

## 单通道 SAR 无模糊估计快速运动目标速度

张学攀<sup>\*①</sup> 廖桂生<sup>①</sup> 朱圣棋<sup>①</sup> 束宇翔<sup>②</sup> 李东<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

<sup>②</sup>(中国电子科技集团第三十八研究所 合肥 230088)

<sup>③</sup>(重庆大学通信与测控中心 重庆 400044)

**摘要:** 该文提出一种利用单通道相位信息无模糊估计地面运动目标径向速度方法。在距离频域做两视处理,并在多普勒域经过两视干涉处理,使得运动目标的干涉相位满足相位连续性假设。利用最小二乘线性拟合估计干涉相位关于多普勒频率的斜率,径向速度可由该斜率计算得到。该文方法具有不受相位缠绕影响的优点。相比于单通道幅度方法,该方法具有更高的估计精度和实时性。该方法在多普勒域能够同时估计多个目标径向速度。通过实测数据处理验证了该文方法的有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 地面运动目标检测; 快速运动目标; 径向速度无模糊估计; 单通道

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)08-1932-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01231

## Unambiguous Velocity Estimation for Fast Moving Targets Using Single Channel SAR

Zhang Xue-pan<sup>①</sup> Liao Gui-sheng<sup>①</sup> Zhu Sheng-qi<sup>①</sup> Shu Yu-xiang<sup>②</sup> Li Dong<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

<sup>②</sup>(No.38 Research Institute of CETC, Hefei 230088, China)

<sup>③</sup>(Center of Communication and Tracking Telemetry Command, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** A phase-based method using a single channel SAR is proposed to estimate the radial velocity of ground moving targets unambiguously. Two-look operation in the range frequency domain and interferometry in the Doppler domain are done made to keep the phase meet the assumption of phase continuity. The least squares linear fitting is used to estimate the slope between interferometric phase and Doppler frequency, and the radial velocity can be calculated by the slope. The proposed method possesses the advantage of being independent on phase wrapping. Compared with the single channel amplitude-based method, the method is able to provide greater precision and usefulness. The radial velocities of multi-targets can be estimated simultaneously in the Doppler domain. Experimental results validate the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** SAR; Ground moving targets indication; Fast moving targets; Unambiguous radial velocity estimation; Single-channel

### 1 引言

合成孔径雷达(SAR)-地面运动目标检测(Ground Moving Targets Indication, GMTI)系统广泛应用于军事侦察和交通监视等领域<sup>[1,2]</sup>。在SAR-GMTI系统中,无模糊估计运动目标径向速度是实现运动目标精确定位的必要前提<sup>[3-5]</sup>。径向速度无模糊估计方法主要分为多通道<sup>[2,6,7]</sup>和单通道<sup>[8-10]</sup>方法。多通道方法在沿航迹干涉系统构型下,主要通过多载频<sup>[6]</sup>或者多基线<sup>[7]</sup>,构造多组包

含运动目标径向速度的干涉相位,利用不同载频或基线的参差关系解径向速度模糊。但是多通道方法主要面临以下问题:系统实现成本较高,通道间误差和配准误差<sup>[11]</sup>等非理想因素对估计性能影响较大。单通道方法主要基于距离走动(包络信息)与运动目标径向速度线性相关的思想,进而估计运动目标的径向速度。由于包络信息不受相位缠绕问题影响,所以估计的径向速度是无模糊的。在单通道SAR系统下,通过2维搜索运动目标参数实现距离徙动校正,最优结果对应的参数即为运动目标真实参数<sup>[9]</sup>。另外,利用Radon变换通过2维搜索估计杂波对消后运动目标信号包络的斜率,进而实现运动目标径向速度无模糊估计<sup>[8]</sup>。这两种单通道方法均是利用运动目标包络信息,通过2维搜索参数

2013-08-13 收到, 2014-04-09 改回

国家自然科学基金(61101249), 国家 973 计划项目(2010CB731903)

和西安电子科技大学研究生创新基金(JB142001-11)资助课题

\*通信作者: 张学攀 xpzhang7@163.com

无模糊估计径向速度。但基于包络信息的单通道方法主要存在以下 3 点问题: (1) 由于目标包络信息并不敏感于运动目标参数, 估计精度较低; (2) 通过 2 维搜索估计参数, 运算量较大; (3) 2 维搜索步长和参数估计精度需要折中考虑。文献[10]综合考虑目标回波信号的幅度和相位信息, 利用广义似然比试验方法, 通过 1 维参数搜索估计运动目标参数, 在信杂比(Signal to Clutter Ratio, SCR)较高时取得了较好的结果。但是该方法需要同时满足距离维高分辨和方位维低分辨的假设, 而该假设并不适用于大多数 SAR 系统, 而且该方法并未考虑径向速度模糊问题。本文提出一种利用单通道相位信息无模糊估计运动目标径向速度的方法。所提方法通过距离频域两视操作和多普勒域干涉处理得到干涉相位与运动目标径向速度的关系, 经过上述处理后干涉相位满足相位连续性假设, 再利用最小二乘多项式拟合估计径向速度。

