

高速运动目标的频域合成带宽方法

张焕颖, 张守宏, 邢孟道, 李强, 罗斌凤

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 710071, 西安)

摘要: 为了利用线性调频步进雷达获得高速运动目标的高分辨距离像, 提出了基于高速运动模型的频域合成带宽方法. 该方法根据运动目标雷达回波的精确模型建立运动补偿因子, 并在时域将回波信号与频域频谱搬移的误差频率混频, 以消除频域频谱搬移误差的影响. 与传统的基于低速运动模型的合成带宽法相比, 所提方法对高速运动目标回波补偿后不存在子脉冲频谱的初相补偿误差和失配误差, 具有更高的补偿精度. 针对高速运动目标的仿真结果表明, 在采用海明窗加权的情况下, 与基于低速运动模型的频域合成带宽法相比, 所提方法得到的距离像没有出现栅瓣且副瓣电平在 -42 dB以下.

关键词: 线性调频步进; 合成带宽; 运动补偿

中图分类号: TN956 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)10-1184-04

Frequency Domain Synthetic Bandwidth Approach for High Speed Moving Target

Zhang Huanying, Zhang Shouhong, Xing Mengdao, Li Qiang, Luo Bin Feng

(National Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In order to utilize the linear modulated stepped frequency radar to acquire the high resolution range profile of the high speed moving target, an improved frequency domain synthetic bandwidth approach is proposed. In the approach, the motion compensation factor is established in terms of the precise echo model of the moving target, and the error of spectrum shift in the frequency domain is eliminated by mixing the echo signal and the error frequency. Compared to the traditional synthetic bandwidth approach based on the low speed moving target model, the proposed method avoids the initial-phase compensation error and unmatched error of the subpulse's spectrum after compensating the high speed target echo, and possesses higher compensation precision. Aiming at the high speed moving target, the simulation results show that under the case that the Hamming window is used to weight the synthetic spectrum, the target range profile does not have grating lobe and the peak-to-side lobe ratio of that is -42 dB below.

Keywords: linear modulated stepped frequency; synthetic bandwidth; motion compensation

频域合成带宽法是处理线性调频步进信号的一种高效算法. 现有的频域合成带宽方法^[1-5]都是基于低速运动目标回波的 step-go 模型提出的, 高速运动目标的包络在时间轴上存在展宽或压缩^[6], 不能采用 step-go 模型近似. 此外, 由于现有的频域合成带宽法只是在频域对各子脉冲的基带信号进行频谱

搬移, 其频谱搬移的精度受频域采样间隔的限制(搬移量只能是频谱间隔的整数倍), 如果没有专门设置的雷达参数, 往往不能精确地合成信号. 针对高速运动目标, 本文提出了基于高速运动模型的频域合成带宽方法. 该方法根据运动目标雷达回波的精确模型建立运动补偿因子, 并在时域将回波信号与

频域频谱搬移的误差频率混频,以消除频域频谱搬移误差的影响,从而有效地克服了传统方法存在的问题.

1 信号模型

线性调频步进雷达发射的第 m 簇信号为

$$s_{t,m}(t_k, t_i) = N^{-1/2} u_c(t_k) \exp[j2\pi f_i(t_k + t_i + t_m)] \quad (1)$$

式中: $u_c(t_k) = T_p^{-1/2} \text{rect}(t_k/T_p) \exp(j\pi\mu t_k^2)$ 为 chirp 子脉冲,其中 $\text{rect}(u) = \begin{cases} 1 & |u| \leq 1/2 \\ 0 & |u| > 1/2 \end{cases}$, T_p 是子脉冲宽度, $\mu = B_s/T_p$ 为 chirp 子脉冲的调频斜率, B_s 是子脉冲的带宽; $t_k = t - iT_r - mNT_r$ 为快时间, T_r 是脉冲重复周期; $t_i = iT_r$ ($i = 1, 2, \dots, N$), $t_m = mNT_r$ ($m = 0, 1, 2, \dots, M-1$) 为慢时间; $f_i = f_0 + (i - \frac{N+1}{2})\Delta f = f_0 + \Delta f_i$, f_0 为基频, Δf 为子脉冲载频进步量; N 为子脉冲的个数.

