

一种基于距离-多普勒二维联合的群目标分辨方法

杜 兰,刘宏伟,保 铮

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室,陕西西安 710071)

摘 要: 编队飞机由于间距很小,常规低分辨雷达无法直接从距离和方位上分辨架次.本文提出一种基于距离-多普勒二维联合处理的群目标分辨方法.发射线性调频脉冲信号,将观测时间内的若干次回波在距离维和多普勒维分别转换为单频信号的叠加,再联合距离-多普勒二维信息估计协方差矩阵,用超分辨信源数估计算法——新的改进盖氏圆盘法分辨目标架次.这种方法可以直接地给出判决结果,适用于各种飞行状态、低信噪比环境或波束驻留时间较短的情况,而且和重频参差工作模式相兼容,尤其适合中、高重频工作方式.

关键词: 群目标分辨;编队飞行;低分辨雷达;距离-多普勒二维联合;盖氏圆盘法

中图分类号: TN958.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 06-0881-05

A Raid Cluster Resolution Scheme Based on Joint Range-Doppler Processing

DU Lan, LIU Hong-wei, BAO Zheng

(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: It is difficult for common low-resolution radar to distinguish multiple planes flying in a raid cluster using traditional radar signal processing techniques. A raid cluster resolution scheme is proposed based on joint range-Doppler processing. The transmitted signal used is linear frequency modulation (LFM) signal and the received signal within observation time is represented by the summation of multiple sinusoid signals in both range and Doppler dimension. The time-delay and Doppler information are used jointly to estimate the sample covariance matrix, and the final resolution algorithm is a high-resolution source number estimation method—the new modified Gerschgorin disk estimation (NMGDE) method. The proposed scheme can give the target number automatically, and adapts to all kinds of flying states, low signal noise ratio (SNR) or short dwell time, especially middle or high repetition frequency, owing to being compatible with resolving range ambiguity by repetition frequency irregularity.

Key words: raid cluster resolution; formation flight; low-resolution radar; range-Doppler processing; Gerschgorin disk estimation (GDE)

1 引言

现代战争中,空中袭击的来袭飞机多采用多架飞机编队飞行,及时准确地判明来袭目标编队中的飞机架次,对全面分析敌情,制定正确的作战方案是非常重要的.但是,对于常规的低分辨雷达,假设其距离分辨率 100m,方位分辨率 3° .若目标斜距 60km,则距离-方位上的分辨单元为 $100 \times 3000\text{m}^2$ (不考虑高低角分辨),而编队飞行的战斗机间距一般为几十米,距离-方位分辨单元内可容纳多架飞机编队,雷达无法直接分辨这些目标.因此,通常希望利用观测时间内的若干次回波通过某种适用于各种飞行状态的通用算法有效地识别同一回波信号中的飞机架次.

目前,国内外关于低分辨雷达多目标分辨的方法主要有两类:一是从多普勒域入手,使用时频分析法^[1-5].这类方法

存在的缺陷有:需要人工干预,不能直接给出识别结果;只利用了多普勒信息,不具备超分辨能力,需要较长的相关处理时间,对于径向或近似径向飞行效果不好;时频分析法的运算量本身就比较大,为了消除 Wigner-Ville 分布的交叉项使算法运算量和复杂性更大.二是基于低分辨雷达回波的特征提取方法^[6-8].这类方法利用雷达回波的某些有用特征,结合时间谱信息(飞机的航迹、速度和目标的运动特征)实现飞机类型、大小和架次识别.但最终识别要使用神经网络或模板匹配法,如果要对各种类型、各种架次编队都进行训练或建立模板显然是不可行的,而且这种方法所需的相关信息较多,不利于快速分辨.

本文提出一种新的低分辨雷达群目标分辨方法,使用线性调频脉冲信号,联合距离-多普勒二维信息估计协方差矩阵,用超分辨信源数估计算法——新的改进盖氏圆盘法^[11-13]

分辨目标架次. 这种方法的优点是 结合了距离-多普勒二维信息, 较单纯的多普勒维分辨方法效果大为改善, 适用于各种飞行状态; 采用的盖氏圆盘分辨算法是超分辨方法, 不需要人工干预, 可以直接给出判决结果, 而且对信噪比和样本数要求都比较低, 适用于低信噪比环境或波束驻留时间较短的情况; 和重频参差工作模式相兼容, 适用于中、高重频工作方式.

