

天文定位联合 SLR 的单站定轨

1. 中科院上海天文台

2. 中国科学院研究生院

陈国平^{1,2} 胡小工¹ 黄勇¹ 于涌¹ 唐正宏¹ 张忠萍¹ 宋叶志¹

摘要: 天文定位联合 SLR 的单站定轨, 观测技术原理是在光电望远镜系统上增加激光测距设备, 在对空间目标天文定位测角的同时进行激光测距, 将测角和测距资料联合处理, 实现单站定轨。本文对卫星 Ajisai 实测数据进行了单站单圈和多圈定轨分析。由于实测数据有限, 为使分析结论更具普适性, 仿真了三种轨道高度的目标, 并进行单站定轨分析。通过对实测和仿真数据的研究表明, 测距数据的加入极大地提高了定轨精度和 24 小时预报精度。

关键词: 单站定轨; 精密定轨; 激光测距; 天文定位

0 引言

随着国际上对航天探测的不断扩大, 地球附近空间碎片数量与日俱增, 对已在轨或今后将发射的航天器及航天任务产生的影响日益严重, 并增加了对载人航天的潜在危害。应对该威胁的直接方法是利用各种技术手段精密监测空间碎片位置与运动规律, 并在此基础上开展空间碎片的碰撞预警、规避与清除。中高轨微小空间目标的亮度较暗, 根据公式可归算出, 在同步轨道上直径 10cm 的空间目标的亮度仅为 20 星等^[1], 只有大口径光学望远镜才能观测到。在另一方面, 激光雷达的测距精度高, 不过要实现了对低轨目标进行漫反射激光测距, 必须利用高功率激光器配合大口径接收望远镜。

上海天文台研制一种在大口径光电望远镜系统上增加大功率激光测距设备, 利用光电望远镜对空间目标进行观测, 以天文定位的方式获得目标的测角资料^[4], 同时进行激光测距获得测距资料^[6]。本文的主要研究内容是高精度激光测距资料的加入, 对空间目标单站单圈和单站多圈定轨精度及预报精度的影响。

1 实测数据单站定轨

本文使用了卫星 Ajisai 的实测激光测距数据

和天文定位的测角数据。该卫星的轨道高度为 1485km, 倾角 50°, 运行周期为 116min。实测的激光测距数据来源于上海天文台的佘山激光观测站, 实测的天文定位测角数据来自两个设备: 一个是在佘山激光观测站的测距望远镜上安装光学镜头, 测角和测距交替观测; 另一个是浙江安吉天荒坪的旋转 CCD 漂移扫描光电设备。经过整理分析, 可将测角和测距资料归为同圈的共有 5 个圈次, 如表 1 所示。

表 1 卫星 Ajisai 实测测距和测角资料

圈次	测距起始时间 UTC	测距时长 (min)	测角起始时间 UTC	测角时长 (min)
1	2011.03.07 11:46:50	1.2	11:40:57	6.8
2	2011.03.30 11:16:51	4.8	11:12:29	7.5
3	2011.11.15 19:03:23	4.3	19:08:59	5.1
4	2011.11.15 21:03:25	5.6	21:09:09	10.2
5	2011.11.21 11:36:16	0.4	11:29:29	5.5

实测数据中最长的测距时长为 5.6min, 最短

的测距时长为 0.4 min；最长的测角时长为 10.2 min，最短的测角时长为 5.1 min。圈次 1 和 2 的测角数据来源于浙江安吉天荒坪，圈次 3、4、5 的测角来源于佘山。由于浙江安吉天荒坪与上海佘山距离较近，后续处理中，近似认为测角与测距数据属于同站。

1.1 实测数据的精度

在应用上述数据之前，需要对数据精度进行分析，以便在定轨时设置相应的权重。ILRS 网站的数据显示，2011 年 3 月 1 日至 2012 年 2 月 29 日，上海佘山激光测距站对卫星 Ajisai 的最大测距误差为 43.92mm，均值为 $27.36 \pm 6.35\text{mm}$ 。

