

## 基于双采样速率的动目标检测技术研究

龙 宁 张凤荔 虞厥邦  
(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**摘 要:** 高精度动目标检测是雷达数字接收机的一项核心技术, 现有的多普勒频移估计方法不能满足现代数字接收机的高精度、低计算量、超低信噪比环境等要求。该文提出了一种低信噪比环境下的基于双采样速率的高精度动目标检测技术, 它包括基于 FFT 的欠采样信号频率无模糊估计, 高精度多普勒频移估计和基于双采样速率的动目标径向速度估计等算法。

**关键词:** 欠采样, 无模糊频率估计, 多普勒频移估计, 双采样速率, 动目标检测

**中图分类号:** TN953 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)02-0332-02

## A Study on Moving Target Detection Technique Based on Double Sample Rate

Long Ning Zhang Feng-li Yu Jue-bang

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

**Abstract** High accuracy moving target detection is a key technique in the digital radar receiver. The Doppler frequency estimation methods which have been presented can not satisfy the performances of modern digital receivers such as high estimation accuracy, less computation, super low SNR circumstance, etc. In this paper, a high accuracy detection technique of moving target based on double sample rate in low SNR circumstance is proposed, and it includes three main techniques, i.e. unambiguous frequency estimation of sub-sampling signal based on FFT, high accuracy Doppler frequency estimation and radial rate estimation of moving target based on double sample rate.

**Key words** Sub-sampling, Unambiguous frequency estimation, Doppler frequency estimation, Double sample rate, Moving target detection

### 1 引言

在雷达系统、电子对抗中, 时延、多普勒频移和 DOA 估计是雷达信号处理中的核心技术; 在动目标显示雷达中, 需要检测动目标反射信号的多普勒频移, 多普勒频移的估计精度直接影响整个系统的性能。基于非合作性照射源的无源雷达由于具有反电子侦察与电子干扰、反隐身、反反辐射导弹等优点, 具有广阔的应用前景, 而低信噪比环境下的弱信号检测和提取技术特别是多普勒频移估计是此类系统的关键技术之一。低信噪比环境下的高精度频率估计和多普勒频移估计始终是信号处理研究中的热点和难点之一。在通常的系统中可用模糊函数进行时延、多普勒频移联合估计, 但这种联合估计需要进行二维搜索, 计算量很大; 传统的瞬时测频接收机采用的模拟测频法已不能满足现代雷达数字接收机的低信噪比环境、小型化、高精度、低计算量等要求, 超大规模集成电路的迅猛发展使数字测频算法将成为今后的一个主要研究和应用方向。

现有的数字测频法主要有 FFT 测频法、相位测频法、瞬

时自相关法、过零检测法、KAY 测频法等<sup>[1-4]</sup>。相位测频法、瞬时自相关法和过零检测法属于时域算法, 当信噪比很高时, 对于单频正弦信号, 它们的测频精度远远高于 FFT 测频法, 但它们都不能直接测量同时存在的多个信号<sup>[4]</sup>。1989 年由 Kay 提出的 KAY 测频法是频率估计的一个经典算法, 当信噪比很高时, 对于单频正弦信号, 其频率估计子达到了 Cramer-Rao 门限; 但当信噪比低于 6 dB 时, 其测频精度将显著减低<sup>[1]</sup>。与上述几种方法相比, FFT 能够对单频信号、窄带信号和宽带信号进行测频, 但其频率估计精度更低; 由于在频域测频, 因此它对噪声的抑制能力很强, 当样本数足够大时, 能够对信噪比为 -20 dB 甚至更低信噪比的信号精确测频。因此, 对于低信噪比环境下的频率估计和多普勒频移估计而言, FFT 测频法仍不失为一种有效算法。

用 FFT 直接对信号进行测频可以得到多普勒频移, 但由于 FFT 的测频误差  $\Delta f = [1/(2N)]f_s$ ,  $N$  是样本数,  $f_s$  是采样频率, 当  $f_s$  很大时, 测频误差将很大, 也不便于实时处理。本文提出了一种低信噪比环境下的高精度动目标检测技术, 其速度估计误差, 计算量, 超低信噪比环境等指标均远远优

