

GPS 卫星的激光测距和应用研究

许 华 冠

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

简述了 SLR 和 GPS 跟踪技术的发展概况。详细介绍了近几年来对 GPS-35、36 卫星的激光测距进展和应用研究的情况。给出了残差分析的初步结果,并指出了目前 GPS 卫星的稀少的激光测距资料对卫星精密定轨和站坐标的解算是有价值的。同时,也简单地评述了 GPS 卫星的微波和激光跟踪技术各自的优势和弱点。建议联合利用 GPS-35、36 卫星的 SLR 和 GPS 观测资料来开展有关的应用研究。最后,对今后的应用研究工作提出了建议。

关键词 天体测量; 卫星激光测距 — 参考系 — 航天器: GPS 卫星

分类号: P128.15

1 引 言

几十年来,人造卫星的精密跟踪技术得到了蓬勃发展。激光测卫 SLR(Satellite Laser Ranging)、全球定位系统 GPS(Global Positioning System)、全球导航卫星系统 GLONASS(Global Navigation Satellite System)、多普勒地球轨道无线电定位 DORIS(Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite)、精密测距和测速设备 PRARE(Precise Range and Range-Rate Equipment) 和卫星雷达测高 SRA(Satellite Rader Altimetry) 等技术^[1,2] 相继出现,并已在空间大地测量、地球动力学和地球物理等研究领域广泛应用。

美国国防部(DOD)在1993年8月、1994年3月分别发射了两颗带有激光后向反射器的 GPS 卫星: GPS-35(SVN35, PRN5)、GPS-36(SVN36, PRN6)^[3]。这两颗卫星的发射成功,使一些 SLR 跟踪站能对它们进行激光测距观测。这就为直接比较 SLR 和 GPS 两种技术提供了机会。通过分析不同技术所获得的不同结果,可以深入了解每种技术各自的优势和弱点,从而可以把不同技术的测量资料更好地结合起来,使其在各研究领域中发挥更大的潜力,得到更有价值的科学研究成果。

2 SLR 和 GPS 技术的发展概况

SLR 是测量激光脉冲从测站到目标卫星的往返时间从而得到卫星距离的一种技术。1964

年由美国航空航天局 (NASA) 的哥达德空间飞行中心 (GSFC) 首次成功实现了对 BEACON-B 卫星的激光测距。随着科学技术的不断发展, 近 30 年中仪器设备也得到不断的改进和更新, 已从当初的第一代激光测距仪发展到 80 年代的第二代直至目前的第三代激光测距仪。而且除掉大型的固定的 SLR 系统外也出现了轻巧小型的 SLR 流动站。测距精度也提高了三个量级, 从当初第一代测距仪的几 m 提高到现在的毫米的量级^[3,4]。在这期间, SLR 网也已由当初美国 NASA 的几个台站发展到现在分布于全球 30 多个国家和地区的 46 个台站, 其中包括 7 个流动站^[3,5]。全球 SLR 网进行国际联测的激光卫星由 1995 年前的 13 颗增加到 1995 年期间的 17 颗。国际联测的主要激光卫星的参数见表 1^[5,6]。

表 1 激光测距卫星一览表^[5,6]

卫星	发射日期	国际编号	轨道高度 /km	轨道倾角 /($^{\circ}$)	偏心率	直径 /cm	重量 /kg
Starlett	1975.2.6	7501001	960	49.8	0.02113	24	47
Lageos-1	1976.5.4	7603901	5888	109.8	0.00432	60	411
Ajisai	1986.8.13	8606101	1493	50.0	0.00050	216	685
Etalon-1	1989.1.10	8900130	19122	64.8	0.00068	130	1415
Etalon-2	1989.5.31	8903903	19123	65.3	0.00066	130	1415
ERS-1	1991.9.17	9105001	774	98.5	0.00166	不规则	2300
Topex	1992.8.10	9205201	1341	66.0	0.00174	不规则	2500
Lageos-2	1992.10.22	9207002	5900	52.6	0.01354	60	411
GPS-35	1993.8.30	9305401	20200	54.6	0.00172	不规则	1500
Stella	1993.9.26	9306102	960	98.7	0.00064	24	47
Meteor-3	1994.1.25	9400310	1250	82.5	0.00157	不规则	1500
GPS-36	1994.3.10	9401601	20200	55.1	0.00608	不规则	1500
Glonass-63	1994.4.11	9402101	19194	64.9		不规则	
Glonass-67	1994.8.11	9405003	19140	64.9		不规则	
GFZ-1	1995.4.09	8601795	391	51.6	0.00045	21.5	20.6
ERS-2	1995.4.21	9502101	774	98.5	0.00080	不规则	2300
Fizeau	1993.	9305501	931	82.5			

