



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105911524 B

(45)授权公告日 2018.04.13

(21)申请号 201610152919.1

(22)申请日 2016.03.17

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 105911524 A

(43)申请公布日 2016.08.31

(73)专利权人 中国西安卫星测控中心

地址 710043 陕西省西安市咸宁东路462号

(72)发明人 张淑琴 宋克章 何雨帆 杨涛

赵治 李永华 高景丽

(74)专利代理机构 西北工业大学专利中心

61204

代理人 顾潮琪

(51)Int.Cl.

G01S 7/02(2006.01)

(56)对比文件

US 2008/0042897 A1,2008.02.21,全文.

CN 103235297 A,2013.08.07,全文.

陶勇.基于轨道匹配和改进的空间目标识别方法.《雷达科学与技术》.2006,第4卷(第3期),134-139.

Mauro Grassi, et al.Enabling Orbit Determination of Space Debris Using Narrowband Radar.《IEEE transaction on aerospace and electronic systems》.2015,第51卷(第2期),1231-1240.

审查员 王晓琼

权利要求书3页 说明书11页

(54)发明名称

超稀疏雷达数据关联匹配方法

(57)摘要

本发明提供了一种超稀疏雷达数据关联匹配方法,采用“先匹配再定轨再匹配”的思想及“三点法”匹配原则,对数据进行分类、初定轨、“三点法”轨道匹配,逐级筛选目标潜在关联集,以达到数据自相关匹配的目的。本发明提出的超稀疏雷达数据的“三点法”匹配方法,实用性强、匹配正确率高,有效解决了缺少先验信息情况下空间目标多圈超稀疏雷达数据的关联匹配问题,填补了我国在超稀疏雷达多圈观测数据关联匹配方面的空白。

1. 一种超稀疏雷达数据关联匹配方法,其特征在于包括下述步骤:

步骤一、在未关联数据点全集{A}中的选出任意数据点 $D_k$ ,与{A}中任意一数据点 $D_j$ 进行潜在关联分类; $D_k$ 对应的观测时间为 $t(D_k)$ ,空间位置为 $r(D_k)$ , $D_j$ 对应的观测时间为 $t(D_j)$ ,空间位置为 $r(D_j)$ ;  $\Delta h$ 、 $\Delta t$ 、 $\Delta\varphi$ 分别为设定的高度、时间、角度筛选门限;

$$1) \text{ 若 } \begin{cases} |r(D_k) - r(D_j)| \leq \Delta h \\ |t(D_k) - t(D_j) - t_\Delta| \leq \Delta t \quad k \neq j, \text{ 则 } D_j \text{ 为 } D_k \text{ 的第一类潜在关联数据, 加入潜在关联集} \\ |\varphi| \leq \Delta\varphi \end{cases},$$

$P_{d1}(D_k) = \{D_1^1, D_2^1, \dots, D_m^1\}$  中, 其中,  $\varphi$  为  $r(D_k)$ 、 $r(D_j)$  夹角,  $\cos\varphi = \frac{r(D_k) \cdot r(D_j)}{|r(D_k)| \cdot |r(D_j)|}$ ,  $t_\Delta$  为

$D_j$  和  $D_k$  相对某一观测站位于同一个弧段时, 从  $r(D_k)$  到  $r(D_j)$  所需要的理论时间,  $t_\Delta = \frac{\cos B}{n \cdot \sin i \cdot \cos u} \cdot \varphi$ ,  $B$  为观测站纬度, 轨道的平运动速度  $n = \sqrt{\frac{\mu}{r^3(D_k)}}$ ,  $\mu$  为地球引

力常数, 纬度幅角  $u$  及轨道倾角的  $i$  满足  $\sin u = \frac{\sin B}{\sin i}$ ,  $R(R_x, R_y, R_z)$  为  $r(D_k)$ 、 $r(D_j)$  所在轨

道面的单位法向, 且  $R = \frac{r(D_k) \times r(D_j)}{|r(D_k) \times r(D_j)|}$ ,  $\cos i = R_z$ ;

$$2) \text{ 若 } \begin{cases} |r(D_k) - r(D_j)| \leq \Delta h \\ |t(D_k) - t(D_j) - t'_\Delta| \leq \Delta t, \quad k \neq j, \text{ 则 } D_j \text{ 为 } D_k \text{ 的第二类潜在关联数据, 加入潜在关联集} \\ |\varphi| \leq \Delta\varphi \end{cases}$$

$P_{d2}(D_k) = \{D_1^2, D_2^2, \dots, D_l^2\}$  中, 其中,  $t'_\Delta$  为  $D_j$  和  $D_k$  相对某一观测站间隔多圈后同为升轨或降轨

方式时, 从  $r(D_k)$  到  $r(D_j)$  所需要的理论时间,  $t'_\Delta = sT$ ,  $T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3(D_k)}{\mu}}$ ,  $s = \frac{|t(D_j) - t(D_k)|}{T}$

后取整数;

$$3) \text{ 若 } \begin{cases} \varphi + 2u \leq \pi + \Delta\varphi \\ \varphi + 2u \geq \pi - \Delta\varphi \end{cases}, \text{ 则 } D_j \text{ 为 } D_k \text{ 的第三类潜在关联数据, 加入潜在关联集}$$

$P_{d3}(D_k) = \{D_1^3, D_2^3, \dots, D_x^3\}$  中;

步骤二、分别将  $D_k$  与  $P_{d1}(D_k) = \{D_1^1, D_2^1, \dots, D_m^1\}$  中每个潜在关联点进行初定轨, 得出相对应的轨道根数  $\sigma_{1m}$ , 其中,  $\sigma_{1m} = (a_{1m}, e_{1m}, i_{1m}, \Omega_{1m}, \omega_{1m}, M_{1m})^T$ , 即为轨道的半长轴、偏心率、倾角、升交点赤径、近地点幅角、平近点角;

