

延时反馈闭环发射分集的上限性能分析

蒋海林, 苏彦兵, 谈振辉

(北京交通大学现代通信研究所, 北京 100044)

摘 要: 本文分析了仅反馈信道统计参数时闭环发射分集系统的误比特率性能, 然后计算不同多普勒频移和反馈时延时, 反馈信道状态信息时系统的误比特率性能, 并根据信道参数预测的性能上界, 指出在快衰落信道下, 信道参数预测是一个值得研究的方向.

关键词: 闭环发射分类; 延时反馈; 信道预测

中图分类号: TN929. 5 文献标识码: A 文章编号: 0372 2112 (2002) 11-1729 03

Performance Analysis of Delayed Feedback Closed Loop Transmit Diversity System

JIANG Hai lin, SU Yan bing, TAN Zhen hui

(Modern Telecommunication Institute, Northern Jiaotong University, Beijing 100044 China)

Abstract: First the BER performance is analyzed given the channel statistics information. And the BER is calculated given the delayed channel states information under assumptions of different Doppler frequency. Based on the upper bound of channel prediction algorithms, we point out that developing good channel prediction algorithms is a potential direction.

Key words: close loop transmit diversity; delayed feedback; channel prediction

1 引言

影响无线传输的一个重要因素是无线信道的时变多径衰落, 而减少多径衰落的一个重要方法是天线分集技术. 天线分集通常采用的办法是在接收端利用多个天线进行分集合并或者选择接收. 接收分集一般用在基站上, 而用在移动台上的主要问题是移动单元的成本、尺寸和功耗. 如果在基站进行多天发射分集能取得在移动台上接收分集的分集增益, 无疑会经济得多.

发射分集技术目前已经吸引了很多人在进行研究, 文[1]中计算了多发射天线系统在衰落信道中的信道容量, 得出在一定的条件下, 多天线系统的信道容量要远大于单天线系统; V. Tarokh 等人^[2]提出了空时编码的概念, 将发射分集和网格编码、调制相结合, 取得了良好的效果; 文[3]中提出了一种简单的发射分集方案, 而闭环发射分集利用移动台反馈的下行链路的信道参数, 动态设计发送码字和调整天线的加权系数, 在一定条件下具有比开环发射分集更良好的性能^[4].

但是正如文[4]中所指出的那样, 随着 Doppler 频移的增大, 如果没有好的信道参数预测方法, 闭环发射分集的性能将急剧下降. 原因在于随 Doppler 频移增大, 信道的参数变化更快, 同时由于从移动台到基站的反馈时延, 使得基站获得的信道参数有不小的偏差. 本文中首先分析反馈信道统计参数

时系统的误比特率性能, 然后计算不同多普勒频移和反馈时延时, 反馈信道状态信息时系统的误比特率性能, 并根据信道参数预测的性能上界, 指出在快衰落信道下, 信道参数预测是一个值得研究的方向.

2 系统模型

以发射天线个数 M , 接收天线个数 $N=1$ 为例, 假设基站到移动台的信道 h_1, h_2, \dots, h_M 是均值为零的复高斯信道, 其均值为 σ^2 , 发送信号采用 BP SK 调制.

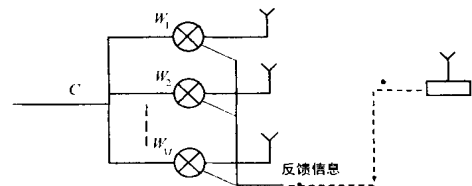


图 1 延迟反馈闭环发射分集系统模型

在图 1 中, 移动台估计到的信道参数反馈到基站, 并由基站进行处理时, 必然存在一个延时, 假设这个时延长度为 D , 假设 h_i 为延时后的信道参数, 则有:

$$h_i = \rho h_{i+} e^{j\theta_i}, \quad 1 \leq i \leq M \quad (1)$$

其中 $E\{h_i e^{j\theta_i}\} = 0$, $e_i \sim N(0, \sigma_e^2)$, 其中 $\sigma_e^2 = (1 - \rho^2) \times \sigma^2$, $\rho = J_0(2\pi f_d D)$, $J_0(x)$ 表示第一类零阶贝塞尔函数, f_d 是信道的多

普勒频移. 接收到的信号为:

$$r(t) = C\mathbf{w}\mathbf{h} + n_0 \quad (2)$$

其中 $c = \pm\sqrt{\varepsilon}$, $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_M]$, $\mathbf{h} = [h_1, h_2, \dots, h_M]^T$, 并且有 $\sum_{i=1}^M w_i^2 = 1$, n_0 是均值为零, 方差为 σ_n^2 的高斯噪声.

