



## 论文

## 复图像域 SAR 运动目标参数估计性能分析

左渝, 许稼\*, 彭应宁, 夏香根

清华大学电子工程系, 北京 100084

\* 通信作者. E-mail: xujia@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2009-02-10; 接受日期: 2009-05-20

国家自然科学基金 (批准号: 60971087)、部委基金 (批准号: 9140A07011810JW01)、航天支撑基金 (批准号: J04-2007047)、航天创新基金 (批准号: CASC200904) 和航空科学基金 (批准号: 20080158001) 资助项目

**摘要** 为分析合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 复图像域运动目标的参数估计性能, 本文在 SAR 复图像域地面运动目标信号模型的基础上, 推导了色高斯分布杂波中运动目标参数估计的克拉美罗界 (Cramer-Rao bound, CRB). 分析了参数估计性能与运动目标散射强度、运动参数以及信号功率谱的相互关系, 并比较了信号域和复图像域的参数估计性能. 进而, 提出采用降分辨率处理 (reducing resolution processing, RRP) 提高了复图像域参数估计性能, 并定量分析了 RRP 带来的参数估计性能改善. 参数估计性能分析表明, 在均匀杂波背景下的 SAR 复图像域, 可实现目标高精度的运动参数估计和定位处理. 最后, 数值实验结果验证了本文参数估计性能分析的正确性和有效性.

**关键词**合成孔径雷达  
运动目标  
复图像域  
参数估计  
克拉美罗界  
降分辨率处理

## 1 引言

合成孔径雷达 (SAR) 作为一种全天时、全天候、大范围、高分辨的新型传感器, 在遥感、预警、侦察、警戒诸多领域得到了普遍应用<sup>[1~3]</sup>. 其中, 同时具备大面积静态场景成像和地面运动目标检测能力的新体制雷达显著扩展了传统 SAR 的功能, 成为理论研究和工程实践的热点和前沿<sup>[4~10]</sup>. 在不增加硬件复杂度的前提下, 利用单通道 SAR 实现地面运动目标的高性能检测、估计和成像始终是具有挑战性和广泛应用前景的研究方向.

为此, 基于距离-多普勒成像算法和驻留相位原理 (stationary phase principle, SPP), 我们在文献 [10] 中推导了单通道 SAR 运动目标复图像域信号模型. 该模型表明: 复图像域运动目标信号可近似为线性调频 (linear frequency modulated, LFM) 信号, 其信杂噪比 (signal to clutter and noise ratio, SCNR) 较信号域有明显提高, 在由方位向和距离向构成的二维平面内, 信号分布在一条偏离正确位置的直线上. 线段的中心和斜率分别取决于运动目标距离向速度导致的模糊多普勒中心和多普勒模糊数, 而线段的长度和 LFM 信号的调频率则主要取决于运动目标的方位向速度. 进而, 文献 [10] 讨论了 SPP 对雷达系统参数和目标运动参数的限制和约束, 揭示了新模型的适用条件. 严格地说, 广域的 SAR 成像场景是非平稳的, 但运动目标经过成像预处理环节后, 运动目标被部分聚焦, 通常被限制在距离和方位有限的一个区域中. 而在有限的范围里, 均匀杂波背景可近似为平稳的分布. 据此, SAR 复

图像域运动目标参数估计问题可近似为在平稳的色高斯随机过程中, 实现一个分布于距离和方位二维耦合直线上的 LFM 信号参数估计问题。

现有的 LFM 信号参数估计方法主要针对信号域的 LFM 信号, 并可概要地分为参数化和非参数化两类。非参数化方法包括短时 Fourier 变换 (STFT)、Wigner-Ville 分布<sup>[9]</sup>、Randon-Wigner 变换<sup>[11]</sup>、Chirplet 变换等时频分析方法。通过时频分析可以得到信号的时频分布图, 进而得到 LFM 信号参数估计。这类方法不需要严格的模型信息, 方法具有稳健性, 但缺点是估计精度较差。与此相反, 参数化方法充分利用对信号模型化的先验知识, 显著地提高了参数估计的性能, 逼近了估计性能的 CRB。但这类方法的稳健性相对较差, 当模型失配时, 参数估计性能会严重下降。典型的参数化 LFM 信号参数估计方法包括: 基于最大似然函数的多维搜索方法, 以及基于似然函数演化的方法, 如 Peleg 等提出的基于多步低维处理的 PPT 方法<sup>[12]</sup> 和乘积高阶模糊函数方法<sup>[13]</sup>, Djuric 等提出的基于瞬时相位恢复的参数估计方法<sup>[14]</sup>。文献 [15 ~ 17] 针对白噪声背景推导了 LFM 信号参数估计的 CRB, 并进而提出参数化估计方法逼近参数估计的 CRB。文献 [18 ~ 21] 则针对色噪声背景中的单频信号与噪声的参数估计性能进行了深入分析, 推导了 CRB 并在 SAR 自聚焦成像、信号域杂波抑制和速度合成孔径雷达 (velocity SAR, VSAR) 处理等方面进行了应用。但是, 现有文献还没有针对 SAR 复图像域色高斯杂波背景, 对分布于距离—方位二维耦合直线上的 LFM 信号进行参数估计的极限性能分析, 难以定量得到复图像域参数估计性能与目标运动参数间的关系。

本文在 SAR 复图像域运动目标信号模型<sup>[10]</sup> 的基础上, 对色高斯分布杂波中运动目标未知参数估计进行了深入分析。本文目的是通过对复图像域杂波中的运动目标参数估计性能分析, 得到杂波对于参数估计性能影响的一般性讨论。例如, 在给定 SCNR 条件下, 给出目标参数估计性能的 CRB, 即参数估计的极限性能。在上述 CRB 分析中, 定义的杂波强度可以是直接成像后的杂波强度, 也可以是经过杂波抑制后的杂波强度, 如 VSAR 系统中的非杂波通道得到的复图像数据。当运动目标 SCNR 很低时, 为了提高参数估计精度, 需要采用杂波抑制。但受篇幅所限, 本文不对具体的杂波抑制方法进行深入讨论。本文分析了参数估计性能与运动目标散射强度、多普勒参数、运动参数、杂波功率谱及信号功率谱的相互关系, 并比较了信号域和复图像域的参数估计性能。进而, 为提高复图像域参数估计性能, 提出采用 RRP, 并分析了 RRP 对参数估计性能的改善。最后, 数值试验和实际数据处理验证了本文参数估计性能分析的正确性和有效性。

