

# 基于相控阵单通道接收机高分辨 DOA 估计的跟踪算法<sup>1</sup>

叶中付 吴涛

(中国科技大学信号统计处理研究室 合肥 230027)

**摘要** 本文提出一种基于相控阵单通道接收机系统的波达方向 (DOA) 高分辨跟踪算法。这种跟踪算法是用特定权实现单通道接收机高分辨测向的进一步完善。在信号源不相关的情况下,通过对权矢量的循环使用和功率信号的更新处理,实现对 DOA 时变信号源的跟踪。计算机模拟结果表明该方法具有良好的效果。

**关键词** 相控阵, 单通道接收机, 特定权, 波达方向估计, 跟踪算法

**中图分类号** TN851

## 1 引言

相控阵接收机系统在雷达等领域已获得广泛应用,以相控阵系统为基础的智能天线在软件无线通信中的重要作用已被充分认识<sup>[1]</sup>,技术研究方兴未艾。相控阵单通道接收机系统作为其中的一种技术,也引起学者的高度重视。同多接收机系统相比,相控阵单通道接收机系统不但大大降低了系统的硬件造价,而且避免了多接收机系统通道一致性问题,是一种性能价格比可以被普遍接受的方案。利用单通道接收机实现高分辨测向的研究已经取得了一定进展<sup>[2-5]</sup>。但到目前为止单通道接收机实现高分辨测向的各种方法都是以 DOA 是时不变的信号源为前提的。考虑到在很多情况下各种信号源的 DOA 都是时变的,例如移动通信信号和雷达目标信号,因此有必要利用单通道接收机对这类信号源进行研究,实现 DOA 的高分辨跟踪。

本文以实现单通道接收机高分辨测向的特定权方法<sup>[5]</sup>为基础。在这种方法中,我们通过引入一组特殊的权矢量,获得单接收机的一组功率输出序列。在信号源不相关的前提下,对这组功率信号进行一系列处理就可以重建经过时空平滑处理<sup>[6]</sup>后的原阵列相关矩阵。对该矩阵采用任何一种特征结构算法<sup>[7]</sup>就可以实现高分辨测向。与文献<sup>[8]</sup>中以多通道接收机系统为基础的方法不同,我们采用循环使用特定权矢量和不断更新功率信号(引入一个新的功率信号、舍去一个旧的功率信号)的方法,实现对 DOA 时变的信号源的跟踪测向。计算机模拟的结果表明在 DOA 随时间缓慢变化的条件下,该方法有良好的跟踪效果。

## 2 特定权方法实现单通道接收机超分辨测向的基本原理

为讨论方便,本文以直线均匀等间距相控阵为背景。设有一个含有  $N$  个等间距传感器的直线阵,每个阵元后接一个移相器(其幅值和相位可调),其对系统的影响相当于加入权矢量。这个阵的总响应  $y(t)$  可以写成如下形式:

$$y(t) = \sum_{n=1}^N w_n(t)x_n(t) = \mathbf{w}(t)\mathbf{x}(t), \quad (1)$$

<sup>1</sup> 1998-05-28 收到, 1999-01-28 定稿  
安徽省自然科学基金资助课题

其中  $\mathbf{w}(t) = [w_1(t), w_2(t), \dots, w_N(t)]$  代表阵列复权矢量,  $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T$  为阵列输出矢量,  $[\cdot]^T$  其表示转置。

当不存在相关信号源时, 多通道接收机输出的相关矩阵  $\mathbf{R} = E\{\mathbf{x}(t)\mathbf{x}(t)^H\}$  为 Toeplitz-Hermite 矩阵<sup>[6,7]</sup>, 其中  $(\cdot)^H$  表示共轭转置。对其采用特征结构方法就可以实现高分辨测向。而在单通道接收机系统中我们能够获得的信息只有平均输出功率  $\sigma_y^2 = E\{|y(t)|^2\} = \mathbf{w}\mathbf{R}\mathbf{w}^H$  的估值, 显然仅由  $\sigma_y^2$  是无法重构  $\mathbf{R}$  的。但我们可以采用对时间域上  $\sigma_y^2$  序列进行信号处理的方法来解决这个问题。

