

论 文
Papers

CDMA中智能天线的接收准则及自适应算法研究

王大庆 张惠民 吴伟陵
(北京邮电大学 北京 100088)

摘要 在CDMA基站中采用自适应天线阵列可以降低多址干扰，提高系统容量，本文提出了一种适合于移动无线通信环境下的接收准则，最大接收信号准则，并根据该准则提出了空间变步长搜索算法。最后分析了基站采用自适应天线阵列时反向信道容量，与使用无方向天线相比，大大增加了系统容量。

关键词 移动通信 码分多址 自适应天线阵列

**A New Criterion and Algorithm of Base-station
Antenna Arrays in Cellular CDMA**

Wang Daqing Zhang Huimin Wu Weiling
(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100088)

Abstract In this paper we analyze the MAI reduction by using the Adaptive Antenna Arrays in CDMA System. we propose a new criterion:maximum received signal criterion. Base on this criterion we also propose a new adaptive algorithm which can be implemented in practice. Finally,we analyze the capacity of reverse link by using the adaptive antenna arrays. Results show that by using eight antennas,the capacity of the reverse link can be increased to about 200 subscribers per cell.

Key words mobile communications, CDMA, adaptive antenna arrays

1 概述

码分多址(CDMA)系统是干扰噪声受限系统。提高CDMA系统容量和性能的关键在于减小多址干扰。本文将讨论在小区基站处采用自适应天线阵列(Adaptive Antenna Arrays)技术对抗多址干扰，提高CDMA系统容量的新方法。

自适应天线阵列^[1]的基本原理就是根据接收准则自动地调节天线阵元的幅度和相位加权，达到最佳接收效果。从空间响应来看，自适应天线阵列是一个空间滤波器，在信号入射方向上增益最大，在干扰信号入射方向上形成零陷。将自适应天线阵列应用于移动通信系统是一项新技术^[2]。在基站处采用自适应天线阵列，可以降低多址干扰信号的能量，增加系统容量。

2 自适应天线阵列

根据最大信噪比准则，自适应天线阵列可以自适应地调整每个天线阵元的相位和幅度加权，使天线阵列的零陷对准干扰信号的入射方向，达到最佳接收效果。如图1所示，对于N元天线阵列，设信号自 α 方向入射，阵元间距为d，接收信号功率为P，以第1根天线为参考，则第i根天线的相位延迟为： $\phi_i = (i-1)d\cos(\alpha)$ ，其中 $i=2, \dots, N$ ，天线阵列接收信号矢量为：

$$\begin{aligned} S^T(t) &= [\sqrt{P} e^{j\omega t}, \sqrt{P} e^{j(\omega t - \beta d\cos(\alpha))}, \dots, \sqrt{P} e^{j(\omega t - \beta(N-1)d\cos(\alpha))}] \\ &= \sqrt{P} e^{j\omega t} V^T(\alpha) \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $V(\alpha)$ 为天线阵在 α 方向上的响应矢量。设 V_d, V_j 分别为有用信号、干扰信号的天线阵响应矢量， $S_d(t), S_j(t)$ 分别为有用信号和干扰信号矢量，M为干扰信号个数，N(t)为噪声矢量。则经过加权的天线阵输出X(t)可表示为下式：

$$X(t) = \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{S}_d(t) + \mathbf{W}^T \cdot \left(\mathbf{N}(t) + \sum_{j=1}^M \mathbf{S}_j(t) \right) \quad (2)$$

S.Applebaum根据接收信号的最大干扰噪声比(MSINR)给出了最优化权值[1]：

$$\mathbf{W}_{\text{opt1}} = \mu (\mathbf{R}_{nn} + \mathbf{R}_{S_J S_J})^{-1} \mathbf{V}_d^* \quad (3)$$

μ 为常数。 $\mathbf{R}_{nn} = E[N(t)^* \cdot N(t)^T] = \sigma_n^2 \mathbf{I}$, $\mathbf{R}_{S_J S_J} = \sum_{j=1}^M E[\mathbf{S}_j^* \cdot \mathbf{S}_j^T]$ 。阵的方向图函数为：

$$f(\theta) = \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{V}(\theta) = \sum_{i=1}^N W_i e^{j \beta_i d \cos(\theta)}, 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (4)$$

N元阵列有N-1个自由度，即可同时对消N-1个来自不同方向的干扰，当干扰信号数目小于阵元数目，阵的方向图(如图2所示)就是在信号入射方向上形成主波束，在干扰信号入射方向形成零点。

