

基于波束切换型智能天线技术的 TDD-CDMA 系统上行链路性能研究

彭木根 王文博

(北京邮电大学 电信工程学院 北京 100876)

摘要 该文通过分析波束切换型智能天线技术的原理,研究了波束切换型智能天线技术对 TDD-CDMA 上行链路的影响,给出了采用波束切换型智能天线技术后适合 TDD-CDMA 上行链路使用的接入控制算法。理论分析和仿真结果表明智能天线技术的天线阵元数和上行链路多用户检测技术优劣将直接影响上行链路容量,采用先进的接入控制算法和优化的接入控制门限值则可以显著提高系统性能。

关键词 TDD-CDMA, 智能天线, 波束切换, 接入控制, 上行链路容量

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)07-1228-05

Investigation of Uplink Performances Based on Switched Beam Antenna in TDD-CDMA Systems

Peng Mu-gen Wang Wen-bo

(College of Telecom Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract The switched beam antenna is analyzed and its model in system level is presented. Based on analyzing the impact of multi-user detection (MUD) and switched beam antenna on the uplink capacity in TDD-CDMA systems, a novel uplink admission control algorithm is proposed. The theoretical and simulation results show that MUD and the number of antenna element have a great impact on uplink performance. The proposed scheme can provide higher gain for TDD-CDMA if the proper noise rise threshold is set.

Key words TDD-CDMA, Smart antenna, Switched beam, Admission control, Uplink capacity

1 引言

随着无线通信技术,数字信号处理(DSP)和集成电路技术的飞速发展,同时为了满足移动通信系统容量、高速传输速率和高质量通信要求,智能天线技术在第三代及其未来移动通信系统中将得到广泛应用,例如在 TD-SCDMA 系统中把智能天线视为一种关键的必备技术。智能天线包括自适应跟踪和固定波束切换两种类型。自适应跟踪智能天线技术通过调节各阵元信号的加权幅度和相位来改变阵列的天线方向图,从而抑制干扰提高信噪比,采用到达角(DOA)算法估计移动台相对基站的方向,并将最理想的波束时刻对准目标用户。固定波束切换型天线技术则是选择一组预先固定的波束之一接入,波束的选择主要基于目标用户所处的位置信息以及接收到的信号质量等。当移动台偏离预先设定的波束方向时,信号的接收质量并不是最佳,但其具有结构简单,易于实现,性能不受信道传播环境影响等特性而在未来的实际网络中广泛使用。

接入控制算法是无线资源管理算法的重要一员,引入接入控制主要是因为:(1)在基于CDMA技术的移动通信系统中,接入一个新的或修改的呼叫将增加系统的干扰;(2)干扰增加将减少小区覆盖,小区的覆盖范围将降低到规划值以

下,并且使已建立连接的服务质量不能保证;(3)在较高负荷的系统中,干扰增长将促使系统鲁棒性降低,并可能导致掉话^[1]。

目前智能天线技术的研究主要侧重于智能天线的几何结构设计、波束赋形设计和波束选择算法设计等方面。有关智能天线技术对系统性能的研究和分析很少。鉴于固定波束切换型智能天线技术的实现简易性,同时能很好提高系统性能,本论文将重点阐述波束切换型智能天线技术对 TDD-CDMA 系统上行链路性能的影响,包括波束数量,多用户检测因子大小,另外为了更好地提高性能,重点分析和研究适合 TDD-CDMA 网络基于波束切换型智能天线技术的上行链路接入控制算法。通过动态 TD-SCDMA 系统级仿真平台给出了天线阵元数和多用户检测因子大小对系统性能的影响,同时验证本文提出的接入控制算法的先进性。

2 理论分析和性能研究

智能天线阵列的几何结构设计主要有两种:线阵和圆阵,线阵是让天线阵元等间隔的排列在一直线上,而圆阵天线等间隔的分布在圆周上。目前在传统的线阵和圆阵上衍生出不同混合型天线几何结构,但从实用和性能角度来看,仍以圆阵天线设计为主,下面将首先以圆阵为目标重点研究智能天线技术的性能,然后理论分析基于波束切换型智能天线技术的系统容量和负载,并且基于理论分析给出详细的接入