测角数据的精度通过对比卫星 Ajisai 的精密星历得到，如表 2 所示。精密星历是利用全球联测的 SLR 数据进行精密定轨得到的，卫星 Ajisai 的精密星历精度约为 $1\text{m}^{[5]}$ 。圈次 1 和 2 的测角数据精度为 4.7 至 5.7arc sec，高于圈次 3、4、5 的 8.1 至 16.7arc sec。主要原因是因为前两组数据是由旋转漂移扫描设备得到，该设备口径大 (30cm)，所处的安吉天荒坪台站夜天光背景好 (暗于 19 星等)，并且在旋转漂移扫描模式下，参考星和目标的星象均可保持圆形，这些因素有利于获得较高精度的天文定位结果。

表 2 卫星 Ajisai 实测测角资料精度

圈次	方位精度 arc sec	仰角精度 arc sec
1	5.3	5.5
2	4.7	5.7
3	16.7	13.7
4	13.6	9.5
5	9.7	8.1

1.2 实测数据单站单圈定轨

卫星 Ajisai 实测数据单站单圈定轨采用数值方法^[2]；重力场为 JGM-3 模型，取 20×20 阶；固体潮摄动；大气阻力摄动，大气阻力系数 Cd 取值 2.2，质量取 685kg，面积取 3.63m^2 ，大气密度模型为 Jacchia-77；光压摄动，系数 Cr 取值 1.0；日月引力摄动；对观测资料的高度截止角为 10° ，不解算大气阻力系数和光压阻力系数^[3]。定轨结果与卫星 Ajisai 的精密星历进行比较，如表 3 所示。

表 3 卫星 Ajisai 实测数据单站单圈定轨结果

圈次	定轨类型	定轨精度/m				24 小时预报精度/m			
		R 方向	T 方向	N 方向	三维位置	R 方向	T 方向	N 方向	三维位置
1	测角	356.0	400.4	250.0	443.4	3646.4	215060.0	13844.0	215250.0
	测角 + 测距	147.0	64.8	112.0	195.9	405.8	12850.0	1035.5	12872.0
2	测角	1855.7	1168.6	418.9	1970.1	69081.0	1053500.0	66727.0	1055100.0
	测角 + 测距	16.5	15.6	33.6	35.4	58.3	3363.5	173.8	3364.5
3	测角	2543.7	2547.0	1002.9	3693.1	336670.0	2148200.0	134060.0	2175000.0
	测角 + 测距	10.4	20.9	44.8	50.5	32.6	2067.2	93.2	2068.5
4	测角	75.7	140.2	48.2	166.1	1191.7	71999.0	4571.2	72052.0
	测角 + 测距	20.0	37.5	68.9	73.2	27.3	1321.1	175.9	1323.4
5	测角	1126.3	1090.9	517.7	1651.3	94832.0	1243500.0	79964.0	1248500.0
	测角 + 测距	136.9	108.9	85.7	194.8	2142.2	120050.0	7860.5	120290.0

表 4 卫星 Ajisai 实测数据单站多圈定轨结果

圈次	定轨类型	定轨精度/m				24 小时预报精度/m			
		R 方向	T 方向	N 方向	三维位置	R 方向	T 方向	N 方向	三维位置
3 + 4	测角	31.1	49.5	13.9	50.8	44.4	348.9	24.1	349.0
	测角 + 测距	2.8	2.9	2.9	5.0	4.8	18.1	4.0	18.1

从表 3 可以看出，当只采用测角数据进行单站单圈定轨时，定轨精度从 166.1m 到 3693.1m 不等，再根据表 2 中所列的测角时长，圈次 4 的测角时长最长，为 10.2min，其定轨精度也最高，为 166.1m，圈次 3 的测角时长最短，为 5.1min，其定轨精度也最低，为 3693.1m；24 小时预报精度从 72km 至 2175km 不等，与测角时长有一定的关系。

当测角和测距数据联合定轨时，定轨精度和 24 小时预报精度都得到了极大的提高。圈次 2、3、4 的定轨精度优于 80m，24 小时预报精度优于 3.5km；圈次 1、5 的定轨精度优于 200m。但是圈次 1 的 24 小时预报误差接近 13km，圈次 5 的 24 小时预报误差更是达到 120km。通过仔细研究表 2 中所列的数据，即可发现圈次 1 和 5 定轨结果较差的原因：圈次 1 的测距时长只有 1.2min，圈次 5 的测距时长只有 0.4min，圈次 2、3、4 的测距时长都大于 4.3min。可见联合定轨时精度的提高主要是由于高精度测距数据的贡献，测距时长越长则定轨结果通常会越好。

