

DS_ CDMA 系统中的 DOA 估计算法研究

刘文珂 , 马晨欣 , 金 梁

(信息工程大学信息工程学院 ,河南 郑州 450002)

摘 要 :DS_ CDMA 系统中 ,智能天线方向图的形成必须依赖于对移动台的到达方向估计 .为精确估计来波方向 ,首先分析研究了适用于 DS_ CDMA 系统的 DOA 估计的传统算法 :MUSIC 算法和 ESPRIT 算法 .这两种算法基于子空间分解 ,运算量大 ,不易于实时实现 .提出使用两种基于 MUSIC 算法和 ESPRIT 算法的改进算法进行 DOA 估计 ,计算量大大降低 .通过模拟实验证明 ,在 CDMA 系统多径信号环境下 ,两种改进算法易于实时实现 .

关键词 :DS_ CDMA ;DOA ;MUSIC 算法
中图分类号 :TN 82 文献标识码 :A

0 引言

1996 年 7 月 ,美国联邦通信委员会 (FCC) 发布 E911 条例 ,要求所有移动通信运营商必须在一定的时限内(2001 年 3 月以前) ,在满足一定的定位成功概率(67%)和定位精度(125 m 以内)的条件下 ,对所有手机用户实现定位^[1] .其后 ,针对移动通信网络移动台定位技术的研究日趋活跃 .随着移动通信市场的不断膨胀 ,移动台定位服务巨大的市场前景逐渐显现出来 ,如紧急救助电话服务 ,被盗车辆跟踪、智能运输系统以及移动通信网络的布置和优化等 .一些人甚至认为今后的移动通信系统中 ,定位技术将是一项推动许多潜力巨大的应用的关键技术 ,例如移动电子商务 .

由于 CDMA 在 3G 中所占据的重要地位 ,CDMA 系统中移动台定位技术成为研究的热点 .定位主要是通过对移动用户的波达方向(DOA)、多径到达时间差(TDOA)及离波方向(DOD)中的一个或几个参数估计来实现的^[2] .

1 传统阵列信号 DOA 估计方法

对阵列信号的 DOA 检测算法中 ,广泛采用的是 MUSIC 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 .

考虑采用 M 元天线阵列 ,若有 D 个窄带信号分别以 DOA θ_k ($k = 1, 2, \dots, D$)入射 ,计及测量噪声和所有信号源的来波 ,则第 i 个阵元的输出信号为^[3]

$$x_i(t) = \sum_{k=1}^D \alpha_k s_k(t) e^{-j\omega(t-\tau_k)} + n_i(t) \quad (1)$$

式中 : $n_i(t)$ 为测量噪声 ;所有标号 i 表示第 i 个阵元 ; k 表示第 k 个信号源 ; α_k 为阵元对第 k 个信号源信号的影响 ,设 $\alpha_k = 1$; ω 为信号的中心频率 , λ 为载波波长 .

假定各阵元的噪声是零均值白噪声 ,方差为 σ^2 ,且与信号不相关 .

将式 (1) 写成向量形式 ,可得阵列输出信号矩阵 :

$$X(t) = AS(t) + N(t) \quad (2)$$

式中 : $X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]^T$;
 $A = [\alpha(\theta_1), \alpha(\theta_2), \dots, \alpha(\theta_D)]$;
 $S(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_D(t)]^T$;
 $N(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)]^T$;
 $\alpha(\theta_k) = [1, e^{-j\omega\tau_k}, \dots, e^{-j\omega(M-1)\tau_k}]^T$;
 $\tau_k = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta_k$.

$X(t)$ 的协方差矩阵可写成 :

收稿日期 2005 - 09 - 30 ;修订日期 2005 - 11 - 03

基金项目 :河南省杰出人才创新基金资助项目(0421000100)

作者简介 :刘文珂(1971 -) ,男 ,山东聊城人 ,解放军信息工程大学博士研究生 ,主要从事通信与信息系统方面的研究

$$\mathbf{R}_{xx} = E[\mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t)] = \mathbf{A}\mathbf{R}_{ss}\mathbf{A}^H + \sigma^2\mathbf{I} \quad (3)$$

若 D 个窄带信号互不相关, \mathbf{R}_{ss} 为对角矩阵.