## 2 问题提出

建立单通道 SAR 系统下运动目标的信号模型。采用单通道单发单收方式, 发射线性调频信号, 平台以恒定速度  $V$  运行。以场景中运动目标  $T$  为研究对象,  $T$  到雷达平台航线的最近距离为  $R_B$ , 仅考虑径向速度  $V_r$ , 而忽略其他运动参数。通过单通道杂波抑制方法<sup>[8]</sup>后, 运动目标在距离脉冲压缩域的信号形式为

$$s(t_m) = A \exp \left[ -j \left( 4\pi f_c / c \right) \left[ R_B + V_r t_m + \left( V^2 t_m^2 / 2R_B \right) \right] \right] \quad (1)$$

其中,  $A$  为距离脉冲压缩后的幅度,  $f_c$  是载波中心频率,  $c$  为光速,  $t_m$  为慢时间。将式(1)通过方位向傅里叶变换转换到多普勒域, 即

$$S(f_d) = A' \exp \left[ -j \frac{2\pi f_c}{c} \left( 2R_B - \frac{V_r^2}{V^2} R_B \right) \right] \cdot \exp \left[ j \frac{2\pi f_d R_B V_r}{V^2} \right] \exp \left[ j \frac{\pi c f_d^2 R_B}{2f_c V^2} \right] \quad (2)$$

其中,  $A'$  为运动目标信号在多普勒域的幅度项,  $f_d$  为多普勒频率, 可以表示为

$$f_d = - \left( 2f_c / c \right) \left[ \left( V^2 t_m / R_B \right) + V_r \right] \quad (3)$$

将式(2)乘以方位向匹配函数的多普勒域结果  $S_a(f_d)$  得

$$S'(f_d) = A' \exp \left[ -j \left( 2\pi R_B / \lambda \right) \left[ 2 - \left( V_r^2 / V^2 \right) \right] \right] \cdot \exp \left( j 2\pi f_d R_B V_r / V^2 \right) \quad (4)$$

其中,  $S_a(f_d)$  可以表示为

$$S_a(f_d) = \exp \left( -j \pi c f_d^2 R_B / 2f_c V^2 \right) \quad (5)$$

由式(4)可见, 运动目标的径向速度包含在相位信息中。将相位关于多普勒频率做线性拟合, 则由该斜率可以估计径向速度, 称该方法为相位-多普勒拟合方法。该方法简单易行, 但需要满足相位连续性假设<sup>[12]</sup>, 即该方法的应用条件为相邻多普勒频率对应的相位之差小于  $\pi$ , 即

$$2\pi R_B V_r \Delta f_d / V^2 < \pi \quad (6)$$

其中, 多普勒频率分辨率  $\Delta f_d$  可以表示为  $\Delta f_d = f_{sa} / M_a$ ,  $f_{sa}$  为脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF),  $M_a$  为方位向傅里叶变换点数。由式(6)可知, 相位-多普勒拟合方法的最大不模糊速度为

$$V_{r,\max} = M_a V^2 / (2R_B f_{sa}) \quad (7)$$

将后文表 1 中系统参数代入式(7), 计算得  $V_{r,\max} = 3.2768$  m/s。由此可见, 相位-多普勒拟合方法可估计的最大不模糊速度较小, 对该方法具有很大限制, 需要探索新方法增大最大不模糊速度。