在第 m 簇发射的时间内,目标散射点到雷达的距离为

$$R_m(t_k, t_i) = R_0 + v_0(t_k + t_i + t_m) + \sum_{p=2}^{\infty} \frac{1}{n} v^{(p)}(t_k + t_i + t_m)^p \approx R_m(0, t_i) + v_m(t_i)t_k \quad (2)$$

式中: R_0 和 v_0 分别是目标初始距离和初始速度; $v_m(t_i) = v_0 + \sum_{p=2}^{\infty} v^{(p)}(t_i + t_m)^{p-1}$ 为第 m 簇中第 i 个脉冲内的目标速度; $v^{(p)}$ 为目标第 p 阶运动参数. 第 m 簇调频步进雷达信号的回波为(忽略回波信号幅度)

$$s_{r,m}(t_k, t_i) = u_c[\alpha_m(t_i)(t_k - \tau'_m(t_i))] \cdot$$

$$\exp\{j2\pi f_i[\alpha_m(t_i)(t_k - \tau'_m(t_i)) + t_i + t_m]\} \quad (3)$$

式中: $\tau'_m(t_i) = 2R_m(0, t_i)/(c - v_m(0, t_i))$ 为回波延时; $\alpha_m(t_i) = (c - v_m(0, t_i))/(c + v_m(0, t_i))$ 为尺度因子; c 为光速. 回波信号同本振信号混频后的得到基带信号

$$s_{l,m}(t_k, t_i) = u_c[\alpha_m(t_i)(t_k - \tau'_m(t_i))] \exp\left(-j2\pi f_0 \frac{2R_m(t_k, t_i)}{c + v_m(t_i)}\right) \exp[-j2\pi \Delta f_i(\alpha_m(t_i)t_k - \alpha_m(t_i)\tau'_m(t_i) - t_k)] \quad (4)$$

在低速运动目标的 step-go 模型中,认为目标运动速度远远小于光速,而且目标在一个雷达脉冲宽度内运动的距离远小于雷达的距离分辨率. 基于

这两点假设对式(4)进行简化,令 $\tau_m(t_i) = 2R_m(0, t_i)/c$, 可得到低速目标的基带信号模型

$$s_{l,m}(t_k, t_i) = u_c[t_k - \tau_m(t_i)] \exp(-j2\pi f_i 2R_m(t_k, t_i)/c) \quad (5)$$

2 基于高速运动模型的频域合成带宽方法

频域合成算法的主要思想^[1-2]是将各子脉冲的频谱进行拼接,获得目标的反射谱. 观察式(4),同一簇回波中,信号的相位和包络延时随 t_i 变化,要进行合成处理必须将这些时变项补偿掉.

首先,补偿式(4)中与基频相关的相位项,为了方便下文的叙述,称之为多普勒相,补偿因子为

$$H_{d,m}(t_k, t_i) = \exp\left[j2\pi f_0 \left(\frac{2R_m(t_k, t_i)}{c + v_m(t_i)} - \frac{2R_0}{c + v_0}\right)\right] \quad (6)$$

为了克服频域合成带宽法在频域频谱搬移时搬移精度受频域采样间隔限制的问题,可以先在时域将回波信号与频谱搬移的误差频率混频. 取离散傅里叶变换(FFT)的采样点数为 l ,基带信号的采样频率为 f_s ,频域的采样间隔 $d = f_s/l$,则误差频率为 $\Delta f_i - \text{round}[\Delta f_i/d]d$,其中 $\text{round}[\cdot]$ 表示取整运算. 频谱搬移误差补偿因子

$$H_{f,m}(t_k, t_i) = \exp[j2\pi(\Delta f_i - \text{round}[\Delta f_i/d]d)t_k] \quad (7)$$

