

机载正侧视合成孔径雷达地面运动 目标参数估计方法

朱圣棋, 廖桂生, 曲 毅, 周争光, 李 海

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 针对距离向速度估计中存在的模糊问题, 提出一种利用目标距离包络的走动轨迹, 通过 Radon 变换技术来无模糊地估计距离向速度的方法. 针对距离向加速度影响方位向速度估计问题, 提出了利用目标多普勒参数来估计运动目标真实合成孔径时间, 通过真实合成孔径时间与方位向速度的关系来确定目标方位向速度. 该方法能很好估计方位向速度而不受距离加速度的影响. 所提方法适合于单/多通道系统. 仿真和实测数据验证了方法的有效性.

关键词: 合成孔径雷达; 地面运动目标指示; Radon 变换; 速度模糊; 参数估计

中图分类号: TN959.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 12-2757-06

An Approach of Ground Moving Target Motion Parameter Estimation for Airborne Sidelooking SAR System

ZHU Sheng-qi, LIAO Gui-sheng, QU Yi, ZHOU Zheng-guang, LI Hai

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

Abstract: A novel algorithm is presented to solve the ambiguity problem of across-track velocity estimation for moving targets in airborne sidelooking SAR system. In this method, the across-track velocity can be unambiguously estimated according to the slope calculated by Radon transform of the profile extracted from the echo's range walk trajectory. In order to solve the problem the along-track velocity estimation is influenced by the across-track acceleration, we propose a new along-track velocity estimation approach. The along-track velocity can be obtained by the real synthetic aperture time (synthetic aperture length) of target. Proposed methods can be applied to both single- and multi-channel SAR systems. The validity and practicability are verified by the simulated and real measured data.

Key words: synthetic aperture radar (SAR); ground moving target indication (GMTI); radon transform; velocity ambiguity; parameter estimation

1 引言

合成孔径雷达(SAR-Synthetic Aperture Radar)是一种全天候、全天时、穿透性强、高分辨率的微波成像雷达, 能够提供对地物背景的二维图像. 传统 SAR 不涉及对运动目标的检测和成像能力, 随着需求的增加, 结合地面运动目标指示(GMTI)同时获取静止场景及运动目标检测与成像已成为军事和民用不可缺少的部分.

对于地面运动目标检测, 目前有单通道检测和多通道检测两大类. 单通道检测方法在实际运用中很受限制, 多通道检测方法主要有相位中心偏置天线(DPCA)技术^[1], 沿迹干涉(ATI)技术^[2~4]以及空时二维自适应处理(STAP)技术^[5]等. 实际中由于目标存在运动, 目标

的多普勒参数与静止场景的多普勒参数存在一定的差异, 导致在 SAR 成像过程中出现目标散焦和位置偏移现象. 特别是快速运动目标, 在合成孔径时间内, 目标出现越距离单元走动现象. 要想对运动目标进行重聚焦和重新定位处理, 必须正确地得到运动目标的相位历程, 而影响目标相位历程的因素有距离向速度, 距离向加速度, 方位向速度以及方位向加速度等.

运动目标参数估计是合成孔径雷达动目标定位和成像中的关键问题. 距离向速度体现在相位历程的一次项, 方位向速度和距离向加速度均体现在二次项上, 方位向加速度则体现在三次项上. 部分静止目标的二次项(多普勒调频率)估计方法可直接用于动目标的参数估计中, 如子孔径相关算法^[6], 相位梯度自聚焦算法^[7]等.

距离向速度估计方法有频谱分析法^[8],干涉法^[9],导向矢量搜索类方法^[10],时频分析方法^[11].实际环境中,由于时间采样导致多普勒模糊和空间采样导致角度模糊的存在,当目标运动速度较快时,上述距离向速度估计方法由于受到估计模糊的影响,将会导致错误的速度估计.对于利用目标调频率来进行方位向速度的估计方法^[12],当目标存在距离向加速度时,会大大影响方位向速度的估计精度,甚至导致该方法失效.即使目标不存在距离向加速度,由于目标的快速运动,也将会使目标的多普勒谱出现模糊.基于频谱分析和时频分析类的方位向速度估计方法也将失效.

