

## 集成广义模糊函数在雷达多目标分辨中的应用\*

戴征坚 邹焕新 郁文贤 胡卫东

(国防科技大学 ATR 重点实验室 长沙 410073)

**摘要** 多目标分辨是常规雷达功能的扩充。由于集成广义模糊函数是单、多分量多项式相位信号检测与参数估计的有效工具,将其应用于雷达多目标分辨中是完全可行的,这已被文中对雷达实测数据的分析所证实。为适应雷达实际工作需求,文中探讨了尚待进一步解决的关键问题。

**关键词** 雷达多目标分辨,广义模糊函数,多项式相位信号,检测与参数估计,魏格纳-维尔分布

**分类号** TN957.1+7

## The Application of the Integrated Generalized Ambiguity Function for Radar Multi-Target Resolving

Dai Zhengjian Zou Huanxin Yu Wenxian Hu Weidong

(ATR State Key Lab, NUDT, Changsha, 410073)

**Abstract** It is a functional extension of the conventional radar for the multi-target resolving. IGAF is an effective tool for the detection and parameter estimation of mono or multicomponent polynomial-phase signals. It is proved to be feasible that the application of IGAF for radar multi-resolving by analyzing the radar data. Some key problems which are remained to be further studied are discussed.

**Key words** Radar Multi-Target Resolving, Integrated Generalized Ambiguity Function(IGAF), Polynomial-Phase Signals(PPS), Detection and Parameter Estimation, Wigner-Ville Distribution(WVD)

由于角分辨率有限(尤其是米波雷达),如何有效实现诸如编队飞行飞机的架次识别、真假多目标的分辨,成为不同用途常规窄带相干雷达工作时所经常面临的问题。尽管多目标的距离和方位基本相同,但在一段观测时间内各个目标的运动特性会有所差异,即目标的径向速度、加速度或横向速度会不同,这已为雷达实测数据所分析证实。因此,多目标分辨的实质就是多目标的运动分辨。从高频区电磁散射原理出发,忽略目标间的多次折射和遮挡效应,一般地可将雷达多目标回波信号表示成如下多分量 PPS 信号形式:

$$x(t) = \sum_{k=1}^d A_k e^{j\phi_k(t)} + w(t) \quad (1)$$

其中  $d$  表示多分量信号数,  $A_k$  表示 PPS 信号的幅度, 多项式  $\phi_k(t) = 2\pi \sum_{m=0}^M a_m t^m / m!$  表示 PPS 信号的瞬时相位,它与目标运动特性相对应;  $w(t)$  为高斯白噪声。因此,多目标分辨就集中于如何提取上式中各分量 PPS 信号的相位差异。

由于一般目标机动能力有限,在短的观测积累时间内,目标回波信号可用低次 PPS 信号表示,而由文献[1][2]分析可知 IGAF 在分析二、三次 PPS 信号时具有以下特点:(1)对低输入信噪比的信号具有非常好的检测性能;(2)相位参数的估计精度与输入信噪比和信号长度  $N$  有关,输入信噪比足够高或信号长度足够长时估计方差可以无偏地趋近于克拉美-罗下限;(3)具有非常好的检测和估计多分量信号相位参数的能力。由于 IGAF 用于单、多分量 PPS 信号分析时具有很好的检测和相位参数估计性能,为从实用角度出发处理多目标分辨问题提供了一种有效手段。

\* 国家 863 高技术资助课题  
1999 年 6 月 18 日收稿  
第一作者:戴征坚,男,1968 年生,博士生

## 1 雷达多目标分辨原理

可将雷达多目标分为完全刚性、近似刚性和非刚性三类,分别对应于多目标间的相对位置固定、多目标间速度具有较小的差异、多目标间具有较大的相对运动等三种情况。对于非刚性的多目标,当目标间速度差异较大,且回波信号满足平稳性条件时,可以采用 FFT 等谱估计方法分辨多目标;当目标间加速度差异较大时可采用时-频分析中的解线性调频等方法分辨多目标。由此可见,为适应雷达实际工作环境,应采用更通用的方法分辨非刚性多目标。时-频分析是分析时变信号的有效工具,如将时-频分析用于非刚性多目标分辨时,为有效分辨速度、加速度差异小的目标,需采用高分辨且无交叉项干扰的时-频变换,并需在时-频面上直接判读代表目标的多条时-频曲线。此外,由于时-频变换是在时间和频率上同时表示信号的能量,没有进行信号能量的有效积累,对于弱信号目标,由于输入信噪比太低,故很难有效检测到。由于 IGAF 是多分量 PPS 信号检测的有效工具,且特别适应于低输入信噪比等实际情况,故可以将之用于非刚性多目标的分辨中。

