

基于机载单天线雷达一维距离数据的地表三维信息优化重建方法

张颖康, 肖扬*

北京交通大学 信息科学研究所, 北京 100044

摘要: 陆地的刚体表面在机载雷达的任意相对运动下具有几何不变性, 基于此约束可利用雷达距离像中提取出的地面多个强散射点的一维距离数据, 重建出地表的三维信息以及载机未知的运动轨迹。鉴于现有基于雷达远场假设的重建方法无法适用于具有较大近场误差的地面目标重建的问题, 提出一种基于雷达近场几何模型的优化重建方法, 采用非线性优化方法实现了对重建参数的捆绑调整。仿真结果表明, 此算法可使近场目标的重建精度得到显著的提升, 由此实现了机载单天线雷达任意未知三维运动下对地表三维信息的高精度几何重构。

关键词: 三维重建; 雷达三维成像; 几何不变性; 捆绑调整; 雷达距离像

中图分类号: V243.2; TN957.52 **文献标识码:** A

作为一种一维距离感知系统, 雷达具有全天候、全天候、高信噪比、探测距离远等诸多优点, 其利用发射和接收宽带电磁信号实现了对目标的高分辨率一维距离成像^[1]。雷达更高维的成像能力一直是现代雷达技术研究的热点问题, 在现有的雷达三维成像技术中, 如干涉合成孔径雷达(InSAR)和干涉逆合成孔径(InISAR)系统, 多采用多天线或多航过方式, 利用雷达不同通道下生成的二维复图像间的干涉相位获取雷达目标的三维信息^[1-3]。然而在一些应用领域, 特别是在对军事目标的探测以及对军事地形的勘察上, 雷达的多天线配置增加了系统的复杂性, 载机的高精度运动模式以及多航过方式也势必增加勘察工作的难度和风险。现有技术中涉及到了一些单天线雷达的三维成像方法, 如利用单天线雷达在多个已知姿态角下的一维距离像对目标散射中心进行三

维成像诊断^[4-6], 圆周运动 SAR(Circular SAR)系统对地面目标的三维成像^[7], 以及逆合成孔径(ISAR)系统对于自旋物体的三维成像^[8]等。这些方法的共同特点在于目标或雷达平台具有已知或者特定的运动模式。然而, 对于一些非合作场合, 例如被探测目标具有未知的高机动三维运动或者雷达运载平台具有未知的曲线运动路径等情况, 如何实现此类任意相对三维运动下的单天线雷达三维感知, 是现有雷达技术有待进一步解决的课题。

对于雷达目标上具有强后向散射系数的散射体, 其在雷达距离像中具有显著的包络特征。随着雷达宽带技术的不断发展, 利用雷达高分辨率距离像中的包络信息可以实现对强散射体一维距离位置的精确提取^[9]。对于普遍的雷达刚体目标, 其在与雷达平台任意的相对三维运动过程中

收稿日期: 2010-09-09; 退修日期: 2011-02-16; 录用日期: 2011-04-14; 网络出版时间: 2011-04-26 11:20:48

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20110426.1120.006.html

DOI: CNKI:11-1929/V.20110426.1120.006

基金项目: 国家自然科学基金(60572093); 高等学校博士学科点专项科研基金(20050004016)

* 通讯作者. Tel.: 010-51684010 E-mail: yangxiao0513@163.com

引用格式: 张颖康, 肖扬. 基于机载单天线雷达一维距离数据的地表三维信息优化重建方法[J]. 航空学报, 2011, 32(7): 1292-1301.
Zhang Yingkang, Xiao Yang. Optimal reconstruction algorithm for 3D terrain information based on 1D range data of airborne single-antenna radar [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(7): 1292-1301.

均具有几何不变性,利用此约束条件,文献[10]首次提出了基于雷达一维距离数据的三维重建方法。近年来,文献[11]和文献[12]采用因子分解法(Factorization)对上述三维重建方法进行了改进。与传统雷达技术中利用相位信息的成像方式不同,此改进属于由一维到三维的几何重构方法,不需要目标或雷达平台运动的任何预知信息,并且无需进行二维成像处理,仅需要预先提取和关联出目标相对三维运动下多个孤立散射点在雷达距离像中的一维距离史(Range History),便能重建出目标的三维结构以及未知的运动路径。

然而,文献[11]和文献[12]中的重建方法均采用了基于雷达远场假设的简化重建模型,因此其仅适用于目标距离较远、尺寸较小的远场情况,如地基雷达对空中或海面目标(如飞机、舰船等)的探测。由于具有复杂散射特性的雷达目标仅能在较小的角度内保持稳定的幅度特征^[9],实际中仅能提取出目标小角度运动下的一维距离数据,因此小尺寸目标上散射点的一维距离数据相对不丰富,其重建精度通常较差。对于陆地表面而言,其在机载雷达的任意三维运动下仍可视为刚体,因此将上述基于雷达一维距离数据的三维重建方法引入到机载雷达对地表三维信息的探测领域将具有更广泛的应用前景。与现有重建算法所针对的小尺寸目标相比,对于地表三维信息重建的优势在于,机载雷达波束覆盖的地面大面积区域具有丰富的空间分布,并且通常包含的强散射体源较多,因此实际中提取出的一维距离数据较为丰富和准确;然而同时存在的问题在于,对于大面积地面目标,雷达的远场假设将不再满足,目标散射点与雷达的径向距离会存在较大的非线性近场误差,因此采用现有基于雷达远场假设的重建模型通常得不到地面高精度的三维信息。

鉴于上述问题,提出一种基于机载单天线雷达一维距离数据的地表三维信息优化重建方法。首先根据雷达与目标的空间几何模型,建立了雷达近场条件下散射点的真实雷达测距与远场近似下的一维投影距离之间的非线性几何关系。基于此雷达近场几何约束,对目标的重建模型进行了近场修正,并通过参数模型的合理选择,降低了参数的冗余自由度,从而成功实现了对目标结构

和载机运动参数的非线性优化,有效地提高了算法在雷达近场条件下的重建精度。利用本文提出的算法,可以成功实现机载单天线雷达任意曲线运动下对地表三维信息及载机运动路径的获取,简化雷达系统配置的复杂性,增强雷达载机作业的灵活机动性,在三维地形获取、地面目标定位、载机运动估计等方面均具有一定的应用价值。