## 2 运动目标模型

### 2.1 运动目标信号模型

正侧视 SAR 几何模型如图 1 所示, 其中  $x$  和  $r$  分别表示方位向和斜距向,  $t$  和  $\tau$  分别表示方位向和斜距向采样时间, 即慢变时间和快变时间。SAR 平台沿方位向飞行, 速度为  $v_s$ 。设场景中存在一个匀速运动点目标  $P$ , 其方位向速度为  $v_x$ , 距离向速度为  $v_r$ , RCS 为  $\sigma$ 。设定雷达视线指向  $P$  时为慢变时间零点  $t = 0$ , 此时雷达位于坐标系的原点, 运动目标位于  $(r_c, 0)$ 。雷达发射矩形包络的 LFM 信号, 其调频率为  $K$ , 带宽为  $B_w$ , 时宽为  $T_w$ , 脉冲重复频率为  $f_p$ 。

在复图像域, 具有一定方位向速度的运动目标可以建模为一个分布在二维平面的 LFM 信号 (如文献 [10] 中 (8) 式), 即

$$d_{Im}(\tau, t; r) = \sigma \frac{B_w}{\sqrt{|K|}} \sqrt{\left| \frac{f_r}{f_r - f_{rm}} \right|} \operatorname{rect} \left( \frac{f_r t + f_D}{(f_r - f_{rm}) T_s} \right) \exp(\phi_0)$$

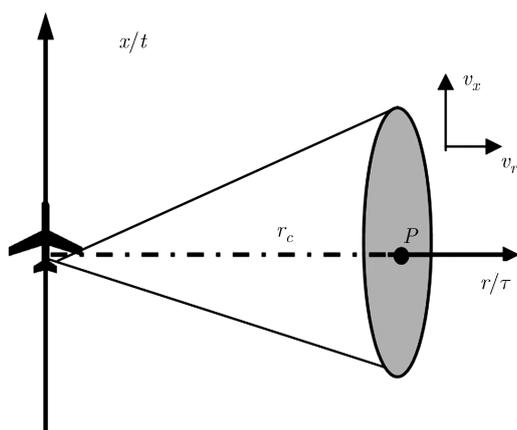


图 1 正侧视 SAR 几何结构示意图

$$\cdot \text{sinc} \left\{ \pi B_w \left[ \tau - \frac{2}{c}(r_c - r_a) + \frac{2}{c} k_r f_{rm} \frac{f_r t + f_D}{f_r - f_{rm}} \right] \right\} \exp \left[ j\pi \frac{f_r f_{rm}}{f_r - f_{rm}} \left( t - \frac{f_D}{f_{rm}} \right)^2 \right], \quad (1)$$

其中,  $T_s$  为运动目标  $P$  的合成孔径时间,  $f_r$  是静止场景的多普勒调频率,  $f_D$  和  $f_{rm}$  分别是运动目标的多普勒中心和多普勒调频率,  $k_r = (\lambda N_d f_p)/(2f_{rm})$ ,  $r_a = -\lambda f_D^2/(4f_{rm})$ ,  $N_d$  是多普勒模糊数.

从 (1) 式可以看出, 当运动目标具有方位向速度时, 目标在成像过程中只能部分聚焦, 在复图像域的方位向上存在着散焦, 占有一定的方位向支撑区. 在这段支撑区内, 运动目标可以近似为一个与目标运动参数相关的 LFM 信号, 因此可以通过 LFM 信号的参数估计实现目标运动参数的估计.

在信号域, 距离徙动校正后的运动目标也可以建模为一个分布在二维平面内的 LFM 信号, 即

$$d_{Si}(\tau, t; r) = \sigma \frac{B_w}{\sqrt{|K|}} \text{rect}(t/T_s) \text{sinc} \left\{ \pi B_w \left[ \tau - \frac{2}{c}(r_c - r_a) + \frac{2}{c} k_r f_{rm} t \right] \right\} \cdot \exp(j2\pi f_D t) \exp(j\pi f_{rm} t^2), \quad (2)$$

其中, (1) 式可由 (2) 式在频域乘上聚焦函数  $h_a(f_t; r_c)$  得到 (如文献 [10] 中 (13) 式), 即

$$h_a(f_t; r_c) = \text{rect} \left( \frac{f_t}{f_p} \right) \exp \left\{ j \frac{\pi}{f_r} f_t^2 \right\}. \quad (3)$$

由于在  $f_t \in [-f_p/2, f_p/2]$  的范围中, 有  $|h_a(f_t; r_c)| \equiv 1$ . 因此, (1) 和 (2) 式具有相同的功率谱, 也就是说, 运动目标在信号域和图像域有相同的功率谱. 同理, 对杂波在信号域和复图像域也有相同的功率谱.

由于运动目标信号分布在距离和方位构成的二维平面上, 因此最优参数估计应该采用二维联合估计. 但是二维联合估计实现复杂, 运算量过大, 所以通常采用准最优处理, 即对运动目标信号做逐个距离单元估计. 这种处理实现相对容易, 运算量也大大减小. 因此本文主要分析在这种准最优方法下运动目标参数估计的极限性能.

## 2.2 运动目标参数估计模型

由 (1) 和 (2) 式可知, 当取定一个距离单元, 既令  $\tau = \tau_0$  时, 运动目标在信号域和复图像域都是具有一定包络调制的 LFM 信号. 因此, 在一个距离单元内, 可以将运动目标在信号域和复图像域离

散时间信号统一定义为

$$s(n) = \sigma W(n) \exp\{j(2\pi f_G n + \pi \gamma n^2)\}, \quad n = -N/2, -N/2 + 1, \dots, N/2 - 1, \quad (4)$$

其中,  $W(n)$  是 LFM 信号的包络,  $f_G$  是 LFM 信号的归一化中心频率,  $\gamma$  是 LFM 信号的归一化调频率,  $N$  是信号采样点数.

在复图像域, 有  $\gamma = f_r f_{rm} / (f_r - f_{rm}) \cdot 1 / f_p^2$ , 信号包络为

$$W(n) = \frac{B_w}{\sqrt{|K|}} \sqrt{\left| \frac{f_r}{f_r - f_{rm}} \right|} \text{rect} \left[ \frac{f_r n + f_D}{(f_r - f_{rm}) T_s f_p} \right] \cdot \text{sinc} \left\{ \pi B_w \left[ \tau_0 - \frac{2}{c} (r_c - r_a) + \frac{2}{c} k_r f_{rm} \frac{f_r n + f_D}{f_r - f_{rm}} \frac{1}{f_p} \right] \right\} \exp \left[ j\pi \frac{f_r}{f_r - f_{rm}} \frac{f_D^2}{f_{rm}} \right] \exp(\phi_0). \quad (5)$$

当运动目标不存在多普勒模糊, 这时  $k_r = 0$ , 运动目标的距离徙动可以忽略, 回波信号都在一个距离单元内. 因此有  $f_G = f_D / f_p$ , 这时的  $f_G$  就是运动目标的归一化多普勒中心. 当运动目标的距离徙动不可忽略时, 回波信号分布到了多个距离单元内, 这时  $f_G$  只是一个距离单元内的 LFM 信号的归一化中心频率, 而与目标运动参数无关. 因此在估计运动目标距离向速度时, 需要保证运动目标的回波信号都位于一个距离单元内. 当距离徙动不可忽略时, 需要做降分辨率处理来满足上述要求.

