

单星多普勒定位系统仿真与性能分析*

宋叶志¹, 胡小工¹, 黄勇¹, 王群仰²

(1. 中国科学院上海天文台·上海·200030; 2. 中国空间技术研究院·北京·100094)

摘要:给出了单星多普勒定位系统单目标定位基本原理以及系统多目标定位的数据处理方法。由于单星系统定位资料较为稀疏且空间几何条件较差,提出采用高程约束辅助定位方法。采用地面测试系统进行半物理仿真,对通过随机方法产生的全球分布的 500 个目标进行解算,系统耗时 10 h 左右,仿真结果表明:当对卫星轨道高度为 840.053 km 时,有效定位率在 98.6% 以上;当轨道高度为 499.226 km 时,有效定位率在 96.4% 以上。证实了解算方法的有效性。

关键词:单星多普勒定位;海洋科学;浮标监测;高程约束辅助定位

中图分类号:V19;P207

文献标志码:A

文章编号:1674-5620(2013)01-0084-05

DOI:10.7642/j.issn.1674-5620.2013-01-0084-05

Simulation and Performance Analysis of Single Satellite Doppler Positioning System

SONG Yezhi¹, HU Xiaogong¹, HUANG Yong¹, WANG Qunyang²

(1. Shanghai Astronomical Observatory, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030;

2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094)

Abstract: Data processing method is presented for multi-target positioning following introduction of the principle of single-target positioning of single-satellite Doppler positioning system. Altitude restriction assisted positioning method is proposed because of lack of observation data for single-satellite system positioning and poor spatial geometry. Hardware-in-the-loop simulation is performed with the ground test system and 500 globally distributed targets generated with a random method are computed in a run of 10 hours. The results show that the effective positioning rate is higher than 98.60% when satellite orbit is 840.053km and 96.40% when satellite orbit is 499.226km, validating the proposed method.

Keywords: single satellite Doppler positioning; marine science; buoy monitoring; altitude restriction assisted positioning

0 引言

近几十年来,地球的自然环境日益恶化,极端自然灾害频繁发生,利用空间技术对地球进行多角度监测已经是人类认识地球环境的重要途径。这是过去二三十年空间技术的一个重要研究领域,未来相当长一段时间内也必然如此。

国外在利用空间技术监测地球环境领域开展的许多工作要早于国内。其中不得不提到著名的 Argos 系统,该系统是由 CNES(法国航天局)、NASA

(美国航空航天局)和 NOAA(美国国家海洋与大气管理局)于 1978 年联合发起并建立的研究项目^[1]。截至目前,全球已经有近 2 万个用户设备平台处于工作状态,用于全球监测、海洋地形信息采集、海洋生物跟踪等。

目前我国也十分重视空间技术在环境监测与科学研究方面的应用,一些新的空间项目计划向科学及民生应用方面倾斜的力度也在加大。单星多普勒定位系统即是我国近年开展的用于海洋浮标监测的

* 收稿日期:2012-08-31;修回日期:2012-12-10;网络出版时间:2013-02-18 15:46:17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4230.TV.20130218.1546.006.html>

基金项目:国家自然科学基金(11073047,11173049);上海市导航实验室开放课题(Y224353002);上海市科学技术委员会(06DZ22101)

第一作者简介:宋叶志(1981-),男,硕士,助理研究员,主要从事卫星轨道理论与数据处理研究;E-mail:song.yz@foxmail.com

一项空间计划, 本文以此为基础展开一些数据处理方法的研究。在数据处理工作中, 只有先对目标进行有效定位, 获得地球表面(含陆地和海洋)相关物理参数才有实用价值, 这也是本文的主要研究内容。

单星多普勒定位系统采用主动式通信方式, 由浮标每隔一定的间隔向空间发射电磁波, 当卫星过顶时, 发射的电磁信号就有可能被星载数据采集系统接收到。卫星上装有 GPS(全球定位系统)接收机和下行链路发射器, 每接收到 1 组新的电磁信号, 发射器即抽取 1 组 GPS 数据与之合并为 1 帧发送给地面数据处理中心进行数据处理。

