

基于二维测向与波束形成结合的多目标跟踪¹

王 河 肖先赐

(电子科技大学电子工程系 成都 610054)

摘 要 阵列信号的侦察与跟踪是两个同样重要的问题,本文就二维空间移动信号的跟踪问题提出了一种稳健而快速的跟踪方法,即波束形成与定点信号子空间搜索相结合的方法,对二维空间中的多个信号同时进行跟踪与波束形成,在分批数据处理的基础上实现信号的跟踪截取,从而提高信号的跟踪能力。文中还通过平面阵对空间二维信号的接收响应模糊性分析证明了算法的有效性。

关键词 多目标跟踪, 二维交替投影, 波束形成

中图分类号 TN953, TN911.7

1 引 言

利用平面传感器阵列对空间信号的侦察和接收是信号处理领域的一个重要方向,如何对运动的目标进行有效跟踪也是一个值得研究的课题。处理目标信号方向跟踪问题的方法主要有两类:一类方法较直接,即测向与波束形成直接相结合的方法,由于需要定时测向,这类算法的稳健性较好,但是需要解决计算量的问题;第二类方法则是以 LMS 算法为代表的及时跟踪的方法,它不涉及信号测向的问题,而以信号输出波形失真最小为准则,这类算法计算量小,但是收敛能力有限,且需要知道关于信号的先验信息。第一类算法则不具有信号的自跟踪能力,需要给出信号方向的附加信息。此时要实现对接收信号的实时跟踪就必须先存在对信号方向的跟踪。

本文在信号跟踪方法上做出了一个特殊的快速实现,即在分批数据处理,信号采样和处理流水作业的基础上实现信号跟踪和接收。具体来说,就是测向过程与跟踪过程循环作用的算法。其中测向算法类似于交替投影算法(AP)的实现^[1],并通过定点子空间搜索实现测向,而跟踪过程则是一个给定方向进行波束合成的过程,波束合成过程可采用最大输出信噪比原则主动对准波束,抑制已知方向的干扰信号,而测向算法则是要保证在信号入射方向移出上一步波束合成算法形成的主波束 3dB 宽度范围之前重新校准信号方位,使得信号可以被稳定及时地接收。在这样的算法中,要求测向算法及时而有效,这样才能准确对信号进行跟踪而不至于丢失信号。为此采用基于二维矩形平面阵的有限区间子空间搜索算法来进行测向,在本文第 3 节描述。

2 模型描述

假设接收阵列为 M 个阵元,每个阵元在平面中对应的坐标设为 $z_i = [x_i \ y_i]$, $i = 1, 2, 3, \dots, M$ 。不失一般性可设 $z_1 = [x_1 \ y_1]$ 位置作为平面坐标原点,其坐标为 $x_1 = y_1 = 0$,远场信号个数为 $P < M$,在面阵所处平面上建立平面直角坐标,信号入射方向以信号与该坐标的 x 轴

¹ 1998-11-16 收到, 1999-08-12 定稿

α 和信号与坐标 y 轴 β 两个参数定义为 (θ_k, ϕ_k) , $k = 1, 2, \dots, P$, 则阵列的接收模型为

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{i=1}^P S_k(t) \mathbf{a}_i + \mathbf{n}(t), \quad (1)$$

$$\mathbf{a}_i = \frac{1}{\sqrt{M}} [e^{if_1^k} e^{if_2^k} \dots e^{if_M^k}]^T, \quad (2)$$

$$f_i^k = \kappa_i \cdot z_i, \quad (3)$$

$$\kappa_k = \frac{2\pi}{\lambda} [\cos \alpha_k \cos \beta_k]^T, \quad \alpha_i \in [0, \pi), \beta_i \in [0, \pi), \quad (4)$$

其中 $S_k(t)$, $t = 1, 2, \dots, N$ 为远场信号 k 的幅度, N 为每批接收与处理的数据长度; \mathbf{a}_k 为非高斯信号 k 的方向矢量的二维模型; f_i^k 为信号 k 在阵元 i 上的空间接收频率; κ_k 为信号 k 的传播矢量, $\mathbf{n}(t)$ 为测量噪声矢量; 服从均值为零, 方差为 σ_n 的圆高斯分布。