针对已有方法^[8~11]在估计快速目标距离向速度存在的模糊问题,本文提出了一种无模糊距离向速度估计的新方法.该方法由于利用目标包络走动与距离向速度的线性关系,并且通过 Radon 变换技术来检测线性包络,因而能够无模糊地估计距离向速度.对于当目标存在距离向加速度而影响方位向速度估计的问题,本文根据方位向速度导致目标合成孔径时间变化的关系,推导出估计方位向速度的解析表达式,同时采用已估计的无模糊距离向速度进行包络和相位补偿,保证了多普勒参数估计不模糊,因此能够在存在距离向加速度的情况下,准确地估计方位向速度.数据处理验证了方法的有效性.

2 信号模型

图 1 为运动目标的斜距与载机运动的关系示意图,其中 v_a 和 v_c 分别表示方位向速度和距离向速度(投影到成像平面), a_a 和 a_c 分别表示方位向加速度和距离向加速度. t_m 表示方位慢时间, R_B 和 $R(t_m)$ 分别表示目标与载机的最近斜距和瞬时斜距, v 为载机速度.雷达接收的基带信号表达式如下

$$s(t, t_m) = \sum_{i=1}^N \sigma_i p\left(t - \frac{2R_i(t_m)}{c}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi f_c R_i(t_m)}{c}\right) \quad (1)$$

其中 t 为距离快时间, $p(\cdot)$ 为距离向包络, σ_i 为对应第 i 个散射点的复反射系数, N 为散射点数目, c 为光速, f_c 为发射信号载频.运动目标在慢时间 t_m 时刻的斜距表达式为

$$\begin{aligned} R(t_m) &= \sqrt{\left(vt_m - v_a t_m - \frac{1}{2} a_a t_m^2\right)^2 + \left(R_B - v_c t_m - \frac{1}{2} a_c t_m^2\right)^2} \\ &\approx R_B - v_c t_m + \frac{(v - v_a)^2 - a_c R_B}{2R_B} t_m^2 - \frac{(v - v_a) a_a}{2R_B} t_m^3 \end{aligned} \quad (2)$$

对于星载 SAR 系统,目标积累时间相对比较短,其

包络在合成孔径时间内跨距离门走动现象不严重.但对于机载 SAR 系统,合成孔径时间相对更长,采用一阶 keystone 变换去除由于目标距离向速度引起的距离走动^[13].对于目标方位向速度或者距离向加速度较大的运动目标,其距离弯曲也会很大,需要利用二阶甚至更高阶 keystone 变换进行处理,从而可以使得目标的能量主要集中在一个距离门内,便于参数估计和聚焦处理.

3 距离向速度估计算法

在 SAR-GMTI 系统中,由于数字采样的缘故,存在两类模糊.一类是脉冲重复频率引起的多普勒模糊.单通道 SAR 系统中,多普勒偏移类算法估计目标距离向速度范围为^[14]

$$-\frac{f_p \lambda}{4} < v_r < \frac{f_p \lambda}{4} \quad (3)$$

其中 f_p 为脉冲重复频率, v_r 是径向速度, λ 为波长.正侧视情况下, v_r 与距离向速度相等.另外一类是天线间距(空间采样)带来的方位模糊.在多通道 SAR 系统中,距离向速度估计范围可以放宽为下式

$$-\min \text{comMultiple}\left(\frac{f_p \lambda}{4}, \frac{v_a \lambda}{4d}\right) < v_r < \min \text{comMultiple}\left(\frac{f_p \lambda}{4}, \frac{v_a \lambda}{4d}\right) \quad (4)$$

其中 $\min \text{comMultiple}(\cdot)$ 表示取最小公倍数操作, d 为天线间距.尽管如此,仍然还是存在测速模糊现象.文献[14]利用运动目标的二维谱特性来估计快速运动目标的无模糊距离向速度,但该方法在实际应用中估计精度有限,存在目标部分照射导致目标方位谱发生变化的情况下估计精度很差,甚至失效.