无论是只用测角数据定轨还是测角测距联合定轨，24 小时预报误差主要集中在 T 方向，即沿迹方向上。

1.3 实测数据单站多圈定轨

从表 2 可以看出，圈次 3 和 4 的观测时间是同一天，可以用于两圈定轨，其它圈次间隔时间较长，不适合用于多圈定轨。定轨设置与 1.2 节相同，通常的多圈定轨会解算大气和光压系数，但在此算例中，由于两圈资料的时间跨度较短，只有 2 小时，因此没有解算大气和光压。通过实验也发现，如若此算例解算大气和光压，会导致预报误差迅速增大。当然，这只是一个特例，通

常观测资料较长时，解算大气和光压结果会更好些。定轨结果与卫星 Ajisai 的精密星历进行比较，如表 4 所示。

从表 4 可以看出，当只采用测角数据进行两圈定轨时，定轨精度接近 50m，24 小时预报精度优于 350m。表 4 的 24 小时预报精度要明显优于表 3，即两圈测角数据定轨产生的 24 小时预报精度，要明显好于单圈测角测距联合定轨产生的预报精度。其主要原因是两圈测角数据比单圈测角测距数据能更好的约束卫星轨道。

当测角和测距数据联合定轨时，定轨精度优于 5m，24 小时预报精度优于 20m。一方面是由于高精度测距数据的加入，极大的提高了定轨精度；另一方面是因为卫星 Ajisai 的轨道高度为 1485km，受大气影响较小，从而预报误差也较小。

无论是只用测角数据定轨还是测角测距联合定轨，24 小时预报误差主要集中在 T 方向。

2 仿真数据单站定轨

由于实测数据有限，为使分析结果更具普适性，本文仿真了三种不同的轨道高度目标：1500km、800km 和 400km。倾角均取 80°。

2.1 仿真条件

仿真测站：上海佘山；仰角噪声：2 arc sec；仰角系统误差：1 arc sec；方位噪声：2 arc sec；方位系统误差：1 arc sec；测距噪声：1.0m；测距系统误差 0.4m；高度截至角：10°；观测条件：地影不观测，白天不观测。

动力学模型为：重力场采用 JGM - 3 模型，取 20 × 20 阶；固体潮摄动；大气阻力摄动，大气阻力系数 Cd 取值 2.2，质量取 1000kg，面积取

表5 仿真1500km目标单站单圈定轨结果

圈次	数据时长 (min)	定轨类型	定轨精度/m				24小时预报精度/m			
			R方向	T方向	N方向	三维位置	R方向	T方向	N方向	三维位置
1	16.0	测角	49.1	37.4	11.2	59.1	579.0	30994.0	2438.4	31084.0
		测角+测距	5.5	3.2	5.8	8.5	14.3	383.8	27.1	384.6
2	13.3	测角	57.9	44.9	49.9	84.5	726.0	43585.0	3381.0	43711.0
		测角+测距	4.1	5.7	2.4	7.2	10.0	122.6	13.6	123.4
3	9.0	测角	252.7	148.7	149.7	326.4	2328.9	140710.0	11366.0	141170.0
		测角+测距	1.3	2.7	1.4	3.2	20.5	1099.1	85.6	1102.5
4	11.7	测角	45.5	23.4	59.7	76.7	474.0	27528.0	2092.2	27533.0
		测角+测距	9.0	6.5	3.0	11.5	26.6	445.9	34.9	447.0

20 m²，大气密度模型为 Jacchia - 77；光压摄动，系数 Cr 取值 1.0；日月引力摄动。

仿真数据单站定轨包括单站单圈定轨和单站多圈定轨两种类型，每种类型又包括只用测角数据定轨和测角测距联合定轨两个方面，均采用数值法。单站单圈定轨参数设置为：重力场为 JGM - 3 模型，取 20 × 20 阶；固体潮摄动；大气阻力摄动，大气阻力系数 Cd 取值 2.2，质量取 1000kg，面积取 20 m²，大气密度模型为 Jacchia - 77；光压摄动，系数 Cr 取值 1.0；日月引力摄动；对观测资料的高度截止角为 10°，不解算大气阻力系数和光压阻力系数。单站多圈定轨的参数设置与单圈定轨设置基本相同，差别在于解算了大气阻力系数和光压阻力系数。

