

文章编号: 1001-2486 (2000) 01-0024-04

改善机载前向阵雷达全程检测性能的研究*

陈建文¹, 王永良², 皇甫堪¹, 周良柱¹

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073; 2. 空军雷达学院重点实验室, 湖北武汉 430010)

摘要: 针对前向阵的杂波分布特性, 给出了一种空时自适应处理 (STAP) 结合多重中脉冲重复频率 (MPRF) 的处理方案, 研究了重复频率的选择以改进系统性能, 并分析计算了三路多普勒通道联合处理 STAP 方法在一组中脉冲重复频率下的改善因子和距离/速度二维盲区分布图。理论分析与仿真结果表明, 该方案可以大大改善机载前向阵雷达的全程检测性能。

关键词: 机载相控阵雷达; 空时自适应信号处理; 重复频率选择; 距离/速度盲区图

中图分类号: TN911.7 文献标识码: A

Research on the Detection Performance Improvement in All Interesting Ranges for Forward Looking Airborne Radar

CHEN Jian-wen¹, WANG Yong-liang², HUANGFU Kan¹, ZHOU Liang-zhu¹

(1. College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. Key Research Lab, Wuhan Radar Academy, Wuhan 430010, China)

Abstract: The STAP of the forward looking airborne radar (FLAR) is studied. A scheme is presented, which is processed by the way of STAP combined with using multiple staggered medium pulse repetition frequencies (MPRFs). In addition, the selection of PRFs is further discussed to make the scheme more available for FLAR. The performance and range/velocity blind zone of FLAR are also investigated by using 3-C approach. The experimental simulation results suggest that the scheme can improve the detection performance in all interesting ranges for FLAR.

Key words: airborne phased array radar; space-time adaptive processing (STAP); selection of PRFs; range/velocity blind zone

为了实现全方位扫描, 机载相控阵雷达 (比如机载预警雷达) 通常采用几副天线, 这些天线被安装在载机的侧面、前面、后面或斜侧, 不论是采用三角形安放形式, 还是采用左、右正侧面阵加上前、后向阵构成的长方形安放形式, 均会遇到天线非正侧面安放的情形。所以, 非正侧面阵机载雷达空时自适应处理 (STAP) 是非常重要的, 就像正侧面阵机载雷达一样。非正侧面阵包括斜侧阵、前向阵和后向阵, 而前向阵是非正侧面阵中杂波抑制最复杂、最困难的情形。Klemm 对正侧面阵与前向阵进行了比较, 指出了前向阵处理的实际困难^[1]。Richardson 和 Hayword 针对前向阵讨论了空时自适应处理, 提出了在主波束区利用近似的线性关系进行 DPCA 处理^[2]。Nohara 等也研究了非正侧面阵 DPCA 技术在机载 GMTI 中的应用^[3]。文献 [4~5] 提出了解决非正侧面阵机载雷达杂波抑制的方案, 已获得了一些有意义的结果。但是, 前向阵的杂波谱结构已明显不同于正侧面阵情形, 与斜侧阵也有很大差别, 其杂波特性与信号处理均有待于作进一步的研究。另一方面, 空时自适应处理与脉冲重复频率 (PRF) 息息相关, 究竟哪种 PRF 最适合于机载相控阵雷达空时自适应处理也值得深入研究。

下面从杂波功率谱的特点入手, 研究前向阵机载相控阵雷达实现全程检测的方案。

1 阵列和杂波模型

一矩形平面阵如图 1 所示, 阵面假设垂直于地面, 与飞行方向的夹角为 θ_p , 阵列由 M 行 N 列全向性

* 收稿日期: 1999-06-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (69572020); 空军中青年科技拔尖人才基金资助项目

作者简介: 陈建文 (1964), 男, 讲师, 博士生。

阵元组成。当 $\theta_p = -90^\circ$ 时, 为前向阵。为简化计算, 先进行列微波合成, 得到一波束合成的 N 元等距线阵。假设载机作匀速直线飞行, 航速为 V , 雷达波长为 λ , 天线波束指向的方位角和高低角分别为 θ 和 φ , 则地面反射点和雷达间的相对速度为

$$V_r = V \cos(\theta + \theta_p) \cos \varphi \quad (1)$$

该反射点杂波的多普勒频移为

$$f_d = \frac{2V_r}{\lambda} = \frac{2V}{\lambda} \cos(\theta + \theta_p) \cos \varphi \quad (2)$$

其中 $f_{dm} = \frac{2V}{\lambda}$ 为杂波的最大多普勒频移, $\cos \psi = \cos \theta \cos \varphi$, ψ 为杂波入射锥角。