GPS 是精密的卫星微波系统, 地面站接收来自 GPS 卫星的无线电波而进行跟踪观测, 该系统由美国国防部操作和控制, 1973 年开始筹建, 1978 年发射第一颗 Block I 型试验卫星, 至 1988 年共发射了 11 颗这种类型的卫星。经过近 10 年的试验, 证实了该系统相当成功, 具有良好的特性。

从 1989 年 2 月发射第一颗 Block II 型工作卫星开始, 每年都发射 5 颗左右, 到 1994 年底全部 21 颗加上 3 颗备用的卫星都已升空, 均匀分布在 6 个不同的轨道平面上。卫星连续发射 2 个波段的载波信号, 载波频率分别为 1575.42MHz(L1) 和 1227.60MHz(L2)。能在全世界范围内向用户提供高精度的全天候的连续、实时的三维测速、三维定位和授时服务。

GPS 系统虽然一开始计划用于军事目的, 但很快在民用方面取得了极大的发展。国际大地测量协会 (IAG) 于 1994 年成立了国际 GPS 地球动力学服务 IGS (International GPS Service for Geodynamics) 机构。目前 IGS 拥有 140 多个分布于全球的 GPS 跟踪站、3 个全球数据中心、5 个业务或地区数据中心、7 个分析中心和一个中心局, 负责向世界各国 GPS 用户提供高质量的精密星历、地球自转参数、全球 GPS 跟踪网的站坐标和每个测站每天的观测资料。

近几年, GPS 相对定位的精度有了显著提高, 从前几年的 10^{-6} — 10^{-7} 量级提高到目前的 10^{-8} — 10^{-9} 量级, 完全可以与甚长基线干涉 (VLBI) 和 SLR 媲美。由于精度的提高, GPS

可以进行高精度的空间大地测量,可以监测板块运动和地壳形变以及海平面的变化,并已成为监测地震和火山爆发的有力工具。

3 GPS 卫星的 SLR 跟踪

对 GPS-35、36 卫星的激光跟踪分别开始于 1993 年 10 月和 1994 年 4 月。由美国导航 GPS 联合计划办公室 (Navstar GPS Joint Program Office)、美国海军研究实验室 (NRL) 及航空航天局 (NASA) 的哥达德空间飞行中心 (GSFC) 和俄罗斯空间设备工程研究所联合组织了对这两颗卫星激光后向反射器试验 GPS/LRE(GPS Laser Retroreflector Experiment) [3,7]。在 GPS-35、36 两颗卫星上的后向反射器阵是委托俄罗斯的空间设备工程研究所建造的,它们与成功地使用在俄罗斯的 GLONASS 卫星上的后向反射器阵十分相似 [3,8]。只是由于在 GPS 卫星上的有限的安装空间,使得其反射面积比 GLONASS 卫星上的小得多。GPS 卫星的后向反射器阵是由 32 块溶石英反射器组成。每个后向反射器被放在一个专门的孔里,32 个孔排成 7 排,每排 5 个或 4 个交替地嵌在铝质的面板上 [3] (见图 1)。该阵长 239mm,宽 194mm,高 37mm,重量仅为 1.27 公斤。在正常光入射时,每个六角形的后向反射器的面积等效于直径为 28.6mm 的圆。GPS 卫星的重心 CG、后向反射器阵的中心和 L 波段发射天线阵的相位中心并不重合。在卫星的体固坐标系里, GPS 卫星标准的重心坐标 (以 mm 为单位,下同) 为 (0, 0, 1011.4)^[9]。这实际上是一个平均位置,在卫星的整个寿命期间,CG 在 Z 轴的负方向移动大约 4.6mm,即从 $Z = 1013.7\text{mm}$ 移到 $Z = 1009.1\text{mm}$ 。在同一体固坐标系里天线阵相位中心的坐标为 (279.4, 0, 1967.9)。而后向反射器阵中心的坐标为 (862.6, -524.5, 1669.8)。这些数据在观测资料的处理中是十分有用的。