分别将  $D_k$  与  $P_{d3}(D_k) = \{D_1^3, D_2^3, \dots, D_n^3\}$  中每个潜在关联点进行初定轨, 得出轨道根数  $\sigma_{3n}$ , 其中,  $\sigma_{3n} = (a_{3n}, e_{3n}, i_{3n}, \Omega_{3n}, \omega_{3n}, M_{3n})^T$ , 即为轨道的半长轴、偏心率、倾角、升交点赤径、近

地点幅角、平近点角；

若集合  $P_{d1}(D_k) = \{D_1^1, D_2^1, \dots, D_m^1\}$  非空, 分别以  $\sigma_{1m}$  为基准筛选  $\sigma_{3n}$ , 筛选原则如下:

$$\begin{cases} |a_{1m} - a_{3n}| \leq \Delta a \\ |i_{1m} - i_{3n}| \leq \Delta i \\ |\Omega_{1m} - \Omega_{3n}| \leq \Delta \Omega \end{cases}$$

$\Delta a$ 、 $\Delta i$ 、 $\Delta \Omega$  分别为设定的轨道半长轴、轨道倾角、升交点赤径筛选门限;

选择  $\sigma_{3n}$  中与  $\sigma_{1m}$  相匹配的轨道根数作为基准轨道根数  $\sigma_{3n}^*$ ;

若集合  $P_{d1}(D_k) = \{D_1^1, D_2^1, \dots, D_m^1\}$  为空, 则  $\sigma_{3n}$  中所有轨道根数即为基准轨道根数,

$$\sigma_{3n}^* = \sigma_{3n};$$

步骤三、将所有参与基准轨道根数确定的数据点建立集合  $P_{d13}(D_k) = \{D_1^3, D_2^3, \dots, D_i^3\}$ ,

即第二级潜在关联集;

步骤四、依据潜在关联的两点的轨道特性, 在第二类潜在关联集  $P_{d2}(D_k) = \{D_1^2, D_2^2, \dots, D_i^2\}$

中, 查找关联的第三点:

1) 依次根据每一个基准轨道根数对应的数据点  $D_k^3, D_k^3 \in P_{d13}(D_k)$ , 分别将  $D_k^3$  与  $P_{d2}(D_k)$  中所有点进行定轨, 得出轨道根数  $\sigma_{21}, \sigma_{21} = (a_{21}, e_{21}, i_{21}, \Omega_{21}, \omega_{21}, M_{21})^T$ , 即为轨道的半长轴、偏心率、倾角、升交点赤径、近地点幅角、平近点角;

2) 将  $\sigma_{21}$  外推到要匹配的  $\sigma_{3n}^*$  对应的根数  $\sigma_{2i}^*$ , 外推原理如下:

$$\begin{cases} \frac{da}{dt} = 0 \\ \frac{de}{dt} = 0 \\ \frac{di}{dt} = 0 \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{3nC_{20}a_e^2}{2(1-e^2)^2 a^2} \cos i \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{3nC_{20}a_e^2}{4(1-e^2)^2 a^2} (1-5\cos^2 i) \\ \frac{dM}{dt} = n = n_0 - \frac{3n_0 C_{20} a_e^2}{4(1-e^2)^{3/2} a^2} (3\cos^2 i - 1) \end{cases},$$

其中,  $a_e$  为地球半径,  $C_{20} = 0.0010826$ ;

3) 通过  $E - e \sin E = M$  和  $\operatorname{tg} \frac{f}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \operatorname{tg} \frac{E}{2}$  计算轨道的真近点角的  $f$ , 其中,  $M$  为轨道平近点

角,  $E$  为偏近点角,  $e$  为偏心率;

4) 采用三点法对分别来自第一类、第二类、第三类潜在关联集中的三个数据点确定的

两组轨道进行匹配,匹配原则如下:

$$\begin{cases} |a_{2l}^* - a_{3n}^*| \leq \Delta a \\ |i_{2l}^* - i_{3n}^*| \leq \Delta i \\ |\Omega_{2l}^* - \Omega_{3n}^*| \leq \Delta \Omega \\ |\omega_{2l}^* + f_{2l}^* - \omega_{3n}^* - f_{3n}^*| \leq \Delta f \end{cases}$$

$\Delta a$ 、 $\Delta i$ 、 $\Delta \Omega$ 、 $\Delta f$ 分别为设定的轨道半长轴、轨道倾角、升交点赤径、真近点角筛选门限;

步骤五、将所有满足匹配原则的轨道根数 $\sigma_{3n}^*$ 与 $\sigma_{2l}^*$ 中所用的数据点,建立第三级潜在关联集 $P_{d123}(D_k) = \{D_1, D_2, \dots, D_z\}$ ,则 $P_{d123}$ 为 $D_k$ 的最终关联匹配数据集 $\{P(D_k)\}$ ;令 $\{A\} = \{A\} - \{P(D_k)\}$ ,返回步骤一,进行其它数据点的关联匹配,若 $\{A\}$ 中数据元素个数小于3,则匹配结束。

## 超稀疏雷达数据关联匹配方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于航天测量与控制领域,涉及一种数据关联匹配方法。

### 背景技术

[0002] 超稀疏雷达数据是指雷达设备观测单个空间目标时每次获取的极少采样点数(不超过4个点)的测量数据。比如,美国的NAVSPASUR空间篱笆系统,空间目标每次穿过时留下极短的测量弧段。测量数据的关联匹配,主要根据测量点的空间位置及轨道特性结合相关性要求,将满足要求的数据关联在一起,便于统一进行分析计算。

