

时变衰落信道中 WCDMA 系统闭环发送分集的性能分析

杨馨 李晋 尤肖虎

(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘要: 该文针对 WCDMA 标准中采用的闭环分集技术, 给出了 RAKE 接收算法模型及反馈的加权矢量算法, 进而分析了时变衰落信道中存在反馈链路延迟时闭环发送分集接收性能, 并与开环分集技术的接收性能进行了比较, 指出了开环和闭环发送分集技术适用的不同移动环境。理论推导及仿真结果表明闭环发送分集在低速移动和较低路径信噪比环境下具有优于开环分集的接收性能。

关键词: 第三代移动通信, WCDMA, RAKE 接收机, 发送分集, 闭环发送分集

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)09-1441-05

Performance Analysis of Closed Loop Transmit Diversity for WCDMA Systems in a Time Variant Fading Channel

Yang Xin Li Jin You Xiao-hu

(NCRL, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract In this paper, the closed loop transmit diversity technique is investigated. The RAKE receiver model and the weighting vector algorithm are presented. Since the feedback delay in the practical systems has considerable effect on the receiver performance of the closed loop transmit diversity technique, the performance of the RAKE receiver with feedback delay in the time variant wireless channel is analyzed and compared with that of the open loop mode. Theoretical analysis and simulation results show that the closed loop transmit diversity technique outperforms the open loop technique in the environments with low speeds and low path signal-to-noise ratios.

Key words Third generation mobile communications, WCDMA, RAKE receiver, Transmit diversity, Closed loop transmit diversity

1 引言

分集技术是抵抗衰落、提高链路及系统性能的一项有效手段。近年来, 发送分集技术受到广泛重视, 就在于能够利用基站设置的多天线, 提高下行链路接收性能及信道容量^[1-3]。WCDMA 移动通信标准采用了开环和闭环两种发送分集技术。两者的差别在于采用闭环发送分集的系统中多了一条从移动终端到基站的反馈链路, 反馈的信息用于对基站发送信号进行预加权, 目的是使得接收机能够获得最大接收功率。因而闭环发送分集技术应能提供比基于空时编码的开环发送分集技术更好的接收性能^[3-5]。

然而, 反馈链路必然导致反馈信息的延迟, 亦存在反馈信息的精度及链路的可靠性问题, 这些都直接影响到闭环发送分集技术的接收性能, 尤其是高速移动环境中的反馈延迟起着至关重要的作用^[6-10]。文献[9,10]分析了时变信道中反馈

延迟对接收机平均功率的影响, 并给出了各自的闭合公式, 但其闭合公式不能与无延迟时的情况相吻合, 只是部分地反映了反馈延迟对接收机平均功率的影响。

本文首先给出 WCDMA 系统闭环发送分集的 RAKE 接收模型及加权矢量算法, 并分析了时变移动信道中反馈延迟对接收性能的影响, 给出了反馈延迟对 RAKE 接收机输出平均信干比影响的表达式, 进而以此作为衡量接收性能的技术指标, 指出了影响开环和闭环发送分集接收性能的不同移动环境条件。理论分析及仿真表明闭环发送分集在低速移动和较低路径信噪比环境下具有优于开环分集的接收性能, 而开环分集技术在移动速度变化的环境中具有稳定的接收性能。

2 WCDMA 系统的闭环发送分集接收算法及加权矢量算法

WCDMA 系统闭环发送分集发送结构如图 1 所示, 数

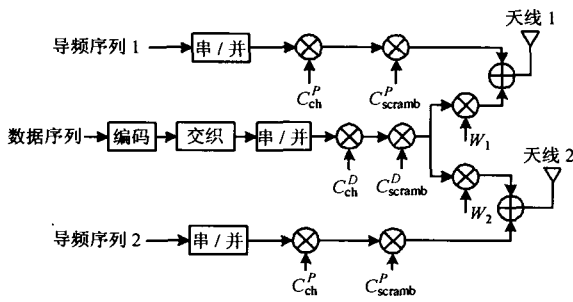


图1 WCDMA 系统支持闭环发送分集发送结构

据序列经信道编码、交织及串/并转换后形成待调制的数据符号，由相同的信道码及扰码进行扩频加扰后，同时送往两根天线，分别经各天线的复加权因子 w_1, w_2 加权后发送出去。图中 c_{ch}^D 和 c_{ch}^P 分别是用户数据信道和公共导频信道的信道码， c_{scramb}^D 和 c_{scramb}^P 分别是用户数据信道和公共导频信道的复扰码。加权因子 w_1, w_2 由移动台接收机决定，并经上行链路的反馈信息(FBI)域传送给基站发射机。

