# 高效的PD雷达多重频模糊分辨算法

段军棋, 何子述, 韩春林

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】在PD雷达中距离和速度模糊不可避免,为解模糊需要发射多重频脉冲串。该文引入一种高效的模糊分辨新算法, 运算简单、计算量小、精度高、易于实时处理。利用该算法在实现模糊分辨的同时能获得好的估计性能。设计实例及数字实 验说明了该方法的正确性和有效性。该算法也可用于欠采样、多基线干涉仪测向或其他类似系统进行频率、方向等参数的模 糊分辨。

关键词 解模糊;多普勒模糊;多重频;PD雷达;距离模糊;速度模糊 中图分类号 TN958.2 文献标识码 A

# **Computationally Efficient Algorithm for Resolving Range and** Velocity Ambiguities in Multiple PRF PD Radars

DUAN Jun-qi, HE Zi-shu, and HAN Chun-lin

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Generally, range and velocity ambiguity existin pulse Doppler (PD) radars Multiple pulse Abstract recurrence frequency (PRF) is needed for resolving ambiguity in the conventional PD radars. This paper provides a technique to resolve the ambiguities with high performance, which is a computationally efficient algorithm and easy to process in a real-time mode. It is able to achieve range and velocity estimates with high precision besides resolving ambiguity by the use of the presented technique. An example and corresponding experimental results show the correctness and validity of the introduced approach. This technique can be also used in sub-Nyquist sampling and interferometer-like with multiple baselines, or others homologous systems to increase their scopes of unambiguous measurements and resolve ambiguities.

Key words ambiguity resolution; Doppler ambiguity; multiple PRF; PD radar; range ambiguity; velocity ambiguity

在PD雷达中,距离或速度模糊不可避免。因此, 要实现真实距离和速度的测量,模糊分辨是必须的。 PD雷达需要发射多重频(通常是2~3个)脉冲串以去 除这种模糊性[1]。文献[2]介绍了多重频模糊分辨技 术, 文献[3-6]对多重频模糊分辨问题利用中国剩余 定理(CRT)或类似算法来实现模糊分辨。CRT法由于 整数要求而使得实际的多普勒频移估计存在较大偏 差。聚类(clustering)算法<sup>[7]</sup>能够适应测量值为小数时 的估计,但需要进行高维穷举搜索,计算量极高, 不适合实时计算。本文介绍了一种高效的模糊分辨 算法,推导出的解析表达式直接实现去模糊。克服 了利用CRT类方法解模糊的整数操作和估计性能差 等问题,同时避免了聚类算法中的海量计算。

本文主要以多普勒频移模糊分辨为例,来介绍

新算法及其应用,该算法同样实用于距离模糊分辨。

#### 常规的PD雷达模糊分辨 1

#### 1.1 PD雷达的模糊问题

设雷达发射载波频率为 f 信号, 由于多普勒效 应,以速度v运动的目标反射回波获得多普勒频移:  $f_{\rm d} = 2vf$ 

$$f/c$$
 (1)

式中 c为电磁波传播速度。PD雷达以某一重频f 发射 N个脉冲,接收机以间隔1/f,对回波进行采样。 当多普勒频移大于f,时,根据采样定理可知多普勒频 率测量存在模糊。这样,实际的多普勒频移可以表 示为:

$$f_{\rm d} = mf_{\rm r} + f_{\rm o} \quad m \in \mathbb{Z} \tag{2}$$

式中 f。为视在多普勒频移。同样地,当1/f,小于

收稿日期: 2006-12-06; 修回日期: 2007-07-12

作者简介:段军棋(1976-),男,博士生,主要从事多学科领域包括宽带信号目标探测理论、电磁信号分析和处理、现代雷达和电子战技术、高精 度测量等方面的研究.

*cR*/2(*R*为目标距离)时,产生距离模糊。一些典型雷达的距离和速度模糊的关系如图1所示,模糊总是难于避免。



#### 1.2 常规的CRT类模糊分辨算法

为了进行模糊分辨,PD雷达通常采用多重频( $f_{r1}$ ,  $f_{r2}$ ,…, $f_{rN}$ )工作方式,选取重频以某一频率单位互素, 对该频率归整化处理,无模糊多普勒频率范围为其 最小公倍数 $F_u$ =lcm( $f_{r1}$ ,  $f_{r2}$ ,…,  $f_{rN}$ ) =[] $f_{ri}$ , i=1,2,…, $N_o$ 当被探测目标以速度 v 运动时,对应的实际多普勒 频移为 $f_d$ ,在不同重频对应的视在多普勒频率分别为  $f_{o1}$ , $f_{o2}$ ,…, $f_{oN}$ ,则应有:

$$f_{d} = N_{1}f_{r1} + f_{o1} = N_{2}f_{r2} + f_{o2} = \cdots = N_{N}f_{r2} + f_{oN} = 2\nu f / c N_{i} \in \mathbb{N}$$
(3)

