二项则为信息选择发射天线系统带来了明显的信道容量增益。

下面, 我们继续完成式(3)等号右边第二项所对应的信道容量计算。

式(4)中第二个等号成立的条件是^[2, 10]: 星座图符号服从复高斯分布, 其概率密度函数为

$$p(x) = \frac{1}{\pi \sigma_X^2} \exp\left[-\frac{|x|^2}{\sigma_X^2}\right] \quad (5)$$

其中, $|\cdot|$ 表示求模运算。

这样, 当信道符号 $x_{ch} = a_m$, 即发射天线 m 所对应的信道 h_m 被选中传输星座图符号时, 接收到的信号也是服从复高斯分布的, 其概率密度函数为

$$p(y|x_{ch} = a_m) = \frac{1}{\pi \sigma_m^2} \exp\left[-\frac{|y|^2}{\sigma_m^2}\right] \quad (6)$$

其中, $\sigma_m^2 = |h_m|^2 \sigma_X^2 + \sigma_N^2 (m = 1, \dots, M)$ 表示经由信道 h_m 接收到的信号方差。

因为各发射天线被选中的概率相同, 也即信号经由各信道被接收的概率相同, 所以, 接收信号的平均概率密度函数为

$$p(y) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M p(y | x_{ch} = a_m) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left[\frac{1}{\pi \sigma_m^2} \exp \left(-\frac{|y|^2}{\sigma_m^2} \right) \right] \quad (7)$$

于是,在各平衰落信道一定的条件下,式(3)第二项所对应的瞬时信道容量计算如下:

$$C_2 = I(X_{ch}; Y) \Big|_{p(x) = \frac{1}{\pi \sigma_X^2} \exp \left(-\frac{|x|^2}{\sigma_X^2} \right)}$$

$$= \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \left[\int_{-\infty}^{\infty} p(y | x_{ch} = a_k) \log_2 \frac{p(y | x_{ch} = a_k)}{p(y)} dy \right] \quad (8)$$

其中, $p(y | x_{ch} = a_k)$ 和 $p(y)$ 分别如式(6)和式(7)所示。

综上所述,信息选择发射天线系统的瞬时信道容量为

$$C = C_1 + C_2 \quad (9)$$

其中, C_1 和 C_2 分别如式(4)和式(8)所示。

当衰落信道是各态历经的随机过程时,瞬时信道容量的

数学期望即为平均信道容量^[11]。所以,信息选择发射天线系统的平均信道容量为

$$\bar{C} = E\{C\} \quad (10)$$

其中, E 表示对各条相互独立的各态历经衰落信道求数学期望。

4 数值结果

这里,我们将对相同天线结构的信息选择发射天线系统和随机选择发射天线系统的信道容量数值结果作一比较,两者的信道容量概率分布函数和平均信道容量比较分别如图 4 和图 5 所示。

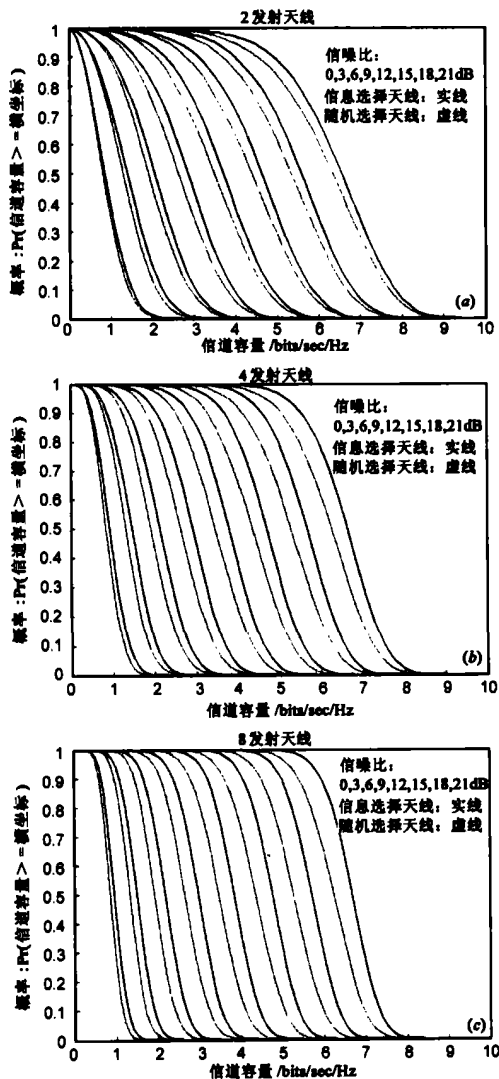


图 4 相同天线结构的随机选择天线系统与信息选择天线系统的信道容量概率分布函数比较:(a)天线结构为(2,1);(b)天线结构为(4,1);(c)天线结构为(8,1)

