

CDMA 系统中智能天线阵的高阶统计量分析

李克^① 鄢书跃^{①②} 张尔扬^①

(^①国防科技大学电子科学与工程学院, 长沙 410073)

(^②湘潭工学院信息与电气工程系, 湘潭 411201)

【摘要】分析了 CDMA 系统中智能天线阵的输出信号特性, 介绍了利用高阶统计量方法抑制高斯噪声和非高斯噪声的原理, 通过公式推导, 引出适合于 NMP(非最小相位)系统的 HOS(高阶统计量)算法。

【关键词】智能天线 多径干扰 高级统计量(HOS) 非最小相位系统(NMP)

Analysis of High Order Statistics of Smart Antenna Arrays in CDMA Systems

Li Ke^① Wu Shuyue^{①②} Zhang Eryang^①

(^①The School of Electronic science and Engineering, National University of Defence Technology, Changsha 410073)

(^②The Dept. of information & Electroengineering of Xiangtan Polytechnic University, Xiangtan 411201)

【Abstract】In this paper, we first analyzed the characteristic of the output signal of smart antenna in CDMA systems, introduced the principle of restraining Gauss noise and non-Gauss noise by using the method of HOS, and derived the HOS algorithm adapted to NMP system by formula derivation. At the end of this paper, we compared the algorithm performance with traditional QR-RLS algorithm.

【Keywords】smart antenna, multipath Interference, HOS, NMP

1 概述

移动通信系统中的基站如果使用智能天线阵单元接收信号, 可以利用信号的高阶统计量进行分析, 降低由于多径 RF 射频传播造成的性能衰退。

在基站信号接收的处理过程中, 空分处理方法并不是有效的, 因为利用传统的波束形成技术并不能补偿 ISI(符号间干扰)。对于由多径衰落引起的 ISI 问题, 合并在一起的空时滤波器是一个非常有效的解决方法。空时滤波器的方法导出了一个离散时间的 SIMO(单输入-多输出模型), 需要对其进行均衡处理。标准的均衡技术是基于一个等价的 MP(最小相位)系统模型的基础上的, 这是因为只对信号的二阶统计特性进行处理。例如: 最小均方误差准则就是基于二阶统计特性的。但是真实的信道并不具备 MP 特性, 所以对于非最小相位系统进行均衡, 就需要找寻别的方法, 而利用信号的高阶统计特性进行分析是一个引人注目的解决方法。

在实际无线电环境中, 遇到的过程有的往往是非高斯的, 有的甚至是非线性的, 就需要考虑除功率谱(自相关)之外的有关偏离高斯过程和非线性存在的信息, 根据随机过程的高阶累积量(HOS)定义的高阶谱就能包含这样的信息。从系统辨识来看, 相关函数(功率谱、二阶谱)对相位是盲的, 对加性噪声是敏感的, 这使得运用相关函数只能辨别最小或最大相

位系统, 无法避免加性有色噪声对系统辨识的影响。运用高阶累积量的方法, 不但可辨识非最小相位系统, 而且高阶累积量对高斯噪声一点不敏感, 可以避免高斯有色噪声对系统辨识的影响, 在抑制高斯型噪声方面有着显著的效果, 为强噪声背景下的弱信号处理提供了一种新的途径和方法。

在对概率密度正态分布的高斯信号进行处理时, 协方差函数起着最基本的作用。对于一个有限冲击响应(FIR)即 MA 系统, 基于相关函数的 MA 参数估计是非线性的, 而且只适用于最小相位系统。基于累积量的方法的优点: 可以线性估计非最小相位 FIR 系统的 MA 参数, 功率谱等价(又叫相关等价)^[2]说明, 二阶统计量(自相关)不可能识别一个系统传递函数的零/极点是位于单位圆内还是位于单位圆外, 因此, 非因果系统的辨识必须使用高阶累积量做分析工具。

2 适用于智能天线阵的 HOS 算法

2.1 智能天线阵信号特征分析

假设一个无线基站阵天线具有 K 个阵单元, 天线的每个阵单元具有一个 $L = L_2 - L_1 + 1$ 个复加权系数的数字滤波器, 阵天线的转移函数可以表示为

收稿日期: 2000-09-21。

李克: 男, 1972 年生, 博士生。从事移动通信抗干扰技术和智能天线技术研究。

鄢书跃: 男, 1963 年生, 副教授, 博士生。主要从事移动通信、自适应功放等方面的研究。

张尔扬: 男, 教授, 博士生导师。国家“863”航天领域专家委员会专家。

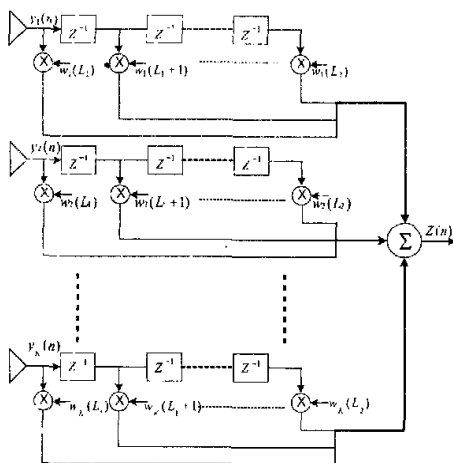


图1 具有K个阵单元的滤波器的高散时间模型

$$H(\omega\theta) = \sum_{m=L_1}^{L_2} e^{-j\omega T_d} \sum_{l=1}^K w_l(m) e^{-j\phi}$$

