

文章编号 1005-0388(2004)05-0596-07

倾斜天线蜂窝系统的双向信道优化模型^①

金荣洪 耿军平 江冉 范瑜

(上海交通大学电子工程系 ,rjin@sjtu.edu.cn , 上海 200030)

摘要 地面基站天线倾斜是提高 CDMA 蜂窝系统容量和平衡小区负载的有效方法之一。本文通过对倾斜天线蜂窝系统的切换问题的研究, 提出了在计算系统容量时, 同时考虑前向信道和反向信道的双向信道分析方法, 使得系统容量的计算更为合理。利用这一模型, 得出了在用户均匀分布和非均匀分布情况下的最佳天线倾斜角度。仿真结果表明, 利用本文的方法, 系统的实际容量比单独考虑反向信道时有显著的提高。

关键词 双向信道, 蜂窝系统, 倾斜天线, 容量优化

中图分类号 TN929.5 文献标识码 A

Capacity optimization with integrated channel model for cellular systems with tilted array

JIN Rong-hong GENG Jun-ping JIANG Ran FAN Yu

(Electronic Engineering Department in Shanghai Jiao Tong University ,
rjin@sjtu.edu.cn , Shanghai 200030 , China)

Abstract The tilted-antenna mechanism is an effective way to balance the traffic and improve the capacity of CDMA cellular system. Through the investigation of handoff problem in the fixed tilted-antenna mechanism, a new model of analyzing the system capacity is presented, in which the quality of the integrated channel is considered. Because of integrating both the forward link and reverse link into consideration, the proposed method consequently can lead to much more reasonable results of the system capacity. Optimized tilted angles of the antenna of a base station, under the condition of uniform or non-uniform user distributions, are investigated. The simulation results show that by the new model, the actual system capacity can be greatly improved compared with the results by the model with the reverse link only.

Key words integrated channel, cellular system, tilted antenna, capacity optimization

1 引言

提高系统容量和减少干扰是 CDMA 系统中一个十分重要的课题^[1,2], CDMA 系统容量分为反向信道容量和前向信道容量^[3], 两者分别从反向和前向信道质量出发, 以 SIR(Signal-Interference Ratio 信

号干扰比)作为分析信道质量的标准。而在研究边界切换问题或其他一些实际问题时, 前向信道容量一般要优于反向信道容量^[3], 所以在计算系统容量时, 以反向信道容量为主^[4,5]。

反向信道容量主要受到来自附近其他小区用户产生的干扰的限制, 而地面基站天线倾斜是减小这

一干扰的有效措施之一^[3]。所谓基站天线倾斜是指基站天线波束在垂直面内向下倾斜一个角度,从而减小基站天线辐射功率在相邻小区的覆盖值。合理的利用这种方法可以对小区用户数量平衡、各类信道干扰的抑制等产生一定的作用。

目前对于倾斜天线本身的高度、增益、方向图等参数,已经有不少文献提出了相应的计算方法^[6~9]。此外,小区边界的移动也是提高系统容量的方法之一。由于相邻小区的用户分布往往是非均匀的,因此通过小区切换边界的移动能够平衡相邻小区的负载,从而提高整个 CDMA 系统的容量。

J. S. Wu 等人^[6]分析了基站天线倾斜在 CDMA 蜂窝系统中的应用,也同样采用反向信道作为容量分析的对象,利用基站端的阻塞概率,作为判断是否接受用户接入请求的依据,以此解决在小区内用户均匀分布情况下的负载平衡问题,实验结果表明该方法能够有效地提高系统的反向信道容量。

