

莱斯衰落下空时分组编码信道的容量分析

燕山大学信息科学与工程学院 肖丽萍 霍新整 杨兴丽

摘要 研究了莱斯衰落下空时分组编码信道的容量,推导出了其数学表达式,并给出了在接收天线数一定的情况下,增加发送天线数所能得到的信道容量上界。研究表明在发送天线数一定时,信道的容量随着接收天线数的增加而增加;在接收天线数一定时,信道的容量也随着发送天线数的增加而增加,但当发送天线数增加到一定数量时会出现地板效应。文章并与瑞利衰落下空时分组编码信道的容量进行了比较。

关键词 莱斯衰落 空时分组编码 信道容量 信噪比

1 引言

现在,随着各种数字多媒体业务的迅猛发展,对无线信道高速数据通信的要求越来越紧迫了,使用多个(发送或接收)天线,可以显著提高无线通信系统的信息传输容量^[1,2],1998年,Tarokh等人在对多发送多接收天线信道容量的基础上,提出了空时编码的概念。该编码把天线分集、信道编码和调制有机的结合在一起,有效提高了系统在衰落信道下的传输性能^[3]。Alamouti提出了一种简单的分集方法,采用两副发送、一副接收,获得与一副发送、两副接收相同的分集增益。Tarokh等在Alamouti工作的基础上,将正交编码的方法结合这种简单的分集技术提出了正交空时分组码,并研究了其编码和译码算法^[4]。文献^[5]在对正交空时分组码接收信噪比研究的基础上,研究了瑞利衰落下空时分组编码信道的容量,而在城市微蜂窝、卫星移动通信系统中,由于信源和信宿之间存在可视路径传播信号,直射波分量不可忽略,此时莱斯假设比瑞利假设更接近实际信道,因此本文对莱斯衰落下空时分组编码信道的容量进行了研究,其结果对实际微波、卫星系统的规划和设计具有一定的指导意义。

2 空时分组码多天线系统模型及接收信噪比的计算

考虑 n 副发送天线、 m 副接收天线的无线传输系统。设 $h_{i,j}$ ($i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m$) 为第 i 副发送天线到第 j 副接收天线的衰落系数。假设需要传输的信息符号序列为 (x_1, x_2, Δ, x_k) , 采用列正交

编码矩阵 $G = \begin{bmatrix} c_1^1 \Delta c_1^1 \Delta c_1^1 \\ M & M & M \\ c_p^1 \Delta c_p^1 \Delta c_p^1 \end{bmatrix}$ 并按行发送,在 P 个时刻内

完成一个编码码字的发送。 G 中的元素 c_t^i ($T=1,2,\dots,P; i=1,2,\dots,n$) 表示 t 时刻第 i 副发送的信号, c_t^i 为 $x_1, x_2, \Delta, x_k, x_1^*, x_2^*, \Delta, x_k^*$ 的线性组合。

记 $\vec{R}_j = (r_1^j \ r_2^j \ \Delta \ r_p^j)^T$ (上标“ T ”表示对矩阵求转置) 为第 j 副接收天线的信道矢量, $\vec{h}_j = (h_{1,j} \ h_{2,j} \ \Delta \ h_{n,j})^T$ 表示关于第 j 副接收天线的信道矢量, $\vec{n}_j = (n_1^j \ n_2^j \ \Delta \ n_p^j)^T$ 为第 j 副接收天线接收的复白高斯噪声矢量。设噪声 n_i^j 每维方差为 $N_0/2$ 。 $\vec{x} = (x_1 \ x_2 \ \Delta \ x_k \ x_1^* \ x_2^* \ \Delta \ x_k^*)^T$ 为信号矢量,假设在传送一个分组码的时间内 ($t=1,2,\dots,K,P$) 信道参数恒定,则系统的第 j 副接收天线的接收矢量可以表示为:

$$\vec{R}_j = G \cdot \vec{h}_j + \vec{n}_j = H_j \cdot \vec{x} + \vec{n}_j \quad (j=1,2,\dots,m) \quad (1)$$

式中 H_j 为第 j 副接收天线的信道矩阵,表示为:

$$H_j = \begin{bmatrix} H_{1,1}^j & H_{1,2}^j & \Delta & H_{1,2K}^j \\ H_{2,1}^j & H_{2,2}^j & \Delta & H_{2,2K}^j \\ M & M & M & M \\ H_{p,1}^j & H_{p,2}^j & \Delta & H_{p,2K}^j \end{bmatrix} \quad (2)$$

