

中图分类号: TN971.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-2230(2012)06-0006-05

一种改进的 MVDR 相干信源 DOA 估计算法

唐孝国, 张剑云, 洪振清

(电子工程学院, 合肥 230037)

摘要: 最小方差无失真响应(MVDR)算法是一种经典的波束形成算法, 同时也能实现 DOA 估计, 但是其分辨力往往比较低。针对这一不足, 提出了一种改进的 MVDR 相干信源 DOA 估计算法。该算法首先对阵列接收数据阵进行共轭重排构造出增广数据矩阵, 然后利用奇异值分解(SVD)求出增广矩阵的伪逆, 再用传统的 MVDR 算法进行 DOA 估计。仿真结果表明, 与传统的 MVDR 算法和前后向空间平滑算法相比, 在阵元数较少和快拍数较低的情况下, 该算法具有更高的 DOA 估计精度和分辨力, 因而是一种很好的相干信号 DOA 估计算法。

关键词: DOA 估计; MVDR; 相干信源; 奇异值分解

DOA Estimation of Coherent Signals via Improved MVDR Algorithm

TANG Xiaoguo, ZHANG Jianyun, HONG Zhenqing

(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: MVDR(minimum variance distortion response) algorithm is a classical beamforming algorithm in array signal processing, and it also can be used for DOA estimating, but there has usually a low resolution. In order to resolve this shortage, an improved algorithm is proposed. An augmentation matrix is constructed firstly by this algorithm via rearranging its receiving data matrix, then SVD(singular value decomposition) is used to solve augmentation matrix inversion and the traditional MVDR algorithm is used to estimate DOA lastly. Compared with the traditional MVDR algorithm and forward and backward spatial smoothing algorithm, the simulation results indicate in the fewer elements and lower snapshots conditions, this improved algorithm has a higher estimating accuracy and resolution, so it is also a good algorithm of coherent signals DOA estimation.

Key words: DOA estimation; MVDR; coherent signals; singular value decomposition(SVD)

1 引言

阵列信号处理是信号处理领域的一个重要分支, 在最近的 30 年来, 作为空域信号分析和处理的一种重要的手段, 在通信、雷达、地震勘探、医学、生物医学工程等多方领域都有着迅猛的发展。阵列信号处理中最主要的两个研究方向是自适应空域滤波(自适应阵列处理)和空间谱估计^[1]。

空间谱估计常被称为 DOA 估计, 即雷达方向估计。MUSIC、ESPRIT 等子空间类算法的出现使得 DOA 估计突破了瑞利极限, 但基本的子空间类算法都不能直接对相干信号进行有效估计, 要利用此类算法, 都需要预先进行解相干处理。传统的解相干处理一般是采用空间平滑技术, 包括前后向平滑算法(FBSS)及其多种变形^[3-6]。目前实

收稿日期: 2012-02-16; 修回日期: 2012-04-19

作者简介: 唐孝国(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理及空时二维自适应处理; 张剑云(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, 雷达分会委员, IEEE 会员, 主要研究方向为雷达及目标环境模拟、雷达信号处理和高速信号处理; 洪振清(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 MIMO 雷达信号处理及阵列信号处理。

现信号解相干处理的算法主要有两大类: 一类是降维处理方法; 另一类是非降维处理方法。其中降维处理方法是一类常用且容易实现的解相干处理方法, 可以分为基于空间平滑^[7]和基于矩阵重构两类算法^[8]; 非降维处理方法主要有频域平滑算法、利用数据自相关阵构造 Toeplitz 矩阵以实现解相干的算法。近年来, 对于后者算法出现的例子比较多, 比如文献[9]针对均匀线性阵列(ULA), 利用自相关阵的任意一行构造了一个 Toeplitz 矩阵, 利用该矩阵得到信号子空间和噪声子空间; 文献[10]在文献[9]的基础上降低了 Toeplitz 矩阵的维数以降低特征值分解的运算量。文献[11]基于单次快拍的平滑构建矩阵, 不用特征值分解实现相干信号 DOA 估计, 减小了计算量, 但 DOA 估计性能在阵元数少时下降较快。

