(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 102654576 B
(45)授权公告日 2013.10.16

(21)申请号 201210151299.1
(22)申请日 2012.05.16

(73)专利权人 西安电子科技大学
地址 710071 陕西省西安市太白南路2号

(72)发明人 于昕 白朝晖 赵建 何焱
朱建益 焦李成 吴建设 尚荣华
李阳阳

(74)专利代理机构 陕西电子工业专利中心
61205
代理人 王品华 朱红星

(51)Int.Cl.
G01S 13/90(2006.01)
G01S 7/02(2006.01)

审查员 段秋萍

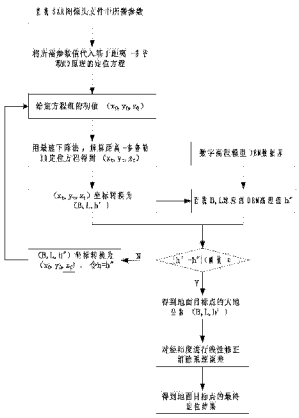
权利要求书3页 说明书8页 附图2页

(54)发明名称

基于SAR图像和DEM数据的图像配准方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于SAR图像和DEM数据的图像配准方法，主要解决现有技术对SAR图像中地面目标点的定位精度不高和在实际工程中实现难的问题。其实现过程为：根据距离-多普勒RD原理及地球模型方程，用最速下降法求解出地面目标点在球心坐标下的经度L，纬度B和高程值h′，并将其值转换到大地坐标系；查找数字高程模型DEM数据库中与B、L对应的高程值h″，将|h′-h″|与设定的阈值ε比较，若|h′-h″|>ε，则令h=h″，返回重新解方程组，若|h′-h″|≤ε，停止迭代，则h′就是地面目标点的高程值，所对应的纬度B和经度L为地面目标点的经纬度；对经纬度进行线性修正消除系统误差，得到最终的地面目标点定位结果。本发明具有运算量小、定位精度高的优点，可用于实际工程中对SAR图像中地面目标点的定位。



CN 102654576 B

1. 一种基于 SAR 图像和 DEM 数据的图像配准方法，包括如下步骤：

(1) 查找 SAR 图像的所带头文件，得到地面目标点所在区域的平均高程值，作为高程值 h 的初始值；

(2) 将初始值 h 分别代入由距离 - 多普勒 RD 原理确定的斜距方程、多普勒频率方程及地球模型方程中，将这 3 个方程联立，用最速下降法求解出地面目标点的位置矢量 $R_t = (x_t, y_t, z_t)$，其中，x_t、y_t、z_t 分别是球心坐标系中地面目标点的 X 轴坐标、Y 轴坐标、Z 轴坐标；

(3) 将计算得到的位置矢量 $R_t = (x_t, y_t, z_t)$ 转换为大地坐标系中对应的纬度 B、经度 L 和高程值 h'；

(4) 根据纬度 B 和经度 L 查找数字高程模型 DEM 数据库中对应的高程值 h''；

(5) 将数字高程模型 DEM 数据库中对应的高程值 h'' 与计算得到的高程值 h' 做差并求绝对值，再与所设定的阈值 $\varepsilon = 0.3$ 作比较，如果该绝对值大于阈值 ε，则令 h = h''，返回步骤(2)，如果该绝对值小于等于阈值 ε，则停止迭代，计算得到的高程值 h' 就是地面目标点的高程值，所对应的纬度 B 和经度 L 就是地面目标点的经纬度；

(6) 对所得地面目标点的纬度 B 和经度 L 进行线性修正，得到修正后的纬度 B' 和经度 L'，以消除系统误差：

$$B' = B - 0.001*\left(\frac{r}{2} - \left|\frac{r}{2} - i\right|\right)/\frac{r}{2} + 0.002*\left(j - \frac{c}{2}\right)/\frac{c}{2} \quad ,$$

$$L' = L + 0.001*(i-1)/r + 0.001*\left(\frac{c}{2} - j\right)/\frac{c}{2} + 0.0065*\left(\frac{r}{2} - |i-1|\right)/\frac{r}{2} \quad ,$$

其中，r 是 SAR 图像的总行数，c 是 SAR 图像的总列数，i 是地面目标点所在行号，j 是地面目标点所在列号；

(7) 根据修正后的经度和纬度，得到地面目标点在大地坐标系中的位置；

所述步骤(2) 中用最速下降法解方程组，按如下步骤进行：

2a) 确定非线性方程组为：

$f_1 = R' = |R_s - R_t| = [(R_s - R_t) \cdot (R_s - R_t)]^{1/2}$,

$$f_2 = -\frac{2}{\lambda R'}\mathbf{V}\cdot\mathbf{R} = -\frac{2}{\lambda R'}(\mathbf{V}_s - \mathbf{V}_t)\cdot(\mathbf{R}_s - \mathbf{R}_t),$$

$$f_3 = \frac{(x_t^2 + y_t^2)}{(R_e + h)^2} + \frac{z_t^2}{R_p^2} - 1,$$

其中，f_1、f_2 分别是由 RD 原理确定的斜距方程和多普勒频率方程，f_3 是地球模型方程，R' 是斜距，R_s、R_t 分别是卫星平台和地面目标点的位置矢量，λ 是雷达波长，V 是速度矢量，R 是位置矢量，V_s、V_t 分别是卫星平台和地面目标点的速度矢量，$V_t = \omega_e \times R_t$，$\omega_e$ 是地球自转角速度，R_e 是平均赤道半径，R_p 是极轴半径且 $R_p = [(1-f)(R_e+h)]^2$，平坦度因子 f = 1/298.255，h 是 SAR 图像中地面目标点所在区域的平均高程值；