控制算法。

2.1 智能天线模型

智能天线阵列的基本思想是根据一定的接收准则自动调节各天线阵元激励的幅度和相位加权重值,达到最佳接收效果。波束赋形算法能够自动调整权重来实现信号的最佳接收,目前主要有最大信噪比、最小均方误差、线性约束最小方差等算法,考虑到算法实现的复杂性和高运算量,文献[2]采用最大接收信号准则调整权重。该算法好处是只需对信号的入射方向进行估计,就可以得到加权重值,无须求解相关矩阵和其逆矩阵等复杂过程,在系统信噪比没有大的降低情况下降低系统复杂度,所以在实际系统中可以实现。根据最大接收信号准则,对射入方向为 α 的波束赋形功率(单位 dBi)可以表示为

$$G(\alpha, \phi_k, M) = 10 \lg \left\{ \left[\sum_{m=1}^M \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} R \left[\cos \left(\alpha - \frac{m-1}{M} 2\pi \right) - \cos \left(\phi_k - \frac{m-1}{M} 2\pi \right) \right] \right\} \right]^2 \right\} \quad (1)$$

其中 $\phi_k \in [0, 360]$, M 为天线阵元数,当 $M=4$ 时 $R=0.3536\lambda$, $M=8$ 时 $R=0.6533\lambda$, $M=16$ 时 $R=1.28\lambda$ 。从式(1)可知,天线阵元数越大,波束带宽越窄,波束增益越大。另外入射角不同,其阵列天线也会不同,在 $[0, 360/M]$ 范围内变化。当入射角 α 不在 $[0, 360/M]$ 范围时,可以类似入射角为 $\alpha - \lfloor \alpha M / 360 \rfloor 360 / M$ 的天线阵列图。

本文只研究波束切换型智能天线,波束是固定的,并且假设 M 根天线阵元可以形成 M 个波束。在 $[0, 360/M]$ 范围内, $M=8$ 时,最大增益波束对准 22.5° (即基准入射角 α 为 22.5°);而 $M=4$ 时最大增益波束对准 45° ; $M=16$ 时,最大增益波束对准 11.25° 。

2.2 基于切换型智能天线技术容量分析

在移动通信系统中,根据用户的QoS要求每种业务都可以设置一定最大可允许的传输误比特率(BER),也就对应着一定的 E_b/N_0 ,对于业务 i 来说其 E_b/N_0 可以表示为^[3]

$$\begin{aligned} \Gamma_i &= (E_b/N_0)_i = \frac{WS_i}{v_i R_i} (C/I)_i \\ &= \frac{WS_i}{v_i R_i} \\ &\cdot \left(P_{mi} G(\alpha_\phi, \phi_{mi}, M) \right) \left/ \left((1-\beta) \sum_{t=1}^M \sum_{j=i}^N P_{mj} G(\alpha_t, \phi_{mj}, M) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \sum_{k \neq m} \sum_{t=1}^M \sum_{j=1}^N P_{kj} G(\alpha_t, \phi_{kj}, M) + P_N \right) \right. \quad (2) \end{aligned}$$

其中 $G(\cdot)$ 根据式(1)计算获得, W 指系统的码片速率; P_{mi} 为 i 用户在基站 m 的接收信号强度; α_ϕ 为服务波束 ϕ 的方位角度, ϕ_{mi} 为用户 i 到服务基站 m 的入射角,服务波束 ϕ 和 ϕ_{mi} 的关系可以表示为: ϕ 等于 $(\phi_{mi} \times M/360)$ 的整数部分值; ϕ_{mj} 为

用户 j 到基站 m 的入射角, ϕ_{kj} 为基站 k 中的用户 j 到基站 m 的入射角, v_i 为用户 i 的语音激活因子,如果是数据业务,其值为1; R_i 为用户 i 的比特速率; S_i 为在该速率下占用的时隙比率^[3]; P_N 为背景热噪声; $(C/I)_i$ 为用户 i 接收信号的信干比; β 是由于在上行信道中采用多用户技术的相关作用而引起的干扰消除,即干扰消除因子,如果MUD技术不采用,则 $\beta=0$,否则 β 介于0和1之间,在TDD模式中可以为0.9; N 为每小区每波束下平均接入的满意用户数。

根据传统CDMA技术可知,可用参数 f 来表示小区外与小区内的干扰比率。如果采用理想功放,则同小区内移动台的发射功率到达基站都相等。另外定义智能天线技术中的平均天线干扰增益因子:

$$\bar{G} = \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N-1} G(\alpha, \phi_{mj}) + \sum_{l \neq m} \sum_{t=1}^L \sum_{j=1}^N G(\alpha, \phi_{mj}) \right) / (NM - 1 + LNM),$$

