

文章编号: 1001 - 9014(2008)03 - 0190 - 04

频率步进和脉冲多普勒复合测速研究

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, 江苏 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:毫米波频率步进 (Step-Frequency) 雷达是一种距离高分辨率雷达. 实现运动目标的距离高分辨必须进行运动补偿, 故提出了一种基于频率步进和脉冲多普勒体制复合测速的方法. 仿真结果表明该方法测速精度高, 抗噪性能好, 算法简单, 速度快.

关键词:毫米波雷达; 运动补偿; 一维距离像; 频率步进; 脉冲多普勒

中图分类号: TN958.3 **文献标识码:** A

COMPOUND APPROACH OF MEASURING VELOCITY BASED ON STEP-FREQUENCY AND PULSE DOPPLER SYSTEM

WANG Gui-Li^{1,2}, LI Xing-Guo¹

(1. School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, NJUST, Nanjing 210094, China;
2. School of Electronic Information Engineering, Wuhu 241000, China)

Abstract: Millimeter wave (MMW) step frequency radar is a kind of high range resolution radar. Motion compensation is necessary in improving resolution of moving target. Based on the approach of step-frequency and pulse Doppler system for motion compensation, a compound approach for measuring velocity was developed. Simulations show that this method is real-time and high efficient, and the method can accomplish accurate estimation of target's velocity and it has good anti-noise performance.

Key words: MMW radar; motion compensation; 1-D range profile; step frequency; pulse Doppler

引言

高分辨率雷达要求雷达系统具有大的带宽, 在现有的硬件水平限制下, 频率步进 (Step-Frequency (SF)) 波形可以在保证高分辨率的前提下, 具有较窄的瞬时带宽, 降低了对接收机和信号处理器件的要求, 易于工程实现, 具有距离高分辨特性, 对于目标的检测、截获、跟踪具有明显优势, 但是存在严重的距离-速度耦合; 而脉冲多普勒 (Pulse Doppler (PD)) 信号主要利用了目标回波的频率特性, 尤其是对毫米波信号, 波长短, 回波信号的多普勒频移大, 易于检测. 交叉发射 SF 帧信号和 PD 帧信号, 并通过 SF 时域相关法测速和 PD 测速复合的方法来进行运动参数估计, 提高测速精度, 减小速度补偿误差, 实现高分辨的一维距离像, 以便进行精确测距和目标识别等; 同时 PD 波形还可以通过速度实现多目标分辨.

1 频率步进 (Step-Frequency) 雷达高分辨一维距离像

雷达信号体制为交叉发射频率步进信号和脉冲多普勒信号, 毫米波 PD 信号对多普勒频移敏感, 通过设置参数, 可以达到很高的测速精度, 从而对 SF 回波速度补偿误差小, 实现高分辨的一维距离像. 雷达的发射信号如图 1 所示.

1.1 基本处理及其多普勒效应

毫米波雷达发射的一组频率步进脉冲序列信号, 其数学表达式为:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t-nT_p}{T_p}\right) \exp(j2\pi n t), \quad (1)$$

式中: $f_n = f_0 + n f$,

$$\text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) = \begin{cases} 1, & -T_p/2 < t < T_p/2 \\ 0, & \text{others} \end{cases}$$

收稿日期: 2007 - 10 - 11, 修回日期: 2008 - 01 - 18

Received date: 2007 - 10 - 11, revised date: 2008 - 01 - 18

基金项目: 总装备部预研基金 (9140A01020107BQ0211); 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, 安徽太和人, 南京理工大学在读博士, 主要从事信号处理与目标识别研究.

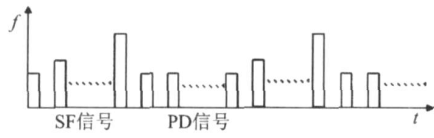


图 1 交替发射的 SF信号和 PD信号
Fig 1 Transmitted SF signal and PD signal by turns

f_0 为初始载频, f 为跳频步长, N 为脉冲个数, T_p 为脉冲宽度, T_r 为脉冲周期.

