

自适应天线阵列在码分多址通信系统中的应用

程 荣¹, 赵晓晖², 杨秀华¹, 闫晓明¹

(1. 长春邮电学院图书馆, 吉林 长春 130012)

(2. 长春邮电学院通信工程系, 吉林 长春 130012)

摘要: 将自适应天线阵列应用于 CDM A 移动通信系统中, 可抑制多址干扰的影响, 提高系统的容量。研究了自适应天线阵列的组成及其自适应算法, 并对采用了自适应天线阵列的 CDM A 系统进行了性能分析。理论分析和数值仿真的结果表明, 与使用单一全向天线的系统相比, 基站采用自适应天线阵列, 改善了系统反向链路的性能, 增加了系统的容量。

关键词: 码分多址; 多址干扰; 自适应天线阵列

中图分类号: TN92.5 文献标识码: A

1 引言

码分多址(CDM A)移动通信系统是一个干扰受限系统。这主要是由于所有的用户信道共用一个信息频带, 接收端接收到的信号是多个用户发射信号的组合。当接收到的有用信号功率较弱, 而无用信号功率较强时, 就会出现多址干扰, 这样系统就不可能有效地进行通信, 所以抗多址干扰技术也是 CDMA 的关键技术之一。

将自适应天线阵列用于 CDM A 系统, 是一种有效的抗多址干扰增加容量的新方法。这主要是由于它能够自动感知存在的干扰源, 并能抑制其影响, 增加所需的用户信号。对于 CDM A 移动通信系统, 一般只考虑在基站使用自适应天线阵列。这主要是因为 CDM A 移动通信系统的反向链路是弱链路, 而且不需要同步。并且基站对阵列的功率、体积等没有严格的限制。

2 自适应天线阵列的组成

自适应天线阵列是一个由传感器阵和实时自适应信号处理器组成的系统, 它可以自动调整阵列的方向图, 提高阵列输出的信号噪声干扰比。从空间响应看, 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。自适应天线阵列的功能框图如图 1 所示^[5]。

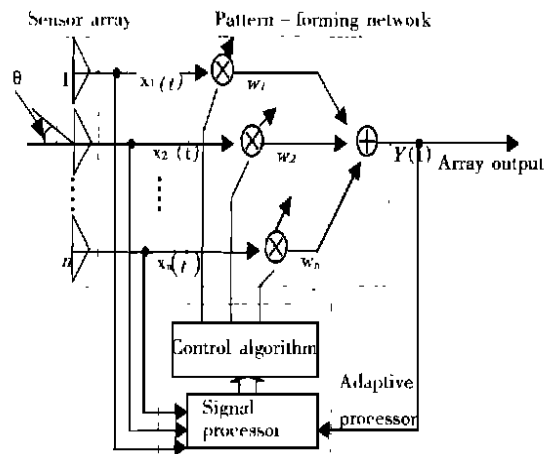


Fig. 1 Functional diagram of N -element adaptive array

图 1 中, 自适应处理器用来调整方向图形成网络中的可变阵元复加权系数 w 。阵列的传感器用于搜索数据, 锁定发射能量的信号源。要达到增强所需信号又抑制干扰信号这两个目标, 系统必须具备这些组成单元。本文只考虑阵元间距恒等为 $\lambda/2$ 的 n 元线性阵, λ 为无线电波的波长。 n 元线性阵有 $n-1$ 个自由度, 可独立地调节 $n-1$ 个阵列波束图的零陷。

假设信号源在阵列的远场, 信号在均匀分布的各向传输媒体中传播, 这样信号是直线传播, 波前到达阵列是平面的。每个阵元接收到的信号分别由期望用户信号和噪声组成:

$$x_i(t) = s_i(t) + n_i(t) \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

阵列的接收到的用户信号向量为

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T = \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (2)$$

阵列输出信号向量为:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{w}^T \mathbf{x}(t) \quad (3)$$

其中, $\mathbf{s}(t)$ 为期望用户向量, $\mathbf{n}(t)$ 为噪声分量, $\mathbf{w}^T = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ 。

3 自适应算法

自适应处理器所面临的问题是用适当的算法调整方向图形成网络中的复加权系数 w , 而使系统性能量度最优化。已知采用的最通用的性能量度包括均方误差、信噪比、输出噪声功率、阵增益等, 以及这些性能量度在加进各种约束条件下的变形。已有的文献分析表明^[2], 各种性能量度都收敛于同一稳态解: 最优维纳解。这些性能量度的最优化问题实际上具有一致性。

