基于欧拉四面体的下降轨雷达图像定位方法

冉 聃 邓 欢 李亚超^{*} 全英汇 邢孟道 (西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘 要:导弹在末制导阶段因惯导误差导致弹体实际位置和惯导指示位置存在较大偏差,影响导引头对目标的准确 定位,无法满足精确打击的应用需求。由于弹载合成孔径雷达在导弹俯冲下降段特殊的成像几何构型,目标点对应 斜视角所在的平面与成像平面异面,因而传统的基于多普勒测角的定位方法已不再适用。该文利用图像匹配获取的 高精度地面点相对位置信息和雷达到各目标点的高精度斜距信息,通过构建欧拉四面体几何模型,以场景数字高程 作为先验信息筛选参考点,解算出以目标点为原点构建的北天东坐标系下的弹体实际位置,从而为弹体修偏提供准 确信息。仿真实验验证了该定位方法能很好地满足导弹末制导阶段的目标定位需求。

关键词:聚束合成孔径雷达;图像匹配;弹载下降段;定位 中图分类号: TN957 **文献标识码:** A

DOI: 10.11999/JEIT160512

文章编号: 1009-5896(2017)03-0677-07

Radar Image Positioning Method on Decent Trajectory Based on Euler Tetrahedron

RAN Dan DENG Huan LI Yachao QUAN Yinghui XING Mengdao (National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: There is a large deviation between the actual position of the missile and inertial guidance position in the final guidance stage due to the inertial navigation error, which influences seeker's accurate on positioning to the target, so it can not meet the application needs of precision strike. Due to the special imaging geometry of the missile borne Synthetic Aperture Radar (SAR) in the descending section, the squint angle plane of the target point is different from the imaging plane, so the traditional positioning method based on Doppler angle measurement is no longer applicable. This paper uses image matching to obtain high precision ground point relative position information and the high precision slant range information between radar and target point. By constructing a Euler tetrahedral geometry model, using the scene digital elevation as *a priori* information to screen the reference point, the actual position of the missile in the established North-sky-East coordinate system with an origin of the target point is calculated. Then it can provide accurate information for the missile maintenance. Simulation results show that this method can meet the requirements of target positioning on missile terminal guidance stage well.

Key words: Spotlight Synthetic Aperture Radar (SAR); Image matching; Decent section of missile-borne; Positioning

1 引言

弹载合成孔径雷达^[1](SAR)导引头作为新一代 精确制导武器因其在未来战场上所承担的重要任务 而越来越受到重视。在有效突防和准确高效打击重 要军事价值目标的要求下,日益严酷的战场环境也 对弹载雷达导引头信号处理系统的全天候,全天时, 远距离探测能力,隐身性,可靠性和抗干扰性能提

基金项目: 国家自然科学基金(61471283, 61303035)

出了更高要求[2]。

导弹在末制导阶段^[3,4]由于惯性导航的制导误差 随着时间累计逐渐积累,导致弹体实际位置和惯导 指示位置存在较大偏差,影响了导引头对目标的准 确定位,无法满足传统光学导引头的末段交接班精 度,降低了导弹的精确打击性能。弹载雷达导引头 在导弹下降段采用聚束 SAR 成像模式^[5],通过高分 辨2维聚焦成像^[6,7]实时获取目标场景的 SAR 图像。 几何失真校正^[8]到地平面的 SAR 实时图像与基准图 像进行匹配获取目标点的精确地理位置信息^[9,10],并 通过该位置信息反解出弹体位置^[11],进而实时修正 INS 误差及弹体飞行轨道偏差,为末段准确交接班 提供技术保障^[12,13]。

收稿日期: 2016-05-19; 改回日期: 2016-09-30; 网络出版: 2016-11-14 *通信作者: 李亚超 wode_ran@163.com

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61471283, 61303035)