对距离为 R , 径向速度为 v 的运动点目标回波信号为

$$x(t) = \sum_{n=0}^{N-1} A_n \text{rec}\left(\frac{t - nT_r}{T_p}\right) \exp(j2\pi f_n(t - \tau)) \quad (2)$$

式中 τ 为目标回波延时, A_n 为回波幅度.

用与发射脉冲信号载频相同的相参本振进行混频, 经过 I/Q 正交双通道滤波及归一化处理, 可得目标回波的复包络视频输出为:

$$x(n) = \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j2\pi f_n \tau) = \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j2\pi n \tau) \quad (3)$$

$$\tau = -2\pi f_n \left[R - nT_r v - \frac{2R}{C} \right], C \text{ 为光速.}$$

去掉与速度无关的项, 相位中由于目标运动形成的干扰项为

$$\tau_n = 2 \left(2f_0 v n T_r / C + 2n^2 f v T_r / C + 4n f v R / C^2 \right) \quad (4)$$

假设可以容忍的测距误差为合成后的半个距离单元, 文献 [2], [3] 详细分析了以上各项对合成结果的影响, 与距离有关的相位因子 $2 \cdot 4n f v R / C^2$, 主要造成一维距离像峰值的走动在典型参数下, 造成的距离走动远小于半个合成后的距离单元, 所以其影响可以不计; 一次相位项 $2 \cdot 2f_0 v n T_r / C$ 主要造成一维距离像峰值的走动, 补偿速度误差应满足 $v1 < C / 4f_0 N T_r$; 二次相位项 $2 \cdot 2n^2 f v T_r / C$ 将引起回波峰值的时移和回波能量的发散, 即导致距离像的失真, 展宽, 峰值下降, 则补偿速度误差应满足 $v2 < C / (8N^2 f T_r)$; 当加速度不为 0 时, 补偿加速度误差须满足 $a < C / 4N^2 f_0 T_r^2$.

设雷达发射 SF 信号参数为: 载频 $f_0 = 95\text{GHz}$, 调频 $f = 10\text{MHz}$, 脉冲步进数 $N = 64$, 脉冲宽度 $T_p = 100\text{ns}$, 脉冲周期 $T_r = 20\mu\text{s}$ 则距离分辨率为 0.234m , 如无特殊说明, 以下 SF 信号仿真均用上列参数. 代入上述参数, 可得一次补偿误差 $v1 = 0.62\text{m/s}$, 二次补偿误差 $v2 = 45.78\text{m/s}$, 加速度补偿误差 $a = 481.86\text{m/s}^2$. 在工程上, 加速度值小于 481.86m/s^2

很容易满足, 速度补偿误差小于 45.78m/s 也容易实现; 而一次补偿要求很高.

1.2 时域相关法测速

考虑同一目标两个 SF 脉冲组回波信号, 其内部脉冲回波基带相位分别为: 1_n 和 2_n

$$1_n = -2\pi f_n \frac{2}{C} \left[R - \frac{2R}{C} v - nT_r v \right]$$

$$2_n = -2\pi f_n \frac{2}{C} \left[R - \frac{2R}{C} v - nT_r v - T_v \right]$$

$$n = 1_n - 2_n = -2\pi f_n \frac{2}{C} T_v = \frac{-4}{C} (f_0 T_v + n f T_v)$$

式中 T 为两 SF 回波脉冲的时间差.

