

# 基于最大似然估计的机载双基地雷达 距离模糊杂波抑制方法

张柏华<sup>1,2</sup>, 谢文冲<sup>2</sup>, 王永良<sup>2</sup>, 张永顺<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学导弹学院, 陕西三原 713800; 2. 空军雷达学院重点实验室, 湖北武汉 430019)

**摘要:** 针对存在距离模糊情况下机载双基地雷达杂波抑制的难题, 本文分析了存在距离模糊时机载双基地雷达的杂波特性, 提出了一种基于最大似然估计的机载双基地雷达距离模糊杂波抑制方法. 该方法首先通过最大似然估计对训练样本所包含的各个模糊距离环的杂波幅度进行估计, 然后通过非均匀采样重构待检测距离门及其模糊距离环的杂波数据, 再由重构的杂波数据得到待检测距离门的杂波协方差矩阵, 最后求得空时自适应处理权值, 完成杂波抑制. 仿真结果表明该方法具有较好的机载双基地雷达距离模糊杂波抑制性能.

**关键词:** 机载双基地雷达; 距离模糊; 杂波抑制; 最大似然估计; 空时自适应处理

**中图分类号:** TN957.51      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2011) 12-2836-06

## Clutter Suppression Method for Airborne Bistatic Radar with Range Ambiguity Based on Maximum Likelihood Estimation

ZHANG Bai-hua<sup>1,2</sup>, XIE Wen-chong<sup>2</sup>, WANG Yong-liang<sup>2</sup>, ZHANG Yong-shun<sup>1</sup>

(1. The Missile Academy, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China;

2. Key Research Lab, Wuhan Radar Academy, Wuhan, Hubei 430019, China)

**Abstract:** In this paper, the clutter characteristics of airborne bistatic radar with range ambiguity are analyzed, and a novel clutter suppression method based on maximum likelihood estimation is proposed. Firstly, the amplitude of various training samples including ambiguous ranges are estimated using maximum likelihood estimation. Secondly, clutter of cell under test (CUT) and the corresponding ambiguous ranges are rebuilt by non-uniform frequency sampling. Thirdly, the clutter covariance matrix of CUT is obtained from the rebuilt clutter data. Finally, clutter suppression is achieved by space-time adaptive processing weight from clutter covariance matrix. The simulation results show that the proposed method is more effective than the traditional method for clutter suppression of airborne bistatic radar with range ambiguity.

**Key words:** airborne bistatic radar; range ambiguity; clutter suppression; maximum likelihood estimation; space-time adaptive processing

### 1 引言

双基地雷达由于在雷达“四抗”方面的潜在优势在近年来得到快速发展和广泛的应用, 是当今雷达研究领域的一大热点. 近年来 STAP 技术在机载双基地雷达中的应用已成为雷达领域的热点研究方向. 机载双基地雷达工作时由于载机的运动、雷达的下视工作和收发位置, 机载双基地雷达表现出更复杂的杂波特性, 杂波呈现严重的距离非均匀性, 使得机载双基地雷达的杂波抑制难度增大.

为了克服杂波非均匀特性对机载双基地 STAP 移动目标检测性能的影响, 近年来一些学者提出了诸如多

普勒翘曲<sup>[1]</sup>(DW)、高阶多普勒翘曲<sup>[2]</sup>(HODW)、角度-多普勒补偿<sup>[3]</sup>(ADC)、基于配准补偿<sup>[4]</sup>(RBC)、自适应补偿<sup>[5~7]</sup>、逆协方差矩阵线性预测<sup>[8,9]</sup>(PICM)、空时内插<sup>[10]</sup>(STINT)、基于配准的非均匀采样补偿<sup>[11]</sup>(RBNFS)等方法. 上述方法都有一个默认的前提, 即雷达回波信号不存在距离模糊, 这个前提只有在低脉冲重复频率的条件下才成立, 一般的脉冲多普勒雷达是不满足这个条件的. 文献[12]在原始数据的基础上分别对不同模糊距离环的主杂波进行角度-多普勒补偿, 然后分别对不同模糊距离环做 STAP, 但是由于不同模糊距离环的回波数据在时域上是不可分的, 所以对不同模糊距离环分别做 STAP 是不可实现的. 本文在研究机载双基地雷达杂