[0003] 传统意义上的数据关联匹配,首先将单弧段数据进行定轨,将定轨结果与先验信息数据库中轨道信息进行粗关联匹配,在此基础上,再将测量数据进行o-c关联匹配,若匹配上,则为已知目标关联数据,若未关联上,则定义为“新目标数据”,此类目标往往包括新发射目标,或者因目标解体、目标变轨等空间事件而导致的“新目标”等。而对于所有“新目标”未关联数据,只能采用各自单弧段定轨结果,进行自相关匹配。总之,是采用“先定轨再匹配”的原则。

[0004] 超稀疏雷达数据单弧段点数太少,无法利用最小二乘定轨,而基于短弧的两点定轨精度太差,所以,传统的“先定轨再匹配”方法已不适应。因没有一定精度的轨道,导致测量数据与已知目标数据库中轨道信息无法进行正确匹配,各弧段多圈数据也无法依据轨道进行自相关匹配,从而形成大量“未关联数据”,而多圈数据的关联匹配是轨道改进的前提和目标识别的基础。

### 发明内容

[0005] 为了克服现有技术的不足,本发明提供一种超稀疏雷达数据关联匹配方法,完成超稀疏雷达观测数据的自相关匹配,为基于超稀疏雷达数据的空间目标轨道确定及目标识别提供支持。

[0006] 本发明解决其技术问题所采用的技术方案包括如下步骤:

[0007] 步骤一、在未关联数据点全集{A}中的选出任意数据点 $D_k$ ,与{A}中任意一数据点 $D_j$ 进行潜在关联分类; $D_k$ 对应的观测时间为 $t(D_k)$ ,空间位置为 $r(D_k)$ , $D_j$ 对应的观测时间为 $t(D_j)$ ,空间位置为 $r(D_j)$ ;  $\Delta h$ 、 $\Delta t$ 、 $\Delta\varphi$ 分别为设定的高度、时间、角度筛选门限;

[0008] 1) 若 
$$\begin{cases} |r(D_k) - r(D_j)| \leq \Delta h \\ |t(D_k) - t(D_j) - t_\Delta| \leq \Delta t \\ |\varphi| \leq \Delta\varphi \end{cases} \quad k \neq j, \text{ 则 } D_j \text{ 为 } D_k \text{ 的第一类潜在关联数据, 加入潜在关}$$

联集  $P_{d1}(D_k) = \{D_1, D_2, \dots, D_m\}$  中, 其中,  $\varphi$  为  $r(D_k)$ 、 $r(D_j)$  夹角,  $\cos\varphi = \frac{r(D_k) \cdot r(D_j)}{|r(D_k)| \cdot |r(D_j)|}$ ,

$t_\Delta$  为  $D_j$  和  $D_k$  相对某一观测站位于同一个弧段时, 从  $r(D_k)$  到  $r(D_j)$  所需要的理论时间,

$t_{\Delta} = \frac{\cos B}{n \cdot \sin i \cdot \cos u} \cdot \varphi$ ,  $B$  为观测站纬度, 轨道的平运动速度  $n = \sqrt{\frac{\mu}{r^3(D_k)}}$ ,  $\mu$  为地球引力常数, 纬度幅角  $u$  及轨道倾角的  $i$  满足  $\sin u = \frac{\sin B}{\sin i}$ ,  $R(R_x, R_y, R_z)$  为  $r(D_k)$ 、 $r(D_j)$  所在轨道面的单位法向, 且  $R = \frac{r(D_k) \times r(D_j)}{|r(D_k) \times r(D_j)|}$ ,  $\cos i = R_z$ ;

[0009] 2) 若  $\begin{cases} |r(D_k) - r(D_j)| \leq \Delta h \\ |t(D_k) - t(D_j) - t_{\Delta}| \leq \Delta t \quad k \neq j, \text{ 则 } D_j \text{ 为 } D_k \text{ 的第二类潜在关联数据, 加入潜在关联} \\ |\varphi| \leq \Delta \varphi \end{cases}$ ,

集  $P_{d2}(D_k) = \{D_1^2, D_2^2, \dots, D_l^2\}$  中, 其中,  $t'_{\Delta}$  为  $D_j$  和  $D_k$  相对某一观测站间隔多圈后同为升轨或降轨方式时, 从  $r(D_k)$  到  $r(D_j)$  所需要的理论时间,  $t'_{\Delta} = sT$ ,  $T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3(D_k)}{\mu}}$ ,  $s = \frac{|t(D_j) - t(D_k)|}{T}$

后取整数;

[0010] 3) 若  $\begin{cases} \varphi + 2u \leq \pi + \Delta \varphi \\ \varphi + 2u \geq \pi - \Delta \varphi \end{cases}$ , 则  $D_j$  为  $D_k$  的第三类潜在关联数据, 加入潜在关联集  $P_{d3}(D_k) = \{D_1^3, D_2^3, \dots, D_x^3\}$  中;

[0011] 步骤二、分别将  $D_k$  与  $P_{d1}(D_k) = \{D_1^1, D_2^1, \dots, D_m^1\}$  中每个潜在关联点进行初定轨, 得出相对应的轨道  $\sigma_{1m}$ , 其中,  $\sigma_{1m} = (a_{1m}, e_{1m}, i_{1m}, \Omega_{1m}, \omega_{1m}, M_{1m})^T$ , 即为轨道的半长轴、偏心率、倾角、升交点赤径、近地点幅角、平近点角;

[0012] 分别将  $D_k$  与  $P_{d3}(D_k) = \{D_1^3, D_2^3, \dots, D_n^3\}$  中每个潜在关联点进行初定轨, 得出轨道根数  $\sigma_{3n}$ , 其中,  $\sigma_{3n} = (a_{3n}, e_{3n}, i_{3n}, \Omega_{3n}, \omega_{3n}, M_{3n})^T$ , 即为轨道的半长轴、偏心率、倾角、升交点赤径、近地点幅角、平近点角;

