

Simulation on Combined Orbit Determination of Navigation Satellites with Cross-Link Ranging Observations and Ground Tracking Observations

LIU Wanke, GONG Xiaoying, LI Zhenghang, WANG Fuhong

School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China
e-mail: wkliu@sgg.whu.edu.cn, smilemeng@126.com, zhli@sgg.whu.edu.cn, fhwang@sgg.whu.edu.cn

Abstract: This paper discusses the mathematical models, force models and methods of COD (combined orbit determination) of navigation satellites, which is based on cross-link ranging observations and ground tracking observations. A variety of simulations are processed with the software developed by ourselves in this paper, and the results indicate that the method of COD adapted in this paper can not only achieve good precision equivalent to broadcast ephemeris, but also solve the problem due to the insufficiency and poor distribution of ground tracking stations, that the accuracy of combined orbit determination with only one ground tracking station is slightly better than that of traditional orbit determination with 17 ground tracking stations which are well-distributed in the world, that the effect of adding ground stations and improving their geographical distribution on improving the accuracy of combined orbit determination is very limited, if 2-4 ground stations are laid in China, the accuracy and reliability of combined orbit determination can be ensured.

Keywords: navigation satellite, combined orbit determination, ground tracking observations, cross-link ranging observations, simulation

综合星间测距数据和地面跟踪数据的导航卫星联合定轨模拟计算

刘万科, 龚晓颖, 李征航, 王甫红

武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 中国, 430079
e-mail: wkliu@sgg.whu.edu.cn, smilemeng@126.com, zhli@sgg.whu.edu.cn, fhwang@sgg.whu.edu.cn

摘 要: 本文首先简要地论述了综合星间测距数据和地面跟踪数据的导航卫星联合定轨中的数学与力学模型、定轨方法、数据模拟方法等, 在此基础上, 基于自编的联合定轨软件进行了不同方案的模拟计算, 结果表明: 采用星地联合定轨模式, 不仅可以获得很好的定轨精度, 而且可大量减少地面跟踪站的布设数目以及对地面站的几何分布要求; 即使只采用 1 个地面站进行星地联合定轨, 其精度也与采用全球均匀布设的 17 个地面站的地基定轨精度相当; 地面跟踪站数量的增加及其地理分布的改善对提高联合定轨精度作用相当有限, 在国内布设 2-4 个地面站就足以保证联合定轨的精度和系统的可靠性。

关键词: 导航卫星; 联合定轨; 地面跟踪数据; 星间测距数据; 模拟计算

1 引言

由导航卫星播发给用户的广播星历是导航和实时定位中必不可少的重要数据, 长期以来其一直是由地面控制系统通过对导航卫星的跟踪观测、定轨计算和预报来提供的^[1,2]。这种定轨方式存在两个不足之处:

(1) 由于卫星导航系统在军事上具有重要作用, 因此, 在战时地面控制系统将成为敌方的主要打击对

象。虽然目前的导航卫星可以存储相当长一段时间的预报星历, 但随着预报时间的增长, 星历精度将迅速下降。因此, 一旦地面控制系统被摧毁, 基于此的卫星导航系统将迅速崩溃。为了确保 GPS 系统的战时生命力, 美国通过在 GPS 上搭载星间链路(可进行星间测距和数据通信)实现了自主定轨功能^[3~6]。

(2) 星历精度除了取决于定轨站的站坐标精度、观测值的数量和精度、定轨时所用的数学力学模型、

项目来源: 国家 863 计划资助项目(2009AA12Z301)

误差改正模型及相应软件的完善程度等因素外,在很大程度上还取决于定轨站的数量及其地理分布。正因为如此,一般都要要求有足够数目的地面定轨站且地理分布较为均匀。然而地面定轨站的布设数量及其地理分布往往受国土范围限制而难以满足上述要求。通过国际协作和商业租借等方式在全球布站将受到国家关系、国际政治因素及数据传输等等因素的限制,并非易事。