$$\phi = (2\pi d \sin\theta / \lambda)$$

d 是相邻阵单元之间的距离, λ 是信号的波长, θ 是信号的到达角度(DOA), 在 $l=1, 2, \dots, K$ 和 $m=L_1, L_1+1, \dots, L_2-1$ 时, T_d 是阵天线权值 $w_l(m)$ 和 $w_l(m+1)$ 之间的延迟。 $H(\omega, \theta)$ 作为 ω 的函数时, 可以看作是频率函数, 作为 θ 的函数时, 就是阵天线的方向图; 多径传播可以归结特征为 N 个路径信道, 第 i 条路径 ($i=1, 2, \dots, N$) 可以用 P_i 个接收到的延迟后的信号来表示, 所以第 i 条路径的冲击响应如下所示:

$$f_i(t) = \sum_{m=1}^{P_i} \rho_{i,m} e^{j\varphi_{i,m}} \delta(t - \tau_{i,m})$$

阵天线模型其实可以看作空时的滤波器组加以考虑, 由图1可知在时域中滤波器可以表示为

$$x(n) = \sum_{l=1}^K \sum_{m=L_1}^{L_2} w_l(m) y_l(n-m)$$

当 $\hat{w} = \hat{w}^{opt}$ 时,

$$z(n) = \sum_{l=1}^K \sum_{m=L_1}^{L_2} w_l^{opt}(m) y_l(n-m) \triangleq x(n)$$

2.2 RLS算法的推导

假设模型中没有噪声的存在, 利用源信号 $\{x(n)\}$ 的统计独立, 以及累积量的线性性质, 进行逐步递推。

要把权矢量 $w_i(\lambda)$ 线性地同阵天线单元输出端的采样信号的四阶交叉累积量联系起来, 需要基带离散时间信道的知识, 而在实际系统中, 这是无法得到的。为消除包含未知信道知识的项, 可以考虑采用类似 Giannakis - Mendel (GM) 的方法, 对多径信道情况进行推导。

假设 $w_i(0) = 1$, 定义如下统计量:

$$s_{i,l,k}^{(4)} = \sum [c_{i,l,l}^T(m+k_1) c_{i,l,l}^T(n-m) - c_{i,l}^T(n-m)]$$

$$c_{i,l,l}^T(m+k_1)],$$

其中:

$$c_{i_1, i_2, i_3, i_4}^T(m) = cum[y_{i_1}(k), y_{i_2}(k+m)^*, y_{i_3}(k+m), y_{i_4}(k+m)^*]$$

$$c_{i_1, i_2}^T(m) = cum[y_{i_1}(k), y_{i_2}(k+m)^*],$$

$n = -q, \dots, 2q, \quad i, l, i_l = 1, 2, \dots, K, \quad k_1 = L_1, \dots, L_2$
对于未知的权值以矢量符号表示:

$$w = [\bar{w}^T, w_2^T, \dots, w_K^T]^T$$

$$w_i = [w_i(L_1), w_i(L_1+1), \dots, w_i(L_2)]^T$$

$$\hat{w} = [w_1(L_1), w_1(L_1+1), \dots, w_1(L_2)]^T$$

系统公式可以表示为:

$$Cw = d$$

矩阵 C 如下定义:

$$C = [C_{1,1}^T, C_{1,2}^T, \dots, C_{1,K}^T, C_{2,1}^T, \dots, C_{K,K}^T]^T$$

$$C_{i,l}^T = [\bar{S}_i^{i,l}, S_2^{i,l}, \dots, S_K^{i,l}]$$

其中 $\bar{S}_i^{i,l}$ 和 $S_n^{i,l}$ 是 $(3q+1) \times (L_2 - L_1 + 1)$ 维的累积量矩阵。

矢量 d 定义为

$$d = [d_{1,1}^T, d_{1,2}^T, \dots, d_{1,K}^T, d_{2,1}^T, \dots, d_{K,K}^T]^T$$

其中的分量 $d_{i,l}$ 为

$$d_{i,l} = [-s_{1,i,l}^{i,l}, -s_{1,i,l-q+1}^{i,l}, \dots, -s_{1,i,2q}^{i,l}]^T$$