波特性的基础上提出了一种新的基于最大似然估计的距离模糊杂波抑制方法 (MLRACS), 该方法用于机载双基地雷达距离模糊杂波的抑制能显著改善其性能。

## 2 机载双基地雷达杂波特性分析

图 1 给出了机载双基地雷达在任意几何配置下的几何关系, 其中 T、R 分别表示发射、接收平台载机, F、O 分别表示发射、接收平台载机在地面的投影, P 表示杂波点,  $V_T$ 、 $V_R$  分别是发射、接收平台载机的飞行速度,  $\psi_T$ 、 $\psi_R$  分别是地面杂波散射点相对于发射、接收平台飞行方向的锥角。本文假设雷达天线都是正侧面放置, 所以  $\psi_T$ 、 $\psi_R$  也分别是发射、接收天线轴向与地面杂波散射点的锥角。  $\theta_T$ 、 $\theta_R$  分别是发射、接收雷达天线波束指向相对于基线方向的方位角,  $\delta_T$ 、 $\delta_R$  分别是发射、接收平台载机飞行方向相对于基线方向的方位角,  $\varphi_T$ 、 $\varphi_R$  分别是杂波散射体相对于发射、接收平台天线轴向的俯仰角,  $h_T$ 、 $h_R$  分别是发射、接收平台载机的飞行高度,  $R_L$  是双基地基线长度,  $R_S$  是双基地探测距离和,  $R_R$  和  $R_T$  分别是接收和发射机到杂波点的距离。

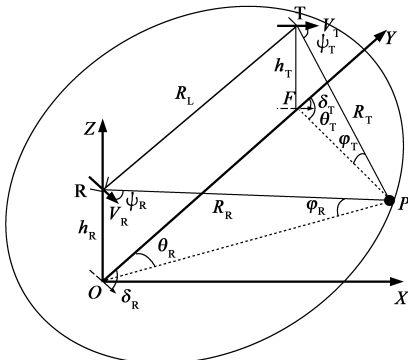


图1 机载双基地几何配置关系图

由图 1 可以得到机载双基地雷达接收回波的多普勒频率为:

$$f_d = \frac{V_R}{\lambda} \cos(\psi_R) + \frac{V_T}{\lambda} \cos(\psi_T) \quad (1)$$

其中,

$$\begin{cases} \cos(\psi_R) = \cos(\theta_R - \delta_R) \cos(\varphi_R) \\ \cos(\psi_T) = \cos(\theta_T - \delta_T) \cos(\varphi_T) \end{cases} \quad (2)$$

假设天线为正侧面放置, 则  $\delta_T$ 、 $\delta_R$  均为 0, 由图 1 的几何三角关系可推出如下公式:

$$R_S = R_T + R_R \quad (3)$$

$$\cos(\varphi_R) = OP/R_R = \sqrt{R_R^2 - h_R^2}/R_R \quad (4)$$

$$\cos(\varphi_T) = PF/R_T = \sqrt{R_T^2 - h_T^2}/R_T \quad (5)$$

$$\cos(\theta_R) = (PF^2 - OF^2 - OP^2)/(-2OFOP) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \cos(\theta_T) &= \cos(\pi - \angle OFP) \\ &= (OP^2 - PF^2 - OF^2)/(2OFPF) \end{aligned}$$

$$= (\cos(\theta_R) OP - OF)/PF \quad (7)$$

$$\begin{aligned} &\{4R_S^2 - [4R_L^2 - 4(h_T - h_R)^2] \cos^2(\theta_R)\} R_R^2 \\ &+ 4R_S(R_L^2 - R_S^2 + 2h_T h_R - 2h_R^2) R_R \\ &+ [4R_L^2 - 4(h_T - h_R)^2] h_R^2 \cos^2(\theta_R) \\ &+ (R_L^2 - R_S^2 + 2h_T h_R - 2h_R^2)^2 = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

从式(8)可解出  $R_R$ , 然后将上述公式代入式(1)、式(2)便可得到接收回波的多普勒频率  $f_d$  关于参变量  $\theta_R$  的依赖于接收机空间锥角和双基地探测距离和两个变量的函数表达式如下:

$$\begin{aligned} f_d &= \frac{V_R}{\lambda R_R} \cos(\theta_R) \sqrt{R_R^2 - h_R^2} \\ &+ \frac{V_T}{\lambda (R_S - R_R)} \left[ \cos(\theta_R) \sqrt{R_R^2 - h_R^2} - \sqrt{R_L^2 - (h_T - h_R)^2} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{其中: } R_R = (-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac})/(2a) \quad (10)$$

$$a = 4R_S^2 - [4R_L^2 - 4(h_T - h_R)^2] \cos^2(\theta_R) \quad (11)$$

$$b = 4R_S(R_L^2 - R_S^2 + 2h_T h_R - 2h_R^2) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} c &= [4R_L^2 - 4(h_T - h_R)^2] h_R^2 \cos^2(\theta_R) \\ &+ (R_L^2 - R_S^2 + 2h_T h_R - 2h_R^2)^2 \end{aligned} \quad (13)$$

