

# 频率步进脉冲距离高分辨一维成像速度补偿分析<sup>1</sup>

蒋楠稚 王毛路 李少洪 毛士艺

(北京航空航天大学电子工程系 北京 100083)

**摘要** 本文就频率步进脉冲距离高分辨一维成像的速度补偿的常用的几种方法(时域法, 频域法, 最小熵值法)进行了分析和比较。并就其中的时域法和频域法进行了改进, 将二者结合起来, 使之更有效地对速度进行估计。还分析了速度补偿的精度要求。

**关键词** 步进频率, 速度补偿, 频域, 时域, 最小熵

**中图分类号** TN957.7

## 1 引言

实现距离向高分辨率(HRR)是现代雷达研究的重要内容之一。它在目标识别、雷达成像、隐身及反隐身技术领域有着广泛的应用前景。用宽带线性调频脉冲压缩体制、匹配滤波及时宽-带宽转换技术等都可实现HRR。脉间频率步进信号也可实现距离向高分辨。

频率步进信号的主要特点:是在每个PRT中采用单频宽脉冲,而在多个PRT中阶梯变频,采用信号处理的方法综合形成距离高分辨。因此可以显著降低对数字信号处理硬件速度的要求。它通过使相参脉冲串中各个脉冲的载频跳变获得大带宽,并通过IDFT处理获得距离高分辨。由于这种方法瞬时带宽小,易于实现,可用低采样率得到HRR,而且由于多脉冲合成,信噪比得到改善。但这种方法的主要问题是成像时间长,目标在成像期间产生很大位移,引起散焦。为了使聚焦较理想,必须进行速度补偿。

## 2 速度误差对成像的影响

雷达与目标的相对径向速度会导致HRR像的偏移和色散。由(1)式:

$$\Psi_i = -2\pi f_i \left[ \frac{2R}{C} - \frac{2v_r}{C} \left( iT_2 + \frac{T_1}{2} + \frac{2R}{C} \right) \right], \quad (1)$$

(式中频率  $f_i = f_0 + i \cdot \Delta f$ , 载频  $f_0 = 10\text{GHz}$ , 步进频率  $\Delta f = 10\text{MHz}$ , 一组脉冲个数  $N = 32$ ,  $i$  为一组脉冲串中的第  $i$  个发射脉冲, 雷达与目标的距离为  $R$ , 单个脉冲宽度  $T_1 = 0.1\mu\text{s}$ , PRT(Pulse Repetition Time):  $T_2 = 700\mu\text{s}$ 。(文中如无特殊说明,以下分析中的参数均用以上数据。)同一目标,由于目标运动形成的相邻周期的目标回波之间的相位差为

$$\Delta\Psi_i = 2\pi f_0 \frac{2v_r}{c} iT_2 + 2\pi i \Delta f \frac{2v_r}{c} \left( \frac{T_1}{2} + \frac{2R}{c} \right) + 2\pi \Delta f \frac{2v_r}{c} i^2 T_2. \quad (2)$$

由(2)式看出目标运动引起的相位变化包括与距离有关的相位因子  $(2\pi i \Delta f (2v_r/c)(2R/c))$  的影响;一次相位项  $(2\pi f_0 (2v_r/c) iT_2)$  的影响(引起偏移);二次相位项  $(2\pi \Delta f (2v_r/c) i^2 T_2)$  的影响(引起偏移、色散)。若速度大到一定程度,由它导致的多普勒频移不能被忽略,若不补偿,会使HRR成像受到较严重的影响。

<sup>1</sup> 1998-02-29 收到, 1998-11-19 定稿

图 1, 图 2 为三个理想点目标, 速度对成像的影响: 图 1 为目标径向速度为 0 时的像, 图 2 为目标速度为 50m/s 时的像。图中横坐标为 IFFT 窗, 该窗的宽度为 15m。

