

## 一种新的多目标角跟踪方法

张怀根 张林让 吴顺君 刘寅

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 该文提出了一种新的多目标角跟踪算法。首先利用高分辨处理估计出目标的个数及其初始角度,接着通过对协方差矩阵的更新得到不同时刻各个目标的角度。该算法减小了阵元噪声的影响,相邻时刻估计得到的角度之间是自动关联的,省去了运算量较大的数据关联过程。此外,文中还提出了进一步提高性能两种方法:通过引入预测值减小了算法中两个近似带来的误差;采用记忆跟踪法来处理有目标交汇的情况。仿真结果表明,该算法有较高的跟踪性能。

**关键词:** 多目标跟踪; 角跟踪; 数据关联; 阵元输出

中图分类号: TN953

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)12-2840-03

## A New Multiple Targets Angle Tracking Method

Zhang Huai-gen Zhang Lin-rang Wu Shun-jun Liu yin

(National Lab. of Radar Signal Processing, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In this paper a new multiple targets angle tracking algorithm is proposed. First, high-resolution method can be used to derive the number of targets and the targets, initial angles. Then the angle of each target at different time could be estimated by updating the covariance matrix estimated through the sensor outputs. In this algorithm, the angles estimated at conjoint time are auto associated, so the process of data association could be omitted. Furthermore, this paper presents two modified methods: one is that the predicted angles are introduced to decrease the errors caused by two approximations, and the other is that the memory track are used when some targets are crossed. Simulation results show the algorithm has high tracing performance.

**Key words:** Multiple targets tracking; Angle tracking; Data association; Sensor outputs

### 1 引言

在传统的多目标跟踪中,最常见的方法为目标状态模型方法<sup>[1]</sup>,建立起包括距离和速度的状态模型,然后再用卡尔曼滤波等方法进行跟踪。有人将阵列信号处理的一些方法用到多目标跟踪中来,仅仅在角度上对目标进行跟踪。比较有代表性的算法为子空间跟踪算法,如PAST<sup>[2]</sup>算法,OPAST<sup>[3]</sup>算法,NP<sup>[4]</sup>算法,API<sup>[5]</sup>算法等等。这些算法利用当前时刻阵元接收到的数据对先前估计得到的子空间进行更新,具有较低的运算量。但要想完成跟踪过程,还必须有以下两个过程:首先需运用MUSIC<sup>[6]</sup>算法或者ESPRIT<sup>[7]</sup>算法估计目标的角度;其次由于前后时刻估计得到的各个目标的角度不是自动关联的,此时数据关联算法<sup>[8]</sup>不可避免,其计算量为 $N!$ ( $N$ 为目标个数)。当目标的个数较多时,这一类算法的运算量太大。

为了避免运算量较大的数据关联过程,文献[9]提出了一种多目标角跟踪算法,但它只有 $(M-1)$ 个独立的方程,其

中 $M$ 为阵元的个数。当目标的个数 $N$ 大于 $(M-1)$ 时则不能适用,而且当目标的角度交汇时此算法会出现关联错误的情况。文献[10]利用估计得到的协方差矩阵与构建的协方差矩阵的差的范数最小得到不同时刻各个目标的角度。文献[11, 12]都是利用最大似然法对目标的角度进行跟踪,其中文献[11]结合了卡尔曼滤波算法,文献[12]对矩阵求逆采用降维处理降低了运算量,在近场情况下对目标的角度和距离进行联合跟踪。实际上,文献[10-12]都是通过目标功率上的差异达到了区分目标的目的。但是当目标中有两个或两个以上目标的功率接近时,这些方法会发生关联错误的情况。

本文提出了一种新的多目标角跟踪算法,此算法利用协方差矩阵的更新得到各个时刻每个目标的角度。相邻时刻之间它们是自动关联的,省去了运算量较大的数据关联过程;本算法可以减小阵元噪声的影响,有更高的跟踪精度。相比较于文献[9]而言,本算法可以得到 $2(M-1)$ 个独立的方程,可以同时跟踪更多的目标;同时,本算法采用记忆跟踪法解决了目标交汇时出现的关联错误的情况。相对于文献[10-12]而言,此算法的运算量较小,而且不要求目标的功率两两不同。

