

地面运动目标不模糊径向速度估计的方法

杨垒, 王彤, 保铮

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 710071, 西安)

摘要: 针对在多通道合成孔径雷达地面运动目标检测系统中采用常规测速方法估计运动目标径向速度时产生模糊的问题, 提出了一种联合斜距历程和干涉相位的不模糊速度估计方法(JRHIP). 首先利用多重信号分类算法对目标的距离频域数据进行超分辨率处理, 然后对目标与雷达之间的斜距历程进行多项式拟合, 利用斜距历程多项式一次项系数与目标径向速度的对应关系得到不模糊、精度略低的径向速度, 再求解干涉相位的 2π 模糊次数, 然后通过解模糊后的目标干涉相位得出正确的径向速度. JRHIP方法充分利用了斜距历程测速的不模糊性和干涉相位测速的高灵敏性, 且没有增加系统硬件的复杂度. 实测数据处理结果表明, 在目标径向速度较大导致干涉相位产生模糊时, JRHIP方法仍然能够得到准确的径向速度, 进而完成对目标的正确定位.

关键词: 合成孔径雷达; 地面运动目标检测; 干涉相位; 斜距历程

中图分类号: TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)08-0076-04

Unambiguous Radial Velocity Estimation Method of Ground Moving Target

YANG Lei, WANG Tong, BAO Zheng

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

Abstract: Aiming at the radial velocity ambiguity of moving targets in conventional multi-channel synthetic aperture radar (SAR) ground moving target indication system, a new unambiguous radial velocity estimation method (JRHIP) is proposed. The method joints the range history with the interferometric phase. The multiple signal classification algorithm is used to improve the range resolution of the target image. And a unambiguous velocity with slightly low precision is obtained from the coefficient of the first order term in the polynomial that fits the range history of the target, and then is used to solve the interferometric phase ambiguity times. Then the true radial velocity is estimated by the interferometric phase with the known ambiguity time. The method combines the unambiguous characteristic of the range history and the high sensitivity of the interferometric phase, and does not increase any hardware complexity of the system. Experimental results on airborne SAR data process indicate that the method can obtain the true radial velocity and relocate the moving target with large radial velocity.

Keywords: synthetic aperture radar; ground moving target indication; interferometric phase; range history

由于干涉相位的 2π 模糊特性, 常规多通道处理体制在改善合成孔径雷达(SAR)系统^[1]的最小可检测速度(MDV)和定位能力的同时, 也带来了径向速

度估计模糊问题. 文献[2]根据运动目标的多普勒谱相对于静止杂波谱的偏移量与其径向速度成正比的关系, 通过估计此偏移量来估计径向速度, 但由于受

信噪比的限制,估计的多普勒偏移通常存在较大的误差,导致所估计的径向速度不准确.虽然系统采用多频发射接收^[3]、增加参差多基线^[1]、变化平台速度^[4]等途径可以缓解 MDV 和测速模糊之间的矛盾,但必然导致硬件系统复杂化,增加信号处理难度.本文从速度的物理概念出发,提出了一种联合斜距历程和目标干涉相位的不模糊径向速度估计方法(JRHIP).该方法利用了斜距历程测速的不模糊性和干涉相位测速的高灵敏性,能够获得不模糊的、高精度的径向速度.

1 运动目标斜距历程模型

先分析机载正侧视 SAR 系统中运动目标的斜距历程与径向速度之间的关系.为论述方便,定义雷达平台的飞行方向为 X 轴,地面上与之垂直的方向为 Y 轴,垂直地面方向为 Z 轴.计量雷达发射脉冲的时刻称为方位时间,用 t 表示, $t=0$ 时刻载机位于 $(0,0,H)$,飞行速度为 v_a .假定地面场景中存在一个恒速运动的目标,初始位置为 $(x_0, y_0, 0)$,方位向速度和 y 轴方向的速度(距离向速度)分别为 v_x 和 v_y .运动目标相对于雷达的实时斜距历程为

$$R(t) = ((x_0 + (v_x - v_a)t)^2 + (y_0 + v_y t)^2 + H^2)^{1/2} \quad (1)$$

假设 $t=t_b$ 时刻运动目标处于雷达波束的方位向中心(正侧视),将 $R(t)$ 在 t_b 时刻进行泰勒级数展开,省略 $(t-t_b)$ 的 3 次项以上的高次项,得到式(1)的近似式

$$R(t) \approx R_b + v_r(t-t_b) + \frac{1}{2R_b} \left((v_x - v_a)^2 + v_y^2 \left(1 - \left(\frac{y_b}{R_b} \right)^2 \right) \right) (t-t_b)^2 \quad (2)$$

式中: $R_b = (y_b^2 + H^2)^{1/2}$ 为运动目标处于雷达正侧视时的斜距; $y_b = y_0 + v_y t_b$ 为运动目标在 $t=t_b$ 时刻的 y 方向位置; $v_r = v_y \frac{y_b}{R_b}$ 为运动目标的等效径向速度.