1 算法应用背景及几何模型

如图1(a)所示,载有单天线雷达的飞行器在空中做高机动飞行,其飞行路径呈任意三维曲线运动轨迹。飞行期间机载单天线雷达对地面某区域进行聚束式回波探测,得到地面目标连续观测视角下的雷达回波序列。通过对雷达各次回波做距离向压缩后,可以得到雷达高分辨率的一维距离像^[1],如图1(b)示意。对于地面上一些静止的强散射体(如车辆、房屋、金属物等),由于其具有较强的后向散射系数,其在雷达一维距离像中通常具有显著的包络特征。在载机的任意三维运动下,地面上具有不同空间位置的散射点在雷达距离像序列中具有不同规律的徙动轨迹。利用现有的散射点一维距离的提取和关联方法,可以提取出地面上多个强散射点在连续回波序列中的一维距离史^[13]。散射点一维距离的提取和关联问题不在本文中讨论,这里假设已在雷达 L 次回波序列中提取出 N 个散射点的一维距离数据,其中设第 i 个散射点在第 j 次回波中的距离位置为 R_{ij} ($i=1,2,\dots,N; j=1,2,\dots,L$)。

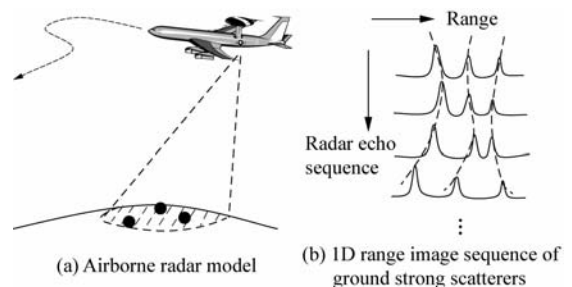


图1 地面目标的雷达模型

Fig.1 Radar model of ground target

图2给出了雷达与目标之间的空间几何模型。将地面 N 个散射点置于目标坐标系 $Oxyz$ 中,则雷达指向原点 O 的方向即为雷达视线(LOS)方向。

设在第 j 次回波时刻雷达与原点 O 之间的距离为 R_{0j} , 则向量 $\mathbf{R}_0 = [R_{01} \ R_{02} \ \dots \ R_{0L}]^T$ 即反映了雷达运动期间与目标之间的相对平移运动。设雷达视线的方位角和俯仰角分别为 θ_j 和 α_j , 则坐标为 $\mathbf{X}_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$ 的散射点在 LOS 上的一维距离投影满足以下几何关系:

$$\rho_{ij} = \mathbf{X}_i^T \mathbf{c}_j \quad (1)$$

式中: \mathbf{c}_j 为雷达在第 j 次回波时刻的视角向量, 其有以下形式^[1]:

$$\mathbf{c}_j = [\sin \theta_j \cos \alpha_j \quad \cos \theta_j \cos \alpha_j \quad \sin \alpha_j]^T \quad (2)$$

由式(2)可知, 雷达视角向量 \mathbf{c}_j 为单位矢量, 因此其具有以下约束:

$$\mathbf{c}_j^T \mathbf{c}_j = 1 \quad (3)$$

式(3)反映了陆地刚体表面在雷达平台运动期间的几何不变性。

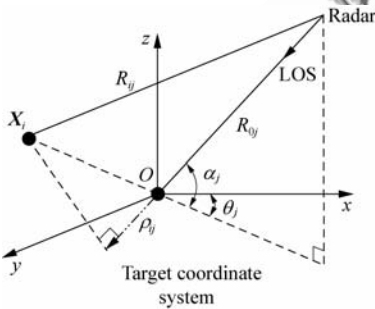


图2 雷达与目标的空间几何模型

Fig. 2 Geometry model of radar and target

通常情况下, 目标散射点的实际雷达测距 R_{ij} 与散射点的坐标 \mathbf{X}_i 、平移量 R_{0j} 和雷达视角 \mathbf{c}_j 之间存在着非线性的几何关系。根据图2所示的空间几何模型, 可推出散射点的实际雷达测距满足以下近场几何约束:

$$R_{ij} = \sqrt{(R_{0j} + \rho_{ij})^2 + \|\mathbf{X}_i\|^2 - \rho_{ij}^2} = \sqrt{R_{0j}^2 + 2R_{0j}\rho_{ij} + \|\mathbf{X}_i\|^2} \quad (4)$$

式中: $\|\mathbf{X}_i\| = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}$ 为点 \mathbf{X}_i 到坐标原点 O 的欧式距离。

2 地面三维信息几何重建算法

由第1节的几何模型可知, 基于雷达未知运动下的地面目标三维重建问题, 即为利用已知的一维距离数据 R_{ij} , 求取各散射点的三维坐标 \mathbf{X}_i ,

以及雷达平台在各次回波时刻的运动参数(包括平移参数 R_{0j} 和视角参数 \mathbf{c}_j)。由式(4)可知, 在雷达近场情况下, 重建参数 \mathbf{X}_i 、 \mathbf{c}_j 和 R_{0j} 与目标散射点的雷达测距 R_{ij} 之间具有非线性关系, 因此难以用线性方法直接求取。针对上述重建问题, 首先采用基于雷达远场假设的重建模型, 得到重建参数的初始解, 然后根据式(4)对重建模型进行近场修正, 并采用非线性优化技术实现对目标结构和载机运动参数的捆绑调整(Bundle Adjustment)^[14-15]。下面对上述算法进行详细阐述。

2.1 基于雷达远场假设的重建方法

当雷达距目标的距离远大于目标尺寸时, 即 $R_{0j} \gg \|\mathbf{X}_i\|$, 雷达回波近似为远场平面波, 此时由式(4)可得各散射点的雷达测距近似为

$$R_{ij} = \rho_{ij} + R_{0j} \quad (5)$$

由于目标坐标系的原点可以取任意位置, 不失一般性, 可将 N 个散射点的质心 ($\mathbf{X}_O = [\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i]^T$) 作为目标坐标系的原点。则在此雷达远场假设下, 根据式(5)可得到目标在各次回波时刻的平移量为

$$R_{0j} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, L) \quad (6)$$

利用式(6)估计出的一组平移向量 \mathbf{R}_0 , 可对雷达的一维距离数据进行去平移处理, 即得到各散射点的一维投影距离为 $\rho_{ij} = R_{ij} - R_{0j}$, 由此构造出如下 $N \times L$ 维的一维投影距离矩阵:

$$\boldsymbol{\rho} = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \dots & \rho_{1L} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \dots & \rho_{2L} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \rho_{N1} & \rho_{N2} & \dots & \rho_{NL} \end{bmatrix} \quad (7)$$

