面向低慢小目标探测的稳健发射波束控制技术

金松坡¹, 庄珊娜², 魏晓凤³, 王鹏毅¹

(1. 中国电子科技集团公司第54研究所,河北石家庄 050081;

2. 石家庄铁道大学 信息科学与技术学院,河北 石家庄 050043;

3. 中国空间技术研究院卫星应用总体部,北京 100094)

摘要:针对低空、慢速小目标探测易被地面动目标或强地物杂波影响的问题,提出一种抑制 近地侧杂波对低慢小目标检测影响的稳健发射波束控制算法。通过约束发射波束对地侧副瓣 电平,可以减少对地侧区域的动目标或强地物杂波的回波。算法以波束稳健性为目标函数,以 峰均比约束优化发射能量利用率,将该优化问题转换为二阶锥优化(Second-Order Cone Programming, SOCP)问题,并求解该优化问题。仿真结果表明,该算法能够在保持发射效率的同 时有效减少近地侧副瓣发射功率,同时提高发射波束的稳健性。

关键词:低慢小目标;波束形成;目标检测;二阶锥优化 中图分类号:TN911.7 文献标志码:A 文章编号:2095-0373(2023)01-0114-06

低空、慢速小(Low-altitude Slow-speed and Small, LSS)目标是指飞行高度低于1000 m,飞行速度 小于55 m/s 且雷达有效截面积(Radar Cross Section, RCS)小于2 m²的目标^[1-2]。在民用领域,LSS 目标飞行器可以实现航空拍摄、环境监测、故障检测、农业灌溉等任务;在军用领域,LSS 飞行器能够利用近 地强地物杂波作为掩护,完成远距离侦查、攻击等任务。

在空域检测时,对于 LSS 目标的探测通常会被地面动目标或强地物杂波所干扰。由于地面动目标或 强地物杂波的回波远远大于 LSS 目标回波,且在多普勒域上呈现一定的频域扩散,使得雷达的微弱回波 信号处于大量杂波之中,对于 LSS 目标检测造成严重的困难。

为了改进在地面动目标杂波以及强地物杂波等复杂环境下对 LSS 目标的检测能力,近年来有许多方法 已经被提出^[3-8]。目标被普遍使用的 LSS 检测方法主要有雷达检测、射频检测和视频检测^[3]。在这些方法 中,雷达检测能够实现全天候检测,相控阵雷达由于能够加强有用目标回波,同时通过波束形成抑制无用的 干扰与噪声^[4],因此得到了广泛的研究。而基于相控阵雷达,大部分研究都集中于设计接收波束的加权系 数,通过接收抑制杂波及干扰,文献[4]提出的角度多普勒离焦转向矢量约束方法可以有效地检测快速运动 目标。Xu et al^[5]提出一种面向 FDA-STAP 雷达的自适应波束形成算法可用于检测快速移动目标。但是,该 算法需要回波信号的协方差矩阵,当训练数据不足时,不能有效抑制地面运动目标的杂波。对于静态发射波 束形成,加窗法常被用于抑制地面运动目标的回波,虽然加窗可以有效地抑制旁瓣,但它也会拓宽主瓣造成 分辨率降低。动目标指示(Moving Target Indicator, MTI)^[6]是消除杂波的传统方法。但 MTI 只能适用于低 强度的杂波,同时会导致虚警率升高,降低目标检测和跟踪的性能。Aubry et al^[7]提出了一种改进的基于压 缩感知的 MTI 算法,可以在强杂波环境中检测微弱信号,但它需要强大的硬件资源支撑。此外,文献[8]中 提出的改进的特征值分解方法可以抑制双模杂波,但同时需要目标回波协方差矩阵。

针对低慢小目标的探测,张少峰^[9]提出基于对强杂波和多径效应的抑制,通过精细化处理技术、高分 辨技术和频率捷变技术对目标进行检测,理论分析和试验数据表明,该方法可有效探测低慢小目标。此 外,国内外学者也提出了其他关于低慢小目标检测的新思路,具有一定启发性,如基于粒子滤波的检测前

收稿日期:2022-11-01 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20220333

作者简介:金松坡(1984—),男,高级工程师,研究方向为阵列信号处理、雷达波形优化设计。E-mail:jinsp3217@126.com

金松坡,庄珊娜,魏晓凤,等.面向低慢小目标探测的稳健发射波束控制技术[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2023,36(1):114-119.