假设信道 $h_{i,j}$ ($i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m$) 已经准确估计出来,利用如下判决准则:

$$D'_k = \left| \hat{x}_k - \left(\sum_{j=1}^m |h_{i,j}|^2 \right) x_k \right|^2 \quad (k=1,2,\dots,K) \quad (3)$$

可分离出 K 条独立的输出支路 \hat{x}_k ($k=1,2,\dots,K$), 每条输出支路可独立进行译码。

$$\hat{x}_k = \sum_{j=1}^m \left[(r_1^{j*} H_{1,k}^j + r_2^{j*} H_{2,k}^j + \Delta + r_p^{j*} H_{p,k}^j + (r_1^j H_{1,K+k}^{j*} + r_2^j H_{2,K+k}^{j*} + \Delta + r_p^j H_{p,K+k}^{j*}) \right] \quad (4)$$

假设各发送符号等能量发送,发送信号序列 (x_1, x_2, Δ, x_k) 的总能量 $E_{tot} = E \left[\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n |c_i^j|^2 \right] = E \left[\sum_{i=1}^n |x_1|^2 + |x_2|^2 + \Delta + |x_k|^2 \right] = n \cdot K \cdot E \left[|x_k|^2 \right]$ 限定的情况下,各输出支路的接收信噪比为:

$$SNR_{rev} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n |h_{i,j}|^2 \frac{E_0}{n \cdot N_0} \quad (5)$$

3 莱斯衰落信道下空时分组编码信道的容量分析

在加性白高斯噪声(AWGN)下,由式(5)得到莱斯衰落下空时分组编码信道(一个空时分组码字

收稿日期:2003年12月2日

时间内,即共 p 个时刻)的瞬时信道容量为:

$$C_{\text{inst}} = K \log_2 \left[1 + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n |h_{i,j}|^2 \frac{E_0}{n \cdot N_0} \right] \quad (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m) \quad (6)$$

式中 $h_{i,j}$ 为复信道,是均值为 μ ,每维方差为 0.5 的独立高斯随即变量,则其幅度 $|h_{i,j}|$ 服从莱斯分布,其概率密度为:

$$P(|h_{i,j}|) = 2|h_{i,j}| \exp(-|h_{i,j}|^2 - \mu^2) I_0(2|h_{i,j}| \cdot \mu) \quad (1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m) \quad (7)$$

其中, $I_0(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(x/2)^{2m}}{(m!)^2}$ 为 0 阶第一类变形贝塞尔函数, $\mu=0$ 时,即为瑞利分布。

设 $h_{i,j} = h_{i,j}^{(R)} + j h_{i,j}^{(I)}$ ($i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m$) 则式(7)的莱斯衰落下空时编码的容量写为:

$$C_{\text{inst}} = K \log_2 \left(1 + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (|h_{i,j}^{(R)}|^2 + |h_{i,j}^{(I)}|^2) \frac{E_0}{n \cdot N_0} \right) \quad (1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m) \quad (8)$$

$$\text{令 } y = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (|h_{i,j}^{(R)}|^2 + |h_{i,j}^{(I)}|^2) \quad (9)$$

则 y 服从自由度为 $2mn$ 非中心均方切比雪夫分布,其概率密度为:

$$P_Y(y) = \frac{1}{2s^2} \left(\frac{y}{s^2} \right)^{(mn-1)/2} e^{-(s^2+y)/2s^2} I_{mn-1}(\sqrt{y} \frac{s}{s^2}) \quad (y \geq 0) \quad (10)$$

其中 $s^2 = \sum_{i=1}^m \mu^2$, $I_\alpha(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(x/2)^{\alpha+k}}{K! \Gamma(\alpha+k+1)}$ 为 α 阶第一类变形贝塞尔函数,则莱斯衰落下平均信道容量为:

$$C = K \int_0^{\infty} \log_2 \left(1 + y \cdot \frac{E_0}{n \cdot N_0} \right) P_Y(y) \cdot dy \quad (11)$$

注意到 $|h_{i,j}|$ 每维的方差为 0.5,则有:

$$C = K \int_0^{\infty} \log_2 \left(1 + y \cdot \frac{E_0}{n \cdot N_0} \right) \cdot \left(\frac{y}{s^2} \right)^{(mn-1)/2} e^{-(s^2+y)/2s^2} \cdot I_{mn-1}(2s\sqrt{y}) \cdot dy \quad (12)$$

