

## 步进频率信号相位对消合成运动目标距离像

陈行勇 刘永祥 黎湘 郭桂蓉

(国防科技大学空间电子信息技术研究所 长沙 410073)

**摘要:** 研究了步进频率信号运动目标成像新方法。首先推导了步进频率信号合成扩展目标距离像原理; 基于离散傅里叶变换理论, 分析了运动导致的步进频率信号合成距离像失真, 提出了相位因子对消合成运动目标距离像方法。新方法不需要估计运动速度。仿真结果证明了该算法效果。

**关键词:** 频率步进信号; 离散傅里叶变换; 距离像; 多普勒效应

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)04-0815-04

## Phase Cancellation for Synthesizing Range Profiles of a Moving Target via Stepped Frequency Signal

Chen Hang-yong Liu Yong-xiang Li Xiang Guo Gui-rong

(Research Institute of Space Electronics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In this paper, a new method is explored for synthesizing range profile of a moving target via stepped frequency signal. The principle of synthesizing range profile of an extended target is investigated for stepped frequency signal. The distortion of synthetic range profiles is discussed with the theory of Discrete Fourier Transform (DFT). Based on phase cancellation, a new technology is proposed to achieve range profile with out distortion for a moving target. The new technology does not need the estimation of the velocity. The result of emulation proves the effect of the method.

**Key words:** Stepped frequency signal; Discrete Fourier Transform(DFT); Range profile; Doppler effect

### 1 引言

现代雷达朝着高灵敏度、强抗干扰、高机动性和良好的低空性能方向发展, 其中高距离分辨率是关键技术之一。由于步进频率信号可以在获得距离高分辨率的同时降低对数字信号处理机瞬时带宽的要求, 它是一种工程上实用、方便灵活的高距离分辨率信号形式。它的另一个优势是能跳过那些受调频广播和移动通讯等外界干扰的频率, 具有抗干扰性。

频率步进信号合成点目标距离像原理已有许多文献进行了研究<sup>[1-3]</sup>, 频率步进波形对目标径向速度非常敏感, 目标径向运动会引起距离-多普勒耦合, 给回波造成附加的一次相位项和二次相位项, 称为剩余相位因子, 其中, 一次相位项会产生耦合时移, 造成测距不准; 二次相位项主要会使能量发散或产生伪峰, 目标能量分散到邻近的距离单元造成距离分辨率下降、测距精度降低和信噪比损失, 使得合成距离像发生畸变。运动补偿是消除或降低合成距离像畸变的一种方法。文献[4]针对调频步进脉冲串信号, 提出了距离、速度和加速度的极大似然估计方法, 它给出了距离、速度和加速度估计的最佳理论, 但是实际可操作性并不强。文献[5]提出

了一种频率步进脉冲组串的方法, 即在每一个频点上发射一组脉冲, 通过脉组之内的处理获得目标速度, 再通过脉组之间的处理获得距离高分辨率的效果。文献[6]提出了频域互相关法、时域互相关法及最小熵值法, 其中频域互相关法就是对IFFT之前相邻两帧的回波求互相关, 根据相关输出的相位估计目标运动速度。所谓最小熵法, 是一种闭环迭代算法, 根据该文的分析, 其实时性较差。文献[7]提出了改变步进频率雷达一个扫描周期内脉冲重复时间来补偿二次相位发散因子的方法, 但不能补偿一次相位因子。

本文首先分析了步进频率信号合成扩展目标距离像原理和合成距离像的多普勒效应。在此基础上通过发射两组具有不同脉冲重复周期的脉冲串来对消相位因子, 提出了一种新的合成距离像方法。该方法不需要估计运动速度, 易于实现, 且计算量小, 尤其适合于高速目标成像。仿真结果表明新方法对多普勒效应引起的一维距离像幅度畸变有很好的改善。

### 2 回波数学模型

如图 1 所示, 设雷达发射的步进频率脉冲串信号前  $N$  个脉冲的时域表达式为

$$s(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t-iT_r}{\tau}\right) e^{j2\pi(f_0+i\Delta f)t} \quad (1)$$