其中 L 表示基站数量, \bar{G} 实际表征除目标用户外所有干扰用户对目标用户的智能天线增益均值。把 $G(\alpha_\phi, \phi_{mi}, M)$ 简写为 G ,简化式(2)为

$$P_{mi} = \frac{(C/I)_i P_N}{G - (C/I)_i \bar{G} [(1-\beta)(NM-1) + fNM]} \quad (3)$$

根据文献[3],定义背景噪声提升(r)为用户所处服务波束 ϕ 的总接收功率 $I_{\text{total}}(\phi)$ 和背景热噪声的比值:

$$\begin{aligned} r &= \frac{I_{\text{total}}(\phi)}{P_N} = \frac{N(1+f)P_{mi}}{P_N} + 1 \\ &= \frac{N(1+f)}{\frac{G}{(C/I)} - \bar{G} [(1-\beta)(N-1) + fN]} + 1 \quad (4) \end{aligned}$$

背景噪声在实际网络中可以测量得到,由上式可计算每小区每波束平均接入用户数 N :

$$N = (r-1) \frac{G + \bar{G}(1-\beta)(C/I)}{(C/I) [1+f + (1+f-\beta)(r-1)\bar{G}]} \quad (5)$$

根据式(5)理论极限容量 N_{max} 可以表示为

$$\begin{aligned} N_{\text{max}} &= \lim_{r \rightarrow \infty} (r-1) \frac{G + \bar{G}(1-\beta)(C/I)}{(C/I) [1+f + (1+f-\beta)(r-1)\bar{G}]} \\ &= \frac{G + \bar{G}(1-\beta)(C/I)}{(C/I)(1+f-\beta)\bar{G}} \quad (6) \end{aligned}$$

波束 ϕ 内的系统负载可以表示为

$$\eta(\phi) = \frac{N}{N_{\text{max}}} = \frac{(1+f-\beta)(r-1)\bar{G}}{1+f + (1+f-\beta)(r-1)\bar{G}} \quad (7)$$

由于上面推导都假设小区下每个波束内的负载类似,所以对于波束 ϕ 来说,上行负载因子与 j , E_b/N_0 , R_i , S_i , β , v_i 和 N 的关系可表示为

$$\eta_{\text{UL}}(\phi) = (1+f-\beta) \sum_{i=1}^N \frac{1}{1-\beta + \left[\bar{G}/(C/I)_i \right]} \quad (8)$$

2.3 基于波束切换型智能天线技术的接入控制算法

在上行的接入控制中有很多方案,其中最常用的是根据从基站接收的总功率和噪声值进行接入控制的判断,图 1 是上行负载曲线,图中的 ΔI 是接入一个新的用户后将会增加的干扰功率,基于干扰的接入控制算法通过估算该值来判断是否允许用户接入。接入前系统的总的干扰加上对新增用户估计的 ΔI [4],两者之和与设定的干扰门限比较,如果大于门限值则拒绝用户接入;如果小于该值则允许用户接入。

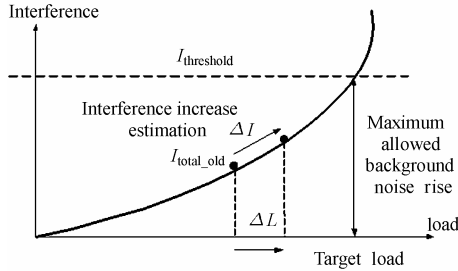


图 1 上行负载预测曲线

Fig.1 Uplink interference and load increase estimation

文献[4]研究了适合TDD-CDMA系统的上行接入控制算法,本文在其工作基础上提出了一种先进的基于波束切换型智能天线下的接入控制算法。算法的基本思想是假设每一切换波束之间完全独立不相关,然后对每一波束下的总接收功率进行测量,预测新的或者修改的用户接入基站后引起的干扰增加,如果干扰预测后总的接收功率或者总负载超过门限值,则拒绝用户接入,或者允许该用户接入系统。如果根据广播信号的强度发生小区切换,用户切换到新的目标基站也同样须执行接入控制机制,此时由于切换引起的接入具有更高的接入门限值,以避免不必要的阻塞导致切换用户掉话。新接入控制算法可以描述为