MUSIC 算法通过将 $\mathbf{X}(t)$ 的协方差矩阵进行特征分解, 找出最小特征值的个数 n_E , 然后求出信号源的个数 $D = M - n_E$, 最小特征值即为噪声功率 σ^2 . 为获取 θ^k , 首先求出 n_E 个最小特征值对应的特征向量 $\mathbf{v}_i, i = D+1, \dots, M$, 构造 $M \times (M-D)$ 维的噪声矩阵 \mathbf{E}_N :

$$\mathbf{E}_N = [\mathbf{v}_{D+1}, \mathbf{v}_{D+2}, \dots, \mathbf{v}_M] \quad (4)$$

构造如下函数:

$$P_{MU}(\theta) = \frac{l}{\alpha^H(\theta)\mathbf{E}_N\mathbf{E}_N^H\alpha(\theta)} \quad (5)$$

连续改变 θ 值, 其最大值所对应的 θ 即为信号源方向的估计值.

另一种传统 DOA 估计算法是 ESPRIT 算法, 该算法是由 Roy 等人于 1986 年提出的, 它利用矩阵对的广义特征值来估计 DOA. ESPRIT 算法步骤如下:

(1) 利用已知的观测数据 $x(l), \dots, x(N)$ 来估计观测数据的自相关函数 $R_{xx}(0), R_{xx}(1), \dots, R_{xx}(m)$.

(2) 由估计的自相关函数构造 $m \times m$ 的自相关矩阵 \mathbf{R}_{xx} 和 $m \times m$ 的互相关矩阵 \mathbf{R}_{xy} , 其中 $y(n) = x(n+1)$.

(3) 求 \mathbf{R}_{xx} 的特征值分解, 对于 $m > p$ (p 为阵元数目), 最小特征值为噪声方差 σ^2 的估计.

(4) 利用 σ^2 计算 $\mathbf{C}_{xx} = \mathbf{R}_{xx} - \sigma^2\mathbf{I}$ 和 $\mathbf{C}_{xy} = \mathbf{R}_{xy} - \sigma^2\mathbf{Z}$, 其中 \mathbf{Z} 是一个左下副对角线均为 1, 其它元素均为 0 的矩阵.

(5) 求矩阵束 $\{\mathbf{C}_{xx}, \mathbf{C}_{xy}\}$ 的广义特征值分解, 得到位于单位圆上的 p 个广义特征值 $e^{j\omega_i}, i = 1, \dots, p$, 据此可以确定波达方向 $\theta_i = \arcsin(\omega_i\lambda/2\pi d)$.

2 适用于 DS-CDMA 信号的算法

MUSIC 算法在信号源独立且信号源数目小于阵元数目的情况下有很高的分辨率, 但它本身也存在着一些弱点: ①无法分辨相关信号源; ②信号源数目大于阵元数目时算法失效; ③抗多径能力弱; ④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 等客观准则, 但在信号恶化的条件下, 经常会出现误判; ⑤谱峰高低不能与信号能量相联系. 近年来, 人们提出很多基于 MUSIC 的改进算法, 但都以增加计算复杂度为代

价, 而且信号源数目大于阵元数目问题仍无法解决.

在 DS-CDMA 系统中, 由于天线阵元数远远小于总的用户路径数, 因而传统 DOA 估计算法无法直接使用. 笔者提出使用两种改进 MUSIC 类算法对 DS-CDMA 中的移动台进行 DOA 估计. 这两种算法分别是基于最大特征值的 DOA 估计和矩阵点除算法.

2.1 智能天线基于最大特征值的 DOA 估计

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. 在 DS-CDMA 系统的针状波束智能天线的 DOA 检测中, 在分析 MUSIC 算法和 R 矩阵特性的基础上, 可以使用用于针状波束智能天线的改进算法: 最大特征值法, 该算法流程如下^[4]:

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

(2) 求出 \mathbf{R} 所对应的最大特征值和特征向量 \mathbf{e}_s ;

(3) 构造空间谱函数 $P(\theta), P(\theta) = \frac{\alpha^H(\theta)\alpha(\theta)}{\alpha^H(\theta)\alpha(\theta) - \alpha^H(\theta)\mathbf{e}_s\mathbf{e}_s^H\alpha(\theta)}$;

(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: ①只需要求解一个特征值与特征向量, 计算量减小; ②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; ③只需搜索最大谱峰, 搜索算法简单; ④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.

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较远, 所以在考虑同信道干扰和多径, 以及电磁环境起伏引起 \mathbf{R} 变化时, 所对应的最大特征矢量仍然比较稳定. 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变化.

