

径向速度对频率步进雷达目标距离像影响分析¹

李海英 杨汝良

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘 要 脉间频率步进波形是一种高距离分辨率信号形式,它通过子脉冲载频的步进变化来获得大的有效带宽,显著降低了系统的瞬时带宽和对接收机硬件的要求。但该信号对目标径向速度非常敏感,雷达与目标间的径向运动将造成距离像峰值的移动、衰减和发散,该文深入分析了目标径向速度对频率步进雷达一维合成距离像的影响,推导出不同距离取样分辨率条件下的距离像偏移因子和发散因子表达式,通过对复数距离像相位的分析,证明了采用补零法来增加逆傅里叶变换点数只能提高距离取样分辨率,而不会影响雷达的距离分辨率。

关键词 脉间频率步进波形,合成距离像,距离分辨率,距离取样分辨率,偏移因子,发散因子

中图分类号 TN951

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。高距离分辨率要求系统具有大的带宽。瞬时带宽的增加必将提高系统对硬件的要求。在现有的硬件水平约束下,脉间频率步进波形是一种工程上实用、方便灵活的高距离分辨率信号形式。载频步进变化的发射波形取消了对瞬时带宽和反射信号近似稳定的高采样率的要求,避免了某些脉冲压缩波形设计的实际问题^[1]。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^[2]。

由于频率步进波形对目标径向速度非常敏感,目标径向运动引起的距离多普勒耦合比较复杂,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^[3],因此必须进行速度补偿。本文首先深入分析了目标径向速度对频率步进信号一维距离像的影响。在此基础上推导出不同距离取样分辨率条件下的距离像偏移因子和发散因子表达式,并通过对复数距离像相位的分析,证明了频率步进信号确实可成倍提高距离分辨率,同时也说明了采用补零法提高取样分辨率只能使距离像细化,而不会改变距离分辨率。

2 径向速度对目标一维距离像的影响

2.1 脉间频率步进雷达回波相位分析^[1,3,4]

频率步进脉冲信号是一组载频以固定频率增量步进的单频脉冲串,可看成线性调频信号的离散化形式。对于具有 N 个子脉冲的频率步进波形而言,正交混频器输出的采样信号为

$$G_i = A_i e^{j\varphi_i} = A_i e^{-j2\pi f_i \tau(t)}, \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

相位展开后表示如下:

$$\varphi_i = -2\pi f_0 \frac{2R_0}{c} - 2\pi i \Delta f \frac{2R_0}{c} + 2\pi f_0 \frac{2v_i T_r}{c} + 2\pi i \Delta f \frac{2v_i T_r}{c} \quad (2)$$

其中 i 代表子脉冲号, f_0 为中心频率, Δf 为步进增量, R_0 为雷达与目标之间的初始距离, T_r 为脉冲重复周期。目标相对雷达的径向速度为 v , 下文中所提到的速度皆指径向速度。

¹ 2001-10-26 收到, 2002-01-14 改回

对于静止目标, 只有第一、第二相位项。第一项为常数, 脉间相参合成距离像时无实际意义; 第二项可以看成雷达发射与接收的延时 $2R_0/c$ 与脉间各个频率步进 $i\Delta f$ 的乘积, 相当于把径向距离转化成频移, 因此可通过 IDFT 再将频移变换到时间域, 得到静止目标的高分辨距离像; 第三相位项是目标运动引起的多普勒频移, 使距离像偏移静止目标; 第四相位项是速度与频率耦合项, 造成目标距离像幅值下降、主瓣展宽, 甚至波形发散失真。

2.2 目标复数距离像分析

对于发射的每组脉冲串, 正交混频器输出的信号代表了目标反射率在频率域的采样, 每组中的全部复数采样值经过 IDFT 处理即可形成目标的一维距离像^[1]。距离向处理时一般采用 IDFT 的快速算法 IFFT, N 取 2 的整数次幂。为了使距离像细节更直观清楚地显现出来, 常采用补零方法增加 IFFT 点数以提高距离像的取样分辨率, 达到距离像细化的目的。取 IFFT 点数为 $M = 2^p N$, $p = 0, 1, 2, \dots$ 。由 (1) 式可知当 $i \geq N$ 时, $G_i = 0$, 则 M 点 IFFT 处理后得到的归一化目标复数距离像为

$$H(l) = \sum_{i=0}^{N-1} \exp \left\{ j \frac{2\pi}{M} \left[\left(l - \frac{R_0}{\Delta r_m} + \frac{vT_r f_0 / \Delta f}{\Delta r_m} \right) i + \frac{vT_r i^2}{\Delta r_m} \right] \right\} \quad (3)$$

