

毫米波调频步进雷达运动补偿方法研究

王桂丽^{1,2}, 李兴国¹

(1.南京理工大学电子工程与光电技术学院,南京 210094; 2.安徽师范大学物理与电子信息学院,安徽芜湖 241000)

[摘要] 毫米波调频步进(chirp-step frequency, Chirp-SF)雷达是一种距离高分辨率雷达,但是存在严重的距离速度耦合问题,所以实现运动目标的距离高分辨必须进行运动补偿。文章提出了一种把脉冲多普勒(Pulse Doppler)测速和基于 Chirp-SF 信号的时域相关法测速相复合的方法。仿真结果表明该方法测速精度高,算法简单,速度快。

[关键词] 毫米波雷达;调频步进;多普勒;运动补偿

[中图分类号] TN958.6 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009—1742(2008)07—0088—04

1 前言

提高距离分辨率是现代雷达应用的一个重要研究方向,而获得高分辨距离像,必须采用大带宽信号,因而频率步进信号近年来得到了较深入的研究^[1]。雷达采用简单的频率步进信号时,在距离分辨率一定的前提下,要提高数据率,则必须增加频率步进量,而频率步进量又受发射脉冲时宽的限制。为解决这一矛盾,用线性调频信号作为频率步进信号的子脉冲,子脉冲的中心频率是步进的,即可构成调频步进(chirp-step frequency, Chirp-SF)信号。相对于简单频率步进信号,调频步进信号能够保持步进频率信号能量和总带宽不变,减少步进阶梯数;在提高系统数据率的同时,减小相同速度情况下目标运动带来的距离走动和目标伪峰。调频步进信号是一种合成信号,它把线性调频信号和频率步进信号这两种高分辨率信号结合起来。然而调频步进信号仍然存在严重的距离—速度耦合,因此要获得高分辨距离像,还要进行运动目标速度补偿。

笔者提出了交叉发射调频步进信号和脉冲多普勒信号的方法,发射信号如图 1 所示。用 Chirp-SF 信号生成高分辨一维距离像,存在严重的距离—速

度耦合。毫米波信号多普勒频移大,故用脉冲多普勒信号测速精度高,但测速范围小;而基于 Chirp-SF 信号的时域相关法测速范围大,但精度低。笔者提出将二者复合,使得测速精度高,测速范围大,可以对 Chirp-SF 信号进行精确的速度补偿,形成高精度的一维距离像。信号处理流程如图 2 所示。

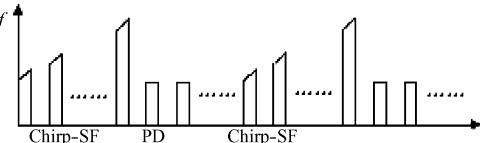


图 1 交替发射的 Chirp-SF 信号和 PD 信号

Fig.1 Transmitted Chirp-SF signal and PD signal by turns

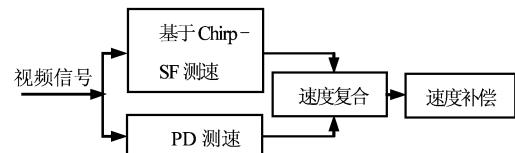


图 2 复合测速流程图

Fig.2 Flow chart of compound measurement of velocity

2 Chirp-SF 信号数学形式及其多普勒效应

2.1 Chirp-SF 信号数学形式

设调频步进信号子脉冲的个数为 N , 调频带宽

[收稿日期] 2007—02—05; 修回日期 2007—05—28

[基金项目] 安徽师范大学青年科学基金资助项目(2006xqn60)

[作者简介] 王桂丽(1979—),女,安徽太和县人,南京理工大学博士研究生,主要研究方向为信号处理与目标识别;李兴国(1940—),男,云南嵩明县人,教授,博士生导师,主要研究方向为毫米波精确探测及目标识别技术

