

TD-SCDMA 系统中利用中置实现 DOA 检测的方法

贾向东^{1,2} 傅海阳¹ 杨龙祥¹ 李 凡¹

(1. 南京邮电大学 江苏省无线通信重点实验室, 南京 210003; 2. 西北师范大学 数学与信息科学学院, 兰州 730070)

摘 要: 智能天线的一项核心技术是来波方向 (DOA) 估计。设计物理模型清晰、数学运算复杂度低的 DOA 估计算法, 对于智能天线的工程实现具有重要的意义。本文给出了一种利用 TD-SCDMA 标准中置序列在基带上实现 DOA 检测的简单实用的谱搜索方法-MIDOA 谱搜索算法。文章首先给出了 TD-SCDMA 系统 8 阵元圆阵智能天线系统中置接收机的物理模型, 在此基础上导出了与之相对应的数学处理模型, 并根据这些数学模型导出了 MIDOA 谱搜索算法流程图和相应的基带检测 MIDOA 谱搜索算法。从仿真结果和性能分析可以看出该方法是一种针对 TD-SCDMA 标准的、简单有效的 DOA 估计方法; 与基于子空间的 MUSIC 等算法相比, 它具有物理模型清晰、算法的稳健度高和可检测的 DOA 数不受智能天线阵元数的限制等特点。

关键词: 无线通信; 智能天线; DOA 估计; MIDOA 谱搜索

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2010)05-0730-06

DOA Estimation Algorithm by Using Midamble in TD-SCDMA

JIA Xiang-dong^{1,2} FU Hai-yang¹ YANG Long-xiang¹ LI Fan¹

(1. Jiangsu Provincial Key Lab of Wireless Communications, Nanjing University of Posts and Telecommunications; Nanjing 210003, China;
2. College of Mathematics and Information Science, Northwest Normal University; Lanzhou 730070, China)

Abstract: The design of direction of arrival (DOA) estimation algorithm is the key technology of smart antennas system. It is very important to design an algorithm of DOA estimation with clear physical model and lower complexity of mathematics process. In this article, a novel spectrum search algorithm, MIDOA spectrum search algorithm, is presented, which is based the feasible use of midamble sequence defined in TD-SCDMA standard (TD), and is one simple practical baseband DOA estimate method. Firstly, we propose the physical model of midamble sequence receiver of TD-SCDMA smart antennas with 8 array element circle formation. Based on the physical model, the mathematics formulations for the receiving process are also presented. Then according to the physical model and the mathematics formulations, we give MIDOA spectrum search algorithm as well as the corresponding flow chart. The simulation results and performance analysis show this method is one simple feasible estimate method of DOA in view of the TD standard. Compared with MUSIC algorithm, the MIDOA spectrum search algorithm is characterized with clear physical model and high robustness. And the number of DOA that can be estimated will not be restricted by the array element number of smart antennas array.

Key words: Wireless communications; Smart antennas; DOA estimation; MIDOA Spectrum search

1 引言

无线通信技术在不断发展,所需的无线频谱已很难满足无线通信的业务需求。无线移动信道是一个多址多用户信道,而且存在多径衰落、时延扩展、频率扩

展等问题。与传统的解决方法相比,基于相控阵天线理论的智能天线技术及其特有的空域滤波功能为这些问题的解决带来了新的思路。TD-SCDMA(TD)标准中规定应在基站(BS)利用智能天线引入空分多址(SDMA)的概念,它能通过移动台(MS)收信号的来波方向

收稿日期: 2009 年 8 月 11 日; 修回日期: 2009 年 10 月 12 日

基金项目: 本文得到国家 973 课题 2007CB310607、863 重点项目 2009AA011302、国家重大专项课题 2009ZX03003-002 和 2009ZX03007-004、东南大学国家移动通信重点实验室开放基金 N200604 的支持。

(DOA)区分不同的用户。只有测出了用户的DOA,才能完成智能天线的定向发送,实现空分多址[1]-[2],可以极好的克服CDMA系统中自干扰的影响,使CDMA系统的无线频谱利用率得到极大的提升。因此,既准确又易于实现的DOA估计方法就成为智能天线技术研究的一个热点。有许多关于TD理论性研究文章[3]-[5]的研究重点集中在DOA的估计方法和上行接收上,也有一些研究TD标准下行波束形成的论文[6]-[8]。但是基于TD中置序列的DOA检查方法,在相关的资料中并没有给出。