适用于 CDMA 基站的自适应算法主要分两类: 一类是根据上述通用的性能量度得到自动调整加权系数的算法, 而不需要判别用户到达的方向。如 LMS 算法、RLS 算法等; 另一类是根据判别所有用户到达阵列的方向来自动调整加权系数, 分别对各个用户实现最佳接收。如 MUSIC 算法、ESPRIT 算法、DMI 算法和 CMA 算法等。

最小均方(LMS)自适应算法^[1]一般用于改变自适应天线阵列的合并权值, 但在移动蜂窝系统中, 在捕获和跟踪问题上它表现出低的收敛速率。递归最小平方算法(RLS)是一种递归算法, 与 LMS 算法相比, 它可达到最满意的失调与收敛速率折衷条件下的最快收敛, 比较适合于蜂窝通信系统。这两种算法都是基于参考信号的方法, 参考信号的提取是其关键问题。参考信号与所需信号的相关性越好, 自适应天线阵列的性能就越好。

直接逆矩阵(DMI direct matrix inversion)算法也需要与用户信号相关的参考信号, 此算法有好的快速收敛速率, 但其计算比较复杂。CMA (constant modulus adaptive) 算法^[5]常用于 TD-MA 蜂窝移动通信系统中, 由于功率控制的限制, 它不适合于 CDMA 蜂窝移动通信系统。

多重信号分类(MUSIC multiple signal classification)算法和借助于旋转不变技术估计信号参数(ESPRIT estimation of signal parameters via rotational invariance techniques)算法是基于信号子空间的分析方法。MUSIC 算法是针对数据矩阵或协方差矩阵的信号子空间方法。ESPRIT 算法^[4]主要是对应于协方差矩阵束的信号子空间方法。MUSIC 算法在计算与存储方面花费相当高, 这主要是由于它需要搜索整个参数空间, 而 ESPRIT 算法不需要搜索整个参数空间, 计算相对简单, 实时性好。ESPRIT 算法的适用条件是阵元数小于用户数, 但在 CDMA 通信系统中, 用户数远大于阵元数。为了将 ESPRIT 算法应用于 CDMA 天线阵列中, 可利用扩频码良好的自相关特性, 用期望用户的 PN 码与阵列的输出相关, 解扩期望用户的信号。解扩后, 就可认为信息数据仅由一个用户信号和噪声组成, 这样就可以使用 ESPRIT 算法来自适应地调整阵列复加权系数, 可得到高分辨率的 DOA 估计, 从而抑制来自于其它方向用户的多址干扰, 提高系统的容量。

4 系统的性能分析

下面分析基站使用自适应天线阵列后 CDMA 系统反向链路的性能。分析时, 我们不仅考虑了本小区用户对期望用户的多址干扰, 也考虑了相邻小区用户对它的多址干扰。由于相邻小区对系统性能的影响最大, 因此在分析中只考虑了单层环绕干扰小区。图 2 为简化的蜂窝小区几何图。从图中可看到, 中心小区 0 受到了 8 个单层环绕小区用户的干扰。

假设在 CDMA 蜂窝移动通信系统中, 每个蜂窝小区的用户数为 d , 中心小区用户 1 为期望用户。自适应天线阵列位于 CDMA 接收机的前端, 采用自适应算法来调整阵列的波束图 $G(\theta)$ 指向用户 1 的方向, 此时阵列的加权矢量为 $\mathbf{W}_1 = [w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1n}]^T$ 。在基站的反向链路中, 中心小区用户 1 不仅受到本小区 $d - 1$ 个用户的多址干扰, 还受到 8 个相邻小区的 $8d$ 个用户的干扰, 阵列输出的期望用户 1 的信号为

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{W}_1^T \mathbf{x}(t) = \mathbf{S}_1(t) + \mathbf{MAI} + \mathbf{n}(t) \quad (4)$$

(4) 式右边第 1 项为期望用户 1 的信号, 第 2 项为本小区和相邻小区用户对期望用户 1 的多用户干扰, 第 3 项为噪声, 与多用户干扰相比, 一般可忽

