

毫米波调频步进雷达复合测速方法

孙慧霞, 刘 峥

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 毫米波调频步进体制雷达是一种重要的距离高分辨率雷达, 运动补偿是其实现距离高分辨的核心技术。针对调频步进体制雷达的运动补偿问题, 提出了三种复合测速方案: 脉组间调频步进复合、脉组内调频步进复合及脉冲多普勒与调频步进复合方案, 并对这三种方案的可行性和应用场合进行了分析, 给出了一种可满足应用条件的复合测速方案, 即脉冲多普勒信号与调频步进信号交替发射的复合测速方案, 针对该方案给出了具体的参数设计与约束条件。仿真结果表明, 该方案测速精度高, 抗噪性能好, 计算量小。

关键词: 毫米波雷达; 调频步进信号; 运动补偿; 复合测速

中图分类号: TN 958.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.03.14

Compound velocity measurement based on modulated frequency stepped radar

SUN Hui-xia, LIU Zheng

(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Millimeter waves modulated frequency stepped radar is a kind of important high-range-resolution radar, and motion compensation is the key technique to realize high range resolution. Three compound approaches for velocity measurement are presented and their feasibility is analyzed, based on which a feasible method is developed, and the parameter design and constraints about the complex signal are discussed. Simulation results indicate that the method can accomplish accurate estimation of the target velocity with good anti-noise performance while only a small amount of computation is needed.

Keywords: millimeter waves radar; modulated frequency stepped signal; motion compensation; compound velocity measurement

0 引言

毫米波系统因具有角度、多普勒高分辨等诸多优点, 在工程实践中被广泛使用^[1]。调频步进脉冲信号是在频率步进信号和线性调频信号的基础上提出来的, 它能弥补二者的缺陷, 可以具有较大的跳频间隔, 合成同样的带宽需要较少的跳频点数, 同时单个脉冲的距离分辨率也较高, 有利于多目标分辨和分选^[2-5]。

然而, 调频步进信号对目标的径向运动较为敏感, 存在距离-多普勒耦合现象^[6-11]。在目标运动环境下, 尤其是在目标高速运动时, 如果不对速度进行补偿, 将会导致合成的扩展目标一维距离像产生距离徙动、波形失真、能量发散, 造成距离像分辨率下降、测距精度降低和信噪比损失, 严重时将使距离像失去意义^[12-15]。因此, 在进行逆傅里叶变换 (inverse discrete Fourier transform, IDFT) 处理前必须对目标径向运动进行补偿。

如果能够不断通过其他手段获得目标的速度信息, 则运动目标的处理将十分简单, 只要在 IDFT 之前, 把目标运动的多普勒频率在相位中补偿掉即可, 这可以通过一个简单的乘法运算来实现^[16]。

脉冲多普勒 (pulse Doppler, PD) 体制雷达具有很好的目标速度测量性能, 因此可以考虑在调频步进高分辨体制中引入 PD 体制进行实时速度测量供速度补偿环节采用^[17]。这样, 要求雷达的发射波形既可供 PD 处理又可供距离高分辨处理, 这就涉及到发射波形的复合设计问题。本文针对 PD 体制与调频步进体制的复合波形设计问题, 对三种复合波形设计方案的可行性进行论证, 并给出具体的参数设计方案。

1 信号处理

1.1 调频步进信号的多普勒效应

毫米波调频步进雷达发射的信号是一串载频线性跳变

收稿日期: 2010-03-02; 修回日期: 2010-04-25。

基金项目: 国家自然科学基金(60901068)资助课题

作者简介: 孙慧霞(1983-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理及目标识别。E-mail: hxsun@mail.xidian.edu.cn

的线性调频子脉冲,其时域表达式为^[2]

$$u(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect} \left(\frac{t-nT_r}{T_1} \right) e^{j\pi k(t-nT_r)^2} e^{j2\pi f_n t} = \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect} \left(\frac{t-nT_r}{T_1} \right) e^{j\pi k(t-nT_r)^2} e^{j2\pi n\Delta f t} e^{j2\pi f_0 t} \quad (1)$$

式中, T_1 为子脉冲时宽; T_r 为脉冲重复周期; $k=B_1/T_1$ 为子脉冲的调频斜率; B_1 为子脉冲带宽; Δf 为频率步进值; f_0 为雷达载频; $f_n=f_0+n\Delta f$ 为第 n 个子脉冲的载频; N 为子脉冲个数。

