

双基地机载预警雷达空时二维杂波建模及杂波特性分析

王永良¹, 魏进武¹, 陈建文²

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

摘要: 本文建立了双基地机载预警雷达空时二维杂波模型, 其中考虑了双基地雷达的几何配置、雷达的系统参数、各种误差及距离模糊等实际因素对杂波谱的影响. 基于该模型分析了杂波特性, 并计算了杂波的空时二维似然谱, 结果表明所建杂波模型是合理的. 该模型是研究双基地机载预警雷达杂波抑制与时空自适应处理技术的基础.

关键词: 双基地机载预警雷达; 时空自适应处理; 杂波

中图分类号: TN959 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2001)12A-1940-04

Modelling and Characteristics Analysis of Two Dimensional Space-Time Clutter for Bistatic Airborne Early Warning Radar

WANG Yong-liang¹, WEI Jiu-wu¹, 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: This paper sets up a two dimensional space time clutter model for bistatic airborne early warning (AEW) radar. The impact on clutter spectrum of the practical factors such as the geometric configurations of bistatic radar, the parameters of radar system, range ambiguity and all kinds of errors etc. is considered in the model. The clutter characteristics is analyzed based on this model. The rationality of the clutter model is illustrated by computing two dimensional space time likelihood spectra. This model can be used for studying the clutter suppression and STAP techniques for bistatic AEW radar.

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

1 引言

与单基地机载预警雷达相比, 双基地机载预警雷达由于收发系统分置, 因此可将发射机置于远离战场的位置, 而将一个或多个空基(地基)接收机放置于靠近所关注的区域. 该雷达体制自身具有好的“四抗”优势. 但由于载机的运动和机载雷达的下视工作, 使得雷达接收的地杂波明显增强, 且有多普勒频移. 一般来讲, 双基地机载预警雷达表现出比单基地机载雷达更复杂的杂波特性, 使得杂波抑制的难度增大. 由于时空自适应处理可以很有效地补偿由雷达平台运动造成的杂波谱展宽, 成功地抑制杂波而倍受重视^[1,2].

双基地机载预警雷达已开始受到了雷达界的关注, 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. R. Klemm^[3]从杂波多普勒频率及杂波散射体与接收机、发射机之间的双程距离关系出发, 建立杂波模型. 但该模型所产生的杂波协方差矩阵是不适合自适应处理的, 因为发射方向图对杂波特性的调制很难在杂波抑制中得到补偿和抑制. 此外, 文中只考虑了无距离模糊时单距离环杂波回波, 由于其中没有考虑由于距离模糊引起的杂波叠加对杂波功率谱的影响, 所以文中给出的杂波谱显得非常

“规则”. 但这是不符合机载雷达实际工作情况的, 因为雷达在采用高、中脉冲重复频率工作时, 必然存在距离模糊问题.

本文借鉴文献[2]中杂波数据的仿真方法, 建立了双基地机载预警雷达在发射机与接收机呈直线沿同一方向飞行时杂波的数学模型, 并基于该模型, 对空时二维杂波特性进行了深入分析.

2 双基地机载预警雷达杂波模型

杂波建模的思想主要是以接收机所在位置为坐标中心, 利用决定双基地雷达配置的几何关系, 将双基地机载雷达系统中由于分置的雷达发射机所引起杂波分布的变化折算到雷达接收机上, 由此来计算双基地雷达的杂波协方差矩阵, 即将分置的发射机的发射方向图中的参数(锥角)进行坐标变换, 使其等效于位于接收机处一“虚拟”的发射方向图. 杂波协方差矩阵的数学模型描述如下:

发射机(T)和接收机(R)位于高度为 H 的高空, 且发射机位于接收机前方 D_{TR} 处, 发射机和接收机以相同的速度 V 沿 X 方向匀速飞行, 如图1(a)所示. 一发射脉冲经斜距 R_{dT} 入射到地面 P 点, 反射回波经斜距 R_{dR} 被接收. 图中, θ_T, θ_R 表示发射机和接收机的方位角, φ_T, φ_R 表示发射机和接收机的高低

角, φ_T 为发射脉冲的锥角, φ_R 表示接收机的杂波入射锥角. 设发射和接收的载机均作匀速直线飞行, 它们的天线均为 M 行 N 列的矩形侧面阵列, 阵元在行和列方向均等间隔放置,

距离环的选择如图 1(b) 所示, 即距离环 l 是以接收机所在位置在地面上的投影点为圆心, 以 $R_{gRl} = R_{sRl} \cos \varphi_{Rl}$ 为半径的圆. 同一距离环 l 在平面上的各种关系如图 1(c) 所示. 图中, R', T' 为图 1(a) 中 R 与 T 在 $X-Z$ 平面上的投影, P 为处于距离环 l 上的杂波散射体.

