

软件天线系统中的一种环境识别方法

谭萍，漆兰芬

(华中科技大学 电子与信息工程系, 武汉 430074)

摘要：不同于智能天线，软件天线能够识别所处的电磁环境，并根据所处的环境选择合适的算法，动态地调整波束形状。实现软件天线的关键技术之一就是环境的分类与识别。本文首先结合CDMA系统讨论了环境的分类以及环境识别的准则，并提出了一种基于空间平滑的方法来实现环境的识别。最后给出了几种假设条件下相应的数值模拟结果。

关键词：自适应天线阵列；智能天线；软件天线；环境识别；空间平滑

中图分类号：TN929.5

文献标识码：B

文章编号：1000-436X(2004)06-0089-06

A strategy of radio environments indentifications in software antenna systems

TAN Ping, QI Lan-fen

(Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Different from smart antenna, software antenna 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, and a spatial smoothing method to realize the identification of radio environment is proposed. Finally, computer simulations under different conditions are demonstrated.

Key words: adaptive antenna array; smart antenna; software antenna; environment identification; spatial smoothing

1 引言

软件天线不同于智能天线，它能对变化的通信环境进行识别，并根据所处的电磁环境从预先构建的波束形成算法数据库中选择合适的算法，动态地调整波束形状，它是一种基于环境识别并具备算法分集特性的数字波束成形天线。实现软件天线首先需要解决环境分类识别的问题，本文结合CDMA系统具体讨论了一种基于空间平滑技术的环境分类识别的方法。

2 环境的分类

无线通信的传播环境非常复杂性，在环境的分类识别中需要将具有某些相类似性质的传

收稿日期：2002-11-11；修订日期：2004-01-14

基金项目：国家自然科学基金资助项目（60171013）；华为科技基金资助项目

播环境进行归纳分类，具体的类型是由特定的应用目的所决定的。在软件天线系统中，环境分类的目的是确定一种合适的信号处理算法，因此本文从环境对信号影响的角度考虑环境的分类。

无线移动信道对数字信号的影响主要表现在两个方面：一为信道的噪声和干扰；二为信道的多径效应。

噪声是任何通信系统中都会遇到的，但是就移动通信环境的特点而言，干扰影响大于噪声影响，而同频干扰是限制系统性能的主要因素。特别是在 CDMA 系统中存在着远近效应和多址干扰情况，即使是在同一个小区内也可能存在多个干扰用户。

另外由于无线环境的复杂性，一个通过无线信道传播的信号往往会沿一些不同的路径到达接收端，这一现象称为信号的多径传播。由于信号经过不同路径会有不同的时延，如果时延差较大时，就可能引起类似于 TDMA 系统中码间干扰（ISI）的径间干扰。但多径信号中也含有可以利用的有用信息，如果时延差较小时，可以通过合并多径信号来改善接收信号的信噪比。

综合以上分析可知，无线信道对信号的影响主要表现在是否有干扰信号，是否有多径信号，是否有较大时延的多径信号引起的径间干扰。为了在自适应信号处理中有针对性地采取不同的算法进行自适应处理，可以将环境分成以下几类情形：

- 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时延扩展较大的多径信号，也可能存在时延扩展较小的多径信号。实际上前三类都是这一情形的特例。

根据决策论的方法，模式的分类是基于从输入模式中提取出一组预先选择好的特征。因此首先必须解决需要提出什么特征；其次是如何提取特征。为了识别信号传播环境，天线阵列必须快速获取和处理空间信息，从中提取适当的特征量来识别不同的环境。对于 CDMA 系统，由于采用正交的 PN 码，干扰信号和期望信号之间表现为几乎不相关。而对于多径引起的信号，相对时延扩展较小时，可认为各多径信号之间是仍然是相关的。当传播时延超过一个码片周期时，多径信号实际上可被看作是互不相关的。这样干扰信号和期望信号同各自的多径信号可以看作是不相关的群组。而相对时延扩展较大的多径信号相对也可以独立成与期望信号不相关的群组。因此可以通过获得相关源的相关结构，如估计源数是多少，其中相关源有几组，每组有多少相关源数等特征来识别不同的环境类型。