设 $u_c(t_k)$ 的傅里叶变换为 $U_c(f)$,回波基带信号经过多普勒项补偿和频谱搬移误差补偿后再进行 FFT,令 $\tilde{A} = \exp(-j2\pi f_0 \alpha_0(0)\tau'_0(0))$,得到补偿后目标回波的频域信号

$$S_{l,m}(f, t_i) = \frac{\tilde{A}}{|\alpha_m(t_i)|} U_c\left[\frac{f - (\alpha_m(t_i)\Delta f_i - \text{round}[\Delta f_i/d]d)}{\alpha_m(t_i)}\right] \exp[-j2\pi \tau'_m(t_i)(f + \text{round}[\Delta f_i/d]d)] \quad (8)$$

设计子脉冲匹配滤波器. 注意到式(8)中子脉冲频谱复包络 $U_c(\cdot)$ 中存在频移和尺度变换,子脉冲匹配滤波器也应该进行相应的变换,设

$$P_m(f, t_i) = \frac{1}{|\alpha_m(t_i)|} U_c\left(\frac{f - (\alpha_m(t_i)\Delta f_i - \text{round}[\Delta f_i/d]d)}{\alpha_m(t_i)}\right) \quad (9)$$

按下式构造子脉冲的匹配滤波器

$$H_{c,m}(f, t_i) =$$

$$\begin{cases} 0 & |f - (\alpha_m(t_i)\Delta f_i - \text{round}[\Delta f_i/d]d)| > \alpha_m(t_i)B_s/2 \\ 1/P_m(f, t_i) & |f - (\alpha_m(t_i)\Delta f_i - \text{round}[\Delta f_i/d]d)| \leq \alpha_m(t_i)B_s/2 \end{cases} \quad (10)$$

子脉冲匹配滤波后,在频域对子脉冲频谱搬移,搬移量为 $\text{round}[\Delta f_i/d]$ 个频域采样单元,然后在频域对回波包络进行延时校正,补偿因子为

$$H_{\tau,m}(f, t_i) = \exp[j2\pi f(\tau'_m(t_i) - \tau'_0(0))] \quad (11)$$

经过上述操作之后,将子带频谱求和拼接得到拼接谱

$$S_{w,m}(f) = \tilde{A} \exp[-j2\pi f\tau'_0(0)] \sum_{i=1}^N \text{rect}\left(\frac{f - \alpha_m(t_i)\Delta f_i}{\alpha_m(t_i)B_s}\right) \quad (12)$$

对拼接谱的幅度进行归一化,以消除式(12)中相邻子脉冲频带重叠部分的影响. 设 B_w 为合成后的频谱宽度,则 $B_w/2 \approx \Delta f_N + B_s/2$, 归一化处理之后的拼接谱进行逆傅里叶变换获得目标的高分辨距离像

$$s_{w,m}(t_k) = \tilde{A} \text{sinc}(B_w(t_k - \tau'_0(0))) \quad (13)$$

式中: $\text{sinc}(t) = \sin(\pi t)/\pi t$.

刚体延展目标可以看作是一群具有相同运动参数的单散射点目标的集合,因此上述补偿方法同样适用,这时式(6)、式(9)、式(11)采用的运动轨迹是目标中心的运动轨迹,而对于非刚体目标或多目标,由于不同散射点的运动参数不同,无法采用统一的参数进行运动补偿,所以不可能同时得到所有散射点的距离像,这是步进频率体制雷达固有的缺点.

本文提出的高速运动目标的线性调频步进信号回波的频域合成带宽方法流程图如图1所示.

3 基于低速模型的运动补偿方法的补偿误差

参考式(5)所示的低速运动目标的基带信号模型,将 $\tau'_m(t_i) \approx \tau_m(t_i)$, $\alpha_m(t_i) \approx 1$, $1/(c \pm v_m(t_i)) \approx 1/c$ 分别代入式(6)、式(9)、式(11),得到相应的低速运动目标的补偿因子. 为了便于分析,认为目标在一个跳频周期内作加速度为 a 的匀加速运动,即 $v_m(t_i) = v_m(0) + at_i$, 且 $\Delta f = B_s$.