发送信号经历的频率选择性信道可以用一个系数是时变且统计独立的抽头延时线模型来等效，由此得到 RAKE 接收机模型。假设两个发送天线相隔足够远以保证两个天线上的信号衰落互不相关，得到单天线接收信号的等效低通表示为

$$r(t) = \sum_{i=1}^2 \sum_{l=1}^L h_{il}(t) s_i(t - \tau_{il}) + n(t) \quad (1)$$

其中 $s_i(t)$ 为第 i 发送天线的发送信号， $h_{il}(t)$ 为第 i 发送天线第 l 径信道衰落参数，为零均值复高斯过程，其模和相位分别满足 Rayleigh 分布和均匀分布； τ_{il} 为第 i 天线第 l 径的相对延迟， $n(t)$ 为其它用户的干扰和背景噪声构成的加性高斯白噪声，其单边功率谱密度为 N_0 。

移动台根据导频符号估计信道并计算加权矢量，目的是使得在基站经加权发送的信号达到移动台时，移动台接收功率达到最大。移动台在接收第 m 个符号时的接收功率可表示为

$$P(m) = W^H(m) H^H(m) H(m) W(m) \quad (2)$$

其中 $W(m) = [w_1(m) \ w_2(m)]^T$ 为发送第 m 个符号时的加权矢量，为保证发送功率恒定不变而满足 $\|w_1(m)\|^2 + \|w_2(m)\|^2 = 1$ ； $H(m) = [h_1(m) \ h_2(m)]$ ， $h_1(m)$ 、 $h_2(m)$ 分别是两个发送天线到接收天线间的信道冲激响应； $h_1(m) = [h_{11}(m) \ h_{12}(m) \ \dots \ h_{1L}(m)]^T$ ， $h_2(m) = [h_{21}(m) \ h_{22}(m) \ \dots \ h_{2L}(m)]^T$ ， $(\cdot)^H$ 表示矩阵共轭转置。

由式(2)可知， $H^H(m)H(m)$ 为 Hermite 阵，移动台接收功率 $P(m)$ 的最大(最小)值为 $H^H(m)H(m)$ 阵的最大(最小)特

征根值；使接收功率 $P(m)$ 达到最大(最小)的 $W(m)$ 是对应于 $H^H(m)H(m)$ 阵最大(最小)特征根的标准化特征向量。

矩阵 $H^H(m)H(m)$ 的两个最大(最小)特征根分别为

$$\lambda_0(m) = \frac{\|h_1(m)\|^2 + \|h_2(m)\|^2 + \sqrt{\Delta(m)}}{2} \quad (3)$$

$$\lambda_1(m) = \frac{\|h_1(m)\|^2 + \|h_2(m)\|^2 - \sqrt{\Delta(m)}}{2} \quad (4)$$

其中 $\Delta(m) = (\|h_1(m)\|^2 - \|h_2(m)\|^2)^2 + 4|h_2^H(m)h_1(m)|^2$ 。

由此得到使移动台接收功率达到最大的加权矢量 $W(m)$ 应满足如下关系：

$$w_2(m) = \frac{\|h_2(m)\|^2 - \|h_1(m)\|^2 + \sqrt{\Delta(m)}}{2h_1^H(m)h_2(m)} w_1(m) \quad (5)$$