3 环境的识别

所能获得的信息是阵列信号 X 或其阵列协方差矩阵 R_{XX} ，因此对环境识别的依据就是基于对空间阵列协方差矩阵特性的分析。

考虑有 N 个任意配置的感应器，有 K 个窄带信号进入阵列，则阵列感应信号为

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

其中， $A(\theta)$ 是 $N \times K$ 阶方向矩阵， $A(\theta) = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_K)]$ ；

$S(t)$ 是 $K \times 1$ 维信号矢量， $S(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_K(t)]^T$ ；

$N(t)$ 是 $N \times 1$ 维阵列噪声矢量， $N(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_N(t)]^T$

则阵列协方差矩阵为

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

式中 \mathbf{R}_s 是信号协方差矩阵 $\mathbf{R}_s = \mathbb{E}\{\mathbf{SS}^H\}$, σ_n^2 为阵列单元噪声方差, \mathbf{I} 为 $N \times N$ 维单位矩阵, H 表示共轭转置。若 S 是由 K 个独立源组成, 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, 而 $N - K$ 个较小特征值对应的特征矢量构成噪声子空间, 此时根据最大的特征值个数就可以判断源数 K ^[2]。

但如果 K 个信号源中有某些源是完全相关, 相关的几个信号就可合并成一个信号, 到达阵列的独立源个数将减少, 这样信号协方差的秩 $\text{rank}(\mathbf{R}_s) < K$, 对 \mathbf{R} 特征分解后得到较大的特征值个数小于 K , 而特征值为 σ_n^2 的个数将大于 $N - K$ 。因此简单地用矩阵特征分解很难判断信号的源数。

两个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。这种空间平滑可以去相干, 因此为了较详细地对信号相关结构进行估计, 可采用空间平滑技术对阵列协方差矩阵逐步降维去相关的方法, 通过使相干源逐渐变换为独立源的过程来获得所需的信息。

将整个阵列分成 L 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

每个子阵列的输出矢量分别为

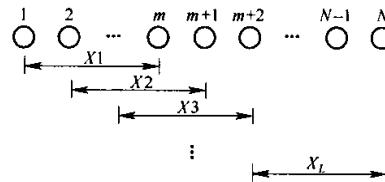


图 1 子阵列的选取

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{X}_1^{(m)} = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T \\ \vdots \\ \mathbf{X}_l^{(m)} = [x_2, x_3, \dots, x_{m+1}]^T \\ \vdots \\ \mathbf{X}_L^{(m)} = [x_L, x_{L+1}, \dots, x_{m+L-1}]^T \end{array} \right\} \quad (3)$$

第 l 个子阵列的协方差矩阵

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

我们取所有子阵列的协方差的平均值, 即

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

$\mathbf{R}^{(m)}$ 是前向空间平滑的阵列协方差矩阵。在前向空间平滑去相关的方法中, 每增加一个子阵列, 就可能从相干源中多分离出一个独立信号。增加子阵列个数, 可以分离出更多的独立信号。如果要将 J 个相关信号全部分离, 则需要将原阵列分成 J 个子阵列, 相应子阵列的阵元个数减少为 $N - J$ 。假设空间有 K 个信号源, 他们组成两组相互独立的相干源组, 其源

数分别为 J_1 和 J_2 , 经过一次前向平滑后可将信号分成两个独立源和两组相干源, 其相干源的数目分别为 J_1-1 和 J_2-1 ^[3,4]。如果要将所有相干源分离成独立源, 则要求阵元数 $N > K + \max(J_1, J_2)$ 。因此, 如果逐步增加子阵列的个数 m , 计算对应平滑矩阵的秩, 由此可得到一系列的秩并构成一个秩序列, 根据秩序列的变化规律就可以判断出信号的个数以及相关组群的结构。

计算的步骤归纳如下:

1) 设信号协方差矩阵 \mathbf{R}_S 是 $N \times N$ 维矩阵, k 是正整数, 定义一个 $(N-k) \times N$ 的矩阵 $\mathbf{I}_{N-k,j}$, $\mathbf{I}_{N-k,j} = [0, \dots, 0, I_{N-k}, 0, \dots, 0]$, 它的前 j 列和后 $k-j$ 列为 $(N-k) \times 1$ 的零矢量, 其中 I_{N-k} 为 $(N-k) \times (N-k)$ 的单位矩阵。用矩阵 $\mathbf{I}_{N-k,j}$ 将 \mathbf{R}_S 分成交叉重叠的矩阵后再平滑, 即

$$\mathbf{R}_S^{(k)} = \frac{1}{k+1} \sum_{i=0}^k \mathbf{I}_{N-k,i} \mathbf{R}_S \mathbf{I}_{N-k,i}^T, \quad k=1, 2, \dots, N-1 \quad (6)$$

