

双基地机载预警雷达空时自适应处理方法

魏进武¹,王永良¹,陈建文²

(1. 空军雷达学院雷达兵器运用工程队重点实验室,湖北武汉 430010;2. 南京电子技术研究所,江苏南京 210013)

摘 要: 本文在文献[1]所建杂波模型的基础上,进一步研究空时自适应处理对双基地机载预警雷达杂波的抑制问题.深入分析了双基地机载预警雷达杂波距离多普勒特性,进而提出了一种基于距离多普勒补偿的空时二维自适应处理方法.理论分析与计算机仿真表明,该算法能有效实现工作于低重频时双基地机载预警雷达杂波抑制.

关键词: 双基地机载预警雷达;空时自适应信号处理;杂波抑制

中图分类号: TN959.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12A-1936-04

Space-Time Adaptive Processing Approaches to Bistatic Airborne Early Warning Radar

WEI Jin-wu¹,WANG Yong-liang¹,CHEN Jian-wen²

(1. Key Research Lab, Wuhan Radar Academy, Wuhan, Hubei 430010, China;

2. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing, Jiangsu 210013, China)

Abstract: In this paper,clutter suppression for bistatic airborne early warning (AEW) radar is studied farther by space-time adaptive processing (STAP) based on the clutter model presented in [1]. The range-Doppler clutter characteristics are analyzed in detail in this paper. In the case of LPRF,a novel space-time adaptive processing approach based on range-Doppler compensation is proposed to suppress the clutter for bistatic AEW radar. The validity of the approach is illustrated by theoretical analysis and computer simulation.

Key words: bistatic airborne early warning (AEW) radar;space-time adaptive processing (STAP);clutter suppression

1 引言

文献[1]建立了双基地机载预警雷达杂波模型,并对其杂波特性作了详细的分析,发现回波多普勒频率与杂波散射体到接收机的距离之间具有很强的相关性,因此双基地机载预警雷达的杂波特性远比单基地机载雷达复杂,使得杂波抑制问题变得更加困难.空时自适应处理(STAP)作为一种有效抑制机载雷达杂波的方法,在单基地机载雷达杂波抑制中已作了大量的研究^[2,3].本文研究了双基地机载预警雷达杂波的 STAP 抑制技术.

目前在双基地机载预警雷达杂波抑制方面,人们也作了一些工作^[4-7].1995年,在采集 MCARM 数据时,专门有四次飞行是用于采集双基地机载预警雷达数据的.1997年,Sanyal 等的研究表明,H. Wang 和 L. Cai 提出的局域联合处理(JDL)法(3×3,3个多普勒通道,3个波束)对双基地 MCARM 数据可作有效的处理.1999年,R. D. Brown 等^[4]综合比较了取不同多普勒通道的 JDL 法对该数据的处理性能,发现增加空域系统自由度时,其处理性能不会有显著改善.同时,文献[4]还利用此数据将 JDL 法与时空级联处理法作了比较,结果表明 JDL(4×1)对双基地 MCARM 数据的处理性能最好.时空级联法的

缺点在于它滤除杂波的同时,也滤掉了淹没在杂波中的信号部分,而 JDL 法能在很好保留信号的同时,有效地抑制杂波,且在信号结构透明时,即使杂信比增加也会保持好的处理性能,但 JDL 法对误差的鲁棒性较差.2000年,P. Chen, K. Beard^[5]提出了双基地机载雷达地面动目标显示(GMTI)的概念,讨论了双基地机载雷达的优化配置参数,以便于抑制主瓣杂波和杂波回波多普勒频率展宽,实现地面低速运动目标的检测.文献[6]中讨论了双基地机载雷达多阶段 STAP 对宽带信号的处理问题.R. Klemm^[7]的研究表明,单、双基地机载雷达抑制杂波所需的系统自由度大约相同,因此单基地机载雷达的信号处理理论可以在双基地雷达中应用.

本文以文献[1]的研究为基础,进一步从研究杂波的距离——多普勒特性入手,着重研究了双基地机载预警雷达杂波抑制问题,提出了一种新的杂波抑制方法——距离补偿空时自适应处理(RC-STAP)方法.