略不计。

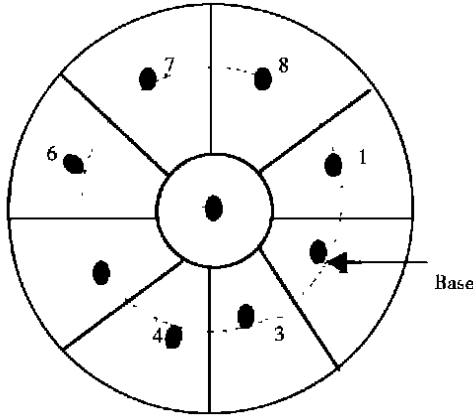


Fig. 2 The cell geometry

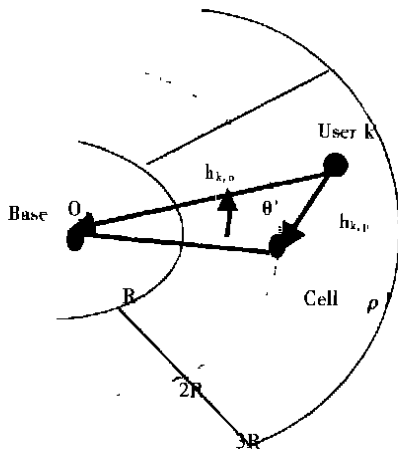


Fig. 3 Geometry for determining the interference of relative cell users

我们用图 3 来分析相邻小区用户对中心小区用户的干扰。图 3 中, 用户 k 为一个相邻小区 ρ 的某一用户, $k = 1, \dots, d, \rho = 1, 2, \dots, 8, k$ 为小区用户数, ρ 为相邻蜂窝小区数。 $h_{k,\rho}$ 是用户 k 与基站 ρ 之间的距离, $h_{k,0}$ 是用户 k 与中心基站 0 之间的距离。

假设各小区所有用户都具有良好的功率控制, 各基站接收到本小区任一用户的功率都为 p_R 。基站 ρ 接收到用户 k 的功率可以表示为^[6]

$$p_{R:\rho} = p_{T:k} \left[\frac{\lambda}{4\pi h_{ref}} \right]^2 \left[\frac{h_{ref}}{h_{k,\rho}} \right]^t \quad (5)$$

t 为路径损耗指数, 一般在 2- 4 之间取值, h_{ref} 是参考距离。

基站 0 接收到小区 ρ 用户 k 的功率为

$$p_{R:\rho} = p_{T:k} \left[\frac{\lambda}{4\pi h_{ref}} \right]^2 \left[\frac{h_{ref}}{h_{k,0}} \right]^t \quad (6)$$

则由(5)式和(6)式可得

$$p_{R:\rho} = p_R \left[\frac{h_{k,\rho}}{h_{k,0}} \right]^t \quad (7)$$

图 3 中, 利用余弦定理可得

$$h_{k,\rho}^2 = (2R)^2 + (h_{k,0})^2 - 2(2R h_{k,0}) \cos\theta \quad (8)$$

把(8)式代入(7)式, 则基站 0 接收到用户 k 的功率为

$$p_{R:\rho} = p_R \left[1 + \left(\frac{2R}{h_{k,0}} \right)^2 - \frac{4R}{h_{k,0}} \cos\theta \right]^{t/2} \quad (9)$$

假设每个相邻小区用户是均匀分布的, 其用户空间分布概率密度函数为

$$f(r, \theta) = \frac{r}{\pi R^2}$$

$$R < r < 3R, \quad \pi/8 < \theta < 7\pi/8 \quad (10)$$

基站使用全向天线时, \hat{p} 表示来自于一个相邻小区单一干扰用户功率的期望值

$$\hat{p}_{R:\rho} = p_R \int_{\pi/8}^{7\pi/8} \int_R^{3R} f(r, \theta) \cdot$$

$$\left[1 + \left(\frac{2R}{r} \right)^2 - \frac{4R}{r} \cos\theta \right]^{t/2} dr d\theta = \gamma p_R \quad (11)$$

这里, γ 为与 t 有关的路径损耗函数, 当 $t = 4$ 时, $\gamma = 0.05513$ 。

$$\gamma = \int_{\pi/8}^{7\pi/8} \int_R^{3R} f(r, \theta) \cdot$$

$$\left[1 + \left(\frac{2R}{r} \right)^2 - \frac{4R}{r} \cos\theta \right]^{t/2} dr d\theta \quad (12)$$

由于中心基站天线阵列的波束图 $G(\theta)$ 在中心小区用户 1 的入射方向上有最大增益, 利用(10)式, 中心小区单一用户对期望用户 1 平均干扰功率为

$$E[p_{R:0} | 0 < r < R] = p_R \int_0^{2\pi} \int_0^R f(r, \theta) G(\theta) dr d\theta =$$

$$\frac{p_R}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} G(\theta) r dr d\theta = \frac{p_R}{D} \quad (13)$$