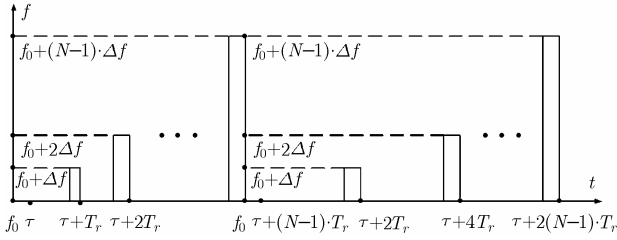


图1 双脉冲串相位对消信号频率

其中  $N$  为子脉冲个数,  $T_r$  为脉冲重复周期,  $i \cdot \Delta f$  为第  $i$  个脉冲的载频增量,  $f_0$  为发射载频的基频分量,  $\tau$  为子脉冲宽度。

如图 2 所示, 设扩展目标冲击响应在径向的投影连续分布曲线为  $h(r)$ ,  $r$  为目标径向尺寸, 以分辨单元将目标划分为等距点目标沿径向排列, 可建立目标径向散射特性的近似模型, 当分辨单元趋近于零时, 这种模型表征了目标散射特性沿径向的精确分布。因此可将目标距离像近似等效为一离散线性系统的冲激响应, 目标径向冲击响应分布即目标距离像点列记为  $h(n)$  ( $n = 0, 1, \dots, N-1$ ), 相参合成距离像的原理就是通过离散傅里叶变换恢复  $h(n)$ 。

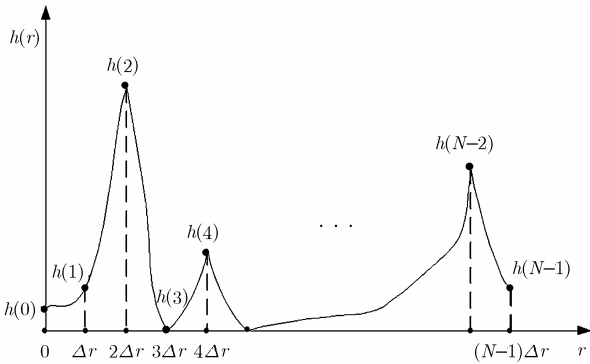


图2 目标距离相模型

设目标第  $n+1$  个散射中心在径向相对雷达的匀速运动速度为  $v_n$ , 目标靠近雷达时  $v_n$  为正。  $t=0$  时刻, 目标第  $n+1$  个散射中心距雷达的距离为  $R_n = R_0 + n\Delta r$ ,  $\tau_{in}$  ( $n = 0, 1, \dots, N-1, i=0, 1, \dots, N-1$ ) 是第  $i+1$  个脉冲雷达波照射第  $n+1$  个散射中心的回波相对于照射到第 1 个散射中心的延迟, 将第  $i$  个脉冲回波信号与相参本振信号  $e^{j2\pi(f_0+i\Delta f)t}$  混频输出为

$$u(t) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect} \left[ \frac{t - \frac{2(R_n - v_n t)}{c} - iT_r}{\tau} \right] h(n) \\ \cdot e^{-j2\pi(f_0+i\Delta f)\frac{2(R_n-v_n t)}{c}}, \\ i T_r + \tau_{i0} \leq t \leq i T_r + \tau_{i(N-1)} + \tau \\ 0, \quad \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

其中  $c$  为光速。假设目标各散射点速度相同, 即  $v_n = v$  ( $0, 1, \dots, N-1$ ), 则最终可得目标的回波信号为

$$u(t) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect} \left[ \frac{t - \frac{2(R_n - vt)}{c} - iT_r}{\tau} \right] h(n) \\ \cdot e^{-j2\pi(f_0+i\Delta f)\frac{2(R_n-vt)}{c}}, \\ i T_r + \tau_{i0} \leq t \leq i T_r + \tau_{i(N-1)} + \tau \\ 0, \quad \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

### 3 相位对消合成距离像

#### 3.1 合成距离像原理

对式(3)在  $i T_r + t_s$  时刻采样得

$$U(i) = u(i T_r + t_s) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) e^{-j2\pi(f_0+i\Delta f)\frac{2[R_n-v(i T_r+t_s)]}{c}} \quad (4)$$

设波形参数满足临界紧约束条件, 即  $\tau \Delta f = 1$ , 将  $R_n = R_0 + n\Delta r$  和  $\tau_{in} = 2n\Delta r/c = 2n(c/(2N\Delta f))/c = n/(N\Delta f)$  代入上式, 得

$$U(i) = \sum_{n=0}^{N-1} \left( h(n) e^{-j2\pi f_0 \frac{2n\Delta r}{c}} \right) e^{-j2\pi \frac{in}{N} + j\phi(i)} \\ = \sum_{n=0}^{N-1} h_a(n) e^{-j2\pi \frac{in}{N} + j\phi(i)} \quad (5)$$