但是由于基站天线倾斜的影响,天线的覆盖范围减小,区内用户尤其是边界用户接收 SIR 受到波束衰减的影响较大,造成前向信道质量急剧下降,使得前向信道质量将有可能影响到整个系统的容量。事实上,在小区间用户均匀分布的情况下,通过前向、反向信道质量的分析可以发现,随着倾斜角度的增大,虽然反向信道容量不断上升,但前向信道容量却急剧下降,因此天线的倾斜角度将受到限制。而对于非均匀用户分布,移动边界造成小区范围扩大后,边界用户往往处于基站天线主波束覆盖范围之外,导致前向信道质量下降。因此本文将采用结合前向信道与反向信道来分析系统容量的方法,建立双向信道分析模型,计算在用户均匀分布、非均匀分布和各种负载失衡情况下的最佳天线倾斜角度。

本文的第二部分将介绍双向信道模型,包括系统模型、天线方向图、SIR 及容量计算方法。第三部分将分析用户均匀分布情况下的倾斜角度与容量的关系。第四部分将分析非均匀用户分布下的切换边界和倾斜角度。

2 双向信道容量计算模型

2.1 系统模型

本文提出的系统模型是建立在下列前提与假设之上的:

1) 系统模型是建立在蜂窝式 CDMA 系统之上的,并且每个小区为正六边形。

2) 基站天线均采用线天线,并且是波束可倾斜的。

3) 由于使用波束倾斜天线的要求,因此每个小区被等分为六个扇区^[12,13],这样就能把研究对象转为相邻小区的两个相邻扇区了(如图 1 中的扇区 1 与扇区 2)^[10,11]。并且切换边界只存在于这两个相邻扇区之中,因此这两个小区之间的切换不会影响到其他小区之间的切换。

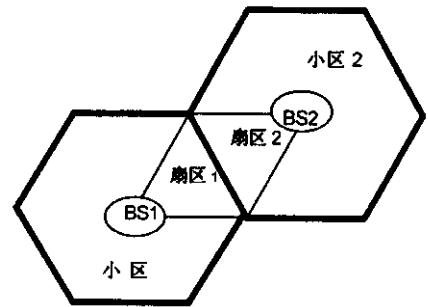


图 1 蜂窝系统

4) 对于前向信道,本文采用了平均 SIR 的方法,即在保持基站总发射功率不变的前提下,通过前向信道功率分配,使小区每个用户的接收 SIR 相等。而对于反向信道,系统中采用了完全功率控制(perfect power control),即小区内的所有用户发射的信号在到达基站后的功率等于常数。

5) 本文中,对于采用本文提出的双向信道分析方法(同时考虑反、前向信道)计算得到的容量称为系统实际容量,而对单独考虑反、前向信道得到的容量值分别称为反、前向信道容量。具体定义请另参见 2.5 节。

2.2 天线方向图

根据 CDMA 蜂窝系统的特点,本文采用将每个小区划分为 6 个扇区的方法。对每个扇区,使用一个单独的倾斜天线阵列(或一个独立的倾斜波束)。与文献[6]相同,这里采用线性阵列,垂直方向上的归一化方向图为:

$$G(\varphi, \gamma) = \begin{cases} 1 - (\varphi/BW)^2, & 0 \leq \varphi \leq BW \\ \gamma, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中 BW 为倾斜天线的波束宽度,本文仍取为 10° ^[6]。 γ 取 $0.1(-10 \text{ dB})$,变量 φ 是由天线倾斜角度、水平面内的来波角度和垂直面内的来波角度共同决定的,计算方法如下^[6]:

$$\varphi = \beta - \cos^{-1}[1 - \cos^2 \Phi(1 - \cos \theta)] \quad (2)$$

式中 Φ 为水平面内的来波角度, β 为用户到基站的

倾角 θ 为天线的倾斜角度。

2.3 用户分布模型

由于在实际情况下,用户分布是随机且离散的,因此无法用任何一个简单的数学表达式来表示。即使是统计模型也应该是一个随时间、地点改变的复杂函数。

为了简化模型,K. Takeo 等人采用了近似一维分布的模型^[10,11],定义沿 x 轴方向的用户分布线密度函数为^[11]:

$$\pi(x) = N \cdot \left(\frac{K}{2R^2} \cdot (x - R) + \frac{1}{2R} \right); \quad 0 \leq x \leq 2R \quad (3)$$