距离为 R , 径向速度为 v 的目标回波信号可以表示为

$$s_r(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect} \left(\frac{t-nT_r-\tau(t)}{T_1} \right) e^{j\pi k(t-nT_r-\tau(t))^2} \times e^{j2\pi n\Delta f(t-\tau(t))} e^{j2\pi f_0(t-\tau(t))} \quad (2)$$

式中, $\tau(t)=\frac{2(R-vt)}{c}$ 为回波时延; c 为光速。为便于分析, 假设回波信号幅度为 1。将雷达回波信号与本振信号混频, 则得混频后的视频输出为

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect} \left(\frac{t-nT_r-\tau(t)}{T_1} \right) e^{j\pi k(t-nT_r-\tau(t))^2} \times e^{-j2\pi n\Delta f\tau(t)} e^{-j2\pi f_0\tau(t)} \quad (3)$$

设在每个脉冲重复周期 (pulse repetition interval, PRI) 的采样点为 $nT_r+2R/c+t_s$, 其中 $t_s \in (-T_1/2, T_1/2)$, 代入式(3)并化简可得

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect} \left(\frac{t-nT_r-2R/c+(2v/c)nT_r}{T_1} \right) \times e^{j\pi k \left[t-nT_r-\frac{2R}{c}+\frac{2v}{c}nT_r \right]^2} e^{j2\pi f_0 \frac{2v}{c} t_s} e^{-j2\pi f_0 \left(\frac{2R}{c}-\frac{2v}{c}nT_r-\frac{2v}{c}nT_r \right)} \quad (4)$$

显然, 式(4)可以分解为各个 PRI 的 chirp 子脉冲和不同 PRI 之间的频率步进两个部分, 因此, 对调频步进信号的处理可以分为在各个 PRI 内对 chirp 子脉冲进行脉冲压缩和在脉压后的 PRI 之间作 IDFT 处理两个步骤。故目标运动对调频步进信号的影响亦可以分为对子脉冲压缩的影响和对脉冲综合的影响。

对式(4)中的 chirp 子脉冲进行脉冲压缩处理可得第 n 个子脉冲压缩后的输出为^[18]

$$\tilde{s}_{cn}(t) = \text{rect} \left[\frac{t-nT_r-2R/c+(2v/c) \cdot nT_r}{T_1} \right] \times \sqrt{kT_1^2} \frac{\sin \pi(f_{dn}+kt_s)T_1}{\pi(f_{dn}+kt_s)T_1} e^{-j\pi k t_s^2} e^{j\pi} \quad (5)$$

式中, $f_{dn}=2v(f_0+n\Delta f)/c$ 为多普勒频移。由式(5)可得目标运动对子脉冲压缩的影响主要表现为脉压输出的峰值位置在不同的 PRI 之间的“走动”, 假设可以容忍的目标最大时移为 $1/2$ 个距离单元, 即 $1/(2B_1)$, 则不发生距离移动应满足如下条件^[9]

$$(2v/c)NT_r < 1/(2B_1), \text{ 即 } v < c/(4NT_r B_1) \quad (6)$$

目标运动对频率步进脉冲合成的主要影响是形成了一次、二次相位误差, 一次相位误差造成了 IDFT 后结果的耦合时移, 使目标像产生距离移动, 以目标速度引起的距离移动不超过半个高分辨距离单元为准则, 则一次相位补偿精度要求为^[6]

$$v \leq c/(4Nf_0 T_r) \quad (7)$$

二次相位误差将造成 IDFT 结果的波形发散, 使距离像失真, 以相参处理间隔内二次相位变化不超过 $\pi/2$ 为不失真条件, 则二次相位补偿精度要求为^[6]

$$v \leq c/(8N^2 \Delta f T_r) \quad (8)$$

由以上分析可知: 目标运动对一维距离像的影响较大, 因此, 在调频步进体制雷达中必须对运动目标进行速度补偿。运动补偿要在式(6)~式(8)的共同约束下进行。通常, 子脉冲压缩的速度补偿精度要求和二次相位速度补偿精度要求较低, 很容易满足, 而一次相位速度补偿精度要求较高, 在米每秒的量级。因此, 必须对目标速度进行精确补偿。