一般， $w_1(m)$ 取为实数，设 $w_2(m) = a(m)e^{j\phi(m)}$ ，有 $w_1(m) = \sqrt{1 - a^2(m)}$ 。使接收功率达到最大的 $e^{j\phi(m)}$ 和 $a(m)$ 为

$$e^{j\phi(m)} = \frac{h_2^H(m)h_1(m)}{|h_2^H(m)h_1(m)|} \quad (6)$$

$$a(m) = \frac{\|h_2(m)\|^2 - \|h_1(m)\|^2 + \sqrt{\Delta(m)}}{\sqrt{(\|h_2(m)\|^2 - \|h_1(m)\|^2 + \sqrt{\Delta(m)})^2 + 4|h_2^H(m)h_1(m)|^2}} \quad (7)$$

根据 WCDMA 系统闭环发送分集的系统结构及信道模型，我们给出如图 2 所示的 RAKE 接收机模型。在发送数据符号 $d(m)$ 时，接收端第 l 径解扩后的信号为

$$r_l(m) = \sqrt{\epsilon_k} [h_{1l}(m)w_1 + h_{2l}(m)w_2] d(m) + n_l(m) \quad (8)$$

其中 ϵ_k 是发送数据符号能量， $n_l(m)$ 是在解扩中产生的总噪声值。RAKE 接收机输出的关于发送符号的最优判决变量 $U(m)$ 为

$$U(m) = \sum_{l=1}^L \tilde{d}_l(m) \quad (9)$$

其中 $\tilde{d}_l(m) = \sqrt{\epsilon_k} |h_{1l}(m)w_1(m) + h_{2l}(m)w_2(m)|^2 d(m) + z_l(m)$ ，

$z_l(m) = [h_{1l}(m)w_1(m) + h_{2l}(m)w_2(m)]^* n_l(m)$ 。

对 $U(m)$ 进行解交织和译码，可得到信息符号 $d(m)$ 。

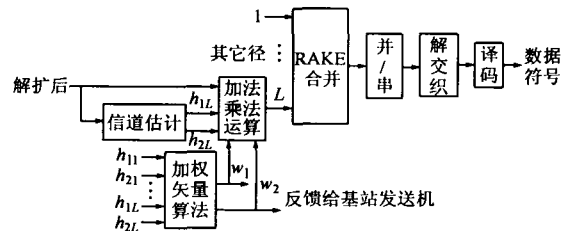


图2 WCDMA 系统闭环发送分集的 RAKE 接收机模型

3 时变信道中反馈延迟对闭环发送分集接收性能的影响

由于基站发送机在第 m 个符号时刻的加权矢量 $W(m)$ 是由接收机事先计算再反馈到基站发送机，所以接收机加权

矢量的计算和发送机进行加权之间存在一定的延迟,这是由反馈链路的延迟造成的。反馈链路延迟使得接收机的接收功率偏离了可能获得的最大值,从而影响闭环发送分集接收性能。

假设时变的移动信道为广义平稳非相干散射信道(WSSUS),以下分析采用广泛运用的 Jakes 衰落信道模型,每一径信道的自相关函数 $r_{ii}(n)$ 反映了信道参数的时变特性

$$r_{ii}(n) = E\{h_{ii}(m)h_{ii}^*(m-n)\} = \sigma_{ii}^2 J_0(2\pi f_d n T_s) \quad (10)$$

其中 $E\{\cdot\}$ 表示统计平均, σ_{ii}^2 为第 i 天线经 l 径的平均功率, $J_0(\cdot)$ 为第一类零阶贝塞尔函数, f_d 为信道最大多普勒频移, T_s 为一个导频符号时间。

假设单径信道,两个发送天线衰落路径互不相关,且具有相同平均功率 σ_i^2 。我们采用一阶 Markov 过程来表征时变信道在加权矢量获得时刻与实际加权时期间的变化

$$h_i(m) = J_0(2\pi f_d n T_s) h_i(m-n) + \xi_i(m), \quad i=1,2 \quad (11)$$

其中 nT_s 表示反馈延迟, $h_i(m)$ 表示第 i 天线第 m 符号时刻信道参数, $\xi_i(m)$ 是过程噪声,具有零均值,方差为 σ_ξ^2 ,且满足

$$\sigma_i^2 = J_0^2(2\pi f_d n T_s) \sigma_i^2 + \sigma_\xi^2 \quad (12)$$

此时闭环发送分集 RAKE 接收机的瞬时接收功率为

$$P(m) = |h_1(m)w_1(m) + h_2(m)w_2(m)|^2 = \left| \frac{h_1(m)h_1^*(m-n)}{\sqrt{|h_1(m-n)|^2 + |h_2(m-n)|^2}} + \frac{h_2(m)h_2^*(m-n)}{\sqrt{|h_1(m-n)|^2 + |h_2(m-n)|^2}} \right|^2 \quad (13)$$