式中 $K = \frac{\xi}{\delta}$ 为用户分布的失衡系数。 ξ δ 如图 2 所示。由于 $\pi(x) \geq 0$,显然有 $0 \leq K \leq 1$,且 K 越大就表示用户分布非均匀程度越大。当 $K=0$ 时,式(3)就表示均匀分布。

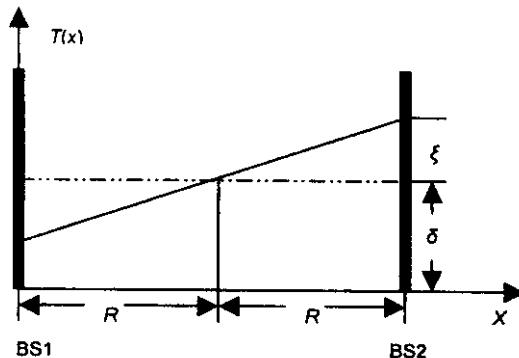


图 2 用户分布密度函数

不同于[11],本文为使计算分析更贴近实际工程应用,采用了二维的分析模型,因此需要将[11]中一维的用户分布密度函数转换成二维函数。直角坐标中 $\pi(x)$ 表示沿 x 方向一维的分布密度函数,由于假设了用户在 y 方向上为均匀分布,因此分布密度函数中并没有出现 y 。若设实际的直角坐标下的二维分布密度函数为 $T(x, y)$ 则有:

$$T(x, y) = \begin{cases} \pi(x, y) & 0 < x \leq R \\ \frac{2}{\sqrt{3}}x & R < x < 2R \\ \frac{\pi(x, y)}{\sqrt{3}(2R - x)} & \end{cases} \quad (4)$$

因此式(4)即为在 X 方向上符合式(3)^[11],而在 Y

方向为均匀分布的二维用户密度函数(具体证明请参见附录 A)。即保持了式(3)的用户随小区径向线性非均匀的分布特性,又不增加计算的复杂度。且由于式(4)在两个相邻扇区内积分恒定为 N (N 为两个扇区内的总用户数,证明请参见附录 A),这样系统内总负载就保持恒定,便于比较结果。

2.4 SIR 估计

与文献[7]相同,本文的信号传播模型也只考虑路径衰减与波束衰减,并且路径衰减指数 k 假定为一常数,同时忽略了热噪声对系统接收 SIR 的影响,即认为干扰远远大于热噪声。

2.4.1 前向信道 SIR

采用平均 SIR 的方法,在保持总发射功率不变的前提下,通过功率控制,改变基站分配给每个用户的发射功率,从而使小区内每个用户的接收 SIR 相同。首先定义边界以左的区域为 D1(图中包括扇区 1 全部和扇区 2 边界以左部分),以右的区域为 D2,计算小区 1 内的总用户数 N_1 :

$$N_1 = \iint_{D1} T(x, y) dS \quad (5)$$

文献[8]中给出了前向信道容量的一般计算方法,本文在此基础上引入了小区基站天线倾斜的影响,得到小区 1 内用户的接收 SIR:

$$SIR_1 = P_{n1}(i) \cdot L_1(i) \cdot G_1(\gamma, \beta, \theta) \cdot [1 - F_o] \cdot P_1 L_1(i) G_1(\gamma, \beta, \theta) + v P_2 L_2(i) G_2(\gamma, \beta, \theta) \quad (6)$$