上式是含有贝塞尔函数的无穷积分,对此式很难进行直接积分,采用数值计算对其进行分析。

图 1 给出了在发送天线数 $n=2$ 时莱斯衰落下(其中 $\mu=\sqrt{2}$)空时分组编码信道的容量 C 与接收天线数 m 的关系

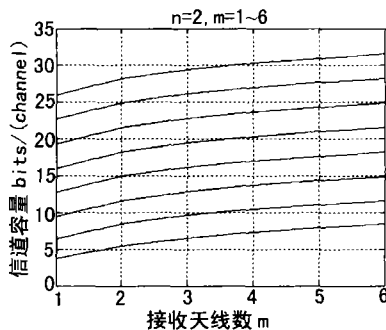


图 1 发送天线数 $n=2$ 时,信道容量 C 与接收天线数的关系

快,随着接收天

线数的增大容量的增加逐渐变缓;理论上,信道容量随着接收天线数的增加会不断增加,但实际系统是不能无限增加下去的。图 2 给出了在接收天线数 $m=1$, 信道容量 C 与发送天线数 n 之间的关系(SNR 由 0dB 开始依次间隔 5dB 增加),除 $n=1, m=1$ 的曲线为 $\mu=0$,即瑞利衰落外,其余均为 $\mu=\sqrt{2}$ 的莱斯衰落。由图 2 知,当接收天线为 1 与时,采用空时分组编码的多个发送天线系统与单个发送天线相比信道的容量有明显的增大,但当发送天线数增加到一定的程度(近似为 3, 4)时,信道容量几乎不再增加,事实上,当发送天线数 $n \rightarrow \infty$ 时,得到接收天线数一定时信道容量的上限为:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} C = K \log \left(1 + m \cdot \frac{(1 + \mu^2) E_0}{N_0} \right) \quad (13)$$

即存在发送天线数的地板效应。在实际移动通信系统中,由于手持设备体积、成本和系统复杂度等原因的限制,在移动台中实现接收分集比较困难,可以选用发送分集提高系统性能。但考虑到发送天线的地板效应,在采用空时分组编码的系统中,当发送天线数量达到理论给出的参考值后,就没有必要再增加了,发送天线数的再增加只能使系统复杂度提高,而性能得不到明显的改善。

图 3 给出了当发送天线数 $n=2$ 时,接收天线数 $m=2,4$ 时,瑞利衰落下($\mu=0$)空时分组编码信道的容量与莱斯衰落下($\mu=\sqrt{2}$)空时分组编码信道的容量比较。通过比较,发现莱斯衰落下

与瑞利衰落下信道的容量变化趋势是很相似的,但是在相同的条件下(相同的发送天线数 n , 相同的接收天线数 m , 相同的 SNR)莱斯衰落下信道的容量要

(下转第 33 页)

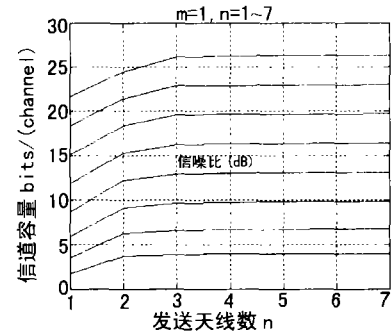


图 2 接收天线数 $m=1$ 时,信道容量 C 与发送天线数的关系

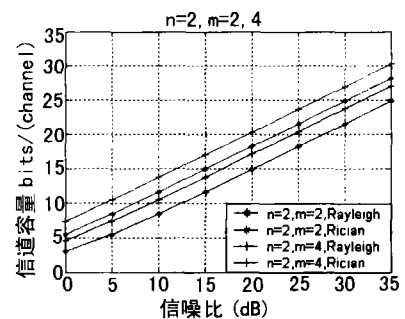


图 3 发送天线数 $n=2$, 接收天线数 $m=2,4$ 时,莱斯衰落与瑞利衰落下信道的容量比较

(3)当系统使用 6MHz 晶振,单片机串行口工作在方式1下,发送波特率为 2400bps,连续发送次数采用 9 次时,不考虑指令执行时间。发方发送数据时间:

$(1/2400 \times 10 \times 3) \times 9 \approx 112.5 \text{ ms}$

收方收到数据后需延迟时间(假设接收到前两次数据):

$(1/2400 \times 10 \times 3) \times (9 - 2) \approx 87.5 \text{ ms}$

再考虑 DTR810 收发延时和指令执行时间,安排出完整收发过

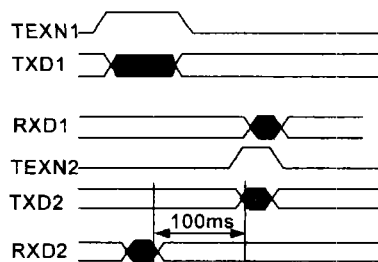


图3 收发时序图

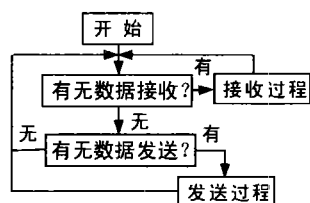


图4 主程序流程图

程的时序(图3)。主程序流程图如图4所示。

4 结束语

本无线数据传输方案除适用于近距离遥控遥测系统外,还适用于无线自动抄表、安全报警和家居工业自动化等应用系统领域。该方案接口电路简单,并有可靠性高、反应速度快的优点。目前已有完成设计的成形系统,测试结果满意,已经投入使用。✧