完全刚性多目标的分析方法相对简单,可采用方位维 ISAR 成像原理,利用目标间的横向投影位置不同实现多目标分辨。对于近似刚性多目标,亦主要靠目标间横向投影位置不同实现分辨,这里的多目标间径向速度差异很小,但此差异有时影响多目标同时成像。这时应对目标分别补偿和成像。方位维 ISAR 成像分辨多目标的关键技术是运动补偿,一旦精确补偿后就可以采用常规 ISAR 横向多普勒分辨方法,如 FFT 等实现多目标分辨,亦可采用 MUSIC 等超分辨谱估计法。方位维 ISAR 成像常采用相位拟合法实现运动补偿,即假设目标作匀速直线运动且雷达观测角度很小,这样目标距离可用一个二次多项式来表示:

$$R_0(n\Delta t) = an^2\Delta t^2 + bn\Delta t + c \quad (2)$$

由于  $c$  是常数项,可以忽略,这里只要能够从回波中正确估计出参数  $a, b$ , 就可以进行有效的运动补偿。

G. Corsini 给出了一种最佳估计准则,即当下列函数为最大值时,可获得参数  $a$  和  $b$  的最优估计:

$$L(a_0, b_0) = \left| \sum_{n=1}^N S_r(n) \exp[j(a_0 n^2 + b_0 n)] \right| \quad (3)$$

式中  $a_0 = \frac{4\pi}{\lambda_0} a \Delta t^2$ ,  $b_0 = \frac{4\pi b}{\lambda_0} \Delta t$ ,  $S_r(n)$  为雷达回波,可表示为  $S_r(n) = S_r(t) e^{j\phi(t)}$ , 其中  $\phi(t) = \Phi(t) + \Phi(t)$ , 分别对应于目标平动和转动引起的相位变化。一般认为  $\Phi(t)$  的变化较缓慢,而  $\phi(t)$  属快变分量,由目标的转动引起。运动补偿的目的就是要补偿相位分量  $\phi(t)$ 。式(3)实质是解线性调频,文献[6]指出用 IGAF 分析二次 PPS 信号时与解线性调频是等价的,即用 IGAF 亦可以实现与式(3)类似的最优估计。为适应诸如拐弯、机动或较长的观测时间等实际背景,目标距离需用三次多项式近似:

$$R_0(n\Delta t) = an^3\Delta t^3 + bn^2\Delta t^2 + cn\Delta t + d \quad (4)$$

为了最优估计上式参数,需构造与式(3)类似的目标函数,有的文献采用回波相位差分法进行运动补偿,其实质亦是构造全局最优解。这一点与 IGAF 法相同。由文献[1]分析可知,IGAF 不仅可有效估计三次 PPS 信号的相位参数,而且适用于低输入信噪比等实际情况,故运动补偿可建立在 IGAF 基础上。

## 2 IGAF 用于雷达实测数据的分析

由上面理论分析可知,可以采用 IGAF 来实现常规窄带相干雷达的多目标分辨:利用 IGAF 对多分量 PPS 信号的分辨能力,先将回波数据按非刚性多目标进行分辨;如为完全刚性多目标,则可利用 IGAF 估计的信号相位参数,直接进行方位维 ISAR 成像和分辨;如为近似刚性多目标,其处理过程与完全刚性多目标类似;如目标间速度差异影响成像,则需将初步成像后的各个目标分开,再分别补偿和成像,最后合成清晰的多目标一维像。对于近似刚性多目标,如果可以利用较长时间的观测数据,则利用所成的动态一维像将可更好地实现多目标分辨。

为证实上述理论分析的有效性,下面采用 IGAF 对某警戒雷达的实测数据进行分析,目标为两架编队飞行的飞机。这里利用两组数据,分别对应于机动和平稳飞行两种状态,从图 1 可知:机动飞行时由于

目标间速度和加速度存在一定差异,在时-频面上表现为分离的两条时-频曲线,中间部分为交叉项;平稳飞行时目标间速度差异很小,故从图2中无法分辨多目标的存在。图3为用二阶IGAF对机动飞行数据处理结果,两个峰值对应于两目标的存在,由于其中一目标被部分遮挡,故峰值偏小;图4为先用二阶IGAF的相位参数估计值对平稳飞行数据进行运动补偿、再用MUSIC进行超分辨谱估计的结果,从横向距离上可分辨出两个目标。