式中 F_o 为正交因子(orthogonal factor)^[10], P_1, P_2 分别为基站 1、2(BS1、2)总的发射功率, $P_{n1}(i)$ 为 BS1 对第 i 个用户的发射功率, $L_1(i), L_2(i)$ 分别为 BS1、2 到第 i 个用户的路径衰减, $G_1(\gamma, \beta, \theta), G_2(\gamma, \beta, \theta)$ 分别为 BS1、2 到用户 i 的天线波束衰减,可由式(1) (2) 计算得到。 v 为话音激活因子(voice activity factor)^[3]。式(6)中分子表示用户接收到的信号功率,分母的第一项 $(1 - F_o) P_1 L_1(i) G_1(\gamma, \beta, \theta)$ 表示小区 1 内其他用户对该用户的干扰。由于多径传输引起了正交性的下降,从而造成区内干扰上升, $1 - F_o$ 就表示干扰增加的程度。在实际系统中 F_o 很难确定,为了简化起见,一般假设 F_o 为一个常数^[10],且与编码的正交性有关^[12]。由于本文以 IS-95 系统为例进行计算,因此取 $F_o = 0$ ^[10]。而分母中的第二项 $v P_2 L_2(i) G_2(\gamma, \beta, \theta)$ 表示 BS2 对小区 1 内用户 i 的干扰。由于小区内平均 SIR,因此式(6)中 SIR 为一常数,由此可得:

$$SIR_1 = \sum_{i=1}^{N_1} \left[\nu (1 - F_o) P_1 + \frac{\nu P_2 L_2(i) G_2(\gamma \beta \theta)}{L_1(i) \cdot G_1(\gamma \beta \theta)} \right] \\ = \sum_{i=1}^{N_1} P_{T_1}(i) = P_1 \quad (7)$$

$$SIR_1 = \nu (1 - F_o) N_1 + \nu \frac{P_2}{P_1} \cdot \iint_{D_1} \frac{L_2 \cdot G_2(\gamma \beta \theta)}{L_1 \cdot G_1(\gamma \beta \theta)} \cdot T(x, y) dS \quad (8)$$

$$\text{上式中 } \frac{L_2}{L_1} = \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^k \quad (9)$$

r_1, r_2 分别为用户到 BS1、2 的距离, k 为路径衰减指数。同理可按上述方法计算小区 2 中的 SIR。

2.4.2 反向信道 SIR

BS1 接收 SIR 的计算公式如下^{[3][10]}:

$$SIR_1 = S_1 \nu (N_1 - 1) S_1 + \nu S_2 \iint_{D_1} \frac{L_1}{L_2} \cdot \frac{G_1(\gamma \beta \theta)}{G_2(\gamma \beta \theta)} \cdot T(x, y) dS \quad (10)$$

式中分子表示基站收到的用户信号功率, 分母中的第一项表示小区内其他用户对 BS1 的干扰功率, 第二项表示小区 2 内用户对 BS1 的干扰。上式中 S_1, S_2 为用户信号到达各自基站时的功率值, 由于采用了完全功率控制, 因此 S_1, S_2 对所有区内用户为恒定值。 L_1, L_2 分别为用户到 BS1、2 的距离衰减, L_1/L_2 可由(9)式计算得到。同理可计算 BS2 的接收 SIR。

2.5 容量计算方法

从式(8)、(10)中可以看出系统的前向、反向信道 SIR 都与系统内总用户数 N 成反比(或近似成反比^[6]), 因此在容量计算过程中以 $SIR \cdot N$ 作为研究对象。又由于前向、反向信道 SIR 必须满足:

$$SIR_{\text{reverse}} \geq SIR_{\text{reverse-req}} \quad (11)$$

$$SIR_{\text{forward}} \geq SIR_{\text{forward-req}} \quad (12)$$

其中, SIR_{reverse} 、 SIR_{forward} 分别表示反向和前向信道的 SIR, 而 $SIR_{\text{reverse-req}}$ 、 $SIR_{\text{forward-req}}$ 则分别是为保证反向和前向信道质量而设定的门限值。CDMA 系统要求反向、前向信道的 E_b/N_0 分别大于 7dB、5dB^[3]。由于 CDMA 系统的处理增益定义为带宽除以信息速率, 本文中取 21dB(1.2288MHz/9.6kbps), 因此反向、前向信道 SIR 门限值分别为 -14dB(7.0~21.0) 和 -16dB(5.0~21.0)。