## 3 单通道两视干涉相位无模糊估计方法

### 3.1 理想情况

多视处理在不改变硬件设备时具有灵活且高效的应用。在距离脉冲压缩后, 将运动目标信号通过距离向快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)转换到距离频域, 通过两视处理<sup>[13,14]</sup>构造两视数据, 构造方法如图 1 所示, 给出了  $N_r$  较小和较大情况, 两视数据距离频谱间隔  $f$  可以表示为

$$f = N_r f_{sr} / M_r \quad (8)$$

其中,  $N_r$  为两视数据的距离频率单元间隔,  $f_{sr}$  为距离向采样频率,  $M_r$  为距离向离散傅里叶变换点数。

将两视数据通过距离向快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)转变到距离脉冲压缩域。将两视数据分别转换到多普勒频率, 并乘以方位向匹配函数, 有

$$S(f_{d1}) = A \exp \left[ -j \frac{2\pi}{c} \left( f_c + \frac{f}{2} \right) \left( 2R_B - \frac{V_r^2}{V^2} R_B \right) \right] \cdot \exp \left[ j \frac{2\pi f_{d1} R_B V_r}{V^2} \right] \quad (9)$$

$$S(f_{d2}) = A \exp \left[ -j \frac{2\pi}{c} \left( f_c - \frac{f}{2} \right) \left( 2R_B - \frac{V_r^2}{V^2} R_B \right) \right] \cdot \exp \left[ j \frac{2\pi f_{d2} R_B V_r}{V^2} \right] \quad (10)$$

$f_{d1}$  和  $f_{d2}$  分别为两视情况下的多普勒频率。

$$f_{d1} = - \left( 2/c \right) \left[ f_c + \left( f/2 \right) \right] \left[ \left( V^2 t_m / R_B \right) + V_r \right] \quad (11)$$

$$f_{d2} = - \left( 2/c \right) \left[ f_c - \left( f/2 \right) \right] \left[ \left( V^2 t_m / R_B \right) + V_r \right] \quad (12)$$

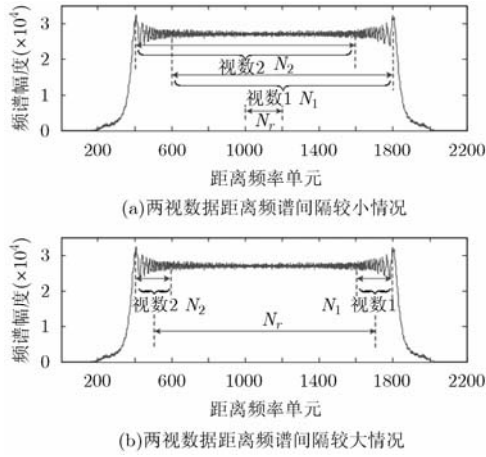


图1 两视数据构造方式

将式(11)和式(12)代入式(9)和式(10)，做干涉处理，并结合式(3)得

$$\Delta S = A^2 \exp \left[ -j \frac{2\pi f}{c} \left( 2R_B - \frac{V_r^2}{V^2} R_B \right) \right] \cdot \exp \left[ j \frac{2\pi f_d R_B V_r}{V^2} \frac{f}{f_c} \right] \quad (13)$$

经过上述处理，沿多普勒频率变化的相位减小为原来的  $f/f_c$ 。将式(8)代入式(13)，关于多普勒频率的相位连续性假设条件为

$$2\pi R_B V_r \Delta f_d N_r f_{sr} / V^2 M_r f_c < \pi \quad (14)$$

由于  $N_r f_{sr} \ll M_r f_c$ ，所以，经过上述两视干涉处理，该相位连续性假设条件被有效放宽。

由于运动目标多于一个像素，对同一多普勒频率上多个像素的干涉结果求相位并取其均值，得到运动目标在不同多普勒频率的干涉相位。将干涉相位关于多普勒频率做最小二乘线性拟合，并估计其斜率为  $\hat{k}$ ，由此得到径向速度估计值为

$$\hat{V}_r = \hat{k} V^2 f_c M_r / (2\pi R_B N_r f_s) \quad (15)$$

在满足式(14)的条件下，所提方法的最大不模糊速度为

$$V'_{r,\max} = M_a V^2 M_r f_c / (2R_B f_{sa} N_r f_{sr}) \quad (16)$$

对比式(7)和式(16)可见，经过所提方法处理，系统所能估计的最大不模糊速度提高了  $M_r f_c / N_r f_{sr}$  倍。

### 3.2 方位向速度的影响

上一节在只考虑径向速度的前提下介绍了所提方法。本节将着重分析运动目标方位向速度对径向速度估计的影响。当考虑运动目标的方位向速度时，运动目标在距离脉冲压缩后的信号形式为

$$s(t_m) = A \exp \left[ -j \frac{4\pi f_c}{c} \left( R_B + V_r t_m + \frac{(V - V_a)^2 t_m^2}{2R_B} \right) \right] \quad (17)$$