跟踪技术、基于变换域方法、基于微多普勒分析的检测方法、基于多活性代理的系统检测方法。基于杂波 白化处理的检测方法^[10]受到频域白化思想的启发,自适应于杂波谱的形状对杂波进行白化,而非滤波,因 此在目标与杂波频谱存在混叠的情况下,仍然能够有效提取目标信息^[11-12]。

本文提出一种基于相控阵雷达的发射波束控制算法,针对 LSS 目标检测易受到地面动目标杂波以及强 地物杂波等的影响,通过主动减少对地侧发射能量来减少地面目标的反射杂波,并引入峰均比约束以保证发 射波束能量的利用率,提出了一种低慢小目标探测的稳健发射波束控制技术。通过采用约束松弛法将非凸 目标函数转化为二阶锥规划(Second-Order Cone Programming, SOCP)问题并求解。仿真实验表明,优化后 的波束形成器有效地抑制了地面运动目标区域的回波,并且在地面侧的主瓣和副瓣上都具有良好的性能。

1 信号模型

假设一个均匀线性阵列,由 N 个距离为 d 的阵元组成。则阵列各阵元发射信号到达远场空间 θ 方向 某一点的信号波程差为

$$\boldsymbol{\lambda}(\theta) = \begin{bmatrix} 0, d\sin(\theta), 2d\sin(\theta), 3d\sin(\theta), \cdots, (N-1)d\sin(\theta) \end{bmatrix}$$
(1)

假设电磁波传播速度为 c,且天线载波频率为 f,则空间相位差矢量为

$$\boldsymbol{\varphi}(\theta) = \begin{bmatrix} 0, 2\pi f_0 d\sin(\theta)/c, \cdots, 2\pi f_0 (N-1) d\sin(\theta)/c \end{bmatrix}$$
(2)

设阵列各个阵元的加权矢量为ω,某时刻发射信号为s(t),且在相同时刻所有阵元发射信号均相同, 故远场中θ方向某一点接收信号表示为

$$y(t) = \omega_1 s(t) + \omega_2 s(t) e^{j2\pi f_0 d\sin(\theta)/c} + \dots + \omega_n s(t) e^{j2\pi f_0 (n-1) d\sin(\theta)/c}$$
(3)

令方向导量为

 $\boldsymbol{a}(\theta) = \begin{bmatrix} 1, \mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi f_0 d\sin(\theta)/c}, \mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi f_0 2d\sin(\theta)/c}, \cdots, \mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi f_0 (N-1) d\sin(\theta)/c} \end{bmatrix}$ (4)

定义阵列方向图为

$$F(\theta) = \omega^{H} a(\theta) \tag{5}$$

式中,(·)^H为共轭转置算子。

2 提出的方法

2.1 常规接收波束副瓣控制技术

最小方差无失真响应波束形成(Minimum Variance Distortionless Response, MVDR)算法^[13]的基本 原理是使期望信号方向增益约束为单位增益,同时使得干扰和噪声受到抑制而在阵列输出中的功率最 小,即保证阵列输出功率最小

min
$$\omega^{H} R_{x} \omega$$
 subject to $\omega^{H} a(\theta_{0}) = 1$ (6)

利用 Lagrange 乘子算法求解上述约束优化问题,定义函数

$$J(\omega) = \frac{1}{2} \omega^{H} R_{x} \omega + \lambda(\omega^{H} a(\theta_{0}) - 1)$$
(7)

求解式(7)对ω的梯度并令其为零,可以得到

$$\nabla_{\omega} J = R_x \omega + \lambda a(\theta_0) = 0 \tag{8}$$

因此用 λ 表示的最优加权矢量为

$$\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{MVDR}} = -R_x^{-1} a\left(\theta_0\right) \boldsymbol{\lambda} \tag{9}$$

由于 ω_{MVDR} 满足约束条件式(8), 可以得到

$$\lambda = -\frac{1}{a(\theta_0)^H R_x^{-1} a(\theta_0)} \tag{10}$$

将式(10)代入式(9),得到 MVDR 波束形成算法加权矢量为

$$\boldsymbol{\omega}_{\text{MVDR}} = \frac{R_x^{-1} a(\theta_0)}{a(\theta_0)^H R_x^{-1} a(\theta_0)} \tag{11}$$

在快拍数有限的情况下,式(11)的估计值为

$$\hat{\boldsymbol{\omega}}_{\text{MVDR}} = \frac{\hat{R}_x^{-1} a\left(\theta_0\right)}{a\left(\theta_0\right)^H \hat{R}_x^{-1} a\left(\theta_0\right)} \tag{12}$$