卫星相对于浮标有相对运动, 故由浮标发射的电磁信号将产生频移, 数据处理部分正是基于此频移对浮标进行位置解算。以上系统中, 浮标的发射频率也是未知的, 故需在数据处理的同时把浮标发射频率也解算出来。

1 多普勒定位原理

1.1 基本定位方法

频率定位的基本方程为

$$f_r = f_g \left[1 - \frac{v_{sx}(x_s - x_u) + v_{sy}(y_s - y_u) + v_{sz}(z_s - z_u)}{c \sqrt{(x_s - x_u)^2 + (y_s - y_u)^2 + (z_s - z_u)^2}} \right] + \epsilon \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial F}{\partial X^T} \right)_{i1} = \frac{f_g}{c} \frac{v_{sx} \sqrt{(x_s - x_u)^2 + (y_s - y_u)^2 + (z_s - z_u)^2} - v_{sx}(x_u - x_s) + v_{sy}(y_u - y_s) + v_{sz}(z_u - z_s)}{(x_s - x_u)^2 + (y_s - y_u)^2 + (z_s - z_u)^2} (x_u - x_s)$$

$$\left(\frac{\partial F}{\partial X^T} \right)_{i2} = \frac{f_g}{c} \frac{v_{sy} \sqrt{(x_s - x_u)^2 + (y_s - y_u)^2 + (z_s - z_u)^2} - v_{sy}(x_u - x_s) + v_{sy}(y_u - y_s) + v_{sz}(z_u - z_s)}{(x_s - x_u)^2 + (y_s - y_u)^2 + (z_s - z_u)^2} (y_u - y_s)$$

$$\left(\frac{\partial F}{\partial X^T} \right)_{i3} = \frac{f_g}{c} \frac{v_{sz} \sqrt{(x_s - x_u)^2 + (y_s - y_u)^2 + (z_s - z_u)^2} - v_{sz}(x_u - x_s) + v_{sy}(y_u - y_s) + v_{sz}(z_u - z_s)}{(x_s - x_u)^2 + (y_s - y_u)^2 + (z_s - z_u)^2} (z_u - z_s)$$

$$\left(\frac{\partial F}{\partial X^T} \right)_{i4} = 1 + \frac{v_{sx}(x_u - x_s) + v_{sy}(y_u - y_s) + v_{sz}(z_u - z_s)}{c \sqrt{(x_s - x_u)^2 + (y_s - y_u)^2 + (z_s - z_u)^2}}$$

在定位过程中, 卫星的位置和速度由 GPS 数据定轨实现。通常情况下信号接收时刻与 GPS 离散轨道不吻合, 这时可以采用插值方法计算离散的卫星位置、速度信息。

1.2 约束条件的使用

在测量资料不是很充足的情况下, 若辅助以约束条件, 可以改善参数估计效果。实际应用时, 约束可以采用数字高程甚至是参考椭球体对定位目标进行约束求解。本系统中, 由于只有 1 颗卫星进行导航定位, 且轨道高度较低, 过顶弧段较短, 资料尤为稀少, 这时约束条件就显得十分必要。下面给出约

束条件下的求解方法。其中 f_r 为卫星接收到的信号; f_g 为浮标发射的信号; c 为光速; $[x_s, y_s, z_s]^T$ 为卫星在地固坐标系中的位置; $[v_{sx}, v_{sy}, v_{sz}]^T$ 为卫星在地固坐标系下的速度; $[x_u, y_u, z_u]^T$ 为浮标在地固坐标系下的位置; ϵ 为系统噪声与测量噪声。