2 编队目标回波模型分析

2.1 距离维(快时间)分析

发射的线性调频脉冲信号为

$$s_0(t) = \text{rect}_T(t) e^{j2(f_0 t + (\mu^2/2)t^2)} \quad (1)$$

其中

$$\text{rect}_T = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

f_0 表示载频, μ 表示调频率. 在距离维由于编队飞机有一定的间距, 各架飞机与雷达的斜距不同, 引起的回波时延也不同. 用和发射信号调频率相同的线性调频信号 $s_r(t) = s_0(t - \tau)$ 作参考信号对接收回波解线性调频(Dechirp), 时延的不同就转换为了频率的不同, 以两架飞机编队为例(为分析方便, 这里暂时忽略噪声信号, 并且目标只考虑单散射点)

$$\begin{aligned} s_{\text{Dechirp}} &= s(t) \times s_r^*(t) = [a_1 s_1(t) + a_2 s_2(t)] \times s_r^*(t) \\ &= a_1 \text{rect}_T(t - \tau_1) e^{j2(f_0(t - \tau_1) + (-2\mu(t - \tau_1) + \mu(\tau_1^2 - \tau_2^2))/2)t} \\ &\quad + a_2 \text{rect}_T(t - \tau_2) \\ &\quad e^{j2(f_0(t - \tau_2) + (-2\mu(t - \tau_2) + \mu(\tau_2^2 - \tau_1^2))/2)t} \\ &= a_1 e^{j2(f_0(t - \tau_1) + \mu(\tau_1^2 - \tau_2^2)/2)t} \text{rect}_T(t - \tau_1) e^{(-2j\mu t)} \\ &\quad + a_2 e^{j2(f_0(t - \tau_2) + \mu(\tau_2^2 - \tau_1^2)/2)t} \text{rect}_T(t - \tau_2) e^{(-2j\mu t)} \quad (2) \end{aligned}$$

式中 $*$ 表示取共轭, a_1 和 a_2 分别表示两个目标的后向散射强度, τ_1 和 τ_2 分别代表两个目标的回波时延, $f_1 = \mu \tau_1$, $f_2 = \mu \tau_2$. 根据式(2), Dechirp 以后的编队目标回波是多个单频信号的叠加.

2.2 多普勒维(慢时间)分析

雷达目标的多普勒频率为

$$f_d = (2V/\lambda) \cos \theta \quad (3)$$

其中, λ 为波长, V 为目标速度, θ 为目标飞行方向与雷达视线的夹角. 仍以两架飞机编队为例, 如果它们的飞行速度相同, 其回波的多普勒频率差为

$$\begin{aligned} f_d &= f_{d1} - f_{d2} = \frac{2V}{\lambda} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \\ &= \frac{2V}{\lambda} \left(-2 \sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \sin \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \right) \\ &\quad - \frac{2V}{R} \frac{d}{R} \sin^2 \theta \quad (4) \end{aligned}$$

其中, R 为平均斜距, d 是两架飞机的间距, 上式假设 $R \gg d$, 两架飞机与雷达视线夹角 θ_1 、 θ_2 的差别很小, $\sin(\theta_1 - \theta_2)$

$$\theta_1 - \theta_2 \approx \frac{d}{R} \sin \theta, \text{ 其中 } \theta = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}.$$

仍假设目标速度不变, 单目标回波的调频率为

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{df_d}{dt} = \frac{-2V}{\lambda} \sin \theta \frac{d\theta}{dt} = \frac{-2V}{\lambda} \sin \theta \frac{d}{dt} \left(\frac{Vt}{R} \sin \theta \right) \\ &\quad - \frac{2V}{R} \frac{V}{R} \sin^2 \theta \quad (5) \end{aligned}$$

由于 $\frac{V}{R}$ 很小, 上式中忽略了更高次的 $\frac{V}{R}$ 项. 如果要用傅立叶变换分辨上述多个目标要求单目标的多普勒频率在处理期间是恒定的. 但根据式(5)由于 μ 是随时间不断变化的, 单目标的多普勒频谱会展宽, 因此, 傅立叶变换是很难分辨多个目标的.

进一步分析目标多普勒频率变化的二次项

$$\frac{d^2 f_d}{dt^2} = \frac{2V^2}{R} 2 \sin \theta \cos \theta \frac{d\theta}{dt} = \frac{4V^3}{R^2} \cos \theta \sin^2 \theta \quad (6)$$

$$\frac{d^2 f_d}{dt^2} \bigg/ \frac{df_d}{dt} = \frac{2V}{R} \cos \theta \quad (7)$$

根据式(7), 以 4.1 节的仿真参数为例, 目标多普勒频率的变化对线性调频模型的偏差不超过 2%. 可见, 在相关处理的时间段内, 用线性调频模型来描述目标多普勒频率的变化是合适的, 编队飞行目标的雷达回波可看作是多个不同频率的线性调频波的叠加. 以上考虑的都是匀速飞行的情况, 实际目标作加(减)速飞行时也会出现多普勒频谱展宽的情况. 因此, 通常对观测时间内的回波先作多普勒域分析, 发现宽谱信号后用最小熵法^[3]在一定的调频率范围内搜索作 Dechirp 处理, 将回波信号变换为单频信号的叠加, 再使用后续算法.