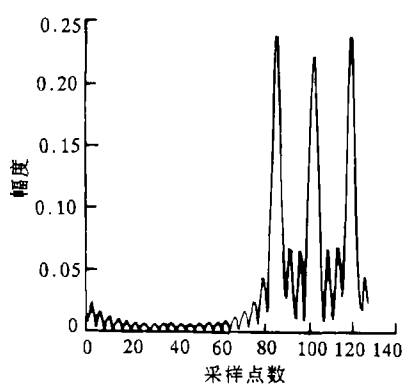


图 1  $V = 0$  m/s 时的成像

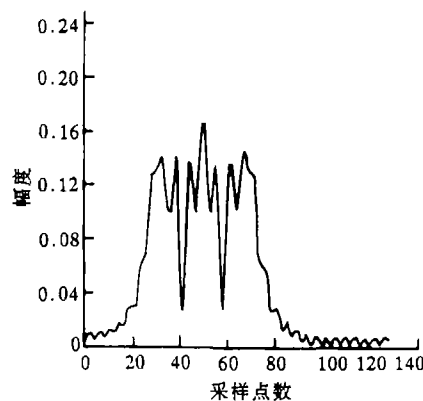


图 2  $V = 50$  m/s 时的成像

### 3 速度补偿方法

目前, 速度补偿的方法主要有三种: (1) 频域互相关法, (2) 时域相关, (3) 最小熵法, 这三种方法是互相独立的, 每种方法都有其自己的优缺点。下面, 就三种方法分别概要地进行介绍:

#### 3.1 频域互相关法

考虑同一目标两个前后相邻的脉冲组回波信号 BURST1 和 BURST2, 其内部脉冲回波基带相位分别为  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$ :

$$\varphi_1 = -2\pi f_i \{ (2R/c) - (2v/c)[iT_2 + \tau + (2R/c)] \}, \quad (3)$$

$$\varphi_2 = -2\pi f_i \{ (2R/c) - (2v/c)[(i+N)T_2 + \tau + (2R/c)] \}, \quad (4)$$

取两组回波数据互相关的测度为  $R(0)$ :

$$\begin{aligned} R(0) &= \sum_{i=1}^{N-1} (e^{j\varphi_{1i}})^* e^{j\varphi_{2i}} = \sum_{i=0}^{N-1} \exp \left( j4\pi f_i \frac{v}{c} NT_2 \right) \\ &= \exp \left[ j2\pi \frac{v}{c} (2f_0 + (N-1)\Delta f) \right] \frac{\sin[N^2 4\pi \Delta f (v/c) T_2]}{\sin[2\pi \Delta f (v/c) NT_2]}. \end{aligned} \quad (5)$$

$R(0)$  的相位包含  $v$  的信息:

$$\arg[R(0)] = 2\pi (v/c) NT_2 [2f_0 + (N-1)\Delta f], \quad (6)$$

故

$$\hat{v} = \arg[R(0)]c / \{2\pi NT_2 [2f_0 + (N-1)\Delta f]\}. \quad (7)$$

因为多普勒速度估计的无模糊范围满足  $\arg[R(0)] \in [-\pi, +\pi]$ , 即

$$\hat{v} \in \left\{ -\frac{c}{2NT_2 [2f_0 + (N-1)\Delta f]}, +\frac{c}{2NT_2 [2f_0 + (N-1)\Delta f]} \right\}. \quad (8)$$

由以上典型数据得无模糊速度范围为  $(-0.33, +0.33)\text{m/s}$ 。这显然是不能满足要求的。

### 3.2 时域互相关法

由频域互相关的推导过程可知,两个相邻脉冲组对应的脉冲相位差为  $\Delta\varphi = 4\pi f_i v N T_2 / C$ 。它对应两个相邻距离剖面之间的时延量  $\Delta\tau = 2v N T_2 / C$ , 对应的距离延迟  $\Delta l = (C/2)\Delta\tau = v N T_2$ , 对应的延迟距离分辨单元数 ( $\Delta R = c T_1 / (2N) = c / (2N \Delta f)$  为距离分辨率):

$$\Delta n = \Delta l / \Delta R = 2v T_2 N^2 \Delta f / C, \quad (9)$$

最后得

$$v = \Delta n C / (2 T_2 N^2 \Delta f). \quad (10)$$

由(8)式,无模糊速度范围为  $\{-(1/2)NC/(2T_2 N^2 \Delta f), (1/2)NC/(2T_2 N^2 \Delta f)\}$  由以上典型数据得无模糊速度范围为  $(-334.9, +334.9)\text{m/s}$ 。这显然是能满足要求的。