$x(n) = \exp(j2\pi n \tau)$, $n = 0, 1, \dots, N-1$ 对 $x(n)$ 作 FFT

$$y(k) = B \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left(-j\frac{2\pi n f T v}{C}\right) \cdot \exp\left(j2\pi n \frac{k}{N}\right),$$

式中 $B = \exp\left(-j\frac{4}{C} f_0 T_v\right)$

$$|y(k)| = B \left| \frac{\sin\left(\frac{2N f T v}{C} - k\right)}{\sin\left(\frac{2 f T v}{C} - \frac{k}{N}\right)} \right| \quad (5)$$

当 $k = \frac{2N f T v}{C}$ 时, $|y(k)|$ 有最大值. 速度分辨率

$$v = \frac{C}{2N f T}$$

无模糊测速范围 $v \in \left[-\frac{C}{4 f T}, \frac{C}{4 f T} \right]$, 从处理的实时性和速度分辨率

来考虑, 拟选择 T 为两个帧周期^[1], 即为两组 SF 信号和两组 PD 信号时间之和. 代入参数得速度分辨率 $v = 30.52\text{m/s}$, 测速范围 $(-976.56\text{m/s}, 976.56\text{m/s})$. 可以看出测速范围可以满足工程要求, 但速度分辨率低.

1.3 多普勒测速

发射一组 N 个脉冲序列, 载频为 f_0 , 则单个发射脉冲表达式如下:

$$s(t) = \text{rec}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp(j2\pi f_0 t)$$

雷达回波 $x(t) = \text{rec}\left(\frac{t - \tau}{T_p}\right) \exp(j2\pi f_0 (t - \tau))$, 式

中 τ 是回波延时, $\tau = -2\pi \left[R - \frac{2R}{C} v - nT_r v \right]$

经过混频, 及归一化处理得视频采样信号:

$$x(i) = A \exp(j2\pi n T_r f_d), f_d = \frac{2v}{C} = \frac{2v f_0}{C}$$

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

$$Y(k) = A \sum_{i=0}^{N-1} \exp(j2\pi n T_r f_d) \cdot \exp\left(j2\pi n \frac{k}{N}\right), \text{所}$$

$$\text{以: } |Y(k)| = A \left| \frac{\sin\left(\frac{(NT_r f_d - k)}{T_r f_d - \frac{k}{N}}\right)}{\sin\left(\frac{(NT_r f_d - k)}{T_r f_d - \frac{k}{N}}\right)} \right|$$

所以当 $k = \text{round}(NT_r f_d)$ 时, 回波达到最大值.

round 函数: 四舍五入取整数.

$$\text{测速精度 } f_d = \frac{1}{NT_r}, \quad v = \frac{1}{2NT_r}, \text{ 无模糊测速范}$$

$$\text{围} \left[-\frac{1}{2}, \frac{N}{2NT_r}, \frac{1}{2}, \frac{N}{2NT_r} \right].$$

设雷达发射 PD 信号参数: 载频 $f_0 = 95\text{GHz}$, 脉冲数 $N = 128$, 脉冲宽度 $T_p = 1\mu\text{s}$, 脉冲周期 $T_r = 20\mu\text{s}$ 与 SF 信号相比, PD 发射信号脉冲数增加了, 这样可以减少雷达系统本身的复杂性, 且提高速度分辨率. 代入参数, 得速度分辨率 $v = 0.62$, 满足一次相位误差补偿的要求^[2,3]; 测速范围 $(-38.5\text{m/s}, 38.5\text{m/s})$. 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 SF 的时域相关法测速和 PD 测速的方法结合起来, 才能精确得速度值.

设时域相关和多普勒测速测得的速度分别为 v_1, v_2 , 则实际速度值

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

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 0.62m/s , 最大测速范围 $(-976.56\text{m/s}, 976.56\text{m/s})$, 显然这满足上述速度补偿及工程的要求.