2b) 给定一组值 (x_0, y_0, z_0)，作为步骤 2a) 中非线性方程组解的初始值，分别得到 f_1、f_2 和 f_3 的值，将所得值代入目标函数 $F(x_0, y_0, z_0)$，计算目标函数值：

$$F=F(x_0,y_0,z_0)=\sum_{i=1}^{3}f_i^2,$$

其中，F 是目标函数值；

2c）若目标函数值 F < ε，则 $(x_0, y_0, z_0)^T$ 为非线性方程组的一组实根，停止计算，否则继续执行下面的计算步骤，其中，ε 是设定的阈值，其值为 0.3；

2d）计算目标函数 $F(x_0, y_0, z_0)$ 在点 (x_0, y_0, z_0) 处的偏导数：

$$\frac{\partial F}{\partial x_0}=2\sum_{j=1}^{3}f_j^2\cdot\frac{\partial f_j}{\partial x_0},$$

$$\frac{\partial F}{\partial y_0}=2\sum_{j=1}^{3}f_j^2\cdot\frac{\partial f_j}{\partial y_0},$$

$$\frac{\partial F}{\partial z_0}=2\sum_{j=1}^{3}f_j^2\cdot\frac{\partial f_j}{\partial z_0},$$

其中，$\frac{\partial(A)}{\partial(a)}$ 表示函数 A 对变量 a 求偏导；

2e）计算中间变量 D 的值：

$$D=\left(\frac{\partial F}{\partial x_0}\right)^2+\left(\frac{\partial F}{\partial y_0}\right)^2+\left(\frac{\partial F}{\partial z_0}\right)^2;$$

2f）计算地面目标点在位置 (x_t, y_t, z_t) 处的值：

$$x_t=x_0-\lambda\frac{\partial F}{\partial x_0},$$

$$y_t=y_0-\lambda\frac{\partial F}{\partial y_0},$$

$$z_t=z_0-\lambda\frac{\partial F}{\partial z_0},$$

其中，λ = F/D，x_t、y_t、z_t 分别是球心坐标系中地面目标点的 X 轴坐标、Y 轴坐标、Z 轴坐标；

2g）重复步骤 2b）～ 2f），直到满足 x_t、y_t 和 z_t 的精度为 0.0201，得到的 (x_t, y_t, z_t) 就是地面目标点的球心坐标。

2. 根据权利要求 1 所述的基于 SAR 图像和 DEM 数据的图像配准方法，其中步骤（3）所述的坐标系转换，按如下步骤进行：

3a）将大地坐标系中的 BLh′ 转换到球心坐标系中的 $x_ty_tz_t$：

$$\begin{cases}x_t=(N+h')\cos B\cos L\\ y_t=(N+h')\cos B\sin L\\ z_t=(N(1-e^2)+h')\sin B\end{cases},$$

其中，卯酉曲率半径 $N=\frac{a}{\sqrt{1-e^2\sin^2 B}}$，e 为地球的第一偏心率且 $e^2=\frac{a^2-b^2}{a^2}$，a 是地球赤道半径，b 是地球极半径，B 是纬度，L 是经度，h’ 是高程值；

3b）将球心坐标系中的 (x_t, y_t, z_t) 代入步骤 3a）中的公式，得到在大地坐标系中纬度 B、

经度 L 和高程值 h’ 的计算公式：

$$B=\arctan(\frac{z_t+(e')^2 b\sin^3\theta}{P-e^2 a\cos^3\theta},$$

$$L=\arctan(\frac{y_t}{x_t}),$$

$$h'=\frac{P}{\cos B}-N \quad ,$$

其中，P 是球心坐标系中地面目标点到 Z 轴的距离且 $P=(x_t^2+y_t^2)^{\frac{1}{2}}$，θ 是中间变量且 $\theta=\arctan(\frac{z_t a}{Pb})$，e′ 为地球的第二偏心率且 $e'=\frac{e^2}{1-e^2}$，x_t、y_t、z_t 分别是球心坐标系中地面目标点的 X 轴坐标、Y 轴坐标、Z 轴坐标；

3c）将步骤 2g）得到的（x_t, y_t, z_t）代入步骤 3b）中的 B、L、h′ 公式中，得到地面目标点的纬度 B 和经度 L 及高程值 h’。

基于 SAR 图像和 DEM 数据的图像配准方法

技术领域

[0001] 本发明属于图像处理技术领域，涉及图像配准，特别是一种地面目标定位和配准方法，可用于 SAR 图像中的地面目标定位和 SAR 影像的几何校正处理过程的预处理环节。

背景技术

[0002] 合成孔径雷达 SAR 技术以其高分辨率、全天候、全天时的工作能力以及对目标的识别特性，在军事、地形测绘、海洋监测等方面发挥着日益重要的作用。图像配准是将来自同一区域、在相同时间或不同时间、不同传感器或不同视点所获取的遥感数字图像在空间上进行对准。利用 SAR 图像和数字高程模型 DEM 数据库的图像配准，可以对图像的像素进行精确的地理定位，SAR 图像和 DEM 数据的图像配准过程就是对 SAR 图像中目标进行定位的过程。