对于静止目标,经过距离压缩和距离徙动校正后,其能量主要集中在一个距离门.但对于运动目标,由于距离向速度的存在,按静止目标经过距离压缩和徙动校正处理后,仍然会扩散到其它距离门,并且距离向速度越大,扩散得越明显.对于快速运动目标,忽略距离向加速度,方位向速度以及方位向加速度引起的包络走动,其包络走动量大小与方位慢时间成线性关系.如图 2 所示,距离门采样间隔 δr 和方位门采样间隔 δx 分别为:

$$\delta r = \frac{c}{2f_s} \text{ 和 } \delta x = \frac{v}{f_p} \quad (5)$$

经过 ΔT_m 时间目标回波包络距离压缩后在方位和距离上的所占据的单元 m 和 n 分别为:

$$m = \frac{v \Delta T_m}{\delta x} \text{ 和 } n = \frac{v_c \Delta T_m}{\delta r} \quad (6)$$

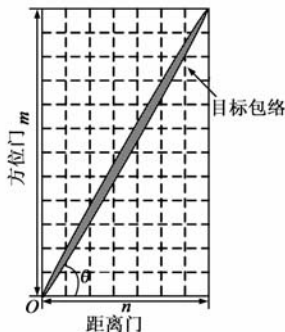


图2 距离压缩后快速目标回波包络沿距离分布

可以得到包络斜率 k (方位单元数比距离单元数) 表达式如下

$$k = \tan \theta = \frac{m}{n} = \frac{f_p c}{2v_c f_s} \quad (7)$$

其中 f_s 表示距离向的采样率. 实际环境中, 目标是在杂波加噪声的背景下进行检测的. 在单通道 SAR 系统中, 对于信杂噪比相对高的目标, 可以直接进行目标包络轨迹提取. 在多通道 SAR 系统中, 可以在杂波抑制后提取目标距离轨迹. 考虑到实际环境中存在图像配准误差, 基线误差和时变天线方向图误差, 采用联合多普勒通道的降维 STAP 方法 (3DT-SAP 或 EFA)^[15] 来进行杂波抑制. 杂波抑制后, 将数据从方位多普勒域变换到方位时间域, 还原出运动目标的距离包络历程曲线.

在 SAR 图像中, Radon 变换广泛应用在多普勒中心无模糊估计中^[28,29]. 采用 Radon 变换进行直线斜率 (倾角 θ) 估计时, 利用式 (7) 得到距离向速度估计如下

$$\hat{v}_c = \frac{f_p c}{2f_s \tan \hat{\theta}_i} \quad (8)$$

更精确的距离向模糊速度的主值可以通过传统的干涉法 (多通道) 或者多普勒频移法 (单通道) 获得, 结合式 (8) 得到的模糊数, 得到最终的高精度且无模糊的距离向速度估计.

4 方位向速度估计算法

为了避免距离向加速度影响方位向速度估计的问题, 采用方位向速度引起合成孔径长度的变化来计算方位向速度. 距离向速度和加速度对于目标在方位向的合成孔径长度影响很小, 从而避开距离向加速度对方位向速度的影响, 从理论上可以提高方位向速度的估计精度.

图 3 为运动目标存在方位向速度时的合成孔径长度变化示意图, 其中 L 表示静止场景中点目标的合成孔径长度, L_1 为运动目标由于方位向速度的影响导致额外增加或减少的合成孔径长度 (若目标方位向速度方向与载体飞行方向相反, 则 L_1 为负值, 表示减少). 此时运动目标的合成孔径时间 ΔT_2 可以表示如下

$$\Delta T_2 = \frac{L + L_1}{v} = \frac{L + v_a \Delta T_2 + \frac{1}{2} a_a (\Delta T_2)^2}{v} \quad (9)$$

实际应用中, 通过目标频谱关系来计算目标的合成孔径长度

$$\Delta f_d = -k_d \Delta T_2 - \xi (\Delta T_2)^2 \quad (10)$$

其中 Δf_d 为目标频谱带宽. 令 $s_r(t_m) = \exp(j\phi(t_m))$, $\phi(t_m) = 2\pi(f_d t_m + \frac{1}{2} k_d t_m^2 + \frac{1}{3} \xi t_m^3)$. 由式 (10) 得到符合实际雷达系统的合成孔径时间如下 (具体推导过程见附录 A):

$$\begin{cases} \Delta T_2 = \frac{-k_d - \sqrt{k_d^2 - 4\xi \Delta f_d}}{2\xi}, & \xi \neq 0 \\ \Delta T_2 = -\frac{\Delta f_d}{k_d}, & \xi = 0 \end{cases} \quad (11)$$