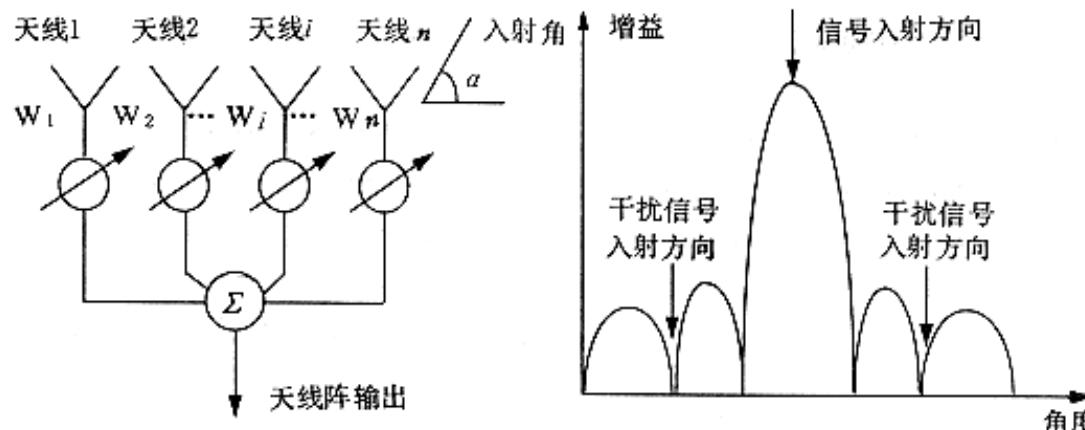


图1 自适应天线阵列

图2 天线阵的方向图

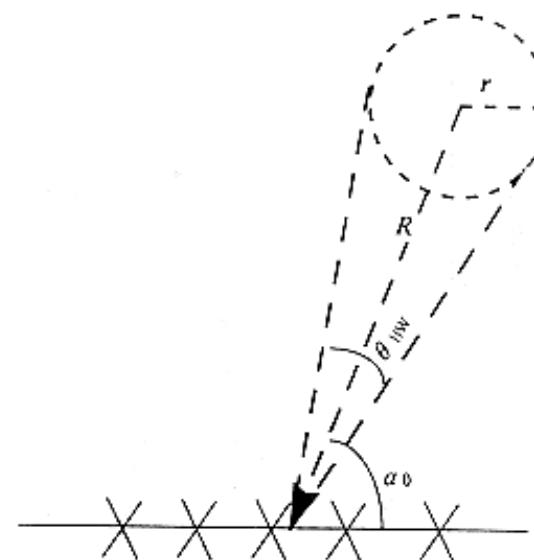


图3 基站接收信号模型

3 最大接收信号准则

考察CDMA系统基站接收信号模型^[2]，如图3所示。R为移动台距基站距离，r为移动台周围折射、散射半径， α_0 为信号入射角，BW为多径信号入射角宽度。

因为 $R=3\sim 5km$, $r=100\sim 200m$, $R \gg r$, 所以 BW很小, 可将移动台看做点源。多径信号的入射角是以 α_0 为均值, 为标准偏差的正态分布, 随环境不同而变化, 实验证明当R为3km, $\sigma < 5^\circ$ ^[3], 可以近似地认为信号是来自于同一方向。

由于应用环境变化, 在移动通信系统中根据最大信噪比准则求最优权值存在一些困难:首先相关矩阵 R_{nn} , R_{SJSJ} 不易得到, 求其逆矩阵的运算量可达 $1.5N^3+5N^2$ 次复数乘法, 实现复杂度大^[4];其次由于小区内平均用户数大于30, 远大于天线阵元数目, 天线阵已不能起对消干扰的作用。因此我们提出最大接收信号准则。设天线阵接收的所需信号为 $S_d(t)$, 经过加权后阵列输出为 $X_d(t)$ 则:

$$X_d(t) = W \cdot S_d(t) = \sqrt{P} e^{j\omega t} W \cdot V_d \quad (5)$$

则当 $W_{opt2}=V_d^*$ 时, 接收信号 $X_d(t)$ 最大。此时

$$W_{opt2}^T = V_d^* = [1, e^{j\beta d \cos(\alpha)}, e^{j\beta 2d \cos(\alpha)}, \dots, e^{j\beta (N-1)d \cos(\alpha)}] \quad (6)$$