卫星导航系统具有自主定轨的功能后,不但可维持系统的战时生命力,而且在非战时,也可综合地面跟踪数据和星间测距数据实现联合定轨(本文称之为星地联合定轨)。采用此定轨模式时,原来因通视问题无法从地面站上进行跟踪观测的卫星现在可以通过通视卫星进行间接的观测了,完全无法观测的空白弧段将几乎消失;几何图形强度也将大为加强,方程的状态将迅速得以改善,这样即便是布设少数几个定轨站或者定轨站分布在一个相对狭小的范围内也可获得较好的定轨精度。因此,可以说这种星地联合定轨方式为我们解决地面跟踪站分布不足及地理分布均匀问题提供了另一种可能,它对我国北斗卫星导航系统的建立有着重要作用且逐渐受到关注。

国内外有关导航卫星星地联合定轨的研究文献较少。2000年,刘迎春等以低轨星座为对象通过简单的数值分析证实了星地联合定轨是有效的^[8]。2003年,美国的J.A.Rajan等人从解决导航卫星自主定轨时星座整体旋转问题出发进行了初步的研究^[9]。2007年,武汉大学的耿江辉、施闯等人也对综合地面GPS观测数据及低轨卫星的星载GPS数据进行导航卫星的联合定轨问题进行了初步研究,结果表明低轨卫星的星载GPS观测值对GPS卫星精密定轨具有一定的贡献^[10]。武汉大学的刘万科也于2008年对使用导航卫星的星间测距数据和地面测距数据进行导航卫星的星地联合定轨问题开展了初步的研究,结果表明星地联合定轨模式是可行的,可明显降低地面监测站布设数目及对地理分布的要求^[3]。这些初步的研究成果,对后续的相关研究具有一定的参考价值,但并未对星地联合定轨进行深入的研究。实际上,我国在布设“北斗二代”系统时将不得不面临地面定轨站布设不足及其地理分布不均匀的困境,因此深入开展导航卫星的星地联合定轨方面的研究显得尤为迫切。本文后续篇幅将就导航卫星星地联合定轨中的数学模型和定轨软件等问题进行简要的阐述,并重点通过模拟计算,获得一些有益的结论。

2 数学力学模型及定轨软件

2.1 星间测距的观测方程

在星间观测数据的处理时,对获得的双向距离观测值,需要进行预处理,主要包括电离层延迟改正、信号发射机延迟改正、信号接收机延迟改正、测量伪距平滑、测量历元归算改正、相对论效应改正、天线相位中心偏差改正等,获得改化伪距^[3,4,5,11,12]。

改化后的星间伪距可简写为(忽略了残余的系统误差)^[3,4,5,11,12]:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2} + (dt_i - dt_j) + e_{ij} \quad (1)$$

$$r_{ji} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} + (dt_j - dt_i) + e_{ji} \quad (2)$$

式中 x_i 、 y_i 、 z_i 为卫星 i 的坐标值; x_j 、 y_j 、 z_j 为卫星 j 的坐标值; dt_r 为接收卫星的钟差; dt_s 为发射卫星的钟差,单位为m; e_{ij} 、 e_{ji} 为卫星间测距的随机误差。

结合状态方程,对上面的方程进行线性化,即可按照动力学定轨方法参与后续的轨道解算。

地面测距为单向测距方式,其距离观测和星间距离观测的差别在于距离的接收端由卫星变成了地面站,所以可以说其距离观测方程和星间距离观测方程实质是一样的,可以采用类似的方式参与轨道计算。

2.2 力学模型

卫星在绕地球运行的过程中会受到多种摄动力的影响,可分为保守力和非保守力两大类。摄动力的具体表达式在卫星轨道理论及精密定轨的参考资料中已有详细的介绍,此处不再赘述。

2.3 数值积分器

为进行数值计算,我们设计了一个联合积分器,首先用8阶Runge-Kutta积分器起步,然后用混合的12阶Adams-Cowell积分器求解。并采用开普勒轨道以及真实轨道等对积分器的正确性进行了检验。