在信号域, 有  $\gamma = f_{rm} / f_p^2$ , 信号包络为

$$W(n) = \frac{B_w}{\sqrt{|K|}} \text{rect} \left( \frac{n}{T_s f_p} \right) \text{sinc} \left\{ \pi B_w \left[ \tau_0 - \frac{2R(n/f_p; r)}{c} \right] \right\} \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} r_c \right\}. \quad (6)$$

由于采用 (3) 式的方位向聚焦不改变信号的功率谱分布形式, 因此信号域的  $f_G$  与复图像域相同. 为方便推导, 设杂波服从参数已知的色高斯分布, 且杂波的多普勒中心为零. 由于成像处理不会改变杂波的功率谱, 因此定义信号域和复图像域的杂波功率谱均为  $P_c$ , 由此可以得到杂波的自相关矩阵为

$$\mathbf{C} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} P_c(k) \mathbf{v}(k) \mathbf{v}(k)^H = \frac{1}{N} \mathbf{F}^H \mathbf{A} \mathbf{F}, \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{v}(k) = [e^{-j2\pi k \cdot 0/N} \ e^{-j2\pi k \cdot 1/N} \ e^{-j2\pi k \cdot 2/N} \ \dots \ e^{-j2\pi k \cdot (N-1)/N}]^T$  是阵列流形矢量,  $\mathbf{F} = [v(0) \ v(1) \ \dots \ v(N-1)]$  是离散 Fourier 变换矩阵,  $\mathbf{A} = \text{diag}(P_c)$  是杂波功率谱构成的对角阵.

因此, 信号域和复图像域参数估计模型可以统一定义为

$$x(n) = s(n) + c(n), \quad n = -N/2, -N/2 + 1, \dots, N/2 - 1, \quad (8)$$

其中,  $c(n) \sim N(0, \mathbf{C})$  是服从色高斯分布的杂波, 且杂波参数已知. 待估计参数定义为

$$\theta = [\sigma \ f_G \ \gamma]^T. \quad (9)$$

### 3 多普勒参数估计 CRB

高斯分布杂波中估计未知参数  $\theta$  的 Fisher 信息矩阵如下:

$$[I(\theta)]_{ij} = \left[ \frac{\partial x}{\partial \theta_i} \right]^H \mathbf{C}^{-1} \left[ \frac{\partial x}{\partial \theta_j} \right] = N \left[ \mathbf{F} \frac{\partial x}{\partial \theta_i} \right]^H \mathbf{A}^{-1} \left[ \mathbf{F} \frac{\partial x}{\partial \theta_j} \right] = N \left[ \frac{\partial B_s}{\partial \theta_i} \right]^H \mathbf{A}^{-1} \left[ \frac{\partial B_s}{\partial \theta_j} \right], \quad (10)$$

其中,  $B_s$  是运动目标回波的频谱, 利用驻留相位原理可以得到连续时间的  $B_s$  近似解析式为

$$B_s(f) \approx \sigma \sqrt{\frac{\pi}{-\gamma}} \exp\left(-j\frac{\pi}{4}\right) W\left(\frac{f-f_G}{2\gamma}\right) \exp\left(-j\pi\frac{(f-f_G)^2}{\gamma}\right), \quad (11)$$

其中,  $f = f_t/f_p$  是归一化的多普勒频率. 由于幅度中包含多普勒参数信息远小于相位中的多普勒信息, 因此对多普勒参数求导时只对相位求导, 有

$$\frac{\partial B_s(f)}{\partial \sigma} = B_s(f) \cdot \frac{1}{\sigma}. \quad (12)$$

$$\frac{\partial B_s(f)}{\partial f_G} \approx B_s(f) \cdot \frac{f-f_G}{2\gamma} \cdot j4\pi. \quad (13)$$

$$\frac{\partial B_s(f)}{\partial \gamma} \approx B_s(f) \cdot \left(\frac{f-f_G}{2\gamma}\right)^2 \cdot j4\pi. \quad (14)$$

将上述三式离散化后带入 (10) 式, 可得

$$I(\theta) = 16\pi^2\sigma^2 Q P Q^H. \quad (15)$$

$$Q = \text{diag}\left(\frac{1}{j4\pi\sigma}, \frac{1}{2\gamma}, \left(\frac{1}{2\gamma}\right)^2\right). \quad (16)$$

$$[P]_{ij} = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \frac{P_s(k)}{P_c(k)} \left(\left(\frac{k}{N} - f_G\right)\right)_{0.5}^{i+j-2}, \quad (17)$$

其中,  $P_s(k) = |B_s(k)|^2/\sigma^2$  为归一化的信号功率谱, 表示单位 RCS 目标的功率谱.  $((x))_{0.5}$  表示将  $x$  以 1 为周期折叠到  $[-0.5, 0.5)$  之间.

对 Fisher 信息矩阵求逆, 可以得到参数估计的 CRB 如下:

$$\text{CRB}_\sigma = [I(\theta)^{-1}]_{11} = [P^{-1}]_{11}, \quad (18)$$

$$\text{CRB}_{f_G} = [I(\theta)^{-1}]_{22} = \frac{1}{4\pi^2\sigma^2} \gamma^2 [P^{-1}]_{22}, \quad (19)$$

$$\text{CRB}_\gamma = [I(\theta)^{-1}]_{33} = \frac{1}{\pi^2\sigma^2} \gamma^4 [P^{-1}]_{33}. \quad (20)$$

由上述三式可以得出关于运动目标参数估计 CRB 的三点结论:

**结论 1** 目标的 RCS 越大, 多普勒参数估计的 CRB 越小, 目标的 RCS 每增大  $k$  dB, 多普勒参数估计的 CRB 就减小  $k$  dB. 而由 (18) 可知, RCS 估计的 CRB 不随 RCS 改变.

