

传输分集技术在第三代移动通信系统中的应用

李 俨¹, 封 翔²

(1. 信息产业部电信科学技术研究院移动中心, 北京学院路 40 号, 北京 100083; 2. 安捷伦科技软件有限公司, 北京 100044)

摘 要: 本文首先分析了衰落信道中采用分集技术时卷积编码 Viterbi 软判算法的性能, 指出具有独立衰落特性的分集信道数越多, 接收的性能越好. 并给出了采用不同的分集技术时系统性能的仿真结果, 结果表明采用传输分集技术可以明显提高前向链路的性能, 而不增加移动终端的复杂度. 传输分集是一种有效可行的对抗衰落的技术, 有望在第三代移动通信系统中得到广泛应用.

关键词: 传输分集; 第三代移动通信; 扩频通信; 卷积编码

中图分类号: TN821+.91 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2000)11A-0145-04

Application of Transmit Diversity Techniques in Third Generation Mobile Communication Systems

LI Yan¹, FENG Xiang²

(1. China Academy of Telecommunication Technology, No. 40, Xue-yuan Road, Beijing, 100083, China;

2. Agilent Software Ltd. Co., Beijing, 100044, China)

Abstract: The performance of convolutional coding with diversity using Viterbi soft decision decoding algorithm in Rayleigh fading channel is analyzed, and it shows that the more the independent diversity channels, the better the performance. Then the diversity techniques used in 3G mobile communication system are introduced and simulations for different diversity techniques are carried out. The results show that the link performance can be improved obviously using transmit diversity technique without increasing the complexity of mobile terminal. Transmit diversity is an efficient technique to combat fading and it will be widely used in 3G mobile communication system.

Key words: transmit diversity; 3G mobile communication; spread spectrum communication; convolutional coding

1 引言

无线传输所面临的最大问题是信道的时变多径衰落特性, 克服多径衰落的技术包括传输功率控制和分集. 功率控制在克服慢衰落时较为有效, 但在快衰落时, 由于功率控制的速度有限, 所以效果不明显; 另一方面, 功率控制可能增加对相邻小区的干扰, 而使系统总干扰增加. 分集技术包括时间分集、频率分集和天线分集. 这些分集技术与纠错编码相结合, 可降低传输错误率. 交织就是一种时间分集方式. 时间分集会导致较大的延时, 在慢衰落信道中分集增益较小. 扩频技术本身便是一种频率分集, 在频率选择性信道下, 如大区制系统中, 在接收端可采用 RAKE 接收机. 但对室内环境和微小区系统环境, 衰落多为平坦性衰落, 由于运动速度较慢, 衰落速度慢, 时域和频域分集的效果不明显, 所以有必要采用其它分集技术, 而天线分集便是一种有效的技术. 天线分集包括发射分集和接收分集, 分别指采用多个独立的天线发射或接收.

第三代移动通信系统需支持更高速率的业务, 同时还需具有更高的服务质量, 更广的覆盖范围和更高的频谱利用率. 为了使相对简单的移动终端获得分集增益, 考虑在基站端使

用发射天线分集^[1].

本文在第二部分给出了分集系统模型, 第三部分分析了采用分集技术时衰落信道中卷积编码 Viterbi 软判算法的性能. 接着在第四部分介绍了传输分集技术在三代系统中的应用, 并进行了性能比较, 最后总结全文.

2 分集系统模型

在采用分集技术的二进制数字通信系统中, 假设有 L 个分集信道, 每个信道的衰落特性服从 Rayleigh 分布, 且相互统计独立, 各信道上的加性高斯白噪声(AWGN)也相互统计独立, 其双边功率谱密度均为 $N_0/2$.

分集系统的模型如图 1 所示. 经卷积编码和 BPSK 调制后的序列在 L 个相互独立的 Rayleigh 衰落信道上传输, 在接收端, 各接收机采用相干解调, 各接收机的输出信号进行最大比合并. 解码器采用 Viterbi 软判的算法.