多普勒雷达是基于多普勒-距离工作的, 所以其信号处理问题通常是根据距离单元的多普勒谱进行分析的。杂波抑制性能主要由多普勒-距离关系确定。设载机高度为 H , 斜距为 R , 由(2)式可得

$$f_d = f_{dm} [\cos \psi \cos \theta_p - \sqrt{1 - (H/R)^2 - \cos^2 \psi \sin^2 \theta_p}] \quad (3)$$

这里 $R \geq H / \sin \varphi$ 。对于正侧面阵, $\theta_p = 0^\circ, f_d = f_{dm} \cos \psi$, 这意味着正侧面阵多普勒中心频率不随距离 R 变化; 对于前向阵, $\theta_p = -90^\circ, f_d = f_{dm} [\cos \psi - \sqrt{1 - (H/R)^2 - \cos^2 \psi}]$, 即前向阵多普勒中心频率随距离 R 而变化。

天线方向图和地形等因素确定了机载雷达的实际杂波谱, 它是非均匀的、时变的。可以证明某距离单元的杂波谱为^[6]

$$P(R, f_d) = \frac{A \sigma G_r(\varphi(R), \psi(f_d))}{R^3 \sqrt{f_{dm}^2 - f_d^2}} \quad (4)$$

其中, A 是由雷达系统参数确定的常数, $G_r(\varphi, \psi)$ 表示天线收发方向图, σ 为每单位面积的雷达目标截面积, 它通常表示为以下反射模型: $\sigma = \gamma \sin \varphi + \sigma_{os} I - \frac{9\sigma^2 - \varphi^2}{\Delta \varphi_0^2}$, 第一项是 γ 模型, 表示漫反射; 第二项表示镜面反射, 参数 $\Delta \varphi_0$ 表示镜面反射的区域(高度线杂波区)。不考虑地球曲率半径的影响, 本文取 $\gamma = 0.1, \sigma = 10, \Delta \varphi_0 = 0.1$ 。

脉冲多普勒雷达的杂波谱随脉冲重复频率(PRF)而变化, 随距离模糊、频域模糊而变化, 考虑这些因素, 杂波谱可表示为^[6]

$$P(R, f_d) = \sum_{i=0}^{N_c} \sum_{k=-N_f}^{N_f} P(R + iR_u, f_d + kf_r) \quad 0 \leq f_d \leq f_r, H \leq R < H + R_u \quad (5)$$

其中, f_r 表示 PRF, $R_u = \frac{C}{2f_r}$ 为模糊距离, C 为电磁波传播速度, $N_f = \text{INT}[2f_d/f_r]$ 是频率重复次数。 N_c 是

距离模糊次数, 设最大杂波距离是 R_{\max} , 则 $N_c = \text{INT}\left[\frac{R_{\max} - H}{R_u}\right]$ 。

图 2 为前向阵($\theta_p = -90^\circ$) 某一特定波束指向时的多普勒-距离杂波功率谱。由图可见, 在前向阵的近距离段, 强杂波的中心多普勒频率 f_d 随距离 R 迅速变化(特别是非均匀杂波环境), 而在远距离处随 R 变化很慢或者近似不随 R 而变化。

2 前向阵空时自适应处理方案

杂波分布特性是设计空时自适应处理器时要考虑的一个关键因素。正侧面阵机载雷达的杂波多普勒频率不随距离而变化, 可获得近似的独立同分布(IID)数据样本集合, 雷达可采用 HPRF 工作模式。前向阵系统的杂波特性随距离而改变, 难以得到足够的 IID 数据样本来形成协方差矩阵, 因此增

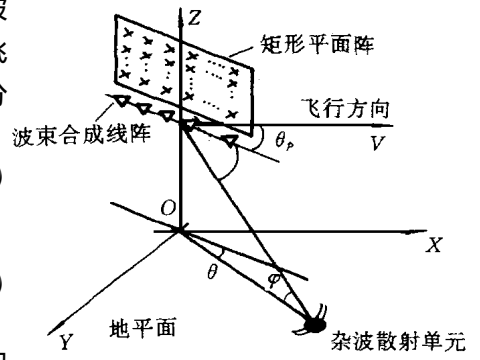


图 1 机载雷达天线阵列与杂波散射体的几何关系

Fig. 1 Airborne radar antenna and clutter scatterer geometry

大了自适应处理的难度。如上所述，在前向阵的远距离段，杂波谱随距离变化很慢，可获得一些准 IID 数据样本，所以在远程段可以进行自适应处理。但在近程段进行自适应处理是很困难的，我们称某一特定的近距离段（如 20 km）为不灵敏区。

