

基于最大输出信噪比准则的自适应脉冲压缩

张劲东 王海青 朱晓华 李戛晟

(南京理工大学电子工程与光电技术学院 南京 210094)

摘要: 传统的匹配滤波只能将距离旁瓣压缩到一定的程度, 因此可能出现强目标的旁瓣掩盖弱目标的情况。针对上述问题, 该文提出了基于迭代思想和最大输出信噪比准则的自适应脉冲压缩方法, 该方法利用先验目标距离像信息来实现自适应地抑制距离旁瓣和噪声。该文首先推导了算法原理, 然后给出了算法的实现步骤, 最后讨论了算法的收敛性及优化。仿真结果表明, 该算法可以自适应地实现旁瓣抑制, 并在多目标和运动目标的情况下能够实现有效的脉冲压缩。

关键词: 雷达; 脉冲压缩; 自适应处理; 最大输出信噪比

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)04-0790-04

Adaptive Pulse Compression via MSN Criteria

Zhang Jin-dong Wang Hai-qing Zhu Xiao-hua Li Yu-sheng

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Traditional matched filter could only suppress range sidelobes to a certain extent, so the weak target may be covered by the range sidelobes of the strong one. To solve this problem, adaptive pulse compression algorithm based on reiteration and maxim output signal-to-noise rate criteria is proposed. This algorithm uses the a priori information to adaptively suppress range sidelobes and noises. Algorithm steps are given according to the principle and convergence is also considered. Simulation results show that this algorithm could effectively suppress sidelobes and still works effectively under conditions of multiple targets and moving target.

Key words: Radar; Pulse compression; Adaptive processing; Maximal signal-to-noise rate

1 引言

在现代雷达中普遍采用脉冲压缩技术来同时扩大作用距离和提高距离分辨力, 即发射大时宽带宽积的雷达信号以提高发射的平均功率, 保证足够的最大作用距离, 而在接收时采用相应的脉冲压缩获得窄脉冲, 以提高距离分辨力。实现脉冲压缩的传统方法是采用 North 匹配滤波器。匹配滤波器是在点目标和高斯白噪声条件下和最大输出信噪比意义下的最优线性滤波器。然而当雷达波束中不再是单个点目标的时候, 或随着雷达发射信号带宽的增加, 目标的回波模型变成多散射点模型表示时, 雷达回波可以看作发射信号与目标距离像的卷积。当距离像上相邻的位置上存在目标的时候, 匹配滤波器的输出可能会出现强目标的旁瓣掩盖弱目标的情况。

为了解决这个问题, 已经提出的非自适应的方法中最小平方(LS)法^[1]通过对相邻单元的去耦合来实现对旁瓣的抑制。LS方法是最小均方意义下的最优方法, 但LS模型并没有考虑到所有的卷积距离像, 因此对于距离窗外的目标无法实现有效提取。失配滤波器^[2]以一定的信噪比损失为代价对

旁瓣进行抑制, 但抑制的效果有限。CLEAN 算法^[3,4]通过估计目标所在位置来清除距离旁瓣的影响, 这种方法虽然可以较为稳健地消除距离旁瓣, 但对弱小目标的提取效果并不很好。2003 年 Shannon 开始提出一种新的思路, 通过基于最小均方误差准则(MMSE)的自适应处理来实现脉冲压缩^[5-9], 该方法利用先验目标距离像信息来迭代实现自适应地抑制距离旁瓣, 通过 3 次以上迭代过程可以有效实现对距离旁瓣的抑制。本文结合迭代思想和最大输出信噪比准则(MSN), 提出迭代最大输出信噪比准则(RMSN)的自适应脉冲压缩, 首先推导了 RMSN 算法原理, 其次给出了 RMSN 算法的具体实现步骤, 然后对算法实现中的收敛性问题进行分析, 最后通过仿真试验验证了算法的有效性和稳健性。

2 基于 MSN 准则的自适应脉冲压缩

假设发射波形用 N 点向量表示为 $\mathbf{s} = [s_0 \ s_1 \ \dots \ s_{N-1}]^T$, 距离像为 L 点采样, 其 N 点向量表示为 $\tilde{\mathbf{x}}(\ell) = [x(\ell)x(\ell-1) \ \dots \ x(\ell-N+1)]^T$, $\ell = 0, 1, \dots, L-1$, 且有 $\{x(\ell) = 0 | \ell < 0 \cup \ell > L-1\}$, $v(\ell)$ 为加性噪声, 则回波信号第 ℓ 个采样点可表示为

