DOI:10.19789/j.1004-9398.2022.06.007
文献引用:常占强,刘家喜,钱淑君,等.一种GNSS测码伪距绝对定位求解方法[J].首都师范大学学报(自然科学版),2022,43(6):46-49+57.
CHANG Z Q,LIU J X,QIAN S J,et al. A novel solution method for absolute GNSS positioning with code pseudo-range [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition),2022,43(6):46-49+57.

一种GNSS测码伪距绝对定位求解方法*

常占强[1,2**],刘家喜[1,2],钱淑君[3],张妍欣[1,2],郑浩鑫[1,2]

(1.首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048;2.三维信息获取与应用教育部重点实验室,北京 100048;3.山东省第四地质矿产勘查院,山东 潍坊 261021)

摘要:全球卫星导航系统(GNSS)具有为全球提供定位、导航、授时服务的强大功能.其中,GNSS测码伪距绝对定位技术仅需一台接收机就能实现快速定位导航,广泛应用于军事、车舰导航以及测绘和地学领域.当前GNSS测码伪距绝对定位有常规经典法和求差法2种解算方法,前者须预知GNSS接收机的初始概略坐标值才能进行结算,而后者则需增加接收导航卫星信号才能对实现绝对定位.本文提出了一种无需GNSS接收机初始概略坐标,仅需接收处理4颗GNSS卫星信号就能精确获取接收机三维坐标的测码伪距绝对定位求解方法,显著提高了GNSS测码伪距单点定位性能并拓展了其应用区域,最后通过实际算例验证了本方法的精确性与鲁棒性.

关键词:GNSS绝对定位;初始概略坐标;泰勒级数展开;迭代求解;级数发散
中图分类号:P228

A novel solution method for absolute GNSS positioning with code pseudo-range*

CHANG Zhanqiang[1,2**],LIU Jiaxi[1,2],QIAN Shujun[3],ZHANG Yanxin[1,2],ZHENG Haoxin[1,2]

(1.College of Resource Environment and Tourism,Capital Normal University;2.Key Lab of 3D Information Acquisition and Application,Beijing 100048;3.Shandong No.4 Institute of Geological and Mineral Survey,Weifang Shandong 261021)

Abstract:The global navigation satellite system(GNSS) provides unprecedented potential for precise ground and space based positioning,navigation and timing almost anywhere in the world. The absolute GNSS positioning with code pseudo range can rapidly implement positioning and navigation with just one GNSS receiver. Accordingly,it has been widely applied in many fields,such as military actions,vehicle navigation,surveying and mapping. At present,there are two algorithms:the conventional and the differentiating algorithms. The former needs the initial approximate coordinates of the GNNS receiver for solution;while one additional GNSS satellite signal has to be tracked and handled with for the latter. In this paper,we proposed a novel absolute positioning method,which can accurately obtain the three-dimensional coordinates of GNSS receiver only by processing the signals of four GNSS satellites without initial approximate coordinates of the GNSS receiver. Finally,the accuracy and

收稿日期:2021-12-21
* 国家自然科学基金面上项目(41874059)
** 通信作者:changkkll@sina.com

robustness of the proposed method have been verified with the experimental results. Accordingly, the application area of GNSS absolute GNSS positioning can be expanded by using this method.

Keywords: absolute GNSS positioning; initial approximate coordinates; Taylor series expansion; iterative solution; series divergence

CLC: P228

0　引　言

全球卫星导航系统（global navigation satellite system，GNSS）泛指中国的北斗（Beidu）、美国的GPS（global positioning system）、俄罗斯的GLONASS（global navigation satellite system）和欧洲的伽利略（Galileo satellite navigation system）. 现今，GNSS定位导航功能不仅广泛应用于军事、测绘、公安交通、数字测图、精细农林业及土地资源调查与勘测等领域[1-9]，并已渗透到人类日常生活中，如旅游、野外探险等. 其中，GNSS测码伪距绝对定位仅用一台接收机不需要进行差分处理就可实现全球快速定位导航，在军事、公安交通、车辆舰船定位导航、精细农林业、土地资源调查与勘测等领域中发挥着重要作用. 尤其是精确单点定位技术（precise point positioning，PPP）定位精度可达厘米级，受到了越来越广泛的关注[10-21]. 当前，GNSS测码伪距绝对定位坐标解算方法有常规经典算法和求差法2种[22-26]：常规经典法同时接收处理4颗GNSS卫星信号即可实现定位，但需要GNSS接收机初始概略坐标值，再用泰勒级数展开将伪距观测方程线性化；求差法不需GNSS接收机初始概略坐标值，但需多接收处理1颗GNSS卫星信号才能实现定位，在一定程度上限制了GNSS的定位区域，特别是在地形复杂的山区峡谷地带和森林茂密地区等GNSS卫星信号接收困难区. 本文将在对2种方法进行系统分析的基础上，提出一种改进的测码伪距绝对定位处理方法，并用实例对其进行验证.