多普勒测量实际上是通过累积多普勒的周记数实现的, 在物理量上反映了平均距离变化率, 数学上表现为信号间隔时间内斜距的差商, 相当于时序差分, 由此便消去了大部分的系统误差。如果周记数时间间隔很短, 则称为瞬时多普勒。因为高频多普勒不易直接测量, 故而一般采用混频方法实现, 实施定位时, 可以先对数据进行预处理。本文中将周记数转换为接收频率, 方法如下

$$f_0 = \frac{N}{2^{32}} \times 27 \times 10^6$$

$$f_g = 401.65 \text{ MHz} + (f_0 - 80 \text{ kHz})$$

前面已经提及式(1)中待估计参数为浮标位置与发射频率。定位方法与一般定位系统无本质差异, 即对线性化测量方程采用某种最优估计方法(如最小二乘估计)不断改进, 直至满足精度需求。

测量量理论函数对待估参数的偏导数矩阵为

束条件下的求解方法。

记测量方程偏导数矩阵 $A = \frac{\partial F}{\partial X^T}$ 。在 $G(X) = b$

非线性约束下, 对约束方程线性化

$$b - G(X) = \frac{\partial G}{\partial X^T} \Delta X$$

记 $a = b - G(X)$, $H = \frac{\partial G}{\partial X^T}$ 。对于精度不等的情

况下, 采用高斯-马尔科夫估计, 则有

$$\Delta X_u = \Delta X - (A^T P^{-1} A)^{-1} H^T [H(A^T P^{-1} A)^{-1} H^T]^{-1} \cdot (H \Delta X - a)$$

相应的协方差阵为

$$P = \{I - (A^T P^{-1} A)^{-1} H^T [H(A^T P^{-1} A)^{-1} H^T]^{-1} H\} \cdot (A^T P^{-1} A)^{-1}$$

计算时采用约束来不断校正估计结果,在测量数据不充足时约束显得很重要。在实际计算时,一般不宜按公式直接求解,而是形成增广线性化方程

$$\begin{bmatrix} A^T A & H^T \\ H & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T (f_g - F(X)) \\ b - G(X) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中,系数矩阵为对称正定矩阵,可以采用不开平方的 Cholesky 分解方法进行解算^[2-3]。

1.3 初值条件的选取

在定位时,目标位置的初值完全未知,所以需要一种较为合理的初值选取方法。在 GPS 等卫星定位中,由于非线性方程的微分几何性质良好,所以在较大范围内选取初值都是可以收敛的。但是对于一般的非线性系统,不能任意选取初值。如在 Argos 系统中,有学者构造了一些几何方法用于初值选取^[4]。实际上,对于复杂的非线性系统,由解析几何的方法进行初值选取往往是很困难的,本文提出采用数学方法拓展收敛域。下面简要介绍数值延拓方法的基本思想。

2 个拓扑流形 M 与 N 间有 2 个连续映射 f 与 g

$$f, g: M \rightarrow N$$

假设存在 1 簇连续映射

$$\begin{aligned} H: M \times [0, 1] &\rightarrow N \\ x, t &\rightarrow H(x, t) \end{aligned}$$

如果 $H(x, t)$ 中参数 t 由 0 连续的变化到 1 时,有

$$H(x, 0) = f(x), \quad H(x, 1) = g(x)$$

使映射 f 连续变为 g , 则称此连续映射 f 与 g 同伦。

对于适定的非线性方程组

$$F(x) = 0 \quad (3)$$

可以构造映射 $H(x, t): D \times [0, 1] \subset R^{n+1} \rightarrow R^n$, 使之满足条件

$$H(x, 0) = F_0(x), \quad H(x, 1) = F(x), \quad \forall x \in D \quad (4)$$

$$\begin{cases} x^{i,j+1} = x^{i,j} - \{ [H_x(x^{i,j}, t_i)]^T H_x(x^{i,j}, t_i) \}^{-1} [H_x(x^{i,j}, t_i)]^T H(x^{i,j}, t_i) \\ x^{1,0} = x^0, x^{i+1,0} = x^{i,m_i} \\ x^{k+1} = x^k - \{ [H_x(x^k, 1)]^T H_x(x^k, 1) \}^{-1} [H_x(x^k, 1)]^T H(x^k, 1) \\ x^N = x^{N,0} \\ j = 0, 1, \dots, m_j - 1, \quad i = 1, 2, \dots, N - 1, \quad k = N, N + 1, \dots \end{cases}$$