$$y(\ell) = \tilde{\mathbf{x}}^T(\ell)\mathbf{s} + v(\ell) \quad (1)$$

接收回波信号的连续 N 个采样点为 $\tilde{y}(\ell) = [y(\ell)y(\ell+1) \dots y(\ell+N-1)]^T$, 因此匹配滤波的结果可表示为^[8]

$$\hat{x}_{MF}(\ell) = \mathbf{s}^H \tilde{y}(\ell) = \mathbf{s}^H \mathbf{A}^T(\ell) \mathbf{s} + \mathbf{s}^H \tilde{\mathbf{v}}(\ell) \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{A}(\ell) = \begin{bmatrix} x(\ell) & x(\ell+1) & \dots & x(\ell+N-1) \\ x(\ell-1) & x(\ell) & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & x(\ell+1) \\ x(\ell-N+1) & \dots & x(\ell-1) & x(\ell) \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(3)可见, 匹配滤波的当前结果受到矩阵 $\mathbf{A}(\ell)$ 非对角线上距离单元的影响。因此将距离像矩阵 $\mathbf{A}(\ell)$ 分解为对角矩阵 $\mathbf{A}_1(\ell)$ 和非对角矩阵 $\mathbf{A}_2(\ell)$, 其中 $\mathbf{A}_1(\ell) = x(\ell)\mathbf{I}_N$, $\mathbf{A}_2(\ell) = \mathbf{A}(\ell) - \mathbf{A}_1(\ell)$ 。式(2)可以表示为

$$\tilde{y}(\ell) = \mathbf{A}_1^T(\ell) \mathbf{s} + \mathbf{A}_2^T(\ell) \mathbf{s} + \tilde{\mathbf{v}}(\ell) \quad (4)$$

式(4)中第 1 项为当前距离单元 $x(\ell)$ 的信号分量, 第 2 项为相邻距离单元的信号分量, 可以看作其他距离单元上的干扰信号, 第 3 项为噪声分量。

为了实现距离旁瓣的有效抑制, 这里设计基于最大输出信噪比准则的滤波器 $\mathbf{w}(\ell)$, 该滤波器与距离单元的位置有关。经过脉冲压缩后的输出信噪比为

$$\begin{aligned} \text{SNR} &= \frac{E[\mathbf{w}^H(\ell) \mathbf{A}_1^T(\ell) \mathbf{s}]^2]}{E[\mathbf{w}^H(\ell) \mathbf{A}_2^T(\ell) \mathbf{s} + \mathbf{w}^H(\ell) \tilde{\mathbf{v}}(\ell)]^2]} \\ &= \frac{\mathbf{w}^H(\ell) \mathbf{R}_s(\ell) \mathbf{w}(\ell)}{\mathbf{w}^H(\ell) [\mathbf{R}_c(\ell) + \mathbf{R}_n] \mathbf{w}(\ell)} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\mathbf{R}_s(\ell) = E[\mathbf{A}_1^T(\ell) \mathbf{s} \mathbf{s}^H \mathbf{A}_1(\ell)] = E[|x(\ell)|^2] \mathbf{s} \mathbf{s}^H$, $\mathbf{R}_c(\ell) = E[\mathbf{A}_2^T(\ell) \mathbf{s} \mathbf{s}^H \mathbf{A}_2(\ell)]$, $\mathbf{R}_n = E[\tilde{\mathbf{v}}(\ell) \tilde{\mathbf{v}}^H(\ell)]$, $E[\cdot]$ 代表求期望。使上式输出信噪比达到最大的最优滤波器 $\mathbf{w}(\ell)$ 为^[10]

$$[\mathbf{R}_c(\ell) + \mathbf{R}_n]^{-1} \mathbf{R}_s(\ell) \mathbf{w}(\ell) = \lambda_{\max} \mathbf{w}(\ell) \quad (6)$$

该滤波器为矩阵 $[\mathbf{R}_c(\ell) + \mathbf{R}_n]^{-1} \mathbf{R}_s(\ell)$ 的最大特征值 λ_{\max} 所对应的特征向量。矩阵 $\mathbf{R}_c(\ell)$ 的第 i 行第 j 列元素为

$$\mathbf{R}_{c_{i,j}}(\ell) = \sum_{n=k_L, n \neq i}^{k_U} \rho(\ell - n + i - 1) s_n s_{n-i+j}^* \quad (7)$$