MVDR 算法可以得到经典的解析解,是阵列信号处理的基础^[14]。而副瓣控制技术可以在保证主瓣 指向不变的情况下,实现任意副瓣电平控制,即

$$\begin{cases} \min_{\omega} | \omega^{H} a(\theta_{s}) | \\ s. t. \omega^{H} a(\theta_{0}) = 1 \end{cases}$$
(13)

式中,θ。为副瓣角度。通过式(13)的求解,可以得到针对副瓣约束的波束形成算法,式(13)没有解析解, 可以通过优化算法求得最优解。由于天线具有收发互易的性质,因此可知,为得到相同的方向图,发射波 束形成和接收波束形成可以利用相同的加权矢量,得到收发方向图。

2.2 算法

为了减小 LSS 目标检测在低空受到的严重地面杂波和其他慢速小型干扰,要求地面反射的回波功率 应尽可能低。用 Θ_G 表示地面侧的位置,发射波束形成器中的功率约束可以写为

$$|\boldsymbol{\omega}^{H}\boldsymbol{a}\left(\boldsymbol{\theta}\right)|^{2} \leqslant \delta, \forall \boldsymbol{\theta} \in \boldsymbol{\Theta}_{G}$$

$$(14)$$

式中, 8为 Θ_G 位置的规定旁瓣峰值,可根据实际需要,针对不同位置指定不同的峰值。通过式(14)的约束,可以得到期望的发射副瓣功率,减少发射对地测的能量。雷达方位维波束不做约束,对俯仰维发射波束进行约束,将对地一侧的副瓣进行抑制,减少强地物目标的回波能量,则波束对空方向的副瓣将太高,考虑到对空高仰角一般没有强反射体,因此,较高的副瓣不会引起较强的反射回波,从而在一定程度上抑制了地面强地物杂波对目标检测的影响,提高了系统的检测概率。

在实际应用中,阵列天线间距、信道幅度和信道相位的误差会导致波束方向图变形,从而降低空间滤 波能力以及发射波束的稳健性。由式(3)可知,波束的第 *n* 个加权矢量系数可以写成

$$\omega_n = g_n e^{j\varphi_n} \tag{15}$$

定义波束稳健性目标函数为

$$T_{*} = \sum_{n=1}^{N} g_{n}^{2} = \|\omega\|_{2}^{2}$$
(16)

式中, $\|\cdot\|$ 为 ℓ 范数算子。由于在误差一定的情况下, T_* 越小则波束的稳健性越高, 因此可得

$$\| \boldsymbol{\omega} \|_2^2 \leqslant \beta \tag{17}$$

式中,β为波束稳健性因子。考虑到稳健性,同时为了提高 LSS 目标检测性能,利用式(17)对式(14)进行 修正,以稳健性作为目标函数得到

$$\begin{cases} \min_{\omega} \beta \\ \text{s. t. } \omega^{H} a(\theta_{0}) = 1 \\ |\omega^{H} a(\theta_{s})|^{2} \leq \delta_{s}, \forall \theta_{s} \in \Theta_{S} \\ ||\omega||^{\frac{2}{2}} \leq \beta \end{cases}$$
(18)

式中, θ_0 为主瓣指向; θ_i 为有干扰或在地面侧的位置; Θ_s 为干扰位置以及 Θ_G 中的地面侧位置的集合; δ_s 为副瓣约束因子,其可以根据实际应用确定。对式(18)中的第2个约束进行修正,则式(18)中的问题可以转化为 SOCP 问题

$$\begin{cases} \min_{\omega} \beta \\ \text{s. t. } \omega^{H} a\left(\theta_{0}\right) = 1 \\ |\omega^{H} a\left(\theta_{s}\right)|^{2} \leq \sqrt{\delta_{s}}, \forall \theta_{s} \in \Theta_{s} \\ ||\omega||^{2} \leq \beta \end{cases}$$
(19)

在工程实际中,为了尽可能地提高发射效率,通常使雷达发射机的功率放大器工作在饱和状态。若 对发射波形进行幅度调制,雷达发射效率则会大大降低。因此为充分利用雷达发射机放大器进行功率放 大,往往要求所发射波形具有恒模或低峰均比特性。峰均比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)定义 为峰值功率与平均功率之比,即

$$r_{\text{PAPR}} = \frac{\max_{i=1,2,\dots,N} |\omega_i|^2}{\|\omega\|^2 / N} = \frac{\max_{i=1,2,\dots,N} |\omega_i|^2}{\|\omega\|^2}$$
(20)

