doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.02.009

引用格式:帅晓飞,詹旭.用于步进频连续波雷达旁瓣抑制的自适应 CLEAN 技术[J]. 电讯技术,2015,55(2):163-167. [SHUAI Xiaofei,ZHAN Xu. A Sidelobes Suppression Algorithm Based on CLEAN Technology for Stepped Frequency Continuous Waveform Radar[J]. Telecommunication Engineering,2015,55(2):163-167.]

用于步进频连续波雷达旁瓣抑制的自适应 CLEAN 技术*

帅晓飞^{1,}, 詹 旭^{2,**}

(1. 中国兵器装备集团(成都)火控技术中心,成都 611731;2. 四川理工学院 自动化与电子信息学院,四川 自贡 643000)

摘 要:为了解决步进频连续波雷达中的强目标距离旁瓣掩盖弱小目标问题,对步进频自适应脉压 算法(SFCW-RMSMIL)进行修正,并联合修正 SFCW-RMSMIL 算法和 CLEAN 技术,提出了一种新的 自适应 CLEAN 算法(A-CLEAN)。该算法解决了弱小目标能量严重压制问题,同时还能精确估计各 目标的幅度和位置,提高了雷达对弱小目标的检测能力。最后利用仿真数据、实测数据以及蒙特卡 洛实验验证了新提出的 A-CLEAN 算法的有效性和实用性。

关键词:步进频连续波雷达;旁瓣抑制;自适应 CLEAN;弱小目标检测 中图分类号:TN958.6 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2015)02-0163-05

A Sidelobes Suppression Algorithm Based on CLEAN Technology for Stepped Frequency Continuous Waveform Radar

SHUAI Xiaofei¹, ZHAN Xu²

(1. Fire Control Technology Center of China South Industries Group Corporation, Chengdu 611731, China;
 2. Department of Electronic Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract: This paper addresses the masking problem of small target by large nearby target for the stepped frequency continuous waveform(SFCW) radar. Firstly, the traditional adaptive pulse compression based on the reiterative maximum signal minus interference level(SFCW-RMSMIL) is modified. Then a novel adaptive CLEAN(A-CLEAN) algorithm is proposed by combining the modified SFCW-RMSMIL method with the CLEAN technology for sidelobe reduction to improve the detection ability. The new algorithm succeeds in dealing with the problem that the power of weak target is seriously suppressed, and estimates the amplitude and location of weak target accurately. Finally, several numerical results using simulated data, real data and Monte Carlo experiment are provided to prove the effectiveness and practicability of the proposed algorithm. **Key words**: stepped frequency continuous waveform radar; sidelobes suppression; adaptive CLEAN; weak target detection

1 引 言

在步进频连续波(Stepped Frequency Continuous Waveform, SFCW) 雷达中, 对回波信号通常采用逆快速傅里叶变换(Inverse Fast Fourier Transform, IF-FT)技术获得雷达的距离像信息^[1],但 IFFT 固有的

高距离旁瓣对邻近弱小目标掩盖问题限制了 IFFT 在实际中的应用。因此,解决这种掩盖问题以提高 雷达对弱小目标的检测性能十分必要。目前,针对 该掩盖问题已经取得一定的成果,如 Piet van Gendere 等人提出的自回归 Yule-Walker 算法^[2],仿真

** 通讯作者:Zhanxuu@163.com Corresponding author:Zhanxuu@163.com

 ^{*} 收稿日期:2014-09-12;修回日期:2015-01-22 Received date:2014-09-12;Revised date:2015-01-22
 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61178068);四川省教育厅项目(14ZB0223)
 Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61178068); Sichuan Provincial Education Department Project (14ZB0223)