多普勒补偿因子的补偿误差表现为子脉冲频谱的初相,影响带宽合成精度的是相邻子脉冲间初相

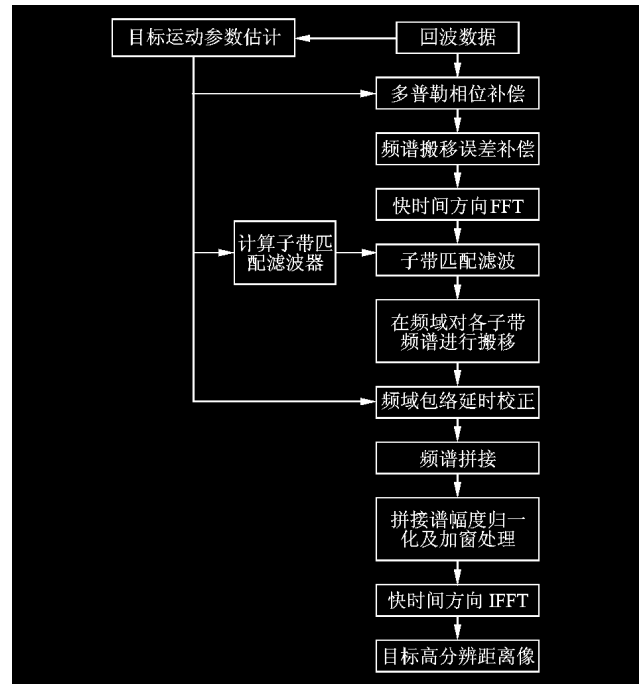


图1 调频步进信号的频域合成带宽处理流程图

的突变量,容易推导出相邻子脉冲间初相的突变量约为

$$\Delta\delta_{d,m}(t_i) = 4\pi f_0 T_r (v_m(0)^2 + aR_m(0,0))/c^2 \quad (14)$$

包络延时校正因子的相位补偿误差 $\delta_{d,m} = 2\pi f[(\tau_m(t_i) - \tau_0(0)) - (\tau'_m(t_i) - \tau'_0(0))]$, $|f - \Delta f_i| \leq \Delta f/2$, 该项导致目标距离像的平移,基本不影响距离像的形状.

根据低速运动目标模型设计子脉冲匹配滤波器,对高速运动目标回波来说是失配的. 采用驻相点法容易导出子脉冲匹配滤波器频谱和回波子脉冲频谱的相位分别为 $-\pi f^2/\mu$ 和 $-\pi f^2/(\alpha_m(t_i)^2\mu)$ (忽略初相且 $|f| \leq B_s/2$), 因此子脉冲失配滤波引入的相位误差为

$$\delta_{c,m}(f, t_i) = -\frac{\pi f^2}{\mu} \left(1 - \frac{1}{\alpha_m(t_i)^2}\right) \leq \pi T_p v_m(0) / \frac{c}{B_s} = \eta \quad |f| \leq \frac{\Delta f}{2} \quad (15)$$

失配滤波引入的误差为子脉冲频谱的二次相位误差. 可以看出,如果在一个脉冲宽度内目标运动的距离同子脉冲的距离分辨率比值 η 很小,那么失配滤波的影响可以忽略,或者说子脉冲的时宽带宽积越小,失配滤波的影响也就越小.

$\Delta\delta_{d,m}(t_i)$ 和 η 共同决定了目标的高分辨距离像的栅瓣电平,这里给出一些定性结论:

(1) 式(19)对高分辨距离像的栅瓣电平的影响

由下式决定

$$\zeta = | [\Delta\delta_{d,m}(t_i)/2\pi] - \Delta\delta_{d,m}(t_i)/2\pi | \quad (16)$$

(2) 如果失配滤波的影响可以忽略, $\zeta < 0.03$ 时, 高分辨距离像的栅瓣电平小于 -30 dB;

(3) $\zeta = 0$ 时, $\eta < 0.05$ 失配滤波引起的距离像最高栅瓣电平小于 -30 dB.