其中 D 是波束图 $G(\theta)$ 的波束方向性,

$$D = \frac{2\pi}{\int_0^{2\pi} G(\theta) d\theta}$$

由(10)、(11)式可得一个相邻小区用户对中心基站天线阵列的平均干扰功率为

$$E[p_{R:\rho} | R < r < 3R] = \frac{1}{8} \int_{\pi/8}^{7\pi/8} \int_R^{3R} p_R \left[1 + \left(\frac{2R}{r} \right)^2 - \frac{4R}{r} \cos\theta \right]^{t/2} G(\theta + \frac{\rho\pi}{4}) \cdot \frac{r}{\pi R^2} dr d\theta \quad (14)$$

考虑一个特殊情况, 如果 $G(\theta)$ 在区域 $(2\rho - 1)(\pi/8) < \theta < (2\rho + 1)(\pi/8)$ 内是分段常数, $\rho = 1, \dots, 8$, 方向图可以表示为

$$G(\theta) = \sum_{\rho=1}^8 G_\rho U(\theta - \frac{\rho\pi}{4}) \quad (15)$$

其中, $U(\theta) = \begin{cases} 1, & |\theta| < \pi/8 \\ 0, & |\theta| \geq \pi/8 \end{cases}$ 。这种情况虽然有一

定的偏差, 但能简化分析结果。当用户数远大于阵元数时, 这种简化是近似合理的。把(15)式代入(14)式得

$$E[p_{R,r} | R < r < 3R] = \frac{P_R}{8} \frac{G_\rho}{\rho=1} \frac{3R}{R} \frac{\pi^8}{\pi R^2} \frac{r}{\pi R^2} \cdot [1 + \left(\frac{2R}{r}\right) - \frac{4R}{r} \cos(\theta)]^{1/2} dr d\theta \quad (16)$$

令 $D = \frac{8}{G_\rho}$, 则一个相邻小区用户对中心基站

天线阵列的平均干扰功率为

$$E[p_{R,r} | R < r < 3R] = \frac{p_{R,Y}}{D} \quad (17)$$

中心基站天线阵列接收到的总平均干扰功率为

$$p_{MAI} = \frac{dp_R + 8(d-1)p_{R,Y}}{D} \quad (18)$$

由于阵列接收到期望用户 1 的功率为 p_R , 则 SINR 为

$$SINR = \frac{D}{d + 8(d-1)\beta} \quad (19)$$

可得系统的平均误码率

$$P_e = Q\left[\frac{3ND}{d(1+8\beta) - 1}\right] \quad (20)$$

N 为系统的处理增益, 当 $d \gg 1$ 时, P_e 近似为

$$P_e = Q\left[\frac{3ND}{d(1+8\beta)}\right] \quad (21)$$

5 数值分析

为证明自适应天线阵列对 CDMA 移动通信系统反向链路性能的改进, 在假设系统有良好的功率控制下, 给出计算机数值仿真结果。

假设系统中每一个用户的数据传输率为 $9600b/s$, 传输带宽为 $W = 1.25 \text{ MHz}$ 。每一个用户给定一个扩频序列, 此序列是码长为 127 的 m 序列, 处理增益 $N = 127$ 。当路径损耗系数 $t = 4$ 时, $\beta = 0.05513$ 。

首先验证阵列的定向性, 用一个四元均匀分布线性阵接收信号。假设中心小区有六个用户, 用户 1 为期望用户, 其入射角为 0° ; 其它用户分别以不同的角度到达阵列。图 4 为自适应天线阵列波束方向图。从图中可看到, 阵列的主波束对准用户 1 到达的方向, 在其它方向上形成零陷或保持较低功率增益, 从而抑制其它用户的干扰。