**结论 2** 参数估计的极限性能随目标多普勒中心呈非单调的变化特性. 当目标多普勒中心与杂波中心重叠时, 各参数估计的 CRB 较大. 当目标多普勒中心偏离较小时, 主要受到加权的影响, CRB 比重叠时更大, 且偏离越大, CRB 也越大. 相反地, 当偏离较大时, 主要受杂波功率谱白化的影响, 偏离越大, CRB 越小.

由 (17) 式可知,  $P$  可以看作是以目标的多普勒中心为零点, 对白化后的运动目标频谱的加权和. 因此,  $P$  仅与运动目标的功率谱有关, 而与目标的多普勒调频率无关.  $P$  中各元素的大小由两个因素决定. 一个是目标多普勒中心与杂波多普勒中心的距离, 由于杂波具有一定的功率谱分布, 主要的杂波能量都集中在杂波中心附近, 因此, 目标多普勒中心偏离杂波多普勒中心越远, 白化后的目标功率谱的值越大, 得到的  $P$  就越大; 另一个因素是, 由 (17) 式可知,  $P$  是对白化后的功率谱的加权和, 目标信号中越偏离目标多普勒中心的部分得到的加权值就越大, 因为这部分信号提供了更多的多普勒相位信

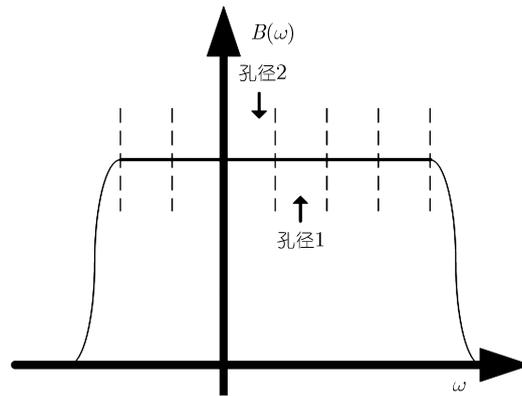


图 2 存在距离徙动时的运动目标频谱

息. 当目标多普勒中心偏离杂波多普勒中心时, 会导致一部分权值较大的目标功率谱进入杂波较强的区域, 使得  $P$  减小, 而且越高阶相位受到的影响也越大.

**结论 3** 目标多普勒调频率绝对值越小, 多普勒参数估计的 CRB 越小, RCS 估计的 CRB 不变.

#### 4 降分辨率处理 (RRP)

由于受到距离徙动的影响, 运动目标的回波信号分布在多个距离单元内. 为进一步提高复图像域的参数估计性能, 本文引入 RRP. 由于 RRP 增加了距离—方位耦合的 LFM 信号在一个距离单元中的驻留时间, 因此可以提高参数估计性能. 但是, RRP 在目标密集和分辨率下降严重时, 会存在多目标分辨困难等问题. 由于在复图像域, 经过针对场景的距离徙动校正, 运动目标的剩余距离徙动受模糊数控制, 其跨距离单元数大大减小. 因此, 选择合适的 RRP 程度, 通常 RRP 到 10 m 左右, 就能够有效消除距离徙动的影响. 而在大部分非城区的区域, 10 m 距离分辨率也可以避免多目标重叠的问题.

在复图像域, 运动目标回波近似为一个 LFM 信号. 由于存在距离徙动, 回波近似线性地分布在多个距离单元内. 在每一个距离单元内, 回波是原 LFM 信号的一个子孔径, 如图 2 所示.

为了方便推导假设天线波束主瓣内目标信杂比近似不变, 主瓣外信杂比近似为 0, RRP 前每个距离单元的内子带信号的功率谱采样点数为  $M$ . 当只用一个距离单元内的回波做参数估计时, 由 (17) 式可得

$$\mathbf{P} \approx \frac{P_{s0}}{P_{c0}} \begin{bmatrix} M & & \frac{M^3}{12N^2} \\ & \frac{M^3}{12N^2} & \\ \frac{M^3}{12N^2} & & \frac{M^5}{80N^4} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

其中,  $P_{s0}$  是归一化信号功率谱幅度,  $P_{c0}$  是杂波功率谱幅度. 由此可以得到参数估计 CRB 如下:

$$\text{CRB}_\sigma = \frac{P_{c0}}{P_{s0}} \frac{9}{4M}, \quad (22)$$

$$\text{CRB}_{f_G} = \frac{1}{4\pi^2\sigma^2} N^2 \gamma^2 \frac{P_{c0}}{P_{s0}} \frac{12}{M^3}, \quad (23)$$

$$\text{CRB}_\gamma = \frac{1}{\pi^2\sigma^2} N^4 \gamma^4 \frac{P_{c0}}{P_{s0}} \frac{180}{M^5}. \quad (24)$$

为了克服距离徙动的影响, 采用 RRP 将  $L$  个距离单元的回波相参叠加在一起, 其中  $K$  个距离单元包含主瓣内目标回波. 叠加后的回波中, 杂波功率变为原来的  $L$  倍, 信号功率谱幅度不变, 带宽变为原来的  $K$  倍. 因此 RRP 后的 Fisher 信息矩阵如下:

$$I(\theta) = 16\pi^2 \mathbf{Q} \frac{P_s}{LP_c} \begin{bmatrix} KM & \frac{K^3 M^3}{3N^2} \\ \frac{K^3 M^3}{3N^2} & \frac{K^5 M^5}{5N^4} \end{bmatrix} \mathbf{Q}. \quad (25)$$

进而, 可得到 RRP 后参数估计 CRB 如下

$$\text{CRB}_\sigma = \frac{P_{c0}}{P_{s0}} \frac{9}{4M} \frac{L}{K}, \quad (26)$$

$$\text{CRB}_{f_G} = \frac{1}{4\pi^2 \sigma^2} N^2 \gamma^2 \frac{P_{c0}}{P_{s0}} \frac{12}{M^3} \frac{L}{K^3}, \quad (27)$$

$$\text{CRB}_\gamma = \frac{1}{\pi^2 \sigma^2} N^4 \gamma^4 \frac{P_{c0}}{P_{s0}} \frac{180}{M^5} \frac{L}{K^5}. \quad (28)$$

通常有  $L \approx K$ , 再由 (26) 式可得出结论, RRP 对目标 RCS 的估计性能没有改善, 而对多普勒参数估计性能则有显著的提高, 这也是 RRP 在实际 SAR 处理中得到广泛应用的原因. 但分辨率降得过低, 会导致  $L \gg K$ , 反而使得参数估计性能下降. 因此需要根据感兴趣的运动目标速度范围确定 RRP 的程度.