2006-03-20 收到, 2007-09-17 改回

国家自然科学基金(60672130)和教育部新世纪优秀人才支持计划资助课题

## 2 数学模型

众所周知， $M$  个等间距放置的阵元在  $t$  时刻的输入信号为

$$\mathbf{r}(t) = [r_1(t) \ r_2(t) \ \cdots \ r_M(t)]^T = \mathbf{A}(t)\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

其中  $\mathbf{A}(t)=[\mathbf{a}_1(t), \mathbf{a}_2(t), \dots, \mathbf{a}_N(t)]$ ;  $\mathbf{a}_i(t)=[1, e^{-j\Phi(\theta_i(t))}, e^{-2j\Phi(\theta_i(t))}, \dots, e^{-j(M-1)\Phi(\theta_i(t))}]^T$ ;  $\Phi(\theta_i(t)) = (2\pi d/\lambda)\sin\theta_i(t)$ ,  $d$  为阵元间距,  $\lambda$  为波长,  $\theta_i(t)$  表示  $t$  时刻第  $i$  个目标的 DOA;  $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t)]^T$ ,  $s_i(t)$  为第  $i$  个目标的窄带回波信号;  $\mathbf{n}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)]^T$ ,  $n_i(t)$  为第  $i$  个阵元的观测噪声。

假设阵元噪声  $n_i(t)$  为零均值、方差为  $\sigma^2$  的互不相关的高斯过程, 并且与回波信号不相关, 那么阵元协方差矩阵可写为

$$\mathbf{R}(t) = E[\mathbf{r}(t)\mathbf{r}^H(t)] = \mathbf{A}(t)\mathbf{R}_s(t)\mathbf{A}^H(t) + \sigma^2\mathbf{I} \quad (2)$$

式(2)中  $\mathbf{R}_s(t) = E[\mathbf{s}(t)\mathbf{s}^H(t)]$ , 假设在跟踪过程中  $\mathbf{R}_s(t)$  不随时间变化, 并且将其记为  $\mathbf{S} = \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_N)$ ;  $\mathbf{I}$  为一个  $M \times M$  的单位矩阵。

## 3 多目标角跟踪算法

### 3.1 跟踪算法

设  $k$  时刻  $N$  个目标的角度为  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$ , 第  $k+1$  时刻目标的角度为  $\theta_1 + \Delta\theta_1, \theta_2 + \Delta\theta_2, \dots, \theta_N + \Delta\theta_N$ 。两时刻的阵元协方差矩阵分别为  $\mathbf{R}_k$  和  $\mathbf{R}_{k+1}$ , 记  $\Delta\mathbf{R} = \mathbf{R}_{k+1} - \mathbf{R}_k$ , 则

$$\Delta\mathbf{R} = (\mathbf{A}_{k+1}\mathbf{S}\mathbf{A}_{k+1}^H - \mathbf{A}_k\mathbf{S}\mathbf{A}_k^H) + (\sigma_1^2 - \sigma_0^2)\mathbf{I} \quad (3)$$

相邻时刻阵元的噪声功率近似的看成不变, 有  $\sigma_0^2 \approx \sigma_1^2$ 。因此式(3)可近似为

$$\Delta\mathbf{R} \approx \mathbf{A}_{k+1}\mathbf{S}\mathbf{A}_{k+1}^H - \mathbf{A}_k\mathbf{S}\mathbf{A}_k^H \quad (4)$$