2 不模糊径向速度估计方法

2.1 干涉相位估计模糊径向速度

当采用多天线沿航向干涉方式进行运动目标检测时,不同天线在相同位置观测场景的方位时间不同,运动目标的径向速度导致其斜距发生了变化,因此可以通过不同天线回波间的干涉相位估计目标径向速度.假设系统采取正侧视一发双收工作模式,天线 1 收发共用,天线 2 仅接收信号.在方位配准后,2

个天线获取的运动目标回波信号间的干涉相位为^[5]

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda v_a} v_r \quad (3)$$

式中: λ 为雷达载波波长; d 为 2 个天线相位中心间距.从式(3)可知,干涉相位测速方法是将运动目标在天线观测时间延迟 $\frac{d}{2v_a}$ 内的斜距变化量与波长进行比较,测速精度非常高.但是,由于干涉相位只能在 $(-\pi, \pi]$ 的区间内取值,所以目标径向速度过大就有可能造成相位模糊.假设干涉相位模糊了 m 次,则根据式(3)可得到运动目标径向速度为

$$v_r = \frac{(\Delta\varphi + 2\pi m)\lambda v_a}{2\pi d} \quad (4)$$

2.2 斜距历程估计不模糊径向速度

事实上,干涉相位模糊次数 m 是未知的,在利用式(4)进行速度估计时一般取 $m=0$,这将导致测速错误,进而导致不能正确对运动目标重新定位.从速度的基本物理概念来看,目标的径向速度等于其距离的变化率.如果能够获得目标距离随方位时间的变化规律,就可以得到不模糊的径向速度.从式(2)可以看出,运动目标的斜距历程近似由 3 部分组成:常数项 R_b ,运动目标处于雷达波束中心时的斜距;一次项 $v_r(t-t_b)$,运动目标在 SAR 图像上的距离走动,距离走动率即为其径向速度;二次项 $\frac{1}{2R_b} \left((v_x - v_a)^2 + v_y^2 \left(1 - \left(\frac{y_b}{R_b} \right)^2 \right) \right) (t-t_b)^2$,距离弯曲项,导致斜距随方位时间非线性变化.由 SAR 成像原理可知,距离压缩后目标的距离单元位置可以等效为其斜距.当获取了目标的距离压缩数据后,可以提取出目标的斜距历程坐标,然后通过二阶多项式对斜距历程进行最小二乘拟合,多项式的一次项系数就等于运动目标的径向速度.

为了减小散焦对检测性能的影响,用于运动目标检测的 SAR 系统倾向于使用低分辨率的系统参数.图像分辨率较低时,每一像素点代表较长的斜距,通过斜距历程估计径向速度的精度非常差.在不改变系统带宽的基础上,本文利用多重信号分类(MUSIC)算法^[6]获得了优于理论值的距离分辨率.假定雷达发射信号为线性调频信号,对于某一方位单元的回波信号,经过距离向去线性调频后得到的频域回波加噪声信号可写成

$$X(n) = \sum_{k=1}^K \alpha_k \exp\left(j \frac{4\pi}{c} r_k n \Delta f\right) + \eta \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

式中: K 为散射点总数; α_k 为第 k 个散射点回波的

幅度; r_k 为第 k 个散射点的斜距; c 为光速; Δf 为频率采样宽度; η 为方差为 σ^2 的白噪声; N 为频率采样点数. 对某一方位单元频域数据的协方差矩阵可以由下式估计

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{N-L+1} \sum_{m=0}^{N-L} \mathbf{X}_m \mathbf{X}_m^H \quad (6)$$

式中: $\mathbf{X}_m = [X(m), X(m+1), \dots, X(m+L-1)]^T$; L 为虚拟子阵的阵元数. 对 $L \times L$ 维协方差阵 $\hat{\mathbf{R}}$ 进行特征分解, 并假定特征值中存在 l 个大特征值. 将 $\hat{\mathbf{R}}$ 的 $L-l$ 个小特征值对应的特征向量称为噪声子空间 $\mathbf{U}_N = [u_{l+1}, u_{l+2}, \dots, u_L]$, 则 MUSIC 算法估计的空间谱就是我们所需要的距离向超分辨率数据

$$P_L(r) = \frac{1}{|\mathbf{e}^H(r) \mathbf{U}_N|^2} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{e}(r) = [1, \exp(j \frac{4\pi r}{c} \Delta f), \dots, \exp(j \frac{4\pi r}{c} (L-1) \Delta f)]^T$; r 为设定的斜距长度.