各小区的反向和前向信道容量为:

$$N_{\text{capacity}} \approx \frac{SIR \cdot N}{SIR_{\text{req}}} \quad (13)$$

而系统的实际容量应该表示为:

$$N_{\text{capacity}} = \min(N_{\text{forward}}, N_{\text{reverse}}) \quad (14)$$

其中:

$$N_{\text{forward}} = \min(N_{1\text{forward}}, N_{2\text{reverse}}) \quad (15)$$

$$N_{\text{reverse}} = \min(N_{1\text{reverse}}, N_{2\text{forward}}) \quad (16)$$

小区 1 内前向信道容量 $N_{1\text{forward}}$ 由式(8)结合(13)计算得到, 小区 1 内反向信道容量 $N_{1\text{reverse}}$ 由式(10)结合(13)计算得到, 以此类推。因此定义由(15)、(16)得出的分别为前向、反向信道容量, 由(14)得出的为系统容量。

3 均匀用户分布下的容量分析

本文以 CDMA IS-95 协议的语音传输部分为应用背景进行数值分析。参数取值如下: 小区半径为 R ; 话音激活因子(voice activity factor) $\nu = 3/8$ ^[3]; 扩频带宽取 1.2288MHz, 信息速率取 9.6kbps, 系统允许最低反向、前向 SIR $SIR_{\text{reverse-req}} = -14$ dB, $SIR_{\text{forward-req}} = -16$ dB; 基站天线高度 $H = 0.01R$ ^[6]; 正交因子 $F_o = 0$ (伪随机序列)^[12]; 路径衰减指数 $k = 4$ 。

图 3 给出了用户均匀分布时前、反向信道容量与倾斜角度的关系。由于用户为均匀分布, 该例中并不要求移动边界以平衡负载。由图中可见, 反向信道容量随天线倾斜角度的增大单调上升, 但前向信道容量则单调下降。

如果只考虑反向信道容量, 从(10)式中可以发现, 不断增加天线的倾斜角度, 分母中的第二项, 即来自相邻小区用户的干扰将不断减小, 从而使反向信道容量单调上升。

但是随着倾斜角度的增加, 天线波束主瓣覆盖小区内部的范围减小, 在极限的情况下, 基站天线将完全用旁瓣对准本小区用户, 这显然是不合理的。事实上, 在倾斜角度增大的过程中, 基站天线对边界用户的波束衰减大幅度上升, 从而使其接收 SIR 大大下降。由于假设采用了功率分配, 因此整个小区内的用户接收 SIR 将会下降, 从而造成前向信道容量下降。

前向、反向信道容量相交点即为系统实际容量最大的点, 对应的天线倾斜角度为系统容量最大意义下的最佳倾角。而且由于天线倾斜角度大于最佳倾角后前向信道容量急剧下降, 因此实际应用中天线倾角应小于最佳倾角。该例中, 由图 3 可见, 最佳倾角为 8.6°, 即在用户均匀分布情况下, 天线倾斜角度不应超过 8.6°, 此时两个相邻扇区的总容量为 126, 单扇区容量即为 63。