2 双基地机载雷达杂波距离多普勒谱

因为脉冲多普勒(PD)雷达的信号处理通常是按距离门作多普勒分析的,其杂波抑制性能主要取决于杂波的距离

-多普勒 ($P_{SR} - f_d$) 分布特性,所以研究杂波距离多普勒特性对 STAP 是非常必要的.对于双基地机载预警雷达,就某一固定的收、发间距,由文献[1]式(6)可见,即使杂波入射锥角相同,其多普勒频率分布也随距离变化,这主要决定于双基地雷达的几何配置(见文献[1]).图1给出了两种不同收发间距下杂波的距离多普勒分布.由图可见,与正侧面阵工作的单基地机载预警雷达不同,双基地机载预警雷达杂波多普勒频率随斜距 R_{SR} 的变化而变化.当 D_{TR} 较小时,近距离变化较快,远距离几乎平坦;在 D_{TR} 大时,在近距离范围内,杂波的多普勒频率变化缓慢,而在远距离范围内变化则显得较快.综合考虑,可以看出,当斜距与收、发间距接近时,其变化较快,而斜距与间距相差较大时,杂波的多普勒频率随斜距的变化微弱,但考虑距离模糊时,由于杂波多普勒频率与距离之间有强的非线性,故收、发间距较小时,有利于在各个距离环上获得符合或近似符合独立分布 I. I. D 条件的杂波数据,较利于空时自适应处理.同时,基于文献[8]双基地机载预警雷达的杂波模型,接收波束在尾扫 ($R = 120^\circ, R = 150^\circ$) 时,多普勒频率与距离的相关性较弱.

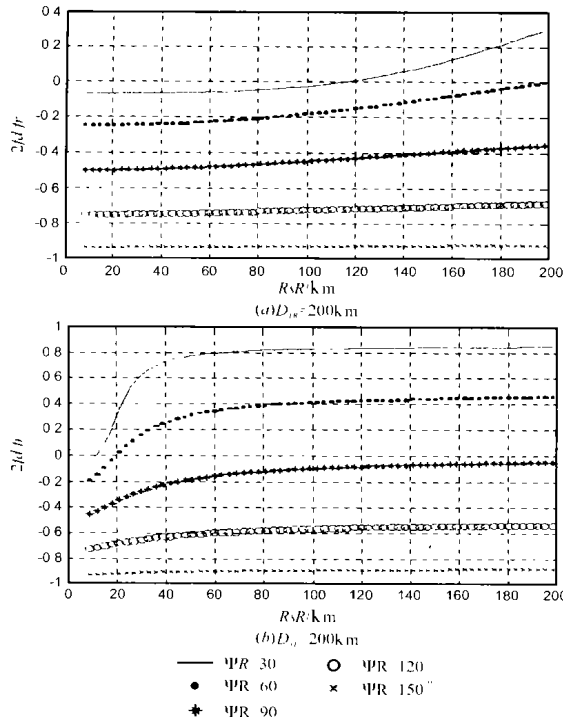


图1 双基地机载预警雷达杂波距离多普勒谱

经以上分析,发现双基地机载雷达杂波的距离多普勒特性与采用非正侧面阵工作的单基地机载雷达情况类似,两种情况均是由于杂波回波多普勒频率与距离的相关性而制约了空时二维自适应处理对杂波的抑制能力.所幸的是,文献[8]已对单基地非正侧面阵时的 STAP 方法作了一定的研究工作,系统地分析了空时自适应处理与多重脉冲重复频率相联合的处理方法,以解决雷达采用前向阵与斜侧阵工作时的杂波抑制问题.由于在近距离门中,杂波的多普勒频率随距离(距接收机 25km 以内)变化较快^[8],不利于作自适应处理,故文中关闭了近距离门的杂波回波,虽然在中、高重复频率时,这种近

程关闭可导致较大的距离盲区,但可通过多重脉冲重复频率组合的方式来错开关闭的距离盲区.与单基地非正侧面阵雷达的杂波抑制不同,双基地机载雷达随配置不同,其杂波多普勒频率在很大范围内都对距离,因而敏感难以形成有效的数据来构造杂波协方差矩阵,或者即使构造了杂波协方差矩阵,但由于前后杂波特性(特别是距离多普勒特性)变化较大而难以实现有效的杂波抑制.因此,有必要进一步研究 STAP 方法以改善双基地机载雷达杂波抑制能力.