设由 N 个散射点的三维坐标 \mathbf{X}_i 构成 $N \times 3$ 维的目标坐标矩阵为 $\mathbf{S} = [\mathbf{X}_1 \ \mathbf{X}_2 \ \dots \ \mathbf{X}_N]^T$; 由 L 次视角向量 \mathbf{c}_j 构成 $3 \times L$ 维的雷达视角矩阵为 $\mathbf{C} = [\mathbf{c}_1 \ \mathbf{c}_2 \ \dots \ \mathbf{c}_L]$, 则由式(1)可得雷达纯旋转运动下的模型为

$$\boldsymbol{\rho} = \mathbf{S}\mathbf{C} \quad (8)$$

同时, 由式(3)可得几何不变形约束条件为

$$\text{diag}(\mathbf{C}^T \mathbf{C}) = \mathbf{1}_{L \times 1} \quad (9)$$

式中: $\text{diag}(\mathbf{X})$ 表示矩阵 \mathbf{X} 主对角线元素组成的向量; $\mathbf{1}_{L \times 1}$ 表示 $L \times 1$ 的全 1 向量。

利用上述去平移后的一维投影距离矩阵 $\boldsymbol{\varphi}$, 可以在式(8)和式(9)的共同约束下, 对目标未知的坐标矩阵 \mathbf{S} 和视角矩阵 \mathbf{C} 进行如下求解:

(1) 仅利用式(8)的约束能够得到 \mathbf{S} 和 \mathbf{C} 的一簇仿射重建(Affine Reconstruction)^[14] \mathbf{S}_A 和 \mathbf{C}_A , 其存在仿射多义性, 即存在任一 3×3 的矩阵 \mathbf{M} (这里称为仿射变换矩阵), 可使 $\mathbf{S}_A = \mathbf{S}\mathbf{M}$ 和 $\mathbf{C}_A = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}$ 依然满足式(8)条件 $\boldsymbol{\varphi} = \mathbf{S}_A \mathbf{C}_A$ 。在现有基于因子分解法重建算法中^[11-12], 对 \mathbf{S}_A 和 \mathbf{C}_A 的估计是通过对矩阵 $\boldsymbol{\varphi}$ 进行如下降秩的奇异值分解(SVD)得到的, 即

$$\boldsymbol{\varphi} = \mathbf{V}\boldsymbol{\Sigma}\mathbf{U}^T \quad (10)$$

式中: $\boldsymbol{\varphi}$ 的秩为 3, 实际中矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}$ 取为含前 3 个主特征值的特征值矩阵; \mathbf{V} 和 \mathbf{U} 分别为其对应的左右特征向量矩阵。此降秩处理对于 $\boldsymbol{\varphi}$ 中的误差具有抑制作用, 由此可以得到如下一组较好的仿射重建结果, 即

$$\begin{cases} \mathbf{S}_A = \mathbf{V} \\ \mathbf{C}_A = \boldsymbol{\Sigma}\mathbf{U}^T \end{cases} \quad (11)$$

(2) 利用式(9)的几何不变性约束, 可对 \mathbf{S}_A 和 \mathbf{C}_A 与 \mathbf{S} 和 \mathbf{C} 之间相差的仿射变换矩阵 \mathbf{M} 进行如下估计: 由于 $\mathbf{C}_A = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}$, 则有

$$\mathbf{C}^T \mathbf{C} = \mathbf{C}_A^T \mathbf{M}^T \mathbf{M} \mathbf{C}_A = \mathbf{C}_A^T \mathbf{W} \mathbf{C}_A \quad (12)$$

式中: $\mathbf{W} = \mathbf{M}^T \mathbf{M}$ 为对称矩阵。记 \mathbf{W} 的第 i 行、第 j 列的元素为 W_{ij} , 则可构建 \mathbf{W} 上三角 6 元素向量 $\mathbf{w} = [W_{11} \ W_{12} \ W_{13} \ W_{22} \ W_{23} \ W_{33}]^T$, 并由 \mathbf{C}_A 的各行向量(记为 $\mathbf{C}_A^i (i=1, 2, 3)$) 构建 $L \times 6$ 的矩阵, 记为

$$\mathbf{B}_{C_A} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_A^1 \odot \mathbf{C}_A^1 \\ 2\mathbf{C}_A^1 \odot \mathbf{C}_A^2 \\ 2\mathbf{C}_A^1 \odot \mathbf{C}_A^3 \\ \mathbf{C}_A^2 \odot \mathbf{C}_A^2 \\ 2\mathbf{C}_A^2 \odot \mathbf{C}_A^3 \\ \mathbf{C}_A^3 \odot \mathbf{C}_A^3 \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

式中: 符号“ \odot ”为 Hadamard 乘积^[11]。将式(12)代入式(9), 即可建立如下关于 \mathbf{w} 的线性方

程组:

$$\mathbf{B}_{C_A} \mathbf{w} = \mathbf{1}_{L \times 1} \quad (14)$$

当 $L \geq 6$ 时, 可得到 \mathbf{w} 的最小二乘估计为

$$\mathbf{w} = (\mathbf{B}_{C_A}^T \mathbf{B}_{C_A})^{-1} \mathbf{B}_{C_A}^T \mathbf{1}_{L \times 1} \quad (15)$$

由式(15)求解出的向量 \mathbf{w} 重新构建矩阵 \mathbf{W} , 并对 \mathbf{W} 进行 Cholesky 分解, 便可得到相差任一旋转变换下的仿射变换矩阵 \mathbf{M} , 即存在任一正交矩阵 \mathbf{R} , 可使矩阵 $\mathbf{M}' = \mathbf{R}\mathbf{M}$ 依然满足 $\mathbf{M}'^T \mathbf{M}' = \mathbf{W}$ 。

(3) 利用以上估计出的仿射变换矩阵 \mathbf{M} , 通过式(16)将仿射重建 \mathbf{S}_A 和 \mathbf{C}_A 上升为欧式重建(Euclid Reconstruction)^[14], 即

$$\begin{cases} \mathbf{S}_E = \mathbf{S}_A \mathbf{M}^{-1} \\ \mathbf{C}_E = \mathbf{M} \mathbf{C}_A \end{cases} \quad (16)$$

