

# 应用智能天线提高 CDMA 系统性能的分析

北京邮电大学 冯斌

**内容提要:** 本论文主要从理论和实践的角度, 分析了应用智能天线对 CDMA 系统性能的提高。CDMA 系统是一个干扰受限的系统, 随着用户数的增多, 多址干扰会增大, 引起覆盖距离的减小。论文主要研究了覆盖距离和系统容量的关系, 并对使用智能天线和不使用智能天线这两种情况的系统性能进行了比较。论文共分为三部分, 首先介绍了所要用到的一些基本理论, 然后进行了进一步的推导得出结论式, 最后以实例计算说明问题。

## 1 基本理论

### 1.1 智能天线基本原理

智能天线使用一系列低增益天线阵元, 连接在合并网络上。这里,  $\phi$  是入射到阵列上的平面波的方位角,  $\theta$  是仰角。对于来自  $(\theta, \phi)$  方向的入射平面波, 入射在阵元  $m$  和参考阵元的信号分量间的相位差为

$$\Delta\varphi_m = \beta\Delta d_m = \beta(x_m \cos\phi \sin\theta + y_m \sin\phi \sin\theta + z_m \cos\theta) \quad (1-1)$$

其中  $\beta = 2\pi/\lambda$  是相位传播因子。

现设一系列低增益阵元按直线等距排列构成  $M$  元天线阵列, 间距为  $\Delta x$ 。阵列的每条支路具有一个权因子  $\omega_m$ , 权因子  $\omega_m$  具有幅值和相位。考察一个入射平面波  $s(t)$ , 其与阵列轴线所夹角  $(\theta, \phi)$ 。则由  $x_m = m\Delta x$  及式 3-1 可知, 射到阵元  $m$  上的接收信号为

$$u_m(t) = As(t)e^{-j\beta m\Delta d} = As(t)e^{-j\beta m\Delta x \cos\phi \sin\theta} \quad (1-2)$$

其中  $A$  是任意常数增益。阵列输出端的信号为

$$z(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \omega_m u_m(t) = As(t) \sum_{m=0}^{M-1} \omega_m e^{-j\beta m\Delta x \cos\phi \sin\theta} = As(t)f(\theta, \phi) \quad (1-3)$$

$f(\theta, \phi)$  称为阵列因子。阵列因子是波达方向  $(\theta, \phi)$  的函数, 决定了阵列输出端的信号  $z(t)$  与参考阵元处测得的信号  $As(t)$  的比值。通过调整权集  $\{\omega_m\}$ , 可以将阵列因子的最大主瓣对准任意方向  $(\theta_0, \phi_0)$ 。此时, 在这个方向接收或发射的功率可以达到最大。

可以证明, 当  $\omega_m = e^{j\beta m\Delta x \cos\phi_0 \sin\theta_0}$  时, 阵列在方向  $(\theta_0, \phi_0)$  的输出可以达到最大, 由式 1-3, 此时的最大输出信号为

$$z_{\max}(t) = AMs(t) \quad (1-4)$$

最大输出功率为

$$P_{\max} = A^2 M^2 E[|s(t)|^2] \quad (1-5)$$

### 1.2 无线电波传输原理

在无线传输中, 发射机使用增益为  $G_t$  的天线, 发射一个时间平均功率为  $P_t$  的信号。接收机到发射机的距离为  $d$ , 使用增益为  $G_r$  的天线。则接收天线处功率  $P_r$  为

$$P_r = \frac{\lambda^2 G_t G_r P_t}{(4\pi d)^2} \quad (1-6)$$

用分贝表示时

$$P_r = P_t + G_t + G_r - 20 \log \left( \frac{4\pi f}{c} \right) - 20 \log d \quad (1-7)$$

如不特殊声明, 此后的计算均使用分贝作为单位。

但是, 此公式有一定局限性, 只适用于自由空间。在多径及发射机和接收机间存在障碍物时, 用  $L_p$  表示发射机和接收机间的路径损耗, 公式可改进为

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_p \quad (1-8)$$

### 1.3 对数距离路径损耗模型

基于理论与实际测量的传输模型都表明, 无论是室外或室内的无限信道中, 平均接收信号功率与发射机和接收机间距离的对数成反比。任意 T-R 距离的平均大尺度路径损耗  $L_p$  可以用路径损耗指数  $n$  表示为距离的函数

$$L_p(d) = L_p(d_0) + 10n \log \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (1-9)$$