为实现导弹在末制导阶段的高精度弹体定位, 国内外许多学者均展开研究。文献[14]中提到了基于 惯导数据的 SAR 平台定位方法,这种方法利用惯导 数据中的斜视角和俯仰角进行定位,其方法虽然简 单,但国内惯导误差普遍较大,导致定位精度较低。 文献[15]中提到的利用导弹在末制导中距离向上 3 点的位置以及斜距和地距的已知参数对弹体进行定 位,但是该定位方法只适用于 SAR 系统工作在正侧 视条带模式的情况。文献[16]中提到了一种基于景象 匹配的斜视 SAR 定位算法, 通过景象匹配, 利用数 字地图高精度配准对高速 SAR 平台进行定位, 但地 面匹配点位置较近时定位精度会下降。文献[17]建立 了基于匹配点距离差和多普勒频差的定位模型。对 于下降轨,弹道倾角不为零,此时速度矢量和中心 斜距矢量的夹角 θ,与速度矢量和瞬时斜距矢量的夹 角色,不在同一平面上,不能通过多普勒信息进行测 角定位。文献[18]中结合 SAR 成像的特点,结合时 空域特性提出一种基于参数估计的 SAR 定位方法。 但由于系统误差以及匹配误差将会导致传播矩阵误 差累积,很大程度上降低了定位的精度。文献[19] 利用距离多普勒和惯导输出的数据推导定位的解析 公式,减少了复杂的迭代计算,但该定位精度对导 弹各分系统的误差精度要求较高,目前难以实现。 以上传统方法均不能普遍适用于弹载雷达导引头下 降段大斜视或正侧视的聚束和条带成像模式, 过分 依赖惯导,对误差的鲁棒性不强。

为了寻找适应性强的定位方法,本文提出一种 基于欧拉四面体构型下的 SAR 弹体定位模型。欧拉 四面体的优势在于可以通过 6 条棱长计算出该四面 体的体积,利用海伦公式得到底面三角形的面积, 然后求得该四面体顶点到底面的垂直高度。该模型 通过 SAR 景象匹配获取地面点目标信息¹⁸,在基准 图中重构出以目标点为原点的北天东坐标系定位模 型。高精度基准图提供精确的地面点坐标信息,利 用景象匹配后得到的高精度仿射变换矩阵将基准图 中地面各点映射回 SAR 匹配图^[20],再由波门采样前 沿加上成像平面图像中的距离单元位置得到地面各 点到雷达的距离,保证了该欧拉四面体模型的定位 精度。该定位方法不需多幅图像进行数据融合提高 精度,仅需单幅匹配图就能实现高精度定位。同时, 该方法不依赖惯导数据, 仅需一个匹配点, 且该匹 配点的选取可以任意,其误差大小不会影响定位精 度。这大大降低了图像匹配的要求,提高了模型的 鲁棒性。

为了进一步降低定位误差,在建立坐标系和选 取参考点时,考虑到坐标系是可调整的,所以应保 证雷达与目标的斜距在地面上的投影与 X 轴的夹角 尽量小。同时,选取的参考点坐标应为距离目标点 较远的点。在实际应用过程中,雷达到目标的距离 还需考虑地面点的数字高程 (Digital Elevation Model, DEM^[21])。对于下降轨,雷达波束的擦地角 很大,因而在本文所建立的欧拉四面体构型中,雷 达到各地面点的距离近似等于成像平面基于图像测 距得到的距离值加上地面点的 DEM 值。

2 弹体定位原理

弹载实时成像处理算法计算后的场景图像数据,经过几何失真校正后与事先储存在弹上存储单元的适配区基准图进行高精度匹配算法处理,根据匹配过程中得到的仿射变换矩阵可以分别在两幅图中找到本文方法中计算弹体位置所需要的对应目标点、参考点以及任意一对匹配点的坐标信息。基准 图与实时图像对应坐标点的仿射变换关系可以通过 式(1)求得。

$$(x_s, y_s, 1) = \boldsymbol{H} \cdot (x_j, y_j, 1) \tag{1}$$

其中, (*x_s*, *y_s*) 为实时图像中某点坐标, (*x_j*, *y_j*) 为基 准图中对应坐标, *H* 为图像匹配算法得到的3×3阶 仿射变换矩阵。式(1)中,特征点第3维坐标归一化 为 1,相应变换矩阵*H*的最后一个元素也归一化为 1,便于求解。