2.2 矩阵点除算法估计 DOA

该算法仿照 ESPRIT 算法, 将天线阵列分为前后两组, 并设由这两组阵元形成的对应于 $\mathbf{Y}_{kp}(i)$ 的矢量分别为 $\mathbf{y}_{kp}(i), \mathbf{z}_{kp}(i)$, 则有^[5]:

$$\begin{cases} y_{kp}(i) = A_{kp}S_{kp}(i) + n_y(i) \\ Z_{kp}(i) = A_{kp}\Phi_{kp}S_{kp}(i) + n_z(i) \end{cases} \quad (10)$$

其中： A_{kp} 为前一组阵元的导向矢量，即 $a(\theta_{kp}) = [A_{kp} \exp(-j(M-1)\pi \sin\theta_{kp})]^T$ ； Φ_{kp} 为旋转矩阵，且 $\Phi_{kp} = \text{diag}[\exp(-j\pi \sin\theta_{kp})]$ ； $n_y(i)$ ， $n_z(i)$ 分别为各组阵元上的噪声向量。

为简化书写，将式(10)简记为

$$\begin{cases} y(i) = AS(i) + n_y(i) \\ Z(i) = A\Phi S(i) + n_z(i) \end{cases} \quad (11)$$

接下来，求 $y(i)$ 的自相关函数及 $y(i)$ 与 $z(i)$ 的互相关函数

$$\begin{cases} R_{yy} = AE[SS^H]A^H + \sigma^2 I \\ R_{yz} = AE[SS^H]\Phi^H A^H + \sigma^2 \Lambda \end{cases} \quad (12)$$

其中： Λ 是一个左下副对角线均为 1，其它元素均为 0 的矩阵。

将 $\sigma^2 I$ ， $\sigma^2 \Lambda$ ，分别从 R_{yy} ， R_{yz} 中减掉，可得

$$\begin{cases} C_{yy} = R_{yy} - \sigma^2 I = APA^H \\ C_{yz} = R_{yz} - \sigma^2 \Lambda = AP\Phi^H A^H \end{cases} \quad (13)$$

其中： $P = E[SS^H]$ ，在典型的 ESPRIT 算法中， Φ 值的求取是通过计算 $\{C_{yy}, C_{yz}\}$ 的广义特征值来实现的。但对式(13)而言，由于缺省的信源数为 1，因此 Φ 的维数也为 1，即 Φ 本质上是一个数。此时，采用式(14)所示的矩阵点除算法即可方便地求出 Φ 值，从而避免广义特征值分解运算。

$$[\Phi I]_{m,m'} = [C_{yy}]_{m,m'} \backslash [C_{yz}]_{m,m'} \quad (14)$$

矩阵点除运算就是将两各矩阵的对应元素进行除法操作的一种运算。不难看出，只要对 ΦI 矩阵中的各元素进行简单的算术平均就能得到最终的 Φ 值。但 C_{yy} ， C_{yz} 的获取并不容易，因为 σ^2 并不容易估计（采用最小的广义特征值来估计 σ^2 将使算法的优势几乎全部丧失）。

仔细分析 R_{yy} 与 R_{yz} 中的元素，不难发现：对于这两个矩阵，若不考虑主对角线以及左下副对角线上的元素，并记由其它元素形成的 $(M-2) \times (M-2)$ 维矩阵分别为 \tilde{R}_{yy} ， \tilde{R}_{yz} ，则依然可通过 \tilde{R}_{yy} 与 \tilde{R}_{yz} 的矩阵点除算法来求得 Φ 值，即

$$[\Phi I]_{m,m'} = [\tilde{R}_{yy}]_{m,m'} \backslash [C_{yz}]_{m,m'} \quad (15)$$

这样省略了对 σ^2 的估计，方便地实现了 Φ 值的求取。

该算法运算过程为：首先计算 \tilde{R}_{yy} 与 \tilde{R}_{yz} 的相位，然后通过计算对应元素之差并取平均来求得

Φ 值，最后根据关系式 $\theta = \arcsin(\arg(-\Phi)/\pi)$ 求出 θ 值。

为了比较以上几种算法的性能，使用 Matlab 软件进行了 Mont Carlo 仿真实验，实验中使用 31 位 GOLD 码对用户数据进行扩频调制，假设阵列天线含 4 个阵元，信号波长与阵元间距之比为 0.5，并假设阵列天线接收到 3 个用户信号，每个用户有 3 条径。实验证明，两种改进算法的运算速度分别是传统算法运算速度的 11 倍和 8.4 倍，如果使用 DSP 器件，可以实时实现。

5 结论

定位主要是通过对移动用户的波达方向（DOA）、多径到达时间差（TDOA）及离波方向（DOD）中的一个或几个参数估计来实现的^[6]。笔者分析研究了适用于 DS-CDMA 系统的 DOA 估计的 MUSIC 算法和 ESPRIT 算法。由于这两种算法基于子空间分解和谱峰搜索，运算量大，不易于实时实现。而随后介绍的两种改进算法，智能天线基于最大特征值的 DOA 估计和矩阵点除算法，基于传统的 MUSIC 算法和 ESPRIT 算法，而计算量却大大降低，易于实时实现。通过模拟实验对这些算法的性能、计算复杂度进行了比较，对于 DS-CDMA 系统的 DOA 估计的实现具有一定的指导意义。

参考文献：

[1] GODARA L C. Application of antenna arrays to mobile communications, part II: Beam-forming and direction-of-arrival considerations[J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(8): 1195 ~ 1245.