从文献 [10] 可知, 复图像域运动目标存在剩余距离徙动. 因此, 为了提高参数估计性能, 需要做 RRP 处理. 幸运的是, 复图像域的剩余距离徙动与目标的多普勒模糊数有关, 而在运动目标检测的过程中可以简单的估计出目标的多普勒模糊数, 因此可以利用估计出的多普勒模糊数估计目标的剩余距离徙动, 确定 RRP 的距离单元数目, 提高参数估计的性能.

## 5 运动及定位参数估计 CRB

下面讨论运动目标速度估计的 CRB, 并比较信号域和复图像域速度估计的极限性能. 由于距离向速度需要运动目标完整的相位历程, 因此下面关于距离向速度估计的结论只有在运动目标的距离徙动可以忽略, 或通过 RRP 消除距离徙动的影响时才成立, 而方位向速度估计没有这个要求.

由于矩阵  $\mathbf{P}$  仅与目标的功率谱有关, 而成像处理不改变目标的功率谱, 因此在信号域和复图像域做参数估计时矩阵  $\mathbf{P}$  相同. 利用未知参数与目标运动的关系  $v_r = f_D \lambda / 2$  和  $v_x = v_s - \sqrt{-r_c \lambda f_{rm} / 2}$ , 可以得到运动目标参数的估计性能.

在复图像域, 有  $\gamma = f_{rIm} / f_p^2 = f_r f_{rm} / ((f_r - f_{rm}) f_p^2)$ ,  $f_{rIm}$  是运动目标成像后的调频率, 以及  $f_G = f_D / f_p$ , 可以得到复图像域运动目标二维速度估计的 CRB 为

$$\text{var}_{Im}(v_r) = \frac{\lambda}{8\pi^2 \sigma^2} \frac{f_{rIm}^2}{f_p^4} [P^{-1}]_{22}, \quad (29)$$

$$\text{var}_{Im}(v_x) = \frac{1}{\pi^2 \sigma^2} \left( \frac{\partial v_x}{\partial f_{rm}} \frac{\partial f_{rm}}{\partial f_{rIm}} \right)^2 \frac{f_{rIm}^4}{f_p^6} [P^{-1}]_{33} = -\frac{r_c \lambda}{8\pi^2 \sigma^2} \frac{f_{rm}^3}{f_p^6} [P^{-1}]_{33}. \quad (30)$$

在信号域, 有  $\gamma = f_{rm} / f_p^2$  和  $f_G = f_D / f_p$ , 由此可以得到信号域运动目标二维速度估计的 CRB 为

$$\text{var}_{Si}(v_r) = \frac{\lambda}{8\pi^2 \sigma^2} \frac{f_{rm}^2}{f_p^4} [P^{-1}]_{22}, \quad (31)$$

$$\text{var}_{S_i}(v_x) = -\frac{r_c \lambda}{8\pi^2 \sigma^2} \frac{f_{rm}^3}{f_p^6} [P^{-1}]_{33}. \quad (32)$$

由于  $|f_{rIm}| = |f_r f_{rm} / (f_r - f_{rm})| > |f_{rm}|$ , 从 (29) 和 (31) 式可以得出:

**结论 4** 复图像域运动目标的距离向速度估计极限性能要差于信号域. 运动目标的方向向速度越小,  $f_{rm}$  和  $f_r$  就越接近,  $f_{rm}$  和  $f_{rIm}$  就相差越大, 参数估计极限性能下降就越多.

从 (30) 和 (32) 式可以看出, 复图像域运动目标的方向向速度估计极限性能与信号域相当, 但由于复图像域运动目标的 LFM 信号模型是由 SPP 近似得到, 并且近似误差随方向向速度减小而增大. 因此可以得出:

**结论 5** 复图像域运动目标的方向向速度估计极限性能要略差于信号域. 运动目标的方向向速度越小, 参数估计极限性能下降就越多.

由于运动目标存在距离向速度, 使得运动目标成像后的方向向位置发生偏移, 偏移的距离为  $C_t = \text{mod}(-f_D / f_r, T_s)^{[10]}$ . 因此, 方向向定位参数估计也就是对  $C_t$  的估计, 由 (19) 式可以得到, 在信号域和复图像域定位参数估计的 CRB 分别为

$$\text{var}_{S_i}(C_t) = \frac{1}{4\pi^2 \sigma^2 f_r^2} f_{rm}^2 [P^{-1}]_{22}, \quad (33)$$

$$\text{var}_{Im}(C_t) = \frac{1}{4\pi^2 \sigma^2 f_r^2} f_{rIm}^2 [P^{-1}]_{22}. \quad (34)$$

由于方向向定位参数可以由多普勒中心或距离向速度得到, 因此关于定位参数估计极限性能的结论与距离向速度估计时的结论类似, 为:

**结论 6** 复图像域运动目标的定位参数估计极限性能要差于信号域. 运动目标的方向向速度越小,  $f_{rm}$  和  $f_r$  就越接近,  $f_{rm}$  和  $f_{rIm}$  就相差越大, 参数估计极限性能下降就越多.

## 6 数值仿真

本节的数值仿真实验共分为两个部分: 1) 选取一块实际的单通道 SAR 的场景回波数据, 将具有设定 SCNR 的仿真运动目标回波叠加到场景回波数据上, 再经过成像处理得到运动目标的复图像域数据, 最后使用 MLE 估计出复图像域中的运动目标参数. 为验证文中的结论, 本文将运动目标叠加到场景的不同位置上实现 Monte-Carlo 仿真, 并将参数估计误差与 CRB 作比较. 2) 确定实际场景中一个实际的运动目标, 并对目标作参数估计, 然后利用估计出的参数对目标做聚焦成像.

### 6.1 多普勒参数估计 CRB

数值实验采用某所的单通道 Ku 波段机载 SAR, 工作参数分别为: 平台速度  $v_s=120$  m/s, 波长  $\lambda=0.02$  m, 发射信号为矩形包络的 LFM 信号, 带宽  $B_w=240$  MHz, 时宽  $P_w=40$   $\mu$ s, 脉冲重复频率  $f_p=2$  kHz.  $t=0$  时, 目标与雷达的距离为  $r_c=13500$  m. 选取场景大小为  $800(\text{pixel}) \times 4096(\text{pixel})$ , 其中方位和距离向像素点 (pixel) 的尺寸可根据前述参数计算. 回波成像结果和估计出的杂波功率分别如图 3 所示.

假设注入的仿真运动目标为匀速直线运动的点目标, 运动速度为  $(v_x, v_r)$ . 图 4 的上下两图分别给出了注入的一个速度为  $(5, 1)$  m/s 的仿真运动目标脉压后的和成像后的结果. 在仿真中, 通过调整运动目标的散射强度, 使得 RRP 后, 在一个距离单元中的运动目标信号满足设定的 SCNR.