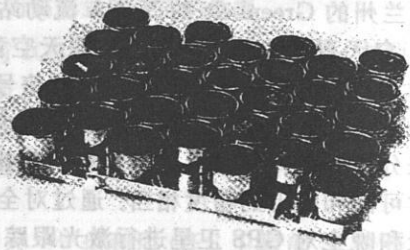


图 1 GPS-35、36 上的激光后向反射器阵 [3]

表 2 目前成功地跟踪过 GPS-35、36 的 SLR 站

站号	站名	国家
1884	Riga	Latvia
1864	Maidanak	Uzbekistan
7080	MCDonald	USA
7090	Yarragadee	Australia
7105	Greenbelt	USA
7109	Quincy	USA
7110	Monument peak	USA
7210	Haleakala	USA
7839	Graz	Austria
7840	Herstmonceux	U.K
7843	Orroral	Australia
8834	Wetzell	Germany
7836	Potsdam	Germany

由于 GPS 卫星的高度 (大约在 20000 km 左右) 比大多数激光测距卫星要高得多,加上 GPS-35、36 上的反射器的有效面积比高度相仿的俄罗斯的 GLONASS 卫星上的反射器阵的

面积小 30 倍左右^[3]，因此激光的回波要微弱得多。估计比同样高度的激光测距卫星 Etalon 的回波小 3—4 倍。加上原有的 SLR 站在设计上主要是为了跟踪 Lageos 和一些低轨道卫星的，因此激光跟踪有一定的难度，并不是所有的 SLR 站均能对 GPS-35、36 卫星进行激光跟踪。据有关文献统计，目前仅有 13 个 SLR 站取得了成功^[3,10]。它们分别列在表 2 中。

目前 GPS 卫星的激光测距资料是比较少的，其原因之一已由 Schutz^[11] 指出：原有的 SLR 工作考虑和硬件的设计已经影响了对这两颗 GPS 卫星的激光跟踪。另一个原因是属于计划安排的问题：SLR 跟踪的优先权是定期由 SLR 的分委员会 CSTG (Coordination of Space Techniques for Geodesy and Geodynamics) 评定的。通常在大地测量和其他专用卫星中，低轨道卫星往往比高轨道卫星具有更高的权重。在 1995 年以前全球联测的 13 颗激光跟踪卫星中，按跟踪的优先权排列，GPS-35、36 分别排在第 10 和第 11 位。然而根据需要也可以安排一定期限的 GPS 激光跟踪会战。

利用美国 NASA 激光流动站 MOBLAS-4 在 1994 年 3 月 9 日对 GPS-35 大约 40 min 的 SLR 观测，拟合轨道后得到的残差的均方误差 $RMS=1.16\text{cm}$ ，它代表了卫星一次通过的测距内符精度。为了去除观测中的随机误差，在 5 min 间隔内对观测资料进行平滑而生成了标准点，标准点的 RMS 大约为 2mm ^[3]。

为了增加 GPS 卫星的激光测距资料，实现白天对 GPS 卫星激光观测是很必要的。在美国马里兰州的 Greenbelt 的 NASA 流动站 MOBLAS-7 上进行了 GPS 卫星的白天激光跟踪试验^[3]。白天观测的关键是如何克服天空背景噪声的影响，白天天空背景噪声比夜晚要大 10^6 倍，从大量的噪声中检测微弱的回波信号困难极大。为了观测成功需要在接收系统中采用超窄带干涉滤光片，减小接收视场角及缩小距离门控等。在资料预处理中还需应用特殊的滤波方法来分离噪声。同时卫星预报和机架指向精度的要求也需相应提高^[12]。这样白天的测距精度才可能和晚上的精度相当。通过对全球大多数 SLR 站接收系统的更新改造，将使它们具有白天和晚上对 GPS 卫星进行激光跟踪的能力。