另一方面,在校正到地平面的实时图像数据中 找到上述目标点、参考点以及任意一个匹配点的坐 标,根据成像平面距离向距离分辨单元的划分可以 分别确定 3 个点各自所处的单元格序号 k,进而根 据式(2)确定各点准确的距离信息。

$$R = R_0 + k \cdot \frac{C}{2F_s} \tag{2}$$

其中, R₀为雷达波门采样前沿, C/(2F_s)为每个距 离分辨单元的大小。

以弹体实际位置作为四面体的顶点,目标点、 参考点和匹配点作为该四面体底面三角形的 3 个顶 点,构建出欧拉四面体几何构型。成像过程中距离 向测距的准确性以及底面 3 点的坐标关系保证了四 面体 6 条棱长的求解。通过推导底面三角形坐标间 的数学关系,得到弹体投影到地平面的 2 维坐标位 置与已知参考点位置坐标的函数,从而求解出弹体 在当前坐标系下的 2 维坐标。再利用欧拉四面体几 何关系,求解出弹体位置在当前坐标系下的高度向 坐标,从而在 3 维层面准确确定弹体位置坐标,反 馈回控制系统,修正 INS 误差。该定位方法通过景 象匹配得到的高精度仿射变换矩阵和基于图像的雷 达测距保证欧拉四面体各点的位置精度,因此本方 法具备较高的定位精度。

3 定位模型构建

3.1 定位坐标系的选取

图 1 为 SAR 基准图中,以目标点为原点建立的 北天东坐标系下弹载雷达定位几何构型图。图中,A 为弹体实际位置, 雷达工作在聚束模式对目标场景 聚焦成像,得到目标场景在成像平面的 SAR 图像。 利用成像算法中成像平面与地平面之间的几何失真 校正映射函数将成像平面图像校正到地平面^{18]},得到 SAR 匹配图。通过图像匹配算法,将 SAR 图像和 基准图进行匹配,得到多个匹配点及 SAR 基准图与 匹配图之间的仿射变换矩阵 H^[9]。在基准图中选取 目标点T和参考点C,利用仿射变换矩阵H求出目 标点与图像中心点在匹配图中的位置坐标。建立以 目标点T为原点的北天东坐标系,如图1所示,点O 的坐标为(x,y,0),图像中心点坐标为 $(\Delta x, \Delta y, 0)$ 。 从所有匹配点中任意选取一个匹配点P1,构建以弹 体实际位置点A、匹配点P₁、目标点T和参考点C 为顶点的欧拉四面体。该定位模型输出的定位参量 是基于目标点为原点建立的北天东坐标系下的弹体 3 维位置,无需进行坐标变换的繁琐计算,便可直 接传给导弹的控制系统进行弹体位姿调整。

3.2 弹体位置求解

图 1 中匹配点 P_1 、目标点 T 和图像中心点 C 均 能在 SAR 匹配图中找到对应的图像坐标。因此,通 过点 T, C, P_1 在基准图中的位置坐标,求出欧拉四 面体底边 TP_1 , P_1C , CT 的长度 S_1 , S_2 , S_3 。弹体位置 点 A 到点 T, C, P_1 的距离分别为 R_1 , R_2 和 R_3 , 其表 达式为

$$R_{1} = R'_{1} + DEM_{1}$$

$$R_{2} = R'_{2} + DEM_{2}$$

$$R_{3} = R'_{3} + DEM_{3}$$
(3)

式中, DEM_1 , DEM_2 和 DEM_3 分别为点C, P_1 , T 的



图 1 目标点为原点的北天东坐标系下弹体定位图

当地数字高程。 R'_1 , R'_2 , R'_3 分别为目标点和点C, P_1 , T对应的斜距长度,可以通过将点T、点C和点 P_1 在 SAR 匹配图中的位置逆映射回成像平面 SAR 图, 找到它们所在的距离向位置坐标,再通过式(4)求 得。

$$R'_{1} = R_{0} + k_{1} \cdot c/(2f_{s})$$

$$R'_{2} = R_{0} + k_{2} \cdot c/(2f_{s})$$

$$R'_{3} = R_{0} + k_{3} \cdot c/(2f_{s})$$
(4)

式中, *R*₀为雷达波门采样前沿距离; *k*₁,*k*₂,*k*₃为点 *C*,*P*₁,*T*位于成像平面 SAR 图像中的距离单元数; c为光速, *f*,为距离向采样率。