### 3.3 最小熵值法

此法基于当成像被最好聚焦时,其熵值最小。由熵的概念,我们很易理解,熵是混乱度的量度,熵值越大,像越无序(聚焦性越差)。最小熵值法由一个时域 HRR 像  $H(r)$ , 将时域各点幅度归一化得  $H'(r)$ , 定义熵值为

$$En = - \sum_{i=0}^{N-1} H'(i) \log(H'(i)), \quad (11)$$

使上式最小即为最小熵。当径向速度被估计出来,并用之补偿相位,熵值开始变小,理想情况下,当估计值与实际值一致时,最小熵值被得到。最小熵值法是一闭环系统,具有反馈能力。它能自适应地使系统熵值达到最小。

## 4 仿真数据分析比较及合成估计法

### 4.1 数据分析与比较

4.1.1 频域互相关法 由于相位只能区分  $(-\pi, +\pi)$  变化,所以此法的无模糊速度很小,一般只适用于慢速目标。如果不能消除模糊,此法就很难应用到实际中。但此法估计精度高,运算量小。

4.1.2 时域相关法 进行包络的位置对准,较粗糙,成像质量受到影响。图 3, 图 4, 图 5 分别为信噪比为 30dB, 20dB, 5dB 时的估计结果,横坐标为真实速度 (0-100m/s), 纵坐标为估计的速度。由图可发现,时域法还具有较好的抗噪性能。

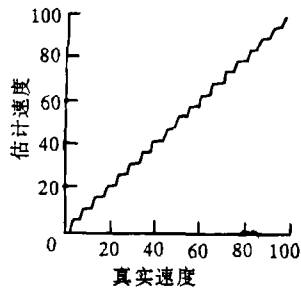


图 3 时域法速度估计结果 (SNR=30dB)

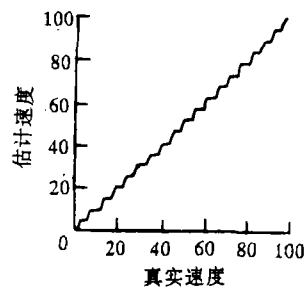


图 4 时域法速度估计结果 (SNR=20dB)

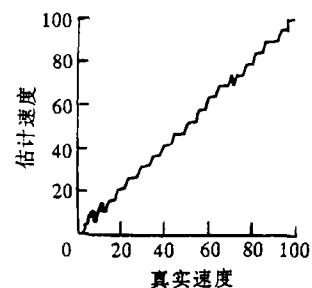


图 5 时域法速度估计结果 (SNR=5dB)

由 (10) 式注意到, 时域补偿的结果成阶梯状, 为降低每个阶梯, 可采用进行 IFFT 之前, 将采样数据补零, 再进行 IFFT, 可使估计精度提高, 代价是增加了 FFT 的运算量。如图 6, 图 7, 图 8 分别为数据长短 32, IFFT 补零至 32, 64, 128 时的估计结果 (SNR=5dB, 横坐标为真实速度 0-100m/s, 纵坐标为估计速度)。

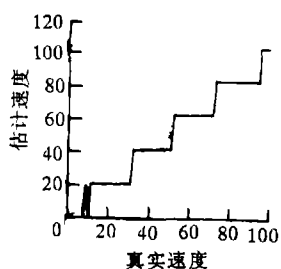


图 6 时域法速度估计结果 (IFFT  $n=32$ )

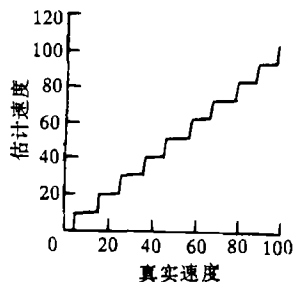


图 7 时域法速度估计结果 (IFFT  $n=64$ )

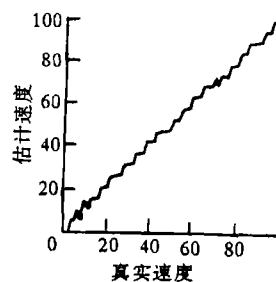


图 8 时域法速度估计结果 (IFFT  $n=128$ )