实际上, 一次雷达回波中包含很多散射点, 距离单元数目也非常多, 但并不需要对所有距离单元进行超分辨率处理, 只对运动目标信号进行处理即可. 因此, 在实际操作中, 首先将回波数据进行常规距离压缩, 并利用多通道优势抑制静止杂波, 然后加窗提取出距离低分辨率的运动目标数据, 变换至频率域进行 MUSIC 谱估计, 获得距离超分辨率数据, 再根据多个方位单元的距离超分辨率结果获取目标的斜距历程信息, 最后通过多项式最小二乘拟合求解径向速度.

2.3 联合斜距历程和相位估计径向速度

从前面分析可知, 干涉相位测速精度较高, 斜距历程测速无模糊. 因此, 本文将二者相结合以解决径向速度估计模糊问题. 首先利用超分辨率斜距历程得到不模糊径向速度的粗估计, 并确定模糊数 m ; 然后利用干涉相位获得模糊高精度径向速度 Δv_r ; 最后得到高精度径向速度估计 $v_r = \frac{m\lambda v_a}{2d} + \Delta v_r$. 很明显, 当不模糊速度的估计精度满足速度模糊数估计精度后, 系统的定位精度将主要取决于干涉相位的估计精度. 当采用杂波抑制后干涉获取干涉相位方式时, 本文方法能够得到很高的测速精度.

3 实测数据处理

处理对象为某研究所录取的一批机载三通道 SAR-GMTI 数据. 工作在正侧视模式下的 3 副天线依次沿航向排列, 中间的天线 2 是系统的发射天线, 所有天线同时接收回波. 系统工作在 X 波段, 带宽

为 40 MHz, 采样率为 60 MHz, 脉冲重复频率为 1 000 Hz, 雷达速度在 116 m/s 左右, 天线相位中心间距为 0.559 m. 下面重点对斜距历程估计径向速度的结果进行分析, 最后给出联合干涉相位进行运动目标重新定位的结果.

图 1 为本文所选数据在距离压缩后进行杂波抑制^[7]的结果. 选取天线为天线 1 和天线 2. 图 2 为图 1 中矩形框内运动目标 8 的放大图像. 由图 2 可以看出, 虽然斜距变化存在, 然而由于距离分辨率很差, 远远达不到测速的精度要求.

图 3 为对图 2 运动目标进行距离超分辨率处理的结果, 距离步长取为 0.1 m, 既满足了分辨率要求, 又不至于使运算量过大. 图 4 为斜距随回波时间的变化曲线. 从图 3、图 4 可以看出, 由于距离分辨率的提高, 运动目标斜距历程的可解析度得到了很大提高. 然而, 由于各种因素存在, 目标距离位置存在波动, 但不影响其整体趋势. 通过二阶多项式拟合, 如图 4 中斜线所示, 可以得出此运动目标的径向速度约为 5.8 m/s.

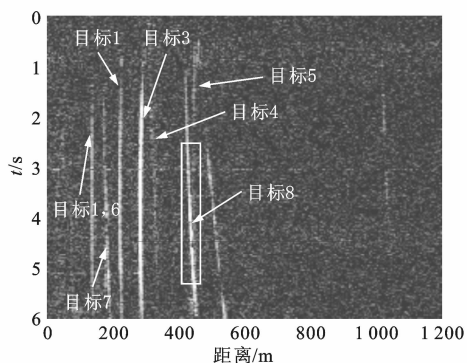


图1 距离压缩后的杂波抑制图像

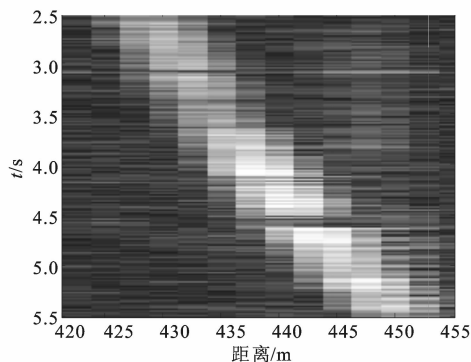


图2 由图1提取出的目标8图像

图 5 为 2 种测速方法相结合的运动目标定位结果. 由图 5 可以看出, 运动目标 1~目标 7 的径向速度都没有超过最大不模糊速度 3.51 m/s, 所以仅利用干涉相位就可以将其正确定位. 仅利用干涉相位

