

文章编号 1005-0388(2003)06-0683-04

软件天线中的环境分类与识别^{*}

谭萍 漆兰芬

(华中科技大学 电子与信息工程系 tan_ping@163.com, 湖北 武汉 430074)

摘要 在智能天线技术的基础上,近期提出了一种新型的天线——软件天线。它能根据所处的环境选择合适的波束形成算法,动态地调整波束形状。实现软件天线的关键技术之一是环境的分类与识别。结合 CDMA 系统讨论了环境的分类以及环境识别的准则,提出了一种空间平滑的方法来实现环境的识别。模拟计算结果表明,该方法是一种较为有效的方法。

关键词 自适应天线阵列,软件天线,环境识别,环境分类

中图分类号 TN929.5 文献标识码 B

Classification and identification of radio environments in software antenna

TAN Ping QI Lan-fen

(Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University
of Science and Technology, tan_ping@163.com, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract Based on the smart antenna technology, a new concept of software antenna has been proposed recently. It can recognize the status of the radio environments and appropriately select an algorithm to dynamically reconfigure itself by the recognized environment. One of the key technologies to realize software antenna is the classification and identification of the radio environments. In this paper, we discuss the categorization of the radio environments and the criteria of identification in CDMA systems. Finally a spatial smoothing method to realize the identification of radio environment is proposed. Simulations have been conducted which demonstrated the effectiveness of this approach.

Key words adaptive antenna array, software antenna, environment identification, environment classification

1 引言

随着移动通信技术的发展,智能天线技术的研究引起了广泛的关注,目前已经涌现出多种自适应波束形成算法。但是各种算法都具有其自身的特点和适用条件,算法性能受应用环境的影响非常大,很难找到一种自适应波束形成算法既能够在各种环境下都具有很好的抗干扰性能同时又能够快速收敛且计算复杂度低。如果能够对复杂的通信环境进行分

类识别,并且根据所处的环境类别从预先构建的波束形成算法数据库中选择一种合适的算法进行处理,就可能使通信系统在各种环境下都保持最佳性能。这种基于智能天线技术的新型天线被称为软件天线^[1,2]。实现软件天线的关键之一在于如何确定环境分类的标准以及如何实时、准确地识别环境的类型。本文将具体结合 CDMA 系统讨论软件天线的环境分类与识别方法。

2 环境的分类

软件天线中对环境分类的目的是选择合适的自适应波束形成算法,因此对环境分类时需要考虑环境对信号的影响以及自适应波束形成算法对这些影响的消除作用。

信号与周围环境的相互作用十分复杂,有大物体的反射、电磁波绕物体的绕射和信号散射等。这些复杂作用导致了信号往往会沿一些不同的路径到达接收机,这一现象称为信号的多径传播,即多径信号的产生。由于信号经过不同路径会有不同的时延,如果时延差较大,就可能引起码间干扰 (ISI)。此外,周围环境中的其他发射机发射的信号也会对信号构成同道干扰 (CCI),特别是在 CDMA 系统中即使是在同一个小区内也可能存在多个干扰用户。由以上分析可知,移动无线环境对信号的影响主要表现在是否有同道干扰,是否有多径信号以及是否存在时延扩展较大的多径信号引起的码间干扰。

自适应波束形成算法能够控制天线的接收方向,使天线波束指向有用信号而将“零点”对准干扰信号方向。当多径信号间的时延差较小时,不会引起码间干扰,可以通过合并多径分量来增强信号。如果存在多径信号且时延差较大时,可能引起码间干扰,一些自适应波束形成算法使波束指向功率较大的多径分量,而将其他功率较小的多径分量作为干扰信号加以“零点”抑制,这样处理简单但是多径分量没有得到很好利用。CDMA 系统中传统的 RAKE 接收机能够将时延差较大的多径信号合理地合并再利用,而 CDMA 系统中的 2D-RAKE 接收机甚至能对每一个多径分量方向都形成一个波束,但计算很复杂。为了选择合适的自适应波束形成算法克服不同环境对信号的不同影响,可以将环境分成以下几类:

1) 只有单个期望信号,实际上这是一种理想情况;

2) 既有期望信号又有干扰信号,但是不考虑多径效应;

3) 既有期望信号又有干扰信号,但是存在由多径效应引起的时延扩展较小的多径信号;