2.4 参数估计方法

在求出变分方程的数值解,组成线性化的误差方程并进而构成法方程后,还需要采用合适的参数估计方法来进行轨道状态向量(位置、速度和动力学参数)的求解。在卫星定轨中参数估计一般可采用两种方法:一种是逐历元解算的滤波方法,另一种是分段整体解算的最小二乘算法。考虑到计算效率以及本项研究中需进行大量的模拟计算^[3],因而采用最小二乘法求

解。实际应用时，可根据具体情况选择合适的方法。

2.5 定轨软件

为满足整个研究工作的需要，在联合定轨理论和方法研究的基础上，我们自行研制了一套基于 C/C++ 语言的可进行导航卫星自主定轨和星地联合定轨解算和分析研究的软件包。该软件包主要由观测值生成模块、基于动力学拟合的先验信息生成模块、数值积分模块、自主定轨模块、星地联合定轨模块、星历预报和精度估算模块等模块组成。其中一些模块仅用于自主定轨，不在本文研究之列。该软件现已经过了较大数量数据的反复测试和改进完善，可为后续的相关研究工作提供可靠的基础平台。

3 模拟观测值的生成

由于所研究问题本身的敏感性，目前尚无法获得实测的星间距离观测值，因而在我们的研究工作中只能采用模拟观测值。同时，采用模拟观测值也有一个好处，即可根据研究工作的需要方便地给观测值赋予不同的误差，以便讨论这些误差对定轨精度的影响。由于 GPS 可提供本文数据模拟中所需的各种数据，也便于对计算结果进行精度检验，同时 GPS 卫星也成功地实现了星间测距，故本文的数据模拟和计算分析都是以 GPS 系统为对象进行的。但从理论上讲本方法和程序也适用于其它卫星导航系统。

星间距离观测值和星地间的距离观测值将受到多种误差的影响。按理说，应首先按各种模型生成各类误差，加入卫星间的几何距离中，使模拟观测值尽可能接近实际情况，然后在数据处理时再用各

种模型来加以改正。但考虑到我们的研究项目的性质（主要从事理论和方法研究），这样做并无太大的实际意义，而且还会增加工作量，因而做了简化处理：首先依据卫星精密星历计算出卫星间的真实距离，然后加入测量噪声 ε 和残余的系统误差 σ ， σ 是由于未模型化或模型不完善而在观测值中残留下来的系统性偏差， ε 和 σ 的数值可任意给定，但不再追究它们是由那些模型误差所造成的。此外，在星间观测数据的模拟中，还需考虑星间测距信号的覆盖范围和通视条件。

星地间的距离观测值采用类似的方法生成。

4 模拟计算及结果分析

4.1 数据模拟方案

按照上述的模拟原则和方法，对 2007 年第 112 至 126 日共 15 天在轨的全部 31 颗 GPS 卫星的星间距离观测值和星地间的距离观测值进行了模拟。星间距离观测值中所含的残余系统误差采用参考文献[5]中所给出的值（见表 1）。其中固定偏差主要来自信号发射设备和接收设备内的信号延迟，周期项则是一些未被改正的与卫星轨道运动有关的项，对 GPS 卫星而言其周期约为 12 小时。GPS 卫星有在轨校正偏差的能力。表 1 中给出的是 Block IIR 卫星经工厂测试校正和卫星在轨测试校正后残留下来的系统误差均方差值，它主要取决于测试校正的精度，其值可为正号也可为负号，可大可小。表 1 中容许值是允许的最大误差值；实际值是实际测定的卫星残余系统误差的均方根值。如无特殊说明，在我们的研究中则采用实际值。

Table 1. The systematic errors remained in cross-link ranging observations
表 1. 星间距离观测值中的残余系统误差

残余系统误差		容许值	实际值
发射机	固定偏差	75cm	31cm
	周期项幅度	75cm	21cm
接收机	固定误差	120cm	51cm
	周期项幅度	105cm	27cm