1.2 多普勒测速

发射一组 M 个脉冲序列, 则单个发射脉冲的时域表达式为

$$u'(t) = \text{rect} \left(\frac{t}{T'_1} \right) e^{j2\pi f_0 t} \quad (9)$$

式中, T'_1 为发射脉冲时宽; f_0 为载频。

将回波信号与相参本振混频后的视频输出采样信号为

$$x(n) = A e^{j2\pi f_d n T'_r}, \quad n = 0, 1, \dots, M-1 \quad (10)$$

式中, T'_r 为脉冲重复周期; $f_d = \frac{2vf_0}{c}$ 为多普勒频移; v 为雷达与目标的径向速度。

对回波信号做傅里叶变换可得

$$X(k) = \sum_{n=0}^{M-1} x(n) e^{-j2\pi k \frac{n}{M}} \quad (11)$$

则

$$X(e^{j2\pi f}) = \frac{\sin [\pi(f-f_d)MT'_r]}{\sin [\pi(f-f_d)T'_r]} e^{-j\pi(M-1)(f-f_d)T'_r} \quad (12)$$

显然, 式(12)在 $f=f_d$ 时幅度取得最大值, 经过门限判决, 根据 f_d 的取值, 就可以得到目标速度。

多普勒速度处理的相参处理时宽为 $T_M=MT'_r$, 所对应的速度分辨率为

$$\Delta v = c/(2T_M f_0) = c/(2MT'_r f_0) \quad (13)$$

最大不模糊速度为

$$v_{\max} = c/(2f_0 T'_r) \quad (14)$$

2 发射波形的复合设计

通过波形设计可以实现在毫米波导引头上 PD 与调频步进的复合。发射波形的复合设计有 3 种方案, 第 1 种是连续发射一组载频相同的线性调频信号, 再发射另一组载频相同的线性调频信号, 后一组载频与前一组载频是线性步进的, 这样连续发射 N 组线性调频信号, 每一组线性调频信号经一次脉压后就构成了 PD 体制, 从每一组线性调频信号中等间隔的抽取出一个线性调频信号就构成调频步进体制, 我们称之为脉组间调频步进信号; 第 2 种方案是连续发射多组线性调频步进信号, 每一组调频步进信号就构成了调频步进体制, 从每一组调频步进信号中抽取出差频相同的线性调频信号, 经过一次脉压后就构成了 PD 体制, 称之为脉组内调频步进信号; 第 3 种方案是交替发射 PD 信号与调频步进信号, 利用 PD 信号测速, 用于对调频步进回波信号进行运动补偿, 从而实现高分辨的一维距离像。

2.1 脉组间调频步进信号

如图1所示,在每个频点上发射一组脉冲(设有M个脉冲),每个子脉冲为线性调频信号,脉组间进行频率步进(设频率步进数为N),频率步进的脉冲重复周期为 $T_M = MT_r$,通过对脉组之内的线性调频信号进行脉压之后(构成PD体制)做快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)处理可以获得目标速度,对速度补偿后,再通过脉组之间的IFFT处理合成一维高分辨距离像。

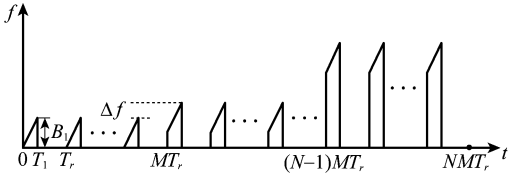


图1 脉组间调频步进信号载频随时间变化示意图

发射信号为

$$u_1(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \text{rect} \left(\frac{t - mT_r - nT_M}{T_1} \right) \times e^{jk(t - mT_r - nT_M)} e^{j2\pi\Delta f t} e^{j2\pi f_0 t} \quad (15)$$

式中, f_0 为雷达载频; Δf 为频率步进值; T_1 为子脉冲时宽; $k = B_1/T_1$ 为子脉冲的调频斜率; T_r 为脉冲重复周期;频率步进调制周期或相参积累时间为 $T_c = NT_M$ 。