结果表明该算法在对弱小目标检测和分辨方面优于 IFFT 技术,但是在发射信号能量较弱时,该算法对 旁瓣的抑制能力较差,不能很好地解决弱小目标被 掩盖的问题。在文献[3]中,周启荣等人提出了基 于熵的旁瓣抑制算法,仿真结果表明最大熵可以有 效去除 Gibbs 振荡造成的拖尾旁瓣,但积分电平较 高,最小熵可以降低峰值旁瓣电平和积分旁瓣电平, 却会抑制弱信号主瓣幅度。最近,L. Kong 等人提出 了基于迭代最小均方误差准则(Reiterative Minimum Mean-square Error)的自适应脉压算法(SFCW-APC)^[4],仿真和实测数据验证均表明该算法能够有 效抑制步进频雷达中的距离像旁瓣.获得更好的检 测性能。在文献[5]中,L. Kong 等提出了基于迭代 最大信干差(Reiterative Maximum Signal Minus Interference Level, RMSMIL)的自适应脉冲压缩算法(SF-CW-RMSMIL),仿真实验表明 SFCW-RMSMIL 比 SFCW-APC 具有更好的收敛性。然而,在多目标场 景中,该算法会严重压制弱小目标的能量,不利于雷 达对弱小目标的检测。

基于上述讨论,本文首先对 SFCW-RMSMIL 算 法进行修正,以保证在压制旁瓣的同时准确估计各 目标的幅度和位置。经过实验发现,在目标回波信 号很弱时,该修正 SFCW-RMSMIL 算法在场景中目 标个数未知的情况下检测性能依然受到限制.且该 算法的检测性能对强弱目标所在的相对位置的变化 敏感。为此,我们进一步联合修正 SFCW-RMSMIL 算法和 CLEAN 技术^[6-7],充分利用两种算法各自的 优点,提出了一种新的自适应 CLEAN 算法(Adaptive CLEAN, A-CLEAN)。与上述的 SFCW-APC 和 SFCW-RMSMIL 一样, A-CLEAN 算法是一种迭代算 法。首先,在该算法中用修正 SFCW-RMSMIL 算法 作为前置估计器去取代 IFFT:其次,通过比较第 k 步与第 k-1 步所有感兴趣距离单元能量之和的大 小自适应地判断目标存在与否,在场景中目标数目 未知的情况下实现对每一个目标的精确提取。最 后,利用仿真数据和实测数据验证了 A-CLEAN 算 法的有效性和实用性。

2 回波模型

假设仿真中感兴趣的距离单元个数为 L,那么 经过 L/Q 解调和低通滤波,接收到的回波信号表示 如下^[5]:

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{S}^{\mathrm{H}} \boldsymbol{x} + \boldsymbol{n}_{\circ} \tag{1}$$

式中, $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_L]^T$ 是距离像上 L 个连续采样 · 164 ·

值,在传统的步进频雷达中,该距离像的获得是通过 对回波信号 y 进行 IFFT;(•)ⁿ是转置共轭操作;n 为噪声向量;信号矩阵 S 可以按下式进行描述:

$$\boldsymbol{S} = \begin{bmatrix} e^{j2\pi f_0 \tau_1} & e^{j2\pi (f_0 + \Delta f) \tau_1} & \cdots & e^{j2\pi (f_0 + (M-1)\Delta f) \tau_1} \\ e^{j2\pi f_0 \tau_2} & e^{j2\pi (f_0 + \Delta f) \tau_2} & \cdots & e^{j2\pi (f_0 + (M-1)\Delta f) \tau_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{j2\pi f_0 \tau_L} & e^{j2\pi (f_0 + \Delta f) \tau_L} & \cdots & e^{j2\pi (f_0 + (M-1)\Delta f) \tau_L} \end{bmatrix} \circ$$
(2)

式中, f_0 为起始频率, Δf 为步进频率, τ_l 为第 l个距离 单元的延时,M为频率步进点数。因此,IFFT 估计 的目标距离像可以表示为

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{\text{ifft}} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{y} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{S}^{\text{H}}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{S}\boldsymbol{n}_{\circ} \tag{3}$$

由于 IFFT 产生的高距离旁瓣会掩盖邻近的小目标,因此在我们过去的工作中也提出了诸多有效的旁瓣抑制算法,而且在单目标场景中和多目标场景中(各目标信噪比变化不大,也即是回波强度接近的场景中),这些算法在旁瓣抑制和对小目标的提取上都取得了良好的效果,不幸的是在各邻近目标信噪比变化很大的多目标场景中,这些算法均不能有效地从旁瓣中提取出小目标,旁瓣抑制性能也随之恶化,这种性能的下降,SFCW-RMSMIL算法表现尤为明显。因此,为了解决 SFCW-RMSMIL 算法的存在问题,我们首先推导了修正 SFCW-RMSMIL算法,进而提出了A-CLEAN 算法。