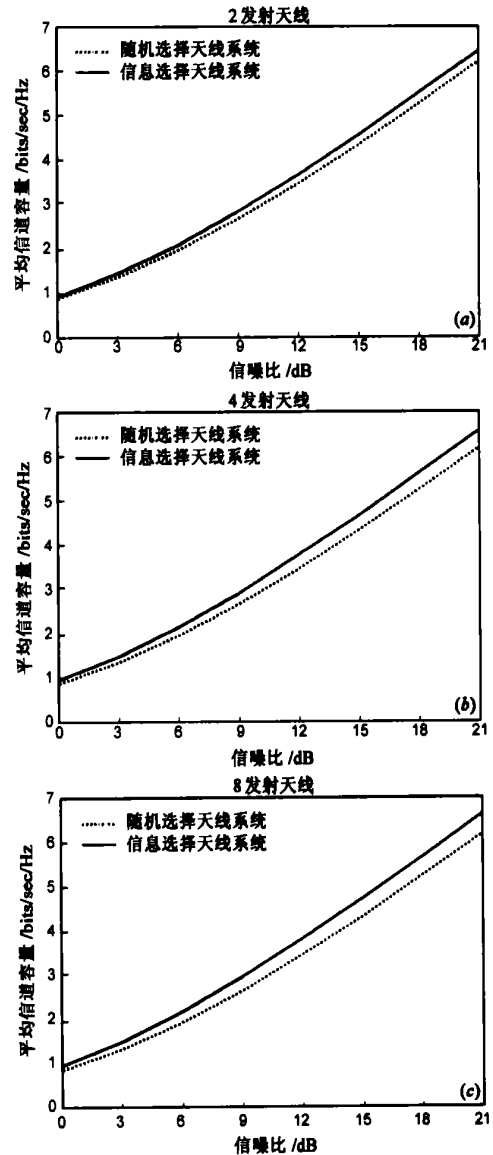


图 5 相同天线结构的随机选择天线系统与信息选择天线系统的平均信道容量比较:(a)天线结构为(2,1);(b)天线结构为(4,1);(c)天线结构为(8,1)

每一次计算执行 20000 组独立的平衰落信道样本,沿袭文[2]中所用的平衰落信道模型, $(M, 1)$ 系统中相互独立的各平衰落信道服从同一复高斯分布,即

$$h_m \sim \text{Normal}(0, 1/\sqrt{2}) + \sqrt{-1} \cdot \text{Normal}(0, 1/\sqrt{2}),$$

$$m = 1, 2, \dots, M \quad (11)$$

由图 4 和图 5 中的各图可以看出, 在天线结构相同的条件下, 信息选择天线系统的信道容量明显高于随机选择天线系统的信道容量。而且, 随着信噪比的增大以及发射天线个数的增加, 信息选择天线系统较随机选择天线系统的信道容量增益变得愈加明显。这是因为: 当信噪比升高时, 星座图上各符号点之间的距离增大, 信息选择天线系统能够实现更为有效的星座图符号与信道符号联合检测, 从而其信道容量增益有所提高; 而当发射天线个数增加时, 对应的信道符号信息将会增加, 信息选择天线系统的传输效率随之升高, 于是其信道容量增益亦随之升高。

5 结论

鉴于在多天线系统随机选择发射天线这一传输模式中存在着提高信道容量的可能性与可行性, 我们提出了一种新的天线选择模式^[7, 8], 即以一部分信源信息来选择发射天线。用于决定由哪个发射天线传送另一部分映射于传统调制星座图上的信源信息。本文从信息理论的角度对这种传输模式的信道容量进行了详细分析, 得出了解析表达式。数值结果表明: 与随机选择发射天线的传输模式相比, 信息选择发射天线的传输模式能够更为有效地传输信息、从而实现更高的信道容量。

参考文献:

- [1] Jakes W C. A comparison of specific space diversity techniques for reduction of fast fading in UHF mobile radio systems[J]. IEEE Trans Vehicular Technology, 1971(11): 81–93.
- [2] Foschini G J, Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. Wireless Personal Communications, 1998(6): 311–335.
- [3] Tarokh V, Seshadri N, Calderbank A R. Space time codes for high data rate wireless communication: Performance criterion and code construction[J]. IEEE Trans Inform. Theory, 1998, (3): 744–765.
- [4] Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless

communications[J]. IEEE J Select Areas Commun, 1998, (10): 1451–1458.

- [5] Tarokh V, Jafarkhani H, Calderbank A R. Space time block codes from orthogonal designs[J]. IEEE Trans Inform Theory, 1999(7): 1456–1467.
- [6] Telatar I E. Capacity of multi antenna gaussian channels[J]. European Transactions on Telecommunications, 1999, (11): 585–596.
- [7] Jiao B L, Xiong Q. A Signal modulation technique for increasing band efficiency in multipath environment[A]. IEEE 2001 International Conference on Third Generation Wireless and Beyond (3G Wireless 2001) [C]. San Francisco: Delson Group Inc, Cupertino, CA, 2001. 514–517.
- [8] Yang Y L, Song S M, Xie K Q, Jeong B J, Jiao B L. Channel hopping technique: Simulation result[A]. 2004 IEEE 60th Vehicular Technology Conference[C]. Los Angeles: Piscataway, N. J. IEEE, 2004. 4851–4853.
- [9] Fano R M. Transmission of Information: A statistical Theory of Communications[M]. New York: John Wiley and Sons, 1961. Chapter 2.
- [10] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. Bell Syst Tech J, 1948: 379–423, 623–656.
- [11] Bolekski H, Gesbert D, Paulraj A J. On the capacity of OFDM-based spatial multiplexing systems[J]. IEEE Trans Commun, 2002, (2): 225–234.

作者简介:



杨玉丽 女, 1978 年生于河北省承德市, 现在北京大学信息科学技术学院攻读博士学位, 研究方向为通信与信息系统。
E-mail: yang_yuli@hotmail.com

焦秉立 男, 北京大学信息科学技术学院教授、博士生导师, 主要从事无线通信及声学方面的研究。