[0003] 在对 SAR 图像中目标进行定位时，目前有 3 种定位方法：基于多项式模型的定位方法、基于共线方程模型的定位方法和基于距离 - 多普勒 RD 原理的定位方法。

[0004] 一. 基于多项式模型的定位方法。这种方法是通过构建多项式模型对目标进行定位，多项式模型用一组多项式对输入空间和输出空间的变换进行简单的函数逼近，是一种基于平面的变换。通过在地形图上和卫星遥感影像上选取参考点并读取其地理坐标和影像坐标，用最小二乘法建立两者的多项式变换关系，然后将图像坐标系中的象素以此关系转换到地图坐标系中从而实现对地定位。

[0005] 多项式模型定位方法不依赖于卫星传感器成像系统本身，它要求选择参考点，以定出一系列多项式系数，因此与卫星轨道、传感器姿态等参数全然无关。该方法操作简单且原理清晰，但在实际应用上具有明显的局限性，特别是在宽阔的洋面上，或是在一望无际的沙漠里，或是在有大片浓云覆盖的地区，很难找到用于图像定位的可靠的参考点，因此也就很难谈得上有多少定位精确度。

[0006] 二. 基于共线方程模型的定位方法。这种方法是通过构建共线方程模型进行目标定位，共线方程模型的基本思想是将侧视 SAR 图像看成是一个中心投影遥感器获取的等效图像，然后借用光学遥感的中心投影方式进行校正，从而把 SAR 的距离投影和侧视几何成像转化为中心投影的透视关系。该方法是建立在影像坐标和地面坐标严格变换关系的基础上的，是对成像空间几何形态的直接描述，因而，从理论上讲比多项式方法更严密些。

[0007] 对于诸如 Landsat、SPOT 等卫星的 TM 光学成像机理而言，共线方程模型无疑在理论上很好地反映了中心投影的透视几何关系。但是对于 SAR 成像而言，虽然也可以将距离投影转换为中心投影，仿照摄影测量中惯用的共线方程来表达，但共线方程只是一个虚构的中心投影构像模型，并不能真实地反映出 SAR 距离投影的几何形态，即位于传感器所发出之探测波的同一波前球面上的所有地物点将成像于同一点。因此 SAR 不适用共线方程的概念。

[0008] 三. 基于距离 - 多普勒 RD 原理的定位方法。这种方法是 1982 年首先由 Curlander 等人提出的，此方法利用地球物理模型方程、SAR 多普勒方程、SAR 斜距方程对图像像素进

行定位，并于 1989 年完成了 SAR 图像自动校正地理编码后处理系统。该系统可以对 SAR 图像进行精确定位，精度可以达到 ±200m。

[0009] 距离－多普勒 RD 原理主要是根据合成孔径雷达 SAR 的成像原理，这样点目标的空间定位由两方面来决定：一是根据目标回波时间的长短来确定点目标到雷达的距离，二是根据目标回波的多普勒特性。如图 1 所示，在 SAR 的照射区域内，分布着等时延的同心圆束和等多普勒频移的双曲线束，图中 S 是卫星位置，D 是星下点，P 是地面目标点，O 是地球中心。点目标必定在等时延的同心圆束和一个等多普勒曲面的交线上，如果预先知道点目标所在的约束平面，如地表面，则像点的空间位置可以唯一确定。根据距离向上回波信号的时延和方位向上的多普勒频移这两个信息来确定点目标位置的方法，就是距离－多普勒 RD 定位方法。

[0010] 根据 RD 原理，列出 RD 方程组如下：

[0011] 1）多普勒频率方程：

[0012] $$f_{DC}=-\frac{2}{\lambda R}\mathbf{V}\cdot\mathbf{R}=-\frac{2}{\lambda R}(\mathbf{V}_s-\mathbf{V}_t)\cdot(\mathbf{R}_s-\mathbf{R}_t)\quad,$$

[0013] 式中，f_{DC} 为多普勒频率，λ 为雷达波长，R 是卫星到地面的距离，V 表示速度矢量，R 表示位置矢量，v_s、v_t 分别指卫星平台和地面目标的速度矢量，且 $V_t=\omega_e\times R_t$，ω_e 是地球自转角速度。

[0014] 2）斜距方程：

[0015] $R=|R_s-R_t|=[(R_s-R_t)\cdot(R_s-R_t)]^{1/2}$，

[0016] 其中，R_s 和 R_t 分别为卫星平台和地面目标的位置矢量，它们可通过卫星下行数据影像头文件中的星历参数并通过函数预测得到，设 $R_s=(x_s,y_s,z_s)^T$，$R_t=(x_t,y_t,z_t)^T$。

[0017] 3）地球模型方程：

[0018] $$\frac{(x_t^2+y_t^2)}{(R_e+h)^2}+\frac{z_t^2}{R_p^2}=1\quad,$$

[0019] 式中，R_e 为平均赤道半径，R_p 为极轴半径，且 $R_p=[(1-f)(R_e+h)]^2$，平坦度因子 f=1/298.255，(x_t,y_t,z_t) 为地面目标点的位置矢量，h 是 SAR 图像中目标所在区域的平均高程值。