上述计算方法是 1 种大范围收敛方法,第 1 式利用延拓法求出 $x(1)$ 的 1 个足够好的近似,使之进入高斯-牛顿法的收敛域,从而保证后续计算收敛。

如果方程组

$$H(x, t) = 0, \quad t \in [0, 1] \quad (5)$$

有解 $x = x(t), x: [0, 1] \rightarrow R^n$ 连续依赖于 t , 当 $t = 1$ 时,即为式(3)的解,此即构造了同伦映射,把原方程的求解问题转化为求同伦方程(5)的解。

关于式(5),解的曲线 $x = x(t)$ 的存在性可以针对特殊情形给出如下的定理。

设映射 $F: D \subset R^n \rightarrow R^n$ 在 D 上连续可导,假定存在一个开球 $S = S(x^0, r) \subset D$, 使 $\forall x \in S, \|F'(x)^{-1}\| \leq \beta$ 成立,其中 $r \geq \beta \|F(x^0)\|$, 则方程

$$F(x) = (1-t)F(x^0), \quad t \in [0, 1], x \in S$$

存在唯一的解 $x: [0, 1] \rightarrow S \subset R^n$, 且 $x(t)$ 连续可导并满足常微分方程初值问题

$$\begin{cases} x'(t) = -[F'(x(t))]^{-1} F(x^0), & \forall t \in [0, 1] \\ x(0) = x^0 \end{cases}$$

上述定理表明同伦方程

$$H(x, t) = F(x) + (t-1)F(x^0) = 0 \quad (6)$$

存在唯一的解。除了上面给出的同伦之外,还可以构造其他一些形式的同伦方程,这里不多作介绍。

数值延拓法是计算同伦方程的一种有效算法,目前相关文献中一般也是处理适定方程组。本文对这一方法作了推广,用以处理大范围收敛的非线性回归问题。

设 $H(x, t): D \times [0, 1] \subset R^{n+1} \rightarrow R^n$ 是满足式(4)的已知同伦,可以将区间 $[0, 1]$ 划分为 N 等份,记

$$t_i = \frac{i}{N}, i = 1, \dots, N - 1$$

用某种迭代法(如牛顿法、拟牛顿法等)求方程组

$$H(x, t_i) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

的解 x^i 时,如果 $t_i - t_{i-1}$ 充分小,则可以期望 x^{i-1} 是 x^i 的一个足够好的近似,从而使迭代法收敛。在计算第 i 个超定非线性方程组时,可以采用高斯-牛顿法进行计算,由此得到数值延拓法序列

在实际计算中,选择一定的同伦映射后可以对上面的计算方法作进一步简化。如果同伦映射取式(6), $m_j \equiv 1$, 则大范围的高斯-牛顿序列简化为

$$\begin{cases} \mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k - [\mathbf{F}_x(\mathbf{x}^k)^T \mathbf{F}_x(\mathbf{x}^k)]^{-1} \mathbf{F}_x(\mathbf{x}^k)^T [\mathbf{F}(\mathbf{x}^k) + \left(\frac{k}{N} - 1\right) \mathbf{F}(\mathbf{x}^0)], & k = 0, 1, \dots, N-1 \\ \mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k - [\mathbf{F}_x(\mathbf{x}^k)^T \mathbf{F}_x(\mathbf{x}^k)]^{-1} \mathbf{F}_x(\mathbf{x}^k)^T \mathbf{F}(\mathbf{x}^k), & k = N, N+1, \dots \end{cases} \quad (7)$$

一般而言,通常用式(7)第 1 式获得迭代初值,所以 N 不必取很大。

需要说明的是,非线性方程的初值问题是一个数学难题,目前还没有根本上解决^[5]。本节提出的方法也仅仅是扩大收敛域的一种有效方法,并不能表示从根本上解决非线性方程组的收敛域问题。