设 $c_l(n, k)$ 表示理想情况下第 n 路(列子阵)的第 k 个脉冲对第 l 个距离环杂波的采样数据(忽略了噪声项), 考虑等效阵元方向性及距离调制, 则有^[3]:

$$c_l(n, k) = \frac{g_n(\varphi_{Rl})}{R_{sRl}^2} \int_0^\pi F(\theta_T, \varphi_{Tl}) \cdot e^{j(n-1)\omega_s(\theta_R, \varphi_{Rl}) + j(k-1)\omega_t(\theta_R, \varphi_{Rl})} d\theta_R \quad (1)$$

其中, $n = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, K; l = 1, 2, \dots, L; \omega_s(\theta_R, \varphi_{Rl}) = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos \theta_R \cos \varphi_{Rl}$ 为空域角频率; $\omega_t(\theta_R, \varphi_{Rl}) = \frac{2\pi f_{dl}}{f_r}$ 为时域角频率; f_r 为脉冲重复频率 (PRF); f_{dl} 为第 l 个距离环上杂波回波的多普勒频率; R_{sRl} 为第 l 个距离环到接收机的斜距; $g_n(\varphi_{Rl})$ 和 $F(\theta_T, \varphi_{Tl})$ 分别表示接收方向图和发射方向图. 接收机第 n 路列子阵的接收方向图为

$$g_n(\varphi_R) = \sum_{m=1}^M I_m \exp \left\{ j \frac{2\pi d}{\lambda} (m-1) (\sin \varphi_R - \sin \varphi_{R0}) \right\} \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

双基地机载雷达的阵面合成发射方向图可表示为

$$F(\theta_T, \varphi_T) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_n I_m \exp \left\{ j \frac{2\pi d}{\lambda} [(n-1)(\cos \varphi_T - \cos \varphi_{T0}) + (m-1)(\sin \varphi_T - \sin \varphi_{T0})] \right\} \quad (3)$$

其中 $\cos \varphi_T = \cos \theta_T \cos \varphi_T$; $\cos \theta_T = R_{sRl} \cos \varphi_{Rl} - D_{TR} / \sqrt{D_{TR}^2 + R_{sRl}^2 - H^2 - 2D_{TR}R_{sRl} \cos \varphi_{Rl}}$, 当 $D_{TR} = R_{sRl} \cos \varphi_{Rl}$, $\cos \theta_T = 0$ 时, $\cos \theta_T = 0$.

$\cos \varphi_{Tl} = \frac{\sqrt{R_{sRl}^2 - H^2 + D_{TR}^2} - 2\sqrt{R_{sRl}^2 - H^2} D_{TR} \cos \theta_R}{R_{sRl} + D_{TR} - 2R_{sRl} D_{TR} \cos \theta_R \cos \varphi_{Rl}}$; 对任意的杂波距离环 l 的高低角, 都有 $\varphi_{Tl} \leq 90^\circ$, 可计算 $\sin \varphi_{Tl}$. 其中 I_m, I_n 分别为固定的列、行子阵加权.

距离环如图 1(b) 所示, 则距离环 l 上的杂波回波多普勒频率为^[3]

$$f_{dl} = \frac{V}{\lambda} (\cos \varphi_{Tl} + \cos \varphi_{Rl}) \quad (4)$$

其中 $\cos \varphi_{Tl} = \frac{R_{sRl} \cos \varphi_{Rl} - D_{TR}}{\sqrt{R_{sRl}^2 + D_{TR}^2 - 2R_{sRl}D_{TR} \cos \varphi_{Rl}}}$.

将式(2)、(3)及(4)代入式(1)可得到所需要的杂波数据(以上表达式中均需 $R_{sRl} > H, R_{sRl} > H$, 以确保波束到达地面). 设在观测时间内接收到 K 个脉冲回波, 用 $NK \times 1$ 维矢量 $C = [c(1, 1), \dots, c(N, 1), \dots, c(1, K), \dots, c(N, K)]^T$ 表示空时二维杂波样本, 则 $R_c = E^L C C^H$ 表示杂波的二维协方差矩

间距为 d , 并设 $d = \lambda/2$ (λ 为工作波长). 阵面法线垂直于载机飞行方向(正侧面阵), 各行子阵与飞行方向平行. 另外设发射机和接收机的系统参数完全一致.