[0020] 这种方法虽然能解决基于多项式模型的定位方法在实际工程应用中局限性大且定位精度低和基于共线方程模型的定位方法不能很好地用在 SAR 图像定位上的缺陷。但对这种定位方法的求解，大多采用最小二乘迭代算法，求解过程复杂，且求解过程中目标点的高度 h 未知，需要用地面目标位置矢量 (x_t,y_t,z_t) 来表示再通过计算求出高度 h。同时要对计算出的地面目标位置矢量进行坐标转换，这样在求解过程中，由于已知的数据如地球赤道半径、地球极半径等为近似数据，故得到的计算结果误差就会被放大使定位精度降低，而且无法验证所得数据的合理性。

发明内容

[0021] 本发明的目的在于针对上述已有方法中的不足，提出了一种基于 SAR 图像和 DEM 数据的图像配准方法，以降低定位时求解方程的复杂性，提高定位精度，满足实际工程需要。

[0022] 实现本发明目的的技术思路是：通过将 SAR 图像头文件中给出的所需参数代入距离－多普勒 RD 原理定位方法中的 3 个联立方程，用最速下降法及将 SAR 图像和 DEM 数据相结合的方法，求解方程得到目标点的经纬度值和高度值，对所得数据进行线性修正得到更准确、高精度的地面点目标位置。其具体步骤包括如下：

[0023] （1）查找 SAR 图像的所带头文件，得到地面目标点所在区域的平均高程值，作为高程值 h 的初始值；

[0024] （2）将初始值 h 分别代入由距离－多普勒 RD 原理确定的斜距方程、多普勒频率方程及地球模型方程中，将这 3 个方程联立，用最速下降法求解出地面目标点的位置矢量 $R_t=(x_t, y_t, z_t)$，其中，x_t、y_t、z_t 分别是球心坐标系中地面目标点的 X 轴坐标、Y 轴坐标、Z 轴坐标；

[0025] （3）将计算得到的位置矢量 $R_t=(x_t, y_t, z_t)$ 转换为大地坐标系中对应的纬度 B、经度 L 和高程值 h′；

[0026] （4）根据纬度 B 和经度 L 查找数字高程模型 DEM 数据库中对应的高程值 h″；

[0027] （5）将数字高程模型 DEM 数据库中对应的高程值 h″ 与计算得到的高程值 h′ 做差并求绝对值，再与所设定的阈值 ε=0.3 作比较，如果该绝对值大于阈值 ε，则令 h=h″，返回步骤（2），如果该绝对值小于等于阈值 ε，则停止迭代，计算得到的高程值 h′ 就是地面目标点的高程值，所对应的纬度 B 和经度 L 就是地面目标点的经纬度；

[0028] （6）对所得地面目标点的纬度 B 和经度 L 进行线性修正，得到修正后的纬度 B′ 和经度 L′，以消除系统误差：

[0029] $$B'=B-0.001*\left(\frac{r}{2}-\left|\frac{r}{2}-i\right|\right)/\frac{r}{2}+0.002*\left(j-\frac{c}{2}\right)/\frac{c}{2},$$

[0030] $$L'=L+0.001*(i-1)/r+0.001*\left(\frac{c}{2}-j\right)/\frac{c}{2}+0.0065*\left(\frac{r}{2}-|i-1|\right)/\frac{r}{2},$$

[0031] 其中，r 是 SAR 图像的总行数，c 是 SAR 图像的总列数，i 是地面目标点所在行号，j 是地面目标点所在列号；

[0032] （7）根据修正后的经度和纬度，得到地面目标点在大地坐标系中的位置。

[0033] 本发明与现有技术相比具有以下优点：

[0034] 1）本发明由于在计算中采用最速下降法，而没有采用通常所用的最小二乘迭代法，大大减少了运算量，并且提高了计算结果的精度。

[0035] 2）本发明由于将 SAR 图像和 DEM 数据结合起来对地面目标进行定位，不仅对目标的定位结果更加精确，而且有利于在实际工程上的使用。

[0036] 3）本发明由于对所得地面目标点的位置矢量进行了线性修正，提高了定位精度。

[0037] 实验结果表明，本发明对地面目标点的定位可以满足实际工程中要求的。

附图说明

[0038] 图 1 是本发明中的距离－多普勒 RD 定位原理图；

[0039] 图 2 是本发明的实现流程图。

具体实施方式

[0040] 参照图 2，本发明的具体实施步骤如下：

[0041] 步骤 1. 从 SAR 图像所带头文件提供的参数中，查获 SAR 图像中地面目标点所在区域的平均高程值 h。

[0042] 步骤 2. 联立由距离 - 多普勒 RD 原理确定的斜距方程、多普勒频率方程及地球模型方程，将这 3 个方程作为一个非线性方程组，用最速下降法求解得到地面目标点在球心坐标中的位置。

[0043] 2a）根据距离 - 多普勒 RD 原理确定的斜距方程、多普勒频率方程和地球模型方程：

[0044] 斜距方程：$R' = |R_s - R_t| = [(R_s - R_t) \cdot (R_s - R_t)]^{1/2}$，

[0045] 多普勒频率方程：$f_{DC} = -\frac{2}{\lambda R'}\mathbf{V}\cdot\mathbf{R} = -\frac{2}{\lambda R'}(\mathbf{V_s}-\mathbf{V_t})\cdot(\mathbf{R_s}-\mathbf{R_t})$，