式中: \mathbf{M} 的多解导致 \mathbf{S}_E 和 \mathbf{C}_E 存在旋转多义性, 其与真实的 \mathbf{S} 和 \mathbf{C} 相差任一旋转变换, 即存在任一正交矩阵 \mathbf{R} , 使 $\mathbf{S}_E = \mathbf{S}\mathbf{R}^T$, $\mathbf{C}_E = \mathbf{R}\mathbf{C}$ 。

以上得到的欧式重建结果 \mathbf{S}_E 和 \mathbf{C}_E 中蕴含了目标结构和雷达视角相差任一旋转角度意义下的全部三维信息。其中目标上各散射点的重建坐标可由 \mathbf{S}_E 中的各行向量 $\mathbf{X}_{Ei} (i=1, 2, \dots, N)$ 得到。同时, 利用预先估计出的平移向量 \mathbf{R}_0 , 可以得到各回波时刻雷达在目标坐标系中的运动轨迹, 即

$$\mathbf{X}_{rj} = \mathbf{R}_{0j} \mathbf{c}_{Ej} \quad (j=1, 2, \dots, L) \quad (17)$$

式中: \mathbf{c}_{Ej} 为 \mathbf{C}_E 的第 j 个列向量。

2.2 基于近场几何模型的优化重建方法

如图 2 所示, 目标散射点的近场距离误差可以表达为实际雷达测距与远场假设下的投影距离之差, 即 $\Delta r = |R_{ij} - (R_{0j} + \rho_{ij})|$ 。对于机载雷达波束覆盖的大面积区域, 其存在着较大的近场误差(例如雷达垂直波束覆盖半径为 500 m, 雷达距地面 3 000 m, 则地面目标最大近场误差约为 41.38 m), 在这种情况下, 2.1 节所述的基于远场假设下的重建方法将不再适用。本节引入式(4)的近场几何约束, 采用非线性优化方法对 2.1 节得到的初步重建参数进行了近场修正。其中, 针对目标欧式重建的旋转多义性问题, 建立了合理的参数模型, 降低了参数的冗余自由度, 从而使最优优化技术在算法中的应用成为可能。

2.2.1 参数模型

在欧式空间中,经任意平移和旋转变换后,两点之间的距离关系仍保持不变。由此可知,利用雷达一维距离数据重建出的目标和雷达的三维坐标存在无穷解,其与真实的坐标相差任意的平移和旋转变换,共6个冗余的自由度(平移3个,旋转3个)。因此,若直接将目标和雷达平台的三维坐标(\mathbf{X}_{E_i} 和 \mathbf{X}_{r_j})作为优化参数进行优化调整,将导致由于冗余的自由度过多而无法找到参数的最优解。

由2.1节可知,雷达与目标的三维信息可由欧式重建参数 \mathbf{S}_E 、 \mathbf{C}_E 和 \mathbf{R}_0 完全表述,其中 \mathbf{S}_E 和 \mathbf{C}_E 可由仿射重建参数 \mathbf{S}_A 、 \mathbf{C}_A 以及仿射变换矩阵 \mathbf{M} 共同决定(见式(16))。因此,选取 \mathbf{S}_A 、 \mathbf{C}_A 、 \mathbf{R}_0 以及 \mathbf{W} 的上三角元素向量 \mathbf{w} 作为优化参数,由于 \mathbf{S}_A 、 \mathbf{C}_A 和 \mathbf{w} 能够在式(14)的额外约束下对 \mathbf{S}_E 和 \mathbf{C}_E 完全表述,并且参数 \mathbf{W} 对于 \mathbf{M} 的任一旋转变换均具有唯一性,由此可以去除参数模型中冗余的3个旋转自由度。

采用以上选取的优化参数,对式(4)中的参量 ρ_{ij} 和 $\|\mathbf{X}_i\|$ 进行表述。由于 $\boldsymbol{\varphi}=\mathbf{S}_A\mathbf{C}_A$,则参量 ρ_{ij} 可表达为 $\rho_{ij}=\mathbf{X}_{A_i}^T\mathbf{c}_{A_j}$ (\mathbf{c}_{A_j} 为 \mathbf{C}_A 的第 j 个列向量)。同时根据式(16)可推出,目标任意欧式重建的坐标 \mathbf{X}_{E_i} 到坐标原点的距离 $\|\mathbf{X}_{E_i}\|$ 可表述为

$$\|\mathbf{X}_{E_i}\|^2 = \|\mathbf{X}_{A_i}^T\mathbf{M}^{-1}\|^2 = \mathbf{X}_{A_i}^T\mathbf{M}^{-1}\mathbf{M}^{-T}\mathbf{X}_{A_i} = \mathbf{X}_{A_i}^T\mathbf{W}_1\mathbf{X}_{A_i} \quad (18)$$

式中: $\mathbf{W}_1=\mathbf{M}^{-1}\mathbf{M}^{-T}=\mathbf{W}^{-1}$ 仍为对称矩阵。同样将 \mathbf{W}_1 的上三角6个参数组成向量 \mathbf{w}_1 ,并由目标的仿射重建坐标构建向量

$$\mathbf{b}_{\mathbf{X}_{A_i}} = \begin{bmatrix} x_{A_i}^2 & 2x_{A_i}y_{A_i} & 2x_{A_i}z_{A_i} & y_{A_i}^2 & 2y_{A_i}z_{A_i} & z_{A_i}^2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

则由式(18)可得

$$\|\mathbf{X}_{E_i}\|^2 = \mathbf{b}_{\mathbf{X}_{A_i}}\mathbf{w}_1 \quad (20)$$

为了对新增的参数 \mathbf{w}_1 进行约束,利用 \mathbf{W} 与 \mathbf{W}_1 的互逆条件(即 $\mathbf{W}\mathbf{W}_1=\mathbf{I}$),建立了6个关于 \mathbf{w} 和 \mathbf{w}_1 的约束方程,即 $l_i=0(i=1,2,\dots,6)$,其中,

$$\begin{cases} l_1 = \omega_1\omega_{11} + \omega_2\omega_{12} + \omega_3\omega_{13} - 1 = 0 \\ l_2 = \omega_2\omega_{12} + \omega_4\omega_{14} + \omega_5\omega_{15} - 1 = 0 \\ l_3 = \omega_3\omega_{13} + \omega_5\omega_{15} + \omega_6\omega_{16} - 1 = 0 \\ l_4 = \omega_1\omega_{12} + \omega_2\omega_{14} + \omega_3\omega_{15} = 0 \\ l_5 = \omega_1\omega_{13} + \omega_2\omega_{15} + \omega_3\omega_{16} = 0 \\ l_6 = \omega_2\omega_{13} + \omega_4\omega_{15} + \omega_5\omega_{16} = 0 \end{cases} \quad (21)$$