在现有的资料中,大致存在三类DOA估计算法:谱搜索算法,基于子空间的算法和基于最佳性能准则的算法。其中DOA估计的谱搜索方法[9]基于波束形成的概念,它并未利用接收信号向量的 $x(n)$ 模型或信号和噪声的统计模型。谱搜索DOA估计法利用搜寻到的输出功率峰值可以确定与DOA有关的阵列流形,而后利用阵列流形的值和电子导引把波束调节到任意方向。常见的谱搜索方法有:延时-相加法(经典波束形成器)和Capon最小方差法。这类方法原理上比较简单,需要直接处理载波信号的相移,但实现的难度极大。一般而言,可分辨的DOA数少于阵元数,无法利用数据信号特性提高分辨率。在TD标准中规定使用8阵元构成的圆阵,按8个码道3径计算时,需要分辨的DOA数至少为24个,因此上述方法无法在CDMA系统中实现。该算法只有经过进一步改进之后,才可以在CDMA系统中实现。本文将给出一种新型的基于中置序列的谱搜索算法。

基于子空间法的DOA估计[3]-[9]算法需要利用收信号输入数据矩阵的特征结构,是一种具有较高分辨率的次最优方法。常见的有MUSIC算法和ESPRIT算法。其中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,能够精确地检测出信号的DOA。但是这类方法的物理模型不明确,相关资料都偏重于矩阵运算,它们可搜索的DOA数也少于阵元数,并且存在大量的矩阵运算,要求的运算量很大。

基于最佳性能准则的DOA估计算法[10]-[11],按照是否需要参考信号可以分为盲算法和非盲算法两大类。非盲算法是指需借助参考信号(导频序列或导频信道)的算法,此时接收端知道发送的是什么,进行算法处理时需先确定信道响应再按一定准则(比如最优的迫零准则)确定各阵元收信号的加权值,要么直接按一定的准则确定或逐渐调整加权值,以使智能天线

输出与已知多阵元收信号加权后叠加的最大值相关,常用的准则有MMSE(最小均方误差)、LS(最小二乘法)等。在这类算法中参考信号的获取是关键,参考信号与所需信号的相关性越好,DOA估计的性能就越好。由于在TD标准中安排了中置序列,它具有导频信道的作用,所以上述方法应该能用于TD标准的DOA检测。这些算法需要进行矩阵的求逆计算、特征值分解等复杂的计算过程,提高了DOA检测的实现难度。

盲算法则无需MS端发送已知的导频信号,接收端将自行估计收信号,并以此为参考信号进行DOA估计,但需注意的是:应确保估计信号与实际的MS发信号间有较小差错。目前,盲自适应算法普遍存在的问题是算法的计算量大、收敛速度慢,很难用于捕获和跟踪移动用户的DOA。

综上所述,现有的算法都有一定的不足之处。还有许多文献[12、13、14]也对DOA检测进行了大量的研究。本文将给出一种利用TD标准中置序列实现DOA检测(MIDOA)的简单实用的估计方法—MIDOA谱搜索算法,该算法属于谱搜索算法的改进。在该MIDOA算法中,文章首先给出8阵元圆阵智能天线中置序列接收机的原理图,在其基础上导出中置序列在接收过程中的数学处理表达式,并根据这些数学表达式导出MIDOA基带检测算法,以及算法流程图。进而给出该算法的实现过程以及仿真结果,最后对于该方法实现过程中可能存在的下变频误差的影响进行了研究。从仿真结果和性能分析可以看出该方法是一种针对TD标准的、简单有效的DOA估计方法。

2 TD标准时隙突发信号的结构

TD标准的子帧结构如图1所示。每个子帧由长度 $675\mu\text{s}$ 的7个常规时隙和3个特殊时隙组成。3个特殊时隙分别是由下行导频时隙(DwPTS, $75\mu\text{s}$)、上行导频时隙(UpPTS, $125\mu\text{s}$)和保护时隙(GP, $75\mu\text{s}$)构成。在这7个常规时隙中Ts0总是分配给下行链路,而Ts1总是分配给上行链路,其主时隙可按小区上、下行时隙的配置要求进行动态分配,上行链路的时隙和下行链路的时隙之间由一个转换点分开,在TD-SCDMA系统中的每个5ms的子帧中有两个转换点(UL到DL和DL到UL)。