针对本文的具体情况,由于卫星轨道高度并不是很高,解算同伦方程的起点选择该目标测量资料获得时刻卫星星下点的平均,继而进行数值延拓。按照以上策略,在试验的 500 个目标定位解算中,未出现因为初值选取不当造成定位失败的情形。

2 半物理仿真

由于目前没有卫星,只能通过地面系统进行算法验证。验证方法是将一台计算机与数据发射系统进行连接,由计算机采用随机方法生成全球分布的浮标,并用动力学模型外推生成“实时”卫星轨道及多普勒测量数据,对卫星轨道的位置加噪声作为 GPS 接收机测量值,把 GPS 测量值和多普勒测量数据通过数据发射平台以电磁信号发射出去。数据采集系统与另一台计算机终端链接,数据采集系统接收到数据发射平台的信息,把数据信号通过串口发送到计算机上,计算机对数据进行解码预处理,进而对数据按照上一节的多目标定位方法进行数据处理。半物理仿真试验流程如图 1 所示。

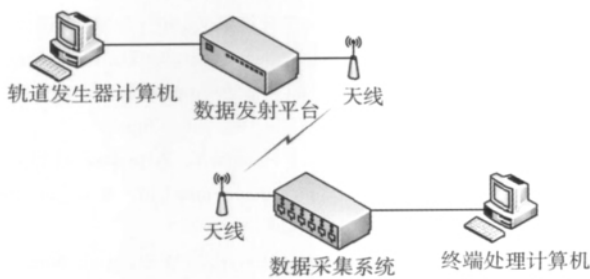


图 1 半物理仿真流程图

Fig. 1 Flowchart of hardware-in-the-loop simulation

GPS 数据每 2 s 获取 1 次,多普勒数据则在卫星过顶可视弧段内随机接收到(系统仿真中天线张角取 60°),二者不同步。

每获得新的多普勒数据,系统就从资料中按顺序抽取 GPS 资料,二者加其他一些信息合并为 1 帧发送。

3 空间段及地面目标生成

在试验中,分别选择 840.053 km 及 499.226 km 卫星轨道高度作为轨道指标进行数值法外推。本文主要考虑地球非球形引力、日月引力摄动、大气摄动、光压、地球潮汐形变引起的摄动。

为同时验证信号发射平台、数据采集系统以及定位算法的有效性,试验时对轨道高度为 840.053 km 的卫星,拷机从 2011-08-16T 13:00:52.000(UTC,世界协调时)起,至 2011-08-17T 10:06:22.000(UTC)结束,共 21.103 9 h。对轨道高度为 499.226 km 的卫星,拷机从 2011-08-16T 12:00:00.000(UTC)起,至 2011-08-17T 01:44:46.000(UTC)结束,共 13.76 h。

浮标系统采用蒙特卡洛方法在地球表面随机生成 500 个目标。

4 定位性能与误差统计分析

4.1 轨道高度为 840.053 km 全球分布目标定位性能统计

半物理仿真中,轨道高度取 840.053 km,拷机时间按第 3 节所述,对全球分布的 500 个目标进行定位,并对其定位结果进行了分析。有效定位目标数分布区间如表 1 所示,有效定位率为 98.60%。

表 1 有效定位目标区间分布 ($H=840.053$ km)

Tab. 1 Number of targets in different intervals ($H=840.053$ km)

范围误差	目标数/个
0~1 km	22
1~5 km	375
5~10 km	78
10~100 km	18
>100 km	7

4.2 轨道高度为 499.226 km 全球分布目标定位性能统计

半物理仿真中,轨道高度取 499.226 km,拷机

时间按第 3 节所述,对全球分布的 500 个目标进行定位。有效定位目标数区间分布如表 2 所示。

表 2 有效定位目标区间分布($H=499.226$ km)

Tab. 2 Number of targets in different intervals ($H=499.226$ km)

