

doi: 10.7690/bgzd.2013.06.016

基于最小二乘估计的机载火控雷达运动目标检测方法

李文君, 朱文, 李东涛, 鱼佳欣

(中国人民解放军 63898 部队, 河南 济源 454650)

摘要: 针对机载火控雷达在地面运动目标检测模式下主杂波多普勒频率随距离单元快变的特点, 分析机载火控雷达地面运动目标检测特点, 提出一种基于最小二乘估计的多普勒频移补偿方法, 以实例进行仿真验证, 并与常规处理方法和 3DT-STAP 方法进行对比。结果表明: 在低重频模式下, 该算法能自适应的进行多普勒频移补偿, 提高雷达系统地面运动目标检测能力, 优于其他 2 种类似方法。

关键词: 机载火控雷达; 最小二乘估计; 杂波抑制; 多普勒频移

中图分类号: TJ06 **文献标志码:** A

Moving Target Diction Method of Airborne Fire Control Radar Based on Least Squares Estimation

Li Wenjun, Zhu Wen, Li Dongtao, Yu Jiaxin

(No. 63898 Unit of PLA, Jiyuan 454650, China)

Abstract: Aiming at the main cluster Doppler frequency fast varying following the distance unite airborne fire control radar under ground moving target detection mode, analyzed airborne fire control radar ground moving target detection feature, put forwards the Doppler frequency shift compensation method based on least squares estimation. Use example to carry out simulation and verification. Compare regular resolution method with 3DT-STAP method. The results show that, under low repetition frequency mode, the method can self-adaptive carry out Doppler frequency compensation, improve radar system ground moving target detection ability. The method is better than other 2 methods.

Key words: airborne fire-control radar; least squares estimation; clutter suppression; Doppler frequency shift

0 引言

机载火控雷达的天线一般采用前视阵, 在空/地功能中地面运动目标检测 (ground moving target indication, GMTI) 模式下, 载机平台的运动会使地杂波产生多普勒频移, 地面低速运动目标回波在多普勒域很容易淹没于主杂波内, 因此机载火控雷达地面运动目标的检测实际上就是从强地杂波环境中检测出运动目标回波。

20 世纪 90 年代以后, R.Klemm^[1-4]等人着重对前视阵机载雷达的特点进行了较为深入的研究。王彤、孟祥东^[5-7]等人对机载雷达地面低速运动目标检测方法研究时, 提出了基于多普勒频移补偿法。O.Kreyenkamp^[8]开创性地提出了自适应多普勒频移补偿的空时二维自适应处理 (space time adaptive process, STAP) 技术方法。STAP 技术具有良好的杂波抑制效能, 而对于前向阵雷达, 杂波环境不均匀, 随距离而变化, 系统具备更多的自由度, 很难自适应收敛到最优权。90 年代以后出现了干涉对消处理技术^[9-10], 首先采用时域多普勒滤波器将杂波局域化, 然后利用空域加权以滤除不同方向上的主瓣杂波, 其加权系数主要由飞机惯导系统提供, 不受环

境影响, 但干涉对消技术最大的不足是当波束指向垂直于天线平面方向时, 该方法不能有效地增强信噪比, 此时位于主瓣内的动目标不容易被检测出来。

因此, 笔者针对机载火控雷达前视阵下杂波快变的特点, 将最小二乘估计的思想运用 STAP 杂波抑制中, 通过对不同距离单元的回波做自适应频移补偿, 大大降低了杂波的非均匀性。仿真实验结果表明: 该方法能获得较好的杂波抑制性能, 一定程度上有效提高雷达对地面运动目标的检测效果。