需要指出的是, 式(8)  $R_R$  有两个解: 式(10)中, 当  $\pi/2 \leq \theta_R \leq 3\pi/2$  时, 取加号, 当  $\theta_R \leq \pi/2$  或  $\theta_R \geq 3\pi/2$ , 取减号。通过仿真, 便可以得到任意几何配置、载机任意飞行方向、天线任意安置条件下, 接收平台锥角 - 地杂波多普勒的二维图。



图2 两种典型配置情况图

为了分析方便, 本文选择了图 2 的两种典型配置进行了仿真, 其中接收、发射天线均为正侧面放置。图 3 ~ 图 6 给出了典型配置一、二单一距离和存在距离模糊时的杂波特征谱和功率谱等高线图。从图中可以看出: 一方面, 当存在距离模糊时杂波协方差矩阵的大特征值个数(即: 杂波自由度)显著增加, 杂波自由度从 30 左右增加到 60 多, 其中配置二的杂波自由度比配置一略微多一点; 另一方面, 杂波功率谱由于距离模糊而大大展宽。以上两种因素给传统 STAP 方法的杂波抑制性能带来了很大的影响。

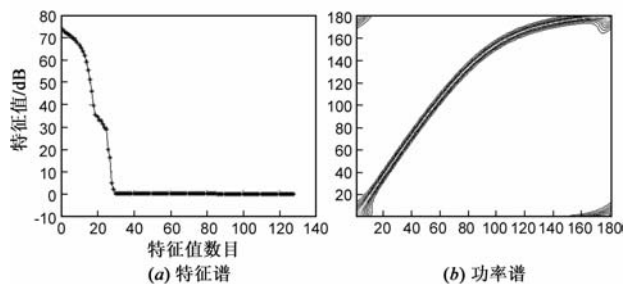


图3 配置一130km

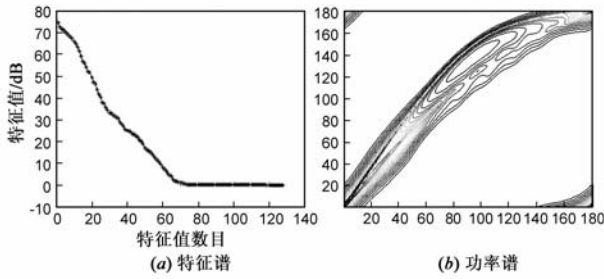


图4 配置一存在距离模糊的情形

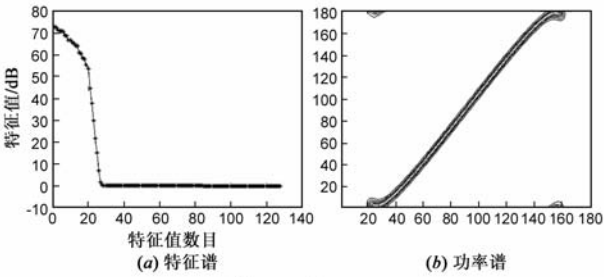


图5 配置二130km

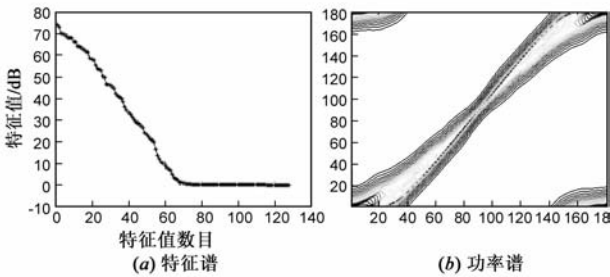


图6 配置二存在距离模糊的情形

### 3 基于最大似然估计的机载双基地雷达距离模糊杂波抑制方法

#### 3.1 方法描述

本文提出的基于最大似然估计的距离模糊杂波抑制方法(MLRACS)描述如下:该方法首先利用最大似然估计方法分别对不同训练样本内所包含的各个模糊距离环的杂波幅度进行估计,其次通过非均匀采样重构待检测距离门及其模糊距离环的杂波数据,再次通过重构的杂波数据得到待检测距离门及其模糊距离环的杂波协方差矩阵,最后求得空时自适应处理权值,完成杂波抑制.MLRACS方法的具体实现步骤见图7,其中,双基地结构参数可由惯导系统提供.