调频步进体制对应的最大不模糊距离为 $R_{\max 1} = cT_M/2 = cMT_r/2$,脉组间调频步进体制对应的最大不模糊距离为 $R_{\max} = cT_r/2$,故采用脉组间调频步进体制导致最大不模糊距离减小M倍,有可能造成测距模糊问题;另外,PD体制的相参处理时宽为 T_M ,所对应的速度分辨率为 $\Delta v = c/(2T_M f_0)$,由式(7)可知,一次相位速度补偿精度要求为 $|\Delta v_1| \leq c/(4Nf_0 T_M)$,可见,速度分辨率不能满足一次相位速度补偿精度要求,因此,采用脉组间调频步进信号体制不适于复合测速。

2.2 脉组内调频步进信号

如图2所示,连续发射M组调频步进信号,每组由N个线性调频脉冲组成,脉冲重复周期为 T_r ,对每组调频步进信号中载频相同的线性调频信号做脉压后(构成PD体制)再进行FFT处理就可以获得目标速度。对速度补偿后,通过脉组内的IFFT处理就可以合成高分辨一维距离像。

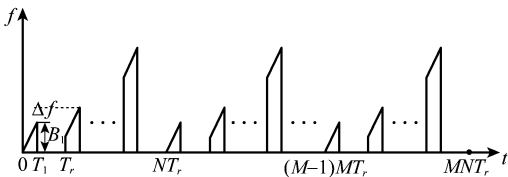


图2 脉组内调频步进信号载频随时间变化示意图

发射信号为

$$u_2(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect} \left(\frac{t - mNT_r - nT_r}{T_1} \right) e^{jk(t - mNT_r - nT_r)} e^{j2\pi\Delta f t} e^{j2\pi f_0 t} \quad (16)$$

由图2可知,PD体制的脉冲重复周期为 $T'_r = NT_r$,对应的最大不模糊速度为 $v_{\max} = c/(2f_0 NT_r)$,可见,最大不模

糊速度相对于仅发射PD信号减少了N倍,有可能存在测速模糊问题,因此脉组内调频步进体制仅适用于低速运动目标测速。

2.3 PD信号与调频步进信号交替发射

如图3所示,雷达信号体制为交替发射PD信号与调频步进信号,假设PD信号的脉冲重复周期为 T'_r ,脉冲积累数为M。由于毫米波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,从而对调频步进回波速度进行补偿,实现高分辨的一维距离像。

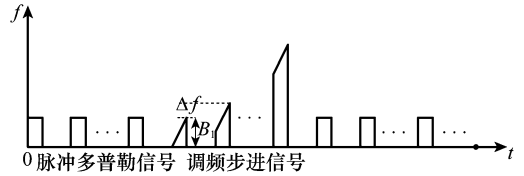


图3 交替发射的PD信号与调频步进信号

根据已知的调频步进信号参数和最大不模糊速度要求 v_{\max} ,PD信号的参数设计如下

(1) 由最大不模糊速度 $v_{\max} = \frac{c}{2f_0 T'_r}$, 可得 $T'_r \leq \frac{c}{2f_0 v_{\max}}$;

(2) 由速度分辨率不大于一次相位速度补偿精度,即 $\Delta v = c/(2MT'_r f_0) \leq c/(4Nf_0 T_r)$, 可得 $M \geq 2NT_r/T'_r$ 。

由以上分析可以看出,脉组间调频步进体制的最大不模糊距离较小,并且测速精度不能满足一次相位速度补偿精度要求,因此不适于复合测速;脉组内调频步进体制不模糊测速范围较小,适用于低速运动目标;而PD信号和调频步进信号交替发射的复合体制通过合理设置参数能够避免出现速度模糊,并且测速精度能够满足一次相位速度补偿精度要求,因此可以用于高速目标复合测速。

3 仿真结果

设雷达发射调频步进信号参数为:载频 $f_0 = 35$ GHz,频率步进数 $N = 32$,步进频率值 $\Delta f = 6$ MHz,子脉冲宽度 $T_1 = 1.5$ μ s,脉冲重复频率 $f_r = 30$ kHz,子脉冲带宽 $B_1 = 20$ MHz。根据式(6)~式(8)的约束条件,速度补偿误差应分别低于3 516 m/s,2.008 9 m/s和183.105 5 m/s。假设目标速度范围为 $[-300$ m/s,300 m/s]。