本文算法只用到了  $\Delta\mathbf{R}$  的信息, 由式(3), 式(4)可以看出本算法有效地减小了阵元噪声的影响(快拍数越多, 噪声的影响越小)。将式(4)展开可得

$$\Delta\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & b_1 & b_2 & \cdots & b_{M-1} \\ b_1^* & 0 & b_1 & \cdots & b_{M-2} \\ b_2^* & b_1^* & 0 & \cdots & b_{M-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{M-1}^* & b_{M-2}^* & b_{M-3}^* & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中  $b_n = \sum_{i=1}^N s_i (e^{jn\Phi(\theta_i + \Delta\theta_i)} - e^{jn\Phi(\theta_i)})$ ,  $n = 1, 2, \dots, M-1$ 。

当  $\Delta\theta_i$  较小时, 有

$$\begin{aligned} b_n &= \sum_{i=1}^N s_i \left( e^{jn\frac{2\pi d}{\lambda} \sin(\theta_i + \Delta\theta_i)} - e^{jn\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta_i} \right) \\ &\approx \sum_{i=1}^N s_i \left( e^{jn\frac{2\pi d}{\lambda} (\sin\theta_i + \Delta\theta_i \cos\theta_i)} - e^{jn\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta_i} \right) \\ &= \sum_{i=1}^N s_i e^{jn\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta_i} \left( e^{jn\frac{2\pi d}{\lambda} \Delta\theta_i \cos\theta_i} - 1 \right) \\ &\approx \sum_{i=1}^N s_i e^{jn\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta_i} \left( nj\frac{2\pi d}{\lambda} \Delta\theta_i \cos\theta_i \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{令 } e^{jn\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta_i} = \gamma_i, \quad j\frac{2\pi d}{\lambda} \cos\theta_i = \beta_i, \quad \text{有 } b_n = \sum_{i=1}^N s_i \gamma_i^n n \beta_i \Delta\theta_i。$$

由式(5), 式(6)易得

$$\mathbf{H} * \Delta\boldsymbol{\theta} = \Delta\mathbf{y} \quad (7)$$

其中

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} s_1 \gamma_1 \beta_1 & s_2 \gamma_2 \beta_2 & \cdots & s_N \gamma_N \beta_N \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_1 \gamma_1^C C \beta_1 & s_2 \gamma_2^C C \beta_2 & \cdots & s_N \gamma_N^C C \beta_N \\ s_1 \gamma_1^{-1} (-\beta_1) & s_2 \gamma_2^{-1} (-\beta_2) & \cdots & s_N \gamma_N^{-1} (-\beta_N) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_1 \gamma_1^{-C} (-C) \beta_1 & s_2 \gamma_2^{-C} (-C) \beta_2 & \cdots & s_N \gamma_N^{-C} (-C) \beta_N \end{bmatrix}$$

$$C = M - 1$$

$$\Delta\boldsymbol{\theta} = [\Delta\theta_1 \ \Delta\theta_2 \ \cdots \ \Delta\theta_N]^T$$

$$\Delta\mathbf{y} = [\Delta\mathbf{R}_{12} \ \cdots \ \Delta\mathbf{R}_{1M} \ \Delta\mathbf{R}_{21} \ \cdots \ \Delta\mathbf{R}_{M1}]^T$$

最小二乘解式(7)可得

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\widehat{\mathbf{H}}^H \widehat{\mathbf{H}})^{-1} \widehat{\mathbf{H}}^H * \Delta\hat{\mathbf{y}} \quad (8)$$

当目标的个数  $N$  不超过  $2(M-1)$  ( $M$  为阵元个数) 并且同一时刻各个目标的角度两两不同时, 式(7)有唯一解。

### 3.2 两个修正

通过上面的分析可以看到  $k$  时刻和  $k+1$  时刻目标的角度是自动关联的, 可以避免常见多目标跟踪算法中的数据关联问题。但是此种算法也是有缺陷的: (1) 式(6)采用了两个近似, 当相邻时刻角度变化较大时, 这两种近似所带来的误差也是比较大的。(2) 当目标出现交汇时,  $\mathbf{H}$  出现秩的亏损, 跟踪性能明显下降。对此, 提出了两种修正方法。对于第 1 种情况, 将式(4)用下式代替

$$\Delta\mathbf{R} \approx \mathbf{A}_{k+1}\mathbf{S}\mathbf{A}_{k+1}^H - \mathbf{A}_{k+1/k}\mathbf{S}\mathbf{A}_{k+1/k}^H \quad (9)$$