其中 l 为径向距离位置, $l = 0, 1, \dots, M-1$, $\Delta r_m = c/(2M\Delta f)$ 为距离取样分辨率。对 R_0 处静止目标而言, 复数距离像幅值可表示为

$$|H(l)| = \left| \sin \frac{\pi N}{M} \left(l - \frac{R_0}{\Delta r_m} \right) / \sin \frac{\pi}{M} \left(l - \frac{R_0}{\Delta r_m} \right) \right|, \quad l = 0, 1, \dots, M-1 \quad (4)$$

令 $l_p = R_0/\Delta r_m$, $t_l = l - l_p$, 则当 $t_l = \pm kM$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 时, $|H(l)|$ 有与 R_0 相关的峰值点^[5]。在每一个峰值点附近, 归一化后的压缩波形都具有 $\text{sinc}x$ 函数形状, 而且在每个峰值点附近当 $t_l = \pm kM \pm (M/N)$ 时 $|H(l)|$ 第一次过零, 通常以峰值点和第一次过零点间距 $(M/N)\Delta r_m$ 作为主瓣宽度, 因为它大约等于半功率点宽度^[6], 由此可得 N 个子脉冲频率步进信号的距离分辨率为

$$\Delta r = \frac{M}{N} \Delta r_m = \frac{M}{N} \frac{c}{2M\Delta f} = \frac{c}{2N\Delta f} \quad (5)$$

可见距离分辨率 Δr 只与子脉冲数 N 和频率步进增量 Δf 有关, 即与信号总带宽有关, 而与 IFFT 点数 M 无关。这也说明了距离分辨率是频率步进信号固有的特征, 增加 IFFT 点数, 只能提高距离取样分辨率, 使距离像细化, 并不能改变频率步进信号的距离分辨能力。此外, 回波信号的 M 点傅里叶逆变换, 相当于在频域以 $1/M$ 为间隔抽样, 而距离像在时间域则以 M 个距离取样单元为周期延拓。由于径向距离位置 l 有一定的取值范围, 只有当 $l = l_p - k_p M \in [0, M-1]$ 时目标距离响应会正确出现在距离像中, 所以初始距离 R_0 处的静止点目标在距离像中的位置是以 l_p 为中心, 以 M 为周期, 反向延拓 k_p 个周期后的所处的距离取样单元位置^[7]。

令 (3) 式相位中

$$\beta(i) = \frac{1}{M} \left[\left(l - \frac{R_0}{\Delta r_m} + \frac{vT_r f_0 / \Delta f}{\Delta r_m} \right) i + \frac{vT_r i^2}{\Delta r_m} \right] \quad (6)$$

由于频率步进信号实质上是线性调频信号的离散化形式, 所以可参照线性调频信号瞬时频率的求法, 得出目标距离像与步进阶数的关系:

$$l(i) = \frac{d\beta(i)}{di} = \frac{1}{M} \left(l - \frac{R_0}{\Delta r_m} + \frac{vT_r f_0 / \Delta f}{\Delta r_m} + \frac{2vT_r i}{\Delta r_m} \right), \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (7)$$

上式中第一项是径向距离位置；第二项为 $R_0/\Delta r_m$ ，表征初始距离 R_0 处静止目标的距离像的峰值位置；第三项为目标径向运动造成的多普勒频移，由 (2) 式可知，频移量 $f_d = 2vf_0/c$ ，若不进行动态补偿，距离像处理时就误把多普勒频移当作因距离产生的频移，造成目标距离像偏移静止目标位置 $vT_r f_0/(\Delta f \Delta r_m)$ 个距离取样单元；第四项是 v, i 耦合项，若不进行动态补偿， N 个子脉冲时间内可将目标峰值响应主瓣展宽 $2vNT_r/(\Delta r_m)$ 个距离取样单元。由此，定义距离取样单元 Δr_m 条件下距离像的偏移因子 L 和发散因子 P ：

$$L = (M/N)(vNT_r/\Delta r)(f_0/B) \tag{8}$$

$$P = (M/N)(2vNT_r/\Delta r) \tag{9}$$

当 $M = N$ 时，即距离取样分辨率等于距离分辨率时，就得到常规意义下的偏移和发散因子。

3 点目标仿真实验

仿真实验主要波形参数： $f_0 = 3.2\text{GHz}$ ， $\Delta f = 1\text{MHz}$ ， $N = 512$ ， $R_0 = 5\text{km}$ 。

