

## 双载频步进频率雷达精确速度测量方法

曹宇飞 屈晓光 黄培康

(中国航天科工集团第二研究院 23 所 北京 100854)

**摘要:** 步进频率雷达中, 目标的径向运动将导致合成的目标径向一维距离像产生距离徙动和波形失真, 需要对目标速度进行测量以补偿其影响。该文提出基于单个步进频率脉冲串的共轭法速度测量方法, 然后提出一种同时发射双载频步进频率信号的速度测量方法, 并分析了其潜在测量精度。理论分析和仿真结果证明, 两种方法相结合不仅具有普通步进频率信号的高距离分辨率等优点, 而且具有速度测量无模糊测量范围大、测量精度高的特点, 可以利用速度测量值补偿目标一维距离像的距离移动和失真, 从而同时实现高速目标的速度精确测量和高分辨成像。

**关键词:** 雷达; 步进频率; 共轭法; 双载频; 高精度速度测量

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)05-1113-04

## Precise Velocity Measurement Approach in Dual-Carrier-Frequency Stepped-Frequency Radar

Cao Yu-fei Qu Xiao-guang Huang Pei-kang

(No.23 Inst. of the Second Research Academy, China Aerospace Science and Industry Corp., Beijing 100854, China)

**Abstract:** In stepped frequency radar, the velocity of targets must be estimated and compensated to eliminate the range migration and distortion due to target moving. The conjugation method is presented for velocity measurement in stepped frequency radar. And a prototype of a stepped frequency system with dual carrier frequencies is proposed. With processing approach proposed, the system has both the advantage of high range resolution of stepped frequency radar and the capability of high precise velocity measurement. The estimated velocity can be used to compensate range migration and distortion in radar imaging. Therefore, the dual-carrier-frequency stepped-frequency radar can achieve high precise velocity measurement and high resolution simultaneously.

**Key words:** Radar; Stepped frequency; Conjugation method; Dual carrier frequency; Precise velocity measurement

### 1 引言

步进频率信号因有较窄的瞬时带宽, 易于工程实现, 是一种实用的距离高分辨信号形式<sup>[1]</sup>。利用步进频率信号实现精确速度测量功能, 将有利于跟踪滤波<sup>[2]</sup>和成像补偿<sup>[3]</sup>等。针对步进频率雷达的目标运动参数估计, 国内外有关学者已经做了大量研究。频域互相关法<sup>[4]</sup>精度较高、运算量小, 但是速度估计的无模糊范围非常小; 最小脉组误差法<sup>[5]</sup>及最小脉组相位差分法<sup>[6]</sup>, 需要预先确定目标的速度范围, 如果速度范围过大, 则速度模板数过多, 计算量会非常大; 文献[7]利用正负调频目标距离像偏移信息估计速度, 但估计精度受距离分辨率限制, 精度不高; 文献[8]提出脉冲串载频步进的方法, 通过对每个载频上发射的脉冲串回波进行处理得到目标的速度信息, 再综合不同载频的回波信息得到目标的高分辨距离像, 但实现复杂, 数据率低; 文献[9]中用发射正负调频组合信号的方法解决了测速精度和速度模糊的问题, 实现较复杂, 数据率低。

本文根据步进频率信号的特点, 首先提出基于单个步进

频率脉冲串的共轭法速度测量原理, 然后提出一种同时发射双载频步进频率信号的系统, 并给出了其速度测量方法, 两种方法相结合, 实现高速目标的速度无模糊精确测量, 同时保留了普通步进频率信号的距离高分辨率等优点。

### 2 步进频率雷达共轭法速度测量原理

步进频率信号是一组载频按固定步长递增的脉冲序列, 其数学表达式可写为

$$s_i(t) = \sum_{i=0}^{N-1} a(t - iT_r) \exp[j2\pi(f_0 + i\Delta f)t] \quad (1)$$

其中  $T_r$  是脉冲重复周期,  $\Delta f$  是频率步进间隔,  $f_0$  是载频,  $N$  为步进脉冲个数,  $a(t)$  为单个脉冲的复包络, 本文取矩形脉冲。

步进频率体制下, 归一化的理想散射点回波数学表达式为

$$s_r(t) = s\left(t - \frac{2R(t)}{C}\right) = \sum_{i=0}^{N-1} \left\{ a\left(t - iT_r - \frac{2R(t)}{C}\right) \cdot \exp\left[j2\pi(f_0 + i\Delta f)\left(t - \frac{2R(t)}{C}\right)\right] \right\} \quad (2)$$