4 资料分析和应用研究

随着全球一些 SLR 站对 GPS-35、36 的观测成功，对这两颗 GPS 卫星的激光测距资料的分析和应用研究工作也逐步在开展起来。主要在以下几个方面：

4.1 激光测距资料的残差分析

残差分析可以估计各种误差源的量级。美国德克萨斯 (Texas) 大学空间研究中心 (CSR) 的 Schutz 等人^[13]，利用 SLR 的站坐标和国际 GPS 地球动力学服务 (IGS) 分析中心由 GPS 资料得到的精密星历对 GPS-35 初期的 SLR 资料进行了残差分析，对残差中所包含的主要误差源的量级估计如下：

SLR 的仪器误差约 1cm

SLR 点位的坐标误差约 2cm

对流层、地球潮汐等改正后的误差约 1cm

IGS 分析中心提供的卫星轨道的误差约 30cm

激光反射中心相对于质量中心的误差约 1cm

L1/L2 发射天线相位中心相对于质量中心的误差约 1cm

目前最精确的 GPS 卫星轨道是由 IGS 分析中心提供的。这一轨道是由 7 个独立的 GPS

分析中心各自计算的轨道通过加权平均结合而成的,这 7 个分析中心分别为: CODE(欧洲定轨中心), ESA(欧洲空间局), GFZ(德国地学研究中心), JPL(美国喷气推进实验室), NGS(美国国家大地测量局), EMR(加拿大的能源矿产资源部), SIO(美国 Scripps 海洋研究所)^[14,15]。

Schutz 等人利用上述各分析中心提供的星历所计算的 GPS-35 在 GPS 周 721-756 期间的 SLR 残差分析结果列于表 3。

表 3 由 IGS 各分析中心的精密星历计算的 GPS-35 的 SLR 残差分析^[13]

分析中心	资料数	残差的平均值 /cm	残差的均方误差 /cm
CODE	2251	-8.03	14.96
EMR	2184	-9.50	15.99
ESA	2251	-5.89	15.85
GFZ	2242	-4.77	12.59
IGS	2113	-8.30	14.05
JPL	2251	-7.85	14.60
NGS	2176	-5.09	21.99
SIO ¹	1566	-12.02	18.57
SIO ²	608	-1.28	15.05

注: SIO¹、SIO² 分别对应于使用 22.5、15min 间隔形式的星历的数据

表 3 说明不同的 GPS 分析中心的星历之间并与 IGS 联合轨道之间存在着一定的差异。由 IGS 各分析中心的星历得到的 GPS-35 的 SLR 资料残差,平均而言约为 -7cm,残差的 RMS 为 12—22cm, RMS 的量级是与 IGS 初期的星历的精度一致的。由于 IGS 初期的星历精度较低,使得 RMS 的量级偏大。目前 IGS 的精密星历的精度已有了很大的提高,大约可达 5cm 的量级^[16]。

德国地学研究中心 (GFZ) 的 Zhu 和 Reigber 等人^[10]也利用 GPS 卫星的 SLR 资料进行过残差分析,得到 1993 年 11 月至 1996 年 1 月的 IGS 精密星历的误差对计算激光测距残差的影响平均约为 6cm。Watkins^[17]也估计 IGS 轨道的径向轨道精度好于或等于 5cm。由于距离误差对径向轨道误差比对沿轨和横向轨道误差更敏感,径向轨道误差几乎完全被吸收到距离误差中。

4.2 激光测距资料的定轨分析

长弧资料的拟合定轨分析,可以检验所采用的力学模型的可靠程度。为了这一目的, NASA 哥达德空间飞行中心 (GSFC) 的 Pavils^[3,18]利用 104 天的 GPS-35 的 SLR 资料来定轨。为保证与其他分析中心的结果尽可能一致,采用由国际地球自转服务 (IERS) 机构公布的处理 SLR 数据的一套规范^[19],在拟合轨道后得到残差的均方误差为 3cm。这表明 GSFC 采用的力学模型的误差较小。