由式 (9) 可得下式:

$$v \Delta T_2 - L = v_a \Delta T_2 + \frac{1}{2} a_a (\Delta T_2)^2 \quad (12)$$

运动目标相位历程的三次项表示如下:

$$\xi = \frac{3(v - v_a) a_a}{\lambda R_B} \quad (13)$$

在式 (12) 和 (13) 两个方程中只存在 v_a 和 a_a 两个变量 (此时 ΔT_2 已知, 如式 (11) 所示), 解上述两个方程 (式 (12) 和 (13)) 可得方位向速度估计如下:

$$v_a = \frac{2v \Delta T_2 - L - \sqrt{(L - 2v \Delta T_2)^2 - 4 \Delta T_2 Q}}{2 \Delta T_2} \quad (14)$$

其中 $Q = v^2 \Delta T_2 - L v - \frac{1}{6} \lambda R_B \xi (\Delta T_2)^2$. 上式是方位向速度估计的精确表达式. 由以上公式推导过程可知: 不管存在加速度与否, 只要目标合成孔径时间估计准确, 方位向速度就能得到精确估计. 因此, 估计多普勒参数 Δf_d , k_d 和 ξ 至关重要. 为了使目标能量尽量集中在一个距离门内, 采用一阶 keystone 变换^[13] 将目标包络扳直. 若目标运动速度过大, 则可能会导致多普勒模糊, 使得 keystone 变换将失效, 导致 Δf_d 的估计也不准确. 此时需要利用上一节估计的距离向速度进行包络和相位补偿, 确保补偿后目标频谱不模糊, 为方位向速度估计提供无模糊的多普勒参数.

5 数据处理分析与验证

仿真数据 1 多普勒不模糊情况: 发射脉冲宽度 $10 \mu s$, 脉冲重复频率 250 Hz , 载体速度 100 m/s , 波长 0.7102 m , 合成孔径长度 400 m , 发射信号带宽 133.5 MHz , 距离采样率 150 MHz , 场景中运动目标 1 距离向速度为 10 m/s .

图 4 为运动目标 1 回波经过距离脉压后的信号, 由图可以看出, 目标由于其距离向速度的影响, 其回波包络出现线性的越距离单元走动. 采用边缘提取方法进行处理后, 利用 Radon 变换对提取的目标边缘进行检测, 得到直线的斜率, 估计目标的无模糊距离向速度, 如图 5 所示, 进而得到距离向速度模糊数.

采用估计的无模糊距离向速度进行距离走动校

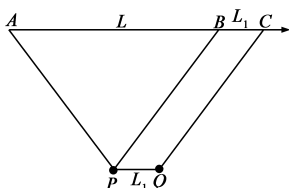


图3 存在方位速度时目标的合成孔径长度变化示意

正,由于走动校正受到目标距离向估计精度的影响,采用粗略估计的距离向速度进行补偿后仍然会存在一定的小距离走动,此时可以采用一阶 keystone 变换进行补

偿.如图 6 所示,目标能量主要集中在一个距离门内,确保后续的多普勒参数得到准确的估计.