[0013] 若集合  $P_{d1}(D_k) = \{D_1^1, D_2^1, \dots, D_m^1\}$  非空, 分别以  $\sigma_{1m}$  为基准筛选  $\sigma_{3n}$ , 筛选原则如下:

[0014]  $\begin{cases} |a_{1m} - a_{3n}| \leq \Delta a \\ |i_{1m} - i_{3n}| \leq \Delta i \\ |\Omega_{1m} - \Omega_{3n}| \leq \Delta \Omega \end{cases}$

[0015]  $\Delta a$ 、 $\Delta i$ 、 $\Delta \Omega$  分别为设定的轨道半长轴、轨道倾角、升交点赤径筛选门限;

[0016] 选择  $\sigma_{3n}$  中与  $\sigma_{1m}$  相匹配的轨道根数作为基准轨道根数  $\sigma_{3n}^*$ ;

[0017] 若集合  $P_{d1}(D_k) = \{D_1^1, D_2^1, \dots, D_m^1\}$  为空, 则  $\sigma_{3n}$  中所有轨道根数即为基准轨道根数,  $\sigma_{3n}^* = \sigma_{3n}$ ;

[0018] 步骤三、将所有参与基准轨道根数确定的数据点建立集合  $P_{d13}(D_k) = \{D_1^3, D_2^3, \dots, D_l^3\}$ , 即第二级潜在关联集;

[0019] 步骤四、依据潜在关联的两点的轨道特性, 在第二类潜在关联集  $P_{d2}(D_k) = \{D_1^2, D_2^2, \dots, D_l^2\}$  中, 查找关联的第三点:

[0020] 1) 依次根据每一个基准轨道根数对应的数据点  $D_k^3, D_k^3 \in P_{d13}(D_k)$ , 分别将  $D_k^3$  与  $P_{d2}(D_k)$  中所有点进行定轨, 得出轨道根数  $\sigma_{21}, \sigma_{21} = (a_{21}, e_{21}, i_{21}, \Omega_{21}, \omega_{21}, M_{21})^T$ , 即为轨道的半长轴、偏心率、倾角、升交点赤径、近地点幅角、平近点角;

[0021] 2) 将  $\sigma_{21}$  外推到要匹配的  $\sigma_{3n}^*$  对应的根数  $\sigma_{2l}^*$ , 外推原理如下:

$$[0022] \left\{ \begin{array}{l} \frac{da}{dt} = 0 \\ \frac{de}{dt} = 0 \\ \frac{di}{dt} = 0 \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{3nC_{20}a_e^2}{2(1-e^2)^2 a^2} \cos i \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{3nC_{20}a_e^2}{4(1-e^2)^2 a^2} (1-5\cos^2 i) \\ \frac{dM}{dt} = n = n_0 - \frac{3n_0 C_{20} a_e^2}{4(1-e^2)^{3/2} a^2} (3\cos^2 i - 1) \end{array} \right. ,$$

其中,  $a_e$  为地球半径,  $C_{20} = 0.0010826$ ;

[0023] 3) 通过  $E - e \sin E = M$  和  $\operatorname{tg} \frac{f}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \operatorname{tg} \frac{E}{2}$  计算轨道的真近点角  $f$ , 其中,  $M$  为轨道平近点角,  $E$  为偏近点角,  $e$  为偏心率;

[0024] 4) 采用三点法对分别来自第一类、第二类、第三类潜在关联集中的三个数据点确定的两组轨道进行匹配, 匹配原则如下:

$$[0025] \left\{ \begin{array}{l} |a_{2l}^* - a_{3n}^*| \leq \Delta a \\ |i_{2l}^* - i_{3n}^*| \leq \Delta i \\ |\Omega_{2l}^* - \Omega_{3n}^*| \leq \Delta \Omega \\ |\omega_{2l}^* + f_{2l}^* - \omega_{3n}^* - f_{3n}^*| \leq \Delta f \end{array} \right.$$

[0026]  $\Delta a$ 、 $\Delta i$ 、 $\Delta \Omega$ 、 $\Delta f$  分别为设定的轨道半长轴、轨道倾角、升交点赤径、真近点角筛选门限;

[0027] 步骤五、将所有满足匹配原则的轨道根数  $\sigma_{3n}^*$  与  $\sigma_{2l}^*$  中所用的数据点, 建立第三级潜在关联集  $P_{d123}(D_k) = \{D_1, D_2, \dots, D_x\}$ , 则  $P_{d123}$  为  $D_k$  的最终关联匹配数据集  $\{P(D_k)\}$ ; 令  $\{A\} = \{A\} - \{P(D_k)\}$ , 返回步骤一, 进行其它数据点的关联匹配, 若  $\{A\}$  中数据元素个数小于 3, 则匹

配结束。

[0028] 本发明的有益效果是：提出的超稀疏雷达数据的“三点法”匹配方法，实用性强、匹配正确率高，有效解决了缺少先验信息情况下空间目标多圈超稀疏雷达数据的关联匹配问题，填补了我国在超稀疏雷达多圈观测数据关联匹配方面的空白。

### 具体实施方式

[0029] 下面结合实施例对本发明进一步说明，本发明包括但不限于下述实施例。

[0030] 本发明采用“先匹配再定轨再匹配”的思想及“三点法”匹配原则，对数据进行分类、初定轨、“三点法”轨道匹配，逐级筛选目标潜在关联集，以达到数据自相关匹配的目的。