是否采用高速运动目标模型补偿回波信号, 由式(15)、式(16)计算值的大小和雷达系统允许的最高栅瓣电平决定.

4 仿真分析

为了验证算法的正确性, 对本文提出的算法进行仿真分析. 仿真中雷达参数设置如下: 工作中心频率 $f_0 = 35$ GHz, 跳频脉冲数 $N = 10$, 频率步进量 $\Delta f = 100$ MHz, 子带带宽 $B_s = 120$ MHz, 子脉冲宽度 $T_p = 30$ μ s, 雷达的合成带宽为 $1\ 120$ GHz, 雷达的 A/D 转换速度为 200 MHz, 雷达每个子脉冲的采样点数为 $7\ 333$, FFT 点数也是 $7\ 333$, 雷达脉冲重复频率 $F_r = 1/T_r = 1\ 200$ Hz. 采用海明窗对拼接谱进行加权.

根据上述参数, 子脉冲经 FFT 后的频域采样间隔约为 27.27 KHz, 而各子脉冲频谱的搬移量为 100 MHz 的整数倍, 因此必须在时域补偿频谱.

仿真目标为单散射点目标, 距离雷达 100 km. 目标的初始速度和加速度分别为 $v_0 = 200$ m/s, $a = 0$ m/s² 和 $v_0 = 5\ 000$ m/s, $a = 400$ m/s² 时, 采用低速运动目标模型和高速运动目标模型进行运动补偿, 仿真结果如图 2、图 3 所示, 图中横坐标零点对应的距离为 100 km, 两种速度下 ζ 的值分别为 $0.000\ 6$ 和 0.042 , η 分别为 0.001 和 0.05 , 若要求目标距离像的主副瓣比大于 30 dB, 前者可以采用低速运动目标模型补偿, 而后者则需要采用高速运动目标模型补偿. 采用低速运动模型补偿回波后, 得到的距离像的最高栅瓣电平分别为 -42.6 dB 和 -26 dB. 采用本文提出的高速运动模型补偿回波后, 距离像中的栅瓣消失, 旁瓣电平在 -42 dB 以下, 与海明窗的旁瓣电平基本一致.

步进频率体制雷达对目标运动速度补偿精度的要求很高, 可以获得单个刚体目标的距离像, 却不能同时获得多个目标的距离像, 这一点可以通过仿真验证. 表 1 列出了 4 个散射点的运动参数, 它们的反射强度相同. 1 号和 2 号散射点的运动参数相同, 距离相差 20 m, 它们代表同一运动目标上的两个散射点; 3 号点和 4 号点速度分别增大了 10 m/s 和 100