1 机载火控雷达地面运动目标检测特点

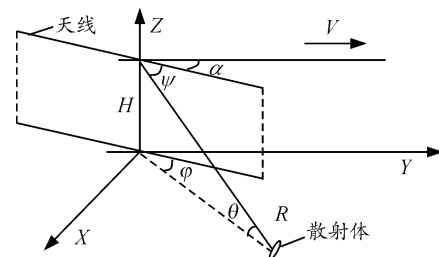


图 1 天线阵面与杂波间几何关系

设地杂波和天线阵面的几何关系如图 1 所示。其中, 天线平面与运动平台速度的夹角为 α , 地杂波相对天线轴向的方位角用 φ 表示, H 为载机升空

收稿日期: 2012-12-23; 修回日期: 2013-01-19

作者简介: 李文君 (1981—), 男, 河南人, 硕士, 工程师, 从事机载雷达与雷达对抗系统研究。

高度, V 为运动平台的速度, λ 为波长, 杂波单元到天线中心的距离为 R , 杂波相对于天线的俯仰角表示为 θ , 杂波相对于天线轴向的锥角记为 ψ 。

则散射体回波的多普勒频率为

$$f_d = \frac{2V}{\lambda} \cos(\varphi + \alpha) \cos \theta = \frac{2V}{\lambda} (\cos \psi \cos \alpha - \sqrt{\cos^2 \theta - \cos^2 \psi} \sin \alpha) \quad (1)$$

火控雷达的天线为前视阵, $\alpha = -90^\circ$, 可得

$$f_d^2 = \left(\frac{2V}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{R^2 - H^2}{R^2} - \cos^2 \psi\right) \quad (2)$$

由式 (2) 可知, 杂波多普勒频率与 R 的变化有关, 近程主杂波变化剧烈, 而远程杂波变化慢, 较为平缓。

$\Delta\varphi_0$ 为主瓣衰减 3 dB 时的波束宽度, 当波束指向 (φ_0, θ_0) 时, 俯仰角主锥面旁瓣的方位 3 dB 宽度为

$$\Delta\varphi(\varphi_1, \theta_1) = \frac{\sin(\varphi_0 - \alpha) \cos \theta_0}{\sin(\varphi_1 - \alpha) \cos \theta_1} \Delta\varphi_0 \quad (3)$$

式 (3) 中 θ_1 、 φ_1 分别为旁瓣的俯仰和方位角。

则杂波散射点 (φ, θ) 的多普勒频率为

$$f_d = f_m \cos \varphi \cos \theta \quad (4)$$

$$f_m = 2V/\lambda \quad (5)$$

方位波速宽度在不同距离门中导致频谱展宽为

$$\Delta f_d = f_m \left| \frac{\sin \varphi_1}{\sin(\varphi_1 - \alpha)} \right| \Delta\varphi_0 \quad (6)$$

当 $\varphi_1 = \varphi_0$, $\theta_1 = \theta_0$ 时, 主杂波谱宽为

$$\Delta F_m = f_m \left| \frac{\sin \varphi_0}{\sin(\varphi_0 - \alpha)} \right| \Delta\varphi_0 \quad (\varphi_0 \neq 0, \pi) \quad (7)$$

机载火控雷达, $\alpha = -90^\circ$, 可得

$$\Delta F_m = f_m \tan \varphi_0 \Delta\varphi_0 \quad (8)$$

由式 (8) 可看出, 主杂波谱宽随 φ_0 的正切值变化, 波束指向与阵面法线接近时, 主杂波的带宽较小, 且杂波的带宽会随着波束偏离角度的增大而增大。

2 最小二乘估计多普勒频移补偿法

机载火控雷达各个距离单元的主杂波呈现很强的非均匀性, 中心频率随距离变化而变化, 对其进行多普勒频移补偿后, 才可使不同距离单元的回波数据满足正态独立同分布的条件。在 HPRF、MPRF(高、中重频)情形下, 用相邻距离单元杂波估计待检测单元杂波回波的协方差矩阵, 不同距离单元的回波数据分别由多个距离单元回波数据叠加而成, 形成多重模糊。笔者将基于最小二乘估计思

想运用到多普勒频移补偿算法, 对相邻距离单元的杂波数据进行估计, 并对杂波数据相位自适应进行补偿, 使其与待测距离单元杂波数据在相位上保持一致, 主要运用于低重频条件下的地面动目标检测。