将式(11)代入上式并化简后得到

$$P(m) = A(m) + B(m) + C(m) + D(m) \quad (14)$$

其中

$$\begin{aligned} A(m) &= J_0^2(2\pi f_d n T_s) \left[|h_1(m-n)|^2 + |h_2(m-n)|^2 \right] \\ B(m) &= J_0(2\pi f_d n T_s) \left[\xi_1(m)h_1^*(m-n) + \xi_2(m)h_2^*(m-n) \right] \\ C(m) &= J_0(2\pi f_d n T_s) \left[\xi_1^*(m)h_1(m-n) + \xi_2^*(m)h_2(m-n) \right] \\ D(m) &= \frac{|\xi_1(m)h_1^*(m-n) + \xi_2(m)h_2^*(m-n)|^2}{|h_1(m-n)|^2 + |h_2(m-n)|^2} \end{aligned}$$

对式(14)取统计平均,得到反馈延迟时闭环发送分集接收机的平均接收功率为^[11]:

$$\begin{aligned} E\{P(m)\} &= E\{A(m)\} + E\{B(m)\} + E\{C(m)\} + E\{D(m)\} \\ &= 2\sigma_i^2 J_0^2(2\pi f_d n T_s) + \sigma_\xi^2 \end{aligned} \quad (15)$$

其中

$$\begin{aligned} E\{A(m)\} &= J_0^2(2\pi f_d n T_s) E\{|h_1(m-n)|^2 + |h_2(m-n)|^2\} \\ &= 2J_0^2(2\pi f_d n T_s) \sigma_i^2 \\ E\{B(m)\} &= J_0(2\pi f_d n T_s) \left[E\{\xi_1(m)\} E\{h_1^*(m-n)\} \right. \\ &\quad \left. + E\{\xi_2(m)\} E\{h_2^*(m-n)\} \right] = 0 = E\{C(m)\} \\ E\{D(m)\} &\approx \frac{E\{|\xi_1(m)h_1^*(m-n) + \xi_2(m)h_2^*(m-n)|^2\}}{E\{|h_1(m-n)|^2 + |h_2(m-n)|^2\}} \\ &= \frac{E\{|\xi_1(m)|^2 |h_1(m-n)|^2 + |\xi_2(m)|^2 |h_2(m-n)|^2\}}{E\{|h_1(m-n)|^2 + |h_2(m-n)|^2\}} \\ &= \frac{2\sigma_\xi^2 \sigma_i^2}{2\sigma_i^2} = \sigma_\xi^2 \end{aligned}$$

可见,有反馈延迟时,闭环发送分集 RAKE 接收机的平均接收功率包含了平均信号功率 $2\sigma_i^2 J_0^2(2\pi f_d n T_s)$ 和反馈延迟引入的噪声功率 σ_ξ^2 。

当系统无反馈延迟或是静止信道时, $J_0^2(0) = 1, \sigma_\xi^2 = 0$,由式(15)得到 $E\{P(m)\}_{\text{NO_DELAY}} = 2\sigma_i^2$ 。这与闭环发送分集在无反馈延迟时的结论是一致的。

时变信道中闭环发送分集有反馈延迟相对于无反馈延迟时平均信号功率损失为

$$P_{\text{loss}} = -10 \log \left[\frac{2\sigma_i^2 J_0^2(2\pi f_d n T_s)}{E\{P(m)\}_{\text{NO_DELAY}}} \right] = -10 \log \left[J_0^2(2\pi f_d n T_s) \right] \quad (16)$$