最小方差无失真响应(MVDR)算法最早于 1969 年由 Capon 提出^[12], 是一种比较经典的数字波束形成技术, 也可以用于相干信号的 DOA 估计, 只是分辨力不是很高, 当阵元数较少或者分辨力要求提高时, 它的估计性能将受到极大影响, 甚至没法实现到达角估计。

文献[13]提出了一种通过构造增广数据矩阵并对其奇异值分解求解增广矩阵的逆的方法修正 MVDR 波束器, 以降低干扰方向的零陷深度。因为它用到数据共轭重排, 故本文考虑将其用于相干信号的 DOA 估计, 本文称其为 MMVDR (Modified MVDR) 算法, 通过与未改进之前的算法和前后向空间平滑算法作比较, 仿真实验表明, 在阵元数较少和低快拍数的情况下, 本文算法在 DOA 估计精度和分辨力方面都有较大提高, 因而可以作为很好的相干信号 DOA 估计方法。

2 信号模型

考虑有 P 个波长为 λ 的远场窄带信号从方向 $\theta_k(k = 1, 2, \dots, P)$ 照射到阵元间距为 d 的 L 阵元均匀线阵, 且假设都为各向同性阵元, 均匀线阵示意图如图 1 所示。

以第一个阵元为参考阵元, 则第 l 个阵元的输出信号可以表示为:

$$x_l(t) = \sum_{i=1}^P s_i(t) \exp(j2\pi(l-1)d\sin\theta_i/\lambda) + v_l(t)$$

(1)

$v_l(t)$ 为第 l 个阵元中的加性高斯白噪声, 且满足: $E[V(t) V^H(t)] = \sigma^2 I, E[V(t) V^T(t)] = 0$, 其中 $(\cdot)^H$ 表示矩阵(向量)的共轭转置, $(\cdot)^T$ 表示矩阵(向量)的转置, 则单次快拍阵列接收数据矢量可以表示为:

$$X(t) = AS(t) + V(t)$$

(2)

$X(t)$ 、 $S(t)$ 、 $V(t)$ 、 A 分别为阵列输出矢量、入射信号矢量、阵列噪声矢量和阵列流型矢量, 且有:

$$X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_L(t)]^T$$

(3)

$$S(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_P(t)]^T$$

(4)

$$V(t) = [v_1(t), v_2(t), \dots, v_L(t)]^T$$

(5)

$$A(\theta) = [a(\theta_1) \quad a(\theta_2) \quad \dots \quad a(\theta_P)]$$

(6)

其中: $a(\theta_i) = [1, \exp(-j2\pi d \sin\theta_i/\lambda), \dots, \exp(-j2\pi(L-1)d \sin\theta_i/\lambda)]^T, i = 1, 2, \dots, P$ 。

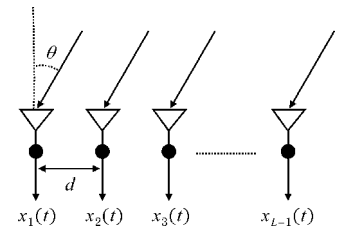


图 1 均匀线阵示意图

3 MMVDR 算法的提出

3.1 传统的 MVDR 算法

根据(3)式得到的阵列接收数据矩阵, 得到数据的自相关矩阵为:

$$R = E\{X(t) X^H(t)\}$$

(7)

在实际工程应用中, 阵列的空间相关矩阵是用有限次快拍得到的观察数据量, 用时间平均进行估计得到的, 即:

$$R = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X(n) X^H(n)$$

(8)

其中, N 是阵列接收信号向量的采样快拍数, $X(n)$ 为第 n 次快拍数据。

MVDR 波束形成算法的基本思想是选取合适的权向量 w , 为了减少基阵对非期望方向上激励的响应构造一个约束最优化问题。这一最优化问题中的判决准则为: 在期望方向上形成一个单位幅度的约束下, 使基阵的均方输出能量最小, 即对其他方向的信号和噪声尽量抑制, 这是个条件极

值问题, 可描述为:

$$\min_w \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} \quad \text{st.} \quad \mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta) = 1 \quad (9)$$

利用拉格朗日乘法(Method of language multipliers) 解决这一最优化问题, 可求得波束指向期望方向时, 阵元权值为:

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta)}{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta)} \quad (10)$$

输出空间功率谱也即用于 DOA 估计的函数为:

$$P_{MVDR}(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta)} \quad (11)$$

其中, $\mathbf{a}(\theta) = [1, \exp(-j2\pi d \sin\theta/\lambda), \dots, \exp(-j2\pi d(L-1) \sin\theta/\lambda)]^T$ 为导向向量, $(\cdot)^{-1}$ 表示求矩阵的逆, 对(11)式通过改变 θ 进行谱峰搜索, 则估计函数 $P_{MVDR}(\theta)$ 的 P 个峰值就是相应的入射信号波达方向。

3.2 改进的 MVDR(MMVDR) 算法

对于 N 次快拍, 可得接收数据矩阵为:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{X}(1) \quad \mathbf{X}(2) \quad \dots \quad \mathbf{X}(N)] \in C^{L \times N} \quad (12)$$

对 \mathbf{X} 构造增广数据矩阵:

$$\mathbf{Y} = [\mathbf{X} \quad \mathbf{J}\mathbf{X}^*] \in C^{L \times 2N} \quad (13)$$

其中 $\mathbf{J} \in C^{L \times L}$ 为副对角线全为 1, 其余元素全为零的矩阵, $(\cdot)^*$ 为矩阵(向量)的共轭, 则新构造增广矩阵的自相关矩阵为:

$$\mathbf{R} = (\mathbf{Y}\mathbf{Y}^H) / 2N \quad (14)$$

对于式(11), 其中一个很关键的步骤就是求自相关矩阵的逆, 近年来, 基于数据矩阵奇异值分解(SVD)的方法在阵列信号处理中得到了广泛研究, 并且有利于提高计算的数值稳定性和计算精度, 文献^[14]将其用于改进的波束形成器, 现将其用于 MMVDR 方法 DOA 估计。

对 \mathbf{Y} 进行奇异值分解为: $\mathbf{Y} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}$, 其中

$$\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1 \quad \mathbf{u}_2 \quad \dots \quad \mathbf{u}_L] \in C^{L \times L},$$

$$\mathbf{\Lambda} = \text{diag} \left[\sigma_1 \quad \sigma_2 \quad \dots \quad \sigma_{2N} \right] \in C^{L \times 2N},$$

设 $\sigma_m, \mathbf{u}_m, m = 1, 2, \dots, L$ 分别为 \mathbf{Y} 的 L 个非零奇异值和对应的左奇异向量, 则 \mathbf{R}^{-1} 可表示为:

$$\mathbf{R}^{-1} = \sum_{m=1}^L \frac{1}{\sigma_m^2} \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m^H \quad (15)$$

将(15)式代入(11)式即可得 MMVDR 的 DOA 估计函数, 其 P 个峰值就是相应的入射信号波达

方向。

综上所述, 现将 MMVDR 算法的步骤总结如下:

- (1) 利用 N 次快拍, 得到(12)式所示的接收数据矩阵 \mathbf{X} ;
- (2) 利用(13)式构造增广数据矩阵 \mathbf{Y} ;
- (3) 再利用(15)式求增广矩阵自相关阵的逆 \mathbf{R}^{-1} ;
- (4) 最后由(11)式通过改变 θ 进行谱峰搜索来估计 DOA。

3.3 算法的计算复杂度分析

下面进行 MVDR、MMVDR、前后向空间平滑三种算法的计算量分析, 从算法原理看, 算法的计算量主要体现在求快拍数据的自相关矩阵和对自相关矩阵求逆两个方面, 设阵元数为 L , 快拍数为 N 。从 3.1 节的分析可知, MVDR 的计算复杂度为 $O(NL^2) + O(L^3)$, 从 3.2 节的分析可知, MMVDR 的计算复杂度为 $O(2N * L^2) + O(L^3)$, 对于前后向空间平滑法, 设将均匀线阵(L 个阵元)分成相互交错的 k 个子阵, 每个子阵的阵元数为 m , 则其计算复杂度为 $2 * O(km^2 * N) + O(m^3)$ 。