其中路径损耗  $n$  表示路径损耗随距离的变化程度,  $d_0$  是接近参考距离, 由靠近发射机的量度确定,  $d$  是 T-R 距离。自由空间的  $n$  等于 2, 当有障碍物时,  $n$  值增加。

选择一个合适传播环境的自由空间参考距离十分重要。在覆盖范围很大的蜂窝系统中, 参考距离通常为 1km, 而蜂窝系统采用较小的距离 (如 100m 或 1m)。参考路径损耗可由  $L_p(d_0) = 20 \log \left( \frac{4\pi f}{c} \right) + 20 \log d_0$  算出, 或通过距离  $d_0$  处的现场测量得到。

### 1.4 理想空间处理增益

智能天线的一个显著优势是对距离的扩展。距离扩展是手机可以在离基站更远处进行操作, 而不必提高手机上行发射功率或基站发射机的下行功率。

当使用  $M$  元阵列智能天线时, 由式 4-3, 接收到的含噪声信号为

$$z(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \omega_m u_m(t) = s(t) \sum_{m=0}^{M-1} \omega_m e^{-j\beta m \Delta x \cos \phi \sin \theta} + n(t) \sum_{m=0}^{M-1} \omega_m \quad (1-10)$$

其中  $s(t) \sum_{m=0}^{M-1} \omega_m e^{-j\beta m \Delta x \cos \phi \sin \theta}$  为有用信号分量,  $n(t) \sum_{m=0}^{M-1} \omega_m$  为噪声分量。

由式 1-5, 接收天线能够提供的最大有用信号功率为

$$P_z = M^2 E[|s(t)|^2] \quad (1-11)$$

此时的噪声功率为

$$N_z = M \delta^2 \quad (1-12)$$

接收信号信噪比为

$$r_z = \frac{ME[|s(t)|^2]}{\delta^2} \quad (1-13)$$

如果不使用智能天线, 而使用单个阵元接收信号, 则信噪比为

$$r_u = \frac{E[|s(t)|^2]}{\delta^2} \quad (1-14)$$

由此可见, 使用  $M$  元阵列可以得到理想空间处理增益为

$$G = 10 \log(M) \quad (1-15)$$

### 1.5 CDMA 系统中的信干比

在基于 IS-95 的系统中, 量度上行链路性能的一个关键指标是用户能达到的信干比 (CINR)。用户的 CINR 是在解扩后测量的。定义 CINR 为期望信号和干扰信号功率的比值

$$CINR = \frac{P_0}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^{K-1} P_k} \quad (1-16)$$

基于 IS-95 的 CDMA 系统还可以利用语音间歇特性。由于通话这沉默期间声码器降低其输出速率。因此, 用户端并不是连续发射, 而是在沉默期间不断地开关, 占空比可低至 1/8。这是用语音激活因子  $\nu$  表征的。考虑语音激活因子对 CINR 的改善, 式 1-16 可变为

$$CINR = \frac{P_0}{\frac{\nu}{N} \sum_{k=1}^{K-1} P_k} = \frac{NP_0}{\nu I_0} \quad (1-17)$$

其中  $I_0$  为多址干扰总功率,  $N$  为扩频因子。

### 1.6 天线系统

天线使用在无线系统链路的两端。利用天线, 射频功率可以耦合到空间, 发射机得以发射, 接收机得以捕获入射电磁波功率。天线既可以是简单的一根导线, 也可以是复杂的有源电子设备。

定义波束方向图为  $F_a(\phi)$ , 最大值为 1。

方向图的最大增益为

$$G_a = \frac{2\pi}{\int_{\phi=0}^{2\pi} F_a(\phi) d\phi} \quad (1-18)$$

### 1.7 定向天线

智能天线可以显示出方向性, 这就是我们所说的定向天线, 即在某个方向上发射和接收的功率大于其它方向上。天线可以自动将方向图指向期望用户信号方向, 而抑制其它方向上的干扰信号, 提高接收信噪比。峰值增益  $G_a > 1$ , 方向图  $F_a(\phi) \leq 1$ 。当一个功率为  $P_c$  的信号入射到定向天线上时, 基站接收到的信号功率为  $F_a(\phi)P_c$ 。当天线方向图在期望用户方向  $\phi_0$  上取得最大值 1 时, 由此方向接收到的有用信号功率为  $F_a(\phi_0)P_c = P_c$ , 而其它方向接收到的多址干扰信号的功率均小于  $P_c$ , 从而有效抑制了干扰。