由式(15)和式(12)可得有反馈延迟时闭环发送分集接收机输出的平均信干比 $\bar{\gamma}_{\text{CL}}$ 为

$$\bar{\gamma}_{\text{CL}} = \frac{2\sigma_i^2 J_0^2(2\pi f_d n T_s)}{N_0/\epsilon_k + \sigma_\xi^2} = \frac{2J_0^2(2\pi f_d n T_s)}{1/a + 1 - J_0^2(2\pi f_d n T_s)} \quad (17)$$

其中 $a = \epsilon_k \sigma_i^2 / N_0$, 为该衰落路径的平均信噪比。

WCDMA 标准采用的开环 STTD 发送分集的 RAKE 接收机输出的平均信干比 $\bar{\gamma}_{\text{STTD}}$ ^[12],

$$\bar{\gamma}_{\text{STTD}} = E \left\{ \frac{\epsilon_k}{N_0} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 |h_i(m)|^2 \right\} = a \quad (18)$$

比较式(17)与式(18),可以得到 WCDMA 系统中闭环发送分集和开环 STTD 发送分集技术适用的系统环境条件,它取决于系统反馈链路延迟 nT_s , 信道最大多普勒频移 f_d 和路径平均信噪比 a 。

当 $J_0(2\pi f_d n T_s) \geq \sqrt{\frac{1+a}{2+a}}$ 或 $0 \leq a \leq \frac{2J_0^2(2\pi f_d n T_s) - 1}{1 - J_0^2(2\pi f_d n T_s)}$ 时, 有

$$\bar{\gamma}_{\text{CL}} \geq \bar{\gamma}_{\text{STTD}} \quad (19)$$

值得指出的是,上述推导是基于反馈到基站发送机的加权矢量无差错而得出的。由式(19)可得,当下行路径平均信

噪比较差时，在系统反馈延迟及信道最大多普勒频移满足 $J_0(2\pi f_d n T_s) \geq 1/\sqrt{2}$ 时，(相当于 WCDMA 标准反馈延迟为一个时隙 0.6667ms 时， $f_d \approx 269\text{Hz}$)，闭环发送分集 RAKE 接收机性能好于开环 STTD 分集接收性能。

4 数值分析与仿真结果

为了验证上述理论分析，本节不仅给出了闭环发送分集的理论曲线，同时给出了仿真结果曲线。我们在 COSSAP 上建立了 WCDMA 系统的闭环及开环发送分集的 RAKE 接收仿真平台，进行了数据仿真。信号调制方式为 QPSK，chip 速率为 3.84 Mcp/s。仿真时，信号传输速率为 240kbit/s，交织器的交织块大小为 32×75 ，信道编码为 1/3 卷积编码，约束长度为 9，信道模型为 M.1225 衰落信道模型。假设理想的信道估计，并假设在接收端 chip、符号及帧已完全同步。仿真时数据信号的总发送比特能量不随发送天线个数及发送分集模式改变。车载环境下 RAKE 合并径数为 3。以下图中的 E_b 为仿真时发送的数据信号的比特能量， N_0 为高斯白噪声的单边功率谱密度。

图 3 反映了闭环发送分集在时变信道中有反馈延迟相对于无反馈延迟时接收信号的平均功率损失随时变信道最大多普勒频移的变化情况。由图可见，在反馈链路延迟固定不变时，随最大多普勒频移的初始增加，信号平均功率损失缓慢增大；而当最大多普勒频移进一步增大时，信号平均功率损失急剧加大。不同反馈延迟导致的接收信号平均功率损失变化趋势相同，只是较小反馈延迟能够适应的时变信道最大多普勒频移范围较大。

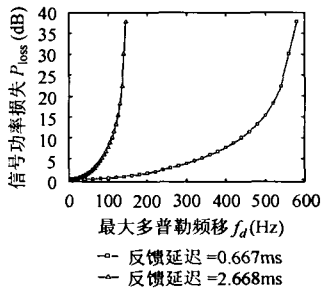


图 3 有反馈延迟时闭环发送分集接收信号的平均功率损失曲线

图 4 是不同路径平均信噪比下开环和闭环发送分集 RAKE 接收机输出平均信干比 (Expected signal-to-interference ratio) 随信道最大多普勒频移的变化曲线。可以看出，开环 STTD 发送分集由于在发送端采用了特殊的空时编码，保证了其 RAKE 接收机具有稳定的平均信干比。而闭环发送分集在静止信道中具有最高的平均信干比，随着信道最大多普勒频移的增加，闭环分集的平均信干比逐渐降低，直到最后远远小于开环的平均信干比。