由式(3)可见当 $R_{nn}+R_{SJSJ}=I$ 时, $W_{opt1}=W_{opt2}$ 。 $R_{nn}+R_{SJSJ}$ 的主对角线元素为干扰和噪声功率之和, 非主对角线元素为信号在任意两个天线间的相关系数, 当相邻天线间隔 $/2$ 时, 相关系数很小, 用户数很多时, 忽略非主对角线上元素的影响, 则由最大接收信号准则和最大信噪比准则得到的加权值已趋于相等, 可以降低系统的复杂度。下面从天线阵的方向图和阵输出信噪比两方面比较两种接收准则。

根据最大信噪比准则, 由式(3)求出 W_{opt1} , 代入式(4), 得到最大信噪比准则下的方向图函数 $f_1(\theta)$ 。根据最大接收信号准则, W_{opt2} 由式(6)给出, 则最大接收信号准则下的方向图函数为:

$$f_2(\theta) = W_{opt2}^T \cdot V(\theta) = \sum_{i=1}^N e^{j\beta(i-1)d(\cos\alpha-\cos\theta)}, -\pi \leq \alpha, \theta \leq \pi \quad (7)$$

以六元直线阵单小区情况为例进行比较, 设小区内用户均匀分布, 忽略白噪声影响。图4为小区用户数M=30, 60时, 由两种准则得到的方向图。可以看出当小区内移动台的数目远大于阵元数目时, 根据最大信噪比准则, 阵列已不能对消干扰, 仅在信号入射方向上形成最大增益主瓣, 在其它方向上保持低副瓣, 且当用户数不同时, 阵列方向图变化很小。由最大接收信号准则亦得到基本相同方向图, 可见两者的基本滤波特性基本保持一致。

设系统有理想的功率控制, 基站处接收到用户信号功率相等, 信号噪声比为10dB, 天线阵列分别为4、6、8元直线阵, 阵元间距为 $/2$ 。图5给出了不同接收准则情况下阵列输出信号干扰噪声比(SINR)情况, 可见阵列输出SINR较采用无方向天线有很大提高, 且输出SINR随着阵元数增加而增加。对六元阵列, 当用户数大于30时, 输出SINR平均可提高8.5dB以上。对于两种接收准则, 当用户数大于30时, 输出SINR差异小于1dB。在实际系统中, 小区内用户数大于30, 采用最大接收信号准则对最大信噪比准则进行简化是可行的。采用最大接收信号准则, 只需对信号入射方向进行估计, 就可得到加权值, 无需形成相关矩阵并求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了系统复杂度。