上式中  $\mathbf{A}_{k+1/k}$  为  $k+1$  时刻的预测导向矩阵。由式(8)可得  $k+1$  时刻的角度为  $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k+1) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(k+1/k) + \Delta\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 。由于  $\boldsymbol{\theta}(k+1/k)$  要比  $\boldsymbol{\theta}(k)$  更接近  $\boldsymbol{\theta}(k+1)$ , 那么式(6)中两个近似带来的误差也要小得多, 因而也能得到更为准确的各个目标角度的估计值。对于第 2 种情况各个目标的角度可用预测值代替,  $k+1$  时刻的角度预测值为

$$\boldsymbol{\theta}_{k+1} = \boldsymbol{\theta}_k + \mathbf{v} * T \quad (10)$$

其中  $\mathbf{v} = \left( \frac{\boldsymbol{\theta}_k - \boldsymbol{\theta}_{k-L}}{L * T} + \frac{\boldsymbol{\theta}_{k-1} - \boldsymbol{\theta}_{k-L-1}}{L * T} + \cdots + \frac{\boldsymbol{\theta}_{k-M} - \boldsymbol{\theta}_{k-M-L}}{L * T} \right)$

$/M$ , 表示估计得到的角速度,  $L$  表示窗长,  $M$  表示窗滑动次数。

## 4 仿真结果

5 个等间距放置的阵元跟踪 3 个运动目标。阵元间距为波长的一半, 总共观测时间为 30s, 每 0.01s 观测一次, 快拍数  $Q=200$ 。仿真结果如图 1-图 6 所示:

图 1、图 2、图 3 为每个目标的信噪比均为 34dB 时本文算法、文献[9]以及文献[11]的跟踪结果。其中实线为目标的

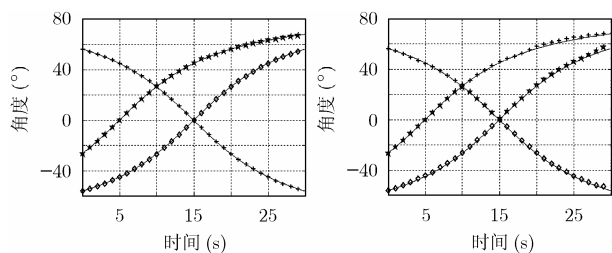


图1 本文算法跟踪结果

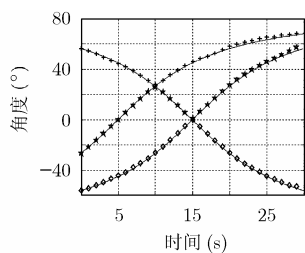


图2 文献[9]跟踪结果

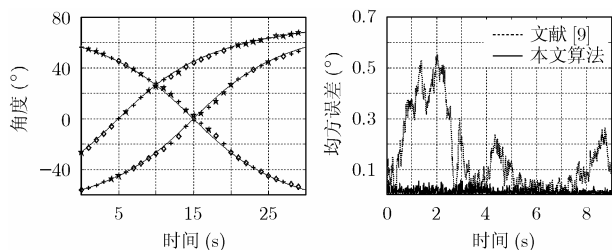


图3 文献[11]跟踪结果

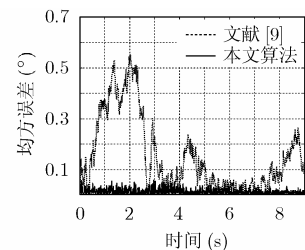


图4 均方误差(目标1前9秒)