4 实验仿真及结果分析

使用均匀线阵, 阵元间隔 $d = \lambda/2$, 信号为窄带远场信号, 噪声为均值为 0、方差为 1 的加性高斯白噪声(复噪声)。下面通过 Matlab 仿真比较 MVDR、MMVDR 和前后向空间平滑方法的 DOA 估计性能。

实验一: 本文算法分辨力提高验证

四个波长为 λ 的信号, 第一、二个相干, 第三、四个相干, 入射方向分别为 $-40^\circ, -20^\circ, 0^\circ, 20^\circ$, 信噪比 $\text{SNR} = 5$ dB, 快拍次数为 $N = 100$, 阵元数为 $L = 8$, 仿真结果如图 2 所示。其他条件都不变, 只将入射方向分别改为 $-30^\circ, -20^\circ, 0^\circ, 10^\circ$, 仿真结果如图 3 所示。在此基础上将阵元数增至 $L = 16$, 其余条件相同, 仿真结果如图 4 所示。

从图 2 可以看出, 当信号方位相差 20 度时, MVDR、MMVDR、前后向空间平滑三种算法都能实现相干信号的 DOA 估计; 从图 3 可以看出, 当信号方位相差减少到 10 度时, 即分辨力要求提高时, MVDR 算法的性能严重下降, 已经不能再实现

相干信号 DOA 估计, 而 MMVDR 算法仍能满足要求, 说明本文算法相比 MVDR 提高了分辨力, 而且, 它相比经典的前后向空间平滑算法估计精度相当, 说明 MMVDR 也能作为一种很好的解相干 DOA 估计算法; 图 4 说明, 相比图 3, 当阵元数增加时, MMVDR 和前后向空间平滑算法性能变得更好, 而且此时 MVDR 算法也变得可以实现, 这说明 MMVDR 算法相比 MVDR 算法分辨力有了提高, 尤其是在阵元数较少的情况下, 本文算法仍能高分辨、高精度地估计, 说明了本文算法的有效性。

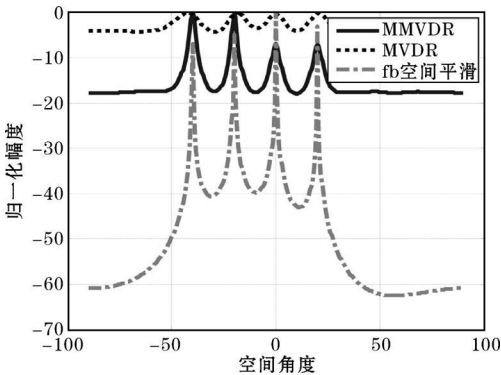


图 2 信号方位相差 20 度, $L=8$

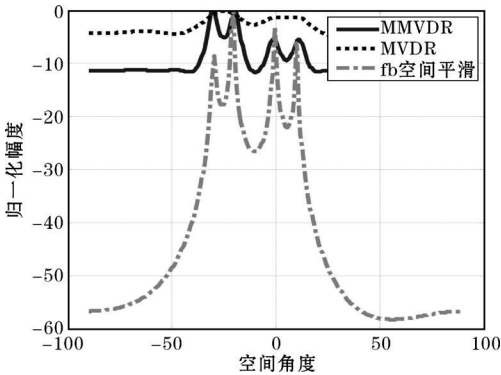


图 3 信号方位相差 10 度, $L=8$

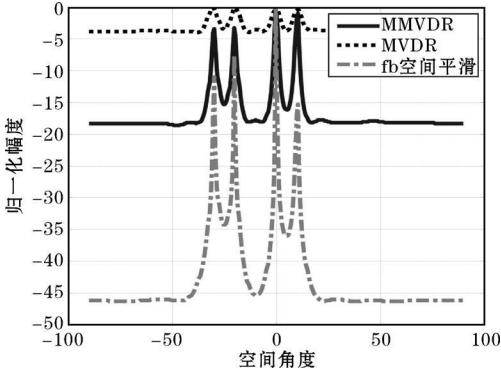


图 4 信号方位相差 10 度, $L=16$

实验二: 三种算法的角度估计 RMSE 比较

四个波长为 λ 的信号, 第一、二个相干, 第三、四个相干, 入射方向分别为 $-30^\circ, -20^\circ, 0^\circ, 10^\circ$, 快拍次数为 $N=100$, 阵元数为 $L=8$, 定义 DOA 估计的均方根误差为:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^P (\hat{\theta}_i - \theta_i)^2} \quad (16)$$