一个时隙也被称作一个突发, Ts0 ~ Ts6这7个常规时隙被用作用户数据或控制信息的传输,它们的结构见图2。每个时隙可分为4个域:两个数据域、一个中置序列(Mid)和一个保护间隔。

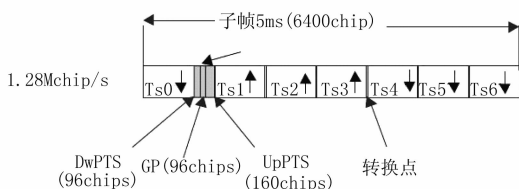
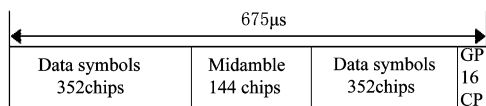


图1 TD标准的子帧结构

一个突发的持续时间就是一个时隙,主时隙突发结构由两个数据符号域、一个 144chips 的 mid 码和 16chips 的保护域 GP 组成,总长为 864chips。数据区共 704chips,数据域中每个码片用 QPSK 调制,扩频系数为 1~16。Mid 码是一个用作训练的已知序列,供多用户检测时信道估值用。



(GP 表示保护间隔, CP 表示码片长度)

图2 常规时隙结构

3 MIDOA 方法的物理实现模型及配套公式

按标准规定, TD-SCDMA 系统中的智能天线应取 8 阵元(AE)圆阵,为了简化模型,我们在这里先取 2 阵元图例。图 3 所示为在 TD 2 阵元智能天线系统中, MIDOA 方法在基带上的接收机实现原理框图,该原理框图也可用于 TD 基带发送波束形成。在图 3 所示的模型中,利用

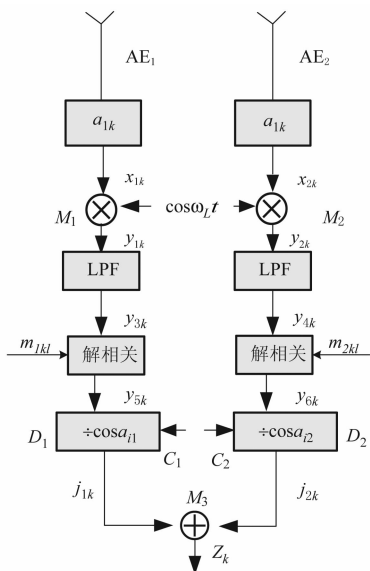


图 3 TD 2 阵元天线中置序列接收原理图中置序列的解相关过程解决了传统的谱搜索和 MUSIC 等算法能搜索的 DOA 数少于阵元数的难题。

根据 TD 标准规定,在 TD 中当使用 $N=8$ 阵元的圆阵时,各个阵元以 $\Delta = \lambda/2$ 波长为间隔均匀放置。由于阵元间的距离很近,所以认为各天线阵元上的收信号是相关的,即各阵元收到的信号幅度基本相等,但是由于各阵元所处的几何位置不同,所以各阵元收信号的相位不同。根据文献[15],可以得到当 8 天线阵

元圆阵的主瓣最大值指向 (θ_k, ϕ_k) 时(第 k 个用户),第 n 个阵元上第 k 个用户收信号相位为

$$a_{nk} = b \sin \theta_k \cos(\phi_k - \phi_n) \quad n = 0, 1, \dots, 7 \quad (1)$$

其中 θ_k 为来波信号的俯仰角, ϕ_k 为来波信号的方位角, $b = 2\pi/\lambda$, a 为圆阵半径, $\phi_n = 2\pi \cdot n/N$ 为阵元 n 的固有相位,又称为内在相位,其与阵元的相对位置有关,反应了阵元的位置。显然,由(1)可见,第 n 个阵元收信号相位由固有相位 ϕ_n 和接收信号的来波方向 ϕ_k 共同决定。该参数可用于表示天线阵的阵列流形。为了分析问题方便起见,在下面的分析中,如不特别说明,来波信号的俯仰角 θ_k 视为一常数 $\pi/2$ 。

假设第一个阵元 AE_1 接收第 k 个用户中置序列 m_{kj} 时的信号为:

$$x_{1k} = A_k g(t) \cos(\omega t + a_{1k}) \\ = \sum_{j=0}^{N_c-1} m_{kj} g(t - jT_c) \cos(\omega t + a_{1k}) \quad (2)$$