### 1.8 蜂窝小区的多址干扰

在一个蜂窝多小区系统中, 每个用户不仅受到所在小区内其它用户的干扰, 还受到相邻小区用户的干扰。现在最常用的是六边形蜂窝结构, 每个小区周围有 6 个相邻小区, 相邻小区中心间隔为  $R$ 。采用理想功率控制, 每个用户发射的信号到达所在小区基站后功率均为  $P_c$ 。

当用户均匀分布在本小区内时, 本小区基站接收到它发射的功率为  $P_c$ 。

当用户均匀分布在相邻小区内时, 相邻小区基站接收到它发射的功率为  $P_c$ 。此时本小区基站接收到它发射的功率为

$$\xi = P_c \int_{R-\pi/8}^{3R-\pi/8} \int_{-\pi/8}^{\pi/8} \frac{r}{\pi R^2} \left[ 1 + \left( \frac{2R}{r} \right)^2 - \frac{4R}{r} \cos \phi \right]^{\frac{n}{2}} dr d\phi = \beta P_c \quad (1-19)$$

其中  $n$  为路径损耗指数,  $\beta$  为邻区衰减。

### 1.9 反向链路性能

设每个小区有  $K$  个用户, 本小区基站反向链路上的总干扰是本小区内用户的干扰与 6 个相邻小区内用户的干扰之和。

当使用全向天线时, 本小区的总多址干扰为

$$I_0 = (K-1)P_c + 6K\beta P_c \quad (1-20)$$

其中  $(K-1)P_c$  为本小区用户产生的干扰,  $6K\beta P_c$  为相邻小区用户产生的干扰。

在基站处使用定向智能天线接收, 可以抑制非期望用户方向上的干扰信号, 因而可以将所有干扰均减少  $G_a$  倍。在用户处使用定向智能天线发送, 只能抑制相邻小区用户产生的多址干扰, 无法抑制本小区用户产生的多址干扰, 因而可以将相邻小区干扰减小  $G_a$  倍。

综上, 当使用定向天线发送和接收信号时, 总多址干扰为

$$I_0 = \frac{(K-1)P_c + 6K\beta P_c / G_a'}{G_a} \quad (1-21)$$

其中  $G_a$  为基站处使用定向智能天线接收时提供的水平方向增益,  $G_a'$  为用户端使用定向智能天发射时提供的水平方向增益。

将式 1-21 代入式 1-17, 可得定向天线蜂窝小区信干比为

$$CINR = \frac{NG_a}{\nu[(K-1) + 6K\beta / G_a']} \quad (1-22)$$

由此可知, 使用定向天线时的  $CINR$  比使用全向天线时要高, 因而反向链路性能得到了很大的提升。

## 2 重要公式推导分析

CDMA 系统的干扰分为多址干扰和噪声干扰。设多址干扰功率为  $I_0$ , 噪声干扰功率为  $N_0$ , 接收信干比为

$$CINR = \frac{NP_0}{\nu[I_0 + N_0]} \quad (2-1)$$

将多址干扰  $I_0$  即式 1-21 代入式 2-1 可得

$$CINR = \frac{NP_0}{\nu[\frac{(K-1)P_c + 6K\beta P_c / G_a'}{G_a} + N_0]} = \frac{NP_0}{\nu[\eta P_c + N_0]} \quad (2-2)$$

其中  $\eta$  为干扰信号功率与接收信号功率的比值

$$\eta = \frac{(K-1) + 6K\beta / G_a'}{G_a} \quad (2-3)$$

由于采用理想功控  $P_c = P_0$ , 对式 2-2 进行变形得到

$$CINR = \frac{N}{\nu[\frac{(K-1) + 6K\beta / G_a'}{G_a} + \frac{N_0}{P_c}]} = \frac{N}{\nu[\eta + \frac{N_0}{P_c}]} \quad (2-4)$$

从式 2-4 中我们可以看出, 为保持接收信干比  $CINR$  不变, 随着小区用户数  $K$  的增大, 基站接收到的信号功率  $P_c$  也必须增大。在手机发射信号功率不变的情况下, 只有减少路径损耗即减小基站覆盖距离  $d$ , 才能加大接收信号功率。因而系统用户数的增多会导致小区覆盖距离的减小。