3 多径衰落信道中卷积码的性能分析

根据卷积码的线性特性, 不失一般性, 可以假设传输的信号为全零序列. 最大比合并器的输出序列 $\{U_k\}$ 即为 Viterbi 解

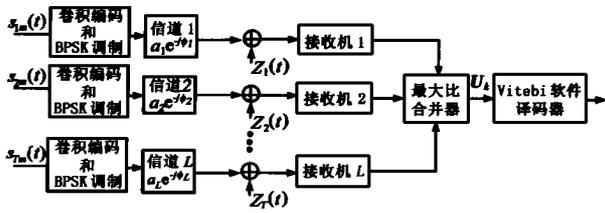


图1 采用分集技术的二进制数字通信系统模型

码器的输入, 可表示为

$$U_k = 2E_c \sum_{l=1}^L \alpha_{k,l}^2 + \sum_{l=1}^L \alpha_{k,l} n_{k,l}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (1)$$

其中 $\{\alpha_{k,l}, l = 1, 2, \dots, L\}$ 为信道在第 k 个比特传输时刻的衰落因子。对固定的 $\{\alpha_{k,l}\}$, U_k 为高斯分布的随机变量, 其均值为

$$E[U_k] = 2E_c \sum_{l=1}^L \alpha_{k,l}^2 \quad (2)$$

方差为

$$\sigma_{U_k}^2 = 2E_c N_0 \sum_{l=1}^L \alpha_{k,l}^2 \quad (3)$$

上面式子中 E_c 为每个编码比特的传输符号的能量。

下面首先分析第一事件错误概率 P_e 。 P_e 即为在卷积码的网格图的任何节点上非正确路径第一次与正确路径合并的概率, 从文献[2]中可知其上界。

$$P_e \leq \sum_{d=d_{free}}^{\infty} a_d P_2(d) \quad (4)$$

其中 d_{free} 为卷积码的最小自由距离, a_d 表示与全零路径的距离为 d 的路径数, $P_2(d)$ 为与正确路径相差 d 比特的错误路径上发生错误的概率, 可表示为

$$P_2(d | \alpha_{k,l}) = P\left(\sum_{p=1}^d \dot{U}_p \geq 0\right) \quad (5)$$

其中下标 p 代表两条路径上所不同的 d 个比特, $\{\dot{U}_p\}$ 表示这 d 个比特对应的解码器的输入。

式(4)和(5)表示的概率都以信道的衰落因子 $\{\alpha_{p,l}\}$ 为条件, 该条件概率需在 $\{\alpha_{p,l}\}$ 的概率密度函数上进行平均。这时需分别考虑快衰落和慢衰落两种情况。

对快衰落信道和采用深度交织的情况, 可假设 $\{\alpha_{p,l}\}$ 对所有 p 和 l 是相互独立的, 则

$$P_2(d | \gamma_b) = Q(\sqrt{2R_c \gamma_b}) \quad (6)$$

$$\gamma_b = \frac{E_b}{N_0} \sum_{p=1}^d \sum_{l=1}^L \alpha_{p,l}^2 = \sum_{p=1}^d \sum_{l=1}^L \gamma_{p,l} \quad (7)$$

其中 R_c 为卷积码的编码速率; $\gamma_{p,l} = E_b \alpha_{p,l}^2 / N_0$ 为在第 p 个比特传输时刻 l 个信道上每比特的瞬时信噪比。

求概率密度函数 $p(\gamma_b)$, 可通过 γ_b 的特征函数来得到。因为 $\alpha_{p,l}$ 为 Rayleigh 分布, 所以 γ_b 服从自由度为 $2dL$ 的 *chi square* 分布。利用与文献[2]中相同的方法可得

$$p(\gamma_b) = \frac{1}{(dL-1)! \bar{\gamma}_c^{dL}} \gamma_b^{dL-1} \exp(-\gamma_b / \bar{\gamma}_c) \quad (8)$$

这里 $\bar{\gamma}_c$ 为每个信道的平均信噪比, 并假设对所有信道都相同。它独立于 k 和 l , 即为

$$\bar{\gamma}_c = \frac{E_b}{N_0} E(\alpha_{k,l}^2) \quad (9)$$

最后, 在衰落信道的统计特性上对式(6)所给的条件错误概率进行平均。

$$P_2(d) = \int_0^{\infty} P_2(d | \gamma_b) p(\gamma_b) d\gamma_b = \left[\frac{1}{2}(1-\mu)\right]^{dL} \cdot \sum_{k=0}^{dL-1} \binom{dL-1+k}{k} \left[\frac{1}{2}(1+\mu)\right]^k \quad (10)$$

其中, $\mu = \sqrt{R_c \bar{\gamma}_c / (1 + R_c \bar{\gamma}_c)}$ 。

对长度为 B 的数据帧, 帧正确概率等于在网格图中每一比特都不发生错误的概率, 其值大于 $(1 - P_e)^B$, 因而帧错误率 P_F 的上界为

$$P_F \leq 1 - (1 - P_e)^B \quad (11)$$

采用同样的方法, 可以得到误比特率 P_B 的上界为

$$P_B < \sum_{d=d_{free}}^{\infty} a_d f(d) P_2(d) = \sum_{d=d_{free}}^{\infty} \beta_d P_2(d) \quad (12)$$