2 仿真实验

为了考察 SF 和 PD 复合测速方法的性能, 采用前面给出的参数对单点动目标, 在 $[-300\text{m/s},$

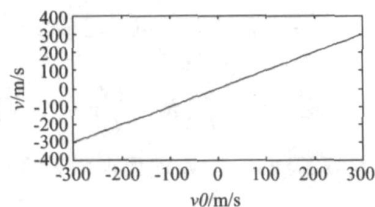


图 2 速度估计曲线 (SNR = 15dB)

Fig 2 Estimated velocity (SNR = 15dB)

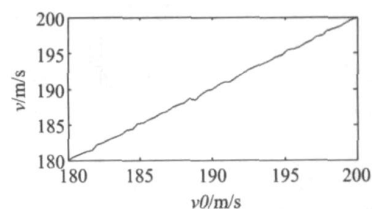


图 3 速度估计曲线局部放大 (SNR = 15dB)

Fig. 3 Magnified part (SNR = 15dB)

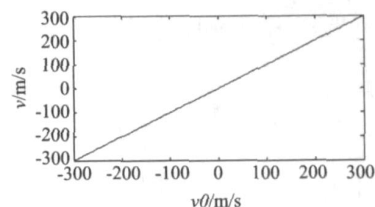


图 4 速度估计曲线 (SNR = 5dB)

Fig. 4 Estimated velocity (SNR = 5dB)

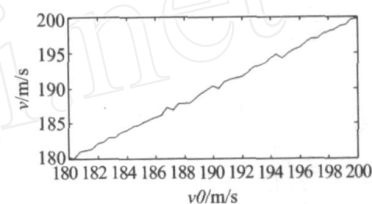


图 5 速度估计曲线局部放大 (SNR = 5dB)

Fig. 5 Magnified part (SNR = 5dB)

300m/s 的速度范围内进行了速度补偿仿真实验, 图 2 和图 4 为实际速度和估计速度关系曲线, 为了使图像更清楚, 图 3 和图 5 分别为图 2 和图 4 的局部放大图像. 图中横轴为目标真实速度 (v_0), 纵轴为估计速度 (\hat{v}). 仿真中对回波复采样数据添加了不同信噪比的复高斯白噪声, 由图 2 和图 3 知, 当 $\text{SNR} = 15\text{dB}$ 时, 在大于 100 次的仿真实验中, 其最大速度误差为 0.304m/s 由图 4 和图 5 知, 当 $\text{SNR} = 5\text{dB}$ 时, 在大于 100 次的仿真实验中, 其最大速度误差为 0.32m/s 信噪比降低 10dB 时, 速度误差增加了 0.016m/s , 因此信噪比对测速精度有一定的影响, 但是当信噪比为 5dB 时, 速度分辨率依然在理论值范围之内, 可见这种测速方法完全可以满足一次补偿误差的要求, 测速精度高, 并且抗性能好, 而且增加脉冲多普勒的脉冲周期或脉冲数, 还可以提高测速精度, 但是要延长系统的工作时间.

由文献 [1] 知道, 仅用 SF 时域相关法测速, 最小测速精度是 0.64m/s , 此时测速范围是 $[-325.5\text{m/s}, 325.5\text{m/s}]$, 增加测速范围, 测速精度会降低, 即当测

(下转 201 页)