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{total_old}}(\phi) + \Delta I(\phi) &\leq r_{\text{threshold}} \cdot P_N \text{ (新用户)} \\ I_{\text{total_old}}(\phi) + \Delta I(\phi) &\leq (r_{\text{threshold}} + \text{HO}_{\text{margin}}) \cdot P_N \text{ (切换用户)} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中 $I_{\text{total_old}}(\phi)$ 是用户接入前目标波束 ϕ 处的总接收功率, $\Delta I(\phi)$ 是用户接入目标波束 ϕ 时新增的接收功率, $r_{\text{threshold}}$ 是接入控制设定的背景噪声提升门限值, $\text{HO}_{\text{margin}}$ 是为切换用户接入预设的冗余值,一般为 3dB。

当新用户接入系统将造成小区内干扰增加,干扰增加量根据文献[4]的推导方法可得:

$$\Delta I(\phi) = \frac{I_{\text{total_old}}(\phi)}{1 - \eta_{\text{UL}}(\phi) - \Delta\eta(\phi)} \Delta\eta(\phi) + \frac{P_N \cdot \beta}{(1 - \eta_{\text{UL}}(\phi) - \Delta\eta(\phi))(1 + f - \beta)} \Delta\eta(\phi) \quad (10)$$

式(10)中 $\Delta\eta$ 是用户接入后在波束 ϕ 内预计新增负载,根据式(8)可知可表示为

$$\Delta\eta(\phi) = \frac{(1 + j - \beta)}{1 - \beta + \left[\frac{G}{(C/I)_{\text{target}}} \right]} \quad (11)$$

其中 $(C/I)_{\text{target}}$ 是用户获得满意质量时的目标 C/I 。接入控制算

法的好坏与式(9)中设置的 $r_{\text{threshold}}$ 有关,最佳 $r_{\text{threshold}}$ 的设置受 β 影响,本文通过系统级动态仿真的方法确定最佳参数取值,更好地为网络规划优化服务。

由于本文主要研究上行链路性能,所以假设下行链路完全理想允许用户接入。根据以上分析,本文提出的上行链路接入控制算法(称为 New AC)如下步骤所示:

(1)当新移动用户(或者切换用户)准备接入新基站时,目标基站的确定根据最佳路径损耗准则,即移动用户接入具有最小路径损耗值的基站,在实际系统中接入具有最强导频信号强度的基站;

(2)检测该基站下是否还有足够的无线资源,如果基站剩余可用无线资源不足以让申请用户接入,则阻塞用户;否则继续执行步骤(3);

(3)根据移动台所处的位置,确定申请用户和目标基站的角度 α ,从而确定用户所处的服务波束 ϕ ,并且根据式(1)确定相应的切换型智能天线阵列图;

(4)检测此时波束 ϕ 内的上行链路总接收功率,如果其大于式(9)中的 $r_{\text{threshold}}$ 与热噪声 P_N 的乘积,则阻塞该用户接入;否则执行下一步。

(5)根据式(10)计算获得 $\Delta I(\phi)$,并且判断此时是否满足式(9),如果满足则接入系统,否则阻塞。

为了评估以上算法的性能,专门提出了不采用接入控制机制(No AC),简单的接入控制机制(Old AC)两种接入控制算法,其中“No AC”指如果满足步骤(2)则接入控制算法执行完毕,即如果有足够的无线资源则运行申请用户接入系统;“Old AC”算法指如果满足步骤(4)则运行用户接入系统,此时不考虑 $\Delta I(\phi)$ 对接入控制算法的影响。

3 仿真与结果分析

基于上述的分析及描述,我们使用 OPNET 仿真工具搭建了一个 TD-SCDMA 系统级动态仿真平台。仿真平台主要由仿真环境模型、业务产生模型、用户移动模型、用户衰落(路径损耗、快衰和慢衰)模型、系统级和链路级动态接口模型、仿真对象模型(UE, Node-B 和 RNC)以及嵌套于各仿真对象模型的各种无线资源管理算法(功率控制、切换技术、接入控制、动态信道分配)等组成。