对于图 1 中的欧拉四面体,其体积计算公式为 $V^2 = \frac{1}{2}$

利用海伦公式,求底面三角形 TCP₁ 的面积为

 $S_{\text{TCP}_{1}} = \sqrt{p(p - S_{1})(p - S_{2})(p - S_{3})}$ (6) 其中, p为三角形 TCP₁的周长的一半, p = $\frac{S_{1} + S_{2} + S_{3}}{2} \circ \text{则图 1 中弹体的高度 h 可通过四面体}$ 体积公式求得。

$$h = \frac{3V}{S_{\rm TCP_1}} \tag{7}$$

由图 1 可知底面三角形有式(8)所示的关系: $OT^2 - OC^2 - CT^2$

$$= \left(\mathrm{OF}^{2} + \mathrm{FT}^{2}\right) - \left(\mathrm{OE}^{2} + \mathrm{EC}^{2}\right) - \left(\mathrm{CH}^{2} + \mathrm{CG}^{2}\right)(8)$$

$$\left(R_1^2 - h^2 \right) - \left(R_2^2 - h^2 \right) - S_3^2 = \left(x^2 + y^2 \right) - \left[(x - \Delta x)^2 + (y - \Delta y)^2 \right] - \left(\Delta x^2 + \Delta y^2 \right)$$
(9)

由式(9)可得

$$u = 2\Delta x \sqrt{R_{1g}^2 - y^2} + 2y\Delta y \tag{10}$$

其中,

$$u = R_{1g}^{2} - R_{2g}^{2} + S_{3}^{2}$$

$$R_{1g} = \sqrt{R_{1}^{2} - h^{2}}$$

$$R_{2g} = \sqrt{R_{2}^{2} - h^{2}}$$
(11)

u是为了表述方便而设定的一个变量, R_{lg} 表示 弹体与地面点目标T的距离在地面上的投影, R_{2g} 表 示弹体与参考点C的距离在地面上的投影,由式 (10)、式(11)可以得到弹体的实际位置A的Y轴坐 标:

$$y_{1,2} = \frac{4u\Delta y \pm \sqrt{16u^2 \Delta y^2 - 16S_3^2 \left(u^2 - 4\Delta x^2 R_{1g}^2\right)}}{8S_3^2}$$
$$= \frac{u\Delta y \pm \sqrt{u^2 \Delta y^2 - S_3^2 \left(u^2 - 4\Delta x^2 R_{1g}^2\right)}}{2S_3^2}$$
(12)

通过惯导数据确定 x, y 的大小,如果 $x \ge y$,则 $y = \min(y_1, y_2); \quad \exists x < y, y = \max(y_1, y_2).$

由勾股定理得点A的x坐标为

$$x = \sqrt{R_{1g}^2 - y^2} \tag{13}$$

通过以上计算,确定了弹体的实际位置 *A* 的坐标为(*x*,*y*,*h*)。

4 定位误差分析

4.1 参考点选取引起的定位误差

基于图像匹配的下降轨聚束 SAR 弹体定位模型中参考点*C*的选取任意,可以不是成像场景中的 点,使该定位方法适用于小场景定位,克服了雷达 末制导定位中需要大场景聚束成像的局限性。本文 模型的特征在于参考点是根据弹体的实际位置点*A* 的坐标值和设定的 SAR 成像基准图的中心点坐标 值的函数关系进行选取的,函数关系为

$$\frac{\partial y}{\partial \Delta x} = \frac{\Delta x - \sqrt{R_{1g}^2 - y^2}}{\left[\Delta y - \frac{y}{\sqrt{R_{1g}^2 - y^2}} \Delta x\right]}$$
$$\Delta x - x \tag{14}$$

$$= \frac{1}{(\Delta y - \Delta x \tan \angle XTO)}$$
(14)

$$\frac{\partial y}{\partial \Delta y} = \frac{\Delta y - \sqrt{n_{1g} - x}}{\left[\Delta y - \frac{y}{\sqrt{R_{1g}^2 - y^2}} \Delta x\right]}$$
$$= \frac{\Delta y - y}{\left(\Delta y - \Delta x \tan \angle XTO\right)}$$
(15)