- 疏小舟,徐兆安,等.湖泊水环境指标的超光谱响应特征分析. *红外与毫米波学报*, 2004, **23**(6): 427—430, 435.
- [2] GONG Cai-Lan, YN Qiu, KUANG Ding-Bo, *et al* Study on the spectral reflectivity models of different water quality parameters in Huangpu River [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (巩彩兰,尹球,匡定波,等.黄浦江不同水质指标的光谱响应模型比较研究. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(4): 282—286.
- [3] Gitelson A, Gritz U, Merzlyak M N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves [J]. *J. Plant Physiol*, 2003, **160**, 271—282.
- [4] Zimba P, Gitelson A. Remote estimation of chlorophyll concentration in hyper-eutrophic aquatic systems: Model tuning and accuracy optimization [J]. *Aquaculture*, 2006, **256**: 272—286.
- [5] Dall'Orto G, Gitelson A. Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: experimental results [J]. *Appl Opt*, 2005, **44**(3): 412 - 422.
- [6] TANG Jun-Wu, TAN Guo-Liang, WANG Xiao-Yong, *et al* The spectra measurement and analysis about water : method of measurement above water [J]. *Journal of remote sensing* (唐军武,田国良,汪小勇,等.水体光谱测量与分析:水面以上测量法. *遥感学报*), 2004, **8**(1): 37—44.
- [7] DUAN Hong-Tao, ZHANG Bai, LIU Dian-Wei, *et al* Relationship between fluorescence peak spectral features and Chlorophyll-a in Lake Chagan [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (段洪涛,张柏,刘殿伟,等.查干湖水体光谱荧光峰特征与叶绿素 a响应关系研究. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(5): 355—359.
- [8] Gordon H R, Brown O B, Evans R H, *et al* A semianalytic radiance model of ocean color [J]. *J. Geophys Res*, 1988, **93**: 10909—10924.
- [9] Morel A, Gentili B. Diffuse reflectance of oceanic waters III, implications of bidirectionality for the remote sensing problem [J]. *Applied Optics*, 1996, **35**: 4850—4862.
- [10] Melin F, Zibordi G, Berthon J F. Assessment of SeaWiFS atmospheric and marine products for the Northern Adriatic Sea [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2003, **41**: 548—558.
- [11] Raymond C S, Karen S B. Optical properties of the clearest natural waters (200 - 800nm) [J]. *Applied Optics*, 1981, **20**(2): 177—184.

(上接 192页)

速范围是 $[-585.9\text{m/s}, 585.9\text{m/s}]$ 时,速度分辨率是 1.14m/s 可见,复合测速法可以更加有效地提高测速精度和测速范围.利用 PD 法测速的精度高,及 SF 测速的速度范围大,得到一种既有大的测速范围又有高的测速精度的复合测速方法.在信号频率不变的情况下,测速精度和时间成反比,测速范围和信号帧周期成反比,延长测速时间和帧周期,可以提高测速精度和范围,因此在工程应用中可以根据实际需要来设计系统参数.

3 结语

针对毫米波雷达,提出一种 SF 和 PD 复合测速的方法对毫米波运动目标一维距离像进行运动补偿,并通过仿真实验证明了这种方法的可行性、快速性.利用该方法进行运动补偿所得的目标一维距离像,可以应用于毫米波雷达中,进行精确的目标识别,测距等处理.

REFERENCES

- [1] LU Jing, LI Xing-Guo, LI Yue-Hua Motion compensation for 1-D range profile of moving target in MMW costas frequency hopped radar [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘静,李兴国,李跃华.毫米波 Costas 编码雷达运动目标一维距离像运动补偿. *红外毫米波学报*), 2005, **24**(5): 346—347.
- [2] LONG Teng Doppler performance analysis of frequency stepped radar signal [J]. *Modern Radar* (龙腾.频率步进雷达信号的多普勒性能分析. *现代雷达*), 1996, **2**: 31—37.
- [3] SHI Zhi-Guang, FU Qiang A velocity compensation method of moving target's high resolution range profile [J]. *Guidance & Fuze* (石志广,付强.一种运动目标距离象的速度补偿方法. *制导与引信*), 2002, **23**(3): 14—17.
- [4] LIU Zheng, ZHANG Shou-Hong Estimation of target motion parameter in a stepped frequency pulses radar [J]. *Acta electronica sinica* (刘峥,张守宏.步进频率雷达目标的运动参数估计. *电子学报*), 2003, **28**(3): 43—45.
- [5] CHEN Hang-Yong, LIU Yong-Xiang, LI Xiang, *et al* Analysis of Micro-Doppler and parameters estimation [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈行勇,刘永祥,黎湘,等.微多普勒分析和参数估计. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(5): 360—363.
- [6] WU Hong-Gang, LI Xiao-Feng, CHEN Yue-Bin, *et al* Spatial-Temporal adaptive clutter classification suppression and dim small moving targets detection [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (吴宏刚,李晓峰,陈跃斌,等.空时自适应杂波分类抑制与弱小运动目标检测. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(4): 301—305.