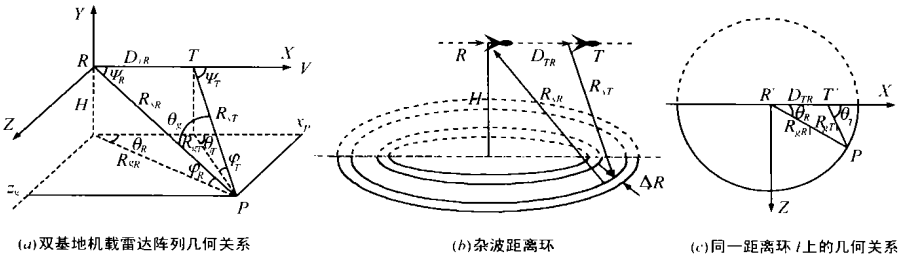


图 1 双基地机载雷达各种几何关系
阵, R_c 的元素为

$$r(n_1, n_2, k_1, k_2) = \sum_{l=1}^L \frac{g_{n1}(\varphi_{Rl}) g_{n2}^*(\varphi_{Rl})}{R_{sRl}^4} \int_0^\pi |F(\theta_T, \varphi_{Tl})|^2 \cdot e^{j(n_2 - n_1)\omega_s(\theta_R, \varphi_{Rl}) + j(k_2 - k_1)\omega_t(\theta_R, \varphi_{Rl})} d\theta_R \quad (5)$$

其中 $n_1, n_2 = 1, 2, \dots, N, k_1, k_2 = 1, 2, \dots, K$, 此处假设不同距离单元的杂波回波信号互不相关.

机载雷达在采用高、中脉冲重复频率工作时, 将会产生距离模糊. 在双基地雷达系统中, 雷达的最大不模糊距离和由脉冲重复频率 f_r 决定, 即 $(R_{sR} + R_x)_u = c/f_r$ ^[4], 其中 c 表示光速. 由于在机载雷达系统中, 对一个待检测单元需要考虑其全程模糊, 本文考虑双基地雷达的几何配置, 通过递归计算方法将距离和的模糊距离折算到接收距离上. 采用高重复频率工作时, 双基地机载雷达的模糊距离如图 2 所示, 图中纵坐标表示待检测单元到接收机的斜距, 各点分别为各次模糊点对应的斜距.

经比较图 2

(a)、(b) 可见, 在双基地机载雷达系统中, 相对于接收机的模糊距离是变化的, 且与双基地的几何配置有关, 这与单基地 AEW 雷达不同.

以上杂波模型的建立, 是以雷达接收机为中心, 将分置的发射机所引起杂波特性的变化

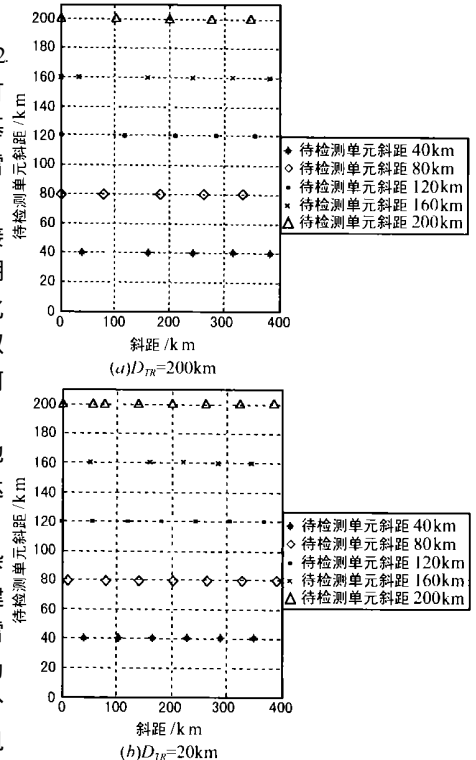


图 2 双基地机载雷达模糊距离($f_r = 2434$ 8Hz)

映射到接收机上, 然后按类似于单基地机载预警雷达情况处理.