其中  $R(t)$  表示目标的瞬时距离, 对目标进行跟踪时, 对每个脉冲的回波信号用对应载频混频, 并在  $(2R_0/C) + iT_r$  处采样,  $R_0$  为第 1 个脉冲传播到目标时刻目标的距离, 目标匀速运动时, 有目标瞬时距离如式(3), 归一化后的采样信号如式(4)。

$$R(i) \approx R_0 + \dot{R}iT_r \quad (3)$$

$$s_r'(i) = a \left[ -\frac{2\dot{R}iT_r}{C} \right] \exp \left[ -j \frac{4\pi}{C} (f_0 + i\Delta f) (R_0 + \dot{R}iT_r) \right], \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

在步进调频体制下, 对每个脉冲来说, 回波都可以按照窄带模型处理。如果目标在脉冲串内的移动不超过半个分辨单元, 忽略脉冲间目标回波信号的幅度起伏, 则可认为采样点幅度不变, 采样后的信号可写为

$$s_r''(i) = \exp \left[ -j \frac{4\pi}{C} (f_0 + i\Delta f) (R_0 + \dot{R}iT_r) \right], \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

由式(5)中得到的  $N$  个采样数据, 构造另一个信号

$$s_1(i) = \begin{cases} s_r''(i + N/2), & 0 \leq i \leq N/2 - 1 \\ 0, & N/2 \leq i \leq N-1 \end{cases} \quad (6)$$

将  $s_1(i)$  共轭后与  $s_r''(i)$  相乘

$$s_2(i) = s_r''(i) \times s_1^*(i) = s_r''(i) \times [s_r''(i + N/2)]^* \\ = \begin{cases} \exp \left\{ j \frac{4\pi}{C} \left[ \dot{R}N\Delta f T_r i + \frac{R_0 N \Delta f}{2} + \frac{\dot{R}N f_0 T_r}{2} + \frac{\dot{R}N^2 \Delta f T_r}{4} \right] \right\}, & 0 \leq i \leq N/2 - 1 \\ 0, & N/2 \leq i \leq N-1 \end{cases} \quad (7)$$

对  $s_2(i)$  进行傅里叶变换, 其频谱幅度在  $f = 2N\Delta f \dot{R}/C$  处取得最大, 据此即可得出目标的速度信息, 目标径向速度的理论分辨率和速度不模糊范围分别为

$$\delta \dot{R} = \frac{C}{N^2 \Delta f T_r} \quad (8)$$

$$|\dot{R}| \leq \dot{R}_{um} = \frac{C}{4N\Delta f T_r} \quad (9)$$

### 3 双载频步进频率雷达速度测量原理

基于步进频率雷达的特点, 本文提出一种双载频步进频率雷达的精确速度测量方法, 其基础原理和普通步进频率雷达相似, 不同之处在于发射机同时发射两个频率步进间隔  $\Delta f$  相同、载频不同、步进方向不同的步进频率脉冲串, 发射脉冲示意图如图 1 所示。接收时, 利用回波信号载频不同, 在接收机端分离。

发射信号的数学表达式为

$$s_{i1}(t) = \sum_{i=0}^{N-1} a(t - iT_r) \exp[j2\pi(f_1 + i\Delta f)t] \quad (10)$$

$$s_{i2}(t) = \sum_{i=0}^{N-1} a(t - iT_r) \exp\{j2\pi[f_2 + (N-1-i)\Delta f]t\} \quad (11)$$

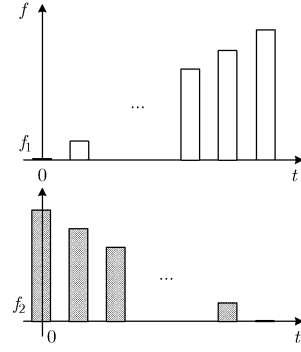


图 1 双载频步进频率雷达发射脉冲

其中  $f_1, f_2$  分别是两个发射信号的参考载频, 其他符号意义同式(1)。

因两个载频不同的目标回波可以在接收机处分离, 所以对每个载频的信号, 目标回波的形式、特点和处理方法都完全与普通频率步进雷达信号相同。对载频为  $f_1$  和  $f_2$  的发射信号, 理想点目标回波信号的归一化采样值分别为

$$s_{r1}(i) = \exp \left[ -j \frac{4\pi}{C} (f_1 + i\Delta f) (R_0 + \dot{R}iT_r) \right], \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (12)$$

$$s_{r2}(i) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{C} [f_2 + (N-1-i)\Delta f] (R_0 + \dot{R}iT_r) \right\}, \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (13)$$