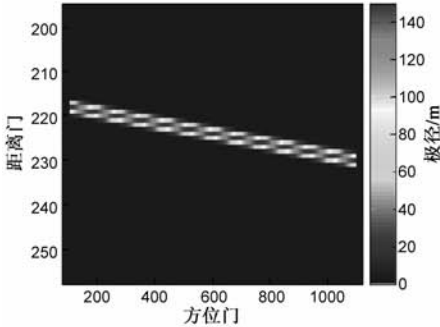


图4 运动目标1距离压缩后斜距历程

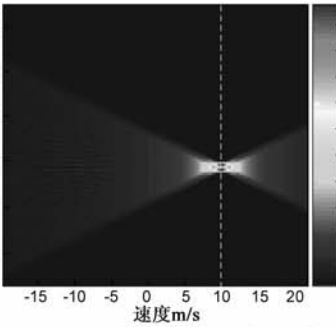


图5 利用Radon变换估计目标1速度值

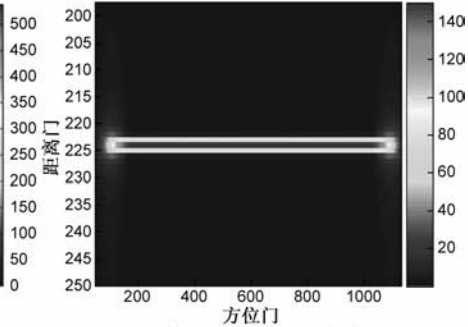


图6 采用一阶keystone变换结果

由图 7 可以看出:不同距离向速度的目标,其频谱中心偏离中心位置不同.根据频谱偏移量的大小,可以确定目标距离向速度的大小.对于相同距离向速度,存在距离向加速度时,其多普勒带宽有所变化.由于目标频谱不仅与距离向加速度有关,还与方位向速度有关,单从频谱上难于将它们分开,必须依靠其它参数方程一起求解.根据式(14)可以很好计算出目标方位向速度,如表 1 所示,目标 2 的方位向速度估计值为 9.97m/s,其相对误差为 0.3%.若采用传统的多普勒调频率方法^[7,11],估计得到的方位向速度则为 13.23m/s,相对误差则为 32.2%.由于方位向速度和距离向速度耦合在二次相位上,文献[16]采用沿航向多通道数据进行方位向速度估计,利用天线间距之间的相位信息进行解耦合处理.假定天线间距为 0.56m,其它参数不变的情况下,采用文献[16]的方法得到的方位向速度为 8.93m/s,相对误差为 10.7%.

0.15m,合成孔径长度 400m,发射带宽 133.5MHz,距离采样率 150MHz,场景中运动目标 3 的参数如表 2 所示.

图 8 为目标 3 采用 Radon 变换进行距离向速度估计图.目标存在加速度时的估计与没有加速度时的估计有些不同,取速度估计的平均值,可以得到目标的距离向速度估计值约 25m/s.由于目标距离向速度较大,导致目标回波出现方位向多普勒模糊现象.存在多普勒模糊时,直接采用 keystone 变换会导致距离走动补偿失效.采用距离向速度估计值进行初步补偿目标包络和相位历程后,再利用 keystone 变换进行校正剩余的徙动量.图 9 为目标 3 经过目标距离向速度估计初步补偿包络和相位后进行 keystone 变换的结果图.从图中可以看出,补偿后目标的多普勒谱不存在模糊,采用 keystone 变换可以完全校正距离徙动.

表 2 列出了目标 3 的参数估计值和相对误差,从表中可以看出,目标的速度估计精度较高,相对误差为 1.91%.若采用传统的多普勒调频率方法,则估计得到的方位向速度为 12.2m/s,相对误差为 18.4%.采用文献[16]的方法得到的目标方位向速度为 13.6m/s,相对误差为 9.3%.因此,可以看出:所提方法不仅适用于单通道处理,而且方位向速度估计精度也相对较高.从式(14)可看出:多普勒带宽的准确估计是本文方法的关键,方法仅适合条带 SAR 模式,不适用于扫描 SAR 模式.

表 1 目标 2 的参数估计 ($V_r=0\text{m/s}$, $V_a=10\text{m/s}$, $ac=1\text{m/s}^2$)

参数	多普勒带宽 Hz	多普勒调频率 Hz/s	方位向速度 m/s
真实值	95.1218	-21.4024	10
估计值	94.2	-21.2	9.97
相对误差百分比(%)	1	1.1	0.3