其中 a_{1k} 如式(1)所示($n=1$), m_{kj} 取 ± 1 , 表示第 k 个用户的第 j 个中置序列码片, N_c 为中置序列的长度, T_c 为码片周期, $g(t)$ 为波形形成函数, ω 为载波信号频率。

取下变频用的本地载波为 $\cos \omega_L t$, 假设下变频用的本地载波信号与收信号载波同步, 则有本地载波频率 $\omega_L = \omega$, 经下变频后有:

$$y_{1k} = \sum_{j=0}^{N_c-1} m_{kj} g(t - jT_c) \cos(\omega t + a_{1k}) \cos \omega_L t \quad (3)$$

略去 $1/2$ 系数的影响, 经低通滤波器(LPF)后得

$$y_{3k} = \sum_{j=0}^{N_c-1} m_{kj} g(t - jT_c) \cos a_{1k} \quad (4)$$

从上式可见, 经下变频后已将智能天线阵元 AE_1 收信号 x_1 给出的载波相位偏移信息 a_{1k} 变换为基带信号的幅度损失 $\cos a_{1k}$ 。可避免直接处理极敏感易变的相位信息 a_{1k} , 由于 $\cos a_{1k} \leq 1$, 将会使 y_{3k} 的幅度下降。

经过与第 k 个用户某一路径的本地中置序列 m_{kl} 相关后可得到用户 K 的某一径信号,

$$y_{5k} = \cos a_{1k} \sum_{j=0}^{N_c-1} m_{kj} \cdot m_{kl} g(t - jT_c) \\ = N_c |g(t)| \cos a_{1k} \quad (5)$$

在上式中, j 表示码片序号; 这里需要说明的是上式中考虑的是经过多径分离以后的某一径信号, 如果要处理多径信号, 则首先要检测出某一用户的主径信号与其它的多径信号分量, 然后根据主径信号的相位对多径分量信号的相位进行适当的调整即可; 这样多径分量的处理过程与式(5)所示过程相似, 最后按照一定的算法合并各个多径分量。故为了说明问题的方便起

见,这里只考虑一径,对于多径的研究我们在文献[16]中有详细的讨论。经除法器D后得

$$j_{1k} = y_{5k} / \cos a_{1k} = N_c |g(t)| \quad (6)$$

同理可得

$$j_{2k} = y_{6k} / \cos a_{2k} = N_c |g(t)| \quad (7)$$

经加法器取得

$$Z_k = j_{1k} + j_{2k} = 2N_c |g(t)| \quad (8)$$

因为已经取用户k某一路径的本地中置序列将该用户中置 m_k 信号解相关,因此 z_k 为用户k两阵元同相分集接收的输出信号,即两阵元定向接收的输出信号,它的信号幅度是两阵元接收处理电路的输出信号之和,在有N根天线阵元时,有:

$$Z_k = \sum_{i=1}^N j_{ik}, N=8 \quad (9)$$

从上述推导过程可以看出,由于利用用户k某一路径的本地中置序列实现收信号的解相关处理,使解相关输出信号 y_{5k} 中只存在一个DOA的信号。因此利用该方法搜索DOA时,可搜索的DOA数与智能天线的阵元数无关。

4 算法实现过程及模拟仿真

本文给出的利用TD标准中置序列实现移动台DOA基带检测的MIDOA估计算法是一类谱搜索算法,与前面讨论的情况相类似,我们这里也假设俯仰角为一常量 $\theta_k = \pi/2$,只对DOA参量 (θ_k, ϕ_k) 中的方位角 ϕ_k 进行模拟仿真,但是其结果并不影响问题的讨论和说明[15]。利用搜索的角度参量 ϕ_i 对 Z_k 表达式(9)中的来波方向在 $0 \sim 360^\circ$ 的范围内进行搜索,当某一搜索角度参量 ϕ_i 值使 Z_k 取得最大值时,则取第k个移动台的来波方向 $\phi_k = \phi_i$ 。

据图3和式(7)可以给出在8阵元圆阵条件下用于搜索的表达式,此时第n根天线的增益为

$$y_n = \frac{\cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} a \left[\cos \left(\phi_k - 2\pi \times \frac{n}{8} \right) \right] \right\}}{\cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} a \left[\cos \left(\phi_i - 2\pi \times \frac{n}{8} \right) \right] \right\}} \quad (10)$$