1　GNSS测码伪距绝对定位算法分析

1.1　常规经典算法

GNSS测码伪距定位是依据GNSS卫星坐标和测码伪距为已知量建立观测方程实现的. 其测码伪距观测方程可表示为

$$\tilde{\rho}^j = \sqrt{(X^j - X)^2 + (Y^j - Y)^2 + (Z^j - Z)^2} + \delta I^j + \delta T^j + C\delta t_{\mathrm{T}} + C\delta t^j,\quad (j=1,2,3,\cdots,N),\qquad (1)$$

式中：$\tilde{\rho}^j$为从卫星编号为j的GNSS卫星到GNSS接收机的测码伪距；X^j、Y^j、Z^j分别为编号为j的GNSS卫星的三维坐标；δI^j、δT^j分别是GNSS卫星信号从编号为j的GNSS卫星到GNSS接收机传播过程中在电离层的延迟与在对流层的延迟；δt_{T}为接收机时钟差；δt^j为编号为j的GNSS卫星时钟差；N为卫星总数. 以上数据从对应的GNSS卫星星历中得到，为已知量. C为电磁波在真空中的传播速度，C=2.997 924 568×10^8 m/s.

为实现绝对定位，GNSS接收机需同时接收处理4颗以上GNSS卫星信号，建立4个以上观测方程可解算出4个未知数：GNSS接收机三维坐标（X，Y，Z）及接收机时钟误差δt_{T}. 但方程式（1）为非线性方程，一般用泰勒级数展开将其线性化. 设GNSS接收机初始概略坐标为（X_0，Y_0，Z_0），将式（1）用泰勒级数展开，略去2次以上项，则

$$\rho^j = \rho_0^j + k^j\delta X + m^j\delta Y + n^j\delta Z + C\delta t_{\mathrm{T}},\quad (j=1,2,3,\cdots,N)\qquad (2)$$

式中：ρ^j是经过电离层、对流层以及卫星时钟误差改正后的距离，为已知量；$\rho_0^j=\sqrt{(X^j-X_0)^2+(Y^j-Y_0)^2+(Z^j-Z_0)^2}$；$k^j$、$m^j$、$n^j$分别是星站欧氏距离在$X$、$Y$、$Z$向的偏导值.

式（2）为线性化后的测码伪距观测方程，可直接求取三维坐标增量（坐标改正数）δX、δY、δZ. 若GNSS接收机同时观测处理N颗卫星信号（N> 4），用最小二乘法解出GNSS接收机三维坐标增量，进而解算出GNSS接收机三维坐标

$$X = X_0 + \delta X,\ Y = Y_0 + \delta Y,\ Z = Z_0 + \delta Z,\qquad (3)$$

再经过若干次递归迭代，最后得到GNSS接收机精确坐标. 如上所述，用泰勒级数展开线性化需预知GNSS接收机的初始概略坐标值（X_0，Y_0，Z_0）. 然而，GNSS接收机初始概略坐标很难预知. 鉴于此，通常将其设为（0，0，0）[25-26]. 但若所选取接收机初始概略坐标值与精确值偏差较大，则泰勒级数展开略去的2次以上项将对解算结果产生显著影响[25-26]，甚至级数发散导致迭代求解失败. 显然，获取接收机初始概略坐标为此方法的关键所在.