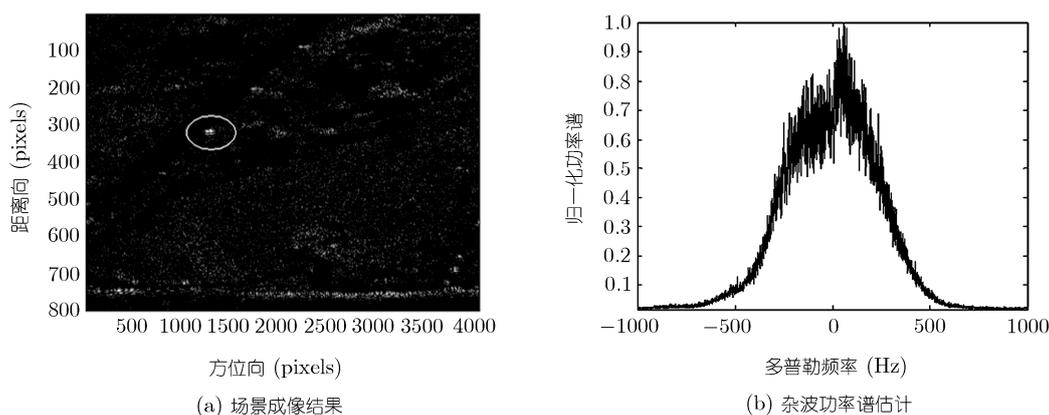


图 3 实际数据处理

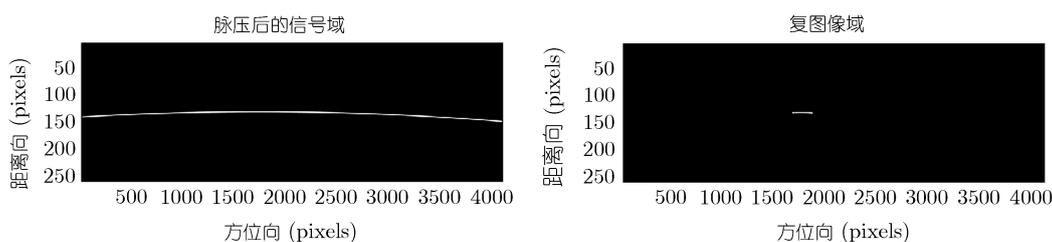


图 4 速度为 (5, 1) m/s 的运动目标脉压的和成像的结果

图 5 给出了多普勒参数 MLE 误差和 CRB 随运动目标二维速度和信杂噪比的变化关系. 图上带“\*”线给出了由 (10) 式通过数值计算得到的准确 CRB, 带 o 线给出了由 (19) 和 (20) 式得到的 CRB 近似值, 虚线给出了 MLE 误差的 Monte-Carlo 仿真结果. 从图 5 各子图可见, 经过 (19) 和 (20) 式得到的 CRB 近似值与由 (10) 式得到的准确值吻合得很好, 因此本文 CRB 推导过程中的近似是合理的.

图 5(a), (b) 给出了速度为 (-6, 10)m/s 的运动目标, 多普勒参数估计误差与运动目标信杂噪比的关系. 可以看出如结论 1 所述, 信杂噪比越高, 多普勒参数估计的 CRB 越小, 信杂噪比每增大  $k$  dB, 多普勒参数估计的 CRB 就减小  $k$  dB. 图 5(c), (d) 给出了信杂噪比为 20 dB, 方位向速度为 -6 m/s 的运动目标, 多普勒参数估计误差与运动目标距离向速度的关系. 如结论 2 所述当运动目标距离向速度接近 0 时, 多普勒中心接近杂波中心, 估计误差较大; 而多普勒中心远离杂波中心时估计误差较小. 图 5(e), (f) 给出了信杂噪比为 20 dB, 距离向速度为 10 m/s 的运动目标, 多普勒参数估计误差与运动目标方位向速度的关系. 在复图像域, 方位向速度的绝对值越小, 调频率的绝对值越大. 由此看出, 如结论 3 所述, 运动目标的多普勒调频率的绝对值越大, 多普勒参数估计误差也越大.

在复图像域, 运动目标虽然仍可以近似为 LFM 信号, 但由于成像过程中的驻留相位原理存在高阶误差, 且当运动目标方位向速度很慢时, 高阶误差相对较大. 因此, 在复图像域利用 LFM 信号模型实现 MLE 估计误差比推导出的 CRB 大, 且方位向速度越慢, 两者相差越大.

### 6.2 运动及定位参数估计 CRB

图 6 给出了运动目标二维速度估计的仿真结果. 图 6(a), (b) 给出了信杂噪比为 20 dB, 方位向速度为 -6 m/s 的运动目标, 二维速度估计误差与运动目标距离向速度的关系. 图 6(c), (d) 给出了信杂