设 $X(r_n)$ 为距离单元 r_n 的回波数据, $T(r_n)$ 为第 r_n 距离单元的多普勒频移变换矩阵, $X'(r_n)$ 是经过频移变换后 r_n 的回波, 第 k 个脉冲后第 r_n 个距离单元的回波为 $x_k(r_n)$, T 为脉冲重复周期, K 表示相干处理时间内的脉冲总个数, 则多普勒频移过程实质上为:

$$X'(r_n) = T(r_n) X(r_n) = \begin{bmatrix} 1 & & & 0 \\ & e^{j2\pi\beta(r_n)T} & & \\ & & \ddots & \\ & & & e^{j2\pi\beta(r_n)(K-1)T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(r_n) \\ x_1(r_n) \\ \vdots \\ x_{K-1}(r_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & 0 \\ & e^{j2\pi\beta(r_n)T} & & \\ & & \ddots & \\ & & & e^{j2\pi\beta(r_n)(K-1)T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(r_n) \\ x_0(r_n) e^{j2\pi\beta(r_n)T} \\ \vdots \\ x_0(r_n) e^{j2\pi\beta(r_n)(K-1)T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0(r_n) \\ x_0(r_n) e^{j2\pi[\beta(r_n) + \beta(r_n)]T} \\ \vdots \\ x_0(r_n) e^{j2\pi[\beta(r_n) + \beta(r_n)](K-1)T} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, $\beta(r_n) = f_D(r_0) - \tilde{f}_D(r_n)$ ($n=1, 2, \dots, N$)。

r_0 为待检测单元, N 为训练样本数, $f_D(r_0)$ 为待检测单元 r_0 杂波多普勒中心频率, $\tilde{f}_D(r_n)$ 为第 r_n 个距离单元经估计以后的杂波多普勒中心频率。

实际环境中, 机载惯导为火控雷达提供平台运动参数时, 存在一定的误差。第 r 个距离单元主杂波回波的多普勒中心频率为

$$f_D(r) = \frac{2v}{\lambda} \cos(\varphi_a + \varphi_p) \cos \theta = \frac{2v}{\lambda} \sin \varphi_a \sqrt{1 - \frac{H^2}{r^2}} \approx \frac{2v}{\lambda} \sin \varphi_a \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{H}{r}\right)^2 - \frac{1}{8} \left(\frac{H}{r}\right)^4 \right] = a_1 + a_2 \frac{1}{r^2} + a_3 \frac{1}{r^4} \quad (10)$$

式中: $a_1 = \frac{2v}{\lambda} \sin \theta_a$, $a_2 = -\frac{vH^2}{\lambda} \sin \theta_a$, $a_3 = -\frac{vH^4}{4\lambda} \sin \theta_a$ 。

若令 $f_D = [f_D(r_1) f_D(r_2) \dots f_D(r_N)]^T$, $a = [a_1 \ a_2 \ a_3]^T$,

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & r_1^{-2} & r_1^{-4} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & r_N^{-2} & r_N^{-4} \end{bmatrix}。$$

可得 $f_D = Ya + \varepsilon$, 其中由于环境因素带来的观测误差记为 ε 。

由最小二乘估计可得

$$\tilde{a} = (Y^T Y)^{-1} Y^T f_D \quad (11)$$

经估计后不同距离单元对于的主杂波中心多普勒频率为

$$\tilde{f}_D = Y\tilde{a} \quad (12)$$

进行自适应多普勒频移补偿前后及理想状态下不同距离单元主多普勒谱中心频率如图2所示, 由图2可以看出, 基于最小二乘估计的多普勒频移补偿后, 杂波多普勒谱趋于平稳, 中心频率值接近于理想状态下的值, 基本消除了扰动的影响。