写成同余方程组形式为:

$$f_{d} \equiv f_{oi} \pmod{f_{ti}} \qquad i = 1, 2, \cdots, N \tag{4}$$

如果 $f_d > \max(f_{r1}, f_{r2}, \dots, f_{rN})$ , 各个重频上多普勒 频移都存在模糊。利用 $CRT^{[8]}$ 算法能够得到 $f_d$ 为:

$$f_{d} = \left(\sum_{i=1}^{N} f_{i}F_{i}c_{i}\right) (\text{mod} F_{u})$$
(5)

式中 *F<sub>i</sub>*= *F<sub>u</sub>* / *f<sub>i</sub>*; *F<sub>i</sub>c<sub>i</sub>* = 1(mod *F<sub>u</sub>*)。利用 CRT 算法 除了计算较复杂外,这种基于同余方程和最小公倍 数原理的处理方法是以所有变量都是整数为前提 的。在雷达系统中,实际多普勒频移为整数的概率 为零,频率和其他参数都可能不是整数。这样,由 于多普勒处理的特殊性,各个重频上的多普勒分辨 力不同,使得实际的处理变得困难,精度难于控制。 同样地 CRT 算法也可用于对距离模糊进行分辨,较 多普勒模糊易于处理<sup>[6]</sup>,但性能还是不高。

## 2 高效多重频模糊分辨算法

为简单起见,下面的讨论假设点目标多普勒频 移为正。当速度方向不确定时,最大无模糊速度减 半,本文以双重频为例进行分析。设雷达重频为发 射两个靠近的重频*f*<sub>rl</sub>,*f*<sub>r</sub>2(Δ*f*<sub>r</sub> = *f*<sub>r</sub>2-*f*<sub>rl</sub> <<*f*<sub>rl</sub>2)。对一 个速度为v的运动目标,多普勒频移表示为:

$$f_{\rm d} = mf_{\rm r1} + f_{\rm o1} = nf_{\rm r2} + f_{\rm o2} \tag{6}$$

式中 m, n为整数, 且 $m \ge n$ ;  $f_{oi}$ 为在重频 $f_{ti}$ 上的视在多普勒频率, 即混叠后的表现频率。令:

$$\Delta f_{do} = \begin{cases} f_{o1} - f_{o2} & f_{o1} \ge f_{o2} \\ f_{o1} + f_{r1} - f_{o2} & \ddagger \& \end{cases}$$
(7)

如果满足条件:

这样,当 $f_{o1} \ge f_{o2}$ 时,有m=n;当 $f_{o1} \le f_{o2}$ 时,有m=n+1。 根据视在多普勒频差产生的机理,易知 $\Delta f_{do} = n\Delta f_{r}(n)$ 为整数)。在工程中,由于视在多普勒频移存在测量 误差,使得 $\Delta f_{do}$ 的计算值不为 $\Delta f_{r}$ 的整倍数。这样,容 易得到n的估计准则为:

 $n\Delta f_{\rm r} \leq f_{\rm r1}$ 

$$\hat{n} = \arg\min_{n \in \mathbb{Z}} \left| n - \frac{\Delta f_{do}}{\Delta f_{r}} \right|$$
(9)

也即是取距离最近的整数。由式(5)可知,减小Δf<sub>r</sub>或 增加f<sub>r</sub>1均可增加无模糊测量范围,选择合适的参数 能够获得需要的参数测量范围。得到n的估计后再由 式(6)可以直接计算目标速度。为了充分利用双重频 测量结果,改善测量精度,可以对由m,n(m可以由n 和多普勒条件导出)得到的多普勒频移进行统计平 均,能够使估计方差减半。

上面的讨论假设了目标速度为正。当速度方向 未知时,可分辨最大速度减半。距离模糊分辨与速 度分辨类似,减小Δf<sub>r</sub>的值同样使最大无模糊测量距 离增加,这与速度测量范围的增加方向一致。对于3 个或以上重频的情况,与双重频类似。由于可获得 更多的测量数据,利用数据估计算法比如最小二乘 算法能够获得更高的估计精度。

# 3 数字实验及分析

实验的PD雷达具有如下主要工作参数:

载频f=10 GHz; 相干处理脉冲数N=128; 重频 f<sub>r1</sub>=13 kHz, f<sub>r2</sub>=14 kHz。

根据第2节描述的方法,最大无模糊速度 $V_u$ 扩展 到2 730 m/s,最大无模糊距离 $R_u$ 扩展到150 km。距 离门宽度设为1 $\mu$ s,每个距离门内数据采用FFT快速 算法进行脉冲积累,根据频谱峰值直接估计频率。 在距离门对齐后,用FFT快速算法,分别得到视在 距离门数 $R_1$ =28, $R_2$ =44,视在多普勒频移 $f_{o1}$ =13 kHz× 118/128; $f_{o2}$ =14 kHz×73/128。由上述方法可得,距 离r=121.95 km,速度v=959.8 m/s。目标的估计参数 接近目标的真实值:距离122 km,速度960 m/s。在 此工作条件下,使用本文方法和CRT法折算的结果 进行分析,距离性能和速度性能对比分别如表1和表 2所示。

表1 时间测量误差对距离估计的影响

R <sub>i</sub> (i=1, 2)测量误差/µs	CRT法平均偏差/km	本文方法平均偏差/km
1	1.3	0.075
2	-	0.150

表2 频率误差测量对速度估计的影响

fol测量误差	fo2测量误差	CRT法平均偏差	本文方法平均偏差
/Hz	/Hz	$/m \cdot s^{-1}$	$/m \cdot s^{-1}$
101	109	78	0.9
203	219	-	1.7

从表1、表2可以看出,采用本文方法进行距离 估计的精度高于单重频距离无模糊时的测量结果; 速度估计也具有良好的性能,均远远高于CRT法。

# 4 结论和评述

本文介绍了一种多重频距离速度模糊分辨算法 和高效的距离速度估计方法。通过推导,得到了模 糊分辨和估计的解析表达式,避免了聚类算法中的 穷举搜索和传统的CRT类方法的整数操作条件,能 够用于距离和速度的高精度无模糊估计。该方法也 可用于欠采样、干涉仪测向或其他类似系统中进行 模糊分辨。

### 参考文献

- SKILLMAN W A, MOONEY D H. Multiple high PRF ranging[C]//Proc 5th National Conference on Military Electronics. WA: IRE, 1960.
- [2] SKOLNIK M I. Radar handbook[M]. 2nd ed. MA: Artech House, 1990.
- [3] HOVANESSIAN A S. Medium PRF performance analysis[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1982, 18(3): 286-296.
- [4] CHANG C, CURLANDER J. Application of the multiple PRF technique to resolve Doppler centroid estimation ambiguity for spaceborne SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(5): 941-949.
- [5] 黄振兴,万征.距离-速度噪扰数据同时分辨的孙子定 理算法[J].电子学报,1992, 20(9): 27-33.
  HUANG Zhen-xing, WAN Zheng. Simultaneous ambiguity resolution on noisy range and velocity data via CRT algorithm[J]. ACTA Electronica Sinica, 1992, 20(9): 27-33.
- [6] 周 闰, 高梅国, 戴擎宇, 等. 余差查表法解单目标距离 模糊的分析和仿真[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(5): 30-31.
  ZHOU Run, GAO Mei-guo, DAI Qing-yu, et al. Analysis and simulation for ambiguity resolving using residues' difference look-up table[J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(5): 30-31.
- [7] TRUNK G, BROCKETT S. Range and velocity ambiguity resolution[C]//Proc IEEE National Radar Conference. MA: IEEE, 1993.
- [8] 潘承洞, 潘承彪. 初等数论[M]. 北京: 北京大学出版社, 1992.

PAN Cheng-dong, PAN Cheng-biao. Fundamentals of numeric theory[M]. Beijing: Peking University Publishing House, 1992.

编辑税红

\_\_\_\_\_

・科技成果介绍・

#### 微波测碳仪

SCD-III型微波测碳仪是一种新型的发电厂燃煤锅炉飞灰含碳量测试仪表。与电厂现有的氧量表和中烟 温测度系统配合,可以构成一套实时、连续检测锅炉燃烧效率的系统。为提高锅炉的经济运行水平,减少 燃煤的环境污染提供了一套有效的测量仪器。与国内外同类系统比较,该测碳仪具有系统工作稳定可靠, 测量回路无堵现象,测试系统具有智能化操作等优点。

主要技术指标:

- (1) 含碳量测量范围: 0.5%~15%(重量比);
- (2) 测量精度: ±2.5%;
- (3) 分辨率: 0.1%;
- (4) 工作温度: -40℃~+50℃;
- (5) 模拟输出: 4~22 mA(含碳量成线形);
- (6) 数字输出: R<sub>s</sub>~422;
- (7) 电源: 220 V±10%, 50 Hz60 VA,AC;
- (8) 机箱体积: 560 mm×350 mm×630 mm;
- (9) 重量: 40 kg。