将式(17)通过方位向傅里叶变换转换到多普勒域，即

$$S(\bar{f}_d) = A' \exp \left[ -j \frac{2\pi f_c}{c} \left( 2R_B - \frac{V_r^2}{(V - V_a)^2} R_B \right) \right] \cdot \exp \left[ j \frac{2\pi \bar{f}_d R_B V_r}{(V - V_a)^2} \right] \exp \left[ j \frac{\pi c \bar{f}_d^2 R_B}{2f_c (V - V_a)^2} \right] \quad (18)$$

$\bar{f}_d$  为考虑运动目标方位向速度时的多普勒频率，可以表示为

$$\bar{f}_d = -\frac{2f_c}{c} \left( \frac{(V - V_a)^2 t_m}{R_B} + V_r \right) \quad (19)$$

在距离频域对式(18)做两视处理，其干涉结果可以推导为

$$\Delta S(\bar{f}_d) = A'^2 \exp \left[ -j \frac{2\pi f R_B}{c} \left( 2 - \frac{V_r^2}{(V - V_a)^2} \right) \right] \cdot \exp \left[ j \frac{f}{f_c} \frac{2\pi R_B V_r}{(V - V_a)^2} \bar{f}_d \right] \cdot \exp \left[ j \frac{\pi c R_B}{2(V - V_a)^2} \left( \frac{3f}{f_c^2} - \frac{f^3}{4f_c^4} \right) \bar{f}_d^2 \right] \quad (20)$$

对比式(18)和式(20)，可以发现：经过上述处理后，沿多普勒频率变化的相位减小为原来的  $f/f_c$ 。这与只考虑径向速度时的结论相同。将干涉相位关于多普勒频率做二次多项式拟合，估计得到一次项和二次项系数  $\hat{k}_1$  和  $\hat{k}_2$ 。根据式(20)可以得到运动目标方位向速度和径向速度估计值分别为

$$\hat{V}_a = V - \sqrt{(\pi c R_B / 2\hat{k}_2) \left[ (3f/f_c^2) - (f^3/4f_c^4) \right]} \quad (21)$$

$$\hat{V}_r = 4f_c^5 \hat{k}_1 \hat{k}_2 / c f^2 (12f_c^2 - f^2) \quad (22)$$

其中，运动目标的方位向速度小于 SAR 平台的运行速度。

## 4 多个运动目标的速度估计

估计多运动目标径向速度的关键在于如何将各个目标分离开：只要提取出单一运动目标信号，就可以通过所提方法无模糊估计径向速度。主要从以下几种情况分析多运动目标径向速度估计。

### 4.1 距离脉冲压缩域分离

当多个运动目标位于不同距离门时，目标信号在距离脉冲压缩域可以区分开。选取各目标信号对应的数据区域，再应用所提方法，即可估计各个目标的径向速度。多个目标在距离脉冲压缩域可分条件为

$$|R_1 - R_2| \geq \Delta R_1 / 2 + \Delta R_2 / 2 \quad (23)$$

其中,  $|\cdot|$  表示绝对值操作,  $R_1$  和  $R_2$  分别为目标 1 和目标 2 到平台运行轨迹的最近斜距,  $\Delta R_1$  和  $\Delta R_2$  分别为目标 1 和目标 2 距离走动在距离向投影的长度。

$$s(t_m, \hat{t}) = A \cdot \text{rect} \left[ \frac{t_m}{T_a} \right] \text{sinc} \left[ B_r \left( \hat{t} - \frac{2}{c} \left( R_B + V_{r1} t_m + \frac{V^2}{2R_B} t_m^2 \right) \right) \right] \exp \left[ -j \frac{4\pi f_c}{c} \left( R_B + V_{r1} t_m + \frac{V^2}{2R_B} t_m^2 \right) \right] \\ + A \cdot \text{rect} \left[ \frac{t_m}{T_a} \right] \text{sinc} \left[ B_r \left( \hat{t} - \frac{2}{c} \left( R_B + V_{r2} t_m + \frac{V^2}{2R_B} t_m^2 \right) \right) \right] \exp \left[ -j \frac{4\pi f_c}{c} \left( R_B + V_{r2} t_m + \frac{V^2}{2R_B} t_m^2 \right) \right] \quad (24)$$

其中,  $\hat{t}$  为快时间,  $B_r$  为发射信号的带宽。将式(24)转换到距离频域, 利用 SPECAN 算法<sup>[15]</sup>进行方位脉冲压缩, 得到运动目标在距离频域-多普勒域的表达形式

$$s(f_d, f_r) = A \text{rect} \left[ f_r / B_r \right] \exp \left( -j 4\pi (f_c + f_r) R_B / c \right) \\ \cdot \left\{ \text{sinc} \left[ \pi T_a (f_d + 2(f_c + f_r) V_{r1} / c) \right] \right. \\ \left. + \text{sinc} \left[ \pi T_a (f_d + 2(f_c + f_r) V_{r2} / c) \right] \right\} \quad (25)$$