为 B , 子脉冲宽度为 T_p , 调频斜率为 $K = B/T_p$, 脉冲重复周期为 T_r , 频率进步量为 Δf , 第一个子脉冲的中心载频为 f_0 , 则对于线性步进信号的第 i 个子脉冲的中心载频为 $f_i = f_0 + i\Delta f$, 其中 $i = 0, 1, \dots, N-1$, 雷达发射的第 i 个子脉冲信号为^[2]

$$s_i = \text{rect}\left[\frac{t - iT_r}{T_p}\right] \cdot$$

$$\exp[j\pi K(t - iT_r)^2] \exp(j2\pi f_i t) \quad (1)$$

雷达接收到点目标的第 i 个回波, 经过混频, 正交检波及归一化处理后的回波信号为

$$x_i(t) = \text{rect}\left[\frac{t - iT_r - \tau(t)}{T_p}\right] \cdot \exp\{j\pi K[t - iT_r - \tau(t)]^2\} \exp[-j2\pi f_i \tau(t)] \quad (2)$$

式中, $\tau(t) = \frac{2(R - vt)}{c} \approx \frac{2(R - viT_r)}{c}$ 为目标回波时延; R 为目标初始距离; v 为目标运动速度; c 为光速。

由式(2)可见, $\exp\{j\pi K[t - iT_r - \tau(t)]^2\}$ 是子脉冲线性调频信号, $\exp[-j2\pi f_i \tau(t)]$ 是由发射的频率步进信号的载频跳变引起的相位变化。基于视频信号的形式, 分两步进行脉冲压缩处理: 首先在各个线性调频子脉冲重复周期内作脉内压缩; 然后在脉冲重复周期之间作逆离散傅立叶变换(inverse discrete fourier transform, IDFT), 进行脉间压缩。式(3)和式(4)分别是对 Chirp-SF 信号的脉内压缩和脉间压缩结果。

$$x_i(t) = \sqrt{KT_p^2} \text{rect}\left[\frac{t_i + 2viT_r/c}{T_p}\right] \frac{\sin[\pi T_p(f_d + Kt_i)]}{\pi T_p[f_d + Kt_i]} \exp\{j\pi[-Kt_i^2 - 2f_i \tau(t) + (1/4)]\} \quad (3)$$

$$|x(n)| = \sqrt{KT_p^2} \cdot \left| \frac{\sin\{\pi[n - 2N\Delta f(R - iT_r v)/c]\}}{N \sin\{\pi[n/N - 2\Delta f(R - iT_r v)/c]\}} \right| \quad (4)$$

式中, $t_i = t - iT_r - 2R/c$; f_d 为多普勒频移; $f_d = 2v/\lambda$, λ 为发射信号波长。

2.2 Chirp-SF 信号的多普勒效应^[3~5]

2.2.1 运动对 Chirp 脉冲压缩的影响

式(3)中 $\text{rect}[(t_i + 2viT_r/c)/T_p]$ 表示脉压输出包络的峰值在不同脉冲重复周期间的移动, 假设可容忍的最大时移为半个脉压后的距离单元^[2], 即 $2vNT_r/c < 1/2B$, 则有

$$\Delta v_1 < c/4BNTr \quad (5)$$

当目标速度满足式(5)时, 脉压后输出信号幅度在 sinc 函数主瓣内, 幅度变化小于 4 dB, 则运动对 Chirp 脉冲压缩的影响可以忽略, 因此对脉间 IDFT 的影响也可以忽略。

2.2.2 运动对频率步进的影响

根据文献[3], 运动对频率步进的影响主要是形成了一次、二次相位误差, 二次脉压后, 一次相位误差造成耦合时移, 二次相位误差造成波形发散。其中, 一次相位补偿误差 $\Delta v_2 < c/4f_0 NT_r$, 二次相位补偿误差 $\Delta v_3 < c/(4N^2 \Delta f T_r)$ 。

3 时域相关法和 PD 复合测速

3.1 时域相关法测速^[6]