4) 既有期望信号又有干扰信号,但是存在由多径效应引起的时延扩展较大的多径信号。

3 环境的识别

为了快速准确地识别环境类型,需要从天线阵列所获取的信号中提取合适的特征信息来确定环境

的类别。对于 CDMA 系统,由于不同用户采用正交的 PN 码,干扰信号和期望信号之间表现为几乎不相关。对于多径传播引起的多径信号,当相对时延差较小时,可认为各多径信号之间仍然是相关的。当相对时延差超过一个码片周期时,多径信号之间实际上可被看作是互不相关的。如果将相关的信号构成一个相关群组,这样干扰信号和期望信号可以看作是属于不同的相关群组。而相对时延差较大的多径信号也可以独立构成与期望信号不同的相关群组。因此如果可以获得接收信号的相关结构,如有多少个信号组成,其中相关群组有几组,每组有多少相关信号,就可以用来识别环境的不同类型。

假设天线阵列接收信号为:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}(\theta) \mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (1)$$

其阵列协方差为:

$$\mathbf{R} = \mathbf{A}(\theta) \mathbf{R}_s \mathbf{A}^H(\theta) + \sigma_n^2 \mathbf{I} \quad (2)$$

其中 $\mathbf{A}(\theta)$ 是方向矩阵, $\mathbf{S}(t)$ 是信号矢量, $\mathbf{N}(t)$ 是阵列噪声矢量, $\mathbf{R}_s = E\{\mathbf{S}\mathbf{S}^H\}$ 是信号协方差矩阵, σ_n^2 为阵列单元噪声方差, \mathbf{I} 为 $N \times N$ 单位矩阵, N 为阵列的阵元个数, $(\cdot)^H$ 表示共轭转置。

若入射信号 \mathbf{S} 是由 K 个独立信号源组成,则 \mathbf{R}_s 的秩 $\text{rank}\{\mathbf{R}_s\} = K$,对 \mathbf{R} 进行特征分解就可得到 K 个比较大的特征值和 $N - K$ 个等于 σ_n^2 的特征值, K 个较大特征值对应的特征矢量展成一个信号子空间,此时根据最大的特征值个数就可以判断独立信号源个数为 $K^{[2]}$ 。但如果 K 个信号源中有某些信号是完全相关的,则到达阵列的独立信号源个数将小于 K ,这样信号协方差的秩 $\text{rank}\{\mathbf{R}_s\} < K$,对 \mathbf{R} 进行特征分解后得到的较大特征值个数将小于 K ,而特征值为 σ_n^2 的个数将大于 $N - K$ 。可见相关信号进入阵列将使阵列协方差矩阵的信号子空间的矢量减少。但若两个相关信号同时进入两个不同的阵列,那么这两个阵列协方差矩阵之和的信号子空间的矢量就可能不减少,这种处理称之为空间平滑处理,具有去相关的特性。如果对阵列协方差矩阵逐步降维去相关,通过使相关信号逐渐变换为独立信号源的过程,就可能获得接收信号的相关结构,实现环境识别。

将整个阵列分成若干个子阵列,每个子阵列的阵元数为 m 。每个子阵列从左逐步向右移,如图 1 所示:

第 l 个子阵列的输出矢量为

$$\mathbf{X}_l^{(m)} = [x_l \ x_{l+1} \ \dots \ x_{l+m-1}]^T \quad (3)$$

第 l 个子阵列的协方差矩阵

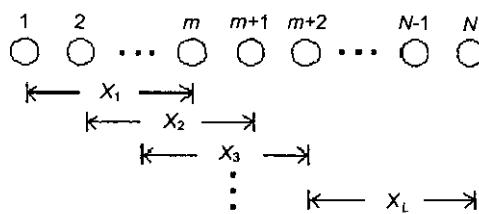


图1 子阵列的选取

$$\mathbf{R}_l^{(m)} = \mathbb{E}\{\mathbf{X}_l^{(m)} \mathbf{X}_l^{(m)H}\} \quad (4)$$

取所有子阵列的协方差的平均值,即:

$$\mathbf{R}^{(m)} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{R}_l^{(m)}, m = N, N-1, \dots, 1 \quad (5)$$

若空间有 K 个信号源,他们组成两组相互独立的相关群组,源数分别为 J_1 和 J_2 ,若阵元数 $N > K + \max(J_1, J_2)$,则经过一次前向平滑后可将信号分成两个独立信号源和两组相干源,其相干源的数目分别为 $J_1 - 1$ 和 $J_2 - 1$ ^[3~5]。逐步减小子阵列个数 m ,每一次平滑后都可以使每个相关群组中再分离出一个独立源,因此相应的秩也在变化,由此可计算出一系列的秩并构成一个秩序列 $\{\text{rank}(\mathbf{R}_s^{(k)})\}, k = 0, 1, \dots, N-1$ 。实际上得不到 \mathbf{R}_s ,只能从取样数据中获得取样协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}$,相应子阵列的取样协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}^{(k)} = \hat{\mathbf{R}}_s^{(k)} + \sigma_n^2 \mathbf{I}$ 通过估计 $\hat{\mathbf{R}}^{(k)}$ 的信号子空间维数可得到 $\mathbf{R}_s^{(k)}$ 的秩。