2.3 距离-多普勒二维联合

现有的群目标分辨算法往往只利用多普勒频率的差异, 根据 2.1 节的分析, 目标的距离维延迟也是不同的, 虽然仅利用常规低分辨率雷达的距离分辨率还不足以分辨它们, 但如果采用超分辨处理方法, 距离维的信息也是很重要的, 尤其是当目标径向飞行时, 多普勒维的差异很小, 主要利用的只能是距离维的信息. 因此, 综合利用距离和多普勒信息可进一步提高多目标分辨的能力. 以 4.1 节介绍的仿真实验为例, 预处理后生成 16×32 的数据矩阵 X , 为了说明单个点目标回波在距离维和多普勒维均具有单频特性, 写出单个点目标情况下的 X

$$X = \begin{bmatrix} a & \dots & a e^{-2j f_d^{15} T} & a e^{-2j f_d^{16} T} & \dots & a e^{-2j f_d^{31} T} \\ \dots & \ddots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ a e^{-2j f_7 T} & \dots & a e^{-2j(f_7 T + f_d^{15} T)} & a e^{-2j(f_7 T + f_d^{16} T)} & \dots & a e^{-2j(f_7 T + f_d^{31} T)} \\ a e^{-2j f_8 T} & \dots & a e^{-2j(f_8 T + f_d^{15} T)} & a e^{-2j(f_8 T + f_d^{16} T)} & \dots & a e^{-2j(f_8 T + f_d^{31} T)} \\ \dots & \ddots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ a e^{-2j f_{15} T} & \dots & a e^{-2j(f_{15} T + f_d^{15} T)} & a e^{-2j(f_{15} T + f_d^{16} T)} & \dots & a e^{-2j(f_{15} T + f_d^{31} T)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中 x 的列向量表示各组脉冲回波经预处理后的距离维采样数据, t 为时域采样间隔, $f = \mu$; x 的行向量表示同一距离单元经预处理后的跨组慢时间采样数据, T 为相邻脉冲组间的时间间隔(根据 4.1 节, 一组脉冲数为 64, T 为脉冲重复周期的 64 倍). 在传统的一维处理中, 只利用了其中一维的单频特性, 为了得到较多的样本数, 假设距离维和多普勒维均采用 $1/2^\circ$ 孔径“窗”长来截取样本向量, 则距离维和多普勒维相应的信号向量(类比阵列信号处理方法, 以下称其为信号向

向向量)为

$$S_R(f) = [1 \quad \exp(-j2f t) \quad \exp(-j2f 2t) \quad \dots \quad \exp(-j2f 7t)]^T \quad (9)$$

$$S_D(f_d) = [1 \quad \exp(-j2f_d T) \quad \exp(-j2f_d 2T) \quad \dots \quad \exp(-j2f_d 15T)]^T \quad (10)$$

距离维采样相当于在 X 的各列用式(9)滑动,得到 $9 \times 32 = 288$ 个长度为 8 的距离维样本向量 X_{Ri} ,则

$$X_R = [X_{R1}^T, X_{R2}^T, \dots, X_{R9}^T, X_{R10}^T, \dots, X_{R288}^T]^T \\ = a[S_R^T, S_R^T e^{-j2f t}, \dots, S_R^T e^{-j2f 8t}, \\ S_R^T e^{-j2f_d T}, \dots, S_R^T e^{-j2(f 8t + f_d 31T)}] J^T \quad (11)$$

是距离维样本矩阵;而多普勒维采样则是在 X 的各行用式(10)滑动,

$$X_D = [X_{D1}^T, X_{D2}^T, \dots, X_{D17}^T, X_{D18}^T, \dots, X_{D272}^T]^T \\ = a[S_D^T, S_D^T e^{-j2f_d T}, \dots, S_D^T e^{-j2f_d 16T}, \\ S_D^T e^{-j2f t}, \dots, S_D^T e^{-j2(f 15t + f_d 16T)}] J^T \quad (12)$$

是多普勒维样本矩阵,包括 $16 \times 17 = 272$ 个长度为 16 的多普勒维样本向量 X_{Di} .