采用脉组内调频步进体制的最大不模糊速度为 $v_{\max} = c/(2f_0 NT_r) = 4.017 9$ m/s,由于 $v_{\max} < 300 - (-300) = 600$ m/s无法满足本方案的最大不模糊速度要求。

采用PD信号与调频步进信号交替发射的信号形式,根据最大不模糊速度要求,可得PD信号的脉冲重复周期为 $T'_r \leq \frac{c}{2f_0 v_{\max}} = 7.142 9$ μ s,取 $T'_r = 7$ μ s;脉冲积累数 $M \geq \frac{2NT_r}{T'_r} = 305$,取 $M = 320$;按占空比1/7计,可取脉冲宽度为 $T'_1 = 1$ μ s。

为了验证PD信号与调频步进信号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 $[-300$ m/s,300 m/s]

的速度范围内进行了速度测量仿真试验,图 4 为 $\mathcal{R}_{\text{SNR}}=5$ dB 时的速度估计曲线,其中横坐标为真实速度值,纵坐标为估计速度值,为了使图像更清楚,图 5 给出了图 4 的局部放大图,其中实线为估计速度值,点划线为真实速度值。图 6 为 $\mathcal{R}_{\text{SNR}}=5$ dB 时在 $[-300 \text{ m/s}, 300 \text{ m/s}]$ 的速度范围内进行 100 次蒙特卡罗试验的速度估计误差结果,在 100 次的仿真结果中,最大速度估计误差为 $1.020 4 \text{ m/s} < 2.008 9 \text{ m/s}$,可以满足一次相位速度补偿精度要求。

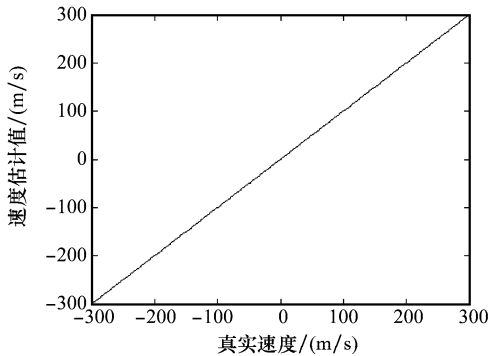


图 4 速度估计曲线 ($\mathcal{R}_{\text{SNR}}=5$ dB)

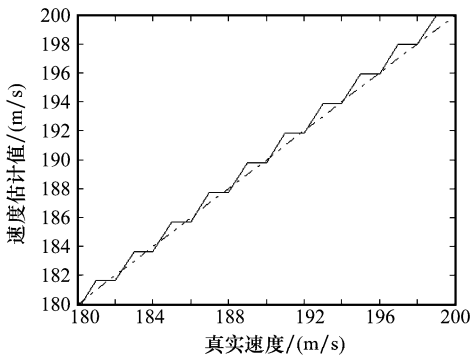


图 5 速度估计曲线局部放大图 ($\mathcal{R}_{\text{SNR}}=5$ dB)

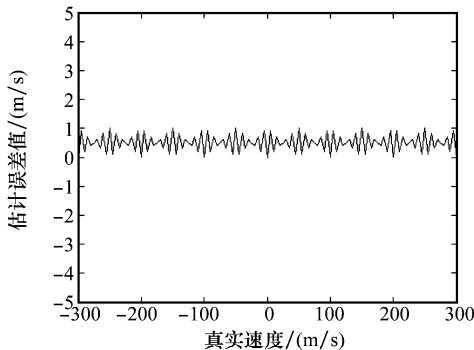


图 6 速度估计误差曲线 ($\mathcal{R}_{\text{SNR}}=5$ dB)

4 结束语

本文基于毫米波调频步进体制雷达,对 PD 与调频步进复合测速的三种方案进行可行性论证,得出了以下结论:(1) 脉组间调频步进信号存在距离模糊问题,并且测速精

度不能满足一次相位速度补偿精度要求;(2) 脉组内调频步进信号存在测速模糊问题,仅适用于低速运动目标;(3) PD 信号和调频步进信号交替发射的复合体制通过合理设置参数能够避免出现距离模糊和速度模糊,并且测速精度能够满足一次相位速度补偿精度要求。因此,脉组间调频步进体制不能用于复合测速;脉组内调频步进体制适用于低速运动情况下的复合测速;而 PD 信号与调频步进信号交替发射的复合体制兼备了这两种信号的优点,使其在毫米波距离成像雷达的应用中同时具备了多普勒速度分辨和距离成像二维信息处理能力,并且整个处理过程仅为 FFT 运算,计算量较小,易于工程实现。