图 5 反映了不同信道最大多普勒频移和不同路径信噪比时，开环和闭环发送分集 RAKE 接收机输出的平均信干比高低区域。图中曲线是不同反馈延迟下两种发送分集具有相同平均信干比的等高线，在线之上的区域，开环具有较高的平均信干比；在线之下的区域，闭环具有较高的平均信干比。由图可以看出，闭环发送分集在路径平均信噪比较低和信道最大多普勒频移较小的区域内具有好于开环的平均接收信干比。相比于较小反馈链路延迟，较大反馈延迟时闭环发送分集 RAKE 接收机的高平均信干比区域更小。

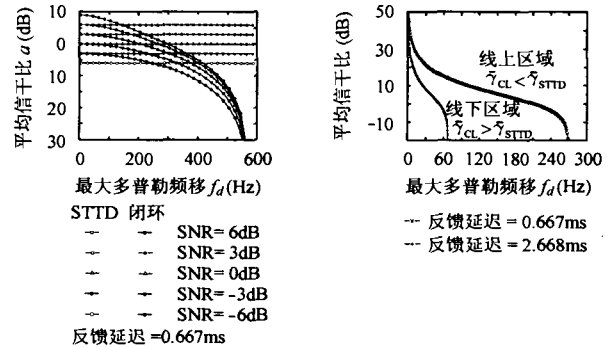


图 4 不同路径平均信噪比时两种发送分集 RAKE 接收机平均信干比曲线

图 5 不同反馈延迟下两种发送分集 RAKE 接收机平均信干比高低的移动环境比较

图 6 和图 7 是系统仿真结果。WCDMA 标准中给出了两种闭环发送分集方案：闭环模式 1 和闭环模式 2。模式 1 只反馈加权矢量中相位 $\phi(m)$ 的量化信息，反馈延迟为一个时隙 0.6667ms。模式 2 反馈加权矢量中相位 $\phi(m)$ 及幅度 $a(m)$ 的量化信息，反馈延迟约 4 个时隙 2.668ms。图 6 显示了步行环境下不同发送分集技术的 RAKE 接收性能。从图中可以看出，发送分集技术对接收性能的改善相当显著。其中闭环分集技术的接收性能明显优于开环 STTD 技术，闭环分集模式 2 相对于开环 STTD 的性能增益大于 2 dB。这是由于在步行环境下，信道的相干时间较长，闭环分集系统在反馈链路延迟时间段内，信道参数基本不变，因而能在接收端提供比开环 STTD 模式更高的性能增益。

图 7 显示了不同车速时各种发送技术为使 RAKE 接收机获得 10^{-3} 误比特率所需的发送信噪比 (E_b/N_0) 的分贝值。由图可见，在步行环境及低速移动环境下，双天线发送分集提供了很大的性能增益，尤其是闭环分集模式。但是随着移动台速度的增加，发送分集获得的性能增益逐渐减小，其中闭环分集技术的性能增益迅速缩小，并劣于开环发送分集。这是由于移动速度的增加使信道的相干时间减小，闭环分集技术受反馈链路延迟影响，利用延迟前的加权矢量进行的相位及幅度调整不能使得接收功率达到最大，而开环分集