[0046] 地球模型方程：$\frac{(x_t^2+y_t^2)}{(R_e+h)^2}+\frac{z_t^2}{R_p^2}=1$，

[0047] 其中，R' 是斜距，R_s、R_t 分别是卫星平台和地面目标点的位置矢量，λ 是雷达波长，V 是速度矢量，R 是位置矢量，v_s、v_t 分别是卫星平台和地面目标点的速度矢量，$v_t=\omega_e\times R_t$，ω_e 是地球自转角速度，x_t、y_t、z_t 分别是球心坐标系中地面目标点的 X 轴坐标、Y 轴坐标、Z 轴坐标，R_e 是平均赤道半径，R_p 是极轴半径且 $R_p=[(1-f)(R_e+h)]^2$，平坦度因子 f=1/298.255，h 是 SAR 图像中地面目标点所在区域的平均高程值；

[0048] 2b）将这 3 个方程联立一个非线性方程组为：

[0049] $$\begin{cases} f_1 = R' = [(\mathbf{R_s}-\mathbf{R_t})\cdot(\mathbf{R_s}-\mathbf{R_t})]^{1/2} \\ f_2 = f_{DC} = -\frac{2}{\lambda R'}(\mathbf{V_s}-\mathbf{V_t})\cdot(\mathbf{R_s}-\mathbf{R_t}) \\ f_3 = (x_t^2+y_t^2)/(R_e+h)^2 + z_t^2/R_p^2 - 1 \end{cases};$$

[0050] 2c）将步骤 1 中查到的平均高程值 h 作为高程的初始值，代入非线性方程组中；

[0051] 2d）给定一组值 (x_0, y_0, z_0)，作为步骤 2b）中非线性方程组解的初始值，代入非线性方程组得到 f_1、f_2 和 f_3 的值，将所得值代入目标函数 $F(x_0, y_0, z_0)$，计算目标函数值：

[0052] $F = F(x_0, y_0, z_0) = \sum_{i=1}^{3} f_i^2$，

[0053] 其中，F 是目标函数值；

[0054] 2e）若目标函数值 F< ε，则 $(x_0, y_0, z_0)^T$ 就是非线性方程组的一组实根，停止计算，否则继续执行下面的计算步骤，其中，ε 是设定的阈值，其值为 0.3，T 表示转置；

[0055] 2f）计算目标函数 $F(x_0, y_0, z_0)$ 在点 (x_0, y_0, z_0) 处的偏导数：

[0056] $\frac{\partial F}{\partial x_0} = 2\sum_{j=1}^{3} f_j^2 \cdot \frac{\partial f_j}{\partial x_0}$，

[0057] $\frac{\partial F}{\partial y_0} = 2\sum_{j=1}^{3} f_j^2 \cdot \frac{\partial f_j}{\partial y_0}$，

[0058] $\frac{\partial F}{\partial z_0} = 2\sum_{j=1}^{3} f_j^2 \cdot \frac{\partial f_j}{\partial z_0}$，

[0059] 其中，$\frac{\partial(A)}{\partial(a)}$ 表示函数 A 对变量 a 求偏导；

[0060] 2g）计算中间变量 D 的值：

[0061] $D=\left(\frac{\partial F}{\partial x_0}\right)^2+\left(\frac{\partial F}{\partial y_0}\right)^2+\left(\frac{\partial F}{\partial z_0}\right)^2$；

[0062] 2h）计算地面目标点在（x_t, y_t, z_t）处的值：

[0063] $x_t=x_0-\lambda\frac{\partial F}{\partial x_0}$，

[0064] $y_t=y_0-\lambda\frac{\partial F}{\partial y_0}$，

[0065] $z_t=z_0-\lambda\frac{\partial F}{\partial z_0}$，

[0066] 其中，λ=F/D；

[0067] 2i）重复步骤 2d）~2h），直到满足 x_t、y_t 和 z_t 的精度值 0.0201，得到 SAR 图像中地面目标点在球心坐标系中的位置坐标（x_t, y_t, z_t）。

[0068] 步骤 3. 将计算得到的地面目标点位置坐标（x_t, y_t, z_t）转换到大地坐标系下。

[0069] 3a）将大地坐标系中纬度 B，经度 L 和高程 h′ 转换到球心坐标系下地面目标点的位置坐标（x_t, y_t, z_t）：

[0070] $$\begin{cases} x_t=(N+h')\cos B\cos L \\ y_t=(N+h')\cos B\sin L \\ z_t=(N(1-e^2)+h')\sin B \end{cases},$$

[0071] 其中，卯酉曲率半径$N=\frac{a}{\sqrt{1-e^2\sin^2 B}}$，e 为地球的第一偏心率，$e^2=\frac{a^2-b^2}{a^2}$，a 是地球赤道半径，b 是地球极半径；

[0072] 3b）将球心坐标系中地面目标点的位置坐标（x_t, y_t, z_t）代入步骤 3a）中的大地坐标系中纬度 B，经度 L 和高程 h′ 公式，得到其在大地坐标系中纬度 B、经度 L 和高程值 h′ 的计算公式：