由式(25)可见, 多个运动目标在距离频域-多普勒域可分条件为

$$-\frac{2V_{r1}}{c} \left( f_c + \frac{B_r}{2} \right) < -\frac{2V_{r2}}{c} \left( f_c - \frac{B_r}{2} \right) \quad (26)$$

这里, 假设  $V_{r1} > V_{r2}$ , 且不考虑多普勒模糊。当存在多普勒模糊时,  $V_{r1}$  和  $V_{r2}$  为两个目标的基带速度。

经过整理可以得到距离频域-多普勒域可分条件的更加直观的形式为

$$V_{r1}/V_{r2} > B_r / \left[ f_c - (B_r/2) \right] + 1 \quad (27)$$

根据表 1 中参数, 计算得到  $V_{r1}/V_{r2} > 1.0045$ 。例如, 设某一运动目标径向速度为 20 m/s, 则在距离频域-多普勒域可分离的径向速度范围为  $(-\infty, 19.91 \text{ m/s}] \cup [20.09 \text{ m/s}, +\infty)$ 。由此可见, 经过上述处理之后, 多个运动目标的可分离条件十分宽松。但是, 在距离频率-多普勒域分离多个运动目标时, 并没有考虑方位向速度; 当考虑运动目标方位向速度时, 需要预先估计方位向速度, 再设计相应的方位向匹配函数, 然后实现多个目标的分离。

## 5 仿真分析和实测数据处理

利用仿真和实测数据验证所提方法。利用所提方法实现动目标检测和定位的流程如图 2 所示。

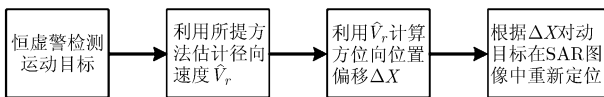


图 2 利用所提方法实现动目标检测和定位流程图

## 4.2 距离频域-多普勒域分离

考虑位于同一距离单元具有不同径向速度 ( $V_{r1}$  和  $V_{r2}$ ) 的两个运动目标。距离脉冲压缩后结果可以表示为

系统参数如表 1 所示, 仿真参数与实测系统参数相同, 以保证仿真分析的有效性。将系统参数代入式(16), 当  $N_r = M_r/2$ , 得到所提算法可估计的最大不模糊速度为  $V'_{r,max} = 966.6560 \text{ m/s}$ , 由此可见, 所提算法有效提高了可估计的最大不模糊速度。

表 1 系统参数

系统参数	符号	参数值
载波频率(GHz)	$f_c$	8.85
信号带宽(MHz)	$B_r$	40
合成孔径时间(s)	$T_a$	2.0478
采样频率(MHz)	$f_{sr}$	60
距离向 DFT 点数	$M_r$	2048
平台运行速度(m/s)	$V$	120
脉冲重复频率(Hz)	$f_{sa}$	1000
方位向 DFT 点数	$M_a$	4096
最近斜距(m)	$R_B$	9000

## 5.1 与单通道包络方法的对比

将所提方法与单通道包络方法<sup>[8]</sup>对比, 主要从估计精度、估计用时和稳健性 3 个方面进行仿真分析。此外, 仿真分析不同径向速度(设为 20 ~ 50 m/s)时所提方法与单通道包络方法的性能, 以说明两类方法的普适性。首先, 在理想情况下, 分析对比两类方法的估计精度和估计用时。为了综合考虑单通道包络方法的估计精度和估计用时, 我们仿真两种包络方法: 分别以  $0.01^\circ$  和  $0.001^\circ$  为搜索步长从  $0^\circ \sim 2^\circ$  进行搜索, 即包络方法 1 和包络方法 2。仿真结果如表 2 所示。由仿真结果中的估计值和估计相对误差可见, 所提方法具有最高的估计精度; 包络方法 1 由于搜索步长较大, 使得估计精度最差; 包络方法 2 通过减小搜索步长, 提高了估计精度。从估计用时方面可见, 所提方法估计用时最少; 包络方法 1 搜索步长较大, 使得估计用时较短, 但仍为所提方法的近似两倍; 而包络方法 2 减小搜索步长, 使得估计用时成倍增长。综合分析可知, 所提方法利用了最少的估计用时实现了最高的估计精度, 具有包络方法不可比拟的优势。