范围误差	目标数/个
0~1 km	6
1~5 km	152
5~10 km	228
10~100 km	96
>100 km	18

4.3 定位性能分析

通过 10 h 以上弧段的覆盖,对于 2 种轨道高度有效定位率基本都在 96% 以上。轨道高度高者,定位性能更优一些,原因在于轨道高度越高过顶弧段越长,星地几何条件越好。因此,轨道高度为 840.053 km 的轨道比 499.226 km 的轨道可视范围大很多。相比于 840.053 km 轨道,499.226 km 的轨道在相同的轨道弧段(这里指相同的真近点角变化范围内弧段,而非相同的时间长度)内有较多定位盲区。对定位而言,有些区域虽不是盲区,但如果仅仅能观测到 1~2 次,依然不能实现定位。

数据采集系统有硬件延时,而硬件设计时没有给出标称值,通过数值试验方法得到约有 1 000 ms 的时间延迟,这个值还是比较大的,对于 2 个轨道高度都有相当结果。亦即对上面 2 种结果,时标后移 1 000 ms 是较好的结果。在所做的数据处理中,还通过扫描(0~2 000 ms)的方式给出了时延不同情况下的定位结果。因此最优或近似最优的延时值不是通过分析硬件指标给出的,而是通过数值试验给出的。如果是不同的数据采集系统,可能这个时延值是不同的,分别需要试验标定。

由测量方程待估计的量为浮标位置及浮标发射频率,共 4 个参数。理论上,只要有 4 次测量资料,即可实现对浮标定位,少于 4 个测量数据则不行。如加上约束条件,即把浮标约束在地球表面(无论是函数模型还是数字高程模型),则理论上 3 次测量即可以实现浮标的有效定位。对于数据较多的情况,可以求得某种准则下的最优解(如最小二乘解)。实际定位时,不能仅仅将测量资料数量作为指标。而

是应该以偏导数矩阵的转置乘以偏导数矩阵,将得到矩阵(法矩阵)的条件数作为定位条件指标。如果矩阵条件数很差,即便测量次数很多,定位结果依然不可靠。上述条件数,即为偏导数矩阵列向量的相关性问题,如果偏导数列向量接近相关,则定位结果不可靠。在空间几何上,指浮标接收到信号的不同时刻卫星在空间的几何分布条件。几何条件较差者,定位结果对误差敏感,甚至出现定位失败情形。

5 结 论

本文给出了单星多普勒定位的详细算法,以及利用约束条件进行定位的方法。在验证多目标定位方法的同时,还验证了数据发射平台以及数据采集系统的设计在一定程度上是可靠的。

从第 4 节可以看到本文的计算精度还是偏低,当然精度不是数值软件设计可以单独决定的。目前,系统精度较低的最大原因来源于信号发射系统与数据采集系统。采用该卫星与地面浮标参数,如果不经信号发射系统与数据采集系统,对于 0.01 Hz 的测量噪声,通过大量仿真,精度大约可以达到米级。

我国有漫长的海岸线和广阔的海域,迫切需要对海洋有更多的认识。以往国内的很多海洋科学数据都依靠国外的卫星服务平台,近些年国内已经逐步展开了许多有价值研究工作,局面已有所改善。

参考文献(References)

- [1] Hofman-Wellenhof B, Lichtenegger H, Wasle E. GNSS-Global navigation satellite systems [M]. New York: Springer-Verlag, 2008:404-406.
- [2] Tapley B D, Schutz B E, Born G H. Statistical orbit determination[M]. Elsevier Inc., 2004:288-290.
- [3] 宋叶志,徐导,何峰. C# 科学计算讲义[M]. 北京:人民邮电出版社,2012:127-133. (Song Yezhi, Xu Dao, He Feng. Scientific computing in C# [M]. Beijing: Posts & Telecommunications Press, 2012:127-133.)(In Chinese)
- [4] Aksnes K, Andersen P H, Haugen E. A precise multipass method for satellite doppler positioning[J]. Celestial Mechanics, 1988(44): 317-338.
- [5] Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T, et al. Numerical recipes[M]. 3rd Edition. New York: Cambridge University Press, 2007: 477-486.

(责任编辑:吴丽娟)