3.1 仿真工具和参数描述

本仿真基于 Macro 蜂窝模型,蜂窝的半径为 577m,每个小区只支持一个子载波。如果研究多小区下的负载控制技术,Macro 系统由 19 个无方向性天线的宏蜂窝组成,采用了 Wrap-around 技术。基站到用户间的损耗为: $37.6 \lg(d) + 15.3$, d 为基站和移动台的距离,单位为米。基站最大总发射功率为 43dBm,最小单码发射功率为 3dBm;移动终端最大发射功率为 21dBm,最小发射功率为 -49dBm,基站天线增益为 11dB,移动终端天线增益为 0dB;基站热噪声为 -106dBm,移动终端热噪声为 -104dBm,阴影衰落均方差

为 10dB, 基站和移动终端最小耦合损耗为 70dB。仿真基于 TD-SCDMA 系统的 12.2kbps 纯语音业务进行。

为了验证本文提出的接入控制模型的正确性, 通过动态仿真平台, 比较了单小区和多小区下的上行接入控制算法的系统性能, 这里假设下行链路恒接入。采用下面的公式评价系统的性能, 本文称之为系统满意度:

$$GoS = \frac{N_{good}}{N_{good} + w_{bad} \cdot N_{bad} + w_{drop} \cdot N_{drop} + N_{block}} \quad (12)$$

其中 N_{good} 、 N_{bad} 、 N_{drop} 和 N_{block} 分别为满意、不满意、掉话和阻塞用户数; w_{bad} 和 w_{drop} 分别表征服务不满意和掉话对系统性能影响的权重大小, 本文 w_{bad} 假设为 2, w_{drop} 假设为 10, 表示 1 个用户掉话对系统性能的影响等效于 10 个用户被系统阻塞, 而 1 个用户服务不满意对系统性能的影响等效于 2 个用户被系统阻塞接入所产生的影响。

3.2 仿真结果分析

采用如前所述的数据进行仿真, 研究天线阵元数, MUD 因子大小, 上行接入控制算法, 接入控制门限等因素对系统性能的影响。图2(a)显示了不采用接入控制机制“**No AC**”(即系统只要有无线资源就可以让用户接入)时MUD因子, 天线阵元数与上行GoS的关系, 而图2(b)显示了采用简单的接入控制机制“**Old AC**”(不考虑新用户接入对噪声提升值的影响, 即式(9)中没有 $\Delta I(\phi)$ 一项)时, 上行链路的性能变化, 此时假设接入背景噪声提升门限值为 9dB。

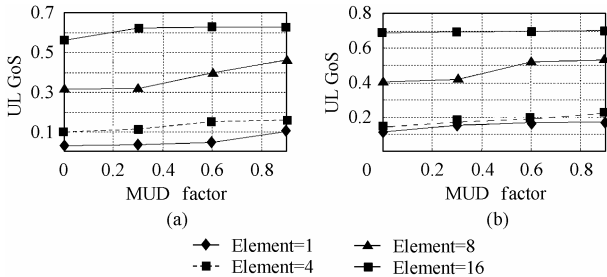


图 2 天线阵元数, MUD 因子大小与上行性能关系

(a) 不采用接入控制算法 (b) 基于不预测新用户接入于干扰增加的接入控制算法

Fig.2 Uplink performance related to antenna element & MUD factor

(a) No AC (b) Old AC

从上面的仿真结果可以看出, 天线阵元数越多, 系统性能越好; 另外, MUD 因子越大, 小区内的干扰减小的越多, 所以性能会越好。由于多阵元天线和 MUD 因子都具有改善小区内干扰的作用, 所以当天线阵元数较大时, MUD 对系统性能的影响不是很大, 关键在于此时主要是小区外的干扰, 小区内的干扰通过多天线阵元已经基本消除。图 2 (a) 和图 2(b) 比较可知, 简单的接入控制算法能明显改善系统性能, 原因在于保证了系统不会过负载。

图3 显示了采用不同接入控制算法时GoS, 掉话用户数, 阻塞用户数和不满意用户数的性能对比。仿真假设在上行采用了MUD技术, 大小为 0.6。仿真结果对比了不采用接入控制机制(**No AC**), 简单的接入控制机制(**Old AC**)和本文提出的

先进接入控制机制(**New AC**)的性能。由于“**No AC**”算法完全基于是否有无线资源, 所以算法性能与背景噪声提升门限值大小无关。而“**Old AC**”和“**New AC**”都是基于背景噪声提升门限的算法, 其性能直接由门限值所决定。另外, 在仿真中假设切换控制时其接入的门限值要比接入控制时的门限值高 3dB。