## 3 实例计算

设计一使用智能天线的 CDMA 无线通信系统, 基站处使用  $60^\circ$  定向天线接收,  $G_a = 6$ ; 用户处使用  $120^\circ$  定向天线发送,  $G_a' = 3$ ; 邻区衰减  $\beta = 0.08$ 。当小区用户数  $K = 50$  时, 将以上参数代入式

$$\eta = \frac{(50-1) + 6 \times 50 \times 0.08 / 3}{6} = 9.5$$

2-3 得到。

扩频因子  $N = 128$ , 语音激活因子  $\nu = 0.6$ , 要求接收端信干比  $CINR = 9dB$ , 噪声干扰功率

$N_0 = -98.1dB$ ，代入式 4-26 得到  $10^{0.9} = \frac{128}{0.6 \times (9.5 + \frac{10^{-9.81}}{P_c})}$ 。由此算出接收功率  $P_c = -110.5dB$ 。

手机发射信号功率  $P_t = 23dB$ ，采用 8 阵元智能天线，由式 1-15，接收增益  $G = 10\log(8) = 9dB$ 。由式 1-8，可算出路径损耗  $L_p = 23dB + 9dB - (-110.5dB) = 142.5dB$ 。

采用对数距离路径损耗模型，路径损耗指数  $n = 4$  接近参考距离  $d_0 = 1km$ ，载波频率  $f_c = 1920MHz$ 。首先算出参考路径损耗  $L_p(d_0) = 98.1dB$ 。然后将允许路径损耗  $142.5dB$  代入式 1-9， $142.5 = 98.1 + 40\log(\frac{d}{1000})$ ，得到小区用户  $K = 50$  时基站覆盖范围为  $d = 12.9km$ 。应用同样方法计算  $K = 80$ ， $K = 100$  个用户时基站覆盖范围，列于下表

表 4

用户数 $K$	比值 $\eta$	接收功率 $P_c$	路径损耗 $L_p$	覆盖距离 $d$
50	9.5	$-110.5dB$	$142.5dB$	$d = 12.9km$
80	15.3	$-108.7dB$	$140.7dB$	$d = 11.6km$
100	19.2	$-106.9dB$	$138.9dB$	$d = 10.5km$

当不使用智能天线时，无法提供定向接收增益， $G_a = 1$ ；无法提供理想空间处理增益， $G = 1$ 。此时再次计算  $K = 50$ ， $K = 80$ ， $K = 100$  时系统的覆盖距离，列于下表以供比较

表 5

用户数 $K$	比值 $\eta$	接收功率 $P_c$	路径损耗 $L_p$	覆盖距离 $d$
50	12.2	$-109.8dB$	$132.8dB$	$d = 7.4km$
100	19.6	$-106.7dB$	$129.7dB$	$d = 6.2km$
150	24.5	$-101.8dB$	$124.8dB$	$d = 4.7km$

### 结果讨论

通过以上计算可以看出，当小区用户数  $K$  增加时，CDMA 系统覆盖距离  $d$  会明显减小。初期建网时，因为业务量较小，为节约成本，每个小区拥有较大的覆盖范围，这样使用较少的基站就可以覆盖较大的范围。但随着小区用户数的增多，业务量增大，多址干扰加剧，在基站接收端不足以满足所要求的信噪比，导致通信质量恶化。这时就要考虑到系统优化，主要措施是设立更多的基站，构成更多的小区，使每个小区的覆盖范围减小，以提高信干比。通过上述计算方法，可得到用户数和覆盖距离的关系，明确在某用户量情况下应构成多大覆盖范围的小区，为网络优化提供理论参考依据。这也是以上讨论的实际应用价值所在。

### 参考文献

- [1] 袁超伟. CDMA 蜂窝移动通信. 北京: 北京邮电大学出版社, 2003
- [2] 纪越峰. 现代通信技术. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002
- [3] 万晓楠. CDMA 移动通信网络优化. 北京: 人民邮电出版社, 2003
- [4] 杨大成. 第三代蜂窝移动通信系统. 北京: 北京邮电大学出版社, 2000
- [5] Kyong Il Kim. CDMA 系统设计与优化. 北京: 人民邮电出版社, 2000
- [6] Joseph C. Liberti, Theodore S. Rappaport. 无线通信中的智能天线: IS-95 和第 3 代 CDMA 应用. 计息工业出版社, 2002



## 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](http://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](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、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](http://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>