上式中的分子由图3中的DOA参数 a_{nk} 给出,其中 ϕ_k 为信号的实际来波方向。分母中的函数对应于图3中的除法器 D_1 中含有的除数因子。 ϕ_i 为进行搜索的角度参量,当 $\phi_i = \phi_k$ 时, y_n 取得合理的最大值,便可以搜索到该用户的来波方向。此时8根天线总的增益为:

$$G(\phi_k, \phi_i) = \sum_{n=0}^7 g_n \quad (11)$$

取其中的

$$g_n = \begin{cases} y_n, & |y_n| \leq 1 \\ 1/y_n, & |y_n| > 1 \end{cases} \quad (12)$$

利用上述DOA估计算法,可以给出图4的MIDOA检测算法流程图。

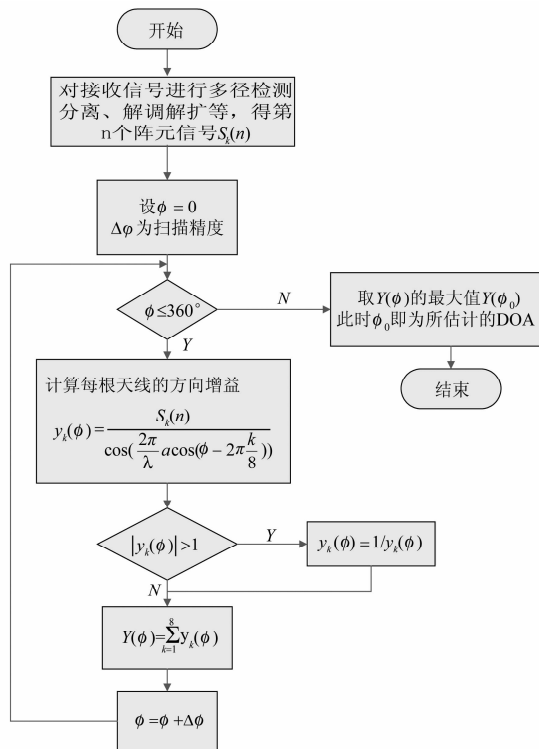


图4 MIDOA检测算法流程图

取圆阵的半径 $a = 0.6533\lambda$,可以得到当第k个MS的DOA $\phi_k = 180^\circ$ 时,搜索得到的 $\phi_i = 180^\circ$,可以正确估计出MS的来波方向 $\phi_k = \phi_i = 180^\circ$,如图5实线所示。此图也给出了收信号的波束形成增益,可以用特定的方法去除图中上述 $\phi_i = 180^\circ$ 峰值区域反方向部分的影响。当 ϕ_k 等于其它角度时,均可以得到搜索结果 $\phi_k = \phi_i$ 。当 $\cos \omega_L t$ 中的本地载波信号频率 ω_L 不等于收信号 $\cos \omega t$ 中的频率 ω 时,只需适当调整搜索函数,也可以取得满意的结果。

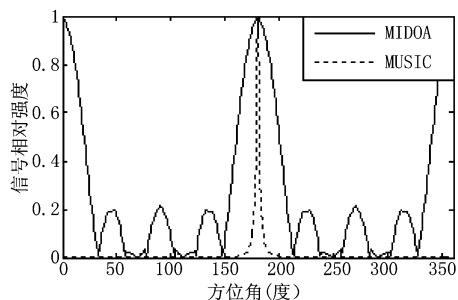


图5 MIDOA算法的谱搜索结果比较

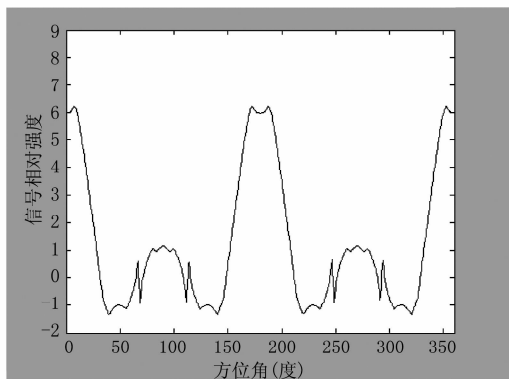
在图5中,同时也给出了基于子空间分解的 MUSIC 算法结果,如图中虚线所示。由图5可知,在峰值处,MIDOA 算法的主瓣较宽,分辨率低于 MUSIC 算法,但是,MUSIC 算法对旁瓣的定位不太明显,而 MIDOA 谱搜索算法却清晰的反应出了旁瓣特性。