其中  $h_a(n) = h(n) e^{-j4\pi f_0 n\Delta r/c}$ , 剩余相位因子  $\phi(i)$  为

$$\phi(i) = -2\pi(f_0 + i\Delta f) \frac{2[R_0 - v(i T_r + t_s)]}{c} \quad (6)$$

若目标静止且  $N$  较大, 则  $\phi(i) = -4\pi f_0 R_0/c - (4\pi \Delta f R_0/c)i$ , 式(4)变为

$$U(i) = \text{DFT} [h_a(n) e^{-j4\pi f_0 R_0/c - j(4\pi \Delta f R_0/c)i}] \\ \approx \text{DFT} [h_a(n) W_N^{ip} e^{-j4\pi f_0 R_0/c}] \\ = \text{DFT} [h_a[\lfloor (n-p) \rfloor_N]] e^{-j4\pi f_0 R_0/c} \quad (7)$$

其中  $p = \lfloor N(2R_0\Delta f/c - \lfloor 2R_0\Delta f/c \rfloor) \rfloor$ ,  $\lfloor \cdot \rfloor$  表示取整运算,  $W_N = e^{-j2\pi/N}$ ,  $h_a[\lfloor (i-p) \rfloor_N]$  表示对  $h_a(i)$  的循环右移位  $p$  点。上式表明, 当  $N$  较大时, 对  $U(i)$  计算 IDFT 取模后, 循环左移位  $p$  点, 即可得到目标的近似原始距离像。

#### 3.2 多普勒效应分析

令  $\phi(i) = -2\pi(\Delta\theta_i^{(0)} + \Delta\theta_i^{(1)}i + \Delta\theta_i^{(2)}i^2)$ ,  $\Delta\theta_i^{(0)}, \Delta\theta_i^{(1)}$  和  $\Delta\theta_i^{(2)}$  分别称为常数项、一次相位因子和二次相位因子, 则

$$\Delta\theta_i^{(0)} = 2f_0(R_0 - vt_s)/c \quad (8)$$

$$\Delta\theta_i^{(1)} = 2(\Delta f R_0 - f_0 v T_r - \Delta f v t_s)/c \quad (9)$$

$$\Delta\theta_i^{(2)} = -2v\Delta f T_r/c \quad (10)$$

常数项  $\Delta\theta_i^{(0)}$  不包含频域因子  $i$ , 对  $h(n)$  的位置和幅度无影响, 对采样点列  $U(\cdot)$  求 IDFT 后取模可消除其对一维距离像影响; 一次相位因子  $\Delta\theta_i^{(1)}$  的作用相当于频域移位采样, 使回波脉冲采样求 IDFT 后得到的  $h(n)$  循环移位, 对一维距离像形状无影响; 二次相位因子  $\Delta\theta_i^{(2)}$  的作用相当于频域非均

匀采样, 使一维距离像产生移位和幅度失真。

### 3.3 相位对消合成距离像

设雷达先发射脉冲重复周期为  $T_r$  的  $N$  个脉冲串, 再发射脉冲重复周期为  $2T_r$  的  $N$  个脉冲串(如图1所示)。两个脉冲串信号除脉冲重复周期不同外, 其余参数相同。对第一个脉冲串经混频的回波信号在距脉冲上升沿  $t_s$  ( $t_s \leq \tau/2$ ) 的时刻采样, 则

$$\begin{aligned} U_1(i) &= \sum_{n=0}^{N-1} \left( h(n) e^{-j2\pi f_0 \frac{2n\Delta r}{c}} \right) e^{-j2\pi \frac{in}{N} + j\phi_1(i)} \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} h_a(n) e^{-j2\pi \frac{in}{N} + j\phi_1(i)} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\phi_1(i) = -2\pi (\Delta\theta_{1i}^{(0)} + \Delta\theta_{1i}^{(1)}i + \Delta\theta_{1i}^{(2)}i^2) \quad (12)$$

