

针状波束智能天线中基于最大特征值的 DOA 估计

胡 铭,冯正和

(清华大学电子工程系微波与数字通信国家重点实验室,北京 100084)

摘 要: 本文针对应用于 DS-CDMA 系统的针状波束智能天线,提出了一种基于最大特征值的 DOA 检测算法。由于充分利用了 CDMA 系统特性,这种算法具有结构简单、运算量低、分辨率高的特点。理论分析和计算机仿真结果表明,它具有很高的稳定性和很强的抗多径的能力。

关键词: 智能天线;码分多址;信号方向估计

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 09-0066-04

DOA Estimation Based on the Largest Eigenvalue for Pencil Beam Smart Antennas

HU Ming, FENG Zheng-he

(State Key Lab. on Microwave & Digital Communications, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A novel DOA estimation algorithm based on the largest eigenvalue of the covariance matrix is presented. It mainly applies to the pencil beam smart antenna in DS-CDMA systems. Different from other DOA estimation algorithms, it only picks up the main path signal of the target user. Thus it can get a high resolution with lower computational requirements. Theoretical analyses and simulation results show that this method has quite good stability and robustness, especially under severe multipath propagation circumstances.

Key words: smart antenna; code division multiple access; direction of arrival estimation

1 引言

随着现代社会信息的激增,人们交流的方式发生了很大的变化。以个人移动通信为代表的新一代通信方式,正显现出强劲的发展势头。由此可以预测,在不久的将来,有限的空间无线频率资源与不断增长的个人无线通信需求的矛盾将更加激化。为了有效利用无线信道资源,人们已经开始了信道扩容新技术的研究,并取得了一些成果。现有的信道扩容方案主要包括:频分多址(FDMA)、时分多址(TDMA)、码分多址(CDMA)等多种方案。其中码分多址由于具有软扩容、软切换等灵活性,已经成为商用通信系统发展的一个热点。

与此同时,人们从天线技术的角度也提出了信道扩容方案,它采用智能天线^[1](Smart Antenna)进行空分多址(SDMA)复用,利用信号源在入射方向(DOA, Direction Of Arrival)上的差别,将同频率、同时隙的信号分开,从而达到信道复用的目的。智能天线是一种能够根据所处的电磁环境智能地调节自身参数,从而使通信系统达到并保持最佳性能的天线^[2]。目前关于智能天线的研究主要集中在方向图自适应的智能天线^[3]。

方向图自适应天线采用主瓣对准目标信号,方向图零点

对准干扰源的基本原理,并采用迭代的自适应算法。由于在个人移动通信的实际信道,复杂的通信环境使天线接收到的信号中包含了大量的目标用户自身的多径信号和同频干扰用户的多径信号。在这种复杂的多径传播环境下,自适应天线零点抑制作用已经部分失效,而且由于采用迭代算法,这种智能天线也存在着响应速度慢的弱点。为了在响应速度、天线增益性能和实现代价等方面取得一个均衡,清华大学微波与数字通信国家重点实验室的张志军、冯正和提出了针状波束智能天线^[2],这种天线的增益性能与方向图自适应天线相当,而算法简单、响应速度快。

针状波束智能天线的关键技术主要包括目标信号的 DOA 检测和目标方向图综合。本文主要针对 DS-CDMA 系统中的针状波束智能天线,引入了可利用的一些先验知识,提出了基于最大特征值的 DOA 检测算法,与 MUSIC^[4]、ESPRIT^[5] 以及其它一些改进算法相比,它具有算法简单、稳定性和抗多径的鲁棒性好等优点。

本文的结构安排如下:文章第二部分将简要介绍针状波束智能天线的基本原理;第三部分对信号的数学模型进行描述;第四部分给出基于最大特征值的 DOA 检测具体算法;第

五部分就该算法的稳定性和鲁棒性进行理论分析;第六部分给出这种 DOA 检测算法的模拟结果,并与其它算法作简要的比较;第七部分对基于最大特征值的 DOA 检测算法的特点进行总结。

2 针状波束智能天线

从图 1 和图 2 中可以看到,针状波束智能天线实际上是一种采用 DBF (Digital Beam Forming) 的天线。

它首先利用阵列天线接收到的信号进行目标用户的 DOA 检测,然后利用目标方向图综合算法确定目标用户所对应的天线阵列权矢量,最后利用 DBF 技术得到所需目标方向图,由此接收特定