5 算法误差控制及模拟仿真

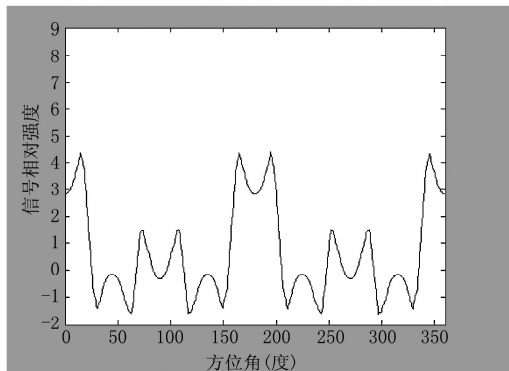
上一小节中介绍的算法实现以及仿真结果是在本地相干载波与收信号载波同步的情况下进行的,当存在下变频误差 $\Delta\theta$ 时,式(10)变为:

$$y = \frac{\cos(\Delta\theta + \frac{2\pi a}{\lambda} [\cos(\phi_k - \frac{n}{8} \cdot 2\pi)])}{\cos(\frac{2\pi a}{\lambda} [\cos(\phi_i - \frac{n}{8} \cdot 2\pi)])}, n = 0, 1, \dots, 7 \quad (13)$$

可以利用式(13)对存在下变频误差时的 MIDOA 谱搜索算法进行仿真研究,取其它仿真条件与图5的仿真条件相同,假设第 k 个用户的入射角 $\phi_k = 180^\circ$ 时,取下变频误差分别为 $\Delta\theta = 30^\circ, 60^\circ$ 时, MIDOA 算法的谱搜索结果见图6。



(a) $\Delta\theta = 30^\circ$



(b) $\Delta\theta = 60^\circ$

图6 下变频误差对 MIDOA 算法的影响

由图6可以看出,下变频过程中若存在相位误差,将对谱搜索图形产生相应的影响:会存在一对相邻较

近的最大峰值点,取它们的平均值即为所搜索的来波方向。这样,我们只需要对 MIDOA 算法的搜索结果进行相应处理,便能取出正确的 DOA 估计值。因此,存在下变频误差时,该算法仍然有效。MIDOA 算法谱搜索的结果也可用于调整所恢复的本地载波的相位。

从该算法给出的物理模型以及算法实现过程可以看出,该算法处理的信号是经过下变频和解相关器处理以后的信号,也就是说该算法是在基带实现的。利用该算法对解相关器输出采样后的信号进行处理便能完成 MS 的 DOA 估计。同时也大大降低了算法的复杂度。

6 结束语

对于智能天线系统中 DOA 的检测估计以及其实现方案的研究,仍然是包括 TD-SCDMA 系统在内的一个重要的研究方面,尤其是在目前存在大量理论研究的基础上给出一个具体、可行、有效的实施方案将显得尤为重要,其对智能天线系统的工程实现具有迫切、重要的意义。本文给出了 MIDOA 谱搜索算法的物理模型以及与之相匹配的数学模型,强调了工程实现中物理模型的重要性,具有很强的工程应用研究意义;其可以对 TD 系统基站收信号进行准确的 DOA 估计,对智能天线的工程实现及其复杂度的降低进行了有益的尝试。

在基于子空间法的 DOA 算法以及基于最佳性能准则算法中都用到大量的矩阵计算,其中当矩阵为 N 维时,一般矩阵的求逆计算、特征值分解和奇异值分解计算的复杂度为 $O(N^3)$ 。本文提出的 MIDOA 谱搜索算法无需矩阵运算,算法复杂度远远低于基于子空间的 DOA 算法以及基于最佳性能准则的算法。但是与其它的算法相比,当单独考虑该算法时,由于存在多径分量的检测和分离,会使设备的复杂度上升,如果考虑和多用户接收机等设备联合使用时,又可使设备的复杂度得到一定的下降。

文章讨论和研究的重点及其目的是为 TD 系统智能天 DOA 估计及其波束形成提供一个简单、可行的具体实施方案,以供进一步研究和探讨。需要强调的是文中做了好多的近似和假设,这样做的目的是尽量使文章中给出的 MIDOA 谱搜索方法物理模型清晰、数学分析简化,便于分析其特点。例如我们在研究时假设已经检测出了某一用户的某一径分量(一般为主径),来对该径信号进行分析和处理,当要考虑同一用户的其它多径分量时,只要能够检测出来,进行相似的过