实验 1 只考虑径向速度引起的目标距离像偏移因子，而不考虑发散因子。

(1) 目标接近雷达，径向速度从 0m/s 开始以 10m/s 递增至 40m/s 。 $2N$ 点 IFFT 变换得到目标距离像见图 1。图中 v 代表目标径向速度， l_p 代表目标一维距离像的峰值点位置。将不同速度的目标距离响应的峰值位置和理论计算相比较，得到表 1。由距离像可见：静止目标距离像的峰值在第 342 距离取样单元。随着速度的增加，运动目标距离像偏离静止目标距离像的距离亦增加，实验结果与理论值基本一致，误差小于一个距离取样单元；当 $v = 40\text{m/s}$ 时，距离像处于临界状态，旁瓣已经从第 0 个距离取样单元“回绕”到了第 1023 个取样单元。

(2) 目标远离雷达，径向速度从 0m/s 开始以 -20m/s 递增至 -80m/s 。 $2N$ 点 IFFT 变换得到目标距离像见图 2。将不同速度时的目标距离响应的峰值位置和理论计算相比较，归纳得出表 2。

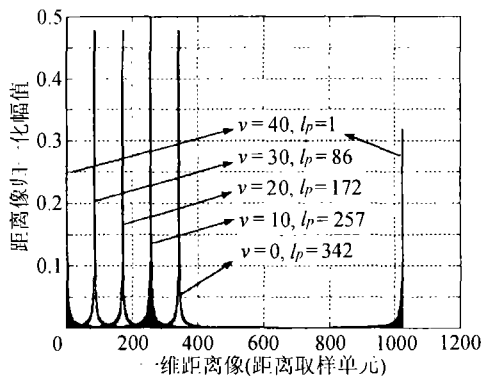


图 1 目标径向速度为正时，目标距离像变化

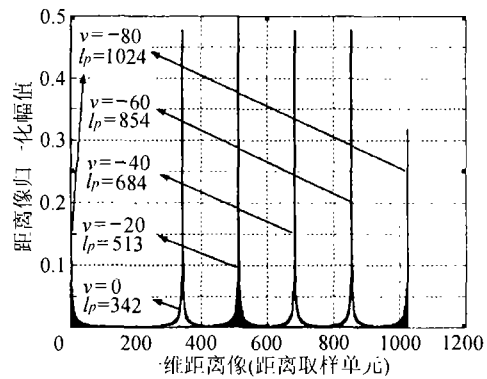


图 2 目标径向速度为负时，目标距离像变化

表 1 目标径向速度为正时，目标距离像峰值变化与理论偏移比较表

目标径向速度	0m/s	10m/s	20m/s	30m/s	40m/s
距离像偏移量	0	-85	-170	-256	-341
理论偏移量	0	-85.3333	-170.6667	-256.0000	-341.3333
实际与理论偏差	0	-0.3333	-0.6667	0.0000	-0.3333

表 2 目标径向速度为负时, 目标距离像峰值变化与理论偏移比较表

目标径向速度	0m/s	-20m/s	-40m/s	-60m/s
距离像偏移量	0	171	342	512
理论偏移量	0	170.6667	341.3333	512.0000
实际与理论偏差	0	-0.6667	-0.3333	0.0000

由运动目标距离像可见, 当速度为 -80m/s 时, 距离像出现回绕。按照理论计算, 速度为 -80m/s 时, 目标距离像峰值应向距离延迟增大的方向偏移 683 个取样单元。由于 $342 + 683 = 1025$ 已超出径向距离的取值范围, 又因为距离像具有周期性, $1024 + 1 = 1025$, 使得该目标的距离响应回绕到距离像中的第 1 个距离取样单元。

实验 2 只考虑径向速度引起的目标距离像发散因子, 而不考虑偏移因子。

(1) 目标接近雷达, 径向速度从 0m/s 开始以 10m/s 递增至 50m/s 。N 点 IFFT 变换得到目标距离像见图 3, 不同速度目标响应的主瓣展宽和理论计算对比见表 3。