假设一个相关群组中含 i 个相关信号的组数为 g_i ,当 $\text{rank}(\hat{\mathbf{R}}_s^{i-1}) < \text{rank}(\hat{\mathbf{R}}_s^i)$ 时 $g_i = 2\text{rank}(\hat{\mathbf{R}}_s^{i-1}) - \text{rank}(\hat{\mathbf{R}}_s^i) - \text{rank}(\hat{\mathbf{R}}_s^{i-2})$

否则 $g_i = 0$ (6)

$$\text{总的信号数为 } K = \sum_i i g_i \quad (7)$$

$$\text{总的相关群组数为 } Q = \sum_i g_i \quad (8)$$

4 数值模拟

这里结合 DS-CDMA 系统进行模拟和分析。假设天线阵列为均匀直线阵,阵元个数 $N = 8$,阵元间隔 $d = \lambda/2$, λ 为波长。

首先不考虑多径现象,假设用户数 K 分别为 1、3、5、7 的情况,相应干扰数 K_1 为 0、2、4、6,期望信号数 $K_2 = 1$,可得到相应的秩序列如图 2 所示,根据公式(6)~(8)可得到相关结构参数如表 1 所示。

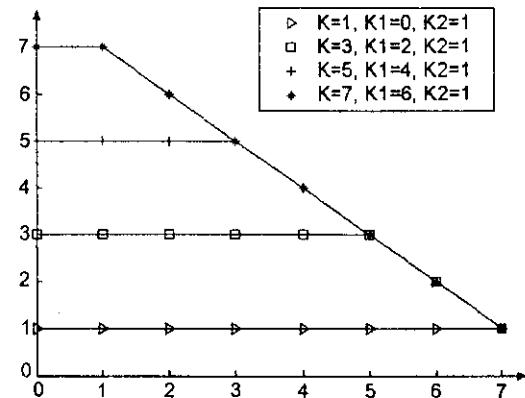


图2 不同干扰用户数对应的秩序列

表1 不考虑多径现象时,不同干扰个数
对应的相关结构参数的计算结果

K_1	秩序列	g_i	K	Q
0	{1 1 1 1 1 1 1 1}	$g_1 = 1$	1	1
2	{3 3 3 3 3 3 2 1}	$g_1 = 3$	3	3
4	{5 5 5 5 4 3 2 1}	$g_1 = 5$	5	5
6	{7 7 6 5 4 3 2 1}	$g_1 = 7$	7	7

进一步考虑多径现象,为简单起见,不考虑干扰信号的多径传播。假设有 $K_1 = 2$ 个独立的干扰信号且期望信号存在 $K_2 = 3$ 个多径信号。相对时延差分别为 $0.1T_c$ (T_c 为码片周期) 和 $1.5T_c$ 时,得到相应的秩序列如图 3 所示,根据公式(6)~(8)可得到相关结构参数如表 2 所示。

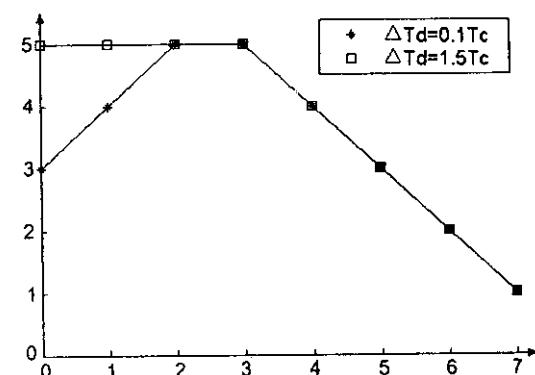


图3 不同相对时延差对应的秩序列

表2 考虑多径现象时,不同相对时延差对应
的相关结构参数的计算结果

ΔTd	秩序列	g_i	K	Q
$0.1T_c$	{3 4 5 5 4 3 2 1}	$g_1 = 2, g_3 = 1$	5	3
$1.5T_c$	{5 5 5 5 4 3 2 1}	$g_1 = 5$	5	5