GPS 系统中，星间距离观测值的测量噪声的均方差 ε 分别采用下列数值^[3,9]：BlockIIR 卫星为 $\pm 75\text{cm}$ ，BlockIIF 卫星为 $\pm 50\text{cm}$ ，BlockIII 卫星为 $\pm 5\text{cm}$ 。地面站的测量噪声在一般情况下采用 $\pm 30\text{cm}$ ，与经载波相位平滑后的伪距观测值的测量噪声大致相当。

4.2 定轨解算策略

为了分析星地联合定轨的可行性，检验所编写软

件的正确性，并获得有益的结论，基于上述的模拟数据采用自编软件进行了星地联合定轨的模拟计算，并以 IGS 的精密星历为标准来检验模拟计算的结果，评定其精度。模拟计算时所采用的解算策略见表 2。

4.3 地面站定轨的结果及分析

为了方便地分析评价星地联合定轨结果，我们首先对仅利用地面跟踪资料进行精密定轨作了模拟计

算。计算按两种方案进行：第一种方案是利用在国内均匀分布的 6 个 IGS 站（BJFS、SHAO、WUHN、

URUM、LHAS、KUNM）进行定轨，第二种方案是利用在全球较为均匀分布的 17 个 IGS 站进行定轨。

Table 2. The resolution strategy used in numerical calculation

表 2. 数值计算时所采用的解算策略

模型	描述
观测量	星地间的距离观测值，星间距离观测值
采样间隔	15min
星表	JPL DE405
地球重力场模型	10 阶次的 EGM96 模型
光压模型	JPLGSPM04 模型(2 个待估参数)
地球定向参数	IERS 提供的 EOP
积分器及积分步长	自编的联合积分器，步长 60s
估计器	标准最小二乘法
状态参数	每个弧段（24 小时）每个卫星估计一组状态向量（估计时固定地面跟踪站坐标）
钟差参数	每个卫星、每台接收机、每个历元设置一个钟差参数，估计时固定北京站的钟差。国内 6 站定轨时不估计钟差参数

4.3.1 国内 6 站的定轨结果

如前所述，利用国内 6 站的伪距观测值来确定 GPS 卫星的轨道时，部分卫星在很长一段时间内处于无任何站可观测的“失踪”状态，因而定轨精度不好，卫星钟差的精度更差。具体结果见下表 3。

Table 3. Accuracy of orbit determination with 6 ground stations in China

表 3. 基于国内 6 站的地基定轨精度

精度指标	R (m)	A (m)	C (m)	URE (m)
RMS'	5.07	22.74	6.59	6.11
Max-dif	29.08	154.01	22.85	35.64

在上表中， RMS' 为全部 31 颗 GPS 卫星在 15 天中的平均 RMS 值。通常整个星座一天的定轨精度可用 RMS 值来衡量，其表达式见（3）式。

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{31} \sum_{j=1}^{96} \delta_{ij}^2}{31 \times 96}} \quad (3)$$

其中， δ_{ij} 为计算值与 IGS 所给出的参考值之差， i 为卫星序号、 j 为历元序号（与 IGS 精密星历的间隔相同，每天 96 个历元）。RMS 反映了整个 GPS 星座在一个时段（一天）内的整体定轨精度。

上表中的 Max-dif 即最大偏差值，是全部 31 颗卫星在 15 天共 1440 个历元中定轨结果与 IGS 精密星历间的最大差值，它反映了最大的定轨误差。其中 R 表

示径向误差、 A 表示沿迹误差、 C 表示法向误差。

URE 为用户距离误差（User Range Error），它是反映卫星导航系统导航定位精度的一个重要指标，其计算公式如下^[3,4]：

$$URE = \sqrt{(R - \delta t)^2 + \frac{1}{49}(A^2 + C^2)} \quad (4)$$

式（4）中的 δt 为卫星钟差的确定误差，在表 3 中未给出。

从表 3 可以看出，仅利用国内 6 站的伪距观测值来确定 GPS 卫星的轨道时，精度较差。即使不计卫星钟差的误差 δt 以及广播星历的预报误差，整个星座的 URE 值也已超过 6m，部分卫星在部分时间中的 URE 值则可超过 30m，无法满足要求（文献[4]中根据 GPS 系统的设计指标以 $URE \leq 6m$ 为标准来评价广播星历的精度是否满足要求，本文中也将以 $URE \leq 6m$ 作为判断标准）。