其中,∠XTO 表示弹体的实际位置点与地面目标*T* 的斜距在地面的投影与*X* 轴的夹角。

通过函数关系式中弹体的实际位置点 A 的纵坐 标 y 分别关于 Δx 和 Δy 求偏导,得到 y 关于 Δx 和 Δy 的变化率,变化率越小,意味着当 Δx 和 Δy 的 值变化时,y 的变化情况不大。为了实现弹体实际 位置点 A 的精确定位,上述函数关系中两个偏导数 的值就需要越小越好,这样能够使得参考点 C 的选 取误差对弹体实际位置点 A 的坐标值带来的影响最 小化。函数关系式表明,设定的参考点 C 的选取误 差会始终存在且不受其坐标位置的影响,并且会直 接影响弹体的实际位置点的坐标值,参考点取的距 离目标点越远,参考点与目标点连线与 X 轴的夹角 (即上述 ∠XTO)越小,模型中雷达图像的定位精度 越高。因此根据惯导数据思想得出,当设定的参考 点 C 为弹载 SAR 雷达弹下点,即弹体的实际位置点 A 投影到地面上的点时,设定的参考点 C 的选取误 差带来的影响最小,弹体实际位置点 A 的定位精度 更好。

4.2 参考点选取的合理性分析

式(14)、式(15)表示弹体Y坐标与参考点位置横 坐标的误差梯度,当参考点选取为弹下点时,误差 梯度最小。参考点从基准图映射至成像图时,由仿 射变换即匹配引起的误差不会对弹体的Y轴坐标精 度造成影响。另外,基于场景和基准图的匹配得到 的仿射变换关系同样适用于远端弹下点至实时成像 图的映射,其引起的距离向误差较小,对定位精度 的影响可以忽略。验证实验主要步骤如下:

(1)对两幅大场景进行匹配算法处理,得到若干(本实验中为 38 个)匹配点;

(2)分别从基准图和实时成像图中截取同样大小的两幅子场景图像,重复上述匹配算法处理,得到基于小场景匹配的仿射变换矩阵;

(3)对基准图中大场景的匹配点依次用上述基 于小场景的仿射变换矩阵进行映射,将结果与实时 成像图中大场景的匹配点进行对比,将其二者的差 异用折线图表示如图2所示。

从图 2 中看出,对场景外远端点用场景的仿射 变换矩阵进行映射,其结果与真实结果误差很小, 上述 38 个匹配点的映射误差均控制在 2.5 个分辨单 元内,据此引起的距离向测距误差被限制在米级, 此量级在工程实践应用中不会对定位精度带来较大 影响。故参考点选取为匹配场景外的弹下点合理。



图 2 弹下点关于场景变换关系的匹配误差曲线

5 实验仿真

为验证本文算法对雷达的 3 维定位精度,下面 通过仿真实验进行验证。雷达的实际位置点与地面 点目标的实际距离为 20984 m,选取的设定的参考 点 *C* 相对于地面点目标 *T*,其距离差范围为 (8000 m, 12000 m)。

5.1 仿真实验条件

表 1 为仿真实验参数表,其中, R_1 表示雷达位 置点与地面点目标的距离, $\angle XTO$ 表示雷达的实际 位置点与地面点目标 T 的斜距在地面的投影与 X 轴 的夹角, Δx , Δy 表示设定的参考点 C 在 X 轴和 Y 轴上的距离,x,y,z分别表示 SAR 雷达的实际位置 点分别在 X,Y和 Z 轴上的距离。

表1 仿真实验参数

R_1	$20984~\mathrm{m}$
∠XTO	10°
Δx	$9000 \mathrm{~m}$
Δy	12000 m
x	11647 m
y	$20536~\mathrm{m}$
z	$17335~\mathrm{m}$

5.2 分辨率对定位精度的影响

以不同分辨率作为自变量,分别用传统的基于 多普勒测角定位方法^[16]和本文所提出的基于欧拉四 面体的定位方法进行仿真实验。在1m的匹配误差 下,表2和表3罗列出仿真结果的各项误差值。

使用传统的基于多普勒测角得到的定位误差如 表 2 所示;其中, $\Delta x_{o}, \Delta y_{o}, \Delta z_{o}$ 分别表示传统方法 得到的弹体位置点的长、宽、高度与弹体位置点的 实际长、宽、高度的差值。使用本方法得到的定位 误差分析如表 3 所示;其中, $\Delta x_{r}, \Delta y_{r}, \Delta z_{r}$ 分别表 示使用本方法得到的雷达位置点的长、宽、高度与 雷达位置点的实际长、宽、高度的差值。