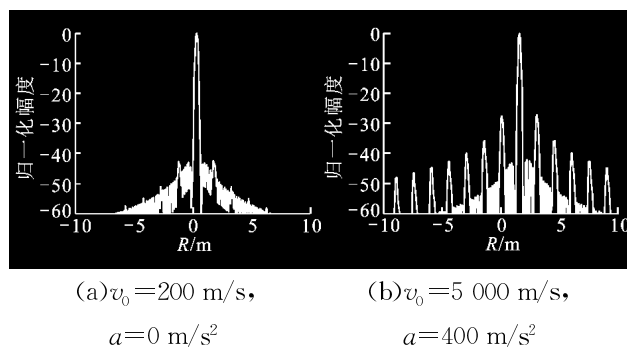


图 2 采用低速运动模型补偿得到的高分辨距离像

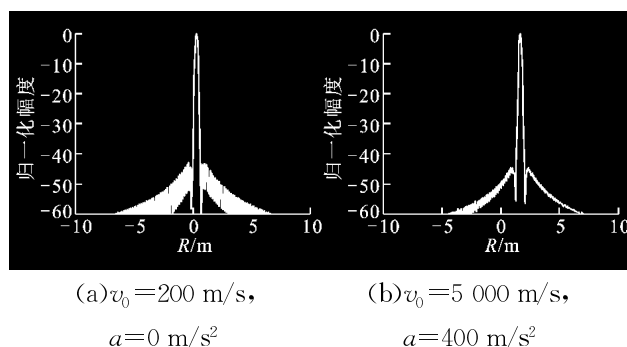


图 3 采用高速运动模型补偿得到的高分辨距离像

m/s, 它们分别代表另外两个运动目标. 以 2 号散射点为基准进行运动补偿, 得到如图 4 所示的距离像, 图中横坐标零点对应的距离为 100 km, 1 号和 2 号散射点的处理结果很好, 而 3 号和 4 号散射点的距离像都出现了畸变, 即主瓣展宽、主瓣幅度降低和栅瓣电平提高, 且运动参数补偿误差越大, 这种畸变越严重.

表 1 图 3 中散射点的运动参数

散射点序号	距离/ m	速度/ m · s ⁻¹	加速度/ m · s ⁻²
1	$10^5 - 20$	$5\ 000$	400
2	10^5	$5\ 000$	400
3	$10^5 + 60$	$5\ 000 + 10$	400
4	$10^5 + 80$	$5\ 000 + 100$	400

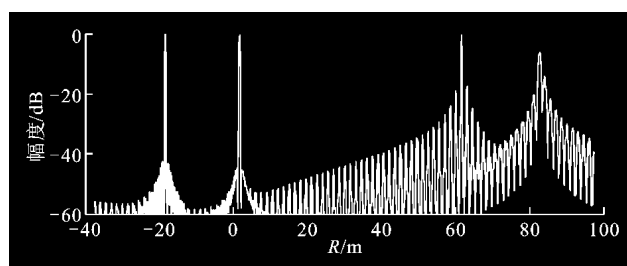


图 4 多目标的距离像

5 结 论

基于高速运动模型的频域合成带宽法根据回波的精确模型建立补偿因子,因此对高速运动目标回波补偿后不存在子脉冲频谱的初相补偿误差和子脉冲匹配滤波的失配误差,从而得到了无栅瓣的高分辨距离像.通过先在时域补偿频谱搬移误差再在频域进行频谱搬移的方式,消除了传统频域合成带宽方法中频谱搬移精度受频域采样间隔限制的问题.仿真结果表明,在采用海明窗对拼接谱加权的情况下,利用基于高速运动模型的频域合成带宽法处理高速运动目标回波得到的高分辨距离像的旁瓣电平在 -42 dB以下,与窗函数的理论旁瓣电平基本一致.

参考文献:

- [1] Wilkinson A J, Lord R T, Inggs M R. Stepped-frequency processing by reconstruction of target reflectivity spectrum [C]// Proceedings of the 1998 South African Symposium. Piscataway, USA: IEEE, 1998: 101-104.
- [2] Nel W, Tait J, Lord, R, et al. The use of a frequency domain stepped frequency technique to obtain high range resolution on the CSIR X-band SAR system [C]// African Conference in Africa. Piscataway, USA: IEEE, 2002: 327-332.
- [3] 姚萍, 郑天垚, 王贞松. 线性调频步进式合成孔径雷达系统的信号处理[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(2): 159-162.
Yao Ping, Zheng Tianyao, Wang Zhensong. Signal processing for the SAR system based on LFM subpulses with carrier frequencies increased step by step [J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(2): 159-162.
- [4] 张云华, 李海滨, 伍捷. 步进频率线性调频脉冲信号的子孔径处理方法[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(1): 1-6.
Zhang Yunhua, Li Haibin, Wu Jie. Subaperture processing method for stepped-frequency Chirp signal [J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(1): 1-6.
- [5] Zhang Yunhua, Wu Jie, Li Haibin. Two simple and efficient approaches for compressing stepped chirp signals [C]// Asia-Pacific Conference Microwave Proceedings. Piscataway, USA: IEEE, 2005: 327-332.
- [6] Berens P. SAR with ultra-high range resolution using synthetic bandwidth [C]// IEEE Geoscience Remote Sensing Symposium. Piscataway, USA: IEEE, 1999: 1752-1754.

(编辑 刘杨)