$$\Delta\theta_{1i}^{(0)} = 2f_0(R_0 - vt_s)/c \quad (13)$$

$$\Delta\theta_{1i}^{(1)} = 2(\Delta f R_0 - f_0 v T_r - \Delta f v t_s)/c \quad (14)$$

$$\Delta\theta_{1i}^{(2)} = -2v\Delta f T_r/c \quad (15)$$

设在总共  $2N$  个脉冲时间内目标速度变化很小, 近似可认为各散射点速度不变, 对第2个脉冲串经混频的回波信号在距脉冲上升沿  $2t_s$  的时刻采样, 可得

$$\begin{aligned} U_2(i) &= \sum_{n=0}^{N-1} \left( h(n) e^{-j2\pi f_0 \frac{2n\Delta r}{c}} \right) e^{-j2\pi \frac{im}{N} + j\phi_2(i)} \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} h_a(n) e^{-j2\pi \frac{im}{N} + j\phi_2(i)} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\phi_2(i) = -2\pi (\Delta\theta_{2i}^{(0)} + \Delta\theta_{2i}^{(1)}i + \Delta\theta_{2i}^{(2)}i^2) \quad (17)$$

$$\Delta\theta_{2i}^{(0)} = 2f_0(R_0 - 2vt_s)/c \quad (18)$$

$$\Delta\theta_{2i}^{(1)} = 2(\Delta f R_0 - 2f_0 v T_r - 2\Delta f v t_s)/c \quad (19)$$

$$\Delta\theta_{2i}^{(2)} = -4v\Delta f T_r/c \quad (20)$$

由式(11)–式(20)可得

$$\begin{aligned} U_0(i) &= \frac{(U_1(i))^2}{U_2(i)} = e^{-j\frac{4\pi f_0 R_0}{c} N-1} \sum_{n=0}^{N-1} h_a(n) e^{-j2\pi \frac{in}{N} - j\frac{4\pi \Delta f R_0}{c} i} \\ &\approx e^{-j\frac{4\pi f_0 R_0}{c}} \text{DFT} \left[ h_a \left[ \left( (i-p) \right)_N \right] \right] \end{aligned} \quad (21)$$

上式表明: 经相位对消后, 合成距离像与速度无关, 二次相位因子已对消, 理论上消除了多普勒效应引起的距离像幅度失真。对  $U_0(i)$  计算 IDFT 并取模后, 循环左移位  $p$  点, 即可得到目标的距离像响应。

## 4 仿真计算

### 4.1 仿真参数

设匀速运动刚体目标模型如图3所示: 目标由顺序相距  $7\Delta r$ ,  $2\Delta r$  和  $14\Delta r$  的4个强散射点构成, 分别记为:  $A$ ,  $B$ ,  $C$  和  $D$ , 归一化散射强度之比为  $1:10:5:8$ ,  $t=0$  时刻目标的第1个强散射点距离雷达的径向距离  $R_0$  为  $2\text{km}$ 。雷达发射的步进频率信号参数和信号处理参数为: 发射频率  $f_0 = 10\text{GHz}$ ,  $\tau = 125\text{ns}$ ,  $\Delta f = 8\text{MHz}$ ,  $N = 32$ ,  $T_r = 1.5\mu\text{s}$ ,  $\Delta r = c/(2N\Delta f) = 0.59\text{m}$ ,  $t_s = \tau/3$ 。