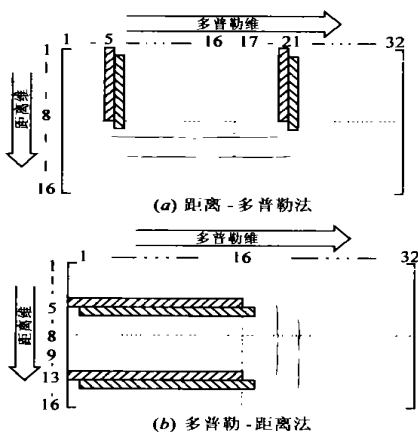


图 1 协方差矩阵样本采样示意图

为了简单有效地将距离维和多普勒维信息结合起来,对于矩阵在纵向仍以 $1/2$ 窗长(8 点采样)作滑窗截取,而在横向按 16 次回波一组分为两组,将某一组单次回波 $1/2$ 窗长(8 点采样)截取的回波数据与间隔 16 次下一组相应回波 $1/2$ 窗长(8 点采样)截取的回波数据连成一个长度为 16 的样本.信号导向向量为

$$S_{RD}(f, f_d) = [S_R^T(f) \quad \exp(-j2f_d \cdot 16T) \cdot S_R^T(f)]^T \quad (13)$$

显然,这种方法是距离维滑动为主,但同时又结合了多普勒维的信息,称为距离—多普勒法.如图 1(a)所示,距离—多普勒采样是在 X 中按照式(13)滑动,总共得到 $9 \times 16 = 144$ 个长为 16 的距离—多普勒样本向量 X_{RDi} ,由于在多普勒维分组,这里的样本数是距离维样本数的一半,而样本长度是距离维样本长度的一倍.类似地,距离—多普勒样本矩阵为

$$X_{RD} = [X_{RD1}^T, X_{RD2}^T, \dots, X_{RD9}^T, X_{RD10}^T, \dots, X_{RD144}^T]^T \\ = a[S_{RD}^T, S_{RD}^T e^{-j2f t}, \dots, S_{RD}^T e^{-j2f 8t}, \\ S_{RD}^T e^{-j2f_d T}, \dots, S_{RD}^T e^{-j2(f 8t + f_d 15T)}] J^T \quad (14)$$

相应地,将数据矩阵转置一下,又可以得到另一种方法

$$S_{DR}(f_d, f) = [S_D^T(f_d) \quad \exp(-j2f 8t) \cdot S_D^T(f_d)]^T \quad (15)$$

这里相当于在横向以 $1/2$ 窗长(16 次回波)作滑窗截取,而在纵向按 8 点采样一组分为两组,将某一组采样 $1/2$ 窗长(16 次回波)截取的各次回波数据与间隔 8 次采样下一组相应 $1/2$ 窗长(16 次回波)截取的各次回波数据连成一个长度为 32 的样本.相应地,这种方法是多普勒维滑动为主,但同时又结合了距离维的信息,称为多普勒—距离法.如图 1(b)所示,多普勒—距离采样是在 X 中按照式(15)滑动,总共得到 $8 \times 17 = 136$ 个长为 32 的多普勒—距离样本向量 X_{DRi} ,同样,由于在距离维分组,这里的样本数是多普勒维样本数的一半,而样本长度是多普勒维样本长度的一倍.类似地,多普勒—距离样本矩阵为

$$X_{DR} = [X_{DR1}^T, X_{DR2}^T, \dots, X_{DR17}^T, X_{DR18}^T, \dots, X_{DR136}^T]^T \\ = a[S_{DR}^T, S_{DR}^T e^{-j2f_d T}, \dots, S_{DR}^T e^{-j2f_d 16T}, \\ S_{DR}^T e^{-j2f t}, \dots, S_{DR}^T e^{-j2(f 7t + f_d 16T)}] J^T \quad (16)$$

对于多目标情形,同样可以对录取的数据矩阵 X 采用以上方法进行样本采样,此时的样本信号是由多个目标信号相加得到的.各种方法采样后相应的协方差矩阵为

$$R_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i X_i^H \quad (17)$$

其中, X_i 是各种采样方法相应的样本向量, N 是样本个数, p 为阶数(X_i 的长度).

3 盖氏圆盘法用于群目标分辨

群目标分辨问题的实质就是要判明雷达回波中包含的信号个数,经过前面的预处理目标回波在距离维和多普勒维都转换为多个单频信号的叠加,这样的回波是平稳非时变的,因此,可以采用阵列信号处理中的超分辨信源数估计算法.其中,信息论准则法和盖氏圆盘法是比较合适的,其优点在于判决过程中不需要主观判断,可以直接给出判决结果.不过,信息论准则法^[9]要求信源独立和比较大的样本数,虽然雷达用中、高重频可获得较多的样本,但信噪比太低,通常在相干积累后样本数只有几十甚至更少,并且信息论准则法对信噪比很敏感.这些缺陷都使得基于信息论准则的 AIC 和 MDL 法在实际应用中并不稳健^[10].盖氏圆盘法(GDE)估计信源数首先是由 H T Wu, J F Yang 和 F K Chen 于 1994 年提出的, GDE 法相对于信息论准则法的优点是更适用于小样本的情况下,运算量较小,而且对信噪比不很敏感^[11].