参考文献:

- [1] 齐飞林,刘峥,杨明磊,等. 毫米波共形相控阵雷达导引头波束形成[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(8):1874-1878. (Qi F L, Liu Z, Yang M L, et al. Low sidelobe beamforming for millimeter wave radar seeker with conformal phased array[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009,31(8):1874-1878.)
- [2] 姜斌,黎湘,陈行勇,等. 调频步进雷达扩展目标运动补偿研究[J]. 信号处理,2006,22(6):873-878. (Jiang B, Li X, Chen H Y, et al. Studies on motion compensation for high resolution profile of extended target produced by stepped chirp radar[J]. *Signal Processing*, 2006,22(6):873-878.)
- [3] Yuan H T, Wen S L, Cheng Z. Simultaneous radar imaging and velocity measuring[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2009,20(4):741-747.
- [4] Tan X G, Wei P, Li L P. Combining Radon-ambiguity transform with second-order difference to improve detection probability of LFM signals in low SNR[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2009,20(1):13-19.
- [5] 张焕颖,张守宏,李强. 调频步进雷达目标抽取算法及系统参数设计[J]. 电子学报,2007,35(6):1153-1158. (Zhang H Y, Zhang S H, Li Q. Target extracting algorithm and system parameter design in stepped frequency modulated radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007,35(6):1153-1158.)
- [6] 龙腾,毛二可,何佩琨. 调频步进雷达信号分析与处理[J]. 电子学报,1998,26(12):84-88. (Long T, Mao E K, He P K. Analysis and processing of modulated frequency stepped radar signal[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1998,26(12):84-88.)
- [7] 沈一鹰,赵彬,禹胜来,等. 脉冲多普勒-阶梯调频信号混合设计与处理技术的研究[J]. 系统工程与电子技术,1998,20(10):6-10. (Shen Y Y, Zhao B, Yu S L, et al. Research on pulse Doppler & step frequency waveform complex design and processing[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 1998,20(10):6-10.)
- [8] 刘峥,张守宏. 步进频率雷达目标的运动参数估计[J]. 电子学报,2000,28(3):43-45. (Liu Z, Zhang S H. Estimation of target motion parameter in a stepped-frequency pulses radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000,28(3):43-45.)
- [9] 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. (Zhang Q,

- Zhang T, Zhang S H. Study of the chirp modulated by a stepped frequency for a moving target[J]. *Journal of Xidian University*, 2001,28(2):220-224.)
- [10] 梁冬青,陈祝明,江朝抒. 强地杂波背景下 Chirp 步进信号的运动补偿[J]. *现代雷达*,2006,28(12):72-75. (Liang D Q, Chen Z M, Jiang C S. A velocity compensation for chirp-subpulse stepped frequency signal in strong ground clutter[J]. *Modern Radar*, 2006,28(12):72-75.)
- [11] 袁昊天,文树梁,程臻. 调频步进雷达的目标速度估计方法[J]. *系统工程与电子技术*,2009,31(8):1842-1845. (Yuan H T, Wen S L, Cheng Z. Velocity estimation method for moving target of frequency-modulated stepping radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009,31(8):1842-1845.)
- [12] Zhang Q, Jin Y Q. Aspects of radar imaging using frequency-stepped chirp signals[J]. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2006,10(1):1-8.
- [13] 苏宏艳,龙腾,何佩琨,等. 运动目标环境下的调频步进信号目标抽取算法[J]. *电子与信息学报*,2006,28(5):915-918. (Su H Y, Long T, He P K, et al. Target's redundancy removed algorithm for modulated frequency stepped pulse radar signal echoed by moving target[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006,28(5):915-918.)
- [14] 袁昊天,文树梁,程臻. 调频步进信号高速运动目标径向速度精确测量技术研究[J]. *电子学报*,2009,37(3):649-653. (Yuan H T, Wen S L, Cheng Z. Accurate velocity measurement of high speed moving target about stepped-frequency chirp signal[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009,37(3):649-653.)
- [15] 李昕,李阳,龙腾. 多目标环境下合成宽带雷达运动补偿方法研究[J]. *中国科学:信息科学*,2010,40(3):492-503. (Li X, Li Y, Long T. Compound wideband radar motion compensation method with multi-targets[J]. *Scientia Sinica (Information)*, 2010,40(3):492-503.)
- [16] 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*,2001,22(6):16-25. (Mao E K, Long T, Han Y Q. Digital signal processing of stepped frequency radar[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2001,22(6):16-25.)
- [17] 王桂丽,李兴国. 频率步进和脉冲多普勒复合测速研究[J]. *红外与毫米波学报*,2008,27(3):190-192. (Wang G L, Li X G. Compound approach of measuring velocity based on step-frequency and pulse Doppler system[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2008,27(3):190-192.)
- [18] 林茂庸,柯有安. 雷达信号理论[M]. 国防出版社,北京,1984:128-135. (Lin M Y, Ke Y A. *Radar signal theory*[M]. Beijing: National Defense Publication, 1984:128-135.)