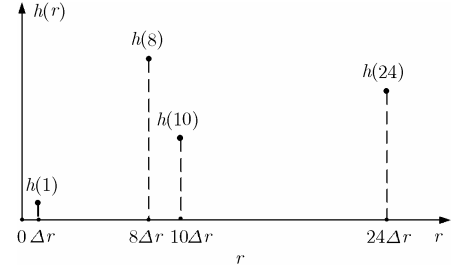


图3 强散射点的位置

### 4.2 仿真结果及分析

不考虑杂波影响和采样幅度损失, 图4给出了不同速度的合成距离像仿真结果。其中  $RP_1$ 、 $RP_2$  和  $RP_3$  分别为原始距离像, 未对消相位合成距离像和对消相位合成距离像。从图4可以看出, 当目标运动速度为  $30\text{m/s}$  时, 未对消相位合成距离像循环右移位21点, 与理论计算值相同, 最高峰  $B$  点的幅度值已衰减35%; 当目标运动速度为  $50\text{m/s}$  时, 由于二次相位项的干扰, 未对消相位合成距离像近似循环右移位20点, 距离像峰值处波形已被展宽, 幅度衰减约40%; 当目标运动速度达到  $100\text{m/s}$  时, 未对消相位合成距离像近似循环右移位19点, 距离像已严重失真, 表现在峰值处波形严重展宽, 并出现伪峰。对比新的合成距离像技术, 对消相位因子后, 剩余相位因子已不含速度项, 故图4的相位对消合成距离像与速度无关。最高峰  $B$  点的幅度值有10%的衰减是由于循环移位点数并非恰好是整数。若  $N$  不是足够大, 即分辨率不是足够高, 微小的幅度衰减是不可避免的。

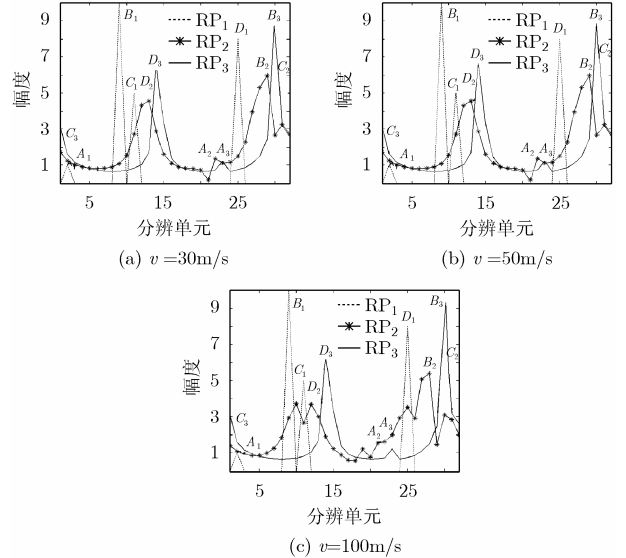


图4 合成距离像对比

## 5 结束语

目标的多普勒效应问题是频率步进体制雷达的核心问题。本文首先分析了步进频率雷达合成一维距离像的原理以及目标运动的多普勒效应机理, 在此基础上提出了一种新的合成距离像的方法, 该方法利用两个脉冲重复周期相差一倍的扫描脉冲采样数据对消相位因子, 不需要估计目标运动速度, 算法简单, 仿真结果证明本文方法的效果。

应当指出, 本文要求目标各强散射中心径向作匀速运动, 且速度相同, 若是作变速运动, 则要求步进频率雷达扫描周期很小, 以保证在两个扫描周期内速度变化很小。

### 参 考 文 献

- [1] Wehner R Donald. High-Resolution Radar[M]. Second Edition. London: Atech House, Boston, 1995, Ch.p4–Ch.p5.
- [2] KokLeog Mun. Stepped frequency imaging radar simulation[R]. AD-A379137, Monterey, California: Naval Postgraduate School, March 2000.
- [3] Paulose Abraham. High radar range resolution with the step frequency waveform [R], AD-A284611, Monterey, California: Naval Postgraduate School, June 1994.
- [4] Abatzoglou T J and Gheen G O. Range, radial velocity, and acceleration MLE using radar LFM pulse train [J]. *IEEE Trans. on AES*, 1998, 34(4): 1070–1084.
- [5] Shen Yiyang and Liu Yongtan. A step pulse train design for high resolution range imaging with Doppler resolution processing[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 1999, 8(2): 196–199.
- [6] 蒋楠稚, 王毛路等. 步进脉冲距离高分辨一维成像速度补偿分析[J]. *电子科学学刊*, 1999, 21(5): 665–670.
- Jiang Nanzhi and Wang Maolu, *et al.* Compensation methods for stepped frequency radar HRR image. *Journal Of Electronics*, 1999, 21(5): 665–670.
- [7] 陈广飞, 张运宁. 线性频率步进脉冲串信号的多普勒相位补偿[J]. *中国空间科学技术*, 1997, 2(1): 1–8.
- 陈行勇: 男, 1978年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理、自动目标识别.
- 刘永祥: 男, 1976年生, 副教授, 研究方向为雷达信号处理.
- 黎 湘: 男, 1967年生, 教授, 研究方向为非线性信号处理、雷达目标识别.
- 郭桂蓉: 男, 1937年生, 中国工程院院士, 研究方向为自动目标识别与模糊工程.