令引入的一组特定矢量权为  $\mathbf{w}_l, (l = 1, 2, \dots, L)$ , 得到通道单接收机相应的一组平均功率信号为  $\sigma_{y_l}^2 = E\{|y_l(k)|^2\} = \mathbf{w}_l\mathbf{R}\mathbf{w}_l^H, l = 1, 2, \dots, L$ 。我们在文献 [5] 中已经证明, 只要所采用的第  $l$  个权矢量值为  $\mathbf{w}_l = [e^{jld}, e^{j2ld}, \dots, e^{jNld}]$ ,  $l = 1, 2, \dots, L$ , 并且满足  $d = 2\pi/L, L > 2 \times (N - 1)$  时, 就可以重构阵列输出的相关矩阵  $\mathbf{R}$ , 从而实现高分辨测向。

重建阵列输出的相关矩阵  $\mathbf{R}$  的具体过程如下:

(1) 权矢量为  $\mathbf{w}_l = [e^{jld}, e^{j2ld}, \dots, e^{jNld}]$  条件下的单通道接收机平均输出功率为  $\sigma_{y_l}^2$ , 由功率序列  $\sigma_{y_l}^2, l = 1, 2, \dots, L$  计算

$$\hat{\mathbf{R}}_l = N\mathbf{g}_l\sigma_{y_l}^2\mathbf{g}_l^H N = N\mathbf{g}_l\mathbf{w}_l\mathbf{R}(\mathbf{g}_l\mathbf{w}_l)^H N = N\mathbf{P}_l\mathbf{R}\mathbf{P}_l N, \quad (2)$$

其中  $\mathbf{g}_l = \frac{1}{N}\mathbf{w}_l^H = \frac{1}{N}[e^{-jld}, e^{-j2ld}, \dots, e^{-jNld}]^T, \mathbf{P}_l = \mathbf{g}_l\mathbf{w}_l, l = 1, 2, \dots, L$ 。

(2) 对  $\hat{\mathbf{R}}_l$  从  $l = 1$  到  $L$  相加, 可得

$$\hat{\mathbf{R}}' = \sum_{l=1}^L \hat{\mathbf{R}}_l, \quad (3)$$

$\hat{\mathbf{R}}'$  是阵列输出的相关矩阵  $\mathbf{R}$  的一个有偏估计。

(3) 对  $\hat{\mathbf{R}}'$  进行简单的处理重建阵列输出的相关矩阵  $\mathbf{R}$

$$\mathbf{R}(m, n) = (1/L)\{\hat{\mathbf{R}}'(m, n)/(N - \text{abs}(m - n))\}, \quad 1 \leq m \leq N, \quad 1 \leq n \leq N, \quad (4)$$

$\text{abs}(\cdot)$  表示取绝对值。

对  $\mathbf{R}$  采用进行特征结构方法就可以实现单通道接收机高分辨测向。

### 3 跟踪算法的实现

在实际中, 我们无法得到  $\sigma_{y_l}^2 (l = 1, 2, \dots, L)$  的真值, 只能每次用  $K$  个快拍来估计每一个权矢量的单通道接收机平均输出功率  $\hat{\sigma}_{y_l}^2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |y_l(k)|^2$ 。我们约定每  $K$  个样本为一个估值周期。由第 2 节可知, 特定权方法实现单通道接收机对不相关信号源的高分辨测向的一个前提条件是在  $L$  (至少为  $2 \times (N - 1)$ ) 个估值周期内信号的 DOA 不变。当信号源的 DOA 随时间变化时, 通过权的循环使用和功率信号的更新处理, 可以实现对信号源的跟踪测向。