仿真数据 2 存在多普勒模糊情况:脉冲宽度 10us,脉冲重复频率 850Hz,载机速度 100m/s,波长

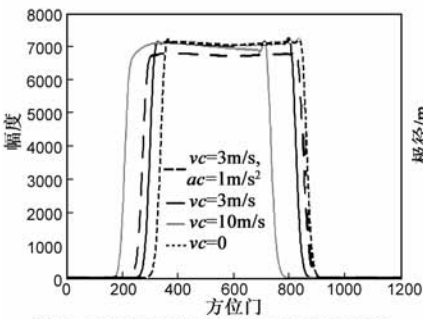


图7 不同距离向速度和加速度的频谱

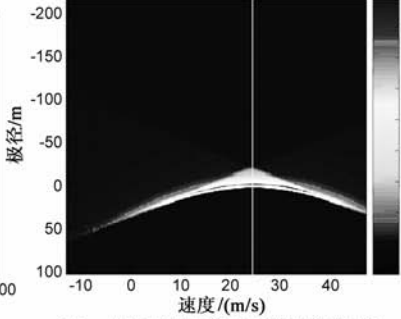


图8 目标3的距离向速度估计结果

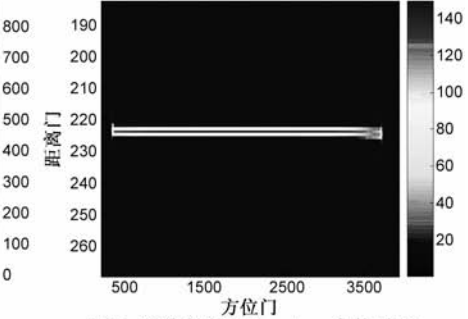


图9 速度补偿后keystone变换结果

表 2 目标 3 的参数估计 (SNR = 20dB, $V_a = 15\text{m/s}$,
 $V_r = 25\text{m/s}$, $a_c = 0.5\text{m/s}^2$)

参数	多普勒带宽 Hz	多普勒调频率 Hz/s	方位向速度 m/s
真实值	484.7059	-103	15
估计值	481.6667	-102.7	14.7128
相对误差百分比 (%)	0.63	0.29	1.91

实测数据处理 沿航向天线通道数目为 3,通道间隔为 0.56m,载机高度为 4845m,最近斜距为 6000m,载机速度为 115m/s,发射接收形式为:通道 2 发,通道 1,2,3 收,载频为 8.85GHz,调频带宽为 40MHz,方位分辨力(全孔径)为 0.56m,脉冲重复频率为 1000Hz,采样频率为 60MHz,距离分辨率为 2.5m.

实测数据中,通道之间的频率响应误差,方向图误差不可避免,采用在多普勒域杂波抑制算法,在一定程度上弥补系统误差,杂波抑制性能要好.也可以在方位多普勒域先进行通道均衡,补偿系统误差后再进行杂波抑制,减轻后续杂波抑制负担,杂波抑制效果更佳.

图 10 为地面的场景图,采用 STAP 方法处理,得到杂波抑制后的图 11,从图 11 可以看出,在标注区域检测出一个快速运动目标,目标能量在距离方向上扩散.多普勒域杂波抑制后截取目标所在区域,将数据变换到方位时间域,目标的距离历程体现在方位时间和距离时间域,对数据进行取模操作后,利用边缘检测算法,降低后续 Radon 变换的计算量,得到图 12.