让信噪比在 -5dB 至 20dB 之间改变, 步进值为 1dB , 对每 dB 做 100 次 monte-carlo 实验, 仿真结果如图 5 所示。在此基础上, 令信噪比 $SNR=5\text{dB}$, 让快拍数在 20 至 1000 次之间改变, 步进值为 20 次, 其余条件相同, 同样对每一种快拍数做 100 次 monte-carlo 实验, 仿真结果如图 6 所示。

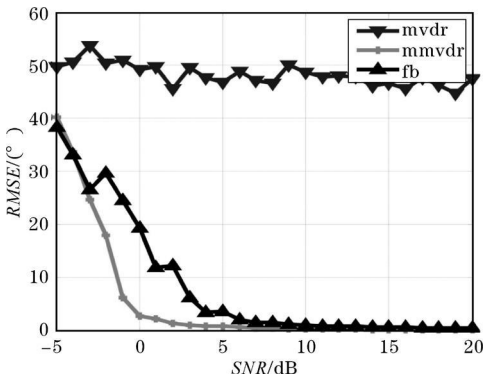


图 5 RMSE 与 SNR 关系

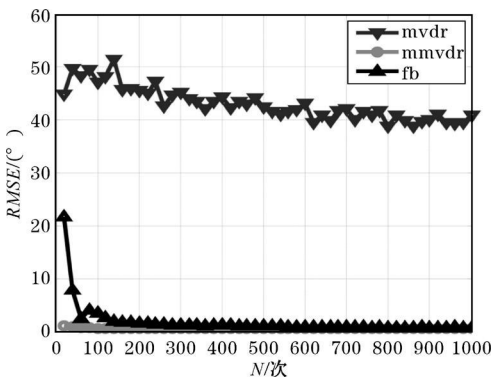


图 6 RMSE 与快拍数的关系

从图 5 可以看出, 当信号方位差为 10° 时, 尽管把信噪比提高, MVDR 算法也不能再实现信号 DOA 估计, 这说明 MVDR 算法虽然也能实现相干信号 DOA 估计, 但分辨力并不是很高; 对于 MMVDR 算法和前后向空间平滑算法, 总体来讲随着 SNR 的提高, 估计性能越来越好, 且相比之下当 SNR 大于 -5dB 开始 MMVDR 稳定性比后者

更好, 因为从图中可以看出前后向空间平滑算法在 -2dB 和 2dB 两个地方出现了波动, 且信噪比从 -4dB 开始到 10dB 之间, MMVDR 算法的估计精度就要高于前后向空间平滑法, 当信噪比大于 0dB 开始, 本文算法就基本能实现高精度要求, 当信噪比大于 10dB 开始两者趋于吻合, 这说明在少量阵元、低信噪比情况下 MMVDR 算法的解相干 DOA 估计性能要高于前后向空间平滑算法, 在高信噪比的情况下, 两者性能相当。从图 6 可以看出, 在分辨力要求较高的情况下, 尽管快拍数增加, MVDR 算法还是没法实现 DOA 估计, 这充分说明了 MVDR 算法的局限性, 即分辨力不高; 而本文算法和前后向空间平滑算法随着快拍数的增加总体效果变得更好, 在快拍数大于 100 时两者基本趋于吻合, 但当快拍数小于 100 次时, 本文算法的估计精度要明显高于后者, 本文算法甚至在快拍数为 20 次时仍能高精度地估计, 这充分说明了本文算法在低快拍数情况下具有很强的优势。

实验三: 三种算法的计算复杂度比较

设阵元数 $L=8$, 对于前后向空间平滑子阵阵元数为 $m=5$, 让快拍数 N 在 20 至 1000 次之间改变, 步进值为 50 次, 三种算法的计算复杂度仿真结果如图 7; 设快拍数为 $N=500$, 阵元数 L 在 6 至 46 之间改变, 步进值为 2, 对于前后向空间平滑算法, 子阵阵元数设为 $L/2+1$, 仿真结果如图 8。