根据上述思想, 由 (2) 式  $\hat{\mathbf{R}}_l$  可以表示成以下形式:

$$\hat{\mathbf{R}}_l = f\{y(t_0 + (l - 1) \times K) : y(t_0 + l \times K - 1, \mathbf{w}_l)\}, \quad l = 1, 2, \dots, L, \quad (5)$$

其中  $f\{\cdot\}$  表示由第  $l$  个估值周期的  $K$  个样本和特定权矢量  $w_l$  计算  $\hat{R}_l$  的函数,  $t_0$  为时间初值. 由 (3) 和 (4) 式可知, 由  $\hat{R}_1, \hat{R}_2, \dots, \hat{R}_L$  获得阵列输出相关矩阵的估计值  $\hat{R}$ .  $\hat{R}$  可以记成  $R_L$ ,  $R_L$  表示由第  $l$  个估值周期 (权矢量取  $w_1$ ) 到第  $L$  个估值 (权矢量取  $w_L$ ) 中的  $L \times K$  个样本所获得的相关矩阵估计值.

要实现 DOA 随时间变化的信号源跟踪, 必须采用当前的接收信号来估计相关矩阵. 一种简单的方法是: 在每次完成跟踪测向后, 按照第 2 部分所述的要求, 通过重新采集接收信号样本, 更新功率信号, 再由这组新的功率信号估计相关矩阵的当前值. 这种方法固然能够达到跟踪要求, 但是大量的中间运算工作被抛弃, 造成运算量的巨大浪费, 同时也使相邻两次跟踪测向的时间间隔明显变长, 不利于连续跟踪.

一种优良的方法应当是最大程度地利用已有的中间工作结果, 只需最少的新的工作就能实现目标跟踪. 一般地, 在由  $\hat{R}_{m-L}, \hat{R}_{m-L+1}, \dots, \hat{R}_{m-1}$  获得阵列输出相关矩阵的当前估计值  $R_{m-1}$  并完成跟踪测向后, 由第  $m$  个估值周期 (权矢量取  $w_m$ ) 的  $K$  个样本估计功率信号, 实现功率信号更新, 在此基础上用特定权矢量  $w_m$  计算出  $\hat{R}_m$  并取代  $\hat{R}_{m-L}$  (即相当于舍去一个旧的功率信号). 这种更新计算相关矩阵的思想可以用下式表达

$$R_m = g\{\hat{R}_{m-L+1}, \hat{R}_{m-L+2}, \dots, \hat{R}_m\}, \quad m = L, L+1, \dots \quad (6)$$

值得注意的是: 在计算  $\hat{R}_{m-L+1}, \hat{R}_{m-L+2}, \dots, \hat{R}_m$  时, 其对应的权矢量组  $w_{m-L+1}, w_{m-L+2}, \dots, w_m$  的取值至关重要. 只要我们在  $m = L, L+1, L+2, \dots$  时, 令所取的一组权矢量  $(w_{m-L+1}, w_{m-L+2}, \dots, w_m)$  分别为  $(w_1, w_2, \dots, w_L), (w_2, w_3, \dots, w_L, w_1), (w_3, w_4, \dots, w_L, w_1, w_2), \dots$ , 即通过循环取权矢量保证每个  $R_m$  估值所对应的  $L$  个权矢量都是  $\{w_1, w_2, \dots, w_L\}$  的组合, 只是排列次序不同, 就可以满足第 2 节所述的重建阵列输出相关矩阵的要求. 在信号源是不相关窄带信号源并且 DOA 随时间缓慢变化时, 不断对  $R_m$  进行高分辨处理就可实现对 DOA 时变的信号源的连续跟踪.