对比表 2 和表 3,同样的仿真参数与实验条件 下,得到的结论为:(1)在不同分辨率和估计误差情

表 2 传统方法定位误差结	果(m)	
---------------	--------------	--

分辨率	$\Delta x_{\rm o}$	Δy_{o}	Δz_{o}
0.1	2.0821	2.0821	1.7903
0.5	6.4107	6.4107	8.9514
1.0	11.8214	11.8214	17.9082
3.0	33.4643	33.4643	53.7083
5.0	55.1071	55.1071	89.5138

表 3 本文方法定位误差结果(m)

分辨率	Δx_{r}	$\Delta y_{\rm r}$	Δz_{r}
0.1	0.0228	1.4084	0.1057
0.5	0.1140	0.9686	0.5287
1.0	0.2280	1.2790	1.0573
3.0	0.6841	1.0431	3.1720
5.0	1.1402	0.8072	5.2866

况下,本文的定位精度优于传统的方法;(2)本文的 方法通过选取合适的参考点,使得定位精度受估计 误差和图像分辨率影响较小,而传统方法的定位精 度受影响较大。因此本文提出的基于欧拉四面体的 定位方法很大程度上体现出有效性与先进性。

5.3 弹目距离对定位精度的影响

考虑到实际弹载合成孔径雷达成像匹配的真实 环境和条件,距离向设置为±6 m 的测距误差,基 准图与实时图的匹配设置为±5 m 的匹配误差。以 弹目距离作为自变量,将上述误差代入仿真实验分 别用传统方法和本文方法进行仿真,以3 m 分辨率 为例,利用 SAR 雷达导引头在末段的一段轨迹数据 进行上述算法仿真。仿真结果如表 4 和表 5 所示。

由仿真结果可以看出,在加入了一定的测距误 差和匹配误差后,基于本文的欧拉四面体定位方法 的定位精度优于传统方法。且随着导弹的飞行,导 弹和目标之间的距离越近,3 维方向的定位精度越

表 4 传统方法定位误差结果(m)

弹目距离	$\Delta x_{\rm o}$	$\Delta y_{ m o}$	$\Delta z_{ m o}$
25559	119.1725	109.2573	101.6254
23488	108.3729	97.9774	92.0076
20984	103.7966	94.6637	79.6746
18540	85.6414	77.9235	63.4663
16159	70.3392	61.0827	52.6657
13845	59.7326	49.3526	43.7732
11598	35.1653	30.1124	23.8273
8173	21.3476	16.2321	10.9856

表 5 本文方法定位误差结果(m)

弹目距离	$\Delta x_{\rm r}$	$\Delta y_{ m r}$	$\Delta z_{ m r}$
25559	29.0575	22.2972	13.6617
23488	24.6382	15.9529	11.2316
20984	21.6457	12.3717	7.9735
18540	18.9264	10.2615	6.0125
16159	17.3362	8.7635	5.1022
13845	14.9679	6.5563	5.2237
11598	13.1382	5.3632	5.4604
8173	10.7201	3.8624	5.5374

高,满足精确制导乃至后续导弹成像模式交接班对 定位精度的要求。仿真结果表明在不同弹目距离下, 基于欧拉四面体 3 点定位模型的定位误差相比传统 方法显著降低,定位精度满足工程中导弹末制导的 定位要求。

考虑工程实际应用中 ± 5 m 的最大匹配误差和 距离向 ± 6 m 的最大测距误差,采用 Monte Carlo 实验方法进行 1000 次仿真实验,在弹目距离为 25559 m 的实验条件下,传统方法和本文方法的误 差结果如图 3 所示,图示分别为传统方法和本文方 法在 X, Y 和 Z 轴方向的定位误差曲线,表示 3 维空 间中各个方向的误差分布。

加入的±5 m 的匹配误差和±6 m 的距离向测 距误差存在一系列的误差组合,上述实验结果反映 了工程应用中的误差包络,实际误差均落在该误差 包络内。由实验结果可知,定位误差随着试验次数 均匀分布,且均处于一定的误差范围内;对比两种 方法的实验结果可以看出,本文方法定位精度优于 传统方法。