为了评定拟合轨道的质量和检验与 IGS 精密星历的一致性, Pavils 选取了当时数据收集最好的两个 14 天弧段的 GPS-35 的 SLR 资料来进行分析。第一个 14 天弧段为 1993 年 11 月 5—18 日,以 SLR-1 表示。第二个 14 天弧段从 11 月 18 日开始,以 SLR-2 表示,两个 14 天弧段仅有一天的共有数据。这两个 14 天弧段在拟合轨道后得到的残差的均方误差大约均为 1.9cm。而由这两个 14 天弧段分别拟合得到的 11 月 18 日的两组轨道差的均方误差在径向、横向和沿轨方向上分别为 3.2、37 和 10.9cm。由 SLR-1 及 SLR-2 拟合得到的 11 月 18 日这两天的两组轨道也分别与 IGS 精密星历作了比较。比较表明两组拟合轨道和初期的 IGS 轨道的

一致性在径向上均达 10cm 量级, 在横向和沿轨方向上均达 0.5m 到 1m 的量级。这仅是 Pavlis 在 1994 年给出的初步结果。当然这是一个有限的测试, 仅利用一天的比较, 很难得出可靠的结论。这方面的工作尚需进一步的分析研究。

GFZ 的 Zhu 等人采用 1995 年 10 月取自 7 个站 5 天的 GPS-35 的 SLR 资料, 分析了单用 SLR 资料所确定的 GPS 卫星的轨道的预报能力。他们把拟合轨道和预报外推轨道分别与 IGS 轨道进行了比较。结果表明单一的 SLR 拟合轨道的精度为 10—20cm, 预报 1 天的轨道精度大约是 30cm, 预报 2 天的轨道精度大约为 50cm, 预报 3 天的轨道精度也可好于 1m^[10]。

4.3 SLR 和 GPS 资料的联合定轨

为了分析 SLR 资料在 GPS 卫星定轨中所起的作用, Zhu 等人^[10]开展了 SLR 和 GPS 资料的联合定轨的分析研究。他们利用 1995 年 10 月 21 和 22 日(相应于第 296 和 297 天)的 GPS 和 SLR 资料进行联合定轨。为了对轨道重叠部分进行比较, 分别计算了两个 1.5 天弧长(296、297 天分别向后延伸 0.5 天), 使这两天中有 12h 的重叠段。他们对只利用 GPS 资料 and 用 GPS-SLR 资料联合解算所得的轨道进行了比较。结果表明, 增加了 SLR 观测对 GPS-35 和 GPS-36 的轨道确定有很大的影响, 其影响就轨道差的均方误差而言可达 10cm 量级。这已和轨道本身的精度量级相当。在 12h 重叠段中也作了相应的比较, 单由 GPS 资料分别拟合求得的重叠段的两轨道差的均方误差对 GPS-35、36 分别为 10cm 和 15cm, 而联合使用 GPS-SLR 资料解算, 相应的均方误差分别减小到 4cm 和 11cm。可见加进 SLR 资料后, 重叠段的轨道符合得更好, 对轨道的确定有了一定的改进。

对解算得到的卫星状态矢量的形式误差也进行了分析。表 4 给出了联合使用 SLR-GPS 资料和只利用 GPS 资料所得到的卫星状态矢量的形式误差。可见, 加进 SLR 资料后对卫星

表 4 卫星状态矢量形式误差的比较^[10]

日期序号 卫星	No.296				No.297			
	GPS-35		GPS-36		GPS-35		GPS-36	
资料类型	GPS	GPS+SLR	GPS	GPS+SLR	GPS	GPS+SLR	GPS	GPS+SLR
σ_x/cm	0.83	0.80	1.85	0.52	0.80	0.78	1.70	0.49
σ_y/cm	1.09	0.54	1.31	0.76	1.05	0.51	1.28	0.76
σ_z/cm	0.98	0.59	1.59	0.61	0.90	0.55	1.55	0.66
$\sigma_{V_x}/0.01mm \cdot s^{-1}$	0.15	0.09	0.30	0.08	0.13	0.08	0.30	0.08
$\sigma_{V_y}/0.01mm \cdot s^{-1}$	0.13	0.11	0.13	0.09	0.14	0.10	0.13	0.10
$\sigma_{V_z}/0.01mm \cdot s^{-1}$	0.20	0.08	0.15	0.08	0.19	0.07	0.13	0.09