1.2 求差法

为了在GNSS接收机初始概略坐标未知情况下获取接收机精确三维坐标值,文献[22-23]提出了求差线性化观测方程法.其主要过程为:

先对式(1)移项,再两边平方得

$$(\rho^j - C\delta t_T)^2 = (X^j - X)^2 + (Y^j - Y)^2 + (Z^j - Z)^2, \quad (4)$$

若GNSS接收机同时接收5颗GNSS卫星信号(j=1,2,3,4,5),即建立5个测码伪距观测方程;再将通式(4)中式j+1两边与式j(j=1,2,3,4)两边相减得到4个线性方程

$$a_jX + b_jY + c_jZ + d_j\delta t_T = l_j, (j=1,2,3,4), \quad (5)$$

式中,a_j、b_j、c_j、l_j为方程组系数,$a_j = 2(X^{j+1} - X^j)$;$b_j = 2(Y^{j+1} - Y^j)$; $c_j = 2(Z^{j+1} - Z^j)$; $d_j = 2(\rho^{j+1} - \rho^j)$; $l_j = (X^{j+1})^2 + (Y^{j+1})^2 + (Z^{j+1})^2 - (X^j)^2 - (Y^j)^2 - (Z^j)^2 + (\rho^{j+1})^2 - (\rho^j)^2$.

求解式(5)线性方程组可得到GNSS接收机三维精确坐标值(X, Y, Z).可见,求差法不需预知GNSS接收机的初始概略坐标,通过对伪距观测方程求差处理实现伪距观测方程的线性化,以解出接收机三维坐标.如上所述,此方法需额外增加1颗GNSS卫星信号可求解出接收机的精确三维坐标.这对于在卫星信号接收困难区域,如高楼林立大都市与地形复杂地区(山谷、盆地、树木茂密地带)的定位与导航增加一定难度.

2 对GNSS测码伪距绝对定位求解法的改进

GNSS接收机在卫星信号接收不理想的区域只能接收4颗GNSS卫星信号,且GNSS接收机初始概略坐标未知,无论是常规经典算法和求差法都无法求解GNSS接收机三维精确坐标.本文将提出一种GNSS测码伪距绝对定位处理方法,在不增加GNSS卫星接收个数的情况下,即仅接收4颗GNSS卫星信号,也可解算出GNSS接收机三维精确坐标.

首先与求差法中式(5)类似,GNSS接收机同时接收4颗GNSS卫星信号则可建立4个测码伪距观测方程(j=1,2,3,4),再通过式j+1两边与式j两边相减得到以下线性方程

$$a_jX + b_jY + c_jZ + d_j\delta t_T = l_j, (j=1,2,3), \quad (6)$$

式中:X、Y、Z为GNSS接收机的三维坐标;δt_T为接收机时钟误差;a_j、b_j、c_j、l_j为方程组系数,将式(6)移项得

$$a_jX + b_jY + c_jZ = l_j - d_j\delta t_T, (j=1,2,3). \quad (7)$$

由于接收机时钟稳定性通常为10^{-10}~10^{-11}量级,而时钟误差δt_T一般为$\pm 10^{-7}$ s量级,与自由项系数l_j相比非常微小,现暂将其忽略,则式(7)可简化为

$$a_jX + b_jY + c_jZ = l_j, (j=1,2,3), \quad (8)$$

显然,由式(8)可直接解出GNSS接收机的三维坐标.由于此前忽略了微小量δt_T,因此如此解出的并非GNSS接收机精确坐标值,但可作为其三维初始概略坐标(X_0, Y_0, Z_0),现将其值代入式(2),可计算出三维坐标增量(坐标改正数)$(\delta X, \delta Y, \delta Z)$;再经过递归迭代,最后获取到GNSS接收机精确坐标值(X, Y, Z).

3 实验分析与验证

为了验证本文所提出方法的可靠性与精确性,作者用实测数据在GNSS接收机的初始概略坐标值未知的情况下,用4颗GPS卫星信号数据,求取GPS接收机精确三维坐标.

现以三维信息获取与应用教育部重点实验室1台GPS接收机2021年10月20日在GPS历元TOW(time of week):268008接收的GPS导航电文数据为例,对本方法进行实验分析验证.从卫星星历中获取的4颗GPS卫星坐标和各颗卫星与接收机间观测伪距以及电离层和对流层延迟差见表1;用本算法求取的GPS接收机概略坐标以及由此迭代计算出的精确坐标如表2所示.由此可见,在无GPS接收机初始概略坐标情况下,本处理方法仅用4颗GPS卫星信号数据,计算出了GPS接收机精确三维坐标.