[0031] 本发明具体包括如下步骤：

[0032] 步骤一：对数据进行分类匹配，建立数据分类集。

[0033] 同一目标的两点观测数据针对某一观测站的关系有：1) 两点数据为同一个弧段，定义为第一类关联数据；2) 两点之间间隔多圈（大于一个轨道周期）后同为升轨或降轨方式的观测数据，定义为第二类关联数据；3) 两点之间间隔多圈（大于一个轨道周期）后分别为一升一降或一降一升方式的观测数据，定义为第三类关联数据。

[0034] 结合三类数据关联特性，依据以下原则对数据进行分类：

[0035] 在未关联数据点全集 {A} 中的选出任意数据点  $D_k$  (对应的观测时间为  $t(D_k)$ ，空间位置  $r(D_k)$ )，与 {A} 中任意一数据点  $D_j$  (对应的观测时间为  $t(D_j)$ ，空间位置  $r(D_j)$ ) 进行潜在关联分类。 $\Delta h$ 、 $\Delta t$ 、 $\Delta\varphi$  分别为高度、时间、角度的筛选门限 (门限大小根据轨道运动特性、计算精度、测量误差等因素综合考虑设置)。

[0036] 1) 若满足式 (1) 筛选条件，则  $D_j$  为  $D_k$  的第一类潜在关联数据，加入潜在关联集

$P_{d1}(D_k) = \{D_1^1, D_2^1, \dots, D_m^1\}$  中。

$$[0037] \quad \begin{cases} |r(D_k) - r(D_j)| \leq \Delta h \\ |t(D_k) - t(D_j) - t_\Delta| \leq \Delta t & (k \neq j, j = 1, 2, \dots, m) \\ |\varphi| \leq \Delta\varphi \end{cases} \quad (1)$$

$$[0038] \quad \text{其中, } \varphi \text{ 为 } r(D_k) \text{、} r(D_j) \text{ 夹角: } \cos \varphi = \frac{r(D_k) \cdot r(D_j)}{|r(D_k)| \cdot |r(D_j)|} \quad (2)$$

[0039]  $t_\Delta$  为从点  $r(D_k)$  到  $r(D_j)$  第一类方式下所需要的理论时间：

$$[0040] \quad t_\Delta = \frac{\cos B}{n \cdot \sin i \cdot \cos u} \cdot \varphi \quad (3)$$

[0041] (3) 式中， $\mu$  为地球引力常数， $R_e$  为地球半径， $B$  为观测站纬度，

$$[0042] \quad n \text{ 为轨道的平运动速度: } n = \sqrt{\frac{\mu}{r^3(D_k)}}$$

[0043] 纬度幅角  $u$  及轨道倾角的  $i$  则由公式 (4)、(5)、(6) 计算得出：

$$[0044] \quad \sin u = \frac{\sin B}{\sin i} \quad (4)$$



[0045]  $R(R_x, R_y, R_z)$  为  $r(D_k)$ 、 $r(D_j)$  所在轨道面的单位法向, 且

$$[0046] \quad \mathbf{R} = \frac{\mathbf{r}(D_k) \times \mathbf{r}(D_j)}{|\mathbf{r}(D_k) \times \mathbf{r}(D_j)|} \quad (5)$$

$$[0047] \quad \cos i = R_z \quad (6)$$

[0048] 2) 若满足式 (7) 筛选条件, 则为  $D_k$  的第二类潜在关联数据, 加入潜在关联集  $P_{d2}(D_k) = \{D_1^2, D_2^2, \dots, D_l^2\}$  中。

$$[0049] \quad \begin{cases} |r(D_k) - r(D_j)| \leq \Delta h \\ |t(D_k) - t(D_j) - t'_\Delta| \leq \Delta t \\ |\varphi| \leq \Delta\varphi \end{cases} \quad (k \neq j, j = 1, 2, \dots, l) \quad (7)$$

[0050]  $t'_\Delta$  为从点  $r(D_k)$  到  $r(D_j)$  第二类方式下所需要的理论时间:

$$[0051] \quad t'_\Delta = sT \quad (8)$$

$$[0052] \quad \text{其中, } T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3(D_k)}{\mu}}, \quad s = \frac{|t(D_j) - t(D_k)|}{T} \quad (s \text{ 为整数})。$$

[0053] 3) 若满足式 (9) 筛选条件, 则为  $D_k$  的第三类潜在关联数据, 加入潜在关联集  $P_{d3}(D_k) = \{D_1^3, D_2^3, \dots, D_n^3\}$  中。

$$[0054] \quad \begin{cases} \varphi + 2u \leq \pi + \Delta\varphi \\ \varphi + 2u \geq \pi - \Delta\varphi \end{cases} \quad (9)$$

[0055]  $\varphi$ 、 $u$  分别由 (2) 式、(4) 式计算得到。

[0056] 步骤二: 基准轨道根数确定

[0057] 1) 初定轨

[0058] 分别将  $D_k$  与  $P_{d1}(D_i) = \{D_1^1, D_2^1, \dots, D_m^1\}$  中每个潜在关联点进行初定轨, 得出相对应的轨道  $\sigma_{1k} (k=1, 2, \dots, m)$ , 其中,  $\sigma_{1k} = (a_{1k}, e_{1k}, i_{1k}, \Omega_{1k}, \omega_{1k}, M_{1k})^T$  (即为轨道的半长轴、偏心率、倾角、升交点赤径、近地点幅角、平近点角)。

[0059] 分别将  $D_k$  与  $P_{d3}(D_i) = \{D_1^3, D_2^3, \dots, D_n^3\}$  中每个潜在关联点进行初定轨 (由于时间跨度长, 在定轨时考虑摄动影响), 得出轨道根数  $\sigma_{3k} (k=1, 2, \dots, l)$ , 其中,

$$[0060] \quad \sigma_{3k} = (a_{3k}, e_{3k}, i_{3k}, \Omega_{3k}, \omega_{3k}, M_{3k})^T。$$