程,最后将多径合并即可;至于多径的检测、分离已超出文章的范围,我们没有讨论,对此更加详细的可以参考我们文章[16]。客观地讲,文章给出的MIDOA谱搜索算法还需要进一步研究和细化,如何吸取其它DOA估计算法的优点,将是我们下一步的工作。

参考文献

- [1] Ayman F. Naguib and Arogyaswami Paulraj, "Performance of CDMA Cellular Networks with Base-Station Antenna Arrays," in Proc. International Zurich Seminar on Digital Communications, pp. 87-100, March 1994.
- [2] Josef Johannes Blanz, Apostolos Papathanassiou. "Smart Antennas for Combined DOA and Joint Channel Estimation in Time-Slotted CDMA Mobile Radio Systems with Joint Detection" [J]. IEEE transactions on vehicular technology, Vol. 49, No. 2. 2000. 49(2): 293-306.
- [3] Cedervall and R. L. Moses, "Efficient maximum likelihood DOA estimation for signals with known waveforms in the presence of multipath," [J]. IEEE Trans. 519, signal processing, 1997, 45(3): p. 808-811.
- [4] 沈建锋, 王宗欣. 智能天线中新的波束形成方法[J]. 电子学报, 2004, 3: 373-376.
- [5] J. Hyekyung, P. Kyung, K. Younghoon, and B. Seungchan, "Space-time joint detection in TD-SCDMA system with antenna array" [C], in Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2005. PIMRC 2005. IEEE 16th International Symposium on, 2005, pp. 2518-2521 Vol. 4.
- [6] 康绍莉, 李世鹤等. TD-SCDMA系统中基于上行参数的下行波束赋形算法[J]. 通信学报. 2002, 23(8): 67-71.
- [7] 李世鹤. 智能天线的原理和实现[J]. 电信建设. 2001 No. 4: 12-19.
- [8] C. Seungwon and S. Donghee, "A novel adaptive beam-forming algorithm for a smart antenna system in a CDMA mobile communication environment" [J], Vehicular Technology, IEEE Transactions on, vol. 49, pp. 1793-1806, 2000.
- [9] 谢显中, 基于TDD的第四代移动通信技术[M], 电子工业出版社, 2005. 01.
- [10] 王梓展, 智能天线技术中两种波束形成算法的研究[J]. 湖南大学硕士学位论文, 2005.
- [11] Aboulnasr T, Mayas K. A. "Robust variable step-size

LMS type algorithm analysis and simulation" [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1997, 45(3): 631-639.

- [12] 刘鸣等, 智能天线技术与应用[M], 机械工业出版社, 2007. 1: p. 71.
- [13] 马凉译. 无线通信中的智能天线 IS-95 和第3代CDMA应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 179-193.
- [14] 金荣洪等编著, 无线通信中的智能天线[M], 北京: 北京邮电大学出版社, 2006, 6.
- [15] 康行建. 天线原理与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 80-95.
- [16] Xiangdong Jia, Fan Li and Haiyang Fu, "Study on the Improvement Scheme of RAKE Receiver for CDMA Down-link" [C], The 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM2009).

作者简介



贾向东(1971-),男,甘肃渭源人,西北师范大学数学与信息科学学院讲师,南京邮电大学通信与信息工程学院在读博士,研究方向为无线通信、下一代网络、3G(B3G)技术、协作通信、压缩协作感知技术等。

E-mail: jiaxd@nwnu.edu.cn, d0825@njupt.edu.cn



傅海阳(1952-),男,浙江义乌人。南京邮电大学通信与信息工程学院教授、博士生导师,曾作为国家公派访问学者出国研修近两年。研究领域为移动互联网、移动通信与无线技术等。

E-mail: fuhay@njupt.edu.cn



杨龙祥(1966-),博士,教授。南京邮电大学通信与信息工程学院副院长,通信技术研究所所长,江苏省无线通信重点实验室副主任。目前从事协作通信、下一代移动通信系统关键技术等方向的研究,承担国家973、国家重大专项和863重点项目等课题。



李凡(1985-),男,江苏南京人。南京邮电大学通信与信息工程学院在读硕士研究生,主要研究方向为移动通信与无线技术。