状态矢量形式误差的改进是十分有效的。在上述每 1.5 天的弧段中, GPS 和 SLR 资料的比率大约为 80 比 1, 而增加了 SLR 资料后形式误差却减小了大约 50%。可见尽管仅有少量的 SLR 资料, 其在 GPS 卫星轨道确定中的影响却是明显的。可见, 以激光后向反射器来装备更多的 GPS 卫星, 并有更多的台站对其进行激光跟踪具有十分重要的意义。Mueller 等人^[20]指出, 这正是今后新建的基本参考站网的重要任务之一, 希望在以后几年中能够实现。

4.4 站坐标的解算

为了研究对 GPS 卫星进行激光跟踪的定位能力和不同空间技术的参考架之间的差别, 利用 GPS-35、36 卫星的激光测距资料开展站坐标的解算是有意义的。可以用两种不同的方法来解 SLR 跟踪站的坐标。

第一种方法是两步解, 即第一步是单用 GPS 数据来决定 GPS 卫星的轨道, 第二步是 GPS 卫星的轨道保持固定, 而利用 SLR 资料来解站坐标。由于 GPS 卫星的精密轨道通常已由 IGS

产生,所以第一步可以省略而直接利用 IGS 的精密星历。Zhu 等人^[10]利用这一方法,由 GPS-35、36 卫星 2.3 年的 SLR 长弧资料确定了 9 个站的站坐标。这是利用 GPS 卫星的激光跟踪资料首先求得的一组站坐标解,精度为 1—3cm。美国 Texas 大学的 CSR 利用 Lageos 卫星的 SLR 资料曾求得一组站坐标解 CSR95L01。Zhu 等人也给出了他们的解和 CSR95L01 解之间的 Helmert 转换参数的结果。这些参数提供了 SLR 和 GPS 参考架之间的直接联结,精度可好于 1m^[10]。

Zhu 等人^[10]指出,利用仅一天的跟踪资料,也可以解站坐标。如果在一天中各个站将跟踪两颗 GPS 卫星(GPS-35 和 GPS-36),而且对于每颗卫星有两次通过,每次通过至少具有 2h 的观测时段,站坐标解的精度可以达到 cm 级的水平。但实际上,每天仅能观测到一次通过,而且观测时段经常短于 1h,在这种情况下坐标分量之间的相关性是很大的,相关系数常大于 0.9,有时甚至大于 0.9999,这种强相关性必然会影响解算结果的合理性。

Zhu 等人^[10]采用 8 天的观测资料,进行了单天站坐标的解算,从解算结果来看,站坐标解的形式误差强烈地依赖于观测资料的标准点数以及相关系数的大小。如果相关系数小于 0.999,而且观测资料的标准点数大于 10,解算得到的站坐标具有好于 5cm 的精度。但如果相关系数大于 0.999,解算的结果就不合理。

第二种方法是同时使用 SLR 和 GPS 资料来联合解算 GPS 卫星轨道和站坐标以及其它有关参数(例如地球自转参数 ERP 等)。正如在 4.3 节中讨论的那样,加进 SLR 资料解算后,对 GPS 卫星的轨道有一定的改善。当然更好的轨道能得到更好的站坐标结果。这种方法要求更多的 CPU 时间。在文献[10]中,Zhu 等人虽然没有给出联合解算站坐标的结果和有关的比较分析。但是联合解算的方法是今后研究的主要方向。

5 GPS 卫星的微波和激光跟踪的优势和弱点

GPS 技术的优点是人人皆知的:地面站容易安装和运行、自动化程度高、站的全球分布、实现全天候和高精度的跟踪。目前 GPS 的观测分辨率对 C/A 码可达 2.9m,对 P 码伪距为 0.3m,而载波相位为 2—2.5mm^[21],但是与 SLR 跟踪相比,GPS 微波跟踪有以下弱点:

(1) 微波数据受对流层和电离层的影响更大

虽然通过使用双频观测,一阶电离层的影响可以被消除,但仍然存在残留的电离层的微小影响。由于水汽在大气中的分布随时空变化的不规则性,使得大气折射改正中的湿延迟很难建立一个恰当模型来模拟它。它所引起的误差一般达几 cm。虽然可通过解算天顶延迟参数来削弱这部分误差影响,但这意味着减少自由度而增加了待估参数之间的相关性。SLR 技术不受电离层的影响,而且相对地受大气的“湿”对流层动态成分的影响较小。

(2) 高精度的 GPS 载波相位观测包含一个整周模糊度(和可能的周跳),通过解模糊度参数,又减少了解的自由度和增加了参数间的相关性。

(3) SLR 是仅需一个钟的双向观测技术,通常不需要解钟误差的改正,而 GPS 则是具有两个钟的单向系统,在每个观测历元必须解出钟误差,若使用双差方法来消除钟误差,则又减少了观测量且增加了观测量之间的相关性。

(4) GPS 技术的多路径效应是另一个误差源,这个误差源从一个点位到另一个点位是变化的,而且量化或完全消除它是困难的。

(5) GPS 卫星及地面站相位中心的变化也对高精度的解算有一定的影响。

当然,由于激光观测不是全天候的,加上受到目前可观测的 GPS 卫星和测站的限制,观测资料相对来讲要少得多。

在单一的 GPS 解中,解参数之间的相关性是值得重视的。文献 [10] 对 4.3 节中提到的第 297 天的单一 GPS 解的解参数情况进行了分析。在除掉钟参数以外的 4548 个解参数中,有 1136 个相关系数高于 0.90, 其中 209 个相关系数高于 0.990, 10 个以上的相关系数甚至比 0.995 更高,这在很大程度上影响了解参数的精度。通过利用数量相对少的激光资料,进行 SLR 和 GPS 资料联合定轨,可明显提高定轨精度,有助于得到可靠的解。这就充分说明了联合解算的必要性。

6 讨论和建议

目前虽然仅只有 GPS-35、36 两颗装有激光后向反射器的 GPS 卫星,对两颗卫星的 SLR 跟踪资料也有限,然而由上述资料分析的初步结果可以看出,这些有限的资料对于下列几项工作是很有价值的:

(1) 根据每天的 GPS 参考架决定 SLR 测站的坐标具有大约 5cm 的精度。

(2) 利用由长弧多年解确定的 SLR 测站的坐标,建立 GPS 和 SLR 参考架之间的联系,具有好于 1cm 的精度。

(3) 当结合 GPS 微波数据和 SLR 资料解算时,改进了总的解系统的条件,提高了 GPS-35、36 的定轨精度。

(4) 由拟合资料得到的轨道预报 1 至 2 天的 GPS-35、36 的轨道具有几分米的精度。

正是由于 GPS 和 SLR 技术在卫星精密定轨和高精度地确定其它参数方面有他们各自的优势和弱点,因此两类数据应结合起来联合解算。CSTG 也把联合解算 GPS 卫星的两类资料作为在 1995—1999 期间的任务之一^[22]。但重要的一点是对 GPS-35、36 的 SLR 观测应比目前更正规,以取得更多的观测资料。如果有大约 6 个全球分布很好的测站每周获得多于 20 次通过,那么在分析解算中结合 GPS 和 SLR 资料共同处理将是非常有意义的。随着国际上这方面研究工作的不断发展,建议在我国目前的 SLR 和 GPS 工作基础上开展以下几项应用研究工作:

(1) 利用 IGS 的精密星历,对 GPS-35、36 的 SLR 资料进行残差分析,以进一步估计各种误差源的量级;

(2) 分析比较 SLR 的测距值和 GPS 的伪距观测值,以分离星钟误差和卫星轨道误差,研究在 SA 政策下,星钟误差的短期和长期特性;