[0061] 2) 基准轨道根数选择

[0062] 若  $m \neq 0$ , 即集合  $P_{d1}(D_k) = \{D_1^1, D_2^1, \dots, D_m^1\}$  非空, 因第一类潜在关联数据集中元素最少, 分别以  $\sigma_{1k} (k=1, 2, \dots, m)$  为基准, 筛选  $\sigma_{3k} (k=1, 2, \dots, l)$ 。筛选原则如下:

$$[0063] \quad \begin{cases} |a_{1k} - a_{3j}| \leq \Delta a \\ |i_{1k} - i_{3j}| \leq \Delta i \\ |\Omega_{1k} - \Omega_{3j}| \leq \Delta \Omega \end{cases} \quad (k=1,2,\dots,m \quad j=1,2,\dots,l) \quad (10)$$

[0064]  $\Delta a$ 、 $\Delta i$ 、 $\Delta \Omega$  分别为轨道半长轴、轨道倾角、升交点赤径的筛选门限(门限大小根据轨道运动特性、定轨精度等因素综合考虑设置)。

[0065] 因 $\sigma_{3k}$  ( $k=1,2,\dots,n$ ) 轨道根数所采用的数据跨度时间长,故精度高于 $\sigma_{1k}$  ( $k=1,2,\dots,m$ )。选择 $\sigma_{3k}$ 中与 $\sigma_{1k}$ 相匹配的轨道根数作为基准轨道根数 $\sigma_{3k}^*$  ( $k=1,2,\dots,s$ )。

[0066] 若 $m=0$ ,即集合 $P_{d1}(D_k) = \{D_1^1, D_2^1, \dots, D_m^1\}$ 为空,则 $\sigma_{3k}$  ( $k=1,2,\dots,l$ )中所有轨道根数即为基准轨道根数, $\sigma_{3k}^* = \sigma_{3k}$  ( $k=1,2,\dots,l$ )。

[0067] 步骤三:第二级潜在关联集的建立。

[0068] 将所有参与基准轨道根数确定的数据点建立集合 $P_{d3}(D_l) = \{D_1^3, D_2^3, \dots, D_l^3\}$ ,即第二级潜在关联集。

[0069] 步骤四:“三点法”轨道匹配。

[0070] “三点法”是指根据轨道运动特性,若存在不同弧段的三个点(一升两降或两升一降),且两组的一升一降数据点定轨(由于时间跨度长,在定轨时考虑摄动影响)结果满足匹配原则,则定义该三个点为关联点。

[0071] 该步骤主要是依据潜在关联的两点的轨道特性,在第二类潜在关联集 $P_{d2}(D_k) = \{D_1^2, D_2^2, \dots, D_l^2\}$ 中,查找关联的第三点。

[0072] 1) “第三点”轨道的计算

[0073] 依次根据每一个基准轨道根数对应的数据点(取点 $D_k^3$ ,其中 $D_k^3 \subset P_{d13}(D_k)$ ),分别将 $D_k^3$ 与 $P_{d2}(D_k)$ 中所有点进行定轨(由于时间跨度长,在定轨时考虑摄动影响),得出轨道根数 $\sigma_{2k}$  ( $k=1,2,\dots,l$ ),

[0074] 其中, $\sigma_{2k} = (a_{2k}, e_{2k}, i_{2k}, \Omega_{2k}, \omega_{2k}, M_{2k})^T$ 。

[0075] 2) 轨道外推

[0076] 由于 $\sigma_{2k}$ 与 $\sigma_{3k}^*$ 轨道历元时间不同,无法比较。根据轨道快速外推原则,主要考虑地球非球形引力 $J_2$ 项的影响,将 $\sigma_{2k}$ (对应的历元时间 $t_{2k}$ )外推到要匹配的 $\sigma_{3k}^*$ 对应的历元时间 $t_{3k}$ 的根数 $\sigma_{2k}^*$ 。外推原理如下:

$$[0077] \left\{ \begin{array}{l} \frac{da}{dt} = 0 \\ \frac{de}{dt} = 0 \\ \frac{di}{dt} = 0 \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{3nC_{20}a_e^2}{2(1-e^2)^2 a^2} \cos i \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{3nC_{20}a_e^2}{4(1-e^2)^2 a^2} (1-5\cos^2 i) \\ \frac{dM}{dt} = n = n_0 - \frac{3n_0 C_{20} a_e^2}{4(1-e^2)^{3/2} a^2} (3\cos^2 i - 1) \end{array} \right. \quad (12)$$

[0078] 其中,  $a_e$  为地球半径,  $C_{20} = -J_2 = 0.0010826$

[0079] 3) 轨道真近点角的计算

[0080]  $E - e \sin E = M$  (13)

$$[0081] \operatorname{tg} \frac{f}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \operatorname{tg} \frac{E}{2} \quad (14)$$

[0082] 其中,  $M$  为轨道平近点角,  $E$  为偏近点角,  $f$  为真近点角,  $e$  为偏心率。

[0083] 4) “三点法”轨道匹配

[0084] “三点法”中的“三点”分别来自第一类、第二类、第三类潜在关联集中的三个数据点,由以上计算可知,轨道  $\sigma_{2k}^*$  是由第二类、第三类潜在关联集中两个数据点确定的轨道,轨道  $\sigma_{3k}^*$  是由第一类、第三类潜在关联集中两个数据点确定的轨道,且第三类潜在关联数据点为同一数据点。由三点确定的两组轨道进行匹配,匹配原则如下:

$$[0085] \left\{ \begin{array}{l} |a_{2k}^* - a_{3j}^*| \leq \Delta a \\ |i_{2k}^* - i_{3j}^*| \leq \Delta i \\ |\Omega_{2k}^* - \Omega_{3j}^*| \leq \Delta \Omega \\ |\omega_{2k}^* + f_{2k}^* - \omega_{3j}^* - f_{3j}^*| \leq \Delta f \end{array} \right. \quad (k=1,2,\dots,l \quad j=1,2,\dots,l \text{ 或 } j=1,2,\dots,x) \quad (15)$$