4.1.3 最小熵值法 靠反复对速度进行估算, 成像, 再估算, 再成像, 速度较慢, 每计算一个熵值就需要进行大于  $2N$  次的复数乘法,  $N$  次的复数加法运算及  $N$  点的 IFFT 运算。而频域法估计出速度只需大约  $N$  次的复数乘法。时域法需大约  $N$  次的复数乘法和  $N$  点 IFFT 运算。为降低运算量, 可采用其它方法先粗略估计一个速度, 再在一定范围内用熵值法反复估计, 直至熵值达到最小。同时, 它的抗噪性能不太好, 图 9, 图 10, 图 11 分别为 SNR=30dB, 20dB, 5dB 情况下, 最小熵值法的估计结果, 横坐标为真实速度 (0-100m/s), 纵坐标为估计的速度。由图可发现, 最小熵值法的估计精度随信噪比的降低而有较明显的降低。

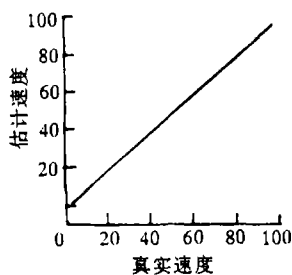


图 9 最小熵法速度估计结果 (SNR=30dB)

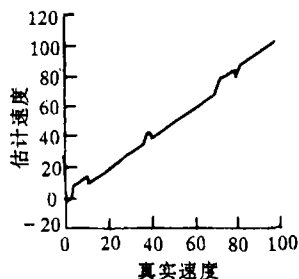


图 10 最小熵法速度估计结果 (SNR=20dB)

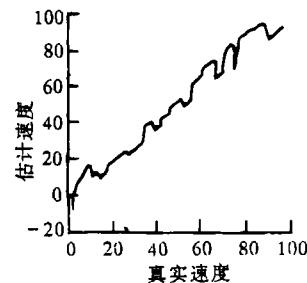


图 11 最小熵法速度估计结果 (SNR=5dB)

## 4.2 合成估计法

由于最小熵值法的实时性比较差, 希望能再找到一种既能有足够的精度, 又能实时处理数据。经反复调试, 我们发现将时域相关与频域相关结合使用, 可达到较理想的效果。

首先, 需要将频域的速度无模糊范围扩大, 通过专门发射一组 PRT 较小的脉冲, 本文中, PRT=10 $\mu$ s 的脉冲, 使无模糊范围扩大到 (-23.08, +23.08)m/s, 使其大于数倍时域的估计误差为  $(1/2)c/(2T_2N^2\Delta f)$ 。典型参数情况下为 10.46m/s, 由 (7) 式, 可推得

$$\hat{v} = (\arg[R(0)] + k\pi)c / \{2\pi NT_2[2f_0 + (N-1)\Delta f]\}, \quad (12)$$

其中  $k$  为任意整数, 这一组数里必然有一个为无模糊时的速度估计值, 再靠判断与时域法的估计值最接近的数值, 即为最佳估计值。由仿真发现, 此法的抗噪性能很好, 如图 12, 图 13, 图 14, 分别为 SNR=30dB, 20dB, 5dB 情况下, 合成估计法的估计结果, 横坐标为真实速度 (0-100m/s), 纵坐标为估计的速度。即使在 SNR 在 5dB 左右时, 估计误差仍可保持在 2m/s 的范围之内。虽然时域法较粗糙, 但它的无模糊范围较大, 选择本文参数可得无模糊范围为 (-334.8, +334.8)m/s, 所以总能较精确地得到最后的估计值。

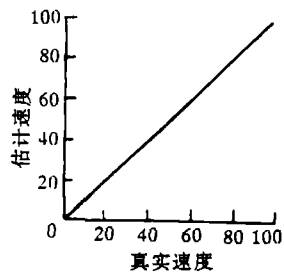


图 12 合成法速度估计结果 (SNR=30dB)

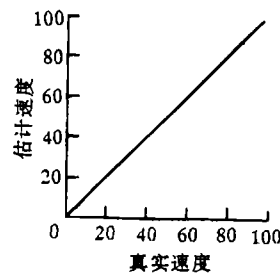


图 13 合成法速度估计结果 (SNR=20dB)

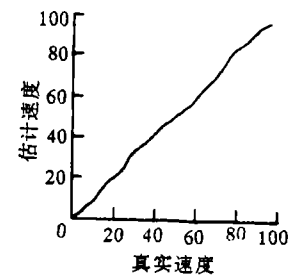


图 14 合成法速度估计结果 (SNR=5dB)