参考文献

- [1] 尚建平,郑建生,袁仪煌. Bluetooth RF 测试方法. 国外电子测量技术, 2003; (4)
- [2] 曹志刚,钱亚生. 现代通信原理. 北京:清华大学出版社, 1992
- [3] 胡汉才. 单片机原理及接口技术. 北京:清华大学出版社, 1996

作者简介

曹建军 (1975 -), 男, 中国人民解放军军械工程学院计算机应用专业研究生, 研究方向为智能检测与诊断、射频识别。

何福友 (1946 -), 男, 中国人民解放军军械工程学院教授, 研究方向为无损检测、寄生传输、射频识别。

李圣军 (1977 -) 男, 中国电子科技集团公司第五十四研究所助理工程师。

(上接第 16 页)

比瑞利衰落下信道的容量大,由此得出均值增大可提高系统的信道容量。由此图还可知,要得到相同的信道容量,在采用相同的发送天线和接收天线的系统中,莱斯衰落下需要的发送功率比瑞利衰落下需要的发送功率可减少大约 5dB。

4 结束语

本文通过对莱斯衰落下空时分组编码信道的容量研究,推导出了莱斯衰落下空时分组编码信道的容量数学表达式,并给出了在接收天线数一定的情况下,增加发送天线数所能得到的信道容量的上界。研究表明,发送天线数一定时,莱斯衰落下空时分组编码信道的容量随着接收天线数的增加而增加;在接收天线数一定时,信道的容量也随着发送天线数的增加而增加,但当发送天线数增加到一定数量时会出现地板效应。所以在实际应用中,为提高性能,发送天线数达到理论参考值时,就没有必要再增加了。通过与瑞利衰落下空时分组编码信道的容量比较,得到在相同的条件下(相同的发送天线数 n 、相同的接收天线数 m 、相同的 SNR)莱斯衰落下空时分

组编码信道的容量要比瑞利衰落下空时分组编码信道的容量好一些。因此,在实际应用中,应将天线架设在较高或空旷的地域,尽可能得到视距传输。✧

参考文献

- [1] Naguib A F, Seshadri N, Calderbank R A. Space - Time Coding and Signal Processing for High - Data - Rate Wireless Communications [J]. IEEE Signal Processing Mag, 2000; 16(3): 77 ~ 91
- [2] Driessen P F, Foschini G J. On the Capacity for Multiple - Input Multiple - output Wireless Channels: a Geometric Interpretation [J]. IEEE Trans on Commun, 1999; 47(2): 173 ~ 176
- [3] V. Tarokh, N. Seshadri, A R Calderbank. Space - time Codes for High Data Rate Wireless Communications: Performance Criterion and Code Construcion [J]. IEEE Trans I. T., 1998; 44(2): 744 ~ 765
- [4] V. Tarokh, H. Jafarkhani and A. R. Calderbank. Space - Time Block Codes from Orthogonal Designs [J]. IEEE Trans. on I. T., 1999; 45(5): 1456 ~ 1467
- [5] 罗涛,佟学俭,乐光新. 瑞利衰落下空时分组编码信道的容量 [J]. 无线通信技术, 2001; 10(1): 1 ~ 4

作者简介

肖丽萍 (1963 -) 女, 副教授, 主要研究方向为移动通信技术。

霍新整 (1978 -) 女, 燕山大学在读研究生, 主要研究方向为空时编码。

(上接第 25 页)

北京:机械工业出版社, 1998

[2] Microsoft Developer Network MSDN Library for Windows DDK, Microsoft Corporation, 2002

[3] HFA3841 Driver Programmer's Manual, Intersil Corporation, Version 1. 61, 2000

[4] 郭峰,曾兴雯,刘乃安. 无线局域网. 北京:电子工业出版社, 1996

[5] IEEE Std 802.11, 1999 Edition

作者简介

孙翔 (1979 -), 男, 硕士研究生, 研究方向: 移动计算网络。

刘乃安 (1966 -), 男, 副教授, IEEE 高级会员, 目前主要从事移动计算网络、WLAN 和 IPv6 网络技术的研究。