3 反馈信道统计信息时的性能分析

在发送端利用反馈的信道统计信息的好处是信道统计信息的变化比信道状态的变化要慢得多, 因此如果在 TDD 模式下其参数要准确得多, 而如果在 FDD 模式下它要求的反馈速率则低得多. 当发送端只能获知信道的统计信息时, 衡量系统性能的参数是平均误比特率 BER_{AV} , 假设信道矢量 $\mathbf{h} \sim N(0, \Phi)$, 对 BPSK 调制有:

$$BER(\mathbf{h}) = Q\left[\frac{\sqrt{2E_b} \mathbf{h}^T \mathbf{w}}{\sigma_n}\right] = Q\left[\frac{\sqrt{2E_b} R \mathbf{h}}{\sigma_n}\right] \quad (3)$$

其中 $R = \mathbf{w}^T \mathbf{w}$. 对 \mathbf{h} 进行 KL 展开, 有:

$$BER_{AV} = E\left[Q\left[\frac{\sqrt{2E_b} \sum_{i=1}^M |\xi_i|^2}{\sigma_n}\right]\right] \quad (4)$$

其中, $\xi_i \sim N[0, \lambda_i]$, $E\{\xi_i \xi_j^*\} = \delta_{i,j} \lambda_i$, $\lambda_i, i = 1, 2, \dots, M$ 是 $M \times M$ 矩阵 $\Phi = \Phi^H R$ 的特征值. 由于 R 非负定, 且是厄密特矩阵,

利用等式 $Q(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp\left[-\frac{x^2}{2\sin^2\theta}\right] d\theta$, 有:

$$BER_{AV} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \prod_{i=1}^M \left(1 + \frac{\varepsilon}{\sigma_n^2 \sin^2\theta} \lambda_i\right)^{-1} d\theta \quad (5)$$

注意到 Φ 的特征值取决于信道相关矩阵 Φ 和输入矩阵 R . 由于 Φ 是固定的, 因而可以选择 \mathbf{w} 使得其达到最小.

下面证明: 在 $\text{trace } R$ 为常量的约束下, 当 $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_M$ 时, 其平均误比特率最小.

$$\text{定义 } \lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M]^T, Z = \frac{\varepsilon}{\sigma_n^2 \sin^2\theta} > 0,$$

$$f(Z, \lambda) = \prod_{i=1}^M (1 + Z\lambda_i)$$

约束条件 $\text{trace } R = C$ 等价于 $\sum_{i=1}^M \lambda_i = C$, 因而问题可以等价于以下的约束优化问题:

$$\begin{cases} \lambda_0 = \underset{\lambda_i > 0}{\text{argmax}} f(Z, \lambda) \\ \sum_{i=1}^M \lambda_i = C \end{cases} \quad (6)$$

注意到 $BER_{AV} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} [f(Z, \lambda)]^{-1} d\theta$, 如果 λ_0 与 Z 无

关, 即可得出 BER_{AV} 在 λ_0 处取得最小值. 用拉格朗日数乘法有:

$$L(\lambda) = f(Z, \lambda) - \mu \left(\sum_{i=1}^M \lambda_i - C \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_j} = Z \prod_{i \neq j} (1 + Z\lambda_i) - \mu = Z \frac{\prod_{i=1}^M (1 + Z\lambda_i)}{1 + Z\lambda_j} - \mu, \quad j = 1, \dots, M \quad (8)$$

令上式中所有偏导为零, 有:

$$\lambda_{j,0} = \frac{\prod_{i=1}^M (1 + Z\lambda_{i,0})}{\mu} - \frac{1}{Z}, j = 1, \dots, M \quad (9)$$

这就表明 $\lambda_{j,0}$ 与 j 无关, 因此有 $\lambda_{1,0} = \lambda_{2,0} = \dots = \lambda_{M,0}$. 命题得证.

当所有信道参数是独立同分布时, 有 $\Phi = I_M$, 而 R 只要满足 $R = \frac{1}{M} I_M$ 即可. 值得指出的是, 不论信道参数是否是独立同分布随机变量, 这里求出的都是反馈信道统计信息时的最优平均误比特率性能, 当信道参数相互间不独立时, 按照这个原则适当地设计码字和天线加权系数, 同样能获得这个最优误比特率性能.