[0073] $B=\arctan(\frac{z_t+(e')^2 b\sin^3\theta}{P-e^2 a\cos^3\theta}$，

[0074] $L=\arctan(\frac{y_t}{x_t})$，

[0075] $h'=\frac{P}{\cos B}-N$，

[0076] 其中，P 是球心坐标系中地面目标点到 Z 轴的距离且$P=(x_t^2+y_t^2)^{\frac{1}{2}}$，θ 是中间变量且$\theta=\arctan(\frac{z_t a}{Pb})$，e′ 为地球的第二偏心率，$e'=\frac{e^2}{1-e^2}$；

[0077] 3c）将步骤 2i）得到的地面目标点位置坐标（x_t, y_t, z_t）代入步骤 3b）中的纬度 B、经度 L 和高程值 h′ 计算公式中，得到其对应的纬度 B、经度 L 和高程值 h′。

[0078] 步骤 4. 根据大地坐标系中的纬度 B 和经度 L，查找数字高程模型 DEM 数据库中和此经纬度值所对应的高程值 h″。

[0079] 步骤 5. 比较数字高程模型 DEM 数据库中对应的高程值 h″ 与计算得到的高程值 h′ 差的绝对值与阈值 ε 的大小，以确定计算得到的高程值 h′ 就是地面目标点的高程值。

[0080] 5a）取阈值 ε=0.3，如果 |h′ -h″ > ε，则令 h=h″，得到大地坐标系中的坐标（B, L, h″），将其转换到球心坐标系，作为方程的初始值（x_0, y_0, z_0），返回步骤 2d）重新执行；

[0081] 5b)如果 $|h' - h''| \leqslant \varepsilon$，则停止迭代，计算得到的高程值 h′ 就是地面目标点的高程值，所对应的纬度 B 和经度 L 就是地面目标点的经纬度。

[0082] 步骤 6. 对所得地面目标点的纬度 B 和经度 L 进行线性修正，以消除系统误差。

[0083] 6a）将经纬度代入以下修正公式：

[0084] $$B' = B - 0.001 * \left(\frac{r}{2} - \left|\frac{r}{2} - i\right|\right) / \frac{r}{2} + 0.002 * \left(j - \frac{c}{2}\right) / \frac{c}{2} \quad ,$$

[0085] $$L' = L + 0.001 * (i-1) / r + 0.001 * \left(\frac{c}{2} - j\right) / \frac{c}{2} + 0.0065 * \left(\frac{r}{2} - |i-1|\right) / \frac{r}{2} \quad ,$$

[0086] 其中，r 是 SAR 图像的总行数，c 是 SAR 图像的总列数，i 是地面目标点所在行号，j 是地面目标点所在列号；

[0087] 6b）根据以上的修正公式，得到修正后地面目标点的纬度 B′ 和经度 L′ 。

[0088] 步骤 7. 由修正后的经度、纬度及计算得到的高程值，最终得到地面目标点在大地坐标系中的坐标 (B′ ,L′ ,h′)。

[0089] 本发明的效果可以通过如下仿真实验进一步说明。

[0090] 1）仿真条件：

[0091] 硬件平台为：Intel Core2Duo CPU E6550@2.33GHZ、2GB RAM

[0092] 软件平台为：VC++6.0

[0093] 2）仿真内容：

[0094] 应用本发明分别对 SAR 图像头文件中给定的 5 个标准参考点和在 SAR 图像中取的 20 个地面目标点进行实验，在球心坐标系将计算值与 Goole Earth 中对应的各点值进行比较，来评价本发明的精度和实际应用性。

[0095] 仿真 1，应用本发明对 SAR 图像提供头文件中给定的 5 个标准参考点进行仿真实验，在球心坐标系下将计算值与 GooleEarth 中对应的各点值进行比较，实验结果如表 1 所示。

[0096] 表 15 个标准参考点的实验结果

[0097]

5 个参考点坐标		参考值/m	计算值/m	误差/m	整体误差/m
(1,1)	x_t	-1730943.35026000	-1730948.34141645	4.9911564500	9.4132298144
	y_t	4971220.80086213	4971224.63997941	-3.8391172802	
	z_t	3590146.92584519	3590139.92881501	6.9970301799	
(1，41600)	x_t	-1696166.73433853	-1696198.78988271	32.0555441799	33.3137638413
	y_t	4979290.50028357	4979282.00396221	8.4963213596	
	z_t	3595606.93848079	3595603.76649845	3.1719823396	
(55200,1)	x_t	-1730090.44376211	-1730056.36967754	-34.0740845702	35.3883297812
	y_t	5005269.30642017	5005263.97251884	5.3339013299	
	z_t	3544734.34901786	3544742.27619529	-7.9271774301	
(55200, 41600)	x_t	-1696387.06305830	-1696404.53005726	17.4669989601	26.6829974939
	y_t	5012394.71072473	5012378.96031701	15.7504077200	
	z_t	3549575.58332752	3549588.18534955	-12.6020220299	
(27600, 20800)	x_t	-1713659.54731292	-1713656.42271919	-3.1245937301	6.4435889486
	y_t	4991899.33893087	4991894.97490869	4.3640221804	
	z_t	3569917.08918083	3569920.65457884	-3.5653980100	