下面我们给出利用特定权矢量方法实现单通道接收机对 DOA 时变的窄带不相关信号源进行跟踪测向的具体方案:

- (1) 由阵元数  $N$  确定权矢量的个数  $L$ , 一般取  $L = 2 \times N$ ;
- (2) 计算  $w_l, g_l, P_l, l = 1, 2, \dots, L$ ;
- (3) 置初值:  $\hat{R}_l = 0, l = -L+1, -L+2, \dots, 0$ ;
- (4) 在第  $l(l = 1, 2, 3, \dots, L, L+1, \dots)$  估值周期, 令所取权矢量为  $w_l = w_{\text{rem}(l, L)}$ , 其中  $\text{rem}(\bullet, \bullet)$  表示求余运算, 由 (5) 式获得  $\hat{R}_l$ ;
- (5) 在第  $m$  估值周期结束时, 按 (6) 式估计出相关矩阵的当前值  $R_m$ ;
- (6) 对  $R_m$  采用特征结构方法估计信号源的 DOA 当前值;
- (7) 进入新的第  $l+1$  估值周期, 将值  $l+1$  赋予  $l$ , 重复 (3) 至 (6) 直至跟踪任务完成.

由上述方案可以知道当  $m < L$  时处于初始化过程, 此时还不能对目标进行正确测向; 当  $m \geq L$  时已经追上信号源的变化, 可以对目标 DOA 的变化进行跟踪.

#### 4 实验结果和性能分析

为了验证上述算法的正确性, 本节给出了计算机模拟的结果. 我们约定: 以下各图中虚线绘制的是信号源 DOA 的实际变化曲线, 实线绘制的是 DOA 估计值的变化曲线. 每个估值周期结束时采用 TLE-ESPRIT 方法<sup>[7]</sup>进行 DOA 估计.

**模拟实验 1** 用 15 个阵元的均匀线阵 (阵元间距为半波长) 对两个 DOA 随时间缓慢变化的不相关的窄带信号源进行跟踪测向, 两个信号源等功率入射, 各阵元的噪声互不相关且功率相等。信号源信噪比为 10dB, 每个估值周期中的样本数  $K$  为 50, 权的个数为 30。一个信号源的 DOA 从  $-5^\circ$  开始每隔一个样本角度减少  $0.0005^\circ$ , 每隔一个估值周期角度减少  $0.025^\circ$ ; 另一个信号源的 DOA 从  $5^\circ$  开始每隔一个样本角度增  $0.0008^\circ$ , 每隔一个估值周期角度增加  $0.04^\circ$ 。模拟结果如图 1 所示。