其中 $k_L = \max\{0, i - j\}$ 为求和的下限, $k_U = \min\{N - 1, N - 1 + i - j\}$ 为上限。

$$\mathbf{R}_s(\ell) = \rho(\ell) \mathbf{s} \mathbf{s}^H \quad (8)$$

其中 $\rho(\ell) = E[|x(\ell)|^2]$ 为单元 ℓ 的平均功率。初始迭代过程中, 设 $\tilde{\mathbf{R}}_c = \mathbf{0}_N$, $\tilde{\mathbf{R}}_s = \mathbf{s} \mathbf{s}^H$ 。

图 1 为 3 步迭代 MSN 算法实现脉冲压缩的过程^[9], 其中下标代表迭代次数。将图 1 中 3 步迭代过程推广到 M 步, MSN 算法经过 M 步迭代后收敛。算法过程如下:

- (1) 根据迭代次数 M , 将 L 个目标距离单元进行扩展, 在其前后各扩展 $(M-1)(N-1)$ 个距离单元, 因此实际截取回波信号 $\{y(-(M-1)(N-1)), \dots, y(L-1+(M-1)(N-1))\}$;
- (2) 将 $\tilde{\mathbf{w}} = \mathbf{s}$ 作为初始脉冲压缩滤波器对 $y(\ell)$ 进行滤波, 得到距离单元的估计值 $\{\hat{x}(-(M-1)(N-1)), \dots, \hat{x}(L-1+(M-1)(N-1))\}$;
- (3) 计算功率估计值 $\hat{\rho}(\ell)$, $\ell = -(M-1)(N-1), \dots,$

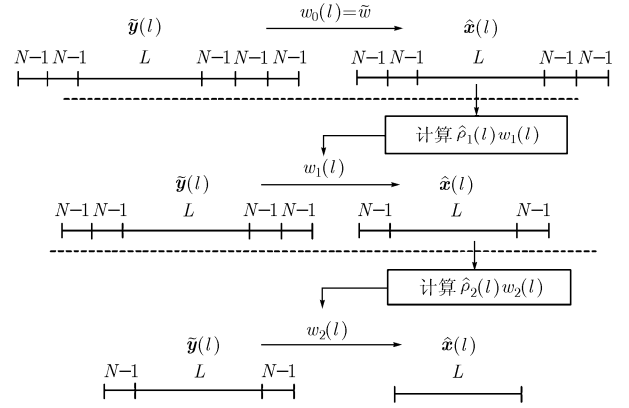


图 1 迭代最大输出信噪比准则算法的步骤

$L-1+(M-1)(N-1)$, 在此基础上计算每个距离单元上的滤波器 $\mathbf{w}(\ell)$, 然后再次将其对 $y(\ell)$ 进行滤波, 得到新的估计值 $\hat{x}(\ell)$;

(4) 重复步骤(3), 直到得到长度为 L 的距离窗。

3 RMSN 算法的分析和优化

RMSN 算法通过迭代过程实现对目标距离像的估计, 每次迭代得到的估计结果作为下一次迭代的先验信息, 因此最终的结果受到收敛性的影响。在 RMSN 算法过程中对矩阵 $[\mathbf{R}_c(\ell) + \mathbf{R}_n]$ 求逆的过程严重影响算法收敛性, 在 RMMSE 算法中对矩阵 $[\mathbf{R}_c(\ell) + \mathbf{R}_s(\ell) + \mathbf{R}_n]$ 求逆的过程影响收敛性。在算法的仿真过程中发现如果 $\hat{\rho}(\ell)$ 的动态范围超过一定程度, 矩阵 $[\mathbf{R}_c(\ell) + \mathbf{R}_n]^{-1}$ 和 $[\mathbf{R}_c(\ell) + \mathbf{R}_s(\ell) + \mathbf{R}_n]^{-1}$ 会出现病态, 此时算法会出现不稳定。

通常将矩阵 \mathbf{A} 的条件数作为衡量矩阵求逆是否发生病态的标准, 其定义为 $\text{cond}(\mathbf{A}) = \|\mathbf{A}\| \|\mathbf{A}^{-1}\|$, $\|\cdot\|$ 为矩阵范数。图 2 给出了 RMMSE 和 RMSN 算法在不同动态范围下经过 1000 次蒙特卡洛仿真得到的 2 范数矩阵条件数。RMSN 算法的矩阵求逆稳定性得到一定的提高。为了进一步优化 RMSN 算法, 将式(6)变换为

$$\mathbf{R}_s(\ell)^{-1} [\mathbf{R}_c(\ell) + \mathbf{R}_n] \mathbf{w}(\ell) = \mu_{\min} \mathbf{w}(\ell) \quad (9)$$