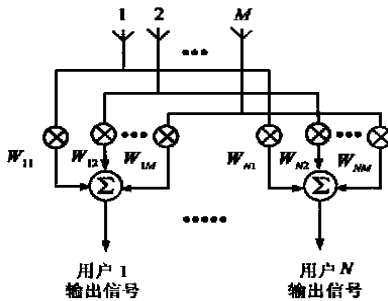


图 1 针状波束智能天线接收原理图

用户的信号。与自适应的智能天线不同,针状波束智能天线在目标方向图综合时,并不考虑同频干扰用户的来向以及进行零点控制,它是利用较窄的主瓣和低旁瓣抑制干扰特性,提高针对目标用户的天线增益。在考虑多径和大量用户的条件下,针状波束智能天线性能与自适应的智能天线是相当的,而前者的响应速度明显优于后者。在针状波束智能天线结构中,目标用户的 DOA 检测是进行一系列后续处理的基础,是一项关键技术。

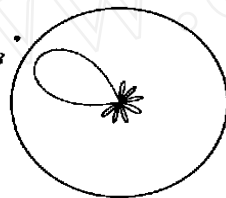


图 2 针状波束方向图

3 信号的数学模型

在 DS-CDMA 通信系统中,用户靠 PN 长码来区分,这些用户占用同一个频段,每个用户都要受到其它用户和多径的共信道干扰 CCI。对于现代以 MUSIC、ESPRIT 为代表的子空间 DOA 检测方法,有一个前提条件,就是信号源的数目 D 应少于天线阵元的个数 M 。而在 CDMA 系统中同信道用户一般都有几十个(典型的为 40~60),因此在接收系统前端采用这些算法测向是很困难的。为此,我们采用在基带 PN 长码相关解扩后再进行 DOA 检测。这样可以使大量的干扰得到抑制,从而使目标信号有较高的信噪比。

假定接收信号为窄带 CDMA 信号,考虑多径影响的 M 阵元天线的基带输出为

$$x(t) = \sum_{i=0}^D \sum_{k=0}^{N_i} p_{ik} b_i \left[\frac{t - ik}{T} \right] c_i(t - ik) a(ik) + n(t) \quad (1)$$

其中 $i=0$ 代表目标用户, $i \neq 0$ 代表同信道用户; $k=0$ 代表用户的优势信号, $k \neq 0$ 代表用户的多径信号; N_i 是第 i 个用户的多径数目。 $c_i(t)$ 是第 i 个用户对应的 PN 长码, $b_i(\cdot)$ 是持续长度为 T 的码元, ik 与 ik 分别是第 i 个用户的第 k 条路径的传播时延和入射角度, p_{ik} 是考虑不同路径传播损

耗而引入的增益系数。 $a(\cdot)$ 是天线的阵列流型矢量。 $n(t)$ 为随机噪声。

对基带输出信号进行解扩可得

$$z(l) = \int_{(l-1)T}^{lT} c_0(t - \tau) \left(\sum_{i=0}^D \sum_{k=0}^{N_i} p_{ik} b_i \left[\frac{t - ik}{T} \right] \cdot c_i(t - ik) a(ik) + n(t) \right) dt \quad (2)$$

考虑到在下面的 DOA 检测算法中,不同的独立同信道用户引入的干扰,以及同一干扰用户的主信号和多径产生的效果基本相同,也为了实际模拟计算的方便,解扩输出信号可以进一步近似为

$$z(t) = p_0 s_0(t) a(0) + \sum_{i=1}^{N_0} p_i s_0(t - \tau_i) a(i) + \sum_{k=1}^K m_k s_k(t) a(k) + n(t) \quad (3)$$

上式右边第一项代表目标用户的主信号,第二项代表目标用户多径引入的影响,第三项为其它同信道用户引入的干扰信号, $n(t)$ 为随机噪声信号。其中 $s_i(t)$ 为功率归一化的信号, p_i 是考虑信号输入幅度与解扩处理后的幅度因子。