#### 3.2 最大似然估计回波幅度

典型的参数化估计方法有周期图估计、自适应匹配滤波估计、最小二乘估计、最大似然估计(MLE)等.在本文所涉及到的杂波幅度估计中,用周期图估计性能比较差,自适应匹配滤波估计线性无关条件难以满足,最小二乘估计存在矩阵奇异而无法得到结果.而MLE则可以克服其它参数估计方法的缺点,很好的估计杂波幅度.因此在本文中我们选用MLE作为训练样本距

离模糊杂波幅度的估计.

假定机载双基地雷达(其天线为均匀线阵,阵元数为  $N$ ,相干脉冲串个数为  $K$ )某一距离门接收到的回波数据为:

$$X = \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^{N_c} a_{cli} S_{li} + n \quad (14)$$

其中,  $L$  为距离模糊次数,  $N_c$  为杂波块数,  $a_{cli}$  为第  $l$  个模糊距离环对应的第  $i$  个杂波块的幅度,  $S_{li}$  为该杂波块对应的空时导向矢量,  $n$  为高斯噪声;  $R_n = \sigma^2 I$ . 上式写成矩阵形式得:

$$X = \sum_{l=1}^L a_{cl} S_l + n \quad (15)$$

其中,  $S_l = [S_{l1} \ S_{l2} \ \dots \ S_{lN_c}]$ ,  $a_{cl} = [a_{cl1} \ a_{cl2} \ \dots \ a_{clN_c}]^T$ ,  $a_{cl}$  中的  $a_{cli}$  可写为  $a_{li} c_{li}$ , 其中  $c_{li}$  已知, 可从雷达方程得到. 于是, 式(15)又可写为:

$$X = \sum_{l=1}^L a_l S_{cl} + n \quad (16)$$

其中,  $S_{cl} = [c_{l1} S_{l1} \ c_{l2} S_{l2} \ \dots \ c_{lN_c} S_{lN_c}]$ ,  $a_l = [a_{l1} \ a_{l2} \ \dots \ a_{lN_c}]^T$ . 由式(16)可得:

$$R = \sum_{l=1}^L S_{cl} \tilde{A}_l S_{cl}^H + R_n \quad (17)$$

其中,  $\tilde{A}_l = \text{diag}[\tilde{a}_{l1}^2 \ \tilde{a}_{l2}^2 \ \dots \ \tilde{a}_{lN_c}^2]$ ,  $\tilde{a}_{li}^2 = E\{|a_{li}|^2\}$ .

由于贝叶斯恒等式  $P(a_{cl} | X) P(X) = P(X | a_{cl}) P(a_{cl})$  中  $P(X)$  不依赖于  $a_{cl}$ , 并且  $P(X)$  不影响  $a_{cl}$ , 因此  $P(X)$  不必计算, 由式(15)得:  $n = X - \sum_{l=1}^L a_{cl} S_l$ , 由高斯假定有(下面式子中的  $e$  表示自然对数):

$$P(n) \propto e^{-n^H R_n^{-1} n} \quad (18)$$

因此, 如果  $a_{cl}$  已知, 由式(15)、(18)有:

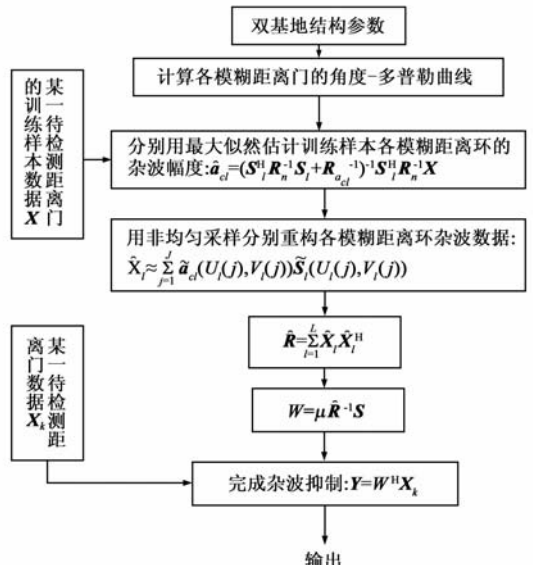


图7 MLRACS处理步骤

$$P(\mathbf{X} | \mathbf{a}_{cl}) \propto e^{-(\mathbf{x} - \sum_{i=1}^J \mathbf{a}_{cl} \mathbf{S}_i)^H \mathbf{R}_n^{-1} (\mathbf{x} - \sum_{i=1}^J \mathbf{a}_{cl} \mathbf{S}_i)} \quad (19)$$