(3) 利用精密的 SLR 资料来改进对流层大气折射模型;

(4) 直接建立 SLR 和 GPS 参考架之间的联系;

(5) 建立 SLR 和 GPS 资料的联合解算方法,以提高定轨和其它参数的解算精度。

致谢 谭德同研究员提供了有关的参考文献和宝贵意见,对此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 Schuitz B E. CSTG Bulletin, 1996, 12:97
- 2 Willis P. CSTG Bulletin, 1996, 12: 53

- 3 Degnan J J, Pavlis E C. *GPS World*, 1994, 5(9): 62
- 4 巩 岩. 人造卫星观测与研究, 1995, 1:27
- 5 Degnan J J. *CSTG Bulletin*, 1996, 12: 37
- 6 谭德同等. 人造卫星观测与研究, 1996, 1: 37
- 7 Pavlis E C, Ronald L B. In: Beutler G et al. eds. *GPS Trends in Precise Terrestrial, Airborne, and Spaceborne Applications*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1995, 154
- 8 Yuri Gouzha, Lgor Koudryaytsev et al. *GPS World*, 1994, 5(1): 30
- 9 Fliegel H E, Galini T E. *J. Geophys. Res.*, 1992, 97: 559
- 10 Zhu S Y, Reigber Ch, Kang Z. *Journal of Geodesy*, 1997, 71: 423
- 11 Schutz B E. In: Degnan J J ed. *Satellite Laser Ranging in the 1990s*, NASA conference Publication 3283, 1994, 85
- 12 杨福民等. 白天卫星激光测距系统的设计和实测结果, 中国科学, 1998, 待发表
- 13 Schutz B E, Abusali P, Eanes R. In: John M L ed. *Ninth International Workshop on Laser Ranging Instrumentation*, Proc. Camberra, Australia, 1994, Camberra: Australian Government Publishing Service, Vol 3, 1000
- 14 Beutler G, Kouba J, Springer T. *Bulletin Geodesique*, 1995, 69(4): 200
- 15 Kouba J et al. In: Zumberge J F, Liu R, Neilan R E eds. *IGS 1994 Annual Report*, Pasadena, California: JPL, Calif. of Tech., 1995. 70
- 16 Kouba J, Mireault Y. In: Zumberge J F, Fulton D E, Neilan R E eds. *IGS 1996 Annual Report*, Pasadena, California: JPL, Calif. of Tech., 1997. 55
- 17 Watkins M. Presentation at 'IGS Analysis Centers Workshop', 1996, Maryland, USA: Silver Spring
- 18 Pavlis E C. In: John M L ed. *Ninth International Workshop on Laser Ranging Instrumentation*, Proc. Camberra, Australia, 1994, Camberra: Australian Government Publishing Service, Vol 3, 895
- 19 McCarthy D D ed. 1992, *IERS Standards*, IERS Technical Note 13, Paris: Observatoire de Paris, 1992
- 20 Mueller I I, Montag H, Reigber Ch et al. *CSTG Bulletin*, 1996, 12: 75
- 21 王广运, 陈增强, 陈 武等. *GPS 精密测地系统原理*, 北京: 测绘出版社, 1988
- 22 Beutler G, Drewes H. *CSTG Bulletin*, 1996, 12:21

Laser Ranging to GPS Satellites and Its Application Research

Xu Huaguan

(Shanghai Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

Abstract

The development of both SLR and GPS tracking techniques is simply described. The progress of laser ranging to GPS-35,36 satellites in recent years and the situation of application research are introduced in detail. The preliminary results of residual analysis are shown, and it is pointed out that the present sparse laser ranging data of GPS satellites are very valuable for precise orbit determination of the satellites and station coordinate solution. Meanwhile, the strengths and weaknesses of microwave and laser tracking of GPS satellites have also been briefly reviewed. The suggestion combining data of the GPS and SLR measurements from GPS-35, 36 satellites in a common solution concerning application study is presented. Finally, some comprehensive comments on the further application research are also given.

Key words astrometry: Satellite Laser Ranging—reference systems—space vehicles: GPS satellite.