表 2 所提方法与包络方法对比仿真结果

理论值(m/s)		20.0000	30.0000	40.0000	50.0000
估计值 (m/s)	所提方法	19.9932	30.0003	40.0010	49.9990
	包络方法 1	20.0717	30.1084	40.1460	50.1850
	包络方法 2	20.0281	29.9775	39.9714	50.0104
估计相对 误差 (%)	所提方法	-0.034	0.001	0.002	-0.002
	包络方法 1	0.358	0.361	0.365	0.370
	包络方法 2	0.140	-0.075	-0.071	0.021
估计 用时 (s)	所提方法	5.6182	5.7732	5.5663	6.2380
	包络方法 1	11.8648	11.7070	11.6556	11.9753
	包络方法 2	88.7943	88.3634	88.4920	88.2873

5.2 所提方法在多目标情况下的应用

仿真分析所提方法在多目标情况下的应用，以 4 个动目标为例进行分析，仿真参数如表 3 所示，仿真结果如图 3~图 5 所示。

表 3 多运动目标仿真参数及估计结果

参数	目标 1	目标 2	目标 3	目标 4
最近斜距(m)	9000	9000	9000	9050
方位位置(m)	0	0	0	0
径向速度理论值(m/s)	20.0000	15.0000	15.5000	25.0000
径向速度估计值(m/s)	20.0053	14.9464	15.4943	25.0092
估计相对误差(%)	0.026	-0.036	0.040	0.040

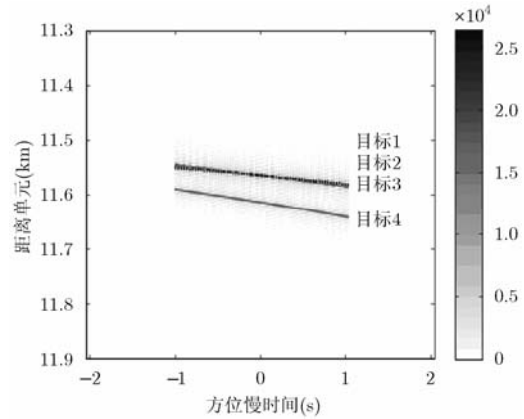


图 3 多个运动目标在距离脉冲压缩域可分情况示意

由图 3 可见，目标 4 可以在距离脉冲压缩域与其他目标分离。将不能分离的目标 1~目标 3 转换到多普勒域，如图 4(b)所示，可见目标 1 可以有效分离。由于目标 2 和目标 3 位于同一距离单元且径向速度仅相差 0.5 m/s，所以在多普勒域也不能分离。如果直接估计径向速度，即认为目标 2 和目标 3 为同一目标时，估计结果为 15.2536 m/s，和理论值有较大偏差，所以需要将两个目标分离后再估计其径向速度。将运动目标信号转换到距离频域-多普勒域，如图 5 所示，可见目标 2 和目标 3 也实现了有效分离。将分离后的单个运动目标转换到多普勒域估计径向速度，估计结果如表 3 所示。根据