[0098] 由表 1 可见，本发明中对 5 个标准参考点的定位精度在 50m 范围之内，查找每个点的时间为 0.015s，说明本发明能满足实际工程中的定位精度需要和实时性要求。

[0099] 仿真 2，应用本发明在 SAR 图像中取 20 个点进行仿真实验，在球心坐标系下将计算值与 Goole Earth 中对应的各点值进行比较，实验结果如表 2 所示。

[0100] 表 2 20 个地面目标点的实验结果

[0101]

点坐标		球心坐标误差/m	整体误差/m	点坐标		球心坐标误差/m	整体误差/m
1	x_t	-22.20026989979660	22.59770551314060	11	x_t	-11.63224748987700	14.02813735689620
	y_t	-0.29373536072671			y_t	-7.67827198002487	
	z_t	4.20927907992154			z_t	1.58858283981680	

[0102]

点坐标		球心坐标误差/m	整体误差/m	点坐标		球心坐标误差/m	整体误差/m
2	x_t	9.47803637012839	10.57267459271630	12	x_t	10.74403798999260	20.06807003246860
	y_t	4.63523842021822			y_t	-9.34530735015869	
	z_t	-0.68032300984487			z_t	14.14066168991840	
3	x_t	-1.62877772003412	3.00714168198424	13	x_t	-9.18331561004742	21.72559714774260
	y_t	0.33427030965686			y_t	-14.65927313920110	
	z_t	-2.50564314983785			z_t	13.14435228006910	
4	x_t	4.84801721991971	5.37110090523990	14	x_t	-26.84619843028480	38.94251620406290
	y_t	2.23852358944714			y_t	-23.80318238027390	
	z_t	-0.57833044975996			z_t	15.13967326981940	
5	x_t	7.82354146009311	8.77449034541335	15	x_t	-25.49230442987750	35.68013480895750
	y_t	1.87609033938497			y_t	-22.78564879950130	
	z_t	-3.50202297000214			z_t	10.19944329978890	
6	x_t	4.42938224039971	7.49379463955392	16	x_t	-14.37255511013790	24.62304390973720
	y_t	5.28854104969650			y_t	-15.08716814033680	
	z_t	-2.92726231040433			z_t	13.11873883008950	
7	x_t	4.01044214004650	9.52471184340683	17	x_t	11.01282428996630	13.47278586383920
	y_t	5.35848065931349			y_t	4.32767631951719	
	z_t	-6.77666397020220			z_t	6.44242794020101	
8	x_t	18.45130310999220	23.02209167046310	18	x_t	-36.54103275993830	45.35236466279730
	y_t	13.44780268985770			y_t	-26.01260612998150	
	z_t	2.95342534035444			z_t	6.70329975988715	
9	x_t	18.10667958995320	21.57873826576950	19	x_t	-34.88961376016950	49.59852448359000
	y_t	11.45101654995230			y_t	-30.06245656963430	
	z_t	2.58153429999947			z_t	18.41133312974120	
10	x_t	3.31686479039490	5.36358480993939	20	x_t	-19.71687813987950	23.66653349847920
	y_t	2.53268657997250			y_t	-7.74311139062047	
	z_t	-3.36926530022174			z_t	-10.55432377010580	

[0103] 由表 2 可见，本发明中 20 个地面目标点的定位误差均控制在 50m 范围之内，查找每一个点的计算时间为 0.015s，说明本发明能满足实际工程中的定位精度需要和实时性要求。