4 非均匀用户分布下的容量计算与分析

由于在实际的蜂窝系统中, 用户分布往往呈非均匀状态, 如某个小区内用户密度较高, 且数量超

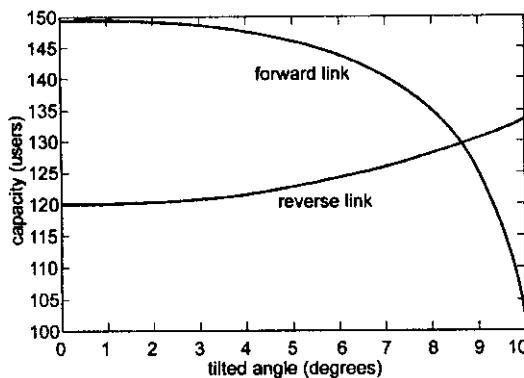


图 3 双向信道容量与倾斜角度的关系

过预定的容量极限,而相邻小区的用户密度较低。此时,小区边界的移动可以平衡各小区负载,以提高系统的总容量^[10,11]。但在基站天线倾斜的情况下,移动边界会造成天线主瓣区内覆盖率的变化。尤其当小区范围扩大后,边界用户往往处于基站天线主波束覆盖范围之外,导致前向信道质量下降。因此,虽然天线倾斜提高了反向信道容量,但此时也必须结合前向信道,即采用双向信道的分析方法。

以下分析中,失衡系数 K 取 0.2、0.4、0.8 为参考研究样值^[10],由于其对应的最优倾斜角度分别为 4.3°、2.1°、1.0°(参见表 1),因此以下仿真实例主要采用这些取样值的结合。

由式(8)、(10),可以计算出两相邻小区的反向和前向信道的 $SIR \cdot N$ 。图 4(a)给出了反向和前向信道 $SIR \cdot N$ 随边界移动的变化。在该例中,用户分布密度函数假设为式(3)且其中 $K = 0.4$,天线倾斜角度取 2.1°(为 $K = 0.4$ 时应用双向信道容量分析方法计算得到的最佳倾斜角度,可参见表 1)。

从图 4(a)中可以看出,在边界由中心移向 BS2 的过程中,小区 1 内用户接收 SIR 下降,而小区 2 内用户接收 SIR 上升,两者相交于 A 点,因此 A 点为根据前向信道计算得出的最大容量点,同时 BS1 的接收 SIR 下降,BS2 的接收 SIR 上升,两者相交于 B 点,因此 B 点为根据反向信道得出的最大容量点。

图 4(b)显示了,倾斜天线系统中容量分析计算遇到的两种情况。为了方便说明,以倾斜角度 4.3°、 $K = 0.8$;倾斜角度 2.1°、 $K = 0.2$ 为例。两个信道的容量分别由(13)式结合(15)、(16)式计算得到。从图中,可以发现其中当 $K = 0.2$ 时,其反向信道容量在 F 达到极值,此时前向信道容量仍高于反向信道容量,因此此时反向信道容量仍为系统容量瓶颈。而当 $K = 0.8$ 时,D、E 点分别为单独根据前向、反向信道得出的最大容量点,且反、前向信道容量相交与 C 点。从图中可以发现,在反向信道容量

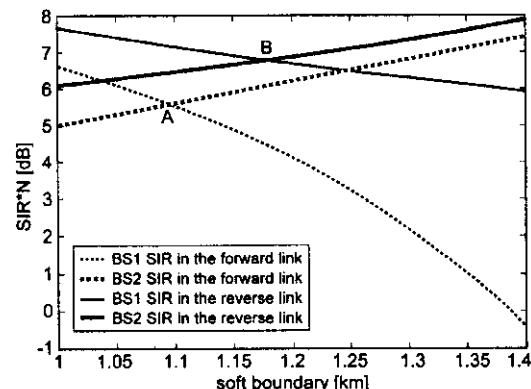
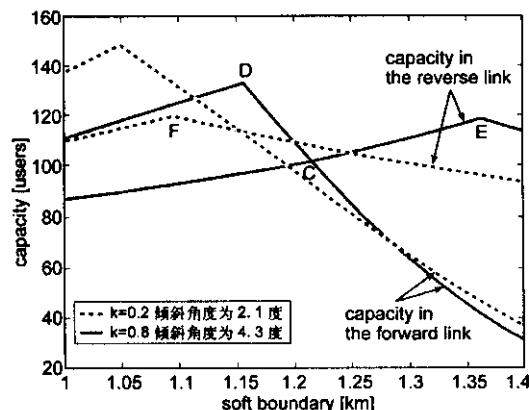
图 4(a) $SIR \cdot N$ 随切换边界的变化图