先验概率  $P(\mathbf{a}_{cl})$  表示  $\mathbf{a}_{cl}$  的先验知识, 可以假定  $a_{cli}$  为独立的复高斯分布, 则有:

$$P(\mathbf{a}_{cl}) \propto e^{-\mathbf{a}_{cl}^H \mathbf{R}_{a_d}^{-1} \mathbf{a}_{cl}} \quad (20)$$

其中,  $\mathbf{R}_{a_d}$  与对角阵  $\mathbf{c}_l = [c_{l1} \quad c_{l2} \quad \cdots \quad c_{lN_c}]$  成比例关系. 最后可得:

$$P(\mathbf{a}_{cl} | \mathbf{X}) \propto e^{-(\mathbf{x} - \sum_{i=1}^J \mathbf{a}_{cl} \mathbf{S}_i)^H \mathbf{R}_n^{-1} (\mathbf{x} - \sum_{i=1}^J \mathbf{a}_{cl} \mathbf{S}_i) - \mathbf{a}_{cl}^H \mathbf{R}_{a_d}^{-1} \mathbf{a}_{cl}} \quad (21)$$

由于  $\mathbf{R}_n$  和  $\mathbf{R}_{a_d}$  正定, 所以  $\mathbf{a}_{cl}$  的最大似然估计值为:

$$\hat{\mathbf{a}}_{cl} = (\mathbf{S}_l^H \mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{S}_l + \mathbf{R}_{a_d}^{-1})^{-1} \mathbf{S}_l^H \mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{X} \quad (22)$$

### 3.3 非均匀采样数据重构

传统的谱配准方法中是利用二维离散傅里叶变换均匀选取点数, 容易产生“篱笆栅格”现象. 因此本文对待检测距离门的某一模糊距离环的数据重构采用非均匀采样方法, 即非等间隔的选取点之间的间隔, 尽可能多的选取幅度值较大的能代表杂波分布的各点数, 这样可以避免“篱笆栅格”现象, 还可显著减少计算量.

假定机载双基地雷达某一距离门第  $l$  个模糊距离环导向矢量  $\mathbf{S}_l$  的秩为  $J$ , 且  $J$  与所选的导向矢量无关, 因此, 接收到的该距离门第  $l$  个模糊距离环数据  $\mathbf{X}_l$  可表示为:

$$\mathbf{X}_l = \tilde{\mathbf{a}}_{cl} \tilde{\mathbf{S}}_l \quad (23)$$

其中,  $\tilde{\mathbf{S}}_l = [\tilde{\mathbf{S}}_{l1} \quad \tilde{\mathbf{S}}_{l2} \quad \cdots \quad \tilde{\mathbf{S}}_{lJ}]$ ,  $\tilde{\mathbf{a}}_{cl} = [a_{cl1} \quad a_{cl2} \quad \cdots \quad a_{clJ}]^T$ . 式(23)表示接收数据  $\mathbf{X}_l$  包含  $J$  个不相关的导向矢量, 其中杂波幅度  $\tilde{\mathbf{a}}_{cl}$  由最大似然估计公式(22)得到.

由于任何角度-多普勒(AD)曲线均可表示为由系统参数估计的  $\psi$  为自变量的参变量, 因此, 可基于功率谱密度(PSD)适当把角度  $\psi$  离散化为  $J$  个角度. 对于某一距离门第  $l$  个模糊距离环数据,  $J$  个数据集  $L_l$  在其对应的 AD 曲线上的位置  $(U_l(j), V_l(j))$  为:

$$L_l = \{(U_l(1), V_l(1)) \quad \cdots \quad (U_l(J), V_l(J))\} \quad (24)$$

由式(24)可以看出, 相对于传统的谱配准方法中利用二维离散傅里叶变换均匀选取点数的方式, 本文方法中各选取点相互之间的间隔为非等间隔的, 这样可以尽可能多的选取幅度值较大的能代表杂波分布的各点数, 避免了“篱笆栅格”现象.  $J$  个幅度峰值数据集  $\mathbf{a}_{cl}$  在该距离门第  $l$  个模糊距离环的相应位置为:

$$\mathbf{a}_{cl} = \{\hat{a}_{cl}(U_l(1), V_l(1)) \quad \cdots \quad \hat{a}_{cl}(U_l(J), V_l(J))\} \quad (25)$$