于现有方法。文中首先研究了一种基于 FFT 的欠采样宽带信号频率无模糊估计算法; 然后在此基础上提出了一种高精度多普勒频移估计算法; 进而提出了一种基于双采样速率的动目标径向速度估计方法。

## 2 基于 FFT 的欠采样信号频率无模糊估计

设待测频信号  $x(t)$  分布在某一有限的频带  $(f_L, f_H)$  上, 其带宽为  $B = f_H - f_L$ 。根据 Nyquist 采样定理, 采样频率应满足  $f_s \geq 2f_H$ , 但当  $f_H$  很高时, 对硬件的要求很高, 也不易进行实时处理。根据带通采样定理<sup>[5]</sup>, 当  $f_s = 2(f_L + f_H)/(2n+1) = 4f_c/(2n+1)$ ,  $f_c = (f_H + f_L)/2$  为信号中心频率,  $n$  取能满足  $f_s \geq 2B$  的非负整数, 则用  $f_s$  对  $x(t)$  进行等间隔采样所得的  $x(nT_s)$  能准确地恢复出原信号  $x(t)$ 。故采用基于 FFT 的欠采样信号直接测频技术是一种减少计算量的有效方案。设  $x(t)$  的中心频率为  $f_c$ , 采样频率为  $f_s$ , 且  $2B \leq f_s < 2f_c$ , 则有

$$f_m = f_c \pmod{f_s} \quad (1)$$

其中  $f_m$  是利用  $f_s$  测得的信号频率, Mod 是取模算子。信号真实频率为

$$f_e = nf_s + f_m \quad (2)$$

式中  $n$  为整数且未知。这就是说, 用欠采样得到的信号频率存在模糊问题。

设  $x(t) \leftrightarrow X_1(f) = X(f)$ ,  $x(t-\tau) \leftrightarrow X_2(f) = X(f) \cdot e^{-j2\pi f_c \tau}$ ,  $X(f)$  为  $x(t)$  的傅氏变换, 因为  $X_1(f)X_2^*(f) = |X(f)|^2 e^{j2\pi f_c \tau}$ , 所以

$$f_c = [1/(2\pi\tau)\text{angle}[X_1(f)X_2^*(f)]] \quad (3)$$

式中  $\text{angle}(\cdot)$  是取相位算子。为了不产生相位模糊, 应有  $2\pi f_{\max} \tau \leq 2\pi$ , 即  $\tau \leq 1/f_{\max} = T_{\max}$ ,  $f_{\max}$  为待测信号的最高频率。所以, 信号  $x(t)$  的精确估计频率为

$$f_e = f_s \cdot \text{INT}(f_c/f_s) + f_m \quad (4)$$

式中  $\text{INT}(\cdot)$  为取整算子。理论上, 只要  $f_s$  满足  $2B \leq f_s < 2f_c$ , 利用式(4)得到的信号频率就不会存在模糊问题。但由于存在量化误差、计算精度等问题, 在实际应用中, 通常当  $f_s \ll f_c$  时, 仍会存在频率模糊问题。

## 3 多普勒频移估计

设接收到的直达信号为  $x_d(t)$ , 其中心频率为  $f_c$ ; 动目标反射信号为  $x_r(t)$ , 其中心频率为  $f_c' = f_c + f_d$ ,  $f_d$  是  $x_d(t)$  的多普勒频移。假设  $f_s$  满足带通采样定理的条件, 测得的  $f_c = f_1$ ,  $f_c' = f_2$ , 且存在频率模糊, 即  $f_1 = mf_s + f_{m_1} + \Delta f_1$ ,  $f_2 = nf_s + f_{m_2} + \Delta f_2$ ,  $m, n$  为整数且未知。其中, (1)  $\Delta f_1, \Delta f_2$  是由于 FFT 测频引起的绝对误差,  $\Delta f_1 \leq (1/2N)f_s$ ,  $\Delta f_2 \leq (1/2N)f_s$ ,  $N$  是样本数。(2)  $f_{m_1}, f_{m_2}$  是由采样频率为  $f_s$  时测得的信号频率, 所以  $f_1 - f_2 = (m-n)f_s + (f_{m_1} - f_{m_2}) + (\Delta f_1 - \Delta f_2)$ , 因为  $|f_{m_1} - f_{m_2}| = f_d$ ,  $|\Delta f_1 - \Delta f_2| \leq \frac{1}{N}f_s$ ,  $f_d < f_s$ , 所以

$$|f_1 - f_2| \pmod{f_s} = |\Delta f_1 - \Delta f_2| + f_d \leq f_d + \frac{1}{N}f_s \quad (5)$$