其中 $\beta_d = a_d f(d)$ 对应于所有与全零路径的距离为 d 的路径上原始数据的错误比特数, 可通过将转移函数 $T(D, N)$ 对 N 求偏微分得到^[2], 即

$$\frac{dT(D, N)}{dN} \Big|_{N=1} = \frac{d}{dN} \left(\sum_{d=d_{free}}^{\infty} a_d N^{(d)} D^d \right) \Big|_{N=1} = \sum_{d=d_{free}}^{\infty} \beta_d D^d \quad (13)$$

对慢衰落信道, 假设 $\{\alpha_{p,l}\}$ 在一帧时间里为常数, 即 $\alpha_{p,l} = \alpha_l$ 。我们先推导以衰落因子 $\{\alpha_l\}$ 为条件的误码率 P_{BS} 的上界, 为:

$$P_{BS}(\gamma_b) < \sum_{d=d_{free}}^{\infty} \beta_d Q(\sqrt{2R_c \gamma_b}) \quad (14)$$

以及以衰落因子 $\{\alpha_l\}$ 为条件的帧正确率 P_{CFS} 的下界, 为

$$P_{CFS}(\gamma_b) > [1 - \sum_{d=d_{free}}^{\infty} a_d Q(\sqrt{2R_c \gamma_b})]^B \quad (15)$$

再将该条件概率在 $\{\alpha_l\}$ 的概率密度函数上取平均, 则误码率 P_{BS} 和帧错误率 P_{FS} 的上界分别为:

$$P_{BS} = \int_0^{\infty} P_{BS}(\gamma_b) \cdot p_s(\gamma_b) d\gamma_b < \int_0^{\infty} \left[\sum_{d=d_{free}}^{\infty} \beta_d Q(\sqrt{2R_c \gamma_b}) \right] \cdot p_s(\gamma_b) d\gamma_b \quad (16)$$

$$P_{FS} = 1 - \int_0^{\infty} P_{CFS}(\gamma_b) \cdot p_s(\gamma_b) d\gamma_b < 1 -$$

$$\int_0^{\infty} \left[1 - \sum_{d=d_{free}}^{\infty} a_d Q(\sqrt{2R_c \gamma_b}) \right]^B \cdot p_s(\gamma_b) d\gamma_b \quad (17)$$

$$p_s(\gamma_b) = \frac{1}{(L-1)! \bar{\gamma}_c^{L-1}} \gamma_b^{L-1} \exp(-\gamma_b / \bar{\gamma}_c) \quad (18)$$

这里 $\bar{\gamma}_c$ 如式(9)所示, $P_s(\gamma_b)$ 是自由度为 $2L$ 的 *chi square* 分布的随机变量 γ_b 的概率密度函数。

利用上面分析结果计算编码速率为 $1/4$, 约束长度为 9, 八进制的生成函数为 (765, 671, 513, 473)^[1] 的卷积码在衰落信道中的误比特率和帧错误率的上界, 分别如图 2 和图 3 所示。数据帧长度为 192, a_d 和 $\beta_d (d \geq 24)$ 通过计算机搜索得到。