(上接第 522 页)

- [6] Patini M, Vigilante D. Adaptive waveforms selection for IMM-UKF tracking architecture application to multifunctional radar systems in heavy cluttered scenario[C]// *Proc. of International Conference on Radar*, 2008:536-540.
- [7] Lunden J, Koivunen V. Automatic radar waveform recognition[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2007,1(1):124-136.
- [8] Capraro C T, Bradaric I. Using genetic algorithms for radar waveform selection[C]// *IEEE Radar Conference*, 2008:1-6.
- [9] Altes R A, Titlelaum E L. Bat signals as optimally Doppler tolerant waveforms[J]. *Journal Acoustics Society of America*, 1970,48(4B):1014-1020.
- [10] Holderied M W, Baker C J. Understanding signal design during the pursuit of aerial insects by echolocating bats: tools and applications[J]. *Integrative Comparative Biology*, 2008, 48(1):74-84.
- [11] Vespe M, Jones G. Lessons for radar[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2009,26(1):65-75.
- [12] Amuso V, Blunt S. *Applications and methods of waveform diversity*[M]. Raleigh, NC: SciTech Publishing, 2009.
- [13] Drozd A. Waveform diversity and design[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2006(210):46.
- [14] Nehorai A, Gini F. Introduction to the issue on adaptive waveform design for agile sensing and communication[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2007,1(1):2-5.
- [15] Bar-Shalom Y, Fortmann T E. *Tracking and data association*[M]. New York: Academic, 1988.
- [16] Kershaw D, Evans R. Optimal waveform selection for tracking systems[J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1994, 40(5):1536-1550.
- [17] Kershaw D, Evans R. Adaptive waveform selection for tracking in clutter[C]// *Proc. of the American Control Conference*, 1994.
- [18] Kershaw D, Evans R. Waveform selective probabilistic data association[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1997,33:1180-1188.
- [19] Niu R, Willett P. Tracking considerations in selection of radar waveform for range and range-rate measurements[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2002,38(2):467-487.
- [20] Niu R, Willett P. Further analysis of waveform effects on tracking performance[C]// *Proc. of Aerospace Conference*, 2000,3:417-431.
- [21] 高羽,张建秋. 机动目标的多项式预测模型及其跟踪算法[J]. *航空学报*, 2009, 30(8):1479-1489. (Gao Y, Zhang J Q. Polynomial prediction model and tracking algorithm of maneuver target[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(8):1479-1489.)
- [22] Paradowski L R. Uncertainty ellipses and their application to interval estimation of emitter position[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1997,33(1):126-133.
- [23] Almeida L B. The fractional Fourier transform and time-frequency representations[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1994,42(11):3084-3091.
- [24] Ozaktas H M, Arıkan O. Digital computation of the fractional Fourier transform[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1996,44(9):2141-2150.
- [25] Ozaktas H M, Zalevsky Z. The fractional Fourier transform with applications in optics and signal processing[EB/OL]. <http://www.ee.bilkent.edu.tr/~haldun/wileybook.html>.
- [26] Borden B. The fractional Fourier transform and ISAR imaging. Inverse Problems[EB/OL]. <http://iopscience.iop.org/0266-5611/16/2/101>.