根据式(8), $\mathbf{R}_s(\ell)^{-1}$ 的计算可以预知。式(9)矩阵 $\mathbf{R}_s(\ell)^{-1} [\mathbf{R}_c(\ell) + \mathbf{R}_n]$ 可以避免矩阵求逆过程, 不但可以提高稳定性, 而且减小了运算量。对式(9)中最小特征值所对应特征向量的求解可以采用反幂法, 该方法收敛速度快、精度高, 是目前求特征向量最有效的方法之一^[11]。在反幂法求解过程中, 由于矩阵 $\mathbf{R}_s(\ell)^{-1} [\mathbf{R}_c(\ell) + \mathbf{R}_n]$ 为 Hermite 矩阵, 因此可以采用 Cholesky 分解代替 LU 分解, 然后求解三角方程组进行迭代计算。单步迭代运算的运算量为 $N^2 + N$, Cholesky 分解的运算量^[11]为 $N^3/6$, 在实际仿真中发现在经过 $N/2$ 以内次迭代就可以收敛, 因此该算法的运算量要略高于 RMMSE 算法中矩阵求逆的运算量。采用反幂法计算得到的特征值与 matlab 的计算结果进行比较得到的误差如图 3 所示, 由此同时得到的特征向量精度也比较高。由于无需对矩阵求逆, 使

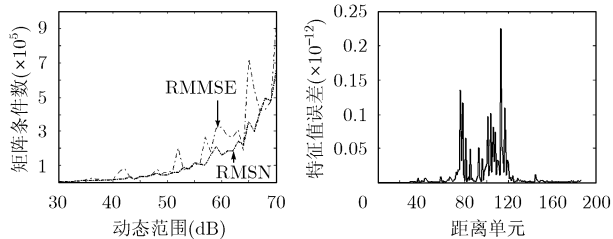


图2 RMMSE和RMSN
算法中求逆矩阵的条件数

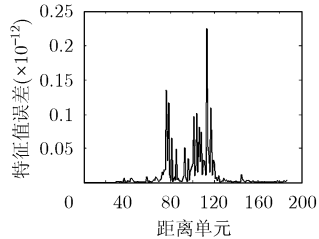


图3 反幂法与 matlab
计算得到的特征值比较

得该算法的稳定性得到提高。而且矩阵采用 Cholesky 分解后减小了运算所需的存储量。

4 仿真实验

为了验证 RMSN 算法的有效性和稳健性,这里设计了3种情况下的仿真实验并将结果与 RMMSE 算法、匹配滤波进行比较。实验1是在高信噪比条件下对单个目标的提取,实验2是在运动目标的情况下对目标的提取,实验3在多个相邻目标的情况下对目标的提取。实验中使用的波形为 $N=30$ 的 Lewis-Kretschmer P4 码, P4 码的定义为

$$s(n) = \exp\left(\frac{j\pi n(n+1)}{N}\right), \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$

其匹配滤波后的结果见图4中的实线。噪声为-60dB的零均值白高斯信号,目标距离像长度 $L=100$ 。

(1)假设在距离窗中第50个距离单元上有一0dB的目标,回波经过匹配滤波和 RMMSE 算法脉压后的结果如图4所示,经过 RMSN 算法脉压后的结果如图5所示。RMMSE 算法在1次迭代后,结果与匹配滤波类似,可以将旁瓣抑制在24dB左右;2次迭代后,旁瓣被进一步地抑制到48dB,3次迭代后旁瓣被抑制到58dB。而 RMSN 在经过两次迭代可以直接将旁瓣抑制到57dB。由此可见,RMSN 算法的收敛性要优于 RMMSE 算法。

(2)假设目标运动引起回波内相位变化 2.23rad,此时匹配滤波的输出主峰下降3dB,RMMSE 算法和 RMSN 算法在回波具有多普勒情况下分别经过3次和2次迭代后脉冲压缩的输出如图6所示。此时两者脉冲压缩后的输出都存在主峰下降、主瓣展宽、旁瓣抬高的现象。和回波无多普勒的情况相比,RMSN 算法的旁瓣抬高约为5dB,而 RMMSE 算法