在 M 个阵元组成的阵列上有 P 个信号入射, 则阵列的协方差矩阵为

$$\mathbf{R} = \mathbf{x}(t) \mathbf{x}^H(t) = \sum_{k=1}^P |S_k|^2 \mathbf{a}_k(\alpha, \beta) \mathbf{a}_k^H(\alpha, \beta) + \sigma_n^2 \mathbf{I}. \quad (5)$$

注: 本文公式中的上标符号 $*$, T , H 分别表示矩阵的共轭, 转置与共轭转置。

3 算法描述

在具备目标方向先验信息的条件下, 可以用最小方差偏滤波 (MVDR) 方法对接收信号进行滤波^[2], 它满足

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \mu \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_1^*, \quad (6)$$

其中, μ 是任意复常数。此时的 \mathbf{W}_{opt} 就是在信号方向上最大信噪比意义下的最优加权矢量。如果采用该矢量进行阵列加权合成, 则信号接收的信噪比最大。在本问题中, 从实际意义上看, 就是利用信号方向上的方向矢量的共轭矢量 \mathbf{a}_1^* 来对接收信号进行相位补偿, 使得信号在接收方向上合成功率最大, 而 \mathbf{R}^{-1} 则为考虑扰动信号与噪声的干扰引入的变换矩阵, 以主波束稍微偏离信号接收方向为代价将零点对准干扰信号方向, 抑制从旁瓣泄漏进来的干扰。

考虑信号的测向过程, 信号测向过程的计算量主要体现在三个方面: (1) 相关矩阵 \mathbf{R} 的估计, (2) 估计算子的计算, (3) 根据估计算子进行信号方向搜索, 本文在后两个方面考虑了计算量的节约问题, 使得分段批量处理的算法具有实用性。

首先考虑可以采用类似交替投影算法 (AP) 的方法来缩减多信号子空间搜索的计算量。在一个由 P 个信号和白噪声构成的空间中, 如果假设信号 j , $j = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, P$ 的空间方向已知, 那么利用 Householder 变换对相关矩阵 \mathbf{R} 进行变换:

$$\mathbf{R}_i = \prod_{j \neq i} (\mathbf{I} - \mathbf{a}_j \mathbf{a}_j^H) \mathbf{R}, \quad (7)$$

那么 \mathbf{R}_i 中则只存在第 i 个信号分量和噪声分量的相关成分, 此时利用传统波束形成搜索谱:

$$P_{\max}(\alpha_i, \beta_i) = \max_{\alpha, \beta} \mathbf{a}^H(\alpha, \beta) \mathbf{R}_i \mathbf{a}(\alpha, \beta). \quad (8)$$

对于空间中的其它 $P-1$ 个信号亦可同此处理, 从而完成对 P 个信号角度的估计值的更新。此外, 将 (7) 式展开

$$\mathbf{R}_i = \left(\mathbf{I} - \sum_{j \neq i} \mathbf{a}_j \mathbf{a}_j^H + \sum_{k, j=2; k \neq j \neq i} \mathbf{a}_k \mathbf{a}_k^H \mathbf{a}_j \mathbf{a}_j^H - \dots \right) \mathbf{R}. \quad (9)$$

当阵列口径与信号波长之比不导致空间中出现严重模糊方向矢量时, 可近似忽略 (9) 式中的关于不同方向矢量间的二次以上乘项 (它们在谱表达式中至少以相异方向矢量相关系数的二次项出现, 则由 (8), (9) 式得最终估计算子

$$P_{\max}(\alpha_i, \beta_i) \approx \max_{\alpha, \beta} \mathbf{a}^H(\alpha, \beta) \times \left(\mathbf{I} - \sum_{j \neq i} \mathbf{a}_j \mathbf{a}_j^H \right) \mathbf{R} \times \mathbf{a}(\alpha, \beta). \quad (10)$$

其次考虑搜索定义域。因为信号方向是一个连续变化的过程, 所以可以将搜索限制在很小的范围之内进行。只要信号个数不发生变化, 则对搜索范围进行限制是可以成立的。为此, 在检验协方差矩阵 \mathbf{R} 的秩不发生变化的条件下, 只要在二维搜索空间里选取上一步测向和波束形成的结果的足够大的邻域, 按照上述算得搜索算子就可以更新测向角度。