图 4(b) 前向和反向信道容量随切换边界的变化图

极值点(D),前向信道容量已经明显低于反向信道容量,前向信道已经成为了系统容量瓶颈。同样,在 E 虽然前向信道达到最优,而此时反向信道又成为了系统容量的瓶颈。因此显然 D、E 都不是系统容量的最优点。由于系统容量必须同时满足(11)、(12)式,因此由(14)式可以计算出最终的系统容量,即 C 为兼顾了前向和反向信道质量的最大系统容量点。因此对于第二种情况,仅考虑反向信道容量就不够全面,双向信道分析方法的合理性和优势就得到了体现^[13,14]。

显然,通过双向信道计算得出的系统容量将随倾斜角度的变化而变化,因此就可以根据系统容量最大的原则,计算最佳的倾斜角度。表 1 中列出了在不同的负载失衡情况下的最大系统容量和最佳倾斜角度。第 2 列为在各种负载失衡情况下应用双向信道模型的道德最佳天线倾斜角度,第 3 列为同时考虑了前向和反向信道的最大系统容量,第 4 列为只考虑了反向信道质量情况下的最大反向信道容量,第 5 列为只考虑了反向信道质量情况下的系统实际容量。

从表1中可以看到,当用户分布失衡程度较小时,系统仍以反向信道容量为瓶颈,而随着用户分布失衡程度增大时,前向信道容量下降将更为显著。此时若单独考虑反向信道,虽然可以找到系统的反向信道容量的最优值,但是此时往往由于边界移动过大,造成前向信道容量急剧下降,从而使系统的实际容量大大下降,且下降的幅度随失衡程度的增加而增大。此时双向信道容量分析方法的优势就得到了体现。按照双向信道分析方法选择天线倾角和切换边界后,系统的容量变化较为稳定。与原有的只考虑反向信道的分析模型相比,系统容量的改善十分明显。

表1 倾斜角度与容量随失衡程度的变化

失衡系数K	最优倾斜角度(degree)	采用双向信道的模型容量	单独考虑信道容量	单独考虑反向信道容量
0.1	5.1	119	119	119
0.2	4.3	119	119	112
0.3	2.9	119	119	97
0.4	2.1	117	119	84
0.5	2.4	114	119	76
0.6	1.7	111	119	66
0.7	1.6	108	118	42
0.8	1.0	105	118	34
0.9	0.8	102	118	30
1.0	0.6	99	117	18

5 结论

本文利用结合前向和反向信道的双向信道容量分析方法,提出了一种寻找在最大系统容量意义下最佳天线倾斜角度与最佳切换边界的方法。该方法能够最大限度地平衡系统负载。从数值计算的结果来看,该方法能够有效地改善系统容量,减轻用户拥塞的问题。

附录A:用户分布密度与负载分布关系的证明

首先证明式(4)在X方向上符合式(3)。假设在x点处,在Y方向上积分:

$$\int T(x, y) dy$$

$$= \begin{cases} \int_{-x/\sqrt{3}}^{x/\sqrt{3}} T(x, y) dy & 0 < x \leq R \\ \int_{-(2R-x)/\sqrt{3}}^{(2R-x)/\sqrt{3}} T(x, y) dy & R < x \leq 2R \end{cases} \quad (1)$$