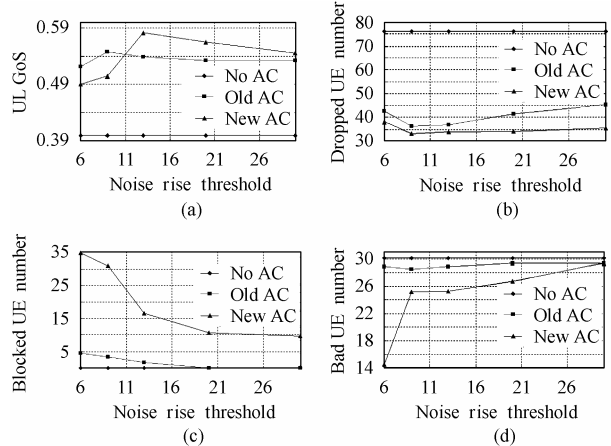


图 3 不同接入控制算法下的系统性能对比

(a) 基于不同接入控制算法的上行 GoS 性能 (b) 基于不同接入控制算法的掉话用户数 (c) 基于不同接入控制算法的阻塞用户数 (d) 基于不同接入控制算法的不满意用户数

Fig.3 Uplink performance comparisons for various AC algorithms

(a) Uplink GoS (b) Dropped UE number

(c) Blocked UE number (d) Unsatisfied (Bad) UE number

从仿真结果可以看出, 本文提出的先进接入控制机制算法由于能有效的预测新用户接入带来的整个系统噪声提升大小, 避免系统过载, 阻止处于恶劣信道状况的用户在满负载时接入系统, 所以能提供更好的上行GoS(如图3(a)), 减少用户掉话(如图 3 (b)), 阻塞更多状态差的用户接入(如图 3(c)), 同时保证接入的用户能得到满意的服务(如图3(d))等。而“**Old AC**”算法由于不预评估式(9)中没有 $\Delta I(\phi)$ 一项, 所以性能明显劣于“**New AC**”算法。

另外, 传统的接入控制算法背景噪声提升门限值一般设置为 9dB^[4], 但如果在上行链路采用了多用户检测技术, 由于使得大部分的小区内干扰消除了, 此时最佳门限值会提高。从我们的仿真结果来看, 当MUD为 0.6 时, 门限值设置为 13dB是一个很好的平衡点。门限值过大, 会使接入控制算法失效, 系统鲁棒性变差; 如果门限值过小, 使得系统负载减小, 很多本可接入系统并且能得到满意服务的用户被阻塞。

4 结束语

本文研究了切换型智能天线技术在 TDD-CDMA 系统上行链路的性能, 采用切换型智能天线技术后, 由于减小了小区内干扰和小区外干扰, 使得系统性能显著提高。同时, 天线阵元数直接影响系统性能, 仿真平台假设采用理想的

DOA 估计算法, 仿真结果表明天线阵元数越多, 系统性能越好。另外, 上行多用户检测技术能明显改善系统性能, 减小小区内干扰, 所以在实际系统中要结合 MUD 技术和天线阵元数, 使两种技术能高效的匹配在一起。

为了提高上行链路性能, 本文提出了一种先进的适用于波束切换型智能天线技术的基于正确上行链路干扰预测接入控制算法, 该算法能在背景噪声提升门限值为 13dB 左右高效工作。

参 考 文 献

- [1] Peng Mugen, Wang Wenbo. A framework for investigating radio resource management algorithms in TD-SCDMA systems, *IEEE Communications Magazine*, 2005, 43(6): 12-18.
- [2] 王大庆, 张惠明, 吴伟陵. CDMA 中智能天线的接收准则及自适应算法研究[J]. 通信学报, 1998, 19(6): 33-39.
- [3] 彭木根, 王文博. 基于多用户检测技术的时分双工-码分多址系统上行链路容量研究[J]. 北京邮电大学学报 2003,26(3): 21-25.
- [4] Peng Mugen, Wang Wenbo. Investigation of uplink admission control schemes for TDD-CDMA systems. ICCAS2004, Chengdu, China, 2004: 1202-1206.
- 彭木根: 男, 1978 年生, 博士, 讲师, 研究方向为 3G/B3G 和无线宽带接入网的无限资源管理和组网技术等.
- 王文博: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 北京邮电大学电信工程学院院长, 研究方向为无线通信系统信号处理及无线宽带通信系统关键技术.