**模拟实验 2** 除两个信号源的 DOA 变化趋势是缓变-不变-缓变外, 其他条件同模拟实验 1。模拟结果如图 2 所示。

**模拟实验 3** 除两个信号源的 DOA 变化趋势是缓变-急变-缓变外, 其他条件同模拟实验 1。模拟结果见图 3 所示。

**模拟实验 4** 除样本数  $K$  为 10 外, 其他条件同模拟实验 1。模拟结果见图 4 所示。

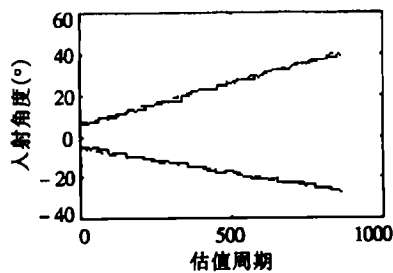


图 1 模拟实验 1 的跟踪测向结果

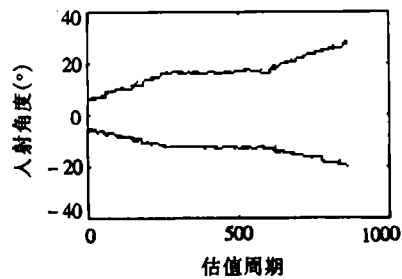


图 2 模拟实验 2 的跟踪测向结果

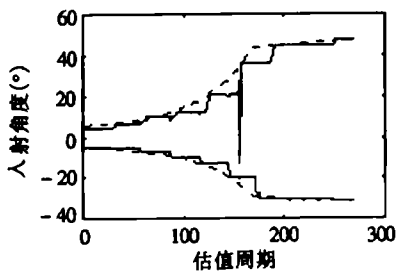


图 3 模拟实验 3 的跟踪测向结果

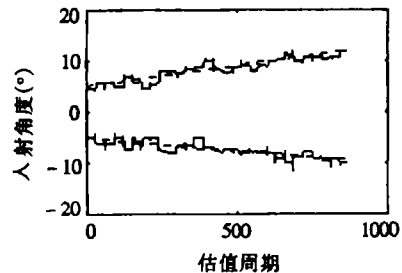


图 4 模拟实验 4 的跟踪测向结果

模拟试验表明, 在信号源不相关的条件下基于特定权方法的单通道接收机高分辨跟踪测向是可行的。当信号源的 DOA 是时不变或缓慢变化时, 跟踪测向的误差较小, 如图 1 和图 2 所示; 图 4 的结果表明样本数  $K$  的取值必须合适, 如取值过大会导致一个估值周期内 DOA 变化速度过大, 产生较大的跟踪误差, 如图 3 所示; 过小会不满足统计平均的要求, 也会导致较大误差, 如图 4 所示。 $K$  的取值应当根据信号源的 DOA 变化程度和对跟踪精度的要求选取。

## 5 结束语

在信号源不相关的条件下, 基于特定权方法的单通道接收机跟踪测向不仅理论上是正确的, 模拟结果证明也是可行的。当信号源的 DOA 不变或缓慢变化时, 跟踪测向的误差较小; 当信号源的 DOA 急剧变化时, 跟踪测向会产生较大误差。这表明本跟踪算法的前提条件

是信号源 DOA 的变化趋势不能太快。估值周期中的样本数的取值应当根据信号源的 DOA 变化程度和对跟踪精度的要求选取。

### 参 考 文 献

- [1] Kennedy J, Sullivan M C. Direction finding and "smart antennas" using software radio architectures. *IEEE Communications Magazine*, 1995, 33(5): 62-68.
- [2] Wahlberg B G, Mareels Iven M Y, Webster Ian. Experimental and theoretical comparison of some algorithms for beamforming in signal receiver adaptive arrays, *IEEE Trans. on AP*, 1991, AP-39(1): 21-28.
- [3] 赵益民, 鞠德航. 单通道接收机实现空间谱估计测向. *通信学报*, 1997, 18(2): 7-11.
- [4] 赵益民, 鞠德航. 协方差矩阵的权微扰算法. *电子学报*, 1996, 24(3): 125-126.
- [5] 叶中付, 吴涛. 用特定权方法实现基于单通道接收机的超分辨测向. *已投通信学报*.
- [6] 叶中付, 沈凤麟. DOA 估计中自相关矩阵的时空二维估计方法. *信号处理*, 1995, 11(3): 206-212.
- [7] Pillai S U. *Array signal processing*. Springer Verlag, World Publishing Corp, 1990: 28-76.
- [8] 周云钟, 陈天麒, 黄香馥. 高分辨信号 DOA 估计的跟踪算法. *电子科学学刊*, 1997, 19(3): 300-305.

## HIGH-RESOLUTION DOA TRACKING ALGORITHM BASED ON PHASED ARRAY WITH A SINGLE CHANNEL RECEIVER

Xie Zhongfu    Wu Tao

(*University of Science and Technology of China, Hefei 230027*)

**Abstract** This paper presents a high-resolution DOA tracking algorithm based on phased array with a single channel receiver. It is an improved algorithm of the method using specific weights to realize high-resolution direction finding with single channel receiver. When signals are uncorrelated, by using the specific weights in turn and refreshing the power measurements continuously, the time-changed DOA of signals can be traced. The computer simulation results show that the algorithm is effective.

**Key words** Phased array, Single channel receiver, Specific weight, DOA estimation, Tracking algorithm

叶中付: 男, 1959 年生, 博士, 副教授, 主要从事通信, 统计与阵列信号处理方面的研究.

吴涛: 男, 1975 年生, 硕士生, 专业为通信与电子工程.