[2] LEI Z D, LIM T J. Estimation of directions of arrival of multipath signal in CDMA systems[J]. IEEE Trans on Commu. 2000, 48(6): 1022 ~ 1028.

[3] BLANZ J J, PELETER, MACTT. Smart antennas for combined DOA and joint channel estimation in time-slotted CDMA mobile radio systems with joint detection[J]. IEEE Trans on Vehicular Tech, 2000, 49(3): 293 ~ 306.

[4] 胡 铭,冯正和. 针状波束智能天线中基于最大特征值的 DOA 估计[J]. 电子学报, 2000, 28(9): 66 ~ 69.

[5] 王维新,吴镇扬. DS-CDMA 系统中基于矩阵点除算法的 DOA 估计[J]. 应用科学学报, 2004, 30(6): 149 ~ 152.

[6] 田孝华,廖桂生. 用一种新的空时导向矢量估计 CDMA 信号波达方向与多径时延[J]. 电子学报, 2002, 30(12): 1876 ~ 1878.

DOA Algorithms for CDMA System

LIU Wen - ke , MA Chen - xin , JIN Liang

(School of Information Engineering , Information Engineering University , Zhengzhou 450002 ,China)

Abstract : In DS _ CDMA system , the producing of the direction plot of intelligent antennas depends on the DOA estimation for the mobile . In this paper , first of all , the traditional MUSIC and ESPRIT algorithms are studied , which is based on the decomposition of subspaces , and with a large computation quantities . And then the improved DOA algorithms are expatiated and the performance of these algorithms is analyzed . Simulations show that the improv algorithms can be realized in real time .

Key words : DS _ CDMA ; DOA ; MUSIC algorithm

(上接第 47 页)

参考文献 :

[1] 杨大智 . 智能材料与智能结构 [M] . 天津 : 天津大学出版社 , 2000 .

[2] FU X , LU W , CHUNG D D . Improving the strength - sensing ability of carbon fiber - reinforced by ozone treatment of the fibers [J] . Cem Concr Res , 1997 , 28 (2) : 183 ~ 187 .

[3] CHEN P W , CHUNG D D . Concrete as a new strain/stress sensor [J] . Composites , 1996 , 27B (Part B) : 11 ~ 13 .

[4] 姚 武 , 陈 兵 , 吴科如 . 三点弯曲负荷下碳纤维水泥基材料机敏性研究 [J] . 中国学术期刊文摘 , 2001 , 8 : 1049 ~ 1051 .

[5] 蒋正武 , 孙振平 , 王新友 . 导电混凝土技术 [J] . 混凝土 , 2000 (9) : 55 ~ 58 .

Research on Alert and Resourceful Characteristic of Carbon Fiber Concrete

WANG Chun - yang^{1 2}

(1 . School of Civil Engineering and Mechanics , Huazhong Univervsity of Science and Technology , Wuhan 430074 , China 2 . School of Civil Engineering , Pingdingshan Institute of Technology , Pingdingshan 467001 , China)

Abstract : In this paper , we make the carbon fiber concrete of different volume quantities (0 . 0 % 、 0 . 2 % 、 0 . 4 % 、 0 . 8 % and 1 . 2 %) and compare that conductance capability , with the test sample being a cube of 100mm × 100mm × 100mm . This paper studies the relationship between the concrete pressure and the resistance rate under the action of monotony and the circulating load when different quantities of carbon fiber are added into the concrete . The study results indicate that , with the increase of carbon fiber , impedance curve gradually moves towards the left . When mixed into the same carbon fiber quantity is 1 . 0 % , differ age material ' s AC impedance chart is discrepancy very much , along with to hydrate age ' s add , C - S - H gel isa great deal of form , the solution resistance at the concrete is gradually aggrandizement , the carbon fibre of here qua transmit electricity quality disperse would leading effect of conductance . along with the add of exterior load , the transmit electricity quality of concrete is almost nothing change , till breakage , resistance change rate tempestuousness add , and that the resistance change rate along with inside stress linearity add of corbon fibre concrete in elasticity phase , when near peak value load , resistance rate just gradually add , indicate the test sample would be about to breakage .

Key words : alert and resourceful ; carbon fiber ; concrete ; model