3 双基地机载预警雷达杂波空时二维处理

通过以上的分析发现,影响数据不均匀性的关键除了功率以外,最主要的是主杂波中心频率随距离变化,因此如果将这种变化作相应补偿,将有利于作自适应处理.在高、中重复频率时,由于距离模糊,一个距离门的数据实际上是多个距离门数据的叠加.因此 RC-STAP 法适合于低重复频率无距离模糊时使用,因为此时可以分辨杂波数据所在的距离门. RC-STAP 方法是以待检测单元进入的杂波多普勒频率为基准,将与其邻近的各距离单元进入的杂波数据作相位补偿,使其在相位上与待检测单元的杂波相位保持一致,然后再进行 STAP 处理.图2给出了 RC-STAP 算法的框图.

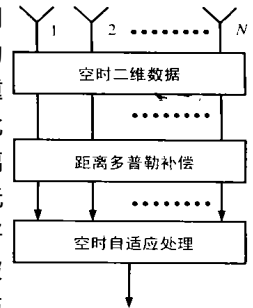


图2 距离补偿空时自适应处理算法框图

在图2所示的空时自适应处理模块中,可以使用现成的单基地机载预警雷达杂波抑制方法如空时相邻多波束法 (STMB)^[9],空时二维 Capon 法^[10]等等.本文以 STMB 法为例,给出基于距离补偿的 STMB (RC-STMB) 算法,该算法的数学描述如下:

不失一般性,设 $x_{n,k}(l)$ 为第 l 个距离单元的第 n 个阵元第 k 时刻的二维接收数据, $n = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, K$, 这里 N 为空域采样数, K 为时域采样数.第 l 个距离单元的空时二维数据 ($NK \times 1$ 维) 可表示为

$$X_l = [x_{1,1}(l), x_{2,1}(l), \dots, x_{N,1}(l), x_{1,2}(l), x_{2,2}(l), \dots, x_{N,2}(l), \dots, x_{1,k}(l), x_{2,k}(l), \dots, x_{N,k}(l)]^T \quad (1)$$

其中, T 表示转置. X_l 称为一次空时二维快拍数据矢量.

定义距离补偿的变换矩阵 D_l ($NK \times 1$ 维) 为

$$D_l = E_N \odot S_l(-u) \quad (2)$$

其中 E_N 为 $N \times 1$ 维矢量,且其元素全为 1. u 表示第 l 个距离门(待检测距离门)上杂波的时域角频率. \odot 表示矩阵或向量的 Kronecker 积.若待检测点的锥角为 θ_0 ,经距离多普勒补偿后,其多普勒频率为 $f_{d0} = \frac{2V}{f_r} \cos \theta_0$,则令

$$S_l(-u) = [1, e^{-j(u^{-2} f_{d0})}, \dots, e^{-j((K-1)(u^{-2} f_{d0})}]^T \quad (3)$$

其中

$$u = \frac{4V}{f_r} \left(\frac{R_{SR} \cos \theta_0 - D_{TR}}{\sqrt{R_{SR}^2 + D_{TR}^2 - 2R_{SR}D_{TR} \cos \theta_0}} + \cos \theta_0 \right) \quad (4)$$

经变换后的二次空时二维快拍数据矢量为

$$\tilde{X}_l = D_l^\circ X_l \quad (5)$$

其中“ \circ ”表示矩阵或向量的 Hadamard 积。

$$S_s (s_i) = [w_1, w_2 e^{j s_i}, \dots, w_N e^{j(N-1) s_i}]^T \quad (6)$$

$$S_t (t_j) = [h_1, h_2 e^{j t_j}, \dots, h_K e^{j(K-1) t_j}]^T \quad (7)$$

其中, w_1, w_2, \dots, w_N 和 h_1, h_2, \dots, h_K 分别表示空域与时域静态权系数, $w_{si} (i = 1, 2, \dots, N)$, $w_{tj} (j = 1, 2, \dots, K)$ 分别表示目标的空域和时域角频率, 其中, $S_s (s_i) (i = 1, 2, \dots, p)$ 表示对应于第 i 个空域波束的空域导向矢量, p 为相邻空域辅助波束的数目, $S_t (t_j) (j = 1, 2, \dots, q)$ 表示对应于第 j 个时域“波束”的时域导向矢量, q 为相邻时域辅助波束的数目, 则空时二维变换矩阵 $T_L (NK \times (p + q + 1)$ 维) 为

$$T_L = \begin{bmatrix} [S_s (s_i) \odot S_t (t_j)]^T \\ [S_s (s_i) \odot S_t (t_1)]^T \\ \dots \\ [S_s (s_i) \odot S_t (t_q)]^T \\ [S_s (s_1) \odot S_t (t_j)]^T \\ \dots \\ [S_s (s_p) \odot S_t (t_j)]^T \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