式中: ω_i 和 ω_{1i} 分别为向量 \mathbf{w} 和 \mathbf{w}_1 的第 i 个元素。

至此,依据以上参数模型得到的用于优化调整的重建参数包括 \mathbf{S}_A 、 \mathbf{C}_A 、 \mathbf{R}_0 、 \mathbf{w} 和 \mathbf{w}_1 ,总共 $3N+4L+12$ 个优化参数,其中优化参数受到的约束方程有式(4)、式(14)和式(21),共 $NL+L+6$ 个方程,当 $NL+L+6>3N+4L+12$ 时,参数可解。

2.2.2 非线性优化

根据2.2.1节给出的参数模型,需要利用式(4)、式(14)和式(21)对优化参数 \mathbf{S}_A 、 \mathbf{C}_A 、 \mathbf{R}_0 、 \mathbf{w} 和 \mathbf{w}_1 进行共同约束。采用罚函数法,建立如下的最小化目标函数:

$$\min_{\{\mathbf{X}_{A_i}, \mathbf{C}_{A_j}, \mathbf{R}_{0j}, \mathbf{w}, \mathbf{w}_1\}} \left\{ \sum_{j=1,2,\dots,N} \|\mathbf{P}\|^2 + \sum_{i=1,2,\dots,L} \|\mathbf{B}_{C_A}^k \mathbf{w} - 1\|^2 + \sigma_2 \sum_{i=1}^6 \|\mathbf{l}_i\|^2 \right\} \quad (22)$$

式中: $\mathbf{P}=\sqrt{\mathbf{R}_{0j}+2\mathbf{R}_{0j}\mathbf{X}_{A_i}^T\mathbf{C}_{A_j}+\mathbf{b}_{\mathbf{X}_{A_i}}\mathbf{W}_1-\mathbf{R}_{ij}}$; $\mathbf{B}_{C_A}^k$ 为矩阵 \mathbf{B}_{C_A} 的第 k 个行向量; σ_1 和 σ_2 为惩罚系数,两者的取值分别决定了目标几何不变性条件以及 \mathbf{W}_1 和 \mathbf{W} 互逆条件的约束力。

采用LM(Levenberg-Marquardt)算法^[14-15]对式(22)的最小化目标函数进行最优化,其中由2.1节得到的参数 \mathbf{S}_A 、 \mathbf{C}_A 、 \mathbf{R}_0 、 \mathbf{w} 和 \mathbf{w}_1 的线性解将作为优化的初始值。经上述优化调整后可以得到优化参数的最优解,同时根据2.1节可由 \mathbf{w} 求解仿射变换矩阵 \mathbf{M} ,并由式(16)和式(17)得到地面目标散射点的三维信息 $\mathbf{X}_{E_i}(i=1,2,\dots,N)$ 以及雷达载机的三维运动轨迹 $\mathbf{X}_{r_j}(j=1,2,\dots,L)$ 。

2.3 算法流程

由此总结出,本文提出的基于机载单天线雷达一维距离数据的地面三维信息几何重建算法的具体流程如下:

(1) 提取和关联出雷达一维距离像中 N 个散射点在 L 次回波中的一维距离数据 $R_{ij}(i=1,2,\dots,N; j=1,2,\dots,L)$;

(2) 根据式(6)对平移参数 R_0 进行初始估计;

(3) 对 R_{ij} 进行去平移处理,并构建如式(7)的一维投影距离矩阵 ϕ ;

(4) 对矩阵 ϕ 进行降秩的奇异值分解(SVD),得到如式(11)的一组仿射重建参数 S_A 和 C_A ;

(5) 由式(15)得到参数 w 的最小二乘估计,并构造矩阵 W 后取逆,得到参数 w_1 ;

(6) 建立如式(22)的最小化目标函数,采用LM法对重建参数 S_A 、 C_A 、 R_0 、 w 和 w_1 进行非线性最优化,得到参数的最优解;

(7) 由式(16)和式(17)求解目标散射点的三维信息 X_{Ei} ($i=1,2,\dots,N$)以及雷达载机的三维运动轨迹 X_{rj} ($j=1,2,\dots,L$)。

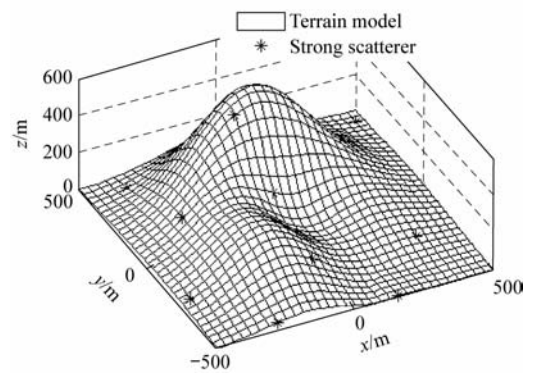
3 仿真验证

本节模拟具有任意曲线飞行轨迹的机载单天线雷达对地面目标进行聚束式回波探测的情况,对地面若干强散射点的雷达回波进行了仿真,同时利用雷达距离像中提取出的一维距离数据,对所提出的重建算法的重建效果进行了检验,并对算法的重建性能进行了量化分析。

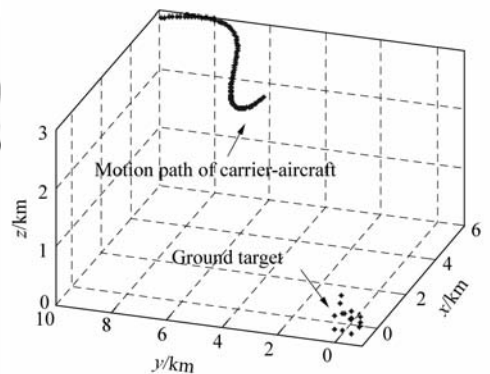
3.1 实例仿真

图3给出了本次实验中地面目标和载机飞行轨迹的仿真模型。其中,实验建立了如图3(a)中的曲面函数来模拟雷达波束覆盖区域的复杂地形,其中波束覆盖区域的直径约为1 km。在曲面上选取12个点作为地面上的强散射点,其空间位置如图3(a)所示。同时,通过仿真得到了载机的一组飞行轨迹,如图3(b)所示。其中载机的飞行高度约为3 000 m,并做接近于目标上空的曲线飞行,其在飞行过程中相对于地面目标的观测方位角 θ 具有幅度为 15° 的正弦摆动,俯仰角 α 具有幅度为 15° 的均转速。经计算,以上仿真模型中地面散射点最大的近场误差约为24.8 m,此时雷达的远场假设将不再满足。