4.3.2 全球 17 站的定轨结果及分析

为了改善 GPS 系统的地面跟踪站的地理分布和图形结构，提高 GPS 系统的广播星历的精度和可靠性，目前 GPS 系统已将地面跟踪站的数量增加至 16 个^[2]，因此，我们在全球范围内也选择了与其分布大致相同的 17 个 IGS 跟踪站来进行类似的定轨解算，这些测站的分布见图 1。按照此布设方案，卫星的跟踪状况大为改善，所有卫星的轨道几乎都能 100% 地被跟踪观测，且大部分时间都能被 4 个以上的地面站同时跟踪，因而定轨精度和可靠性将大为改善。计算结

果见表 4。从表 4 中可以看出，利用全球分布较均匀的 17 个地面站来确定 GPS 卫星的轨道及卫星钟差时 RMS 值减小为 0.53m（15 天的平均值）且最大偏差值也小于 2m。需要说明的是，目前生成广播星历的 GPS 地面定轨站的分布大体与此相仿，地面跟踪系统直接确定的未加入预报误差的 *URE* 与我们的计算结果大致处于一个量级^[2]。

4.4 星地联合定轨的结果及分析

4.4.1 单地面站的星地联合定轨结果及分析

在此处的模拟计算中，地面观测值与星间距离观测值的观测噪声均方差均采用 $\pm 75\text{cm}$ (1σ)，系统偏差的值按表 1 所示设定。计算结果见表 5 与图 2。图 2 中的“17sta”表示的是全球 17 个 IGS 站的地基定轨结果。

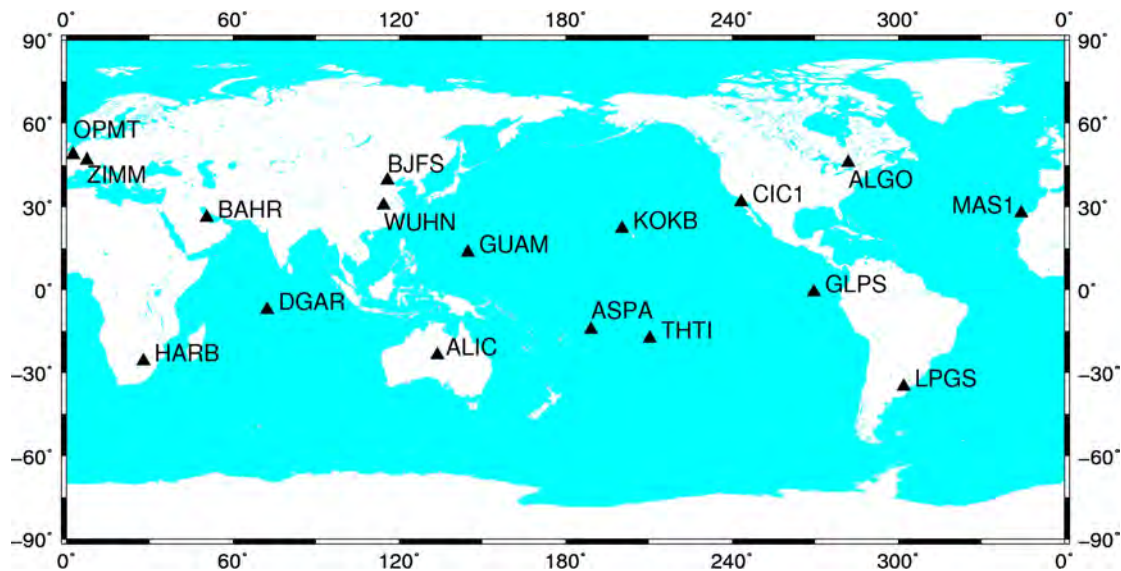


Figure 1. Geographic distribution map of the 17 IGS ground tracking stations in the world
图 1. 全球 17 个 IGS 跟踪站的分布示意图