由此可见,IGAF用于雷达多目标分辨是可行的,尤其是应用于非刚性多目标分辨时,IGAF可以抑制图1中WVD交叉项的影响。当存在两个以上目标时,交叉项与信号项在时-频面上可能是部分重叠的,造成漏检,如采用其它无交叉项的时-频分析方法则往往难以得到高的时-频分辨率,故不利于运动特性差异小的目标间的分辨,而采用IGAF时将更为有效。另外,由于IGAF的相参积累效应,特别有利于弱信号目标的检测。

### 3 结束语

由于IGAF可以有效实现低信噪比下多分量PPS信号的检测和参数估计,将其应用于雷达多目标分辨中是完全可行的。这为从实用角度出发,探讨统一、有效的雷达多目标分辨方法提供了可能。同时应看到,IGAF的优良性能是以增加计算量为代价的,而方位维ISAR对雷达实测数据的运动补偿精度要求很高,因此研究IGAF的高精度、快速实现算法是实用中亟待解决的关键问题。

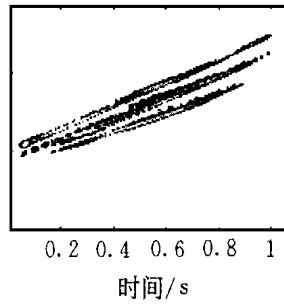


图1 第一组数据的WVD  
Fig.1 WVD of data one

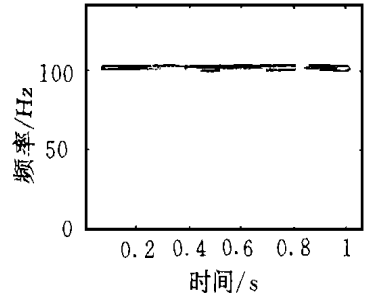


图2 第二组数据的WVD  
Fig.2 WVD of data one

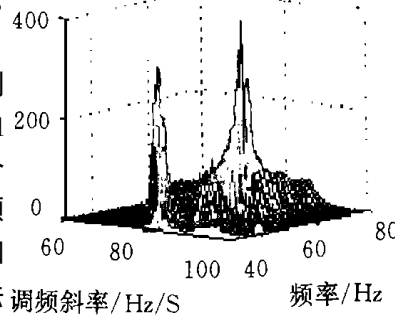


图3 第一组数据的IGAF  
Fig.3 IGAF of data one

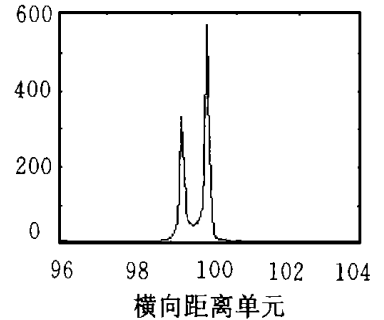


图4 第二组数据运动补偿后的MUSIC  
Fig.4 MUSIC of data two after motion compensation

### 参考文献

- 1 Barbarossa S, Petrone V. Analysis of Polynomia-Phase Signals by the Integrated Generalized Ambiguity Function. IEEE Trans. Signal Processing, 1997, 45: 316 ~ 327.
- 2 李青鹏. 多项式相位信号的分析. 国防科技大学学士学位论文, 1999
- 3 白居易译. 时-频分析: 理论与应用. 西安交通大学出版社, 1998
- 4 Duric P M, Kay S M. Parameter estimation of chirp signals. IEEE Trans. Acoust, Speech, Signal, Processing, 1990, 38: 2118 ~ 2126
- 5 Peleg S, Porat B. Estimation and classification of polynomial phase signal. IEEE T trans. Inform Theory, 1991, 37: 422 ~ 430
- 6 戴征坚等. 强干扰下 LFM 信号的检测与参数估计. 国防科技大学学报, 1999, 3: 52 ~ 57
- 7 杜攀. 飞机目标架次识别方法研究. 国防科技大学硕士学位论文, 1998
- 8 余志舜, 朱兆达. 方位维合成孔径雷达(ISAR)运动补偿成像中的预处理. 航空学报, 1997, 1: 89 ~ 92
- 9 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理. 北京: 国防工业出版社, 1998, 9
- 10 杨军等. 一种 ISAR 多目标实时成像方法. 电子学报, 1995, 4: 1 ~ 5