由图可见, 具有独立衰落特性的分集信道数越多, 性能越好, 且越接近于 AWGN 信道的性能。快衰落信道的性能好于

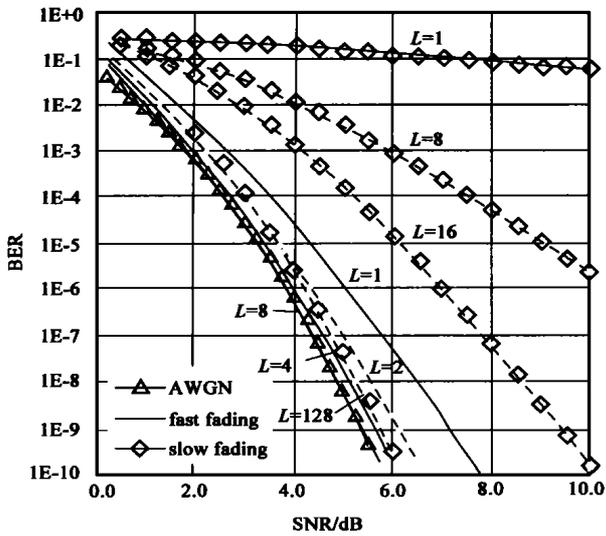


图 2 误比特率的上界

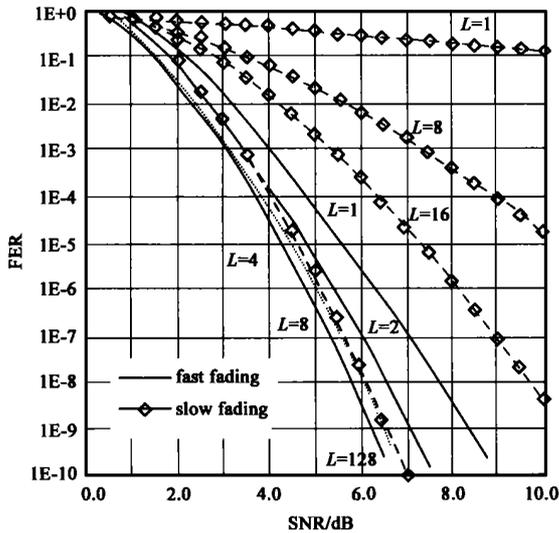


图 3 帧错误率的上界

慢衰落信道。在慢衰落的情况下, 由于信道变化较慢, 当发生衰落, 信噪比下降时, 在较长的序列范围内发生错误的概率均较大, 这时卷积码也不能有效的纠错, 因而误比特率和帧错误率较大; 而对于快衰落信道, 由于假设相邻接收符号受衰落的影响是独立的, 则在一定序列范围内均发生衰落而造成差错的概率较小, 所以其性能好于慢衰落信道的性能。

根据前面的分析可以看出, 在慢衰落信道下, 具有独立衰落特性的信道为 L 个, 而在快衰落信道下, 对于每个信息比特而言, 具有独立衰落特性的信道数为 $L \cdot d_{frec}$ 个, 因而快衰落信道下的性能好于慢衰落信道。

下面讨论两种极限情况。在实际系统中, 衰落的快慢是相对于传输速率而言的。当数据速率较高时, 如高于 1Mbps, 信道接近于慢衰落, 在这种情况下, 应采用交织深度较大的交织器来减弱慢衰落的影响。但在许多系统中, 交织深度常受到实际应用的限制, 如对话音信号, 语音编码的速率本身较低, 同时由于时延的限制, 交织深度不宜过大, 这时可采取一些措

施, 增强独立衰落的特性, 如第三代移动通信系统中采用的天线分集技术。下面就以 cdma2000 系统为例, 介绍传输分集技术的应用。

4 cdma2000 系统中传输分集技术的应用

cdma2000 系统采用了多种传输分集技术: 多载波 (MC) 传输分集、正交传输分集 (OTD)、空时扩频 (STS) 传输分集^[1]。

采用 OTD 方式时, 同一移动终端发送的经编码的信号被分成两个数据流, 分别经正交 Walsh 序列扩频后通过两个独立的天线发送。不同的发射天线采用不同的正交 Pilot 信道。OTD 将原始数据流分成两路并分别在两个天线上传输, 即每个编码后的比特只在一个天线上传输。STS 方式则是将分开的两路信号经正交扰码后再合并, 并分别从两个天线上传输, 且所有的编码后的比特均在两个天线上得到传输。采用 MC 方式时, 编码后的信号被分成三个数据流, 经扩频、调制后分别在三个不同的载波上传输。若三个载波采用同一天线传输, 即采用了频率分集; 而采用不同天线时, 还可获得天线分集增益。