其中, $p + q$ 为所选波辅助束数, p, q 均为偶数。

经变换以后的空时二维快拍数据矢量 $((p + q + 1) \times 1$ 维) 为

$$\tilde{X}_l = T_L^H \tilde{X}_l = T_L^H (D_l^\circ X_l) \quad (9)$$

根据线性约束最小方差 (LCMV) 准则, 可得到 RC-STMB 法的空时二维自适应权 $W_{st} ((p + q + 1) \times 1$ 维) 的计算为如下优化模型

$$\begin{aligned} \min \quad & W_{st}^H \tilde{R}_l W_{st} \\ \text{s. t.} \quad & W_{st}^H (T_L^T S_{st}) = 1 \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$S_{st} = S_s (s_i) \odot S_t (t_j) \quad (11)$$

$$\tilde{R}_l = \frac{1}{L-1} \sum_{i=1, i \neq l}^L \tilde{X}_i \tilde{X}_i^H \quad (12)$$

可以求得空时自适应权为

$$W_{st} = \mu \tilde{R}_l^{-1} (T_L^T S_{st}) \quad (13)$$

第 j 个多普勒的改善因子为

$$IF(0, f_{dj} - f_{d0}) = \frac{|W_{st}^H (T_L^T S_{st})|^2 (1 + CNR_{in})^2}{W_{st}^H \tilde{R}_l W_{st}} \quad (14)$$

f_{dj} 为第 i 个多普勒通道对应的中心多普勒频率, CNR_{in} 为输入的杂噪比, 2 为噪声功率。

4 仿真结果及分析

模拟实验系统的参数说明如下: 天线尺寸为 16 行 \times 16 列, 单元间距 0.115m, 相干脉冲数 $K = 16$ (无 MTI) 或 $K = 18$ (有 MTI), 载机速度 $V = 140\text{m/s}$, 载机高度 $H = 8\text{km}$, 工作波长 $\lambda = 0.23\text{m}$, 脉冲重复频率 $PRF = 304.3\text{Hz}$, 单子阵杂噪比 $(CNR_i) = 60\text{dB}$, 波束指向阵面法向, 选择了 5 个距离环, 各距离环之间的间隔为 15km。图 4 给出了距离补偿自适应处理方法的改善因子。其中, RC-STMB 表示基于距离多普勒补偿的 STMB 法; RC-CAP 表示基于距离多普勒补偿的 Capon (RC-

Capon) 法; RC-MTI 表示基于距离多普勒补偿的 MTI 法; CAP 表示 Capon 法; CoV, MTI 表示常规的 MTI 方法。

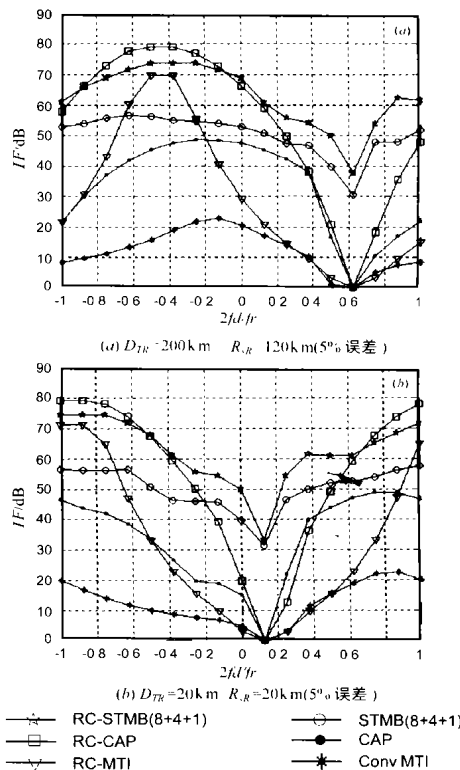


图 3 距离补偿自适应处理方法性能

比较图 3 中各方法的改善因子可见, 相同的杂波抑制方法对不同配置的双基地雷达杂波抑制能力不同, 是因为在不同配置的双基地机载雷达中, 其杂波回波的多普勒频率与距离的相关程度不同而造成的。