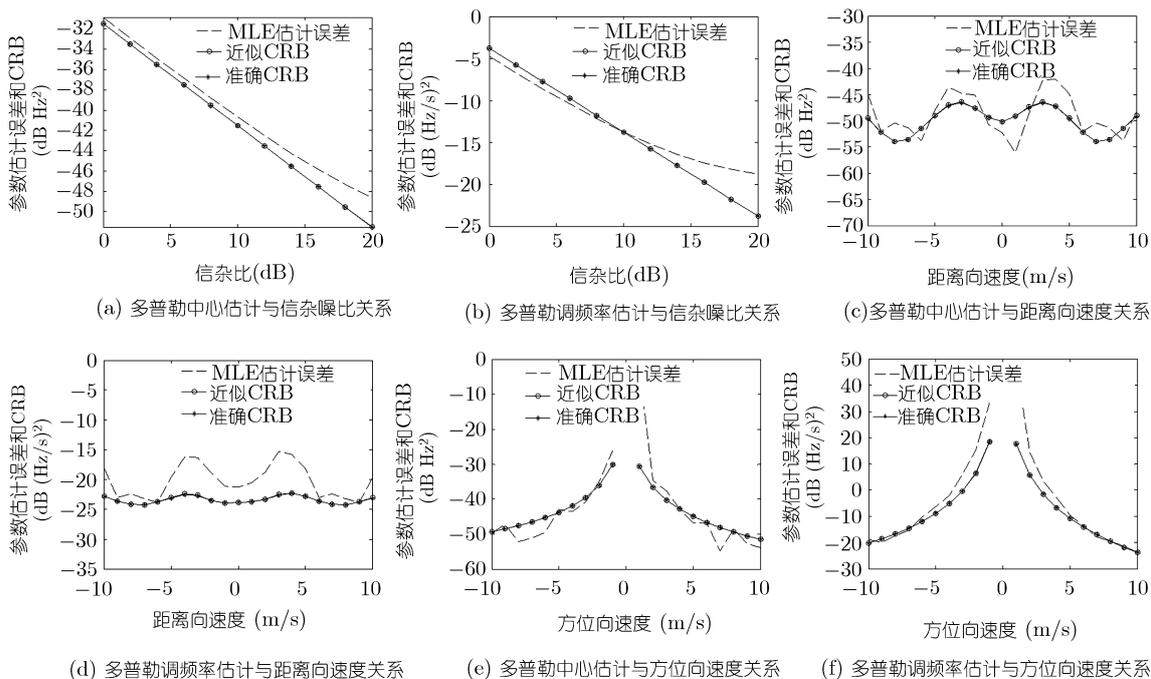


图 5 多普勒参数估计 CRB 分析

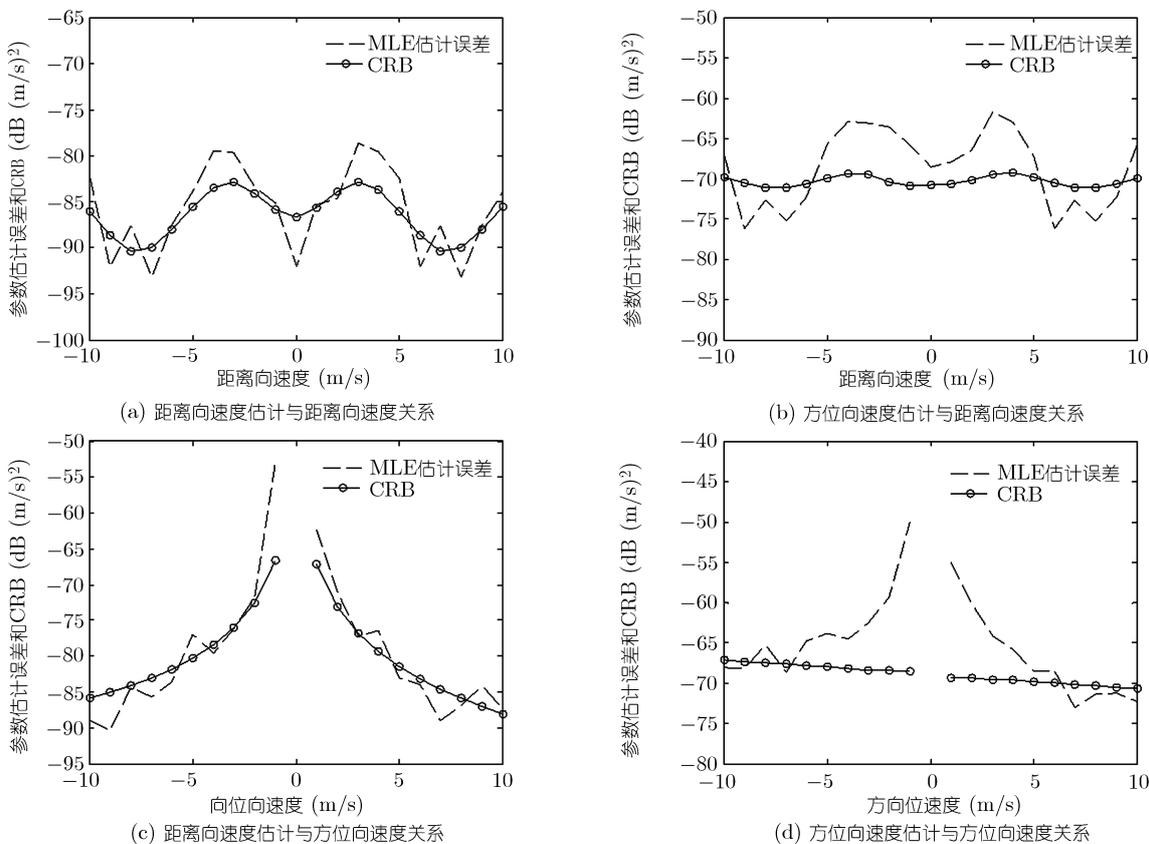


图 6 运动目标运动参数 CRB 分析

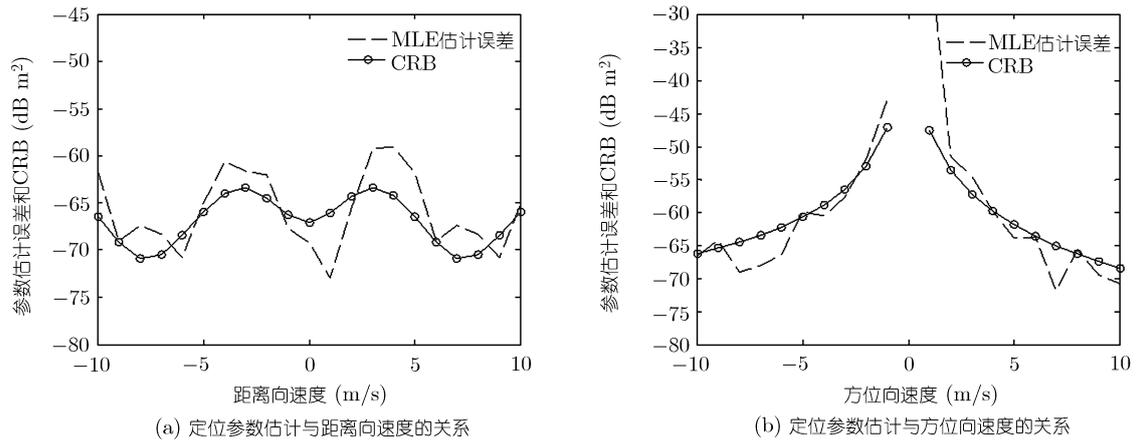


图 7 运动目标定位参数 CRB 分析

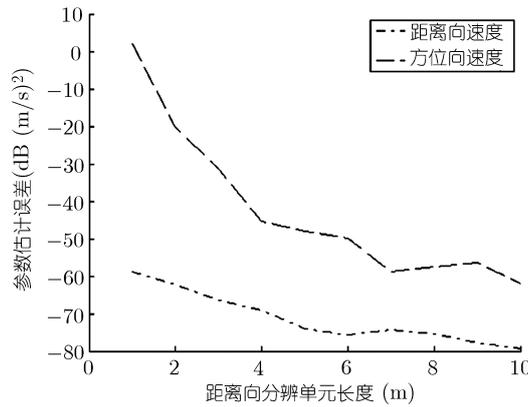


图 8 RRP 对的 MLE 估计误差的影响

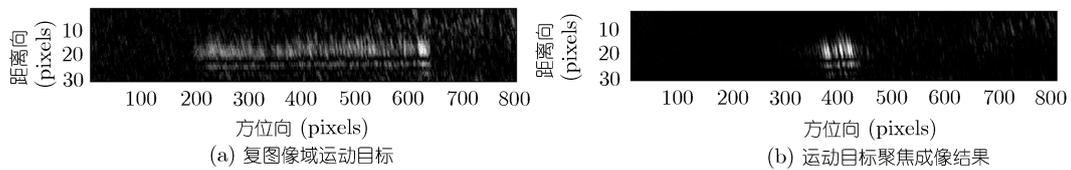


图 9 实际数据处理结果

噪比为 20 dB, 距离向速度为 10 m/s 的运动目标, 二维速度估计误差与运动目标方位向速度的关系. 从图上可以看出, 当目标具有一定方位向速度时, MLE 的结果与 CRB 吻合得较好. 但方位向速度很小时, 由于驻留相位原理误差增大, 会导致复图像域速度估计精度下降. 当目标脉压后信杂比 10 dB, 方位向速度绝对值大于 1 m/s 时, 复图像域距离向和方位向速度估计误差均小于 0.01 m/s. 由此可见, 在单通道 SAR 复图像域可以实现目标速度的有效估计.

图 7 给出了运动目标方位向定位误差与目标二维速度的关系. 可以看到, 由于驻留相位原理的影响, 当方位向速度较小时, 定位误差较大.

### 6.3 RRP 参数估计性能验证

图 8 给出了一个方位向和距离向速度均为 15 m/s 的运动目标利用 RRP 实现 MLE 的仿真结果. 由于存在多普勒模糊, 运动目标在复图像域存在严重的距离徙动, 导致运动目标的参数估计性能降低. 通过 RRP 增加距离分辨单元的长度后, 可以看出, 运动目标参数估计性能显著提高.

### 6.4 实际数据处理

图 3(a) 所示场景的左上部分有一条较为明显的公路, 在路的旁边有若干的运动目标. 取出图上圆圈标示出的运动目标如图 9(a) 所示. 通过参数估计, 得到运动目标的速度为  $(-2.44, 1.76)$  m/s. 根据估计出的目标运动参数对目标聚焦成像的结果如图 9(b) 所示. 由于成像过程中加窗的影响, 以及运动目标本身有一定尺寸, 运动目标在图像的距离和方位向都有一定的扩展, 但相比于图 9(a) 有明显的聚焦效果.

## 7 结论

在 SAR 复图像域运动目标信号模型的基础上, 本文推导了色高斯分布杂波中运动目标未知参数估计的 CRB, 给出了参数估计极限性能与运动目标参数的关系, 并比较了信号域和复图像域参数估计极限性能. 复图像域的参数估计极限性能虽然较信号域有所下降, 但在满足一定方位向速度时, 仍然有较好的估计性能. 同时, 通过分析引入 RRP 时的 CRB 变化, 给出了 RRP 对参数估计性能的影响. 总之, 通过最大似然等优化的参数估计方法, 能够在 SAR 复图像域实现地面运动目标多普勒参数和运动参数的有效估计.

## 参考文献

- 1 保铮, 邢孟道. 雷达成像技术. 北京: 电子工业出版社, 2005
- 2 Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms. Boston: Artech House, 1995
- 3 Oliver C, Quegan S. Understanding Synthetic Aperture Radar Images. Norwood, MA: Artech House, 1998
- 4 Raney R K. Synthetic aperture imaging radar and moving targets. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1971, 7: 499–505
- 5 Ouchi K. On the multilook images of moving targets by synthetic aperture radars. IEEE Trans AP, 1985, 33: 823–827
- 6 Schleher D C. MTI and Pulsed Doppler Radar. London: ArtechHouse Inc, 1991
- 7 Klemm R. Space-Time Adaptive Processing: Principles and Applications. London: Institute of Electrical Engineers, 1998
- 8 Beaulne P D, Gierull C H. Preliminary design of a SAR-GMTI processing system for RADARSAT-2 MODEX data. In: Proceeding of IGASS'03, 2003. 1019–1021