2) 计算秩序列 $\text{rank}\{\mathbf{R}_S^{(k)}\}$, $k=1, 2, \dots, N-1$ 。根据秩序列判断出信号的个数以及相关组群的结构。

实际上我们得不到 \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 $\hat{\mathbf{R}}^{(k)} = \hat{\mathbf{R}}_S^k + \sigma_n^2 \mathbf{I}$, 而 $\hat{\mathbf{R}}^{(k)}$ 的信号子空间维数就是 $\hat{\mathbf{R}}^{(k)}$ 的秩。

4 数值模拟

这里结合阵列天线最简单的一种情况均匀直线阵进行推导和分析。假设阵列为线性均匀阵列, 阵元个数 $N=8$, 阵元间隔 $d=\lambda/2$ 。对于有 K 个用户的同步 CDMA 系统, 它们的信号分别从不同的方向到达接收机, 第 i 个用户信号的信息码为 $b_i(t)$, 码元间隔为 T_b , 相应的地址码为 $S_i(t)$, 码片间隔(chip)为 T_s , 扩频增益为 G , 接收到信号的功率为 P_i 。由于发射载波远远大于信息带宽, 所以信号可按窄带信号处理。因此, 对于全向阵元组成的直线阵, 第 m 个阵元接收到的信号可以表示为

$$X_m(t) = \sum_{i=1}^K \sqrt{P_i} b_i(t) S_i(t) \exp[j\beta(m-1)d \cos\theta_i] \exp(j\omega_c t) + n(t) \quad (7)$$

根据如表 1 所假设的几种情况模拟产生相应的信号, 再根据前述方法可计算得到相应的秩序列及其相关源的结构如表 2 所示, 其中 g_i 表示有 i 个源组成的相关群的个数。

表 1

几种假设的环境

	期望信号	干扰信号
A	有, 入射角为 0°	无
B	有, 入射角为 0°	有, 入射角为 40°
C	有, 入射角为 $(-40^\circ, 0^\circ, 30^\circ)$	有, 入射角为 $(50^\circ, 70^\circ)$
D	有, 入射角为 $(-40^\circ, 0^\circ, 30^\circ)$ 入射角为 $-40^\circ, 30^\circ$ 的相对时延较大	有, 入射角为 $(50^\circ, 70^\circ)$

表 2

根据假设模拟的数据计算所得到的相应信号个数和相关结构

	秩序列	总源数 K	相关群数 Q	相关源结构
A	11111111	1	1	$g1=1$
B	22222221	2	2	$g1=2$
C	34554321	5	3	$g1=2, g3=1$
D	55554321	5	5	$g1=5$

根据所获得的秩序列，就可以得到阵列信号的相关信息并识别出环境所属的类型。通过分析可知：

- 情况 A 属于类型 I，只有一个独立源 $g_1=1$ ，且 $g_i=0$ ($i>1$ 时)。这是最理想的情况，直接将主波束对准期望信号的方向，不需要考虑干扰的零点抑制，得到的波束方向图如图 2 所示。
- 情况 B 属于类型 II，除了独立源外还有干扰源，干扰源个数可能有多个，但是没有考虑多径效应，这时表现为有多个独立源， $g_1=K$ 且 $g_i=0$ ($i>1$ 时)。此时除了将波束对准期望信号外还需要对干扰信号的方向进行零点抑制，如图 3 所示。