实验中采用以上仿真模型,对散射点的雷达回波进行了仿真。仿真中设置雷达信号为线性调频波(LFM),其中心频率为2.5 GHz,信号带宽为600 MHz(纵向距离分辨率约为0.5 m),信号的采样频率为1 200 MHz(2倍带宽)。设目标散射点的后向散射系数(RCS)均为1,并且设置雷



(a) Simulation model of terrain



(b) Motion path of carrier-aircraft

图3 地面目标与载机飞行轨迹的仿真模型

Fig. 3 Simulation model of ground target and motion path of the carrier aircraft

达在以上飞行轨迹期间以等时间间隔连续对地面目标进行了100次回波探测,由此得到地面12个目标散射点的回波序列。模拟实际中地面的杂波干扰,实验中在雷达回波中添加了一定的高斯白噪声,通过沿回波距离向对各次回波的距离向压缩处理,得到了雷达的一维距离像,如图4(a)所示。实验利用散射点在距离像中的包络特征,对各次回波中各散射点的包络峰值所处的距离位置进行了提取,并对各次回波中的散射点进行了关联,从而得到12个散射点在各次回波中的一维距离数据。图4(b)给出了以上提取出的散射点一维距离轨迹。限于雷达距离像有限的纵向距离分辨率以及杂波干涉的影响,以上提取出的一维距离数据的误差大致在分辨率等级。实验中,根据式(6)对目标的平移量进行了估计,并对一维距离数据进行了去平移处理,最终得到目标散射点去平移后的一维投影距离如图4(c)所示。

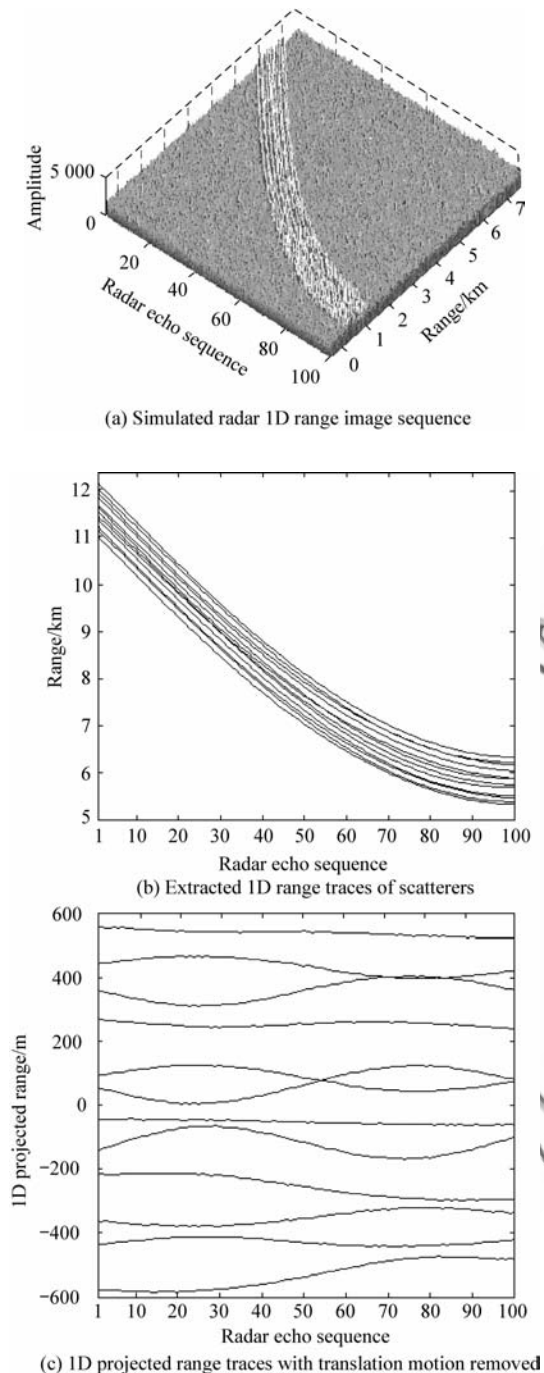
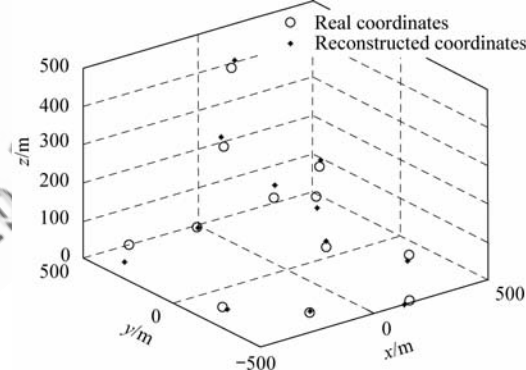


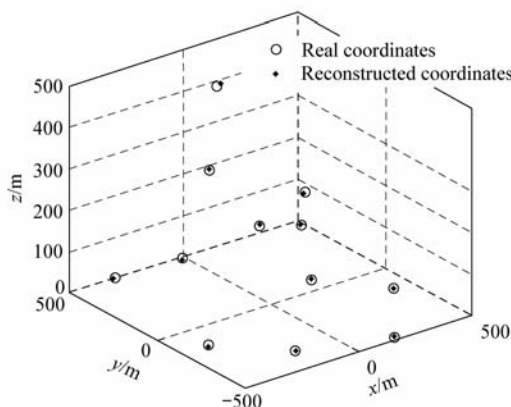
图4 雷达距离像仿真及提取出的一维距离数据
Fig. 4 Simulation of radar range image and extracted 1D range data

基于以上得到的含误差的一维距离数据,分别采用2.1节所述的基于远场假设的重建方法和本文提出的基于近场几何模型的优化重建方法(2.2节),对目标散射点的三维坐标 \mathbf{S}_E 以及雷达的运动轨迹 \mathbf{X}_{rj} ($j=1, 2, \dots, L$) 进行了重