设雷达发射 Chirp-SF 信号参数为: 载频 $f_0 = 95$ GHz, 跳频 $\Delta f = 20$ MHz, 脉冲步进数 $N_1 = 16$, $B_m = \Delta f$, 脉冲宽度 $T_p = 1$ μs, 脉冲周期 $T_r = 20$ μs, 则距离分辨率为 0.47 m, 如无特别说明, Chirp-SF 信号仿真均用上述参数。代入上述参数, 可得 $\Delta v_1 < 11.700$ m/s, $\Delta v_2 < 2.46$ m/s, $\Delta v_3 < 732$ m/s, 所以, 速度对子脉冲的影响可以忽略, 但对一次相位误差补偿的要求很高。

因为速度对 Chirp 子脉冲的影响可以忽略, 所以脉间 Chirp 信号可以看成是常数, 即

$$x_i(t) = D \cdot \text{rect}\left[\frac{t - iT_r - \tau(t)}{T_p}\right] \exp[-j2\pi f_i \tau(t)], \\ D = \exp\{j\pi K[t - iT_r - \tau(t)]^2\}.$$

此时考虑目标两组 Chirp-SF 脉冲回波信号, 其内部脉冲回波基带相位分别为 φ_i 和 φ_i :

$$\varphi_i = -2\pi f_i \frac{2}{c} \left[R - \frac{2R}{c} v - iT_r v \right], \\ -\varphi_i = -2\pi f_i \frac{2}{c} \left[R - \frac{2R}{c} v - iT_r v - \Delta T v \right]$$

中, ΔT 为两 Chirp-SF 回波脉冲的时间差。

令 $\varphi = \varphi_i - \varphi_i = (-4\pi/c)f_i \Delta T v$, $x(i) = \exp(j\varphi)$, $i = 0, 1, \dots, N_1 - 1$ 。对 $x(i)$ 作快速傅立叶逆变换(IFFT)并求模:

$$|y(k)| = B \left| \frac{\sin[\pi(N_1 l - k)]}{\sin[\pi(l - k/N_1)]} \right|, \text{ 式中 } l = \text{round}\left[\frac{2\Delta f \Delta T v}{c}\right], \text{ round 为四舍五入取整数。当 } k = l \text{ 时, } |y(k)| \text{ 有最大值。速度分辨率 } \Delta v = \frac{c}{2N_1 \Delta f \Delta T}, \text{ 无模糊测速范围 } v \in [0, \Delta v].$$

$\left[-\frac{c}{4\Delta f \Delta T}, \frac{c}{4\Delta f \Delta T} \right]$ 。从处理的实时性和速度分辨率来考虑,增大 ΔT ,可以提高算法的采样分辨率和测速精度,但同时减小了无模糊测速范围。如果 ΔT 较小,可以增加无模糊测速范围,减小计算量,但会降低测速精度,增加了统的成本和复杂度。考虑到工程实现,取 ΔT 为4个帧周期时间。代入参数得速度分辨率 $\Delta v = 73.2$ m/s,测速范围为(-586 m/s, 586 m/s)。测速范围大,但速度分辨率低。

3.2 PD 测速^[7]

发射一组 N_2 个脉冲序列,载频为 f_0 ,则发射脉冲表达式为 $s(t) = \sum_{i=1}^{N_2} \text{rect}\left(\frac{t - iT_r}{T_p}\right) \exp(j2\pi f_0 t)$;回波信号经过混频,及归一化处理得视频采样信号为 $x(i) = \exp(j2\pi iT_r f_d)$, $f_d = \frac{2v}{\lambda} = \frac{2vf_0}{c}$,式中, λ 为载波波长, f_d 为多普勒频移。

对回波信号作傅立叶变换提取多普勒频率:

$$|Y(k)| = \left| \frac{\sin[\pi(N_2 T_r f_d - k)]}{\sin[\pi(T_r f_d - \frac{k}{N_2})]} \right|, \text{ 所以当 } k = \text{round}(N_2 T_r f_d) \text{ 时,回波达到最大值;测速精度 } f_d = \frac{1}{N_2 T_r}, \Delta v = \frac{c}{2N_2 f_0 T_r} \text{ 无模糊测速范围} \left[-\frac{c}{4f_0 T_r}, \frac{c}{4f_0 T_r} \right].$$