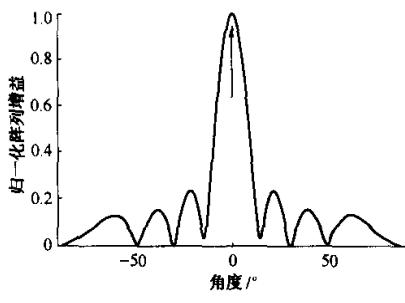


图 2 对应情况 A 构成的天线方向图

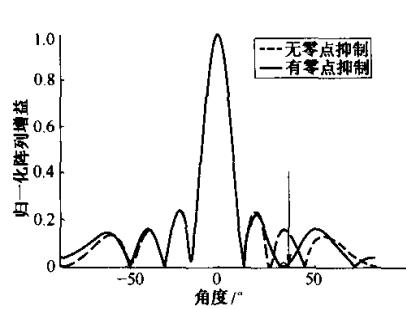


图 3 对应情况 B 构成的天线方向图

• 情况 C 属于类型 III，进一步考虑多径效应，并认为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。而干扰信号可能是多个独立的干扰源也可能是一个干扰源的多径信号构成。其中例 C 假设两个干扰信号是相互独立的。这时可以形成多个波束对准期望信号的各个多径信号，充分利用有用信号，同时对干扰信号也需要进行零点抑制，如图 4 所示。

• 情况 D 属于类型 IV，在考虑多径效应的基础上，认为期望信号的部分多径信号的时延相差较大，呈现出不相关性，容易引起类似码间干扰的径间干扰，这时可以将波束对准期望信号中相对时延较小的多径信号，对于相对时延较大的多径信号，视为与期望信号不相关的独立信号源，在该方向采取零点抑制，如图 5 所示。

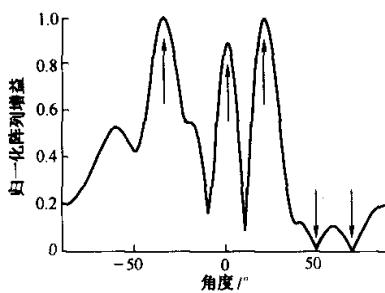


图 4 对应情况 C 构成的天线方向图

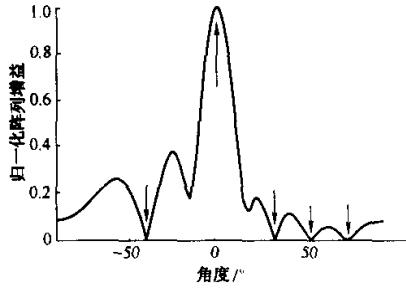


图 5 对应情况 D 构成的天线方向图

5 结论

本文针对软件天线环境分类与识别的需要，首先根据传播环境的特点对传播环境进行分类，并且根据环境分类所需要提取的特征量，提出了一种基于空间平滑技术实现环境识别的方法。该方法利用空间平滑技术去相关的特性，然后估计去相干后的信号子空间的维数，根据平滑秩序列的变化趋势来识别环境的不同。实际上，为了减少计算量，并不需要计算所有秩序列的值，只需要计算平滑前和选择合适的子阵列个数进行空间平滑，比较平滑前后的秩的值就可以识别环境类型。如果平滑前后秩均为 1，则对应类型 I；如果平滑前后秩不变但不为 1，对应类型 II；如果平滑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，对于为了尽量减少牺牲阵元，可采用前后向组合的平滑技术。对于前后（后向）空间平滑法，应满足 $N \geq K + J_{\max}$ ；对于双向平滑算法，应满足 $N \geq K + J_{\max}/2$ 。

此外，空间平滑仅适合线阵，不能直接应用于其他阵列结构，如果采用圆阵等其他阵列结构，则必须作内插处理等来完善。

参考文献：

- [1] KOHNO R. Structures and theories of software antennas for software defined radio[J]. IEICE Trans Comm, 2000, 83(6): 1229-1235.
- [2] KAMIYA Y, KARASAWA Y, DENNO S, et al. A software antenna: reconfigurable adaptive arrays based on eigenvalue decomposition [J]. IEICE Trans Comm, 1999, 82(12): 2012-2020.
- [3] COZZENS J H, SOUDA M J. Source enumeration in a correlated singed environment [J]. IEEE Trans SP, 1994, 42 (2): 304-317.
- [4] SHAN T J, KAILATH T, WAX M. Spatial smoothing approach for location estimate of coherent source [A]. Proc 17th Acilomar Conf Circuits Syst Comput [C]. 1993. 367-371.

作者简介：



谭蔚（1974-），女，湖南邵阳人，华中科技大学博士生，主要研究方向为智能天线、数字信号处理及电波传播环境。



漆兰芬（1936-），女，江西宜丰人，华中科技大学教授、博士生导师，主要研究方向为智能天线、电磁环境与电磁兼容以及微波、毫米波技术及其应用。

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>