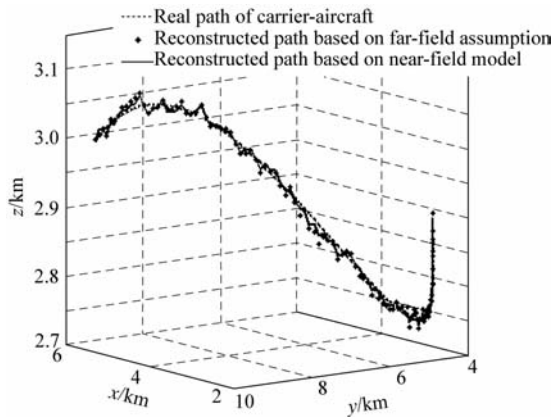
建,其中优化重建方法中的罚函数系数设置为 $\sigma_1 = \sigma_2 = 1\ 000$ 。由于上述方法得到的欧式重建坐标与真实坐标相差任一平移和旋转,为检验重建的准确性,本实验对目标和雷达平台的欧式重建坐标进行了匹配校正。此匹配校正操作是通过求解一组最优的旋转和平移参数,使重建坐标经此欧式变换后的校正坐标与真实坐标之间的欧氏距离达到最小化,从而使重建目标在位置和角度上较好地与真实目标对准。图5(a)和图5(b)分别给出了上述两种方法得到的地面目标散射点的重建结果,可以看出,经过基于近场几何模型的优化重建后,地面目标散射点的重建坐标与真实坐标之间的误差得到了有效抑制,重建精度得到有效提高。图5(c)给出了上述两种方法得到的载机运动轨迹的重建结果。可以看出,两种重建方法载机运动轨迹基本上反映出了载机真实的运动特征,其中本文提出的优化重建方法得到的载机运动轨迹的重建效果稍好于现有方法。



(a) Reconstruction method based on far-field assumption



(b) Optimal reconstruction method based on near-field model



(c) Reconstructed motion paths of carrier-aircraft

图5 地面三维信息和载机运动轨迹的重建结果

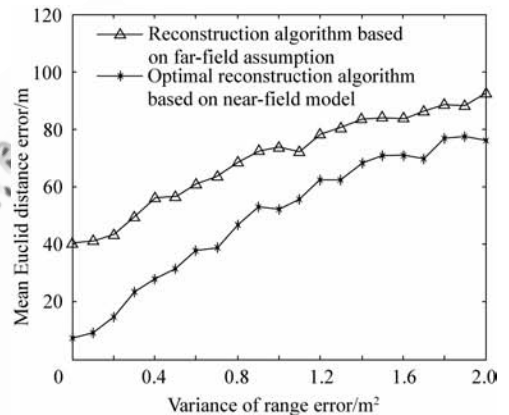
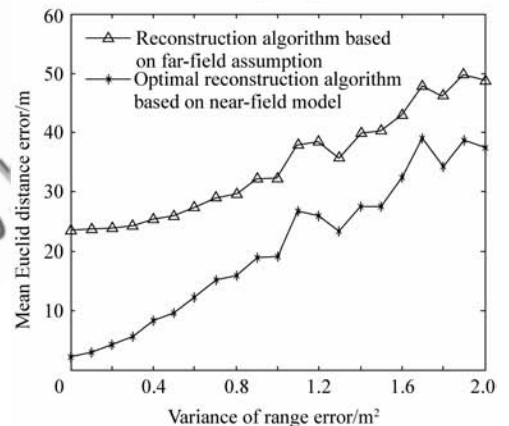
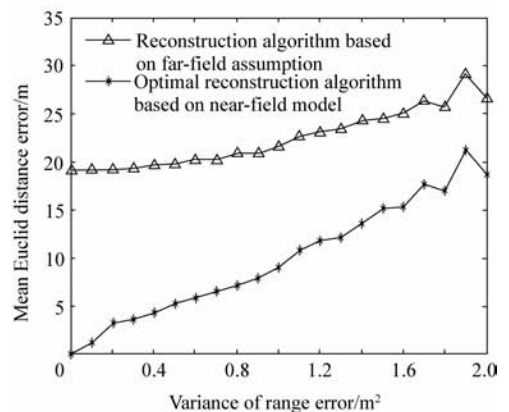
Fig. 5 Reconstructed results of terrain 3D information and motion paths of carrier aircraft

3.2 量化分析

为检验本文提出的优化重建方法对于地面目标三维信息重建效果,实验中以平移和旋转匹配校正后的各目标散射点的重建坐标与真实坐标之间的平均欧式距离误差(即平均每个散射点的距离误差)为标准,针对不同雷达视角角度范围,以及原始一维距离数据中存在不同方差的距离提取误差的情况,分别对现有的基于远场假设的重建方法和本文提出的优化重建方法的重建误差进行了量化分析。

实验中依然采用3.1节的仿真模型,在不改变载机基本运动特征的情况下,分别对载机运动视角范围为 5° 、 10° 、 15° 和 20° 这4种情况进行了重建实验。针对每一种运动情况,首先根据模型计算出目标散射点的真实一维距离数据,然后模拟实际中散射点一维距离的不同提取误差,分别在原始一维距离数据中加入方差为 $0\sim 2\text{ m}^2$ 的高斯误差。对于每一种误差情况,分别采用上述两种重建方法进行了100次重建实验,并计算出每次重建得到的目标散射点的平均欧式距离误差。图6给出了上述两种重建方法在4种雷达视角范围下的平均欧式距离误差曲线,曲线的幅度值为100次重建的平均值。由图6可以看出:对于不同的雷达视角范围情况,经过本文提出的优化重建之后,目标三维坐标的重建精度均得到了显著提高;对于不含误

差的原始一维距离数据(即图中的0方差处),现有方法的重建误差仍较大;而经过本文的优化重建后,仅存在较小的重建误差。由此证明:对于雷达近场目标,现有的基于雷达远场假设的重建模型将不再适用;而本文建立的近场几何模型基本合理,采用本文提出的优化重建方法能够有效提高机载单天线雷达对于地表目标的重建精度。

(a) View-angle scope of 5° (b) View-angle scope of 10° (c) View-angle scope of 15°

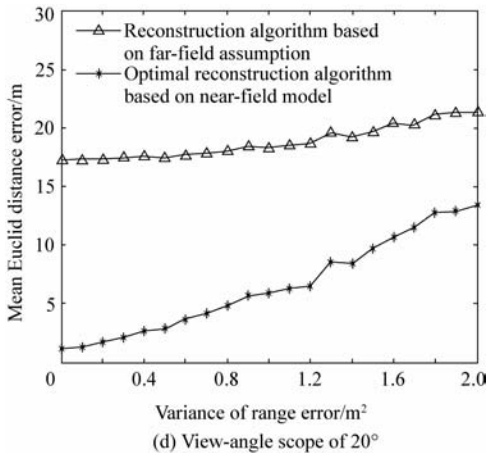


图6 不同视角范围下的平均欧氏距离误差曲线
Fig. 6 Curves of mean Euclid distance error for different view-angle scopes