该检测距离单元第  $l$  个模糊距离环中的幅度值  $\tilde{a}_{cl}(U_l(j), V_l(j))$  可通过  $N_m$  个距离门的数据求平均得到, 即:

$$\tilde{a}_{cl}(U_l(j), V_l(j)) = \frac{1}{N_m} \sum_{m=1}^{N_m} \tilde{a}_{clm}(U_l(j), V_l(j)) \quad (26)$$

其中,  $j = 1, \dots, J$ ,  $N_m$  表示训练样本数. 因此, 经过基于谱配准的最大似然非均匀采样补偿后的该检测距离单元第  $l$  个模糊距离环的杂波估计数据为:

$$\hat{\mathbf{X}}_l \approx \sum_{j=1}^J \tilde{a}_{cl}(U_l(j), V_l(j)) \tilde{\mathbf{S}}_l(U_l(j), V_l(j)) \quad (27)$$

由式(27)即可求得该待检测距离单元第  $l$  个模糊距离环的估计杂波协方差矩阵, 所有模糊距离环的杂波协方差矩阵求和即可得到待检测距离单元及其模糊距离环的杂波协方差矩阵:

$$\hat{\mathbf{R}} = \sum_{l=1}^L \hat{\mathbf{X}}_l \hat{\mathbf{X}}_l^H \quad (28)$$

由杂波协方差矩阵可以得到空时自适应处理权值:

$$\mathbf{W} = \mu \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{S} \quad (29)$$

其中,  $\mu$  表示一个常数,  $\mathbf{S}$  表示导向矢量.

最后完成杂波抑制并输出:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W}^H \mathbf{X}_k \quad (30)$$

其中,  $\mathbf{X}_k$  表示待检测距离门数据.

## 4 性能仿真

本节仿真研究了机载双基地雷达最大作用距离和为 400km(距离模糊度为 3)和 700km(距离模糊度为 5)时图 2 两种配置下本文所提方法的性能. 仿真具体参数为: 阵元数  $N = 8$ , 脉冲数  $K = 16$ , 杂噪比 60dB, 基线距离为 80km, 双基地距离和为 130km, 发射载机和接收载机高度均为 8km, 飞行速度均为 140m/s, 工作波长  $\lambda = 0.23\text{m}$ , 脉冲重复频率  $f_r = 2434.8\text{Hz}$ . 假定脉冲追赶准确同步, 接收主波束指向阵面法向. 所加目标均在第 51 个距离门(双基地距离和 130km), 信噪比 10dB. 传统方法表示按照就近临准则直接估计协方差矩阵的 STAP 处理方法.

**实验 1 改善因子比较** 图 8、9 分别给出了配置一、二距离模糊度为 3、5 时的改善因子图, 其中配置一接收主瓣无偏扫, 配置二接收主瓣偏扫  $30^\circ$ . 从图中可以看出, 本文所提方法能显著提高杂波抑制性能, 特别是当模糊距离环在频域分得较开时, 性能改善更多(如配置一).

**实验 2 输出 SCNR 比较** 图 10 和图 11 分别给出了双基地配置一情况下距离模糊度为 3 和 5 时的输出 SCNR 性能比较图(目标归一化多普勒频率为  $-0.5$ ). 从图中可以看出, 传统方法完全失效, 而本文方法则能够有效检测到目标. 此外, 从图 11 中可以看出, 由于距离模糊度的增加, 两种方法检测性能均有下降, 但是本文方法仍然远好于传统方法.

图 12 和图 13 分别给出了双基地配置二情况下距离模糊度为 3 和 5 时的输出 SCNR 性能比较图(目标归

一化多普勒频率为 0.478). 从图中可以看出, 本文方法性能仍然好于传统方法. 但是距离模糊度为 3 和距离模糊度为 5 对检测性能的影响没有配置一时明显, 这是由

于配置二时不同的模糊距离环的杂波谱离得比较近的原因.