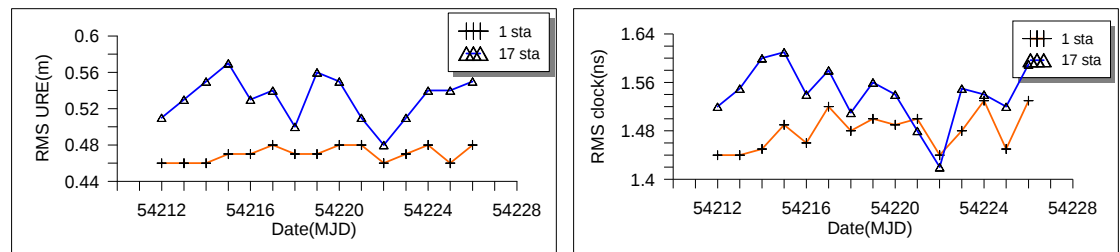


Figure 2. Result of traditional orbit determination only using 17 stations and COD with one station
图 2. 17 站地基定轨与 1 地面站的星地联合定轨结果比较图

Table 4. Accuracy of traditional orbit determination with the 17 ground stations in the world
表 4. 基于全球 17 站的地基定轨精度

精度指标	<i>R</i> (cm)	<i>A</i> (cm)	<i>C</i> (cm)	δt (ns)	<i>URE</i> (cm)
<i>RMS'</i>	14.8	32.4	22.9	1.540	53.1
Max-dif	70.7	147.2	72.9	5.003	193.9

Table 5. Accuracy of COD with one ground station
表 5. 单地面站星地联合定轨结果精度

精度指标	<i>R</i> (cm)	<i>A</i> (cm)	<i>C</i> (cm)	δt (ns)	<i>URE</i> (cm)
<i>RMS'</i>	7.0	40.9	39.3	1.480	47.0
Max-dif	23.6	101.3	80.5	4.290	136.3

从表 5 和图 2 可以看出,即使将地面观测值中的随机误差从 30cm 增加至 75cm,单地面站联合定轨的精度仍可优于在全球较均匀地布设 17 个地面站的地基定轨精度。

4.4.2 地面站的数量对联合定轨精度的影响

为了研究“在联合定轨时究竟应加入多少个地面站才合适”的问题,我们分别用国内 1~6 个站及全球 17 个站进行了模拟计算,结果见表 6 和图 3。

Table 6. Influence of the number of ground stations on the accuracy of COD
表 6. 利用不同数量地面站进行星地联合定轨结果精度

地面站数量	RMS'				
	R (cm)	A (cm)	C (cm)	δt (ns)	URE (cm)
1	7.0	40.9	39.3	1.480	47.0
2	7.0	36.7	35.3	1.479	46.8
3	7.0	34.0	32.5	1.478	46.7
4	7.0	31.0	29.3	1.477	46.5
5	7.0	30.7	29.0	1.477	46.3
6	7.0	30.9	29.3	1.475	46.4
17	7.0	20.5	15.6	1.467	45.9

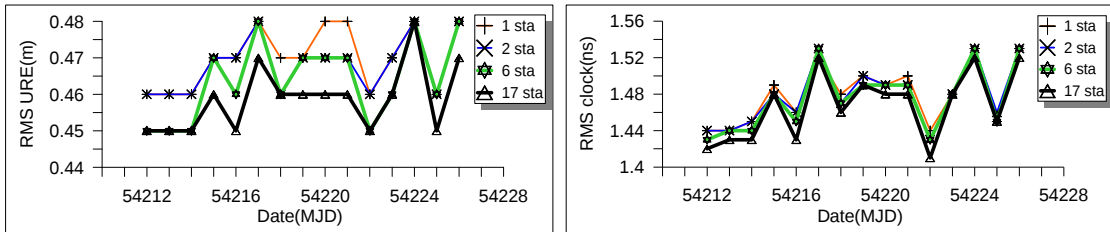


Figure 3. Result of COD with different ground stations
图 3. 利用不同数量地面站进行联合定轨钟差和 URE 的均方差图