表1 4颗卫星的GPS卫星坐标和主要参数 单位:m

卫星编号	三维坐标			观测伪距	电离层延迟差	对流层延迟差
	X	Y	Z			
PRN 2	-21 602 225.332 2	15 452 772.292 3	2 184 415.454 9	22 366 878.290 0	2.381 7	4.115 0
PRN 5	-10 096 020.505 0	11 635 473.355 5	21 480 367.899 0	20 382 607.900 0	1.593 4	2.602 6
PRN 13	-12 890 679.413 6	18 309 787.483 1	14 016 109.167 4	20 116 622.970 0	1.528 0	2.466 7
PRN 15	-4 034 751.613 0	24 625 944.937 4	8 194 649.737 5	20 663 301.180 0	1.747 5	2.883 0

注:PRN为伪随机噪声码.

表2 用实际数据计算出的GPS接收机概略坐标与精确坐标 单位:m

三维坐标	GPS接收机概略坐标	GPS接收机精确坐标
X	−2 167 986.558 3	−2 169 979.767 5
Y	4 384 281.324 1	4 389 267.363 3
Z	4 070 005.987 4	4 069 993.882 0

在计算环境为Intel(R) Core™ i7-2600,CPU为3.4G下,对本方法与常规经典法的工作性能进行了对比,二者都是用4颗卫星信号数据,在用常规经典算法计算中,按照通常做法将初始概略坐标设为(0,0,0)[24-25],本文所提出的处理方法计算迭代次数为4,明显少于常规经典方法的6次,且消耗时间也较短仅为81 ms,而常规经典方法的消耗时间为124 ms.这说明由于求取了GPS接收机概略坐标值而加速了级数收敛,对于减少迭代次数发挥了关键作用,并使得实际计算消耗时间较经典方法显著缩短.此外,需要指出的是,若所选取的初始概略坐标值偏差较大,即三维坐标改正数$\delta X,\delta Y,\delta Z$较大.此时常规经典方法用泰勒级数展开线性化测码伪距观测方程时,其2次以上级数余项不再是“微小项”,很可能因为级数发散而导致迭代求解失败;而对于本文所提出的方法,则不存在此问题,因此具有较高的鲁棒性.

4 结 论

现有GNSS测码伪距绝对定位的2种解算方法各具特色:常规经典算法需预知GNSS接收机的初始概略坐标;求差法不需预知GNSS接收机初始概略坐标但需GNSS接收机多接收处理1颗GNSS卫星信号才能实现定位.本文提出了一种改进的GNSS绝对定位处理方法,此方法兼具经典常规法和求差法的优势.即使在未知GNSS接收机初始概略坐标的情况下,仅接收4颗GNSS卫星信号即可精确求取GNSS接收机的三维坐标值.这对于GNSS卫星信号接收困难区域,如在地形复杂的山区峡谷地带、森林茂密地区以及高楼林立的大都市,实现GNSS绝对定位具有较高的理论意义与应用价值.

参 考 文 献

[1] 周忠谟.GPS卫星测量原理与应用[M].北京:测绘出版社,2004.

[2] 李征航,黄劲松.GPS测量与数据处理[M].武汉:武汉大学出版社,2005.

[3] 李天文.GPS原理及应用[M].北京:科学出版社,2008.

[4] CHANG Z Q, GONG H L. Analysis and estimation of horizontal and vertical components of positioning standard deviation in absolute GPS positioning [J]. World Journal of Engineering, 2011, 8(1): 101-106.

[5] TEUNISSEN P J G, KHODABANDEH A. Review and principles of PPP-RTK methods[J]. Journal of Geodesy, 2014, 893: 217-240.

[6] 杨 丽.基于GNSS技术的地质灾害监测平台研究与实现[J].大众科技,2021,23(10):7-10.

[7] 胡媛,钟李程,陈行杨,等.GNSS-R信噪比信号在海面测高技术的研究综述[J].全球定位系统,2021,46(4):1-7.

[8] 安豪,严卫,杜晓勇,等.GNSS大气海洋遥感技术研究进展[J].全球定位系统,2021,46(6):1-10.

[9] 尹海博,徐熊,郭杭.基于GNSS的物流信息跟踪系统设计[J].导航定位学报,2021,9(6):96-103.

[10] HAN S, KWON J, JEKELI C. Accurate absolute GPS positioning through satellite clock error estimation [J]. Journal of Geodesy, 2001, 75: 33-43.

[11] ZUMBERGE J F, HEFLIN M B, JEFFERSON D C. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large network[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(B3): 5005-5017.