距离向速度估计采用 Radon 变换方法(估计模糊

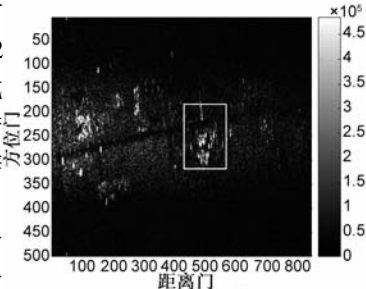


图10 场景图像

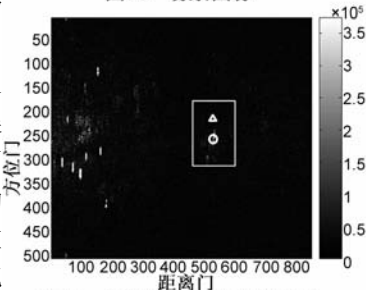


图11 多普勒域杂波抑制结果

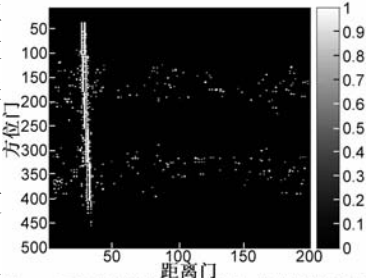


图12 采用边缘检测后提取的距离历程

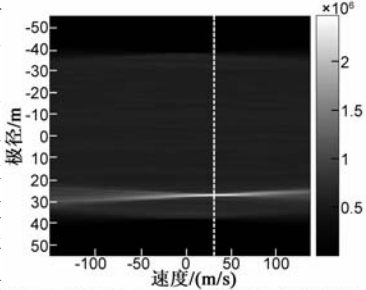


图13 采用Radon变换的速度估计结果

数)结合杂波抑制后 ATI 方法(估计基带速度),进而得到高精度且无模糊的距离向速度估计.Radon 变换得到目标速度估计值为 -34.9m/s ,如图 13 所示, Radon 变换输出的最大值对应的即为目标的速度值,负号代表速度方向与参考方向相反.取模糊整数为 -31.8m/s ,加上干涉法估计值 -3.173m/s ,得到目标距离向速度为 -34.973m/s .然后利用式(14)得到方位向速度估计值为 -10.23m/s .根据估计的距离向速度进行目标重定位,如图 11 所示,圆圈代表动目标检测位置,三角形代表目标重新定位的位置,可见目标基本上被定位到公路上.根据估计的方位向和距离向速度,可以计算出速度矢量(角度大约为 16 度)与道路的走向基本一致.

6 结论

本文提出了一种新的运动目标距离向速度无模糊估计方法.通过拟合目标的包络走动来估计目标距离向速度,该方法不存在空时采样模糊,对目标的距离包络利用 Radon 变换估计斜率,进而得到距离向速度.为了避免方位向速度估计受距离加速度的影响,提出一种利用目标由于方位向速度的存在导致合成孔径时间不同(合成孔径长度不同)进行方位向速度估计.分析了目标运动速度过大导致的多普勒模糊现象,并提出有效的解决方法.实际应用中为了得到精度较高的方位向速度的估计值,多普勒带宽要求得到相对准确的估计.由于要估计目标在 SAR 场景中的真实合成孔径时间,因此,所提方法仅适用于条带 SAR 模式,不适用扫描 SAR 模式.仿真和实测数据处理验证了方法的有效性.

附录 A

由式(10)进行展开,可以得到运动目标的合成孔径时间为:

$$\begin{cases} \Delta T_2 = \frac{-k_d \pm \sqrt{k_d^2 - 4\xi\Delta f_d}}{2\xi}, \xi \neq 0 \\ \Delta T_2 = -\frac{\Delta f_d}{k_d}, \xi = 0 \end{cases} \tag{A1}$$

上式中 k_d 为负值,合成孔径时间在 $\xi \neq 0$ 时有两不同解,理论上均满足方程.下面考虑实际系统情况下各个解的合理性.为了便于分析,首先对合成孔径时间的一个解求极限如下

$$\lim_{a_c \rightarrow 0} \frac{-k_d + \sqrt{k_d^2 - 4\xi\Delta f_d}}{2\xi} = \frac{(v - v_a)}{3a_a} + \frac{\sqrt{k_d^2 - 4\xi\Delta f_d}}{2\xi} \tag{A2}$$

其中 a_c 隐含在 k_d 中.上式合成孔径时间应对所有目标速度和加速度值应该满足实际情况.因此,当载机和目标方位向速度为 100m/s 和 10m/s,距离向加速度为

0.5m/s^2 , 则有

$$\frac{(v - v_a)}{3a_a} = 60 \quad (\text{A3})$$

$$\Delta T_2 = \frac{(v - v_a)}{3a_a} + \frac{\sqrt{k_d^2 - 4\xi\Delta f_d}}{2\xi} > 60 \quad (\text{A4})$$

式(A4)说明合成孔径时间大于 60s, 显然不符合实际的雷达系统, 应舍弃. 因此得到符合实际雷达系统的合成孔径时间如下

$$\begin{cases} \Delta T_2 = \frac{-k_d - \sqrt{k_d^2 - 4\xi\Delta f_d}}{2\xi}, & \xi \neq 0 \\ \Delta T_2 = -\frac{\Delta f_d}{k_d}, & \xi = 0 \end{cases} \quad (\text{A5})$$