从表 6 和图 3 可以看出,随着地面站数量的增加,沿迹误差 A 和法向误差 C 将逐步减小,但对径向误差 R 和卫星钟差的测定误差 δt 的影响却很小。由于 URE 主要取决于 R 和 δt , 所以地面站数量的增加对 URE 的改善程度也十分有限。这是因为星间距离观测值的数量将远远超过地面站上的观测值数量。例如对于 31 颗 GPS 卫星而言,除个别卫星被“障碍球”遮挡而无法观测外,任一历元星间双向距离观测值数量都将超过 750 个,而 17 个地面站上的观测值个数一般只有 100 个左右,此外星间观测值的图形强度也要优于地面观测的图形强度,所以增加地面站的数量,改善其地理分布对于提高联合定轨精度的贡献并不大。我们认为在国内布设 2~4 个地面站就能较好地满足联

合定轨的要求。

4.4.3 测距噪声对联合定轨的精度影响分析

为了研究距离观测值中随机噪声对联合定轨结果的影响,本文模拟计算中采用了三种不同的随机噪声值,它们分别为 $\pm 75\text{cm}$ 、 $\pm 50\text{cm}$ 及 $\pm 5\text{cm}$ 。计算结果见表 7 与图 4。

从表 7 与图 4 中可以看出,当测距噪声增加时,计算出的卫星轨道误差及卫星钟偏差增加幅度很小。当测距噪声增长 15 倍(从 5cm 增加到 75cm),URE 值仅增长 1.2 倍。因此,在设计和实现星地联合定轨系统时,即使测距噪声相对较大(比如 75cm),最终的定轨精度也不会有显著降低。

Table 7. Influence of measurement noises in ranging observation on the accuracy of COD with one ground station
表 7. 测距噪声对单站联合定轨结果的影响

测距噪声	RMS'				
	R (cm)	A (cm)	C (cm)	δt (ns)	URE (cm)
$\pm 5\text{cm}$	6.0	31.6	29.9	1.268	39.9
$\pm 50\text{cm}$	7.0	32.3	30.3	1.347	43.4
$\pm 75\text{cm}$	7.0	40.9	39.3	1.480	47.0

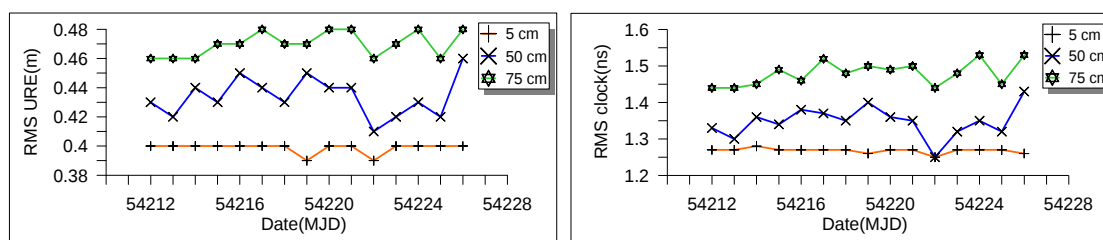


Figure 4. Result of COD with different measurement noises

图 4. 不同测距噪声值下联合定轨钟差及 URE 均方差图

5 结语

本文首先对综合星间测距数据和地面跟踪数据的导航卫星星地联合定轨的理论与方法进行了简要的阐述,在此基础上,基于自编的星地联合定轨分析软件包,进行了大量的模拟计算及分析工作,得出了一些有益结论:

(1) 利用导航卫星的星间测距数据和地面跟踪数据进行星地联合定轨是可行的,可以获得很好的定轨精度。若卫星导航定位系统具有星间距离测量和数据传输的能力,不但在战时地面控制系统被摧毁的情况下能形成自主导航的能力,维持导航系统的正常运行;在平时也可采用星地联合定轨模式,以此来解决难以在全球均匀布设地面跟踪站的难题。