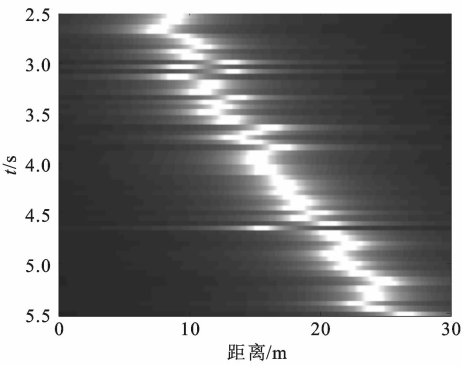


图 3 目标 8 的距离超分辨图像

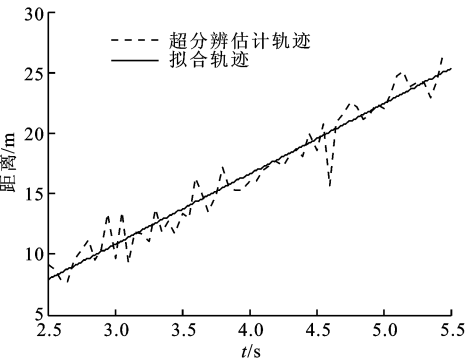
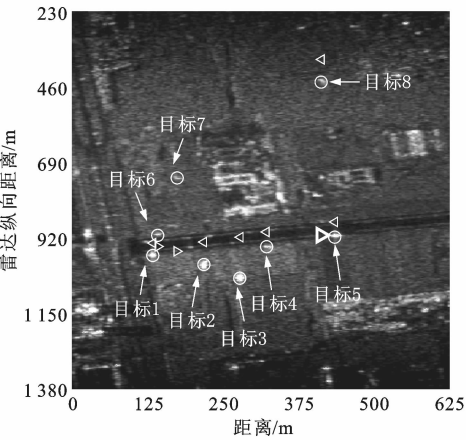


图 4 距离向峰值位置曲线及拟合曲线

定位目标 8 会发生错误,然而我们通过轨迹拟合得到其相位模糊数为 2,联合定位结果如图 5 中大三角所示,基本位于实验道路上,证明了速度估计的正确性。



○:恒虚警检测结果;△:仅利用干涉相位进行定位的结果

图 5 联合斜距历程和干涉相位的目标定位结果

4 结 论

本文提出一种适用于多通道 SAR-GMTI 系统的不模糊径向速度估计方法. 通过将不模糊的斜距历程测速方法和高精度的干涉相位测速方法相结合,解决了大径向速度估计模糊问题. 在利用斜距历程估计径向速度时,针对 SAR-GMTI 系统空间分辨率不高的情况,利用 MUSIC 超分辨算法提高了距离分辨率. 实测数据处理表明,在干涉相位发生模糊时,本算法仍然能够对运动目标进行正确测速和定位。

参考文献:

[1] KLEMM R. Space-time adaptive processing: principles and applications [M]. London, UK: IEE Press, 1998.

[2] MOREIRA J R, KEYDEL W. A new MTI-SAR approach using the reflectivity displacement method [J]. IEEE Trans on GRS, 1995, 33(5): 1238-1244.

[3] MAURICE R, ERICH M, DANIEL N. Capabilities of dual-frequency millimeter wave SAR with monopulse processing for ground moving target indication [J]. IEEE Trans on GRS, 2007, 45(3): 539-553.

[4] WANG Genyuan, XIA Xianggen, CHEN V C. Dual-speed SAR imaging of moving targets [J]. IEEE Trans on AES, 2006, 42(1): 368-379.

[5] GIERULL C H. Ground moving target parameter estimation for two-channel SAR [J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2006, 153(3): 224-233.

[6] KIM K T, SEO D K, KIM H T. Efficient radar target recognition using the MUSIC algorithm and invariant features [J]. IEEE Trans on AP, 2002, 50(3): 325-337.

[7] 杨垒, 王彤, 邢孟道, 等. 机载多通道 SAR-GMTI 的杂波抑制方法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(12): 2831-2834.

YANG Lei, WANG Tong, XING Mengdao, et al. The clutter suppression method of airborne multi-channel SAR-GMTI system [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2008, 30(12): 2831-2834.

(编辑 刘杨)