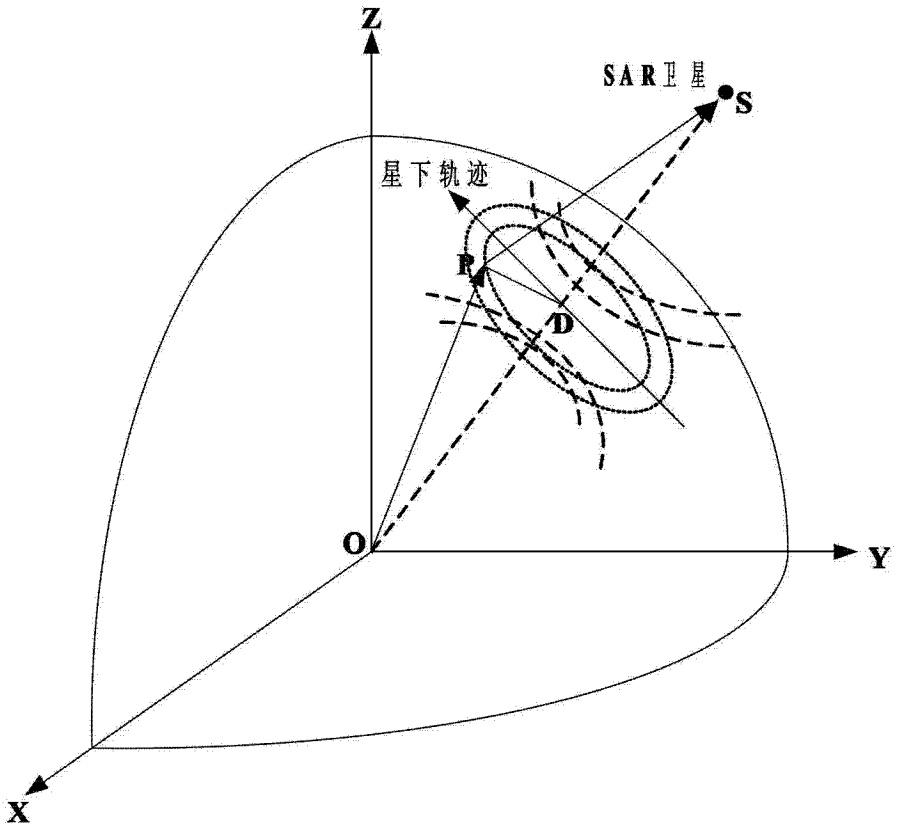


图 1

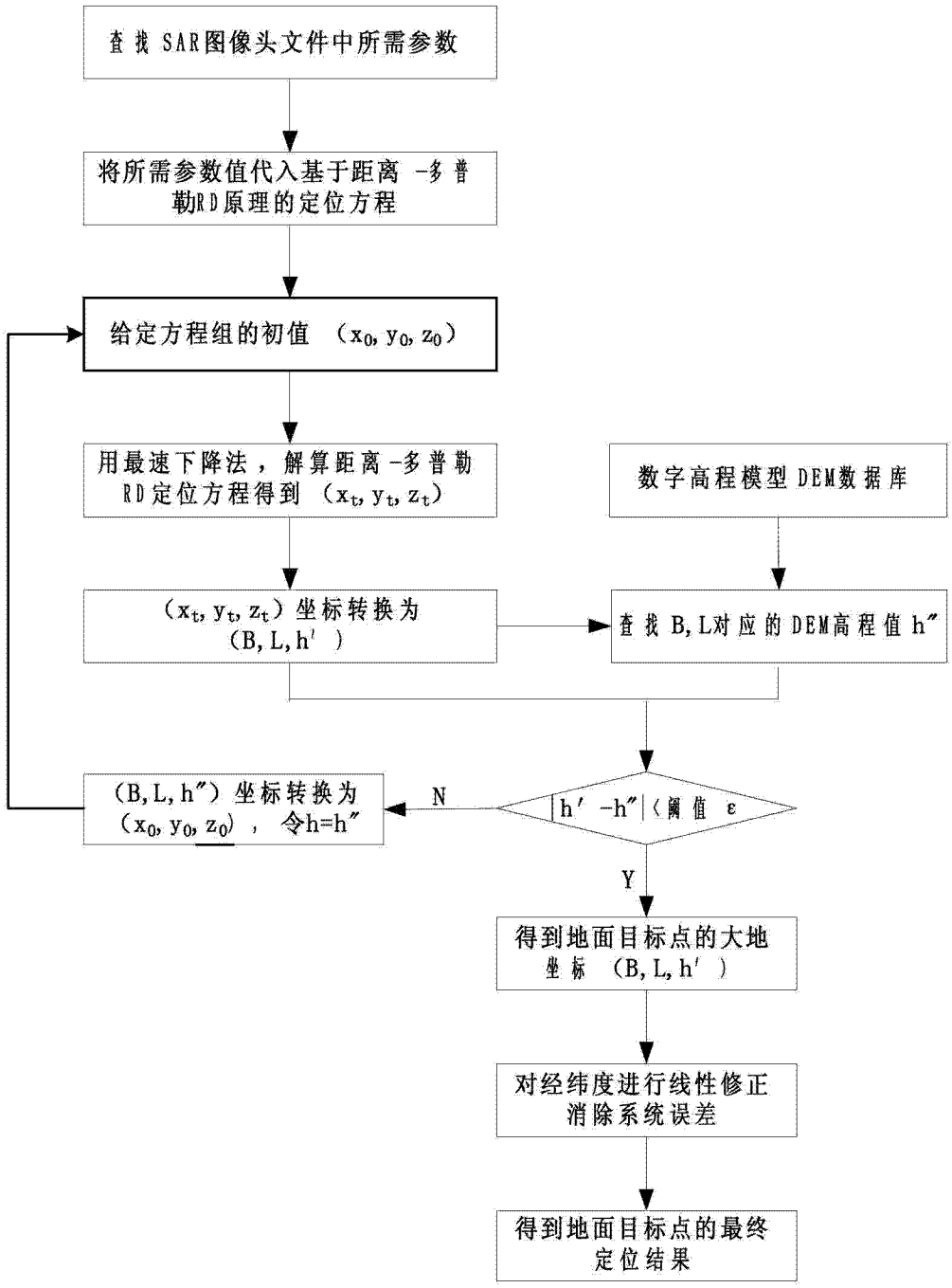

查找 SAR图像头文件中所需参数
将所需参数值代入基于距离 -多普勒RD原理的定位方程
给定方程组的初值 (x_0, y_0, z_0)
用最速下降法，解算距离-多普勒RD定位方程得到 (x_t, y_t, z_t)
数字高程模型 DEM数据库
(x_t, y_t, z_t) 坐标转换为 (B, L, h')
查找 B,L对应的 DEM高程值 h''
(B, L, h'') 坐标转换为 (x_0, y_0, z_0)，令 $h=h''$
N
$|h' - h''| <$ 阈值 ε
Y
得到地面目标点的大地坐标 (B, L, h')
对经纬度进行线性修正消除系统误差
得到地面目标点的最终定位结果

图 2