4 结论

对现有的基于雷达远场假设的重建算法进行了改进,建立了目标雷达测距的近场几何约束,并采用非线性优化方法对重建参数进行了优化调整,有效地提高了对于地面大面积目标的重建精度,实现了机载单天线雷达任意未知三维运动下对地面信息的高精度三维重建。另外,此算法同样可适用于其他一维感知系统(如声纳、红外、激光等)对于近场目标的三维重建领域。

由于此算法的实现需要预先由雷达一维距离像中获得地面散射点有效的一维距离数据,而实际中受到遮挡、杂波、噪声、散射点起伏等因素的影响,散射点一维距离位置的提取和关联问题仍是这项技术的难点问题。由仿真实验可知,此重建方法能够同时重建出雷达平台的运动轨迹,因此实际中可利用初步重建出的雷达运动参数,在一维距离像中提取出更多的散射点,从而用较多的重建散射点来更好地描述地面的三维结构。此外,利用重建出的目标运动信息对地面稠密散射表面的三维成像,将是此项技术今后进一步的研究方向。

参 考 文 献

[1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 229-344.
Bao Zheng, Xing Mengdao, Wang Tong. Radar image technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics

Industry, 2005: 229-344. (in Chinese)

- [2] Xiang Z, Wang K Z, Liu X Z. A model-spectrum-based flattening algorithm for airborne single-pass SAR interferometry[J]. IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters, 2009, 6(2): 307-311.
- [3] Wang G Y, Xia X G, Chen V C. Three dimensional ISAR imaging of maneuvering targets using three receivers[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(3): 436-448.
- [4] Xu X J, Narayanan R M. Three dimensional interferometric ISAR imaging for target scattering diagnosis and modeling[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(7): 1094-1102.
- [5] Mayhan J T, Burrows M L, Cuomo K M, et al. High resolution 3D snapshot ISAR imaging and feature extraction[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(2): 630-642.
- [6] 任双桥, 刘永祥, 黎湘, 等. 基于多姿态角下一维距离像的雷达目标三维成像[J]. 电子学报, 2005, 33(6): 1088-1090.
Ren Shuangqiao, Liu Yongxiang, Li Xiang, et al. Radar target 3-D imaging based on multi-aspect range profiles[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(6): 1088-1090. (in Chinese)
- [7] Bryant M L, Gostin L L, Soumekh M. 3-D E-CSAR imaging of a T-72 tank and synthesis of its SAR reconstructions[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(1): 211-227.
- [8] Xing M D, Wang G Y, Bao Z. A matched-filter-bank-based 3D imaging algorithm for rapidly spinning targets[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(7): 2106-2113.
- [9] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 230-274.
Huang Peikang, Yin Hongcheng, Xu Xiaojian. Radar target characteristics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 230-274. (in Chinese)
- [10] Stuff M, Sanchez P, Biancala M. Extraction of three-dimensional motion and geometric invariants[J]. Multidimensional Systems and Signal Processing, 2003, 14(1-3): 161-181.
- [11] Ferrara M, Arnold G, Stuff M. Shape and motion reconstruction from 3D-to-1D orthographically projected data via object-image relations[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2009, 31(10): 1906-1912.
- [12] 周剑雄. 光学区雷达目标三维散射中心重构理论与技术[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008: 64-66.
Zhou Jianxiong. Theory and technology on reconstructing 3D scattering centers of radar targets in optical region[D].

Changsha: National University of Defense Technology, 2008: 64-66. (in Chinese)

- [13] 刘永祥, 吕玉增, 黎湘, 等. 多姿态角下的目标散射中心关联与成像方法研究[J]. 信号处理, 2008, 24(2): 168-171.

Liu Yongxiang, Lv Yuzeng, Li Xiang, et al. Scattering centers association and imaging based on multi-aspect measurement[J]. Signal Processing, 2008, 24(2): 168-171. (in Chinese)

- [14] Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision[M]. London: Cambridge University Press, 2000: 434-497.

- [15] Triggs B, McLauchlan P F, Hartley R I. Bundle adjustment—a modern synthesis[C]//Proceedings of the Inter-

national Workshop on Vision Algorithms: Theory and Practice. London: Springer-Verlag, 2000: 298-375.

作者简介:

张颖康(1982—) 男, 博士研究生。主要研究方向: 计算机视觉和雷达成像技术。

Tel: 010-51684010

E-mail: 08112079@bjtu.edu.cn

肖扬(1955—) 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 空时信号处理和多维信号处理。

Tel: 010-51684010

E-mail: yangxia0513@163.com

Optimal Reconstruction Algorithm for 3D Terrain Information Based on 1D Range Data of Airborne Single-antenna Radar

ZHANG Yingkang, XIAO Yang*

Institute of Information Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract: Under the arbitrary relative motion of airborne radar, the rigid ground surface holds the geometry invariance. Based on this restriction, the 3D terrain information and the unknown motion path of the carrier-aircraft can be reconstructed using the 1D range data of some strong scatterers extracted from the radar range image. Considering the problem that current reconstruction algorithms based on far-field assumption are incompetent for reconstructing the ground target which involves larger near-field range errors, an optimal reconstruction algorithm based on near-field model of the radar range measurement is proposed and it achieves the bundle adjustment for the reconstructed parameters by utilizing the nonlinear optimization. The simulations verify that, the reconstructed precision of this algorithm is of remarkable improvement for near-field target and, hence, the high precision geometric reconstruction for the terrain's 3D information under the arbitrary unknown 3D motion of the airborne single-antenna radar is realized.

Key words: 3D reconstruction; 3D radar imaging; geometry invariance; bundle adjustment; radar range image

Received: 2010-09-09; **Revised:** 2011-02-16; **Accepted:** 2011-04-14; **Published online:** 2011-04-26 11:20:48

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20110426.1120.006.html **DOI:** CNKI:11-1929/V.20110426.1120.006

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (60572093); Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (20050004016)

* **Corresponding author.** Tel.: 010-51684010 E-mail: yangxiao0513@163.com