在 DS-CDMA 系统的相关解扩过程中,由于部分解扩和 PN 长码游程的影响,对于 n 阶 PN 码,它的相关特性并不是 $2^n - 1$ 和 -1 的理想特性。在理想功率控制的 DS-CDMA 系统中, p_0 和 m_k 满足如下近似关系^[6]:

$$\left(p_0 / m_k \right)^2 = 3W/2, \text{ 其中 } W \text{ 为扩频比} \quad (4)$$

4 最大特征值 DOA 检测算法

在目前 DOA 检测算法中,广泛采用的是 MUSIC^[4] 算法,它是由 R. O. Schmidt 于 1979 年提出的。MUSIC 算法利用了信号子空间和噪声子空间的正交性,构造空间谱函数,通过谱峰搜索,检测信号的 DOA。它在信号源独立且 $D < M$ 的情况下,有很高的分辨率。但它本身也存在着一些弱点:无法分辨相关信号源; $D > M$ 时,算法失效;抗多径能力弱;在判定信号源数目时,需要主观设定最小特征值阈值,或者采用 MDL^[7] 等客观准则,但在信号恶化的条件下,经常会出现误判;谱峰高低不能与信号能量相联系。近年来,人们提出了许多基于 MUSIC 的改进算法,但都以增加计算复杂度的为代价,而且 $D > M$ 问题仍无法解决。

在 DS-CDMA 系统的针状波束智能天线的 DOA 检测中,测向的信号条件和目标要求发生了很大的变化:由于采用了 CDMA 系统的相关解扩特性,在天线阵元接收信号中,目标源一般具有一个能量占优势的主信号;个人移动通信的电磁环境复杂,存在大量目标用户的相关多径;针状波束智能天线进行目标方向图综合时,不需要同信道干扰用户的位置;

后续处理对 DOA 的检测精度要求为标准估值偏差小于 3~5°。因此,针对以上情况的 DOA 检测问题就变为:如何在存在大量相关多径(甚至强多径)的条件下,有效地检测出一个目标信号的方向。

在分析 MUSIC 算法和 R 矩阵特性基础上,提出了适用于针状波束智能天线的改进算法:最大特征值法。该算法基本流程如下:

(1) 计算接收信号的协方差矩阵 $R, R = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N Z(l) Z^H(l)$

(2) 求出 R 所对应的最大特征值和特征向量 e_s ,

(3) 构造空间谱函数 $P(\theta)$

$$P(\theta) = \frac{a^H(\theta) a(\theta)}{a^H(\theta) a(\theta) - a^H(\theta) e_s e_s^H a(\theta)}$$

(4) 计算 $P(\theta)$, 并搜索谱峰, 判定信号入射角度.

与经典的 MUSIC 算法相比它具有如下优点: 只需要求一个特征值与特征向量, 计算量减少; 不需要检测最小特征值的重数, 简单而且不存在对信号源数目 N_s 的误判; 只需搜索最大谱峰, 搜索算法简单; 对于多径引起的相关信号有很强的容忍性, 强多径信号只是造成估值方差的有限增加.

5 检测算法的理论分析

在最大特征值的 DOA 检测算法中, 当无其它同信道用户并不考虑多径时式 (3) 变为

$$z_0(t) = p_0 s_0(t) a(\theta_0) + n(t) \quad (5)$$

此时它与经典 MUSIC 算法得到的结果是一致的. 当计入同信道用户和多径影响, 并假定 p_i 和 m_k 与 p_0 相比都较小时

$$R = R_0 + R, \text{ 其中 } R_0 = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N Z_0(l) Z_0^H(l) \quad (6)$$

根据矩阵论^[8]可知, R 和 R_0 都为 Hermite 矩阵, 设 $\{x_i\}$ 和 $\{x_j\}$ 构成矩阵 R_0 的特征值空间和规范特征矢量空间, 可得

$$R_0 x_i = \lambda_i x_i \quad (7)$$

考察由 R_0 变为 R 时, 特征矢量的变化, 略去二阶小量得

$$R x_i + R x_j = \lambda_i x_i + \lambda_j x_j \quad (8)$$

左乘特征向量 x_j^H 作内积, 可得

$$x_j^H R x_i + x_j^H R x_j = \lambda_i x_j^H x_i + \lambda_j x_j^H x_j \quad (9)$$