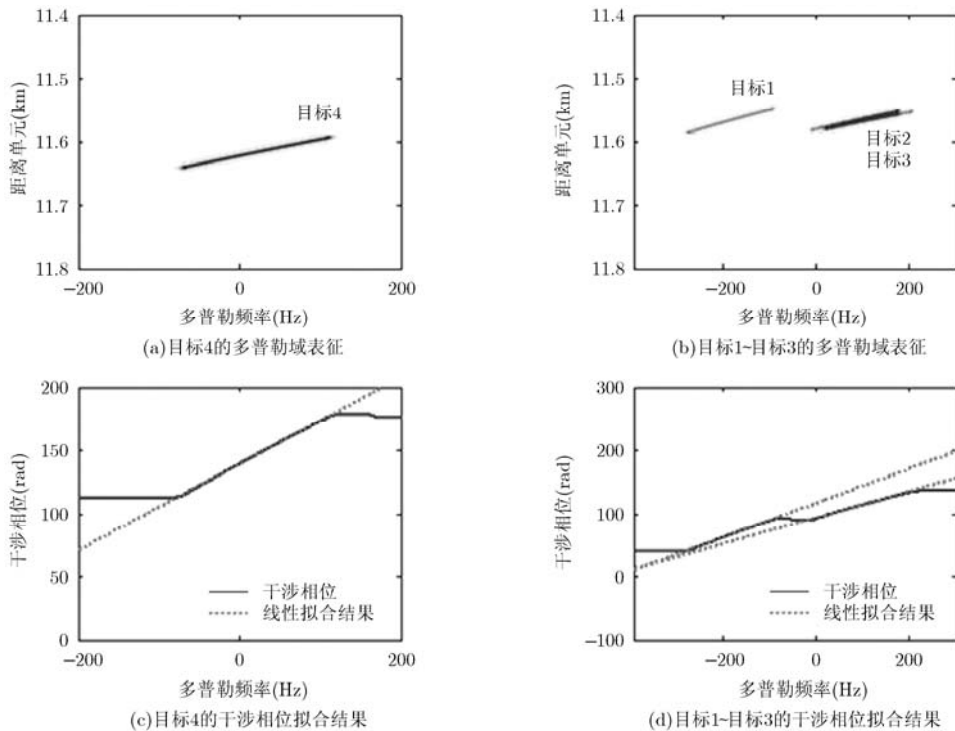


图 4 在多普勒域可分情况估计径向速度

仿真实验可以得出以下结论：在多个运动目标情况下，只要满足可分条件，就可以应用所提方法估计运动目标的径向速度，估计精度并没有受到影响；此外，在多普勒域可分时，所提方法具有同时估计多个目标径向速度的优势，如图 4(d)所示。

### 5.3 实测数据处理

通过实测数据处理验证所提方法的有效性，实测系统参数同表 1 所示，以位于实测系统中公路上的运动目标为研究对象。通过杂波抑制后检测出运动目标，转换到距离脉冲压缩域，再经过两视处理、方位脉冲压缩和干涉处理得到运动目标的干涉图像和解缠绕后的干涉相位如图 6 所示。选取运动目标对应的干涉相位关于多普勒频率做最小二乘线性拟合，拟合结果如图 6(b)所示。

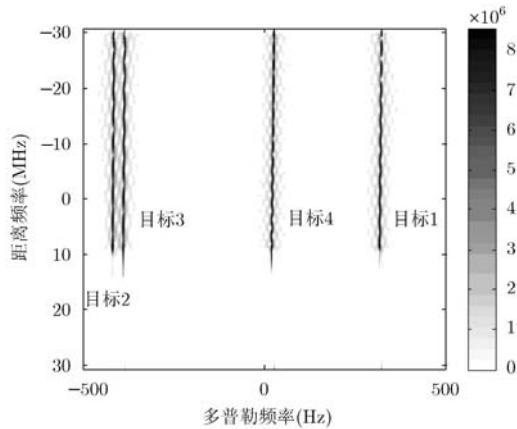


图 5 多个目标在距离频域-多普勒域可分情况示意

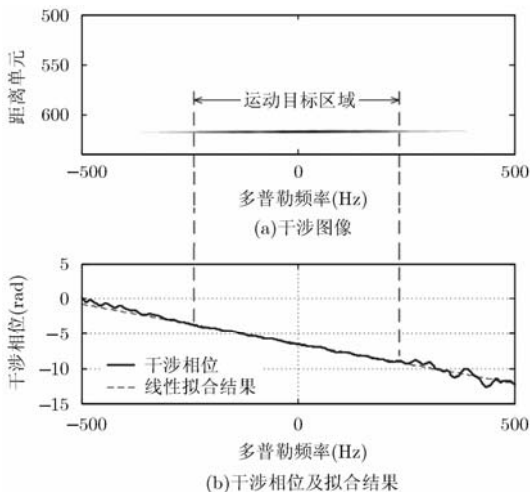


图 6 运动目标的干涉图像和干涉相位

根据线性斜率估计运动目标的径向速度为  $\hat{V}_r = -6.5552 \text{ m/s}$ 。为了说明所估计径向速度的有效性，对运动目标进行重新定位。由径向速度引起的目标方位向位置偏移为

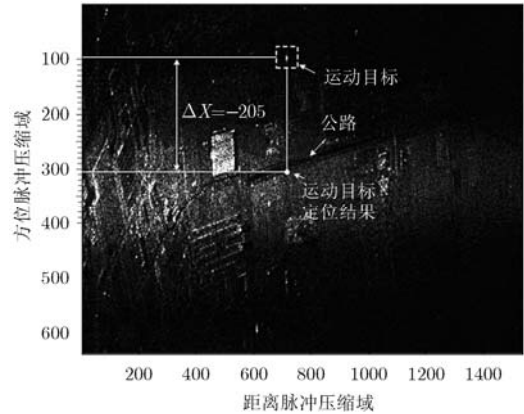


图 7 运动目标在 SAR 图像上定位结果

$$\Delta X = \text{round}\left(R_B \hat{V}_r / V \rho_a\right) \quad (28)$$

其中， $\rho_a$  为 SAR 图像的方位分辨率(2.4 m)， $\text{round}(\cdot)$  表示四舍五入取整操作。将估计的径向速度代入式(28)估计其方位向位置偏移为  $\Delta X = -205$ ，运动目标在 SAR 图像重新定位结果如图 7 所示，运动目标被有效定位于 SAR 图像中的公路上。由此可以验证所提算法在实测系统中应用的有效性。