- 9 Barbarossa S, Farina A. Space-time-frequency processing of synthetic aperture radar signals. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1994, 30: 341–358
- 10 Zuo Y, Xu J, Peng Y N. Doppler parameter estimation for single-channel SAR moving target based on a novel model in complex image domain. In: Proceeding of IGARSS'08, 2008. 1182–1185
- 11 Wood J C, Barry D T. Radon transformation of time-frequency distributions for analysis of multicomponent signals. IEEE Trans Signal Process, 1994, 42: 3166–3177
- 12 Peleg S, Friedlander B. Multicomponent signal analysis using the polynomial-phase transform. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1996, 32: 378–386

- 13 Porat B, Friedlander B. Blind deconvolution of polynomial phase signal using the high-order ambiguity function. *Signal Process*, 1996, 53: 149–163
- 14 Djuric P M, Kay S M. Parameter estimation of chirp signals. *IEEE Trans Acoust Speech Signal Process*, 1990, 38: 2118–2126
- 15 Zhou G, Giannakis G B, Swami A. On polynomial phase signals with time-varying amplitudes. *IEEE Trans Signal Process*, 1996, 44: 848–861
- 16 Friedlander B, Francos J M. Estimation of amplitude and phase multicomponent signals. *IEEE Trans Signal Process*, 1995, 43: 917–926
- 17 Peleg S, Porat B. The Cramer-Rao lower bound for signals with constant amplitude and polynomial phase. *IEEE Trans Signal Process*, 1991, 39: 749–752
- 18 Xu J, Peng Y N, Xia X G. Parametric SAR autofocus: inherent accuracy limitations and realization. *IEEE Trans Geosc Remot Sens*, 2004, 42: 2397–2411
- 19 Xu J, Peng Y N, Wan Q, et al. Doppler distributed clutter model of airborne radar and its parameters estimation. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2004, 47: 577–587
- 20 Xu J, Li G, Peng Y N, et al. Parametric velocity synthetic aperture radar: signal modeling and optimal methods, and parameter estimation. *IEEE Trans Geosc Remot Sens*, 2008, 46: 2463–2480
- 21 Xu J, Li G, Peng Y N, et al. Parametric velocity synthetic aperture radar: multilook processing and its application. *IEEE Trans Geosc Remot Sens*, 2008, 46: 3488–3502