(2) 与传统的地基定轨不同,增加地面站的数量,改善其地理分布对提高联合定轨的精度作用相当有限。在星地联合定轨模式下增设地面站不是为了提高定轨精度,而是为了确保导航系统的可靠性。在国内布设 2~4 个地面站就足以保证联合定轨的精度和系统的可靠性。

(3) 测距噪声对星地联合定轨结果的影响不大,这也是伪距观测值(而不是载波相位观测值)广泛应用于星地联合定轨及自主定轨的原因。

总之,星地联合定轨较之传统定轨方法有很大的优势,例如:定轨精度高、可以大量减少地面跟踪站的布设数目以及对地面站的几何分布要求也会大大降低。因此,利用在我国本土任意位置布设的少量地面站就能保证北斗卫星系统的正常运行。本文结论对我国北斗卫星系统的地面站布设及卫星轨道确定具有重要的参考价值。

References (参考文献)

- [1] XU G. GPS Theory, Algorithms and Applications[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2003.
- [2] CREEL T, DORSEY A, MENDICKI P, *et al.* New, Improved GPS-The Legacy Accuracy Improvement Initiative[J]. GPS World, 2006, 3: 20-31.
- [3] Liu Wanke. Research and simulation on autonomous orbit determination and combined orbit determination of navigation satellites [D]. Wuhan: Wuhan University, 2008.

刘万科. 导航卫星自主定轨及星地联合定轨的方法研究和模拟计算[D]. 武汉: 武汉大学, 2008.

- [4] ANANDA M. P., BERNSTEIN H., CUNNINGHAM K. E., *et al.* Global Positioning System Autonomous Navigation[J]. IEEE. 1990: 497-508.
- [5] Martoccia D and Bernstein H. *et al.* GPS Satellite Timing Performance Using the Autonomous Navigation(Autonav). In: Proceedings of the 11th International Technology Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 1998 Sept 15-18, Nashville, Tennessee. Virginia USA: Institute of Navigation, 1998, 1705-1712.
- [6] Rajan J A. Highlights of GPS II-R Autonomous Navigation, In: Proceedings of ION 58th Annual Meeting and CIGTF 21st Guidance Test Symposium, 2002 June 24-26 New Mexico. Virginia USA: Institute of Navigation, 2002, 354-363.
- [7] Zhao Qile. Research on precision orbit determination theory and software of both GPS navigation constellation and LEO satellites [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.
- [8] Liu Yinchun, Liu Lin, Wang Changbin. On the orbit determination combined the Satellite-Satellite Tracking and the Ground Based Tracking[J]. Publication of Purple Mountain Observatory (in Chinese), 2000, 19 (2):17-120.
- [9] RAJAN J A, BRODIE P, RAWICZ H. Modernizing GPS autonomous navigation with anchor capability[C]. ION GPS/GNSS 2003, Portland, 2003: 1534-1542.
- [10] Geng Jianghui, Shi Chuang, Zhao Qile, Liu Jinnan. GPS precision orbit determination from combined ground and spaceborne data[J]. Geomat Inform Sci Wuhan Univ (in Chinese), 2007, 32(1): 906-909.
- [11] Shuai Ping, Qu Guangji. Time Synchronization Techniques of the Autonomous Navigation of Navigation Constellation. Journal of Astronautics, 2005, 26(6).
- [12] Zeng Xuping. Research and simulation on autonomous orbit determination for navigation satellites [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.
- [13] Bar-Sever Y. E., Kuang D. New Empirically Derived Solar Radiation Pressure Model for Global Positioning System Satellites[R]. The Interplanetary Network Progress Report, No. 42-159, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 2004: 1-11.
- [14] Zhang Q., Moore P., Hanley J., Martin S.. Auto-BAHN: Software for near-real time GPS orbit and clock computations[J]. Advances in Space Research, 2007, 39 (10): 1531-1538.