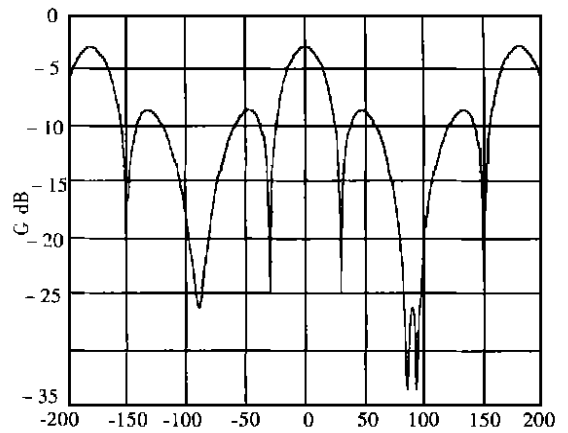


Fig. 4 Four-element array pattern

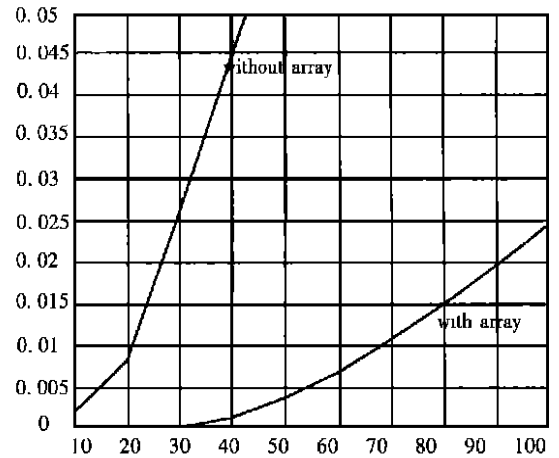


Fig. 5 Average error probability

图 5 为单一全向天线 CDMA 移动通信系统和四元天线阵列 CDMA 系统基站反向链路的平均误码率与用户数的关系曲线图。若每个小区有均匀分布的 10 个用户, 则中心小区期望用户信号受到本小区的 9 个用户和相邻小区的 80 个用户的多址干扰。从图 5 中可看到四元天线阵列的使用, 不仅降低了系统的误码率, 而且提高了系统反向链路的容量。在 $P_e = 10^{-2}$ 处, 单一全向天线系统的用户数为 20 多个, 而四元天线阵列系统所容纳的用户数达到 60 多个。

6 结 论

从理论分析和数值分析的结果来看, 将自适应天线阵列应用于 CDMA 系统, 可大大改善系统反向链路的性能, 增加系统的容量, 是一种抑制多址干扰的有效方法。如果考虑语音纠错编码及分扇区等因素, 系统的容量还会有所提高。

参考文献:

- [1] 胡健栋,等. 码分多址与个人通信[M]. 北京:人民邮电出版社, 1995.
- [2] 普罗基斯约翰 G. 数字通信[M]. 北京:电子工业出版社, 1988.
- [3] Liberti Joseph C, et al. Analytical result for capacity improvements in CDMA[J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 1994, 43(3): 680- 690.
- [4] Zolowski Michael D, Stavrinides Demosthenis. Sensor array signal processing via a procrustes rotations based eigenanalysis of the ESPRIT data pencil[J]. IEEE Trans. Acous., Speech, Signal Processing, 1989, 37(6): 832- 861.
- [5] Monzingo Robert A, Miller Thmos W. Introduction to Adaptive Arrays[M]. New York: Wiley, 1980.
- [6] Rappaport T S, Milstein L B. Effects of radio propagation path loss on DS- CDMA cellular frequency reuse efficiency for the reverse channel[J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 1992, 41(3): 231- 242.
- [7] Wang Yi Ping, Cruz J R. Adaptive antenna arrays for cellular CDMA communication systems[J]. IEEE Proc. Internat. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1995, 3: 1725- 1728.

Application of adaptive antenna arrays in CDMA cellular system

CHENG Rong¹, ZHAO Xiao-hui², YANG Xiu-hua¹, YAN Xiao-ming¹

(1. Library of Changchun Post and Telecomm. Inst., Changchun 130012, China;

2. Dept. of Commun. Eng., Changchun Post and Telecommun. Inst., Changchun 130012, China)

Abstract: The use of adaptive antenna arrays in code division multiple access cellular communication system at base station is presented since the arrays have the ability to suppress the interference of multiple access and increase the capacity of the cellular system. The composition and adaptive algorithms of the arrays are studied. The performance of the proposed system is analyzed. Both theoretical analysis and numerical simulation results demonstrate that using the adaptive antenna arrays at base station, the performance of the system is improved and its capacity is increased comparing with those of the omnidirectional antenna system.

Key words: code division multiple access; multiple access interference; adaptive antenna arrays

作者简介:程荣(1970-),女,山西太谷人,1992年毕业于长春邮电学院通信工程系。1999年获得吉林工业大学通信与信息系统专业工学硕士学位。主要研究方向为移动通信和通信网。