6 结论

本文针对弹载雷达末制导下降轨提出了一种适 用性广泛的弹体定位模型,本模型结合了基准图中 的高精度位置点坐标信息和雷达测距信息,利用欧 拉四面体模型得到了弹体和目标的位置坐标。保证 弹体与目标的斜距在地面上的投影与横轴的夹角尽 量小的前提下,选择弹下点作为参考点可以最大程 度优化定位精度。文中从参考点选取角度对模型进 行了误差分析,对定位的精度误差做出了合理解释, 其定位误差是通过匹配定位方法所能达到的最小定 位误差。

仿真实验验证了本文基于欧拉四面体构型下的 下降轨雷达图像定位方法的正确性,有效性和可靠 性。





参考文献

- 曾乐天,梁毅,邢孟道,等. 一种基于极坐标格式算法的高分 辨 SAR 成像自聚焦算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(6): 1409-1415. doi: 10.11999/JEIT141131.
 ZENG Letian, LIANG Yi, XING Mengdao, et al. Autofocus algorithm of high resolution SAR based on polar format algorithm processing[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(6): 1409-1415. doi: 10.11999/ JEIT141131.
- [2] 周松,周鹏,李亚超,等. 弹载 SAR 下降段成像算法研究[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2011, 38(3): 90-98. doi:

10.3969/j.issn.1001-2400.2011.03.015.

ZHOU Song, ZHOU Peng, LI Yachao, *et al.* Research on the imaging algorithm for missile-borne SAR with downward movement[J]. *Journal of Xidian University (Natural Science)*, 2011, 38(3): 90–98. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2011.03.015.

- [3] FAROOQ A and LIMEBEER D J N. Optimal trajectory regulation for radar imaging guidance[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2008, 31(4): 1076–1092. doi: 10.2514/ 1.31441.
- [4] SUN B, WANG Y, CHEN J, et al. Image position analysis of motion error for missile-borne SAR based on diving model[C].
 IEEE International Conference on Imaging System and

Techniques (IST), Bejing, China, 2013: 206–209. doi: 10. 1109/IST.2013.6729692.

- [5] 邵鹏,李亚超,李学仕,等. 一种应用于斜视聚束模式的改进极坐标格式成像算法[J]. 电子与信息学报,2015,37(2):303-308. doi: 10.11999/JEIT140564.
 SHAO Peng, LI Yachao, LI Xueshi, et al. A modified polar format algorithm applied to squinted spotlight SAR imaging [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(2): 303-308. doi: 10.11999/JEIT140564.
- [6] TAN Q Y and SONG Y L. An auto-focus algorithm for missile-borne SAR[C]. IEEE China-Japan Joint Microwave Conference, Shanghai, China, 2008: 253–257. doi: 10.1109/ CJMW.2008.4772418.
- [7] WANG Yan, LI Jingwen, CHEN Jie, et al. A parameteradjusting polar format algorithm for extremely high squint SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 640–650. doi: 10.1109/TGRS. 2013.2243156.
- [8] 左绍山,杨泽民,孙光才,等.基于几何校正的聚束 SAR 快速 分级后投影算法[J].电子与信息学报,2015,37(6):1389-1394. doi: 10.11999/JEIT141254.
 ZUO Shaoshan, YANG Zemin, SUN Guangcai, et al. Geometric correction based fast factorized back projection algorithm for spotlight SAR imaging[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(6): 1389-1394. doi: 10.11999/JEIT141254.
- [9] 刘瑞红.基于改进的 SIFT-Like 算法的 SAR 图像特征匹配[D].
 [硕士论文],西安电子科技大学,2015.
 LIU Ruihong. Research on SAR images matching based on an improved SIFT-like algorithm[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2015.
- [10] DELLINGER F, DELON J, GOUSSEAU Y, et al. SAR-SIFT: a SIFT-Like algorithm for SAR images[J]. *IEEE Transactions* on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(1): 453–466. doi: 10.1109/TGRS.2014.2323552.
- [11] WEYDAHL D J and ELDHUSET K. Geolocation accuracy of TSX spotlight image data[C]. VDE 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR), Aachen, Germany, 2010: 1–4.
- [12] BELORUTSKY R Y, KISELEV A V, and TYRYKIN S V. The influence of a SAR sensor trajectory deviation on the pip azimuth position in echo signals simulation based on prearranged samples[C]. 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Device (EDM), Novosibirsk, Russia, 2014: 105–109. doi: 10.1109/ EDM.2014.6882487.
- [13] SONG S H, RHO S H, JUNG C H, et al. Geo-location error correction for synthetic aperture radar image[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Honolulu, HI, USA, 2010: 3406–3409. doi: 10.1109/ IGARSS.2010.5650247.
- [14] 燕英,周荫清,李春升,等. 弹载合成孔径雷达成像处理及定 位误差分析[J]. 电子与信息学报, 2002, 24(12): 1932-1938.
 YAN Ying, ZHOU Yingqing, LI Chunsheng, et al. Missileborne SAR imaging and error analysis of positioning[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2002, 24(12): 1932-1938.