把上述得到的两个目标回波信号采样值对应相乘, 得

$$s(i) = s_{r1}(i) s_{r2}(i) \\ = \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{C} [f_1 + f_2 + (N-1)\Delta f] \dot{R}iT_r \right\} \exp(j\phi_0), \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (14)$$

$$\phi_0 = -\frac{4\pi [f_1 + f_2 + (N-1)\Delta f] R_0}{C} \quad (15)$$

式(14)中  $\phi_0$  为常数相位项, 不影响  $s(i)$  的幅度谱,  $s(i)$  的频谱幅度最大值出现在  $f = -2[f_1 + f_2 + (N-1)\Delta f] \dot{R}/C$  处, 目标径向速度的理论分辨率和最大不模糊速度分别为

$$\delta \dot{R} = \frac{C}{2[f_1 + f_2 + (N-1)\Delta f] NT_r} \quad (16)$$

$$|\dot{R}| \leq \dot{R}'_{um} = \frac{C}{4[f_1 + f_2 + (N-1)\Delta f] T_r} \quad (17)$$

### 4 潜在测量精度分析

在实际系统中, 式(13)和式(14)都含有噪声, 形式如下

$$s'_{r1}(i) = s_{r1}(i) + n_1(i) \quad (18)$$

$$s'_{r2}(i) = s_{r2}(i) + n_2(i) \quad (19)$$

设信号  $s_{r1}(i)$  和  $s_{r2}(i)$  幅度均为  $A_0$ ,  $n_1(i), n_2(i)$  是相互独立且均值为 0 方差为  $\sigma_0^2$  的复高斯噪声。按照式(14)方法得到的组合信号为

$$s'(i) = s'_{r1}(i) s'_{r2}(i) = s_{r1}(i) s_{r2}(i) + s_{r1}(i) n_2(i) \\ + n_1(i) s_{r2}(i) + n_1(i) n_2(i) \quad (20)$$

$$n'(i) = s_{r1}(i) n_2(i) + n_1(i) s_{r2}(i) + n_1(i) n_2(i) \quad (21)$$

组合信号  $s'(i)$  中信号幅度等效为  $|s_{r1}(i)s_{r2}(i)| = A_0^2$ ,  $n'(i)$  可等效为一种噪声, 在信噪比较大时,  $n'(i)$  的方差近似为

$$\sigma_{n'}^2 = E\{n'(i)[n'(i)]^*\} \approx 2A_0^2\sigma_0^2 \quad (22)$$

根据文献[10,11], 对于信号  $x(k) = Ae^{j(\omega k + \theta)} + n(k)$ , 其中  $A$  表示信号的幅度,  $\omega$  为信号的频率,  $n(k)$  是均值为零方差为  $\sigma_n^2$  的复高斯白噪声, 其频率估计误差的 Cramer-Rao 界为

$$\sigma_{\omega}^2 = \frac{6\sigma_n^2}{N(N^2 - 1)A^2} \quad (23)$$

所以结合式(7), 有共轭法目标速度估计精度的 Cramer-Rao 界为

$$\sigma_{\hat{R}} \approx \frac{\sqrt{6}C\sigma_0}{\pi A_0 N \Delta f T_r \sqrt{N(N^2 - 4)}} \quad (24)$$

同理结合式(14), 目标速度的最终估计精度的 Cramer-Rao 界为

$$\sigma_{\hat{R}} \approx \frac{\sqrt{3}C\sigma_0}{2\pi A_0 [f_1 + f_2 + (N - 1)\Delta f] T_r \sqrt{N(N^2 - 1)}} \quad (25)$$

所以速度的潜在测量精度与信噪比、脉冲串总持续时间、载频和带宽均有关。

### 5 仿真验证

设雷达参数为  $f_1 = 10\text{GHz}$ ,  $f_2 = 11\text{GHz}$ ,  $\Delta f = 1\text{MHz}$ ,  $N = 256$ ,  $T_r = 25\mu\text{s}$ , 由式(17)知双频法测量的最大不模糊速度  $\dot{R}'_{um} = 141.14\text{m/s}$ , 容易发生速度模糊。根据式(9), 对载频  $f_1$  和  $f_2$  的步进脉冲串回波用共轭法测速时的最大不模糊速度均为  $\dot{R}_{um} = 11.72\text{km/s}$ , 完全可以满足常规测量要求。

分别对载频  $f_1$  和  $f_2$  的步进频率脉冲串回波用共轭法进行速度测量仿真, 设目标速度在  $-10\text{km/s} \sim 10\text{km/s}$  之间随机分布, 每个信噪比下进行 1000 次的蒙特卡罗仿真, 载频  $f_1$  和  $f_2$  的速度测量误差标准差和信噪比的关系分布如图 1 双载频步进频率雷达发射脉冲。

图 2 所示, 由图可见当信噪比增大时, 速度估计误差逐渐接近潜在精度, 而且当信噪比大于 0dB 后, 两个载频的共轭法速度测量误差均小于 11m/s, 此误差完全满足式(17)的不模糊速度要求。