利用式(5)可以精确测得多普勒频移  $f_d$ , 其绝对误差  $\Delta f_d = (1/N)f_s$ ,  $N = Tf_s$ ,  $T$  为信号时宽, 即  $\Delta f_d = 1/T(\text{Hz})$ 。

## 4 基于双采样速率的动目标径向速度估计

根据雷达原理知,  $f_d = (2f_c/c)v_r$ ,  $f_c$  为信号载频,  $c$  为光速,  $v_r$  是动目标的径向速度。设待测频信号  $x(t)$  是窄带信号, 由于 FFT 测频误差  $\Delta f = (1/2N)f_s$ , 据前所述, 当  $f_s$  满足  $2B \leq f_s < 2f_c$  时, 若  $f_s$  取得很小, 则多普勒频移  $f_d$  的绝对误差  $\Delta f_d$  将较小, 但可能存在频率  $f_c$  的模糊; 反之, 若  $f_s$  取得较大, 则多普勒频移  $f_d$  的绝对误差  $\Delta f_d$  将较大, 但不存在频率  $f_c$  的模糊。为了精确地估计动目标的径向速度, 可以采用两种不同的采样速率进行精确测频。若  $x(t)$  的带宽  $B = 20\text{kHz}$ ,  $f_c = 107.5125\text{MHz}$ , 取  $f_{s1} = 10\text{MHz}$ ,  $f_{s2} = 50\text{kHz}$ , 两种采样速率下的样本数  $N$  均为  $5 \times 10^4$ , 此时对于  $f_{s2}$  的采样信号时宽为  $1\text{s}$ 。根据带通采样定理知, 无模糊的信号载频误差  $\Delta f_c \approx (1/2N)f_{s1} = 10\text{kHz}$ , 相对误差约为  $0.01\%$ ; 多普勒频移  $f_d$  的误差  $\Delta f_d = (1/N)f_{s2} = 1\text{Hz}$ , 所以测速误差  $\Delta v_r = (\Delta f_d/2f_c) \cdot c = 1.5\text{m/s}$ 。

## 5 结束语

低信噪比环境下的高精度动目标检测是雷达数字接收机的一项核心技术, 文中提出的基于 FFT 的欠采样信号频率无模糊估计算法、高精度多普勒频移估计算法和基于双采样速率的动目标径向速度估计方法为高性能雷达数字接收机的实现提供了一种新思路。

## 参考文献

- [1] Steven Kay. A fast and accurate signal frequency estimation. *IEEE Trans. on ASSP*, 1989, ASSP-37(12): 1987-1990.
- [2] Zoltowski M D, Mathews C P. Real-time frequency and 2-D angle estimation with sub-Nyquist spatio-temporal sampling. *IEEE Trans. on SP*, 1994, SP-42(10): 2781-2794.
- [3] Tufts D W, Ge H Y. Digital estimation of frequencies of sinusoids from wide-band under-sampled data. IC ASSP-95, South Australia, 1995: 3155-3158.
- [4] James Tsui 著, 杨小牛, 陆安南, 等译. 宽带数字接收机. 北京: 电子工业出版社, 2002: 219-240.
- [5] 杨小牛, 楼才义, 等. 软件无线电原理与应用. 北京: 电子工业出版社, 2001: 8-21.

龙宁: 男, 1978年生, 硕士生, 主要研究方向: 信号检测与估计、雷达信号处理、神经网络、模糊数学、模式识别等。  
张凤荔: 女, 1963年生, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 信息安全、3S(GPS/GIS/RS)系统、数据库技术等。  
虞厥邦: 男, 1932年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 信号处理、神经网络、非线性动力学、计算智能、EDA技术、分数阶微分等。