(2) 目标远离雷达, 径向速度从 0m/s 开始以 -20m/s 递增至 -100m/s 。N 点 IFFT 变换后得到目标距离像见图 4。将距离像中不同速度的目标响应峰值展宽和理论计算相比较, 得出表 4。

由此实验可见: 距离响应峰值幅度大大降低, 波形发散程度与目标径向速度成正比。

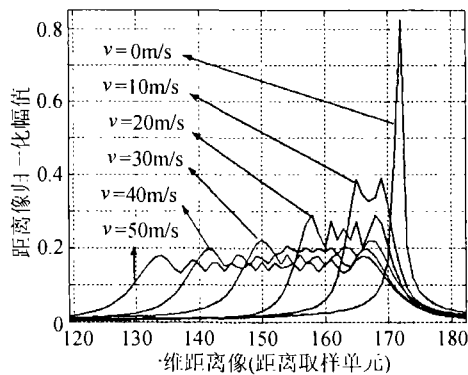


图 3 目标速度为正, 距离像主瓣展宽变化

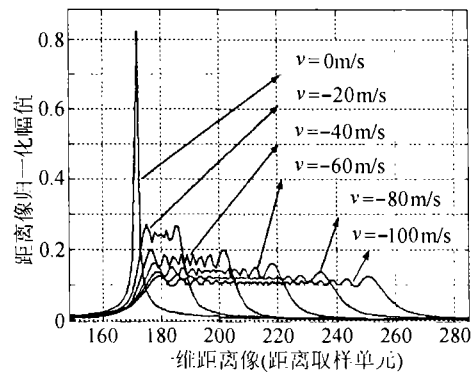


图 4 目标速度为负, 距离像主瓣展宽变化

表 3 目标径向速度为正时, 目标距离像展宽对照表

目标径向速度	0m/s	10m/s	20m/s	30m/s	40m/s	50m/s
距离像主瓣宽度	1	7	15	24	31	39
理论展宽量	1	8.7381	17.4763	26.2144	34.9525	43.6907
实际与理论偏差	0	-1.7381	-2.4763	-2.2144	-3.9525	-4.6907

表 4 目标径向速度为负时, 目标距离像展宽对照表

目标径向速度	0m/s	-20m/s	-40m/s	-60m/s	-80m/s	-100m/s
距离像主瓣宽度	1	15	31	49	66	82
理论展宽量	1	17.4763	34.9525	52.4288	69.9051	87.3813
实际与理论偏差	0	-2.4763	-3.9525	-3.4288	-3.9051	-5.3813

实验 3 同时考虑径向速度引起的目标距离像发散因子和偏移因子。

(1) 目标接近雷达, 径向速度从 0m/s 开始以 10m/s 递增至 50m/s 。作 N 点 IFFT 运算得到目标距离像, 放大后见图 5。与图 1 比较发现, 由于主瓣的展宽, 使 40m/s 处临界的目标距离像出现回绕, 这使目标所能正确显示的目标速度范围减小。

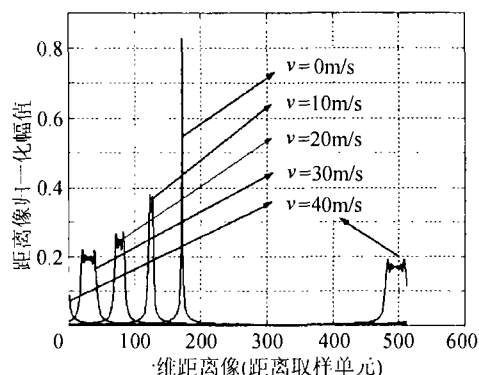


图 5 目标速度为正时引起的距离像偏移和展宽

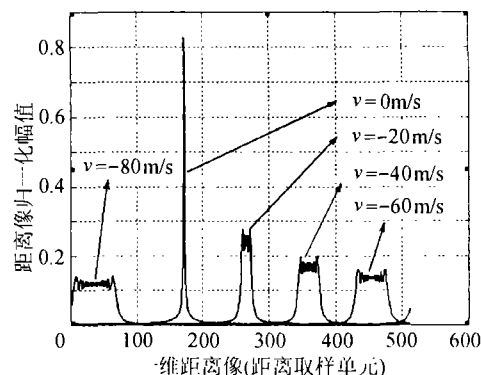


图 6 目标速度为负时引起的距离像偏移和展宽

(2) 目标远离雷达, 径向速度从 0m/s 开始以 -20m/s 递增至 -80m/s 。作 N 点 IFFT 运算得到目标距离像, 放大后见图 6。与图 2 比较发现, 由于主瓣的展宽, 使 -80m/s 处原本临界的目标距离像出现回绕。