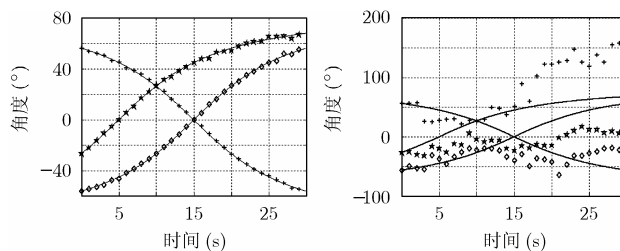


图5 本文算法跟踪结果(SNR=0dB)

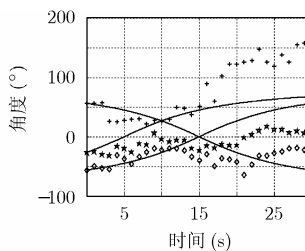


图6 文献[9]跟踪结果(SNR=0dB)

真实轨迹,“◇”、“☆”、“+”符号分别表示目标1,目标2,目标3的跟踪曲线。由仿真结果可以看出,本文算法的跟踪结果良好;文献[9]的算法在15s的时候发生了关联错误的情况;文献[11]的方法在每个时刻都有可能发生关联错误的情况,这是由于文献[11]的算法是从目标的功率上区分目标的,它只适用于目标的功率两两不同的情况。由图4可以看出,本文方法的跟踪精度要高于文献[9]的方法。通过图5、图6的比较可以看出在低信噪比的情况下,本文算法也有较高的跟踪性能。

从运算量上来讲,文献[10-12]方法的实质是一个最小值的高维搜索过程,其运算量相当大。本文算法和文献[9]的运算量相当。

## 5 结束语

本文提出了一种新的多目标角跟踪算法,该算法避免了常见多目标跟踪中的数据关联问题,大大减少了运算量,同时本算法减小了阵元噪声的影响,适用于目标个数大于阵元

个数的情况。仿真结果表明,该算法有较高的跟踪性能

## 参考文献

- [1] Chang C B and Tabaczynski J. Application of state estimation to target tracking. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1984, 29(2): 98-109.
- [2] Yang Bin. Projection approximation subspace tracking. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1995, 43(1): 95-107.
- [3] Abed-Meraim K. Fast orthonormal PAST algorithm. *IEEE Signal Processing Letters*, 2000, 7(3): 60-62.
- [4] Hua Y. A new look at the power method for fast subspace tracking. *Dig. Signal Process*, 1999, 9(2): 297-314.
- [5] Badeau R. Fast approximated power iteration subspace tracking. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2005, 53(8): 2931-2941.
- [6] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Trans. on Antennas Propagat*, 1986, 34(3): 276-280.
- [7] Roy R and Kailath T. ESPRIT-Estimation of signal parameters via rotational invariance techniques. *IEEE Trans. on Acoust, Speech, Signal Processing*, 1989, 37(7): 948-955.
- [8] Chang K C and Bar-Shalom Y. Joint probabilistic data association for multitarget tracking with possibly unresolved measurements. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1984, 29(7): 585-594.
- [9] Sword C K, Simaan M, and Kamen E W. Multiple target angle tracking using sensor array output. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1990, 26(2): 367-372.
- [10] Sastry C R, Kamen E W, and Simaan M. An efficient algorithm for tracking the angles of arrival of moving targets. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1991, 39(1): 242-246.
- [11] Rao C R, Sastry C R, and Zhou B. Tracking the direction of arrival of multiple moving target. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1994, 42(5): 1133-1144.
- [12] Satish A and Kashyap L. Multiple target tracking using maximum likelihood principle. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1995, 43(7): 1677-1694.

张怀根: 男, 1980生, 博士生, 研究领域为雷达信号处理、雷达目标跟踪。

张林让: 男, 1966生, 教授, 博士生导师, 主要研究兴趣为自适应信号处理、阵列波达方向估计、方向图综合。

吴顺君: 男, 1942生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为雷达系统分析、建模与仿真、雷达信号处理。