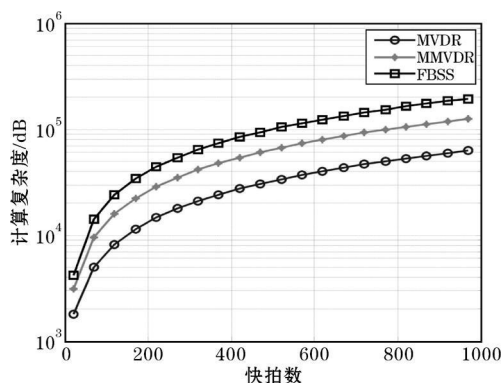


图 7 计算复杂度与快拍数的关系

从图 7 和图 8 可以看出, MMVDR 算法较 MVDR 算法在取得优势的同时计算量要略大些, 但相比空间平滑算法, 其计算复杂度要低。且相对来讲, 阵元数对计算复杂度的影响要大于快拍数对计算复杂度的影响。

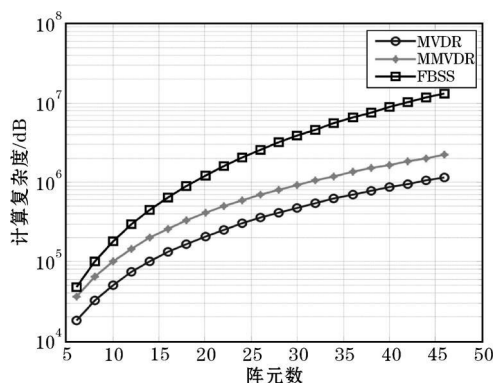


图 8 计算复杂度与阵元数的关系

5 结论

传统的 MVDR 自适应波束形成算法可以用于信号的 DOA 估计, 但当阵元数下降和分辨力要求提高时, 它的解相干性能将受到严重限制, 甚至无法实现。改进的 MMVDR 算法灵活的运用数据共轭重排构造接收数据增广矩阵, 易于实现, 虽然计算量相比 MVDR 方法有所增加却低于前后向空间平滑算法, 但分辨力相比未改进之前的算法却有明显提高, 尤其是在低阵元数和低快拍数的情况下效果改进更加明显, 而且在低信噪比和低快拍数的情况下本文算法的性能要优于前后向空间平滑算法, 在高信噪比和高快拍数情况下两种算法性能相当。因此, MMVDR 算法能作为一种很好的相干信号 DOA 估计方法, 相比 MVDR 和前后向空间平滑算法, 其优势尤其体现在低阵元数、低信噪比和低快拍数的情况下。

参考文献:

- [1] 黄平, 黄登山, 陈春霖. 相干信号源 DOA 估计的一种改进 SVD 算法[J]. 现代电子技术, 2011, 34(5): 81-84.
- [2] PUSKA H, INATTI J S I. Serial Search Code Acquisition Using An Art Antennas with Single Correlator or Matched Filter[J]. IEEE Trans on Communications, 2008, 56(2): 299-307.
- [3] PILLAI S U, KWON B H. Forward/Backward Smoothing Techniques For Coherent Signal Identification[J]. IEEE Trans on Acoustics, Speech, Signal Processing, 1989, 37(1): 8-15.

(下转第 42 页)

其中, σ_{in} 和 σ_{out} 分别为滤波前后图像的标准差, SNR_{in} 和 SNR_{out} 分别表示背景抑制前和抑制后的图像信噪比。

表 1 几种背景抑制算法的性能测评

性能	算法		
	低通滤波	形态学滤波	本文算法
BSF	2. 86	3. 17	3. 37
SNIR	2. 46	2. 77	3. 04

BSF 和 SNIR 越大, 说明算法滤除背景和保留目标的能力越强^[8], 结合表 1 和图 3 可以看出, 低通滤波算法和形态学滤波算法对背景杂波有一定的抑制作用, 但这两种方法不仅残余了大量的结构性云层杂波边缘, 同时目标信号也受到了很大的削弱, 在背景杂波抑制后的残差图像中依然难以发现目标。本文算法不仅较好地消除了杂波, 而且背景抑制后的目标信号得到了保持, 目标的 BSF 和 SNIR 得到了较好的改善, 残差图像中的目标清晰可见, 表明了算法对杂波干扰复杂环境的适应能力。