在文献 [3, 4] 中作者分别就特殊的阵列形式在球面坐标 (θ, ϕ) , $\theta \in [0, 2\pi)$, $\phi \in [0, \pi)$ 上形成了二维 ESPRIT 算法, (θ, ϕ) 坐标与 (α, β) 坐标满足以下关系:

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \cos \theta \cos \phi, \\ \cos \beta &= \sin \theta \cos \phi. \end{aligned} \quad (11)$$

由于 (α, β) 坐标的两个坐标不但相互独立, 而且具有对称性的良好性质, 便于直接在角度空间中进行搜索, 为了避免在搜索过程中计算三角函数, 考虑直接在波径空间 $(\cos \alpha, \cos \beta)$ 二维测向空间里选取上一步测向点的邻域上选取六个邻近搜索点 $(\cos \alpha \pm \Delta, \cos \beta)$, $(\cos \alpha \pm \Delta/2, \cos \beta \pm \Delta/2)$, 与原信号方向组成一个 7 点搜索子集, 附录中对波径空间增量与角度增量的关系进行了说明, 并得出了方向矢量的更新计算量。

为了使信号跟踪能够不间断地进行, 必须保证信号始终落在波束形成的 3dB 范围之内, 因此角度搜索步长 Δ 应该不大于信号接收波束 3dB 宽度。在接收波束的 3dB 宽度范围内, 可使其近似代表目标信号下一步可能出现的新的方位。由此可以用 7 个点代表原信号方向二维搜索平面中的邻域。

对于 P 个空间信号, 则搜索点数扩展为 $7P$ 个, 从其中得到下一个步进循环的 P 个信号方向的估计值 $(\alpha_1, \beta_1), (\alpha_2, \beta_2), \dots, (\alpha_P, \beta_P)$ 。此时算法的第一步完成, 在下一步就可以分别对这 P 个信号按照 MVDR 的原则进行波束形成。

下面讨论信号处理速度对波束跟踪移动信号能力的限制。采样速率的设置必须使信号接收机采样分段数据有足够的长度 N , 以保证信号处理的精度, 这可以通过设置信号采样时间 T_s 来满足要求:

$$N = \Delta_1 / (2V_b T_s), \quad (12)$$

其中 Δ_1 的定义见附录, V_b 为估计的信号最大方位移动速率。此外信号处理速度必须不小于接收下一批数据的时间 $NT_s = \Delta_1 / (2V_b)$ 。根据 (10) 式, 我们可以统计计算 P 个估计算子 $\left(\mathbf{I} - \sum_{j \neq i} \mathbf{a}_j \mathbf{a}_j^H \right) \mathbf{R}$ 需要的乘法次数总共为 $2PM^2$, 而对每个搜索谱值的计算还

需要 M^2 次乘法, 加上相关矩阵 R 的计算量和阵列流形的更新, 总共需要的乘法次数为 $(2P+15)M^2+MN+3PM$ 。

此外, 可以通过增大信号搜索的范围来改善信号的相对处理能力和信号接收的精度。考虑将搜索从一层增加到两层, 即增加 $(\cos \alpha \pm 2\Delta, \cos \beta)$, $(\cos \alpha, \cos \beta \pm \sqrt{3}\Delta)$, $(\cos \alpha \pm 3\Delta/2, \cos \beta \pm \sqrt{3}\Delta/2)$, $(\cos \alpha \pm \Delta, \cos \beta \pm \sqrt{3}\Delta)$ 共 12 个点, 此时总的估值定义域点数增加到 $19P$ 个, 这样可将信号处理时间增加到 Δ_1/V_b , 此时相应需要的乘法次数为 $(2P+39)M^2+MN+5PM$ 。

图 1 为第一层与第二层搜索点位置的分布图。由于 α 与 β 是相互独立且具有对称性的角度分量, 在假设这两个角度都是均匀分布的情况下, 这样的搜索点分布形成一个 Dirichlet 分区, 文献 [5] 中说明了这样的二维分布是一种最优的平面搜索选择。