3 自适应 CLEAN 算法(A-CLEAN)

A-CLEAN 算法的流程如图 1 所示。从图中可 以看出,该算法主要包含 3 个模块,第一块是初始化 处理,用于找到第一个最大目标,并记录下其幅度与 位置;第二块是 CLEAN 处理,用于提取每一步迭代 过程中的最大目标,并自适应地判断目标提取是否 完毕;第三块是修正 SFCW-RMSMIL 估计器,用于 在每步迭代过程中,为 CLEAN 处理提供目标精确 的幅度和位置信息。其中,第二块和第三块是算法 的关键技术,也是本文的重点。



图 1 A-CLEAN 算法的处理模块 Fig. 1 Processing modules of A-CLEAN

从文献[5]中可以看出,在修正 SFCW - RMSMIL 估计器模块中,其本质就是分别为每个距离单元设计一个基于最大信干差准则的滤波器 (MSMIL 滤波器),在 SFCW-RMSMIL 算法中,第 *l* 个距离单元的滤波系数可表示为

$$\boldsymbol{w}(l) = \boldsymbol{\rho}(l) \left(C(l) \right)^{-1} \boldsymbol{s}_{lo} \tag{4}$$

式中, $\rho(l) = |x(l)|^2$ 为第*l*个距离单元的功率估计, 这里初始化距离像估计由 IFFT 获得; $s_l = [e^{i^2\pi/\sigma_l}, e^{i^{2\pi}(f_0+\Delta)\tau_l}, \cdots, e^{i^{2\pi}(f_0+(M-1)\Delta)\tau_l}]^H$ 。而修正的 SFCW-RMSMIL 算法将这里的 MSMIL 滤波器系数 经过归一化,使其满足 $w(l)s_l = 1$ 。这个操作减小了 强目标对应的权系数幅度,能有效凸显邻近距离单 元的弱小目标。假设所有距离单元各项内容相互独 立,式(4)中的干扰矩阵C(l)可表示如下:

$$\boldsymbol{C}(l) = \boldsymbol{S}^{\mathrm{H}} \begin{pmatrix} \rho(1) & \cdots & \cdots & \cdots & 0\\ \vdots & \ddots & \cdots & \cdots & \vdots\\ 0 & \cdots & \rho(l-1) & \cdots & 0\\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0\\ 0 & \cdots & \rho(l+1) & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & \cdots & \ddots & \vdots\\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \rho(L) \end{pmatrix} \boldsymbol{S} + \boldsymbol{R}_{n} \circ$$
(5)

式中, $R_n = \sigma^2 I_M$ 为噪声协方差矩阵,这里的 σ^2 为噪声功率, I_M 为 $M \times M$ 维单位矩阵。

传统 CLEAN 算法是一种迭代算法,并且需要 知道场景中的目标个数,根据文献[5-6],第 k 次迭 代过程中该算法的数学等价公式可以表示为

$$\mathbf{y}_{k} = \mathbf{y}_{k-1} - x_{k-1}(i) \mathbf{s}_{i}$$
 (6)

式中, $k=1,2...,\tilde{x}_{k-1}(i)$ 为第k-1步的第i个距离单元的幅度估计值,这里的i为当前最大目标的位置。 特别地,当k=1时, $y_0=y$ 。而在本文的A-CLEAN 算法中,对距离像 $\tilde{x}_{k-1}(i)$ 估计由修正 SFCW -RMSMIL 获得,因此式(6)可变成

$$\boldsymbol{y}_{k} = \boldsymbol{y}_{k-1} - \boldsymbol{x}_{\text{RMSMIL}}^{k-1}(i) \boldsymbol{s}_{i \circ}$$
(7)

式中, $\tilde{x}_{\text{RMSMIL}}^{k-1}(i) = w_{k-1}^{\text{H}}(i) y_{k-1}$ 是由修正 SFCW-RMSMIL 估计器获得的第 k-1 步最大目标的幅度估计值。

图 2 展示了 A-CLEAN 算法的详细流程,其具体步骤也可作如下描述:

(1)当*k*=1时,对回波 *y* 运行式(3)的 IFFT 获 得初始化距离像 $\tilde{\mathbf{x}}_{\text{RMSML}}^1 = [x_1, x_2, \cdots, x_L]^T$,找到最大 目标所在的位置 *i*=arg{max($\tilde{\mathbf{x}}_{\text{RMSML}}^1$)},记录其幅度 $\mathbf{x}'_i(1) = \max(\tilde{\mathbf{x}}_{\text{RMSML}}^1)$,同时计算出所有感兴趣单元 的功率之和 $P_0 = \sum_{i=1}^{L} |x_i|^2$;

(2) 在第 k 步迭代过程中,首先将 k-1 步得到 的估计距离像按式(7) 作用于 k-1 步的回波,进而 对残余的回波信号采用修正 SFCW-RMSML 算法估 计其距离像,采用与第1步同样的操作过程记录最 大值的幅度和位置,输出第 k 次迭代的目标距离像

 S_k ,并计算功率总和 $P_k = \sum_{i=1}^{L} |x(i)|^2$;

(3)如果 P_k<P_{k-1},可以确定减掉的最大值是一 个真实目标的值,将该目标的位置记录下来,程序跳 到 k=k+1 步,重复步骤 2,直到 P_k>P_{k-1},说明所有目 标已经全部被提取出来并令 k=K,同时可以给出整

个距离历程的目标距离像: $S = \sum_{k=1}^{n} S_{k}$ 。



图 2 A-CLEAN 算法的详细处理流程 Fig. 2 Detailed processing modules of A-CLEAN algorithm

4 性能评估

本节将通过仿真数据和实测数据来验证 A-CLEAN 算法的有效性,并通过蒙特卡洛仿真实验将 A-CLEAN 算法和修正 SFCW-RMSMIL 算法作比 较。为了验证算法对弱小目标的发现能力,实验中 会在强目标附近放置弱小目标。以下仿真和实测数 据的雷达系统参数均按照实验室某步进频连续波雷 达设置,如表1所示。

表1 系统参数设置				
Table 1 System parameters				
频点数 M	起始频率 /MHz	步进频率 /MHz	步进时间 /µs	
91	1000	100	100	

4.1 A-CLEAN 算法仿真结果

本实验采用表 2 所示仿真参数的仿真数据验证 修正 SFCW-RMSMIL 算法和 A-CLEAN 算法的有效 性,从表中可以看出位于距离单元 142 和 155 附近 有弱小目标。

Table 2 Targets parameters for simulation		
目标位置	<i>SNR</i> /dB	
100	0	
135	-5	
142	20	
153	-2	
155	40	
200	3	

仿真结果如图 3 所示,从图 3(a)可以看出经过 修正 SFCW-RMSMIL 算法后,在各峰值反映出的目 标位置均正确,旁瓣抑制较好,同时不会压制邻近弱 小目标的能量。但是当接收到的目标信号很弱时, 弱小目标依然有可能淹没在旁瓣中,较难被检测出, 同时,在不知道场景中目标个数情况下,被旁瓣掩盖 的目标不能有效地被提取出来,因此还需采取措施 提高雷达对弱小目标的检测性能。本文进一步采用 的 A-CLEAN 算法,其仿真结果如图 3(b)所示。可 以看出 A-CLEAN 算法可以有效地提取场景中的弱 小目标(如图 3(b)位于第 135 和第 153 个距离单元 的目标),且该算法在不知道目标个数的情况下依 然能够精确地提取出场景中的每一个目标。



图 3 两种算法仿真结果 Fig. 3 Simulation results of modified SFCW-RMSMIL and A-CLEAN

4.2 检测性能分析实验

本实验通过蒙特卡洛实验分析修正 SFCW-RMSMIL 算法与 A-CLEAN 算法的性能。实验中采 用恒虚警检测器,虚警概率为10-2,门限用10000次 试验数据求得,发现概率由3000次试验求得。该实 验场景中首先固定强目标的位置和其散射强度,这 里设其位于第15个距离单元,信噪比为50dB,强目 标与弱小目标的信噪比差值如图4横坐标所示在30 ~70 dB变化,我们给出了对两个不同位置弱小目标 的检测性能曲线,L=5和L=8分别表示弱小目标在 远离雷达方向与强目标的绝对位置相差5个和8个 距离单元。从图中可以看出:其一,采用 A-CLEAN 算法,雷达对弱小目标的性能要优于采用修正 SF-CW-RMSMIL 算法:其二,修正 SFCW-RMSMIL 算法 的检测性能对目标的位置变化敏感,但是 A-CLEAN 算法受目标所在位置的影响很小,检测性能 的稳定性优于修正 SFCW-RMSMIL 算法:其三,随 着两目标信噪比差值的增加,弱小目标的检测性能 逐渐降低。