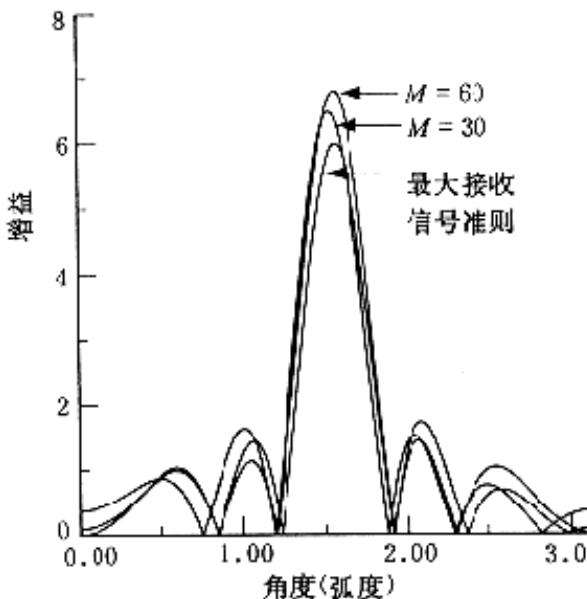


图4 天线阵方向图

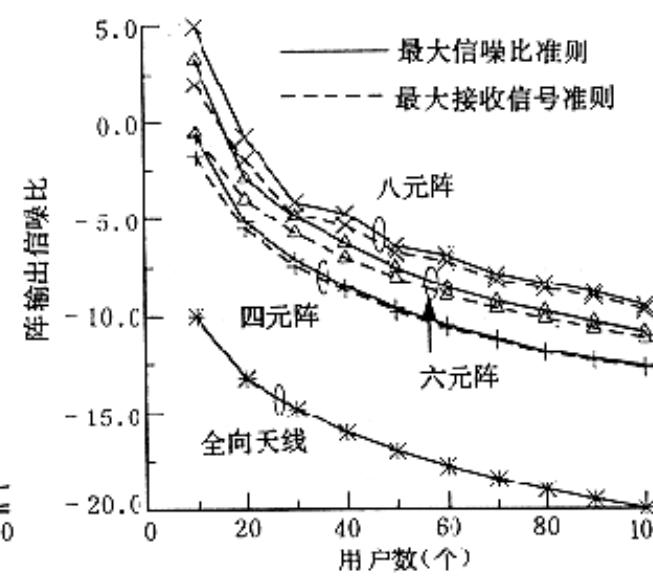


图5 天线阵输出信噪比

4 空间变步长搜索算法

实现最大接收信号准则需要对信号入射方向进行估计。用于信号入射方向估计的算法有MUSIC、ESPRIT等，文献[5]指出如果要唯一地分辨出每个源位置，源的数目须小于天线数目。在移动通信环境下，信号源数目远远大于天线数目，这些算法将不再适用。最小均方(LMS)算法无需已知信号的入射方向，可以通过多次迭代收敛到最优权值，但由于其收敛速度慢不适合于跟踪移动物体[4]，因此我们提出了一种新的自适应算法：空间变步长搜索算法。

根据最大接收信号准则可以由式(6)每隔一定弧度预先计算出一组权值，将所有方向上的权值存放在表中，在搜索时查表即可。由天线阵的特性可知：阵元数目少，阵主瓣较宽。可以利用多元阵中的一部分构成一个子阵，首先用此子阵宽波束进行扫描，确定出信号入射角所在区间，见图6，之后利用阵列的全部阵元形成窄波束在上一步确定的区间内以大步长搜索信号的入射方向，定出下一步搜索区间，之后减小步长，缩小搜索区间，直到搜索到最佳角度，使接收信号最大。

从天线的方向图可以看出，主瓣具有抛物线特性，当主瓣的指向有 $\Delta\theta$ 变化时，输出信号也会产生相应的变化 Δe ，根据 Δe 的变化，可以缩小搜索的区间，当 $\Delta e > 0$ 时，继续沿同一方向进行搜索， $\Delta e < 0$ 时，沿相反方向进行搜索。见图7所示。