3 仿真结果及杂波特性分析

3.1 杂波的空时二维特性

从空时二维滤波的角度研究二维杂波谱, 取 $2f_d/f_r$ 和 $\cos\phi_R$ 作坐标研究杂波的空时二维分布是合理的, 则式(4)可写为

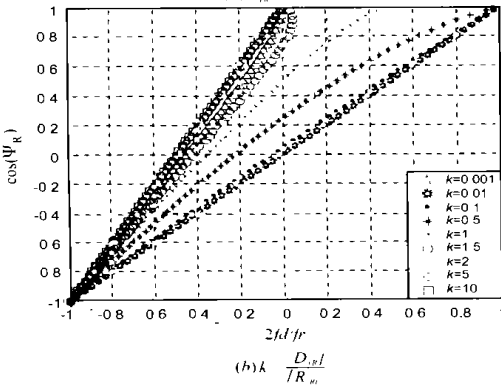
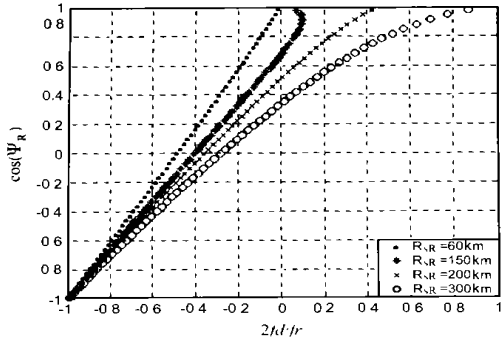


图 3 不同配置时双基地机载预警雷达空时二维杂波分布(高重复频率 $f_r = 2434$ 8Hz)

$$\frac{2f_d}{f_r} = \frac{2V}{Y_r} \left[\frac{R_{sR} \cos \phi_{Rl} - D_{TR}}{\sqrt{R_{sR}^2 + D_{TR}^2 - 2R_{sR}D_{TR} \cos \phi_{Rl}}} + \cos \phi_{Rl} \right] \quad (6)$$

对第 l 个待检测距离门而言, 由式(6)可以得出结论:(1)

当 $D_{TR} \rightarrow 0$ 时, 有 $\frac{2f_d}{f_r} \rightarrow \frac{4V}{Y_r} \cos \phi_{Rl}$, 杂波的多普勒频率分布与采用正侧面阵工作的单基地 AEW 雷达相同;(2) 当 $D_{TR} \rightarrow \infty$ 时,

$\frac{2f_d}{f_r} \rightarrow \frac{2V}{Y_r} (\cos \phi_{Rl} - 1)$, 则杂波谱集中于负多普勒频率域, 且与距离的相关性减弱;(3) 若令 $k = D_{TR}/R_{sR}$, 则上式可表示为

$$\frac{2f_d}{f_r} = \frac{2V}{Y_r} \left[\frac{\cos \phi_{Rl} - k}{\sqrt{1 + k^2 - 2k \cos \phi_{Rl}}} + \cos \phi_{Rl} \right] \quad (7)$$

表明杂波谱受双基地配置的调制.

图 3 给出了几种不同配置下的双基地机载预警雷达空时二维杂波分布. 由图 3(a) 可见, 若收、发间距 D_{TR} 一定, 随着斜距 R_{sR} 的增大, f_d 与 $\cos \phi_R$ 近似呈线性关系, 谱宽增大, 与单基地机载预警雷达的空时二维特性基本一致; 若 R_{sR} 一定, 随着 D_{TR} 的增大, f_d 与 $\cos \phi_R$ 会出现非线性, 谱宽变窄, 当 $D_{TR} \geq 2R_{sR}$ 时, 杂波谱被压缩至负多普勒频率域, 且近似呈线性关系. 式(7)表明, 在雷达系统参数一定时, 双基地机载预警雷达的杂波谱在空时二维平面上的分布主要与其几何配置有关, 不同的 k , 标志着双基地雷达工作于不同的区域^[4], 雷达系统会呈现出各自不同的工作特点, 如图 3(b) 所示, 当 $0.1 \leq k \leq 2$ 时, 杂波回波的多普勒频率与斜距的相关性较强, 其中非线性成分增强; 而在 $k > 2$ 时, 杂波回波的多普勒频率与斜距的相关性很弱, 且杂波多普勒频率集中于负多普勒频率域, 近似呈线性分布; $k < 0.1$ 时, 杂波多普勒频率与斜距的相关性小, 亦近似呈线性分布, 但杂波的多普勒频率分布在全频率域.