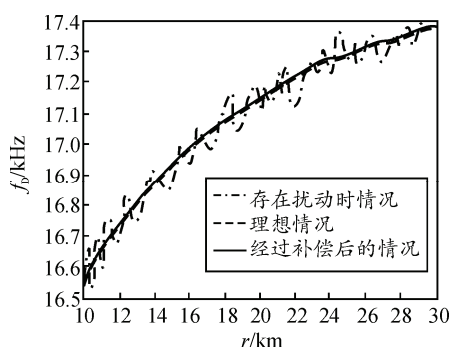


图2 多普勒频移补偿前后对比结果

3 仿真验证

为了验证基于最小二乘估计机载火控雷达运动目标检测方法的有效性, 进行了以下仿真。主要仿真实验参数为: 天线尺寸 16 列×8 行, 单元之间距离 0.12 m, 飞行速度 $V=350$ m/s, 相干脉冲个数 $K=30$, 载机高度 $H=3$ km, 雷达波长 $\lambda=0.03$ m, 脉冲重频 $PRF=2500$ Hz, 杂噪比为 50 dB, 波束与阵面法线方向重合, 俯仰角 $\theta=-3^\circ$ 。笔者将本实验与经典 3DT-STAP 算法效果进行对比, 以验证文中提出的频移补偿算法的性能。图3为采用4种不同处理方法后, 得到的算法性能改善因子之间的对比。

从图3可以看到, 基于最小二乘估计的自适应多普勒频移补偿法, 虽然较理论上的最优处理器性能稍差一些, 但比常规处理方法和 3DT-STAP 方法在性能上有了很大程度的提高。这是因为文中所提方法对杂波谱进行了对齐, 使杂波谱变得平稳, 易于杂波协方差的估计, 提供了杂波抑制能力。而常规杂波抑制处理和 3DT-STAP 处理方法由于没有充分进行多普勒频移自适应补偿, 要得到足够多的满足独立正态同分布条件的杂波数据比较困难, 不易于估计待检测单元的杂波协方差矩阵, 算法处理性

能较低。

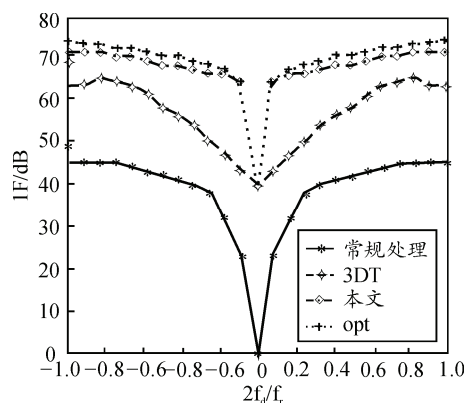


图3 4种不同处理方法改善因子对比

4 结论

笔者针对机载火控雷达 GMTI 模式下主杂波多普勒频率随距离单元快变的特点, 提出了一种基于最小二乘估计的杂波抑制方法, 通过多普勒频移补偿后, 大大提高了空时自适应处理时地杂波抑制能力。仿真实验结果表明: 该方法削弱了各个距离单元杂波多普勒频率变化剧烈程度, 从而易于用相邻距离单元杂波数据来估计待检测单元杂波的协方差矩阵, 加强杂波抑制能力, 很大程度上提高了机载火控雷达对地面运动目标的检测能力。

参考文献:

- [1] Klemm R. Adaptive airborne MTI: comparison of sideways and forward looking radar[C]. USA: Proc. of IEEE Int. Radar Conf. Alexandria, VA, May 1995: 614-618.
- [2] Richardson P.G., Hyaward S.D.. Adaptive Space-time processing for forward looking radar[C]. USA: Proc. of the IEEE Int. Radar Conf., Alexandria, VA, May 1995: 629-634.
- [3] 谢文冲, 王永良. 非均匀杂波环境 STAP 方法研究[J]. 自然科学进展, 2007, 17(4): 513-519.
- [4] 郑明杰, 杨汝良. 一种改进的 DPCA 运动目标检测方法[J]. 电子学报, 2004, 32(9): 1429-1432.
- [5] 孟祥东, 王彤, 等. 机载相控阵雷达近程杂波抑制的俯仰向空域自适应算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(4): 948-952.
- [6] 王彤. 机载雷达简易 STAP 方法及其应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2001: 22-29.
- [7] 姜晖, 廖桂生. 基于传播算子的机载前视阵雷达杂波谱补偿方法[J]. 电子学报, 2010, 38(9): 2205-2208.
- [8] Kreyenkamp O., Klemm R.. Doppler compensation in forward-looking STAP radar[J]. IEE Proc.-Radar, 2001, 148(5): 253-258.
- [9] 林幼权, 等. 三孔径 SAR-MTI 系统性能分析[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(12): 31-33.
- [10] 王静. 机载气象雷达运动补偿算法的理论研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2009: 35-44.