技术

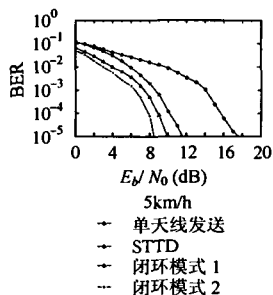


图6 步行环境下各种发送分集技术的RAKE接收机误比特特性

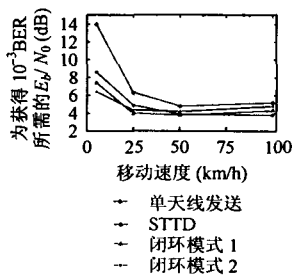


图7 各种发送分集技术相对于单天线发送的性能增益

只要在连续的两个符号时间内信道参数不变,就能获得分集级数为2的接收性能增益。所以,闭环分集技术在低速移动环境下优势明显,而开环分集技术在移动速度变化的环境中具有稳定的接收性能。但随着移动速度进一步提高,信道可分辨路径数增加,信道相干时间更短,交织和信道编码的抗衰落的作用明显,单双天线发送的RAKE接收性能趋于一致,此时由双天线发送分集引起的发送端和接收端的额外的线性处理及增加的反馈链路都不能使得接收性能改善。

5 结束语

本文首先给出WCDMA系统闭环发送分集的RAKE接收模型及加权矢量算法,并分析了时变移动信道中反馈延迟对接收性能的影响,给出了存在反馈延迟时RAKE接收机输出的平均信干比表达式,进而以此作为衡量接收性能的技术指标,指出了影响开环和闭环发送分集接收性能的不同移动环境条件。理论分析及仿真结果表明,闭环发送分集在低速移动和较低路径信噪比环境下具有优于开环分集接收性能,而开环分集技术在移动速度变化的环境中具有稳定的接收性能。

参考文献

[1] Tarokh V, Seshadri N, Calderbank R. Space-time codes for high data rate wireless communications: performance criterion and code construction. *IEEE Trans. on Info. Theory*, 1998, 44(3): 744 - 765.

[2] 3GPP, TSG RAN, WG1, Physical Layer Procedures (FDD), June, 2000.

[3] Derryberry R T, Gray S D, Ionescu D M, Mandyam G,

Raghothaman B. Transmit diversity in 3G CDMA systems. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(4): 68 - 75.

[4] Hamalainen J, Wichman R. Closed-loop transmit diversity for FDD WCDMA systems. 34th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, USA, 29 Oct.-1 Nov., 2000, vol.1: 111 - 115.

[5] Da Silva M J, Taffin A, Lasaulce S, Buljore S. Closed loop transmit diversity enhancements for UMTS narrowband and wideband TD-CDMA. *IEEE Veh. Technol. Conference*, 2001. Spring, 2001, vol.3: 1963 - 1967.

[6] Nagaraj S, Huang Yih-Fang. Downlink transmit diversity: feedback efficiency and robustness. *IEEE International Conference on Personal Wireless Communications*, Hyderabad, India, 17-20 Dec., 2000: 14 - 18.

[7] Onggosanusi E N, Gatherer A, Dabak A G, Hosur S. Performance analysis of closed-loop transmit diversity in the presence of feedback delay. *IEEE Trans. on Commun.*, 2001, 49(9): 1618 - 1630.

[8] Hwang Keun Chul, Lee Kwang Bok. Efficient weight vector representation for closed-loop transmit diversity. *IEEE ICC 2002*, New York, NY, USA, 2002, vol. 2: 732 - 736.

[9] Raghothaman B, Mandyam G, Derryberry R T. Performance of closed loop transmit diversity with feedback delay. 34th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, USA, 29 Oct.-1 Nov., 2000, vol.1: 102 - 105.

[10] Hamalainen J, Wichman R. The effect of feedback delay to the closed-loop transmit diversity in FDD WCDMA. *IEEE PIMRC 2001*, San Diego, CA, USA, 2001 vol.1: D-27 - D-31.

[11] Papoulis A. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. New York: McGraw-Hill, Inc. 1991: 86 - 124.

[12] 杨馨, 董霄剑, 尤肖虎. WCDMA系统发送分集技术的性能分析. *电子学报*, 2002, 30(7): 986 - 989.

杨馨: 女, 1970年生, 博士, 从事未来移动通信系统信道估计与多天技术研究。

李晋: 男, 1977年生, 博士生, 从事未来移动通信系统信道估计、信道编码与译码及多天技术的研究。

尤肖虎: 男, 1962年生, 博士, 博士生导师, 中国电子学会理事, 国家863通信主题专家组组长, 主要研究方向为未来宽带移动通信理论与技术、智能信号处理与通信。