设雷达发射PD信号参数:载频 $f_0 = 95$ GHz,脉冲数 $N_2 = 64$,脉冲宽度 $T_p = 1 \mu\text{s}$,脉冲周期 $T_r = 20 \mu\text{s}$ 。代入参数,得速度分辨率 $\Delta v = 1.2$ m/s,满足一次相位误差补偿的要求;测速范围为(-39.5 m/s, 39.5 m/s)。可见速度分辨率较高,但测速范围小,存在严重的测速模糊。因此必须把基于Chirp-SF的时域相关法测速与PD测速的方法结合起来,才能精确得到速度值。

3.3 复合测速

设时域相关法测速和PD测速测得的速度分别为 v_1, v_2 ,则实际速度值为

$$v = v_2 + kf_r c / 2f_0 \quad (6)$$

式中, k 为任意整数; f_r 为发射多普勒脉冲信号的频率, $f_r = 1/T_r$,令 $v_1 = v_2 + kf_r c / (2f_0)$,则得 $k = \text{round}\left[\frac{2f_0(v_1 - v_2)}{f_r c}\right]$,把 k 值代入式(6),求出速度精确值,实现距离高分辨。由此得出速度分辨率为

1.2 m/s,最大测速范围为(-586 m/s, 586 m/s),显然这满足3.1节所述的速度补偿要求。

4 仿真实验

仿真目标散射点分别在542 m, 543 m, 543.5 m处,图3、图4分别表示目标速度为0 m/s, 180 m/s时的距离像,图5为目标以180 m/s的速度运动时,用

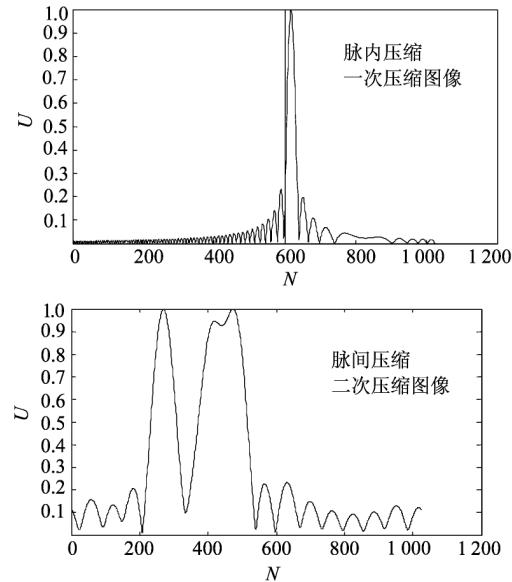


图3 距离像($v=0$ m/s)

Fig.3 Range profiles($v=0$ m/s)

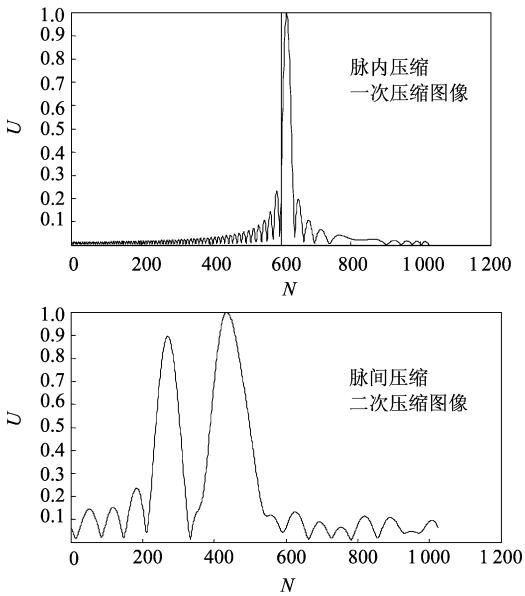


图4 距离像($v=180$ m/s)

Fig.4 Range profiles($v=180$ m/s)