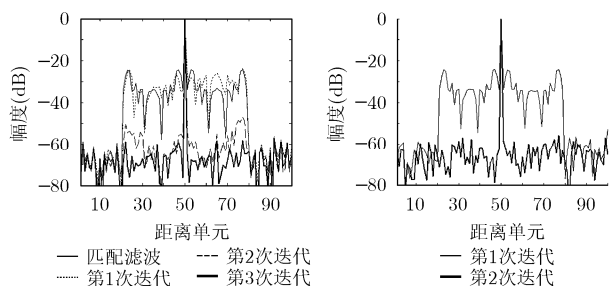


图4 匹配滤波和RMMSE算法的结果

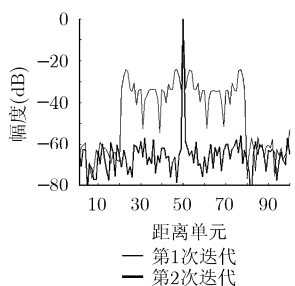


图5 RMSN算法的结果

的旁瓣抬高约为10dB。因此在运动目标情况下 RMSN 算法比 RMMSE 算法要稳健。

(3)在距离单元 $L=50, 30, 57, 65$ 处分别有 0dB, -7dB, -20dB, -32dB 的目标,且目标运动产生的多普勒在 $[-2.23, 2.23]$ rad 范围中,回波经过 RMSN 和 RMMSE 算法后的结果如图7所示。经过匹配滤波后在距离单元 57 和 65 处的小目标很难被提取出来。RMSN 和 RMMSE 算法性能都较好,经过三次迭代后可以很容易地提取出各个目标,但 RMMSE 算法的旁瓣要比 RMSN 算法高出约 6dB。在多目标情况下,RMSN 算法仍可以有效工作。

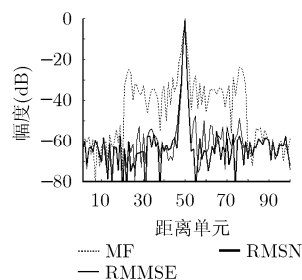


图6 具有多普勒
情况下滤波的结果

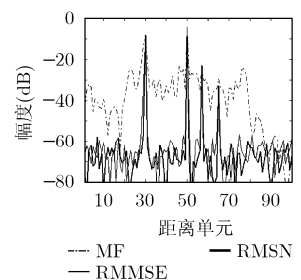


图7 多目标情况
下脉冲压缩的结果

5 结束语

为了抑制距离旁瓣以提高雷达对目标的检测性能,本文在 RMMSE 算法的基础之上提出了基于最大输出信噪比准则的自适应脉冲压缩,该方法可以在静止目标、运动目标 and 多目标情况下稳健并有效地提取目标。仿真结果表明,该算法可以有效地抑制距离旁瓣,并具有一定的多普勒容限,可以有效提取弱小目标。并且和 RMMSE 算法相比,该算法的收敛速度和稳定性也有一定的提高。

参考文献

- [1] Zrnic B and Zejak A. Range sidelobe suppression for pulse compression radars utilizing modified RLS algorithm. Proc. IEEE Spread Spectrum Techniques and Applications, South Africa, 1998, 3: 1008-1011.
- [2] Sato R and Shinrhu M. Simple mismatched filter for binary pulse compression code with small PSL and small S/N loss. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(2): 711-718.
- [3] Hai D. Effective CLEAN algorithms for performance-enhanced detection of binary coding radar signals. IEEE Trans. on Signal Processing, 2004, 52(1): 72-78.
- [4] Bose R, Freedman A, and Steinberg B D. Sequence CLEAN: A modified deconvolution technique for microwave imaging of contiguous targets. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(1): 89-97.
- [5] Shackelford A K, Graaf D J, Talapatra S, and Shannon D B.

- Adaptive pulse compression: Preliminary experimental measurements. IEEE radar conference, Massachusetts USA, 2007: 234-237.
- [6] Blunt S D and Gerlach K. Adaptive pulse compression via MMSE Estimation. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(2): 572-584.
- [7] Shannon D B and Karl G. A generalized formulation for adaptive pulse compression of multi-static radar. IEEE Sensor array and multichannel signal processing, Massachusetts USA, 2006: 349-353.
- [8] Shannon D B and Karl G. Multi-static adaptive pulse compression. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(3): 891-903.
- [9] Blunt S D and Gerlach K. Adaptive Pulse Compression. IEEE Radar Conference, Pennsylvania USA, 2004: 271-276.
- [10] 沈福民. 自适应信号处理. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001: 14-18.
- [11] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析(第四版). 清华大学出版社&Springer 出版社, 2003: 299-311.
- 张劲东: 男, 1981年生, 博士生, 研究方向为高分辨雷达信息处理、雷达波形分集与设计等.
- 王海青: 女, 1976年生, 讲师, 博士生, 研究方向为现代信号处理、自适应信号处理等.
- 朱晓华: 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达系统、高速数字信号处理等.
- 李彧晟: 男, 1979年生, 讲师, 研究方向为雷达成像技术及其信号处理、高速数字信号处理等.