由稳健性约束[13-14]可知

$$\|\boldsymbol{\omega}\|^2 \geqslant 1/N \tag{21}$$

将式(21)代入式(20)可得

$$r_{\text{PAPR}} = N \frac{\max_{i=1,2,\dots,N} |\omega_i|^2}{\|\omega\|^2} \ll N \frac{\max_{i=1,2,\dots,N} |\omega_i|^2}{1/N} = N^2 \max_{i=1,2,\dots,N} |\omega_i|^2$$
(22)

若假设雷达发射功率 PAPR 上限值为 ρ_p ,可得

$$\max_{i=1,2,\cdots,N} |\omega_i| \leqslant \sqrt{\rho_P} / N \tag{23}$$

利用式(23)修订式(19)得到

$$\begin{cases} \min_{\omega} \beta \\ \text{s. t. } \omega^{H} a\left(\theta_{0}\right) = 1 \\ |\omega^{H} a\left(\theta_{s}\right)|^{2} \leqslant \sqrt{\delta_{s}}, \forall \theta_{s} \in \Theta_{s} \\ ||\omega ||^{2} \leq \beta \\ \max_{i=1,2,\dots,N} |\omega_{i}| \leqslant \sqrt{\rho_{P}} / N \end{cases}$$

$$(24)$$

式(24)是凸规划问题的一个子类,可利用内点算法在多项式时间内有效地解决。有许多构造良好的 Matlab 工具箱,如 CVX、SeDuMi 等^[15-18],可用于解决 SOCP 问题。这里使用 CVX 工具箱来寻找最优解, 记为 ω_{SOCP}。

3 仿真和分析

进行3个仿真实验来验证所提出的稳健自适应发射波束形成算法的有效性。在仿真实验中,采用了 个数 M=24 的各向同性辐射阵元,阵元间距为半波长的均匀线阵。阵列发射方向图角度覆盖[-90°,

90°],采样间隔为 0.1°,其中地面侧包括[-90°,-5°],空中区 域为[5°,90°]。训练的快拍数为 L=500,所有的仿真均采用 500 次蒙特卡洛实验的结果。

(1)计算机仿真 1。在试验中,假设波束指向 $\theta_0 = 0^\circ$ 。将 所提出方法的波束方向图与 SMI 波束形成器、静态波束形成 器进行比较,分别用 ω_{SMI} 和 $\omega_0 = a(\theta_0)$ 表示。在试验中,将 PAPR 设置为 1.2,地面侧的旁瓣阈值 δ_s 设置为 - 30 dB。图 1 显示了不同加权矢量得到的阵列方向图。可以清楚地发 现,本文方法得到的方向图在地面侧的旁瓣明显低于其他 2 种方法,且不超过 - 30 dB。SMI 波束形成器只能形成用于抑 制干扰的陷波,而不能满足旁瓣和 PAPR 要求。因此,SMI 波束形成器不能在没有进一步优化的情况下直接使用。



(2)计算机仿真 2。在此试验中,地面侧的旁瓣阈值 δ。仍设置为一30 dB,而 PAPR 界限 ρ_p 分别设置 为 1.2、1.4、1.6、2.0。图 2 给出了不同 PAPR 约束下的波束图。可以注意到,随着 PAPR 约束的放松, 天空侧的旁瓣增长不会那么显著。PAPR 阈值可根据实际系统要求进行选择。

(3)计算机仿真 3。在试验中,旁瓣阈值 δ,分别设置为-25、-30、-35、-40 dB,PAPR 界限 ρ,为 1.4,所设计波束方向图如图 3 所示。从图 3 可以发现,所提出的方法可以满足所有的设计要求。随着对 地侧旁瓣抑制强度的增加,对空侧旁瓣有一定抬升。



4 结束语

针对地面运动目标以及强地物杂波干扰背景下的 LSS 检测性能下降的问题,提出了一种基于 SOCP 的 LSS 目标探测的稳健发射波束控制算法。利用对地侧副瓣约束,减少发射波束对地侧发射能量,可有效减少地面运动目标强地物杂波的回波能量。以稳健性为目标函数,在保证主瓣指向的前提下,利用 PAPR 约束,控制发射功率效率,所提算法可在发射波束侧有效减小运动目标以及强地物杂波回波,大大提高 LSS 目标的探测概率。