- [15] 李亚超,蓝金巧,邢孟道,等. SAR 末制导中导弹定位方法分析[J]. 遥测遥控, 2004, 25(6): 29-34.
 LI Yachao, LAN Jinqiao, XING Mengdao, et al. Positioning of missile with terminal guide SAR system and analysis[J]. Telemetry, Tracking and Command, 2004, 25(6): 29-34.
- [16] 李亚超, 吕孝雷, 王虹现, 等. 高精度景象匹配下的高速 SAR 平台定位和测速[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(11): 1851-1855. doi: 10.3321/j.issn:1001-506X.2007.11.015.
 LI Yachao, LÜ Xiaolei, WANG Hongxian, et al. Research on positioning and measuring speed in the high speed SAR system based on high precision map matching[J]. Systems Engineering & Electronics, 2007, 29(11): 1851-1855. doi: 10.3321/j.issn:1001-506X.2007.11.015.
- [17] 杨立波,谈璐璐,杨汝良,等. 合成孔径雷达景象匹配中制导导弹定位[J]. 系统工程与电子技术,2010,32(11):2416-2420. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2010.11.35.
 YANG Libo, TAN Lulu, YANG Ruliang, et al. Missile location for synthetic aperture radar scene matching midcourse guidance[J]. Systems Engineering & Electronics, 2010, 32(11): 2416-2420. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2010. 11.35.
- [18] 李天池,周荫清,马海英,等.基于参数估计的 SAR 定位方法
 [J].系统工程与电子技术,2007,29(3):372-374. doi: 10.3321/j.issn.1001-506X.2007.03.011.

LI Tianchi, ZHOU Yinqing, MA Haiying, et al. SAR position method based on parameter estimation[J]. Systems Engineering & Electronics, 2007, 29(3): 372–374. doi: 10.3321 /j.issn.1001-506X.2007.03.011.

- [19] 秦玉亮,李宏,王宏强,等.基于SAR导引头的弹体定位技术
 [J].系统工程与电子技术,2009,31(1):121-124. doi: 10.3321/j.issn.1001-506X.2009.01.029.
 QIN Yuliang, LI Hong, WANG Hongqiang, et al. Missile location based on SAR seeker[J]. Systems Engineering & Electronics, 2009, 31(1): 121-124. doi: 10.3321/j.issn.1001-506X.2009.01.029.
- [20] GONG Jianwen, JIN Jianlv, and WEN Xianyu. A highperformance feather-matching method for image registration by combing spatial and similarity information[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(4): 1266–1277. doi: 10.1109/TGRS.2007.912443.
- [21] 张红敏,靳国旺,徐青,等. 基于 DEM 和图像仿真的单幅
 SAR 图像无控制定位[J]. 测绘科学技术学报, 2013, 30(3):
 274-278. doi: 10.3969/j.issn.1673-6338.2013.03.013.
 ZHANG Hongmin, JIN Guowang, XU Qing, et al.
 Positioning with single SAR image based on DEM without ground control point[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2013, 30(3): 274-278. doi: 10.3969/j.issn.1673-6338.2013.03.013.
- 冉 聃: 男, 1992 年生, 博士生, 研究方向为大前斜聚束 SAR 成像.
- 邓 欢: 男, 1991 年生, 博士生, 研究方向为大前斜聚束 SAR 成像.
- 李亚超: 男,1981年生,教授,研究方向为雷达成像和实时信号 处理.
- 全英汇: 男,1981年生,副教授,研究方向为雷达信号实时处理.
- 邢孟道: 男,1975年生,教授,研究方向为雷达成像和目标识别.