由以上 3 组实验可以得出如下结论: (1) 目标径向运动引起的距离像偏移和展宽与径向速度成正比; 目标接近雷达时, 距离像向距离延迟减小的方向偏移展宽; 目标远离雷达时, 距离像向距离延迟增大的方向偏移展宽。(2) 目标距离像只能对一定径向速度范围内的运动目标成像, 一旦目标速度超过此范围, 将出现距离像环绕现象, 形成假目标或称“鬼影”, 将降低图像质量^[2]。若以此图像来进行目标速度估计, 则会出现严重的误差, 无法达到较好的速度补偿效果。(3) 在频率步进信号参数设计时, 要考虑目标速度对峰值的偏移和响应主瓣的展宽影响, 应为目标速度检测、合成孔径雷达成像选择合适的波形参数。

4 结束语

本文明确了目标径向速度对目标一维距离像的影响, 得出不同距离取样分辨率下的运动目标偏移因子和发散因子表达式, 仿真实验结果与理论计算一致。通过静止目标的复数距离像的推导证明: 脉间频率步进波形在不提高发射信号瞬时带宽的情况下确实能将距离分辨率提高 N 倍; 距离取样分辨率的提高只能使距离像细化, 并不会改变距离分辨率; 距离像存在周期回绕问题。本文的研究为频率步进波形参数设计、速度估计、频率步进波形合成孔径处理奠定了有益的基础。

参 考 文 献

- [1] D. R. Wehner, High Resolution Radar (2nd ed), London, Artech House, 1994, Chaper5.
- [2] R.T. Lord, M. R. Inngs, High resolution VHF SAR processing using synthetic range profiling, Proc. IEEE Geoscience Remote Sensing Symp., IGARSS'96, Lincoln, Nebraska, June 1996, vol.1, 454-456.
- [3] G. S. Gill, Step frequency waveform design and processing for detection of moving targets in clutter, IEEE International Radar Conference, Washington D. C., May 1995, 573-578.
- [4] 安建平, 张润宁, 白克壮, 应用于 SAR 的一种波形及多普勒效应补偿技术, 系统工程与电子技术, 2000, 22(1), 59-62.
- [5] K. Ruttenberg, *et al.*, High range resolution by means of pulse to pulse frequency shifting, EAS-CON'68 Record, Washington D. C., Sep. 1968, 47-51.
- [6] 张澄波, 综合孔径雷达原理、系统分析与应用, 北京, 科学出版社, 1989, 30-33.

- [7] 吴湘淇, 信号、系统与信号处理(上), 北京, 电子工业出版社, 1996, 118-122.

ANALYSIS OF RADIAL VELOCITY EFFECT ON RANGE PROFILE OF STEPPED-FREQUENCY WAVEFORM

Li Haiying Yang Ruliang

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Stepped-frequency is a kind of high range resolution waveform, which is used to obtain broad effective bandwidth by sequentially changing of carrier frequency over sub-pulses in one burst, so it reduces requirements on instantaneous bandwidth and receiver. However, this waveform is so sensitive to radial velocity between radar and targets that the loss of range resolution and loss of SNR are brought to SAR system. In the paper, the effect of radial velocity on synthetic range profile is discussed thoroughly first, then two important parameters, target range shift and range spread, are defined in terms of the phase of synthetic range function. Furthermore, the enhancement of the range sample resolution only makes the synthetic range profile present more details, but it will not change the range resolution.

Key words Stepped frequency waveform, Synthetic range profile, Range resolution, Range sample resolution, Target range shift, Target range spread

李海英: 女, 1974 年生, 博士生, 主要研究方向为超宽带信号设计与超宽带合成孔径雷达成像技术.

杨汝良: 男, 1943 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事微波遥感、合成孔径雷达总体设计、信号处理等方面的研究工作.