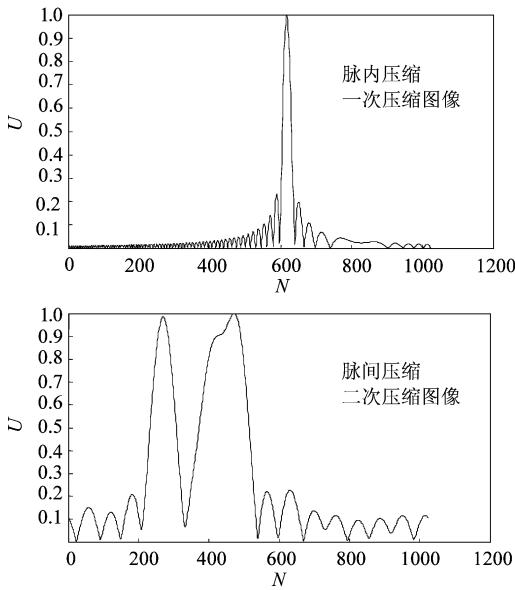


图 5 速度补偿后的距离像($v = 180 \text{ m/s}$)

Fig. 5 Range profiles after motion compensation
($v = 180 \text{ m/s}$)

复合测速方法进行速度补偿后的距离像。在图 3 至图 5 中,纵坐标是回波信号经压缩后输出的归一化电压,用 U 表示;横坐标表示 IDFT 变换点数(对应目标的距离),用 N 表示。从图 3、图 4 看出,速度对一次压缩脉冲主瓣宽度和峰值基本没有影响,这说明 Chirp 信号对目标运动不敏感;但是二次压缩时,明显地有峰值走动,3 个散射点,只有 2 个峰值,并且峰值降低,旁瓣电平增加,这将给后端的测距、目标识别等带来误差。经过速度补偿后,如图 5 所示,

消除了峰值走动,旁瓣电平也被抑制,与图 3 基本一致。由于该方法同时利用了第一帧和第 4 帧的信号来实现速度补偿,因此进行第一次速度估计需要通过发射 4 帧信号来实现,但以后每次速度估计可在每帧发射信号时间内完成,当然也可以根据工程需要,适当修改时间 ΔT 。可见这种测速方法完全可以满足一次补偿误差的要求,速度补偿效果好,并且算法简单,处理时运行速度快。

5 结语

文章提出了一种把 PD 测速和基于 Chirp-SF 信号的时域相关法测速相复合的方法,它对毫米波动目标一维距离像进行精确的运动补偿。仿真实验证明,这种方法的补偿效果好、速度快。利用该方法得到的目标一维距离像,距离分辨率高,可以应用于对毫米波雷达目标进行精确识别,测距等处理。

参考文献

- [1] 毛二可,龙 腾,韩月秋. 频率步进雷达数字信号处理[J]. 航空学报,2002,6(22):16—25
- [2] 王 磊,彭稳高,陈图强. 调频步进信号处理方法探讨[J]. 现代雷达,2002,3(6):60—62
- [3] 向敬成,张明友. 雷达系统[M]. 北京:电子工业出版社,2001
- [4] 张 群,张 涛,张守宏. 运动目标环境下的调频步进信号分析[J]. 西安电子科技大学学报,2001,28(2):220—224
- [5] 龙 腾,毛二可. 调频步进雷达信号分析与处理[J]. 电子学报,1998,12(1):84—88
- [6] 刘 静,李兴国,李 跃. 毫米波 Costas 编码雷达标动目标一维距离像运动补偿[J]. 红外与毫米波学报,2005,24(5): 344—347
- [7] 毛士艺. 脉冲多普勒雷达[M]. 北京:国防工业出版社,1990

Study on motion compensation method for MMW Chirp-SF radar

Wang Guili^{1,2}, Li Xingguo¹

(1.School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science &Technology, Nanjing 210094, China; 2. The College of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000, China)

[Abstract] MMW Chirp-SF radar is a kind of radar to get high range resolution, but the problem of range-velocity coupling is serious. So it is necessary to carry out the motion compensation in order to increase the range resolution of moving target. This paper puts forward a velocity measurement method compounding the Pulse Doppler velocity measurement and the time-domain correlation method based on Chirp-SF signal. The simulations results show that this method can be used to measure velocity accurately with simple arithmetic and high speed.

[Key words] MMW radar; Chirp-SF; Doppler; motion compensation