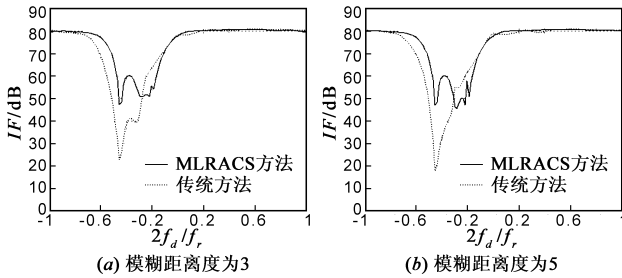


图8 配置一改善因子比较(接收主波束无偏扫)

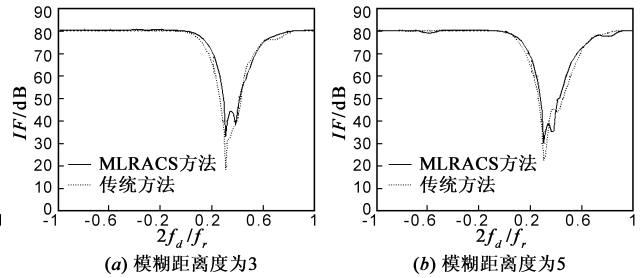


图9 配置二改善因子比较(接收主波束偏扫30°)

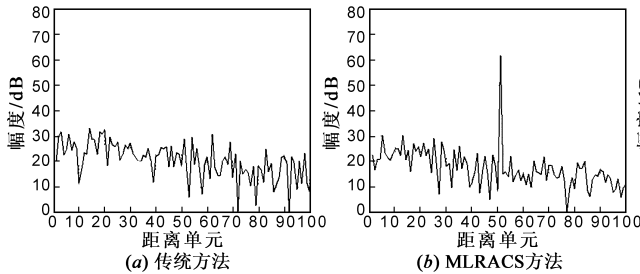


图10 距离模糊度为3时配置一的输出SCNR性能比较

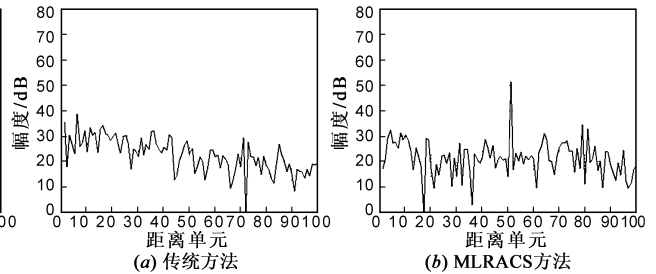


图11 距离模糊度为5时配置一的输出SCNR性能比较

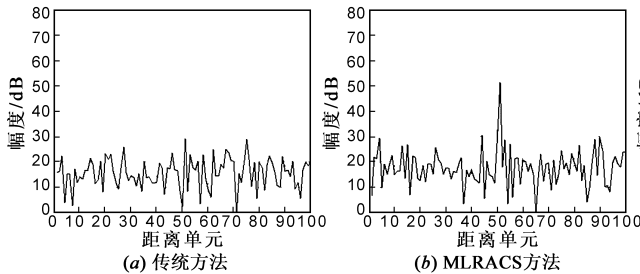


图12 距离模糊度为3时配置二的输出SCNR性能比较

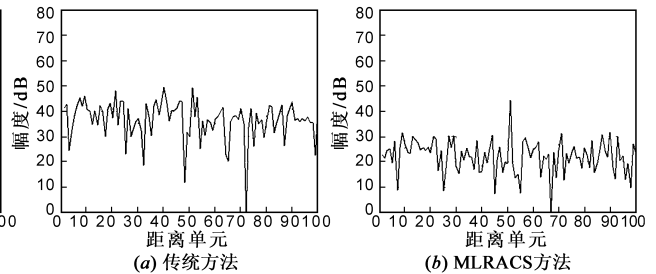


图13 距离模糊度为5时配置二的输出SCNR性能比较

实验 3 多普勒盲区比较

表 1 给出了配置一、二距离模糊度为 3、5 时传统方法与本文方法的多普勒盲区比较(本文假设检测门限为 5dB). 从表 1 可以看出, 本文方法在不同机载双基地配置、不同距离模糊度时均能显著降低多普勒盲区, 提高运动目标的检测性能.

表 1 多普勒盲区比较图

距离模糊度	配置一		配置二	
	传统方法	MLRACS 方法	传统方法	MLRACS 方法
3	18%	4.25%	13.9%	7.8%
5	20%	4.75%	14.5%	8.2%

需要指出的是, 当不同的模糊距离环杂波数据的 AD 曲线靠得很近时, 可能造成最大似然估计无法准确分辨各个模糊距离环的功率谱, 此时对于本文方法, 只需要估计不可分辨的模糊距离环中的一个即可.