仿真时选取了多个距离门, 造成杂波的多普勒频率随距离的变化很大, 难以有足够多的符合 I. I. D 条件的数据构成杂波协方差矩阵, 因而造成常规的 STMB 法、Capon 法以及 MTI 对杂波的处理性能严重下降。经距离多普勒补偿后, 使得各个距离环杂波回波的多普勒频率变化程度减弱, 从而使杂波数据多卜勒频率相互趋近, 取得了较好的处理效果, 故 RC-STMB, RC-Capon 以及 RC-MTI 相对未经补偿的方法, 其性能有明显的改善。

仿真结果还表明, RC-STMB 法与 RC-Capon 法相比, 主杂波区的杂波抑制能力有明显的提高, 更有利于对地面慢速目标的检测, 且 RC-STMB 法的运算复杂度与 RC-Capon 法相当, 所以 RC-STMB 法为首选方法。

5 结论

本文在文献[1]的基础上, 详细讨论了双基地机载雷达杂波回波的距离——多普勒特性, 研究了杂波抑制问题。研究表明, 双基地机载预警雷达杂波回波的多普勒频率与距离具有相关性, 并与其配置有很大的关系。本文提出的距离补偿空时自适应处理方法, 能实现双基地机载预警雷达在低重复频率时对多普勒频率随距离的变化进行补偿, 较好地解决了双基

地机载预警雷达进行 STAP 处理问题,从而可获得有效的杂波抑制性能。

参考文献:

- [1] 王永良,魏进武,陈建文. 双基地机载预警雷达空时二维杂波建模及杂波特性分析 [J]. 电子学报,2001,29(12A):1938 - 1941.
- [2] Klemm R. Space-Time Adaptive Processing—Principles and Applications [M]. IEE Publishers, London, UK, 1998.
- [3] 王永良,彭应宁. 空时自适应信号处理 [M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [4] Brown R D, Little M O, Schneible R A, wicks M. Application of space-time adaptive processing (STAP) in airborne bistatic scenarios [A]. Proceedings of IEEE International Radar Conference [C]. Brest, France, May 1999:17 - 21.
- [5] Pileih Chen, K Beard. Bistatic GMTI experiment for airborne platforms [A]. Proceedings of IEEE International Radar Conference [C], Alexandria, VA, USA, May 2000.
- [6] Yu N Sedyshev, V N Gordienko. The coherent bistatic radar with multi-stage space-time adaptive processing of signal and jamming [A]. Proceedings of IEEE International Radar Conference [C], Alexandria, VA, USA, May 2000.
- [7] Klemm R. Comparison between monostatic and bistatic antenna configurations for STAP [J]. IEEE Trans., 2000, AES-36(2):596 - 608.
- [8] Yong-Liang Wang, Zheng Bao, Ying-Ning Peng. STAP with medium PRF mode for non-side-looking airborne radar [J]. IEEE Trans., 2000, AES-36(2):609 - 620.
- [9] 王永良,吴志文,彭应宁. 适于非均匀杂波环境的空时自适应处理方法 [J]. 电子学报,1999,27(9):63 - 66.

- [10] 保铮,廖桂生,吴仁彪,张玉洪,王永良. 相控阵机载雷达杂波抑制的时空二维自适应滤波 [J]. 电子学报,1993,21(9):1 - 7.

作者简介:



魏进武 男,1978 年出生于甘肃庆阳. 现为空军雷达学院信号与信息处理专业硕士研究生,目前的研究方向为:空时二维自适应信号处理、阵列信号处理.



王永良 男,1965 年出生于浙江嘉兴. 教授,博士生导师. 1994 年获西安电子科技大学博士学位,现为空军雷达学院雷达兵器运用工程全军重点实验室主任,首批入选空军中青年科技拔尖人才. 享受国务院政府特殊津贴,获教育部优秀青年教师奖. 已发表论文 80 余篇. 主要的研究领域为:空时二维信号处理、雷达信号处理、阵列信号处理、现代信号处理等.



陈建文 男,1964 年出生. 副教授. 1992 年毕业于华中理工大学电子与信息工程系,获工学硕士学位,2000 年于国防科技大学电子科学与工程学院信号与信息处理专业获工学博士学位,已发表论文 20 余篇. 现从事雷达信号处理,自适应信号处理,信号检测等领域的研究.