HPRF 和 MPRF 工作模式，系统均存在距离模糊。每一次模糊，系统都对应有一个不灵敏区。特别是 HPRF 模式，很多的不灵敏区占据了较大的区域，所以，HPRF 模式对于前向阵机载雷达自适应处理是不合适的。LPRF 工作模式，因不存在距离模糊，不灵敏区不会导致其他的不灵敏区，IID 数据矢量可由目标距离单元的邻近单元获得，但因存在较高的多普勒模糊，不能有效地检测慢速目标和一些快速运动目标。此外，杂波谱中的主要成分为主瓣杂波，系统虽采用自适应处理，其性能也是很差的。MPRF 雷达与 LPRF 雷达一样，都存在多普勒模糊。考虑到 MPRF 雷达存在距离模糊，应采用较低频率的 MPRF 波形；考虑到较低 MPRF 对应较宽的主杂波谱宽，将导致慢速目标检测性能恶化和 STAP 性能损失，应采用较高的 PRF 波形。所以，前向阵机载雷达空时自适应处理应采用 MPRF 工作模式，并进行 PRF 的优化选择。这样，如果我们采用多重 MPRF，并使得各 PRF 的不灵敏区彼此错开，就有可能获得全程检测性能的改善。

综上所述，可得如下结论：前向阵的杂波分布特性与正侧面阵不同，在近距离段，多普勒频率随距离 R 迅速变化，但在远距离处随 R 变化很慢。为了改进前向阵机载雷达的全程检测性能，可采用空时自适应联合处理（M-CAP），并结合距离维信息综合考虑。具体而言，在特定距离之外，进行自适应处理；对于特定的近距离段，可直接放弃不灵敏区或者采用常规方法进行处理，并采用多重交错 MPRF，进行 PRF 的优化设计，使得各 PRF 对应的不灵敏区和盲区彼此错开，以改善机载前向阵雷达的全程检测性能。

3 实验研究结果

多多普勒通道空时自适应联合处理方法（M-CAP）的结构框图如图 3 所示， $M = 3$ 时，3-C 处理器具有准最优性能和可接受的计算量，而且主杂波区性能较好^[4]，所以本文选择 3-C 处理器，并参考文献 [5] 优化选择 PRF，进行前向阵机载雷达全程检测性能实验研究。

模拟实验系统中所取参数如下：矩形平面阵 ($M \times N$) 16 行 \times 16 列，平面阵轴线与载机航向夹角 $\theta_p = -90^\circ$ ，阵元间距（包括行、列） $d = 0.1$ m，雷达波长 $\lambda = 0.23$ m，载机速度 $V = 140$ m/s，平台高度 $H = 8$ km，脉冲数 $k = 32$ ，主波束方位指向（以飞行方向为准）为 60° ，主波束高低角指向为 0° ，这是前向阵自适应性能最差的情形。输入杂噪比 $CNR_i = 60$ dB，阵元随机幅相误差均方差 $\sigma_a = \sigma_\varphi = 0.05$ 。选择近程特定距离为 20 km，速度盲区 $V_b = \pm 16.7$ m/s（地面交通过滤）。取 PRF 的初始值为 3 kHz。根据文献 [5]，以八重 PRF 中二重 PRF 在距离与速度上完全清晰为准则进行优化，可得到一组 MPRF 值为 2381 Hz, 1785 Hz, 1429 Hz, 1191 Hz, 1021 Hz, 893 Hz, 794 Hz, 713 Hz。

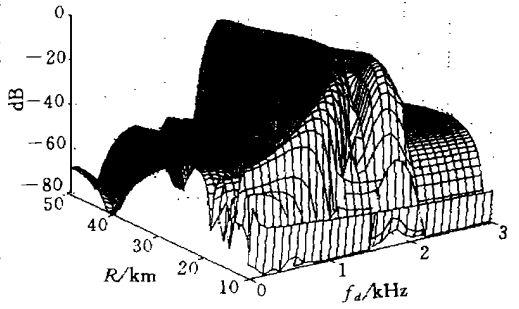


图 2 前向阵多普勒/距离杂波功率谱
Fig 2 Dopple range clutter spectra for FLAR

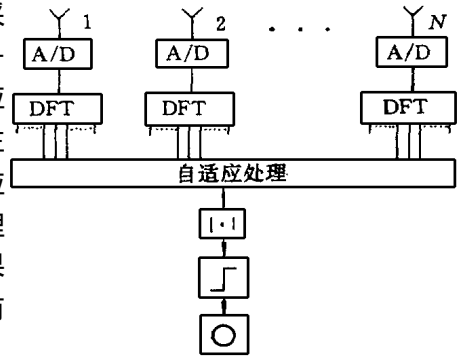


图 3 3-C 处理器结构框图
Fig. 3 The M-CAP architecture with 3-Doppler channel joint adaptive processing