即:

$$\int T(x, y) dy = T(x, y) \quad 0 < x < 2R \quad (2)$$

因此式(4)在X方向上符合(3)式的用户密度函数。仔细观察,可以发现(4)式中并没有出现y,这是由于(4)式代表的用户密度分布在Y方向上呈均匀分布的缘故。

由式(2)可得:

$$\int_0^x dx \int T(x, y) dy = \int_0^x T(x, y) dy \quad (3)$$

由于式(3)在0~2R区间上积分即为N,因此由(3)可知式(4)在两个相邻扇区内积分即为N,N即代表两个相邻扇区内存在的用户数。

参考文献

- [1] 侯瑞庭. CDMA蜂窝系统中的干扰及影响[J]. 电波科学学报, 1997, 12(3): 328~333.
R T Hou. Interference and its effect in CDMA cellular system[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1997, 12(3): 328~333.
- [2] 聂敏, 裴昌幸, 李建东等. 利用电磁波极化实现微蜂窝系统扩容的研究[J]. 电波科学学报, 2003, 18(5): 579~582.
M N, C X Pei, J D Li *et al.*. Research on increasing the capacity of micro-cell system using electromagnetic polarization[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(5): 579~582.
- [3] K S Gilhousen, I M Jacobs, R Padovani, *et al.*. On the capacity of a cellular CDMA system[J]. IEEE Trans. Veh. Technol. 1999, 40(5): 303~312.
- [4] P Newson and M R Heath. The capacity of a spread spectrum CDMA system for cellular mobile radio with consideration of system imperfections[J]. IEEE J. Select. Areas Commun. 1994, 12(5): 673~683.
- [5] T S P. Yum and W S Wong. Hot-spot traffic relief in cellular systems[J]. IEEE J. Select. Areas Commun., 1993, 11(8): 934~938.
- [6] J S Wu, J K Chung and C C Wen. Hot-spot traffic relief with a tilted antenna in CDMA cellular networks[J]. IEEE Trans. On Vehicular Technology. 1997, 47(1): 1~9.
- [7] G R Cooper and R W Nettleton. A spread spectrum technique for high capacity mobile communications[J]. IEEE

- Trans. Veh. Technol. 1978, VT-27(11) 264 ~ 275.
- [8] D H Kim ,D D Lee ,H J Kim and K C Whang. Capacity analysis of macro/microcell CDMA with power ratio control and tilted antenna[J]. IEEE Tran. On Vehicular Technology. 2000, 49(1) 34 ~ 42.
- [9] E Benner and A B Sesay. Effect of antenna height ,antenna gain ,and pattern downtilting for cellular mobile radio[J]. IEEE Trans. On Vehicular Technology. ,1996 ,45(2) 217 ~ 224.
- [10] K Takeo ,S Sato and A Ogawa. A base station selection technique for up/downlink in CDMA systems[C]. IEEE VTC'99 ,1999.
- [11] K Takeo ,S Sato ,and A Ogawa. Optimum soft handoff considering non-uniform traffic in CDMA cellular system[C]. IEEE VTC'99 Fall ,pp. 1471 ~ 1475.
- [12] Young Hoon Kwon ,Daniel C Lee. Capacity analysis of forward link with deterministic power model in CDMA systems with adaptive antenna array and soft handoff [C]. IEEE VTC'2002 ,pp. 335 ~ 339.
- [13] Ming-Ju Ho ,Gordon L Stueber ,Mark D Austin. Performance of switched-beam smart antenna cellular radio systems[J]. IEEE trans. On Vehicular Technology ,1998 ,47(1) 10 ~ 19.

- [14] Mahmoudi ,M ,Sousa ,E S. Sectorized antenna system for CDMA cellular networks[C]. IEEE vehicular tech conference' 47th ,1997 ,1 :4 ~ 7.



金荣洪 (1963 -),男 ,江苏人 ,上海交通大学电子工程系教授 ,博士 ,主要从事现代通信天线理论和设计、数字波束形成技术、多波束天线、数值分析技术等领域的研究工作。

耿军平 (1972 -),男 ,陕西人 ,上海交通大学电子工程系博士后 ,博士 ,主要从事智能天线和电磁兼容等方面的研究工作。

江冉 (1979 -),男 ,上海人 ,上海交通大学电子工程系硕士研究生毕业 ,现就职于上海微软全球技术中心。主要从事智能天线和移动通信等方面的研究工作。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>