图 4 两种算法通过蒙特卡洛仿真结果 Fig. 4 Detection probability of modified SFCW-RMSMIL and A-CLEAN

4.3 实测数据验证

为了验证 A-CLEAN 算法的实用性,本小节采 用实测数据进行验证。场景中我们放置 3 个材质相 同大小不同的球体目标于第 90、123、151 个距离单 元,图 5 给出了两种算法的处理结果。从图 5(a)可 以看出,3 个目标间信噪比差值较大,位于第 123 个 距离单元的目标甚至已经被掩盖在旁瓣或是噪声基 底中。而从图 5(b)中的 A-CLEAN 处理结果可以 明显看出,该目标被有效地提取出来,场景中共有 3 个目标,而经过 A-CLEAN 算法,也能自适应地准确 地提取出 3 个目标。





5 结束语

我们针对在多目标场景中强目标距离旁瓣掩盖 附近弱小目标问题,提出了基于 CLEAN 技术的有 效检测弱小目标的 A-CLEAN 算法。该算法联合修 正的 SFCW-RMSMIL 算法与 CLEAN 技术,不但能 提高弱小目标的发现能力,还能精确估计目标的位 置和幅度。通过仿真实验和实测数据,进一步验证 了 A-CLEAN 算法的有效性。由于该算法利用多次 迭代逐次去除强目标对邻近目标的影响,计算量比 较大,这对工程应用的硬件要求较高,优化该算法减 小计算量将是我们下一步的研究内容。

参考文献:

[1] Van Genderen P, Nicolaescu I. System description of a

stepped frequency CW radar for humanitarian demining [C]// Proceedings of 2nd International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar. Delft, Netherlands: IEEE, 2003;9–15.

- [2] Van Genderen P, Nicolaescu I. Imaging of stepped frequency continuous wave GPR data using the Yule–Walker parametric method [C]// Proceedings of 2005 Radar Conference. Paris: IEEE, 2005:77–80.
- [3] 周启荣,黄春琳,陆珉. 基于熵步进频率探地雷达距离旁 瓣抑制[J]. 雷达科学与技术,2008,6(5):361-365.
 ZHOU Qirong, HUANG Chunlin, LU Min. Range side – lobe suppression based on Entropy in stepped-fequency ground penetrating radar [J]. Radar Science and Technology,2008,6(5):361-365.(in Chinese)
- [4] Kong L J, Zhao B, Cui G L. Sidelobe suppression method for stepped frequency continuous-wave radar [J]. Electronisc Letters, 2011, 47(7):460-462.
- [5] Yang M, Kong L J, Zhao B. A novel method to suppress range sidelobes for stepped frequency continuous – wave radar [C]//Proceedings of 2012 IEEE Radar Conference. Atlanta, GA: IEEE, 2012:404–407.
- [6] Abramovich Y I. Compensation methods of resolution of wideband signals [J]. Radio Engineering and Electronics Physics, 1978, 23(1):54-59.
- [7] Deng Hai. Effective CLEAN algorithms for performance-enhanced detection of binary coding radar signals [J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2004,52(1):72–78.

作者简介:



帅晓飞(1980—),女,四川荣县人,博 士,工程师,主要研究方向为雷达信号处理、 信号与信息处理;

SHUAI Xiaofei was born in Rongxian, Sichuan Province, in 1980. She is now an engineer with the Ph. D. degree. Her research concerns radar signal processing, signal and information

processing.

詹 旭(1981—),女,四川宜宾人,硕士,讲师,主要研 究方向为信号与信息处理、图像处理。

ZHAN Xu was born in Yibin, Sichuan Province, in 1981. She is now a lecturer with the M.S. degree. Her research concerns signal and information processing, image processing.

Email: Zhanxuu@ 163. com