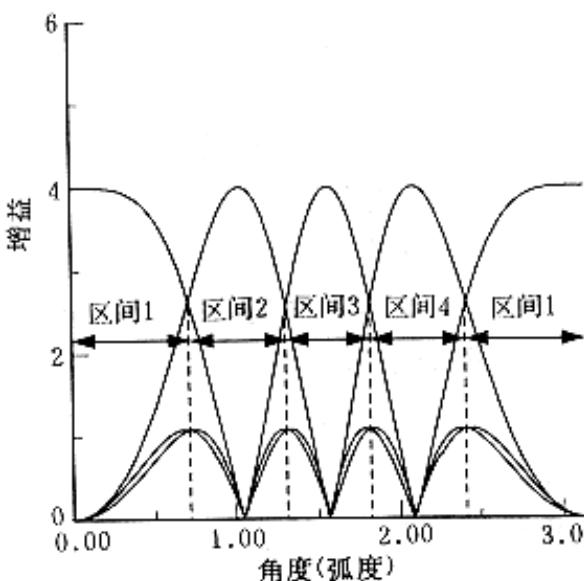


图6 用四元阵划分初始区间

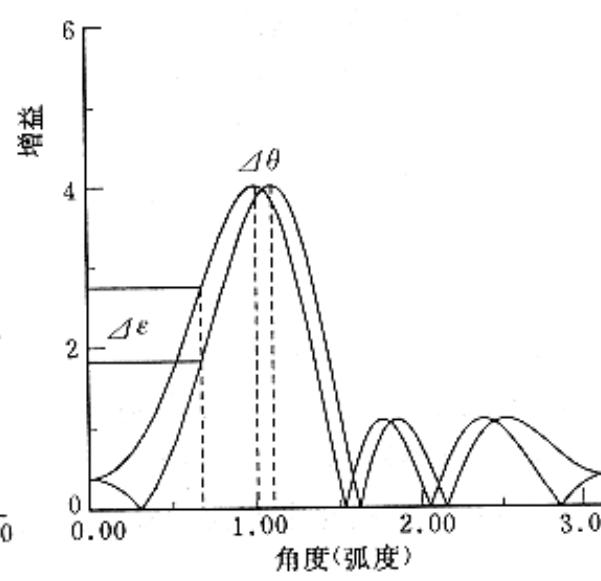


图7 阵输出随主瓣方向变化而变化

下面以N(N=4)元直线阵列为例，说明此搜索算法：

(1) 先以N元直线阵中相邻的四个天线阵元构成一个四元直线子阵，分别在 $\theta=0, (\pi/3), (\pi/2), (2\pi/3)$ 处形成波束，见图6所示，根据接收信号的大小，定出初始搜索的区间 C_1 。改变主瓣方向角 $\pm \Delta\theta$ ，根据接收信号的变化 ΔP ，可以缩小搜索区间为 $C_2=C_1/2$ 。

(2) 以N元阵在 C_2 区间每隔 $\Delta\theta$ 弧度进行搜索，见图8，确定最大接收信号所在区间 C_3 。

(3) 减小搜索步长为 $\Delta\theta$ 弧度在 C_3 内进行搜索，直到找到接收信号最大的入射方向。

(4) 当移动台处于运动时，信号入射角度会发生变化，改变主瓣方向角 $\pm \Delta\theta$ ，根据接收信号的变化 ΔP ，判断出入射信号的变化方向。

(5) 在 $[\theta_1, \theta_1 + \Delta\theta]$ 或 $[\theta_1 - \Delta\theta, \theta_1]$ 范围内以 $\Delta\theta$ 弧度为步长进行搜索， θ_1 为主波束第一零点，直到接收到的信号最强。

(6) 如搜索不到最强信号，则从第一步开始，在整个区间重新进行搜索。

由于在搜索中，只需查表即可得到权值，其收敛速度较LMS算法快，本算法通过不断地缩小搜索区域，克服了LMS算法需要在整个区间进行搜索的缺点，加快了收敛速度。比较几种算法的收敛速度，见图9所示，天线阵为六元，小区内用户数为50。LMS算法取迭代步长为0.05，迭代次数大于1000次时收敛，DMI算法，收敛的次数小于100次，本算法取 $\Delta\theta=0.1$ 弧度， $\Delta\theta=0.01$ 弧度，在 $[0, 2\pi]$ 区间内进行搜索，可见经过20次搜索就可以搜索到信号的入射方向。