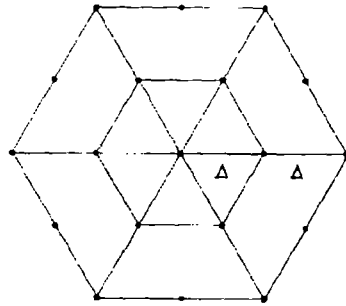


图 1 测向谱邻域搜索点位置分布

4 模拟结果及分析

本文的实验中采用 5×6 的 30 元平面矩阵, 相邻阵元间距均为信号的半波长, 波束合成 3dB 宽度为 19.2° 。假设有两个空间入射信号, 其中第一个为 BPSK 信号, 初始角度 $[80^\circ, 70^\circ]$, 在 α 方向正向移动, 最大速率 $0.5^\circ/s$, β 方向随机抖动; 第二个为正弦信号, 初始角度 $[160^\circ, 40^\circ]$, 在 α 方向反向移动, 最大速率 $0.5^\circ/s$, β 方向随机抖动, 搜索步长 Δ 选取为 0.1125, 信噪比为 10dB。根据附录, 对应的角度搜索范围不大于 0.7° 。模拟结果如图 2。其中, 图 2(a) 为 α 方向的信号方位跟踪, 图 2(b) 为 β 方向的信号方位跟踪, 曲线和实折线分别表示信号的真实方向和跟踪方向, 图 2(c) 为正弦波入射和接收信号的 FFT 表示, 图 2(d) 为 BPSK 入射和接收信号的解调表示。试验结果表明, 跟踪方法对两个信号都进行了较为理想的跟踪。在搜索过程中, 实际信号方向与估计方向不超过 NV_bT_s , T_s 为接收机输出采样时间。

5 结 论

本文中描述了信号的测向与波束合成相结合的多信号跟踪和波束形成的方法, 并对其实现途径中遇到的实际问题进行了讨论。在复杂的信号空间内, 针对信号进行连续跟踪可以得到满意的效果。通过分批数据处理的方式将信号处理的工作集中起来, 并利用交替投影的邻域波束测向方法改进了测向过程, 使得整个算法的及时实现可以得到保证。