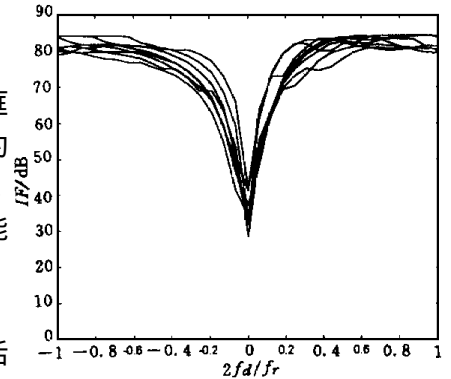


图 4 前向阵 3-C 处理器性能
Fig. 4 Performance of 3-C processor for FLAR

图4为MPRF模式前向阵3-C处理器以改善因子(IF)表示的对应八重PRF的性能曲线。应该指出,我们采用了多普勒跟踪主杂波锁定技术,矫正多普勒频率,否则,处理器的性能将恶化。图5为采用3/8方法检测时的距离/速度盲区图,如果零距离区域(0~20km)和零速度区域(0~±16.7m/s)不算在内,前向阵3-C处理器的实际距离/速度二维清晰度可达92%,这是前向阵最坏的情形,因为主波束方位指向 $\theta_0 = 60^\circ$ 时,主杂波谱宽达到其最大值。另外,我们还研究了相同参数条件下常规MTI方法和二维Capon法的性能,其实际距离/速度二维清晰度分别为37%和82%,比3-C处理器差很多。所以,3-C处理器是较好的选择。

4 结束语

本文研究了前向阵机载雷达空时自适应处理,研究了一种解决前向阵STAP全程检测问题的方案,即STAP技术与多重交错MPRF相结合,以改进系统性能。并以多通道联合自适应处理(3-C)方法进行了验证。理论分析与计算机仿真结果表明,该方案是有效的。由于前向阵是非正侧面阵中杂波分布最复杂、最难处理的情形,我们又以前向阵中主波束方位指向 $\theta_0 = 60^\circ$ 时的最不利情形验证了所提出方案的有效性,所以,STAP技术与多重交错MPRF相结合的方案适合于未来的新一代机载相控阵雷达完成全方位、全距离段的检测任务。

参考文献:

[1] Klemm R. Adaptive airborne MTI: comparison of sideways and forward looking radar [A]. In Proceedings of the 1995 IEEE International Radar Conference. May, 1995: 614-618.

[2] Richardson P G, Haywood S D. Adaptive space-time processing for forward looking radar [A]. In Proceedings of the 1995 IEEE International Radar Conference. May, 1995: 629-634.

[3] Nohara T J, Weber P, Premji A, Bhattacharya T. Airborne ground moving target including non-side-looking antennas [A]. In Proceedings of the IEEE 1998 National Radar Conference. May, 1998: 269-274.

[4] Wang Y L, Peng Y N, Bao Z. Space-time adaptive processing for airborne radar with various array orientations [J]. IEE Proceedings radar, sonar and navigation, 1997 (144): 330-340.

[5] 王永良. 阵面在方位上任意放置时机载雷达空时二维信号处理方法 [J]. 电子学报. 1996, 24 (3): 42-46.

[6] Morris G V, Harkness L L. Airborne pulsed Doppler radar [M]. (2nd ed.) London: Artech House, 1996.

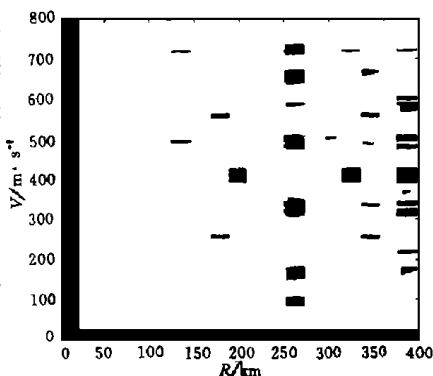


图5 前向阵3-C处理器距离/速度盲区图

Fig. 5 The chart of range/ velocity clarity for FLAR by use of 3-C approach