[12] KOUBA J, HEROUX P. Precise point positioning using IGS orbit and clock products[J]. GPS Solutions, 2001, 5(2): 12-28.

[13] LI Z H, WU X J. The newest progress of GPS: precise point positioning [J]. Journal of Geomatics. 2002, 27(5): 34-35.

[14] CHEN M, GAO C F. Precision analysis for GPS static precise point positioning [J]. Modern Surveying and Mapping, 2006, 29(3): 17-19.

[15] ZHANG Y, LIU J, ZOU X. Application of PPP technology to shipping lane survey [J]. Geospatial Information, 2006, 4(6): 14-16.

[16] ZHAN C G, PENG L, HU K. Outlook of PPP technique application to cadastre survey[J]. Journal of Geomatics, 2005, 30(2): 40-41.

[17] JIANG W, LI Y, CHRIS R. Locata-based precise point positioning for kinematic maritime applications[J]. GPS Solution, 2015, 19(1): 117-128.

(下转第57页)

[J].体育文化导刊,2011(6):36-40.
[21] 庄韬光,李梦璐,陈天然,等.首都山地户外运动与旅游发展策略研究[J].产业与科技论坛,2021,20(4):22-23.
[22] 柳志生,邓建.山地体育旅游产品体验化开发研究[J].体育文化导刊,2017(7):105-109.
[23] 罗锐,许军.西南贫困地区山地户外运动资源开发研究[J].体育文化导刊,2018(1):92-96.
[24] BUNING R J, COLE Z, LAMONT M. A case study of the US mountain bike tourism market[J]. Journal of Vacation Marketing,2018,25(4):515-527.
[25] BAPTISTA M. Adventure tourism in a land of wine: the case of Melgaço[J]. Worldwide Hospitality and Tourism Themes,2017,9(6):663-668.
[26] 田瑾,明庆忠.国外山地旅游研究热点、进展与启示[J].世界地理研究,2020,29(5):1071-1081.
[27] 刘丹.基于计划行为理论的消费者购买意愿研究[D].福州:闽江学院,2020.
[28] 张明立.顾客价值:21世纪企业竞争优势的来源[M].北京:电子工业出版社,2007:32-34.
[29] 段文婷,江光荣.计划行为理论述评[J].心理科学进展,2008(2):315-320.
[30] 赵紫月.基于计划行为理论的体验式民宿旅游消费意愿研究[D].大连:大连海事大学,2020.
[31] 黄震方,李想.旅游目的地形象的认知与推广模式[J].旅游学刊,2002(3):65-70.
[32] 黄颖华,黄福才.旅游者感知价值模型、测度与实证研究[J].旅游学刊,2007(8):42-47.

(责任编辑:李拓宇)

(上接第49页)

[18] SHENG C Z, GAN X L, YU B G, et al. Precise point positioning algorithm for pseudolite combined with GNSS in a constrained observation environment[J]. Sensors,2020,20(4):1120.
[19] GE M, DOUSA J, LI X, et al. A novel real time precise positioning service system: global precise point positioning with regional augmentation[J]. Global Position System,2012,111:2-10.
[20] LYU D Q, ZENG F L, OUYANG X F, et al. Real-time clock comparison and monitoring with multi-GNSS precise point positioning: GPS, GLONASS and Galileo[J]. Advances in Space Research, 2020, 65(1):560-571.
[21] 常占强,刘晓萌.3S集成背景下全球导航卫星系统与地图学教学探索[J].首都师范大学学报(自然科学版),2021,42(2):83-87.
[22] BANCROFT S. An algebraic solution for the GPS equations[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems AES-21,1985(7):56-59.
[23] LUNDBERG J B, MINTER C F, YOON S. Analysis of algebraic solutions to the GPS navigational equations[J]. Advances in the Astronautical Sciences, 1997, 95(1):167-182.
[24] 刘大杰.全球定位系统(GPS)的原理与数据处理[M].上海:同济大学出版社,1996.
[25] 郭秋英,胡振琪.GPS测码伪距绝对定位的几种算法[J].测绘科学,2005,30(5):26-27+4.
[26] 田安红,付承彪,赵珊.一种改进的GPS测码伪距单点定位算法[J].重庆邮电大学学报(自然科学版),2009,21(6):736-740.

(责任编辑:李拓宇)