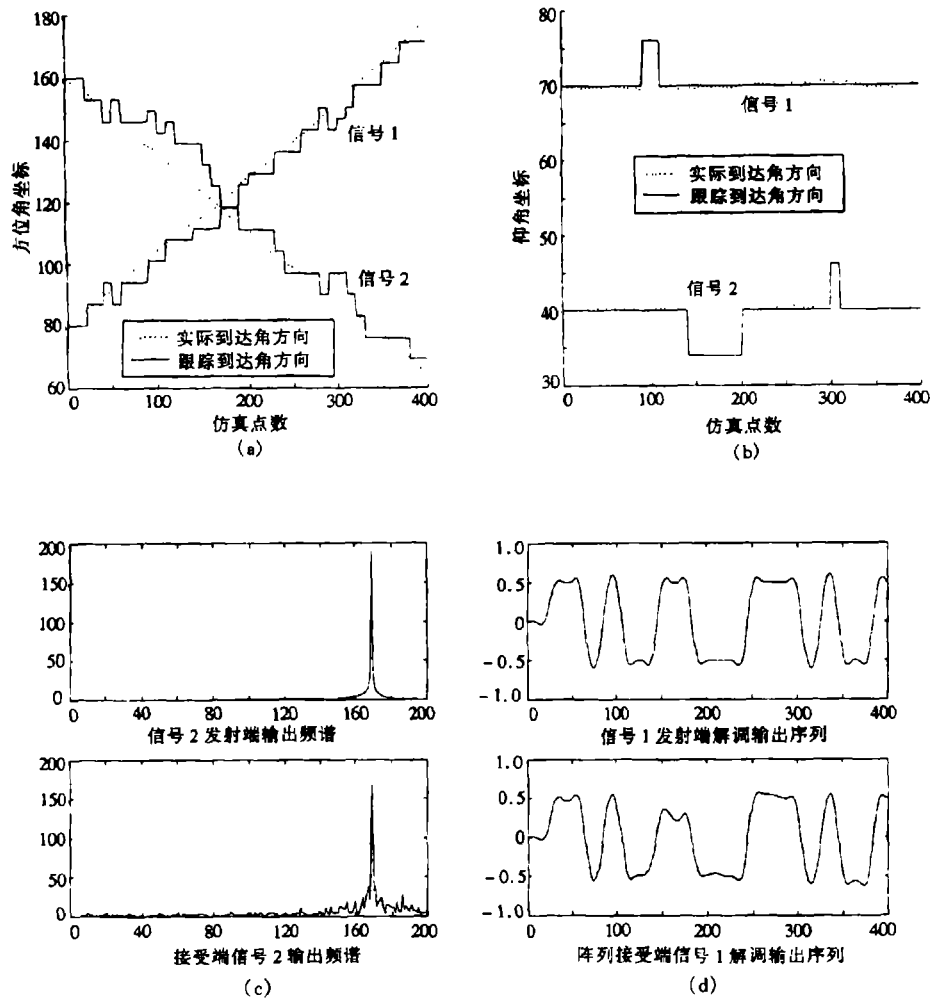


图 2 模拟试验结果

附 录

在测向搜索过程中, 为了避免计算阵列流形中的三角函数, 我们的实际搜索是在对应的两个方向的波径 $(\cos \alpha, \cos \beta)$ 上完成的. 令 $\rho = \sin \Delta_1$, 信号角度实际增量为 Δ , 则

$$\begin{aligned} \Delta &= \cos(\alpha + \Delta_1) - \cos \alpha = (\sqrt{1 - \rho^2} - 1) \cos \alpha + \rho \sin \alpha \\ &\approx \frac{1}{2} \rho^2 \cos \alpha + \rho \sin \alpha \leq \rho \sqrt{1 + 0.25 \rho^2}. \end{aligned} \quad (\text{A1})$$

在搜索步长 Δ 足够小时, 可近似有如下关系:

$$\Delta \approx \Delta_1 \sqrt{1 + 0.25 \Delta_1^2}. \quad (\text{A2})$$

由 (2) 式可以计算出阵列各方向上流形的修正矢量为

$$\mathbf{a}_\Delta = \left[e^{j \frac{2\pi}{\lambda} x_i \Delta_x + j \frac{2\pi}{\lambda} x_i \Delta_y} \right], \quad i = 1, 2, \dots, M. \quad (\text{A3})$$

每次修正流形需要的乘法次数为 M 次, 在信号移动的实际过程中, 由于前后两次搜索中部分搜索点的重复性, 我们实际需要更新的阵列流形在一层搜索和两层搜索时分别为 3 个和 5 个, 因此流形更新所需要的乘法计算两分别为 $3PM$ 和 $5PM$ 。

参 考 文 献

- [1] Ziskind, Wax I M. Maximum likelihood methods for direction of arrival estimation. IEEE Trans. on ASSP, 1990, ASSP-38(7): 1132-1143.
- [2] Schreiber R. Implementation of adaptive array algorithms. IEEE Trans. on ASSP, 1986, ASSP-34(5): 1038-1045.
- [3] Tsung-Hsien Liu, Mendel M. Azimuth and elevation direction finding using arbitrary array geometries. IEEE Trans. on SP, 1998, SP-46(): 2061-2065.
- [4] 刘德树, 等. 空间谱估计及其应用. 合肥: 中国科技大学出版社, 1997, 179-185.
- [5] Gersho A. Asymptotically optimal block quantization. IEEE Trans. on IT, 1979, IT-25(4): 373-380.

MULTI-SIGNAL TRACKING BASED ON 2-D DIRECTION FINDING AND BEAMFORM

Wang He Xiao Xianci

(*Department of Electronic Engineering, UESTC, Chengdu 610054*)

Abstract Spatial inspection and tracking are two important objects in the array signal processing field. A fast and robust tracking method for 2-D moving signals, which combines beamform and spectral peak searching is proposed. In the method, several spatial signals can be processed simultaneously. Furthermore, the effectiveness is demonstrated by computer simulation.

Key words Multi-signal tracking, 2-D AP algorithm, Beamform

王 河: 男, 1972 年生, 博士, 研究领域为谱估计, 阵列信号处理算法, 空间自适应技术研究.

肖先赐: 男, 1933 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事信号处理, 电子工程等方面的教学和研究工作.