[0086]  $\Delta a$ 、 $\Delta i$ 、 $\Delta \Omega$ 、 $\Delta f$  分别为轨道半长轴、轨道倾角、升交点赤径、真近点角的筛选门限(门限大小根据轨道运动特性、定轨精度等因素综合考虑设置)。

[0087] 步骤五:最终关联匹配数据集的建立。

[0088] 1) 根据步骤四,将所有满足匹配原则的轨道根数  $\sigma_{3k}^*$  与  $\sigma_{2k}^*$  中所用的数据点,建立第三级潜在关联集  $P_{d123}(D_k) = \{D_1, D_2, \dots, D_x\}$ , 则  $P_{d123}$  为  $D_k$  的最终关联匹配数据集  $\{P(D_k)\}$ 。

[0089] 2) 令  $\{A\} = \{A\} - \{P(D_k)\}$ , 重复步骤一,进行其它数据点的关联匹配,若  $\{A\}$  中数据元素个数小于3,则匹配结束。

[0090] 以某一观测站的数据为例:

[0091] 设定某一观测站的位置,给定5000多个空间目标的瞬时轨道数据,利用精密轨道外推模型进行外推2天,每个观测弧段获取两点数据,两点数据时间间隔为20秒左右,生成

测站坐标系下的测量数据(测距、方位角、俯仰角),加入一定的随机差和系统差(测距:随机差50m,系统差20m;方位角和俯仰角:随机差0.01°,系统差0.01°)。

[0092] 观测站位置如表1:

[0093] 表1 测站的大地坐标系位置

[0094]

大地经度(度)	大地纬度(度)	大地高度(米)
107.5	25.0	500.0

[0095] 仿真观测数据如下:

目标编号	时间	测距(米)	方位角(度)	俯仰角(度)
3577	2010 12 7 2 51 21.05166	937947.7787	263.61517	55.03554
5080	2010 12 6 0 26 21.05181	1448723.179	91.00146	29.81044
5061	2010 12 7 4 11 21.05342	1504544.289	91.05343	31.11453
5033	2010 12 7 12 47 21.05415	986137.8406	78.08694	65.70274
1229	2010 12 7 22 30 21.05585	685753.8024	280.49441	63.81401
[0096] 2701	2010 12 6 18 32 21.05646	1412949.328	89.78757	21.18967
1584	2010 12 6 18 42 25.46187	1109476.951	92.90282	40.09745
3615	2010 12 7 15 43 21.05731	964310.6579	265.42019	48.46222
207	2010 12 6 5 24 21.0602	740106.4118	275.92777	43.10057
383	2010 12 6 6 35 21.06047	595924.9109	149.16734	84.23374
3386	2010 12 6 18 22 21.06225	896498.9454	276.02749	43.74187
4992	2010 12 6 5 32 21.06235	1112743.983	265.58801	47.67026
	... ..			

[0097] 数据总点数65312,并将所有数据按照时间点进行排序。

[0098] 其中,编号为1584目标的2天内所有数据点如表2,并以1584目标的第一点(序号1)为参考点,以查找与其关联的匹配数据点。

[0099] 表2 编号为1584的目标2天内的数据点

[0100]

目标编号	序号	时间	测距(米)	方位角(度)	俯仰角(度)
1584	1	2010-12-6 6:24:59.562	885619.304	97.432	58.355
1584	2	2010-12-6 6:25:17.698	871125.335	80.337	60.261
1584	3	2010-12-6 18:42:7.487	1127873.662	84.039	9.098
1584	4	2010-12-6 18:42:25.461	1109476.951	92.902	40.097
1584	5	2010-12-7 7:27:19.123	1453176.950	269.509	26.594
1584	6	2010-12-7 7:27:37.266	1473215.146	275.407	25.997
1584	7	2010-12-7 19:44:26.659	1131971.385	275.980	38.880
1585	8	2010-12-7 19:44:44.625	1155733.717	267.562	37.644

[0101] 关联匹配计算步骤如下:

[0102] 1) 根据步骤一,对所有数据进行粗匹配分类。

[0103] 为了提高分类速度,首先将所有数据按照第一类的分类条件,进行同弧段确认。设 $D_k=1584$ 的第一个时间点的数据

[0104] 分类结果如下:

[0105] 第一类 $P_{d1}(D_k)$ 的潜在关联集为:

[0106] 表3 编号为1584的目标第一类潜在关联集

[0107]

目标编号	时间	测距(米)	方位角(度)	俯仰角(度)
1584	2010-12-6 6:24:59.562	885619.304	97.432	58.355
1584	2010-12-6 6:25:17.698	871125.335	80.337	60.261
总点数	2			

[0108] 第二类 $P_{d2}(D_k)$ 的潜在关联集为:

[0109] 表4 编号为1584的目标第二类潜在关联集

[0110]

目标编号	时间	测距(米)	方位角(度)	俯仰角(度)
3708 (2)	2010-12-7 6:55:23.375	894185.009	81.817	54.348
4980 (2)	2010-12-7 7:0:52.289	1114822.028	268.360	31.898
4718 (2)	2010-12-7 7:1:29.932	1146499.344	94.250	47.226
3148 (2)	2010-12-7 7:25:48.716	834789.653	114.068	78.150
1584 (2)	2010-12-7 7:27:19.124	1453176.951	269.509	26.595
...	...	...	...	...
总点数	28 (14 个弧段)			

[0111] 第三类 $P_{d3}(D_k)$ 的潜在关联集为:

[0112] 表5 编号为1584的目标第三类潜在关联集

[0113]

目标编号	时间	测距(米)	方位角(度)	俯仰角(度)
4519 (2)	2010-12-6 16:54:50.938	663927.166	98.157	60.550
111 (2)	2010-12-6 17:33:41.106	499118.764	294.616	78.298
...	...	...	...	...
1584 (2)	2010-12-6 18:42:7.488	1127873.663	84.040	39.099
2623 (2)	2010-12-7 19:43:36.365	1214161.597	275.853	36.625
1584 (2)	2010-12-7 19:44:26.660	1131971.385	275.981	38.880
...	...	...	...	...
总点数	840 (420 个弧段)			

[0114] 2) 根据步骤二,基准轨道确定:

[0115] 第一类 $P_{d1}(D_k)$ 初定轨结果为:

[0116] 表6 编号为1584的目标第一类初定轨结果

[0117]

历元时间(北京时)	a(米)	e	i(°)	$\Omega$ (°)	$\omega$ (°)	M(°)
-----------	------	---	------	--------------	--------------	------

2010-12-6 6:24:59.56201	7142267.300	0.00080492664	98.574	286.536	276.490	108.032
-------------------------	-------------	---------------	--------	---------	---------	---------

[0118] 考虑到定轨精度及提高运算速度,在 $P_{d3}(D_k)$ 中只计算时间跨度在1天内的数据点定轨,根据 $D_k=1584(1)$ 与 $P_{d3}(D_k)$ 定轨结果与 $P_{d1}(D_k)$ 匹配,得出9个基准轨道根别如下:

[0119] 表7 编号为1584的目标基准轨道

[0120]

参与定轨的目标编号	序号	历元时间(北京时间)	$a$ (米)	$e$	$i$ (°)	$\Omega$ (°)	$\omega$ (°)	$M$ (°)
1458(2)	1	2010-12-6 6:24:59.562	7004990.559	0.05200741	98.534	286.518	269.439	109.685
4531(2)	2	2010-12-6 6:24:59.562	7044508.296	0.04155658	98.132	286.332	272.477	107.639
4759(2)	3	2010-12-6 6:24:59.562	7040467.812	0.06373209	98.584	286.541	277.734	99.794
1824(2)	4	2010-12-6 6:24:59.562	7057336.225	0.03144211	99.121	286.790	269.997	111.345
881(2)	5	2010-12-6 6:24:59.562	7073175.186	0.01202049	98.453	286.480	237.752	146.090
4326(2)	6	2010-12-6 6:24:59.562	7100859.554	0.02987324	97.968	286.256	127.989	259.927
713(2)	7	2010-12-6 6:24:59.562	7139250.744	0.02878270	99.302	286.874	117.650	270.310
3085(2)	8	2010-12-6 6:24:59.562	7137889.484	0.00277531	98.004	286.273	276.299	107.970
1584(2)	9	2010-12-6 6:24:59.562	7144285.812	0.00095223	98.469	286.488	112.681	272.031

[0121] 3) 根据步骤三,第二级潜在关联集的建立

[0122] 根据表7中基准轨道所采用的数据点(18点),建立第二级潜在关联集 $P_{d13}(D_k)$

[0123] 4) 根据步骤四,根据“三点法”进行轨道匹配

[0124] 分别根据基准轨道在 $P_{d2}(D_k)$ 中寻找第三点,计算得知,表7中只有第9组找到匹配的第三点,即表4中目标编号为1584的数据。轨道匹配结果如下:

[0125] 表8 “三点法”轨道匹配结果

[0126]

历元时间(北京时间)	$a$ (米)	$e$	$i$ (°)	$\Omega$ (°)	$\omega$ (°)	$M$ (°)

[0127]

基准轨道	2010-12-6 6:24:59.56201	7144285.812	0.00095223	98.469	286.488	112.681	272.031
与第三点确定的轨道	2010-12-6 18:42:7.488	7144020.38571	0.00086137	98.46095	287.00616	107.57933	46.62845

[0128] 再将表8中的第二组轨道作为基准轨道,在 $P_{d3}(D_k)$ 中大于1天的数据中查找第三点,找到另一组数据点,即表5中数据时间点为2010-12-7 19:44:26.660的1584数据。

[0129] 5) 根据步骤四的结果,得到1584的数据匹配结果如表9:

[0130] 表9 关联匹配结果

[0131]

目标编号	序号	时间	测距(米)	方位角(度)	俯仰角(度)
1584	1	2010-12-6 6:24:59.562	885619.304	97.432	58.355
1584	2	2010-12-6 6:25:17.698	871125.335	80.337	60.261
1584	3	2010-12-6 18:42:7.487	1127873.662	84.039	9.098
1584	4	2010-12-6 18:42:25.461	1109476.951	92.902	40.097
1584	5	2010-12-7 7:27:19.123	1453176.950	269.509	26.594
1584	6	2010-12-7 7:27:37.266	1473215.146	275.407	25.997
1584	7	2010-12-7 19:44:26.659	1131971.385	275.980	38.880
1584	8	2010-12-7 19:44:44.625	1155733.717	267.562	37.644

[0132] 由此可见,表9与表2结果完全一致,匹配正确率为100%。

[0133] 为了验证方法的实用性,并通过实测数据进一步验证。利用某一个观测站2天内获取的部分测量数据,在每一个观测弧段内挑选2点数据(包括测距、测角且位置夹角10度左右),将挑选出的数据混合一起。计算过程同仿真数据。

[0134] 总的统计结果如表10:

[0135] 表10 关联匹配统计结果

[0136]

数据类型	总点数	总弧段数	关联匹配正确数	关联匹配正确率
仿真数据	65312	32656	62702	96.0%
实测数据	1532	766	1397	91.2%