5 结论

本文首先对标准形态学滤波算法中结构元进行改进, 提出一种组合型结构元, 然后基于低通滤波和改进型形态学滤波方法, 提出了一种结合线性滤波和非线性滤波的背景抑制方法。新方法体现了形态学的运算性质和结构元素灵活多变的特

性, 克服了形态学极限操作在去噪声同时造成图像信息严重丢失的现象。实验证明该算法能有效性地去除图像中的杂波噪声, 去噪性能优于低通滤波和标准形态学滤波算法, 尤其在低信噪比情况下, 改进方法有明显的优势, 因此该方法在背景抑制中具有广泛的应用前景。

参考文献:

[1] Serra J. Image Analysis and Mathematical Morphology [M]. New York: Academic press, 1982, 1: 20- 28.

[2] 肖启芝, 许凯, 关泽群, 等. 一种形态学滤波结构元的选择方法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(21): 2- 5.

[3] 葛平俱, 苏平. 基于数学形态学的混合消噪法[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(7): 1584- 1585.

[4] 余农, 吴长泳, 汤心溢, 等. 红外目标检测的自适应背景感知算法[J]. 电子学报, 2005, 33(2): 200- 204.

[5] SCHONFELD D. Optimal Structuring Elements for the Morphological Pattern Restoration of Binary Images[J]. IEEE Trans on PAMI, 1994: 16(6): 589- 601.

[6] RAFAEL C, GONZALEZ R, WOODS E. Digital Image Processing Second Edition [m]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

[7] OTSU N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62- 66.

[8] TARTAKOVSKY A, BLAZEK R. Effective Adaptive Spatial-Temporal Technique for Clutter Rejection inIRST [J]. SPIE: Signal and Data Proceeding of Small Targets, 2000, 4048(277): 85- 95.

(上接第 10 页)

[4] DMOCHOWSKI J, BENESTY J, AFFES S. Direction of Arrival Estimation Using Eigenanalysis of the Parameterized Spatial Correlation Matrix[C]// International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Honolulu, Hawaii, USA, 2007: 1- 4.

[5] YE Zhong-fu, XIANG Li, XU Xu. DOA Estimation with Circular Array via Spatial Averaging algorithm[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2007, 6: 74- 76.

[6] XU Di-hua, CHEN Jian-wen, WU You. A Novel Subspace Coherent Signal Processing Algorithm for High-Resolution DOA Estimation[C]// International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications, Yonago, Japan, 2006: 653- 656.

[7] 王布宏, 王永良, 陈辉. 一种新的相干信源 DOA 估计算法: 加权空间平滑协方差矩阵的 Toeplitz 矩阵拟合[J]. 电子学报, 2003, 31(9): 1394- 1397.

[8] DI A. Multiple Sources Location A Matrix Decomposition Approach[J]. IEEE Trans on ASSP, 1985, 33(4): 1086- 1091.

[9] HAN Fang-ming, ZHANG Xia-da. An ESPRIT-like Algorithm for Coherent DOA Estimation[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2005(4): 443- 446.

[10] LIU Li-guo, GAI Yi-bing, WANG Hai-song, et al. An Improved ESPRIT-like Algorithm for Coherent Signal and Its Application for 2-D DOA Estimation[C]// 7th International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory, Singapore, 2006: 1- 4.

[11] SALAMEN A, BAGBY J. Angle of Arrival Estimation without EVD for Coherent Sources [C]// International Conference on Telecommunications. St Petersburg: Russian, 2008: 1- 4.

[12] CAPON J. High-Resolution Frequency-Wave Number Spectrum Analysis[J]. Proc IEEE, 1969, 57(8): 1408- 1418.

[13] 何子述, 黄振兴, 向敬成. 一种有效的 MVDR 波束形成器[J]. 信号处理, 2000, 16(4): 302- 305.