3.2 杂波功率谱

图 4 给出了 $D_{TR} = 200$ km, $R_{sR} = 120$ km 雷达工作于高、中脉冲重复频率时的杂波功率谱. 仿真参数为: 阵元数 $N = M = 16$, 波长 $\lambda = 0.23$ m, 载机高度 $H = 800$ 0m, 载机速度 $V = 140$ m/s, 图 4(a)、(b) 中的脉冲重复频率 $f_r = 2434$ 8Hz, 并设发射机和接收机的雷达参数均相同.

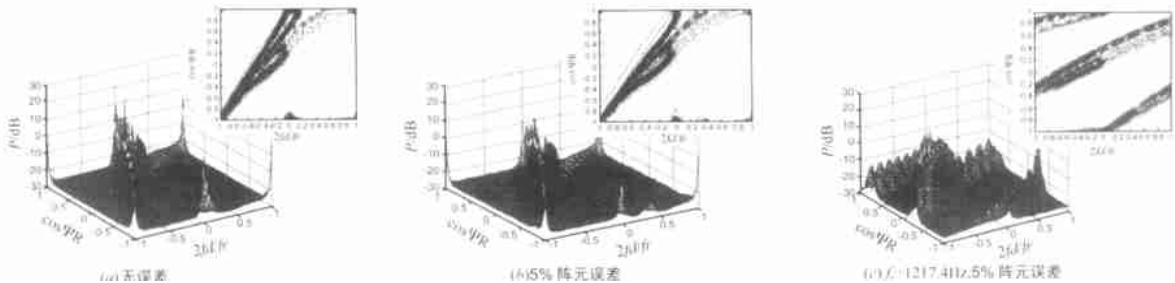


图 4 双基地机载预警雷达杂波空时二维似然谱

由于雷达工作于高重复频率时, 距离模糊比较严重, 而且双基地机载雷达杂波多普勒频率与斜距之间存在较强的相关性, 杂波谱呈明显的分裂, 如图 4(a)、(b) 所示. 杂波回波的多普勒频率与距离之间强的非线性相关性, 使得各模糊距离环反射到接收机上的杂波回波的多普勒频率有较大的差异而造成谱线分裂. 以图 4(a) 为例分析, 由于杂波多普勒频率与入

射锥角的非线性, 使得杂波谱沿曲线分布; 假设接收机的最大接收距离为 400km, 当待检测距离单元到接收机的斜距 $R_{sR} = 120$ km 时, 其各次模糊点到接收机的斜距分别为 120km, 211.5km, 286.3km, 355.4km, 各模糊距离产生的杂波回波具有不同的多普勒频率成分, 叠加到该待探测距离环上时, 各模糊点(尤其是多普勒频率随距离变化较快的距离环)杂波谱的分

裂是必然的,这与图 3(a)所示的空时二维杂波分布图是一致的。因此,本文所建立的空时二维杂波模型是合理的,可用于双基地机载雷达作空时二维自适应处理的杂波抑制问题的研究。采用中重复频率工作时的空时二维杂波似然谱如图 4(c)所示,中重频可减小距离模糊而造成速度模糊,但使得主杂波区展宽,且阵元误差对中重复频率下的杂波谱影响不是很大。

4 结束语

本文建立了双基地机载预警雷达在接收机与发射机呈直线沿同一方向飞行时杂波的数学模型,并分析了双基地的不同配置、距离模糊、阵元误差及脉冲重复频率对杂波谱的影响,通过计算机仿真计算了空时二维杂波似然谱,结合空时二维杂波分布验证了本模型的合理性。本文仅从空时自适应杂波抑制角度研究双基地机载雷达的杂波模型与杂波特性,其内容可作为研究双基地机载雷达空时自适应处理问题的基础。

参考文献:

- [1] Klemm R. Space time Adaptive Processing —— Principles and Applications [M]. IEE Publishers, London, UK, 1998.

- [2] 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.
- [3] Klemm R. Comparison between monostatic and bistatic antenna configurations for STAP [J]. IEEE Trans., 2000, AES- 36(2): 596- 608.
- [4] Skolnik M. Radar Handbook (2nd) [M]. New York: McGraw Hill, 1990.

作者简介:



王永良 男, 1965 年出生浙江嘉兴, 教授, 博士生导师, 1994 年获西安电子科技大学博士学位, 曾在清华大学做博士后, 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 90 余篇, 其中收入国际三大检索论文 30 余篇, 出版学术专著 1 部, 获省部级科技进步一等奖、二等奖、三等奖各 1 项。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。

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。