这几种分集方式都是利用不同天线的独立传输特性来增加符号间的统计独立性, 提高解码性能, 从而获得分集增益。

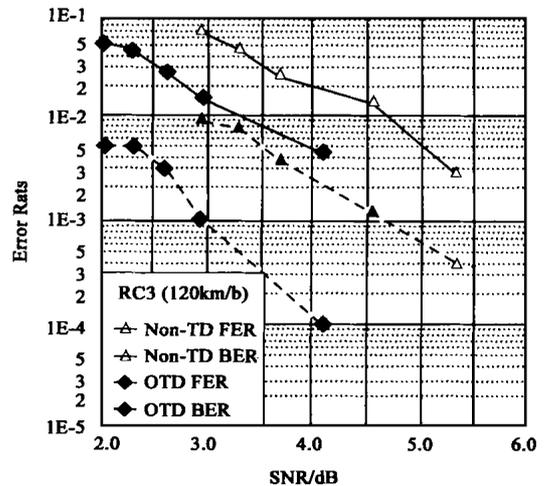


图 4 非传输分集和 OTD 情况下的误帧率和误码率曲线

文中的仿真采用了 OTD 和 STS 方式以及未采用分集方式时, cdma2000 系统在多径衰落环境下的性能。仿真条件为系统工作在 RC3 方式下, 信道为 ITU 为三代系统性能评估而定义的 Vehicle A 环境^[3], 工作频段为 825MHz, 移动速度分别为 120km/h 和 30km/h, RAKE 接收机采用最大比合并, 合并径数为 3 径, 解码器采用 Viterbi 软判决算法。图 4 和图 5 分别给出了在非传输分集、OTD 和 STS 情况下的误帧率和误码率曲线。

由图 4 可以看出, 即使在衰落速度较快的情况下, 如 120km/h, 误帧率为 1% 时, OTD 方式的性能也要好于非传输分集方式 1.4dB。在衰落较慢的情况下, 由图 5 可以看出, 在 30km/h 的情况下, 1% 的误帧率时, STS 方式的性能要好于 OTD 方式 0.2~0.3dB。对于 STS 方式, 每个信息比特所经历的独立衰落信道数是 OTD 方式的一倍, 因而其分集增益要高于 OTD 方式。在衰落更慢的情况, 如步行速度的情况下, STS 方

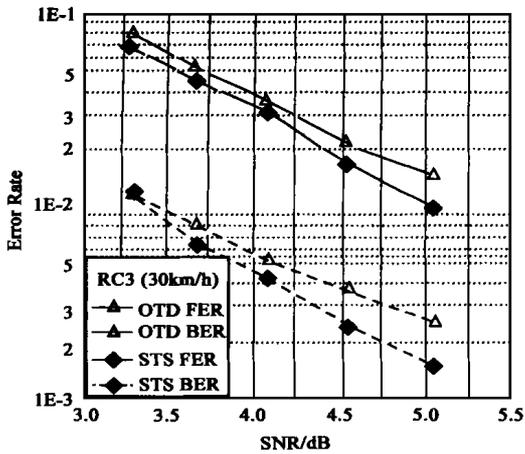


图 5 OTD 和 STS 情况下的误帧率和误码率曲线

式增益会更大一些。

5 小结

本文分析了衰落信道中卷积编码 Viterbi 软判算法的性能, 并指出具有独立衰落特性的分集信道数越多, 接收的性能越好. 增加独立传输信道的最直接的方式就是采用传输分集, 本文以 cdma2000 系统为例给出了在三代系统中使用的 OTD、STS 传输分集的仿真结果. 仿真结果表明, 采用传输分集技术可以明显提高前向链路的性能. 由于采用 STS 方式时每个信息比特所经历的独立衰落信道数是采用 OTD 方式时的一倍,

因而其分集增益要高于 OTD 方式. 传输分集技术可以在不增加移动终端设备复杂度的情况下, 提高前向链路性能, 增加前向链路容量, 因而在三代移动通信系统中将得到广泛的应用.

参考文献:

- [1] 3GPP2 IS 2000 A. Physical Layer Standard for cdma2000 Spread Spectrum Systems, Release A [S]. Apr., 2000.
- [2] John G. Proakis. Digital Communications [M]. Third Edition, McGraw-Hill, NY, 1995.
- [3] TR 101 112 v3. 2. 0. Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of UMTS [S]. (UMTS 30. 03 Version 3. 2. 0), ETSI, Apr., 1998.

作者简介:

李 俨 1998 年 5 月毕业于东南大学通信与信息系统专业, 获工学博士学位. 1998-1999 年初, 在 Nokia 中国研发中心工作. 现任信息产业部电信科学技术研究院移动中心 FDD 分部主任, 负责 IS 95A/cdma2000 CDMA 系统基站和基站控制器的开发. 研究领域包括扩频通信, CDMA 移动通信系统, 调制解调技术, 同步技术, 编译码技术和 ASIC 芯片设计.

封 翔 1998 年 6 月毕业于东南大学通信与信息系统专业, 获工学博士学位. 现工作于安捷伦科技软件有限公司, 从事 cdma2000 系统仿真平台和测试平台的开发工作. 研究领域包括无线宽带通信系统, CDMA 移动通信系统, 调制解调技术等方面.