根据计算结果分析可知：

1) 不考虑多径效应

- 如果只有一个期望信号, 对应类型 1, 其相关结构的特点是 $g_1 = 1$, 且 $i \neq 1$ 时 $g_i = 0$ 。秩序列中秩的值保持不变, 始终为 1。

- 如果除了期望信号外还有 K_1 个干扰信号, 对应类型 2。因为期望信号与干扰信号不相关, 表现为有多个独立源, 其相关结构的特点是 $g_1 = K = 1 + K_1$, 且 $i \neq 1$ 时 $g_i = 0$ 。秩序列中秩的值开始保持不变, 后因独立信号个数大于子阵列的维数, 秩的值将随子阵列阵元个数的减小而减小。

2) 考虑多径效应

假设期望信号有 K_1 条路径, 干扰信号有 K_2 个, 不考虑干扰信号的多径情况

- 如果期望信号的各多径信号的时延相差不大, 各多径信号之间是相关的, 构成一个独立于干扰信号的群组, 对应类型 3。其相关结构的特点是 $g_1 = 1 + K_1$, 且 $g_{K_2} = 1$ 。由于空间平滑的去相关作用, 秩序列中秩的值先增加, 直到相关信号全部去相关, 秩序列的中间阶段可能保持不变, 然后逐渐减小为 1。

- 如果期望信号的各多径信号的时延相差较大, 各多径信号之间是不相关的, 表现为有多个独立信号, 对应类型 4。其相关结构的特点是 $g_1 = K = K_1 + K_2$, 且 $i \neq 1$ 时 $g_i = 0$ 。由于信号间不相关, 因此秩序列中没有秩的值增加的过程, 开始阶段秩序列中秩的值保持不变, 然后逐渐减小为 1。

根据式(6)可知, 当 $\text{rank}(\hat{\mathbf{R}}_s^{i-1}) \geq \text{rank}(\hat{\mathbf{R}}_s^i)$ 时, $g_i = 0$ 。考虑到实时的需要, 为了减少运算量, 当秩序列不再增加时, 即可停止计算秩序列。以表 2 所示的考虑多径现象的情况为例, 当 $\Delta Td = 0.1\text{Tc}$ 时, 实际上只需要计算秩序列的前 4 个值, 而 $\Delta Td = 0.1\text{Tc}$ 时, 只需要计算前 2 个值。

5 结论

本文针对无线移动通信环境的特点, 根据波束形成的需求, 对无线通信环境进行了分类, 并且根据环境分类所需要提取的特征量, 提出了一种采用空间平滑技术来识别环境的方法。并以均匀直线阵为例, 结合 CDMA 系统对几种假设的情况进行了模拟计算和讨论。

空间平滑技术使相干源变换为独立源是以牺牲有效阵元为代价的, 为了尽量减少牺牲阵元, 可采用前后向组合的平滑技术。

实际中常用的阵列结构除均匀直线阵外, 有时也使用圆阵。但空间平滑技术不能直接应用于圆阵, 需要通过利用预处理技术将阵元空间的均匀圆阵转化为模式空间的虚拟均匀线阵, 然后在此线阵的基础上, 再利用空间平滑技术进行环境识别。

实现软件天线的环境分类与识别方法还有待进一步的研究与探索。

参考文献

- [1] KOHNO R. Structures and theories of software antennas for software defined radio [J]. IEICE Trans. Comm., 2000, E83-B(6):1229~1235.
- [2] KAMIYA Y, KARASAWA Y and DENNO S, et al. A software antenna: Reconfigurable adaptive arrays based on eigenvalue decomposition [J]. IEICE Trans. Comm., 1999, E82-B(12):2012~2020.
- [3] COZZENS J H, SOUSA M J. Source enumeration in a correlated signal environment [J]. IEEE Trans, SP, 1994, 42(2):304~317.
- [4] SHAN T J, WAX M and KAILATH T. Spatial smoothing approach for location estimate of coherent source [A]. Proc. 17th Asilomar conf. Circuits, Systems and Computers [C]. 1983, 367~371.
- [5] 蒋泽、杜惠平等. 面向新一代移动通信的智能天线技术 [J]. 电波科学学报 2001, 16(3):342~347.



谭萍 (1974-), 女, 湖南人, 华中科技大学电子与信息工程系在读博士研究生, 研究方向主要为智能天线、自适应信号处理及移动通信系统中信道特性的研究。



漆兰芬 (1936-), 女, 江西人, 华中科技大学电子与信息工程系教授, 博士生导师, 主要从事电磁场与微波技术、智能天线、电磁兼容等方面的研究。

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>