即 $x_j^H R x_i + (\lambda_j - \lambda_i) x_j^H x_i = \lambda_i x_j^H x_i$

当 $j \neq i$ 时, 并假设 λ_i 为单重特征值, 得到

$$x_j^H x_i = \frac{x_j^H R x_i}{\lambda_i - \lambda_j} \quad (10)$$

将 x_i 按 $\{x_j\}$ 展开 $x_i = \sum_{j=1}^M a_j x_j$ (11)

由此可得 $a_j = \frac{x_j^H R x_i}{\lambda_i - \lambda_j}, j \neq i$ (12)

不失一般性, 系数 a_i 可取 0, 因此

$$x_i = \sum_{j \neq i} \frac{x_j^H R x_i}{\lambda_i - \lambda_j} x_j \quad (13)$$

由上式可知, 当 λ_i 没有相近特征值, 且 R 较小时, x_i 变化不大.

在最大特征值 DOA 检测算法中, 由于采用最大特征值, 在实际中它一般离其它特征值很远, 所以在考虑同信道干扰和多径, 以及电磁环境起伏引起 R 变化时, 所对应的最大特征矢量特性仍然比较稳定. 由此构造的空间谱 $P(\theta)$ 也显现出很好的稳定性和很强的鲁棒性. 而 MUSIC 算法由于信号空间的较小特征值与噪声空间的特征值离得很近, 很容易造成特征矢量的改变和空间谱函数的恶化.

6 仿真结果

为检验最大特征值法在 DS-SSMA 系统中工作性能情况, 进行计算机仿真实验. 在实验中采用阵列间距 $d = \lambda/2$ (为真空中的波长) 的 8 元均匀线阵. 结构如下:

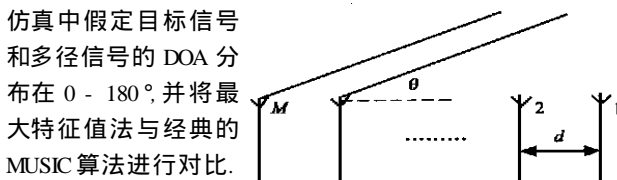


图 3 天线阵列几何结构

图 4 和图 5 分别

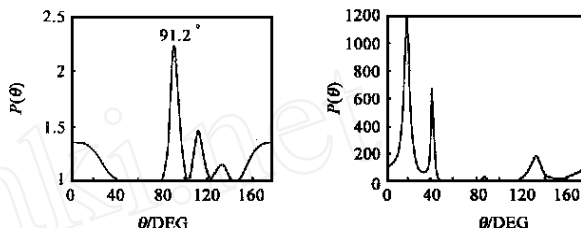


图 4 最大特征值法空间谱

图 5 MUSIC 算法空间谱

为两种 DOA 检测算法在多径条件下典型的空谱, 它们的目标信号 DOA 为 $90^\circ, 0\text{dB}$, 1 个相关强多径信号的 DOA 为 $110^\circ, -3\text{dB}$, 30 个较弱的相关干扰信号为 -22dB . 比较图 4 和图 5, 可以看到基于最大特征值的 DOA 检测算法在信道很恶劣的情况下, 通过最高谱峰仍然可以正确地估计目标用户的 DOA, 而此时经典的 MUSIC 算法的空谱已经无法检测到期望信号的 DOA.

进一步对基于最大特征值的 DOA 检测算法和经典 MUSIC 算法分各种情况讨论, 并作 Monte-Carlo 统计计算, 得到:

表 1 DOA 检测算法性能比较

仿真条件	工作情况	
	最大特征值法	MUSIC
1 个强独立干扰 30 个弱独立干扰	良好	良好
1 个强独立干扰 30 个较强独立干扰	良好	失效
1 个强独立干扰 30 个弱相关干扰	良好	失效
1 个强相关干扰 30 个弱独立干扰	良好	失效
1 个强相关干扰 30 个弱相关干扰	良好	失效

表 2 最大特征值法 DOA 估值性能

目标用户位置	最大特征值法 DOA 估计	
	均值	估值方差
20°	19.4°	2.6°
40°	40.4°	1.5°
60°	60.2°	0.8°
80°	80.1°	0.6°
100°	99.9°	0.6°
120°	119.8°	0.8°
140°	139.6°	1.5°
160°	160.8°	2.7°