5 结论

本文在机载双基地雷达几何模型的基础上, 分析了机载双基地雷达存在距离模糊时的杂波分布特性,

提出了一种基于最大似然估计的机载双基地雷达距离模糊杂波抑制方法(MLRACS), 仿真结果表明该方法能够有效解决机载双基地雷达的距离模糊杂波抑制问题, 显著降低多普勒盲区, 提高运动目标检测性能. 但是需要指出得是本文方法的性能受限于双基地惯导系统提供的系统参数的精确性, 下一步的研究重点将是借助于回波数据信息和外部先验信息提高方法的鲁棒性<sup>[13]</sup>.

参考文献

[1] Borsari Geordi K. Mitigating effects on STAP processing caused by an inclined array [A]. Proceedings of the IEEE National Radar Conference [C]. Dallas, TX, USA: IEEE, 1998. 135 - 140.  
 [2] Pearson F, Borsari G. Simulation and Analysis of Adaptive Interference Suppression for Bistatic Surveillance Radars [R]. MA, USA: Lincoln Laboratory, 2001.  
 [3] Himed B, Zhang Y H, Hajjari A. STAP with angle-doppler

- compensation for bistatic airborne radar[A]. Proceedings of the IEEE National Radar Conference[C]. Long Beach, CA, USA: IEEE, 2002. 311 – 317.
- [4] Lapierre F D, Verly J G. Registration-Based Solutions to the Range-Dependence Problem in STAP Radars[R]. MA, USA: Lincoln Laboratory, 2003.
- [5] Jaffer A, Ho P T. Adaptive angle-doppler compensation techniques for bistatic STAP radars[A]. Final Technical Report, AFRL-SN-RS-TR-2005-398[C]. USA: AFRL, 2005.
- [6] Melvin W L, Davis M E. Adaptive cancellation method for geometry-induced nonstationary bistatic clutter environments[J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 2007, 43 (2): 651 – 672.
- [7] Lapierre F D, Ries P, Verly J G. . Foundation for mitigating range dependence in radar space-time adaptive processing[J]. IET Radar Sonar Navigation, 2009, 3(1): 18 – 29.
- [8] Lim C H, Mulgrew B. Prediction of inverse covariance matrix (PICM) sequences for STAP[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2006, 13(4): 236 – 239.
- [9] Lim C H, Aboutanios E, Mulgrew B. Linear prediction of range-dependent inverse covariance matrix [A]. Proc of the National Radar Conf [C]. Verona, NY: IEEE, 2006. 228 – 232.
- [10] Vijay Varadarajan, Jeffrey L Krolik. Joint space-time interpolation for distorted linear and bistatic array geometries[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 56(3): 848 – 860.
- [11] Xie Wenchong, Wang Yongliang. Range-dependence compensation method for bistatic STAP radar [A]. 2008 IEEE Congress on Image and Signal Processing[C]. Sanya, China: IEEE, 2008. 503 – 506.
- [12] 孟祥东, 吴建新, 王彤, 保铮. 机载双基地雷达杂波分析及其距离模糊杂波的抑制[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2008, 35(6): 992 – 998.
- Meng Xiang-dong, Wu Jian-xin, Wang Tong, Bao Zheng. Clutter analysis and range-ambiguous clutter suppression for bistatic radar[J]. Journal of Xidian University, 2008, 35(6): 992 – 998. (in Chinese)
- [13] 高飞, 谢文冲, 王永良. 机载共形阵雷达杂波抑制方法研究[J]. 电子学报, 2010, 38(9): 2014 – 2010.
- Gao Fei, Xie Wenchong, Wang Yongliang. Study on clutter suppression method for airborne radar with conformal arrays [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(9): 2014 – 2010. (in Chinese)

### 作者简介



**张柏华** 男, 1979年3月生于湖南永兴. 2010年获空军工程大学电路与系统专业博士学位. 主要研究领域为: 空时自适应信号处理、双基地雷达. E-mail: berlainzbh2001@yahoo.com.cn



**谢文冲** 男, 1978年9月生于山西万荣, 2006年获国防科技大学信号与信息处理专业工学博士学位. 研究方向为: 机载雷达信号处理和空时自适应信号处理等.

**王永良** 男, 1965年生于浙江嘉兴, 教授, 博士生导师. 1994年获西安电子科技大学博士学位, 主要研究领域为: 雷达信号处理、阵列信号处理和自适应信号处理等.

**张永顺** 男, 1961年生于山东, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为: 双基地雷达、雷达和电子对抗、阵列信号处理、自适应信号处理.