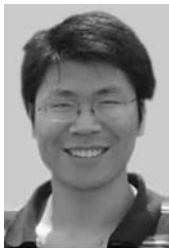
参考文献:

- [1] Wang H S C. Mainlobe clutter cancellation by DPCA for space-based radars [A]. IEEE Aerospace Applications Conference [C]. Crested Butte, CO, USA; IEEE, 1991. 1 - 128.
- [2] 郑明洁, 杨汝良. 一种改进的 DPCA 运动目标检测方法[J]. 电子学报, 2004, 32(9): 1429 - 1432.
Zheng Mingjie, Yang Ruliang. An improved DPCA moving targets detecting algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(9): 1429 - 1432. (in Chinese)
- [3] 刘向阳, 廖桂生, 等. 机载多通道 DPCA 误差补偿及稳健的杂波抑制[J]. 电子学报, 2009, 37(9): 1982 - 1988.
Liu Xiangyang, Liao Guisheng, et al. DPCA error compensation and robust clutter suppression for multi-channel airborne radar [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9): 1982 - 1988. (in Chinese)
- [4] 孙娜, 周荫清, 李景文. 一种新的双孔径天线干涉 SAR 运动目标检测方法[J]. 电子学报, 2003, 31(12): 1820 - 1823.
Sun Na, Zhou Yinqing, et al. A new moving target detect method based on dual-aperture interferometric SAR [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12): 1820 - 1823. (in Chinese)
- [5] Ward J. Space-time Adaptive Processing for Airborne Radar [R]. Lexington, MA: MIT Lincoln Laboratory, 1994.
- [6] Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms [M]. Boston: Artech House, 1995.
- [7] Wahl D E, Eichel P H, Ghiglia D C, Jakowatz C V. Phase gradient autofocus-a robust tool for high resolution SAR phase correction[J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1994, 30(3): 827 - 834.
- [8] Li Z F, Bao Z, Yang F F. Ground moving target detection and location based on SAR images for distributed spaceborne SAR [J]. Science in China Proc F, 2005, 48(5): 632 - 646.
- [9] Soumekh M, Himed B. Moving target detection and imaging

using an X-band along-track monopulse SAR[J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 2002, 38(1): 315 - 333.

- [10] Mendelson H. An alternative approach to multichannel radar detection and location [A]. IEEE Aerospace Conference IEEE, 2005 [C]. Big Sky, MT: IEEE, 2005. 2212 - 2221.
- [11] Yu D, Xue N, Munson D C. An analysis of time-frequency methods in SAR imaging of moving targets [A]. Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop. 2000. Proceedings of the 2000 IEEE [C]. Cambridge, MA, USA; IEEE, 2000. 221 - 225.
- [12] Fienup J R. Detecting moving targets in SAR imagery by focusing [J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 2001, 37(3): 794 - 809.
- [13] Perry R P, Dipietro R C, Fante R L. SAR imaging of moving targets [J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1999, 35(1): 188 - 200.
- [14] Marques P A C, Dias J M B. Velocity estimation of fast moving targets using a single SAR sensor [J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 2005, 41(1): 75 - 89.
- [15] Dipietro R C. Extended factored space-time processing for airborne radar systems [A]. Proceeding of the 26th Asilomar Conference on Signal, System, and Computers [C]. Pacific Grove, CA, USA; IEEE, 1992. 425 - 430.
- [16] 蔚婧, 廖桂生. 一种多通道运动目标重聚焦及运动目标参数估计方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(4): 624 - 628.
Yu Jing, Liao Guisheng. Multi-channel moving target focusing and parameter estimation algorithm [J]. Journal of Xidian University, 2009, 36(4): 624 - 628. (in Chinese)

作者简介:



朱圣祺 男, 1984 年生于江西赣州, 主要研究方向为阵列信号处理, 空时二维信号处理, SAR 多普勒参数估计, 机载/星载雷达地面运动目标检测, 参数估计以及成像。

E-mail: zhushengqi8@163.com



廖桂生 男, 1963 年生于广西桂林. 现为西安电子科技大学信号与信息处理学科博士生导师, 主要研究方向为分布式小卫星雷达系统、阵列信号处理以及地面运动目标检测等。

E-mail: gsliao@xidian.edu.cn