## 6 结束语

本文提出一种利用单通道多普勒域干涉相位解模糊的方法。从应用条件、方位向速度的影响、最大不模糊速度以及多个运动目标情况等方面分析了所提方法的性能。与单通道包络方法进行对比仿真，结果说明所提方法具有高估计精度和低时间成本的优点。所提方法在多普勒域可以同时估计多个目标的径向速度，而且适合于实时性和估计精度要求较高的场合。但所提方法仍然存在以下问题：(1) 如果多个运动目标不能实现有效分离，则不能利用所提方法分别估计各个目标的径向速度；(2) 当同时考虑运动目标方位向速度和多个运动目标时，所提方法只能应用于方位向速度可以预估的前提下。我们将在后面的工作中继续研究探索解决问题的思路。

## 参考文献

- [1] 张丹丹, 仇晓兰, 胡东辉等. 基于运动目标检测的同步轨道星-空双站SAR杂波特性分析[J]. 雷达学报, 2013(3): 348-356. Zhang D D, Qiu X L, Hu D H, et al. Analysis of geosynchronous satellite-air bistatic SAR clutter characteristics from the viewpoint of ground moving target indication[J]. *Journal of Radars*, 2013(3): 348-356.
- [2] 钱江, 苏军海, 李凉海, 等. 利用KWT进行运动目标成像的三通道SAR-GMTI快速目标运动参数估计[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(7): 1660-1667.

- Qian J, Su J H, Li L H, *et al.* Tri-channel SAR-GMTI high-speed target imaging and motion parameter estimation using KWT[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(7): 1660–1667.
- [3] Lv G H, Wang J F, and Liu X Z. Ground moving target indication in SAR images by symmetric defocusing[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(2): 241–245.
- [4] Sun G C, Xing M D, Xia X G, *et al.* Robust ground moving-target imaging using deramp-keystone processing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(2): 966–982.
- [5] Gierull C H, Sikaneta I, Cerutti-Maori D. Two-step detector for RADARSAT-2's experimental GMTI mode[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(1): 436–454.
- [6] Wang G Y, Xia X G, Chen V C, *et al.* Detection, location, and imaging of fast moving targets using multifrequency antenna array SAR[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, 40(1): 345–355.
- [7] Budillon A, Pascazio V, and Schirinzi G. Estimation of radial velocity of moving targets by along-track interferometric SAR systems[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(3): 349–353.
- [8] Xu R P, Zhang D D, Hu D H, *et al.* A novel motion parameter estimation algorithm of fast moving targets via single-antenna airborne SAR system[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(5): 920–924.
- [9] Li G, Xia X G, Xu J, *et al.* A velocity estimation algorithm of moving targets using single antenna SAR[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(3): 1052–1062.
- [10] Dias J M B and Marques P A C. Multiple moving target detection and trajectory estimation using a single SAR sensor[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(2): 604–624.
- [11] Li Z F, Bao Z, and Suo Z Y. A Joint image coregistration, phase noise suppression, and phase unwrapping method based on subspace projection for multibaseline InSAR systems[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(3): 584–591.
- [12] Yu H W, Li Z F, and Bao Z. Residues cluster-based segmentation and outlier-detection method for large-scale phase unwrapping[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(10): 2865–2875.
- [13] Zhu S Q, Liao G S, Tao H H, *et al.* Ground moving target detection and velocity estimation based on spatial multilook processing for multichannel airborne SAR[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(2): 1322–1337.
- [14] Singh J and Datcu M. SAR target analysis based on multiple-sublook decomposition: a visual exploration approach[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(2): 247–251.
- [15] Baumgartner S V and Krieger G. Fast GMTI algorithm for traffic monitoring based on a priori knowledge[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(11): 4626–4641.
- 张学攀: 男, 1986 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像和运动目标参数估计.
- 廖桂生: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为阵列信号处理.
- 朱圣棋: 男, 1984 年生, 副教授, 博士, 研究方向为动目标检测及参数估计.