对协方差矩阵 R_p 做酉变换 $T = \begin{bmatrix} U_{p-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix}$, 其中 U_{p-1}

是 R_{p-1} 的特征向量矩阵,则

$$R_{pT} = T^H R_p T = T^H \begin{bmatrix} R_{p-1} & c \\ c^H & c_{pp} \end{bmatrix} T \\ = \begin{bmatrix} U_{p-1}^H R_{p-1} U_{p-1} & U_{p-1}^H c \\ c^H U_{p-1} & c_{pp} \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} U_{p-1}^H & \\ c^H U_{p-1} & c_{pp} \end{bmatrix} \quad (18)$$

根据分隔定理^[11],假设有 M 个目标,真实的取样协方差矩阵

频脉冲信号,联合距离维和多普勒维信息,用超分辨信源数估计算法分辨目标架次。这种方法不需要人工干预,适用于各种飞行状态、低信噪比环境或波束驻留时间较短的情况,而且和重频参差工作模式相兼容,尤其适合中、高重频工作方式。该方法在仿真实验中取得了较好的识别效果。

参考文献:

- [1] 孙晓兵,保铮,罗琳.时-频信号分析与雷达的多目标分辨[J].系统工程与电子技术,1997,(11):12-16.
- [2] 姬红兵,高新波,谢维信.一种编队目标架次检测方法[J].系统工程与电子技术,2000,22(6):62-65.
- [3] 姜正林,保铮,邢孟道.低分辨雷达编队目标分辨新方法[J].西安电子科技大学学报,2001,28(4):482-486.
- [4] 李勇,刘玉萍,廉保旺,等.加权重排算法在多目标雷达信号分辨中的应用[J].电子与信息学报,2003,25(1):31-36.
- [5] 李勇,张怡,廉保旺,等.基于自适应 Chirp 表示的雷达多目标分辨[J].西北工业大学学报,2001,19(4):605-609.
- [6] 宋颖凤,张汉华,姜卫东,等.低分辨率雷达目标回波波形的特征提取与分类方法研究[J].雷达与对抗,2002,(4):1-5.
- [7] 王伟,张汉华,姜卫东,等.低分辨雷达的目标特征提取方法[J].国防科技大学学报,2002,24(2):31-35.
- [8] 王首勇,朱光喜.应用复双谱对角切片的雷达多目标特征提取[J].信号处理,2002,18(6):500-504.
- [9] Wax M, Kailath. Detection of signal by information theoretic criteria [J]. IEEE Trans AP,1985,33(2):387-392.
- [10] 杨绍麟,柯亨玉,候杰昌,等. OSMAR2000 超分辨率海流算法中空间信号源数的确定[J].武汉大学学报(理学版),2001,47(5):609-613.
- [11] H T Wu, J F Yang, F K Chen. Source number estimator using Gerschgorin disks [A]. Proc ICASSP [C]. Adelaide: IEEE, 1994. 261-264.

- [12] H T Wu, J F Yang, F K Chen. Source number estimators using transformed Gerschgorin radii [J]. IEEE Trans SP,1995,43(6):1325-1333.
- [13] H T Wu, C L Chen. A new Gerschgorin radii based method for source number detection [A]. Proc 10th IEEE Workshop on Statistical Signal and Array Processing [C]. Pennsylvania: IEEE, 2000. 104-107.

作者简介:



杜 兰 女,1980年3月出生于陕西省宝鸡市,2001年毕业于西安电子科技大学,获学士学位,现为西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室在读博士生,主要研究兴趣:雷达目标识别、雷达成像(SAR/ISAR)和雷达信号处理理论。



刘宏伟 男,1971年3月出生于河南省孟津县,副教授,1992年毕业于大连理工大学,获学士学位,分别于1995年和1999年获西安电子科技大学硕士和博士学位,现就职于西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室,研究方向:雷达信号处理与检测、阵列信号处理、雷达目标识别。



保 铮 男,1927年12月出生于江苏省南通市,1953年毕业于中国人民解放军通讯工程学院,现为中国科学院院士、IEEE高级会员、中国电子学会会士,研究方向为雷达信号处理与检测。