这个系统可以按照最小平方问题来解答:

$$w = (C^H C)^{-1} C^H d$$

$C^H C$ 是正定的^[3,5], 当采样点满足在时间上均匀相隔, 累积量绝对可和, 理论上的累积量可以从 N 个采样点的数据记录中估计出来, 整体的平均可以根据经验值近似得到。如果采用累积量估计的过程, 当然可以利用递归的方法来实现, 但同 QR-RLS 递归有着本质的不同, 后者是 SOS (二阶统计量) 的过程。

把矩阵 M 的第 i 行记作 $[M]_i$, 矢量 v 的第 i 个元素记作 $[v]_i$, 在时刻 n , 定义 C, w, d 的估计量为 $C(n), w(n), d(n)$ 在 $n+1$ 时刻更新的矢量值为

$$\bar{C}(n+1) = \begin{bmatrix} \lambda \bar{C}(n) \\ [C(t[n+1])]_{i(n+1)} \end{bmatrix}$$

$$\bar{d}(n+1) = \begin{bmatrix} \lambda \bar{d}(n) \\ [d(t[n+1])]_{i(n+1)} \end{bmatrix}$$

上式中,

$$\begin{aligned} i(n) &= [n - 1/K^2(3q+1)] + 1, i[n] \\ &= (n-1) \bmod [K^2(3q+1)] + 1, \end{aligned}$$

λ 是遗忘因子, 在 $n+1$ 时段, 希望解决如下问题:

$$\min_w \left\| \begin{bmatrix} \lambda \tilde{C}(n) \\ [C(i[n+1])]_{i[n+1]} \end{bmatrix} w - \begin{bmatrix} \lambda \tilde{d}(n) \\ [d(i[n+1])]_{i[n+1]} \end{bmatrix} \right\|^2$$

假设已知一个矩阵 $V(n)$, 满足 $Q^H \tilde{C}(n) = \begin{bmatrix} V(n) \\ 0 \end{bmatrix}$, Q 是正交阵, $V(n)$ 是上三角阵。

因为在正交变换过程中, Euclidean 距离是不变的, 参数变化 $dw(n) = w(n+1) - w(n)$ 。为了找到正交矩阵 Q , 一个简单的方法是通过一系列的旋转来消除矩阵

$$\begin{bmatrix} \lambda \tilde{C}(n) \\ [C(i[n+1])]_{i[n+1]} \end{bmatrix}$$

的下三角部分, 所以 HOS 算法包括如下步骤:

(1) 计算预测误差

$$u(n+1) = [d(i[n+1])]_{i[n+1]} - [C(i[n+1])]_{i[n+1]}^T w(n)$$

(2) 形成矩阵

$$\begin{bmatrix} \lambda V(n) & 0 \\ [C(i[n+1])]_{i[n+1]} & u(n+1) \end{bmatrix}$$

(3) 利用指定的旋转消除矩阵的底下部分。

(4) 解如下三角系统问题

$$V(n+1)dw(n+1) = \tilde{d}(n+1)$$

3 HOS 算法性能分析

首先要认识到由于需要 MP 的条件, 传统的 MMSE(基于 SOS)方法所体现出来的不足。在一般的多径传播条件的模型

下, 信道的实现都表现出很强的 NMP 状况; 在这种条件下, QR - RLS MMSE 滤波器的性能就体现不佳, 这也就有了使用高阶统计量的动机。

为了体现出利用高阶统计量方法同利用传统的 MMSE 方法的区别, 把 HOS 算法同 QR - RLS 算法的性能进行比较。HOS 算法可以达到更低 MSE(均方误差)值, 但是相对来说收敛速度较慢。较低的 MSE 值是因为高阶统计量比二阶统计量具有更高的识别性能(对于多径信道的估计来说)。而较慢的收敛性是因为估计 HOS 需要更多的采样点尺寸(优点是无需训练序列, 是一种盲算法)。

4 结论

非线性方法可获得最佳的性能(最小方差), 但累积量估计易受到估计误差较大方差的影响。当利用高阶统计量时, 因为需要更大的采样数目来获得连续的累积估计, 造成跟踪速度降低, 所以性能的提高是以增加计算的复杂度为代价来获得的。

未曾对邻近信道干扰作出考虑, 但是可以认为对付邻近信道干扰以及多源情况同时抑制一个源信号的多径干扰思想是一致的。

参考文献

- [1] Martone M. Cumulant - Based Adaptive Multichannel Filtering For Wireless Communication Systems With Multipath RF Propagation Using Antenna Arrays. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 1998; 47: (2): 377 - 391
- [2] 张贤达. 现代信号处理. 北京: 清华大学出版社, 1995
- [3] Zheng F, McLaughlin S, Mulgrew B. Cumulant - based deconvolution and identification: several new families of linear equations. Signal Process, 1993; 30: 199 - 219
- [4] Kailath T. Linear Systems. NJ: Prentice - Hall, 1980
- [5] Giannakis G B, Mendel J M. Identification of nonminimum phase systems using higher order statistics. Trans. Acoust. Speech, Signal Processing, 1989; 37: 360 - 377

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)，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>