图 15, 图 16, 图 17 是用上述的合成估计法对 B2 战略轰炸机成像仿真的结果。

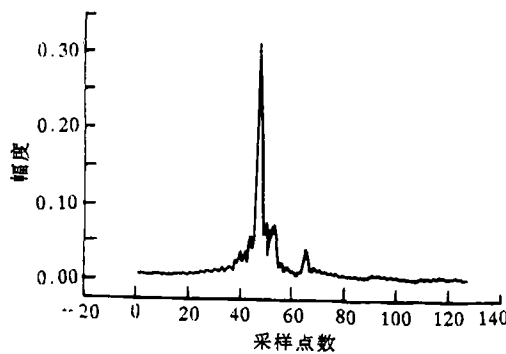


图 15  $v = 0$  m/s 的成像

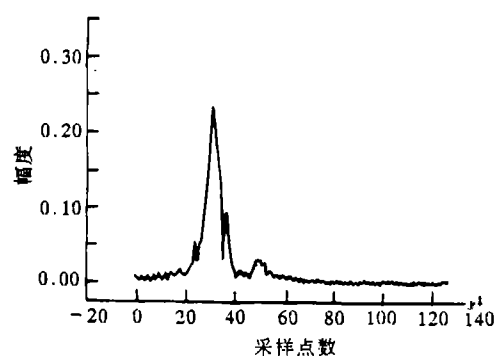


图 16  $v = 50$  m/s 的成像

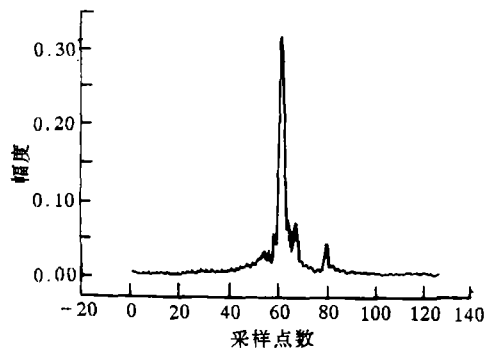


图 17 合成法补偿后成像

## 5 结 论

本文中, 我们较详细地分析比较了三种不同的步进频率雷达的速度补偿方法(频域法, 时域法及最小熵法), 并在此基础上提出了一种时域相关法与频域相关法结合的方法, 它克服了频域法补偿速度无模糊带宽太窄的缺点。与最小熵法相比, 此法提高了速度补偿的计算速度和抗噪能力。

## 参 考 文 献

- [1] Wehner D. High Resolution Radar. Boston: Artech House, 1987, 435-465.
- [2] 马作民. 频率步进雷达成像研究: [硕士论文]. 北京: 北京航空航天大学, 1995, 27-46.
- [3] Chen K M, Nyquist D P. New progress on E/S pulse techniques for non-cooperative target recognition. IEEE Trans. on AP, 1992, AP-40(7): 829-831.
- [4] Nebabin V G. Methods and Techniques of Radar Recognition. Boston: Artech House, 1995, 107-130.
- [5] 孙光民. 基于高分辨回波的雷达目标识别: [博士论文]. 西安: 西安电子科技大学, 1997, 19-24.

## COMPENSATION METHODS FOR STEPPED FREQUENCY RADAR HRR IMAGING

Jiang Nanzhi    Wang Maolu    Li Shaohong    Mao Shiyi

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

**Abstract** In this paper, we present three different kinds of motion compensation methods for stepped frequency radar, which are time domain compensation method, frequency domain compensation method and mini entropy compensation method. Then, an improved method by combining the time domain method and frequency domain method is provided. Finally, the motion compensation requested from stepped frequency radar is also mentioned.

**Key words** Stepped frequency, Motion compensation, Frequency domain, Time domain, Mini entropy

- 蒋楠稚: 女, 1973年生, 美国佛罗里达州立大学98级博士研究生, 从事专业: 信号与信息处理专业。  
 王毛路: 女, 1974年生, 博士生, 主要从事自动目标识别及计算机仿真等方面的研究。  
 李少洪: 男, 1939年生, 教授, 博士生导师, 北京航空航天大学信号与信息处理教研室主任, 主要从事雷达、信号与信息处理、检测估计、多目标跟踪和目标识别等方面的研究工作。  
 毛士艺: 男, 1935年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士。主要研究领域为: 高分辨率雷达成像、弱信号检测、非高斯信号建模、信号分类、多传感器融合、数据互联和多目标跟踪。