所以, 一种可行的双载频步进频率雷达测速的流程为: 先用共轭法对两个不同载频的回波中的一个或两个进行处理, 粗略估计目标的速度范围, 然后综合双载频回波进行处理得到目标速度的精确值。

设目标速度为  $10\text{km/s}$ , 雷达参数不变, 按照上述测速流程, 在每个信噪比下进行 1000 次蒙特卡罗仿真, 可得到速度测量误差标准差随信噪比的变化如图 3, 图中结果显示当信噪比增大时, 速度估计误差逐渐接近潜在精度, 当信噪比大于 0dB 后, 速度测量精度小于  $0.05\text{m/s}$ , 精度非常高。

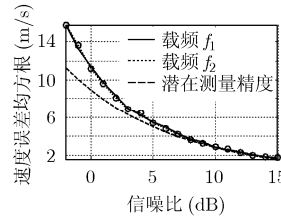


图 2 共轭法速度测量误差

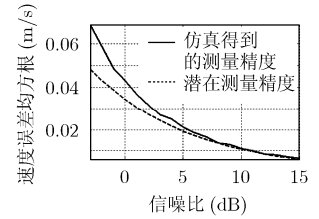


图 3 速度测量误差均方根值随信噪比的变化

### 6 结束语

理论分析和仿真结果都证明, 本文提出的基于单个步进频率脉冲串的共轭法速度测量方法无模糊范围大, 双载频步进频率速度测量方法精度高, 两者结合使本文速度测量方法有模糊范围大和测速精度高的优点; 因为本方法保留了步进频率雷达距离高分辨率的特性, 所以可以利用测得的精确速度值补偿速度引起的目标一维距离像的距离移动和失真, 从而同时实现目标速度的精确测量和高分辨成像。

### 参考文献

- [1] Wehner D R. High Resolution Radar, Second Edition [M], London: Artech House, 1995, Chapter 5.
- [2] 王建国, 何佩琨, 龙腾. 径向速度测量在 Kalman 滤波中的应用[J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(2): 225-227.  
Wang Jian-guo, He Pei-kun, and Long Teng. Use of radial velocity measurements in Kalman filter[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2002, 22(2): 225-227.
- [3] 李海英, 杨汝良. 径向速度对频率步进雷达目标距离像影响分析[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(5): 592-597.  
Li Hai-ying and Yang Ru-liang. Analysis of radial velocity effect on range profile of stepped-frequency waveform [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2003, 25(5): 592-597.
- [4] 蒋楠稚, 王毛路, 李少洪等. 频率步进脉冲距离高分辨一维成像速度补偿分析[J]. 电子与信息学报, 1999, 21(5): 665-670.  
Jiang Nan-zhi and Wang Mao-lu, et al. Compensation methods for stepped frequency radar HRR image [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 1999, 21(5): 665-670.
- [5] 刘铮, 张守宏. 步进频率雷达目标的运动参数估计[J]. 电子学报, 2000, 28(3): 43-45.  
Liu Zheng and Zhang Shou-hong. Estimation of target motion parameter in a stepped frequency pulses radar [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(3): 43-45.
- [6] Niu Tao and Chen Wei-dong. Radial Motion Estimation for Pulse Stepped-frequency Radar [C]. 7th International Conference on Signal Processing, Beijing, China, Sept. 2004, Vol.3: 1961-1964.
- [7] Zhu Yong-feng, Zhao Hong-zhong, and Fu Qiang.

- Simultaneously velocity measuring and HRR profiling with a novel CSF sequence [C]. International Conference on Radar, Shanghai, China, 2006: 1-5.
- [8] 王俊, 张守宏, 刘宏伟. 步进频率信号长相参积累实现方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2001, 28(3): 373-377.  
Wang Jun, Zhang Shou-hong, and Liu Hong-wei. Integral detector using stepped frequency signals [J]. *Journal of Xidian University*, 2001, 28(3): 373-377.
- [9] Yuan Hao-tian, Cheng Zhen, and Wen Shu-liang, *et al.* Study on radar target imaging and velocity measurement simultaneously based on step frequency waveforms [C]. Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Huangshan, China, 2007: 404-407.
- [10] Rife D C and Boorstyn R R. Single tone parameter estimation from discrete-time observations [J]. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 1974, IT-20(5): 591-598.
- [11] Kay S. A fast and accurate single frequency estimator [J]. *IEEE Trans. on Acoust., Speech, Signal Process*, 1989, 37(12): 1987-1990.
- 曹宇飞: 男, 1982 年生, 博士, 研究方向为雷达系统、雷达信号处理等.
- 屈晓光: 男, 1971 年生, 研究员, 研究方向为雷达系统设计、雷达信号处理等.
- 黄培康: 男, 1935 年生, 中国工程院院士, 研究方向为雷达目标特征、目标识别、雷达信号处理等.