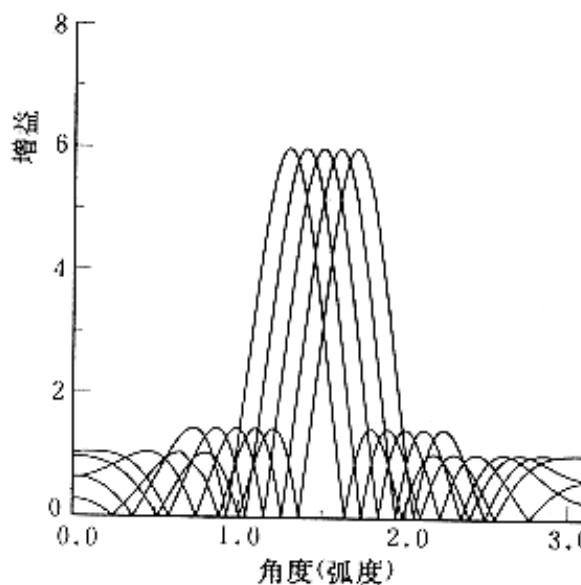


图8 用六元阵进行搜索

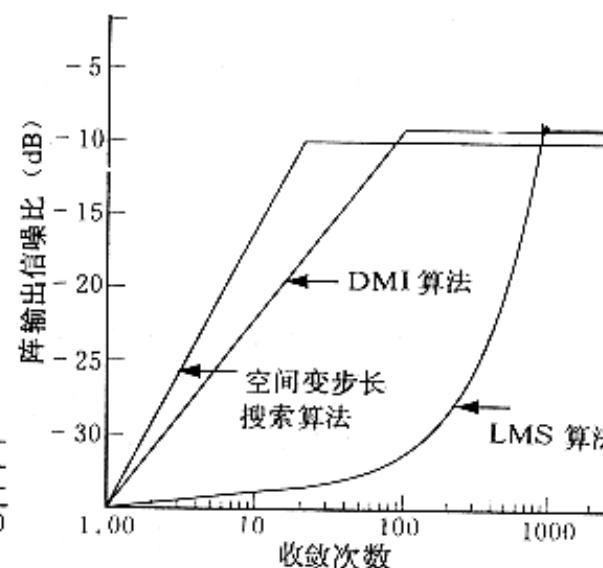


图9 算法的收敛速度

下面考察算法的收敛时间，首先，要求权值的更新速度可以跟踪上信号衰落速率，其次对于PSK信号权值更新时间要大于每个码元时间的5倍以上^[4]。设信号衰落速率为100Hz，平均衰落深度为10dB，则要求权值的更新时间小于1ms，对于IS-95系统，传输速率为1.25MHz，则每个码元为0.8μs，每5个码元进行一次权值更新，由图9可见，对于六元阵LMS算法，收敛到稳态时需要约1000次的迭代，需4ms时间，对DMI算法，计算矩阵的逆需0.2ms。而本文提出的新算法在20次内收敛，仅需0.08ms。可见LMS算法基本不适合于在移动通信环境下使用，DMI算法由于运算量大，实现复杂度高，目前硬件条件下，只适于阵元数目少的情况。本文提出的准则和算法，在牺牲一定信噪比的情况下，将DMI算法计算权值的过程，以固定权值取代，使本算法无论是在收敛速度和性能上都能够满足移动无线通信的要求。

5 系统容量

通过对接收准则和自适应算法的研究，本节将分析采用自适应天线阵列后小区容量变化，CDMA系统前向信道采用同步传输，容量大于反向信道，以反向信道为例，分析其容量。

设系统有理想的功率控制， α 为话音激活系数，小区内用户数为M，天线阵的输出信号为：

$$X(t) = \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{S}_d(t - \tau_1) + \phi \sum_{i=1}^{M-1} \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{S}_i(t - \tau_i) + \phi \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^M \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{S}_{ij}(t - \tau_i) \quad (8)$$

第1项为所要接收的信号，第2项为天线阵接收本小区内的干扰信号，第3项为K个相邻小区的干扰信号，因反向信道采用异步接收，当BER < 10⁻³时，S=E_b/(N₀+I)=7dB，

$$\begin{aligned} P_{\text{outage}} &= Pr(BER > P_0) = Pr\left(\frac{E_b}{N_0 + I} < S\right) \\ &= Pr\left(\frac{P/R}{(I_1 + I_2 + N_T)/W} < S\right) = Pr\left(\frac{LP}{I_1 + I_2 + N_T} < S\right) \end{aligned} \quad (9)$$

则

L为扩频增益，I₁，I₂分别为天线阵输出信号中本小区和相邻小区的多址干扰信号功率。设在理想功率控制情况下，本小区接收信号功率为P=1，当忽略热噪声的影响时，

$$P_{\text{outage}} = Pr\left(I_1 + I_2 > \frac{L}{S}\right) \quad (10)$$

其中

$$I_1 = \sum_{i=2}^M |f(\theta_i)|^2 I'_1, \quad I_2 = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^M |f(\theta_{ij})|^2 I'_2 \quad (11)$$

I'_1，I'_2分别为天线阵输入处本小区和其它小区多址干扰信号功率，为了简化分析，设天线阵的归一化功率方向图 |f(θ)|²如图10，主瓣宽为B，主瓣与最大副瓣接收信号功率相差10dB

$$\begin{aligned} P_{\text{outage}} &= Pr\left(I_1 + I_2 > \frac{L}{S}\right) = Pr\left(\frac{2\pi + 9B}{20\pi}(I_1 + I_2) > \frac{L}{S}\right) \\ &= Pr\left(I'_2 > \frac{20\pi}{2\pi + 9B} \frac{L}{S} - I'_1\right) \end{aligned} \quad (12)$$

在本小区内，I'_1=(M-1)P，设P=0.375。通常将来自其它小区的干扰I'_2认为是均值为μ，方差为σ²的高斯白噪声。取μ=0.247M，σ²=0.078M

$$\begin{aligned} P_{\text{outage}} &= \sum_{k=0}^{M-1} Pr\left(I'_2 > \frac{20\pi}{2\pi + 9B} \frac{L}{S} - K \mid \sum X_i = K\right) Pr(\sum X_i = K) \\ &= \sum_{k=0}^{M-1} \binom{M-1}{K} \phi^K (1-\phi)^{M-1-K} Q\left(\frac{\frac{20\pi}{2\pi + 9B} \frac{L}{S} - K - 0.247M}{\sqrt{0.078M}}\right) \end{aligned} \quad [6] \quad (13)$$