4 反馈信道状态信息时的误码率性能分析

假设移动台能对信道参数的估计为 $\hat{\mathbf{h}}$, 设 $\mathbf{v} = \mathbf{w}\hat{\mathbf{h}}$. 则判决变量 d 的表达式为:

$$\hat{d} = \text{sgn}[\text{Re}\{r\mathbf{v}^*\}] \quad (10)$$

由于 r 和 \mathbf{v} 都是零均值高斯变量, 定义延时后信道的平均瞬时功率增益为 $y = |\mathbf{h}|^2$, 定义发送 SNR 为 $\Gamma = \varepsilon/\sigma_n^2$. 则相对于 y 的条件差错概率为^[4]:

$$P_e(x) = Q_m(a, b) - KI_0(ab) \exp\left[-\frac{a^2+b^2}{2}\right] \quad (11)$$

其中 $Q_m(a, b)$ 是 Marcum Q 函数.

$$a^2 = \frac{1}{2} \left\{ c \sqrt{\frac{\Gamma y}{1 + \sigma_n^2 \Gamma}} - \frac{\sqrt{y}}{\sigma_n} \right\}^2, \quad b^2 = \frac{1}{2} \left\{ c \sqrt{\frac{\Gamma y}{1 + \sigma_n^2 \Gamma}} + \frac{\sqrt{y}}{\sigma_n} \right\}^2, \quad K = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{c}{\sqrt{1 + \sigma_n^2 \Gamma}} \right)$$

同时, y 服从均值为 $M\sigma_n^2$, 自由度为 $2M$ 的 χ^2 分布:

$$p_y(y) = \frac{y^{M-1} \exp(-y/\sigma_n^2)}{(M-1)! \sigma_n^{2M}} \quad (12)$$

对式(11)的条件概率密度在 y 上取平均, 可得到:

$$\bar{P}_e = \int_0^\infty P_e(y) p_y(y) dy \quad (13)$$

得到不同信道相关系数 ρ 下系统差错概率如图 3 所示.

为了减少信道反馈时延对性能的影响, 直观的

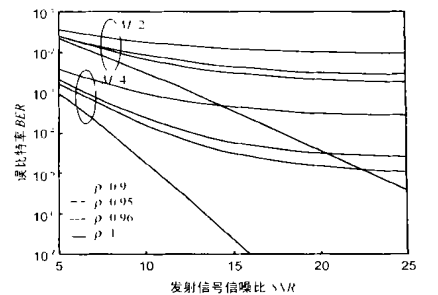


图 3 不同延时反馈系数下的差错概率

想法是对信道的参数进行预测. [7] 中结果显示, 即使预测 10ms 后的信道参数, 预测增益最大也能达到 17dB, 可以求得此时相关系数 $\rho=0.99$ 左右. 因此好的信道参数预测算法对改进系统性能具有很大的潜力.

5 结论

本文中首先分析了反馈信道统计参数时系统的误比特率性能, 并与之相对应的码字设计和天线加权系统设计原则, 然后计算不同多普勒频移和反馈时延时, 反馈信道状态信息时系统的误比特率性能, 并根据信道参数预测的性能上界, 指出在快衰落信道下, 信道参数预测是一个值得研究的方向.

参考文献:

- [1] G Jfoschini Jr, M J Gans. On limits of wireless comm. in a fading environment when using multiple antennas[J]. Wireless Personal Comm, 1998, 6(3): 311- 335.
- [2] V Tarokh, N Seshadi, A R Calderbank. Space time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and code construction[J]. IEEE Trans On Information Theory, 1998, 44(3): 744- 765.
- [3] S M Alamouni. A simple transmit diversity technique for wireless communications[J]. IEEE Journal On Selected Areas in Communications, 1998, 16(8): 1451- 1458.

- [4] J K Cavers. Multiuser transmitter diversity through adaptive downlink beamforming[C]. IEEE WCNC' 99.
- [5] 杜志敏, 等. WCDMA 中两种天线闭环发射分集模式的性能分析[J]. 电子学报, 2000, 28(11A): 92- 96.
- [6] H P Bernhard. A tight upper bound on the gain of linear and nonlinear predictors for stationary stochastic processes[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 43: 2909- 2917.
- [7] T Ekman, G. , Kubin. Nonlinear prediction of mobile radio channels: measurements and mars model designs[C]. USA: 1999. 2667- 2670. IEEE ICASSP99.

作者简介:

蒋海林 男, 1974 年 9 月出生于江西省萍乡市, 现为北方交通大学现代通信研究所博士研究生, 主要研究方向: 无线 ATM, 移动通信中的关键技术.

苏彦兵 男, 1969 年 2 月出生于内蒙古包头市, 现为北方交通大学现代通信研究所博士研究生, 主要研究方向: 多天线 MIMO 系统.

谈振辉 男, 1944 年 2 月出生于上海市, 现为北方交通大学教授、博士生导师、校长. 主要研究方向为个人通信, 宽带移动通信.