参考文献

- [1]Sun H J, Liu Q Y, Wang J C, et. al. Fusion of infrared and visible images for remote detection of low-altitude slow-speed small targets[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14 (1):2971-2983.
- [2]Liu J, Liu C, Dong C, et. al. Necessity analysis and scheme of constructing ultra-low-altitude defense system in megacities[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2021, 36(1):14-21.
- [3]Shi X, Yang C, Xie W, et. al. Anti-drone system with multiple surveillance technologies: architecture, implementation, and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(4): 68-74.
- [4]Xu Q, Jiang C, Han Y, et al. Waveforming: an overview with beamforming[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(1): 132-149.
- [5]Xu J, Liao G, Lei H, et. al. Robust adaptive beamforming for fast-moving target detection with FDA-STAP radar[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 65(4):973-984.
- [6]Curtis C D, Yeary M, Lake J L. Adaptive nullforming to mitigate ground clutter on the national weather radar testbed phased array radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2016, 54(3):1282-1291.
- [7] Aubry A, Maio A D, Carotenuto V, et al. Radar phase noise modeling and effects-part I : MTI filters [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2016, 52(2):698-711.
- [8]Ehsan T, Mojtaba R, Mohammad N M, et al. Compressive sensing MTI processing in distributed MIMO radars[J]. IET Signal Processing, 2018, 12(3):327-334.
- [9]张少峰. 低慢小目标雷达探测技术研究[J]. 现代导航, 2017(6):50-54.
- [10]Wang D W. Clutter-whitening-based low-speed weak Target detection over the sea[J]. Modern Radar, 2003, 25(6): 15-18.
- [11]许道明,张宏伟. 雷达低慢小目标检测技术综述[J]. 现代防御技术, 2018(1):148-155.
- [12]Zhao Z G , Chen J W , Bao Z . Modified adaptive ocean clutter suppression approach in OTHR[J]. Systems Engineering & Electronics, 2012, 34(5):909-914.
- [13] Capon J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis [J]. Proceedings of IEEE, 1969, 57(8): 1408-1418.

[14]李洪涛,贺亚鹏,朱晓华,等. 基于谱分析的稳健自适应波束形成算法[J]. 电波科学学报,2012,27(1):147-151. [15]李洪涛. 自适应数字波束形成关键技术研究[D]. 南京;南京理工大学,2013.

[16]Boyd S, Vandenberghe L. Convex optimization[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.

[17]Grant M , Boyd S. CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 2.0 beta[EB/OL]. [2013-09-01] http://cvxr.com/cvx.

[18]Grant M, Boyd S. Graph implementations for nonsmooth convex programs[J]. Lecture Notes in Control and Information Sciences, 2008(1):95-110.

Robust Transmit Beam Control Technology for the Detection of Low-Altitude and Slow-Speed Small Targets

Jin Songpo¹, Zhuang Shanna², Wei Xiaofeng³, Wang Pengyi¹

(1. China Electronics Technology Group Corp 54th Resrarch Institute, Shijiazhuang 050081, China;

2. School of Information Science and Technology, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. Satellite Application Division of China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Aiming at the problem that the detection of low-altitude and slow-speed small targets is easily affected by ground moving targets or strong ground object clutter, a robust transmit beam-forming algorithm was proposed to suppress the influence of near-ground clutter on the detection of low-slow and small targets. The echoes of moving targets or strong ground clutter in the ground side area could be reduced, by constraining the side lobe level on the ground side of the transmit beam. The algorithm took beam robustness as the objective function and optimizes the transmit energy utilization with the peak-to-average ratio constraint. The optimization problem could be converted into a Second-Order Cone Programming (SOCP) problem and solved. The simulation results show that the algorithm can effectively reduce the transmission power of the near-earth side sidelobe and improve the robustness of the transmission beam while maintaining the transmission efficiency.

Key words: low-altitude and slow-speed small targets; beam-forming; target detection; second-order cone optimization

(上接第 60 页)

Abstract: The three-dimensional model of asphalt pavement was established by ABAQUS software. According to the typical temperature of a day in July in some project area, the temperature field and deformation of pavement structure under variable temperature and heavy duty were analyzed considering the characteristics of material properties of asphalt pavement changing with temperature. The permanent deformation and shear creep characteristics of structural layers at different depths were quantified by changing the driving speed and ground stress. The results show that the vertical deformation and shear creep value change alternately in the transverse range of the whole driving road. At slow speed $(20 \sim 60 \text{ km/h})$, the decrease of vertical deformation and shear creep with the increase of vehicle speed is significantly higher than that of fast speed $(80 \sim 120 \text{ km/h})$. Permanent deformation and shear creep mainly appear in the upper and middle layers. When the driving speed is lower than 60 km/h and the ground pressure is greater than 0.9 MPa, the development of permanent deformation of pavement increases rapidly. In summer high temperature seasons, slow traffic and overloaded vehicles should be limited. Timely peak shifting travel and sprinkler cooling can effectively reduce rutting damage.

Key words: rutting; creep; temperature field; heavy duty; driving speed