当Poutage < 10⁻²时，取扩频增益L=128，S=E_b/I₀=5.012，由式(13)得到小区容量曲线，见图11。可见，小区容量随阵元数目的增加而增加，当使用八元阵时，小区容量将增加到200个用户。

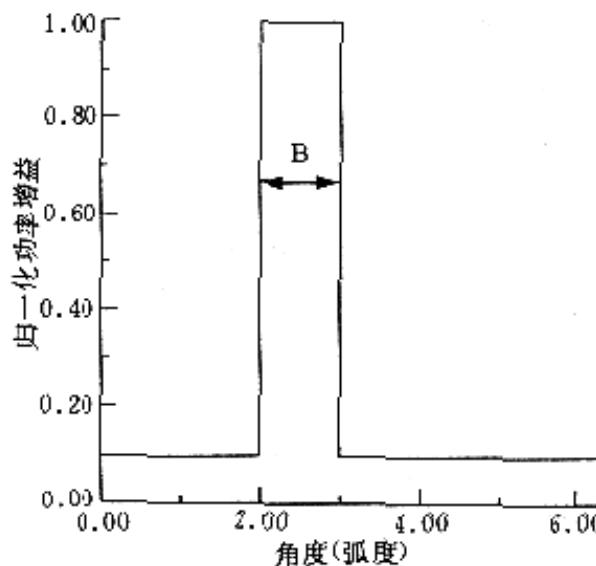


图10 理想情况下天线阵方向图

6 结论

在基站使用自适应天线阵列，可以增加系统容量，提高接收质量。实现的关键在于自适应算法的选择，本文提出了在牺牲一定的信噪比情况下采用最大接收信号准则后可以降低系统复杂度，利于实现。并根据该准则提出了空间变步长搜索算法，论证了其在收敛速率和时间上都适合于移动无线通信环境。最后分析了反向信道容量，当采用八元阵列时，小区用户容量可达到200，大大提高系统容量。

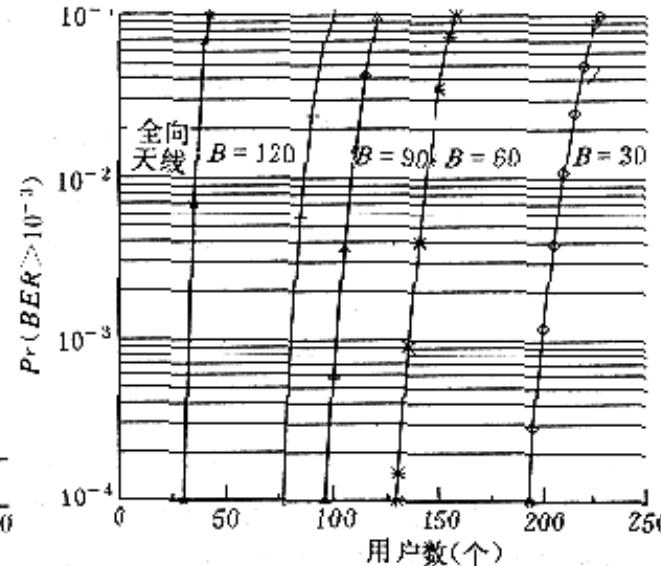


图11 反向信道系统容量

参 考 文 献

- 1 Applebaum S P. Adaptive arrays. IEEE Trans on AP,1976,24(5):585 ~ 598
- 2 Anderson S, Millnert M. An adaptive array for mobile communication system. IEEE Trans VT,1991,40(1):230 ~ 236
- 3 Shigeru KOZONO, Shuji SAKAGAMI. Correlation coefficient on base station diversity for land mobile communication systems. IEICE Trans Com,1987,J 70-B(4):476 ~ 482
- 4 Vaughan R G. On optimum combining at the mobile. IEEE Trans VT,1988,37(4):181 ~ 188
- 5 BRESLER Y, MCOVSKI A. On the number of signals resolvable by a uniform liner array. IEEE Trans ASSP,1986,34(6):1361 ~ 1375
- 6 Gilhousen K S. On the capacity of a cellular CDMA system. IEEE Trans VT,1991,40(2):303 ~ 312

(1996-09-25收到，1997-07-18改定)

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>