表 3 最大特征值法 DOA 估值性能

目标用户 位 置	最大特征值法 DOA 估计	
	均值	估值方差
20°	18.7°	3.8°
40°	40.5°	2.1°
60°	60.2°	1.2°
80°	80.1°	0.9°
100°	99.9°	0.9°
120°	119.8°	1.8°
140°	139.6°	2.0°
160°	161.0°	3.8°

表 4 最大特征值法 DOA 估值性能

目标用户 位 置	最大特征值法 DOA 估计	
	均值	估值方差
20°	18.6°	3.4°
40°	39.2°	2.2°
60°	59.9°	1.0°
80°	80.0°	0.8°
100°	100.0°	0.8°
120°	120.1°	1.1°
140°	140.7°	2.1°
160°	161.8°	3.5°

从表 1 中可以看到,在大多数 MUSIC 算法失效的多径情况下,最大特征值法都能良好地工作.表 2 是在存在 1 个相关多径强信号和 30 个相关的弱干扰信号的条件统计得到的,目标信号为 0dB,相关强信号为 -6dB,每个相关弱信号为 -22dB,并假设它们的相位延迟在 0~2 均匀随机分布.表 3 中,假定目标信号为 0dB,有 1 个相关强信号为 -3dB,60 个相关弱信号,每个为 -22dB,它们的相位延迟在 0~2 均匀随机分布.表 4 中,假定目标信号为 0dB,有 3 个相关强信号,它们在 -6dB~-3dB 均匀随机分布,其相位延迟在 0~2 均匀随机分布,60 个相关弱信号每个为 -22dB,它们的相位延迟在 0~2 均匀随机分布.由表 1~4 可以看出,基于最大特征值的 DOA 检测算法有很强的抗多径的能力,在复杂的移动通信环境中,其检测精度完全能满足针状波束智能天线的需要.

7 结论

本文针对 DS-CDMA 系统,提出了适用于针状波束智能天线的 DOA 检测算法:最大特征值法.由于利用了 CDMA 信号在相关解扩后同信道干扰被抑制的特点,以及协方差矩阵的最大特征值对应的特征向量主要由目标用户优势信号所决定的特性,使得整个算法十分简单,分辨率却较高.理论分析和计算机仿真结果表明这种算法具有很强的抗多径能力.在强多径环境下,该算法仍具有很高的估值精度.

参考文献:

- [1] Joseph Kennedy, Mark C. Sullivan. Direction finding and 'smart antennas' using software radio architectures [J]. IEEE Commun. Mag., May 1995, 62 - 68.
- [2] 张志军. 用于个人移动通信的针状波束智能天线 [D]. 清华大学博士学位论文, 1998.
- [3] Soren Anderson, Mille Millnert, Mats Viberg. An adaptive array for mobile communication systems [J]. IEEE Trans. VT, Feb. 1991, 40(1): 230 - 236.
- [4] R. O. Schmidt. Multiple emitter location and signal parameters estimation [J]. IEEE Trans. AP, Mar. 1986, 34: 276 - 280.
- [5] Richard Roy, Thomas Kailath. ESPRIT: Estimation of signal parameters via rotational invariance techniques [J]. IEEE Trans. ASSP, July 1989, 37(7): 984 - 995.
- [6] Ryuji Kohno, Reuven Meidan, Laurence B. Milstein. Spread spectrum access methods for wireless communications [J]. IEEE Commun. Mag., Jan. 1995: 58 - 67.
- [7] Mati Wax, Thomas Kailath. Detection of signals by information theoretic criteria [J]. IEEE Trans. ASSP, Apr. 1985, ASSP-33(2): 387 - 392.
- [8] 曹志浩. 矩阵特征值问题 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.

作者简介:



胡 铭 1974 年出生, 1997 年于清华大学电子工程系获工学学士学位. 现为清华大学电子工程系电磁场与微波技术专业研究生, 主要从事智能天线技术、数字信号处理和无线数字通信的研究.



冯正和 1945 年出生, 1970 年毕业于清华大学. 现任清华大学电子工程系教授, 博士生导师, 清华大学电子工程系主任. 主要从事智能天线技术、微波毫米波技术、电磁场数值计算、微波数字通信技术、阵列天线及微波测量的研究.