通过仿真观测资料，1500km 的目标 4 天内可观测 16 圈，800km 的目标 7 天内可观测 9 圈，400km 的目标在只考虑地影不观测的条件下，4 天内可观测 4 圈。本文对每个仿真目标均选取 4 圈数据进行分析，主要考虑了观测时长、升降段等因素。

2.2 仿真数据单站单圈定轨

1500km 的仿真目标轨道周期为 116min，定轨结果如表 5 所示。

从表 5 给出的仿真定轨结果可以看出，对于

轨道高度为 1500km 的目标，只采用测角数据进行单站单圈定轨时，定轨精度从 59.1m 到 326.4m 不等。圈次 1 的观测时长为 16.0min，定轨精度为 59.1m，24 小时预报精度为 31km；圈次 3 的观测时长为 9.0min，定轨精度为 326.4m，24 小时预报精度为 141km。定轨精度和 24 小时预报精度与定轨时采用的观测数据时长有一定的关系：通常观测数据越长，定轨精度和 24 小时预报精度越高。

当测角和测距数据联合定轨时，定轨精度从 3.2m 至 11.5m，24 小时预报精度 123.4m 至 1102.5m。预报误差主要集中在 T 方向上。测距数据的加入，使得定轨精度和预报精度得到了极大的提高。

800km 的仿真目标轨道周期为 101min，定轨结果如表 6 所示。从表 6 仿真计算结果可以看出，对于轨道高度为 800km 的目标，当只有测角数据进行单站单圈定轨时，定轨精度从 36.5m 到 244.0m 不等，24 小时预报精度从 29.9km 到 181.8km。测距数据的加入，使得定轨精度提高到 4.4m 至 8.8.3m，24 小时预报精度提高到 273.6m 至 1033.0m 以内。预报误差主要集中在 T 方向上。

400km 的仿真目标轨道周期为 93min，定轨结果如表 7 所示。

表 6 仿真 800km 目标单站单圈定轨结果

圈次	数据时长 (min)	定轨类型	定轨精度/m				24 小时预报精度/m			
			R 方向	T 方向	N 方向	三维位置	R 方向	T 方向	N 方向	三维位置
1	5.0	测角	126.9	83.3	191.0	244.0	4753.3	181580.0	12626.0	181750.0
		测角 + 测距	3.5	0.6	2.6	4.4	17.1	1032.0	74.8	1033.0
2	10.3	测角	42.4	47.7	16.8	64.4	730.4	49656.0	3440.0	49679.0
		测角 + 测距	2.9	0.7	7.8	8.3	12.7	515.9	49.1	515.9
3	9.3	测角	26.7	31.0	13.1	36.5	484.7	29914.0	2073.9	29942.0
		测角 + 测距	5.7	4.9	7.0	7.9	16.0	779.8	63.6	781.5
4	6.0	测角	29.0	21.9	43.7	56.8	590.7	39159.0	2813.4	39200.0
		测角 + 测距	4.0	2.7	0.9	4.9	15.0	273.0	19.4	273.6

表 7 仿真 400km 目标单站单圈定轨结果

圈次	数据时长 (min)	定轨类型	定轨精度/m				24 小时预报精度/m			
			R 方向	T 方向	N 方向	三维位置	R 方向	T 方向	N 方向	三维位置
1	5.0	测角	45.6	82.8	41.0	101.8	3742.3	154640.0	9644.2	154980.0
		测角 + 测距	5.1	1.6	7.3	9.1	54.1	3000.6	178.8	3006.0
2	5.0	测角	6.0	18.5	16.4	25.4	394.8	29214.0	1783.5	29270.0
		测角 + 测距	4.1	0.5	3.2	5.2	21.2	174.0	18.9	174.1
3	5.0	测角	25.9	33.7	20.9	47.4	918.4	68145.0	4256.6	68280.0
		测角 + 测距	5.0	1.2	5.9	7.8	35.8	1691.1	98.9	1694.0
4	5.3	测角	25.8	38.0	21.8	50.9	1012.2	59291.0	3623.4	59410.0
		测角 + 测距	0.9	0.4	3.2	3.4	6.3	435.6	25.7	436.4

从表 7 仿真计算结果可以看出，对于轨道高度为 400km 的目标，当只有测角数据进行单站单圈定轨时，定轨精度从 25.4m 到 101.8m 不等，24 小时预报精度从 29.2km 到 155.0km。测距数据的加入，使得定轨精度提高到 3.4m 至 9.1m，24 小时预报精度提高到 174.1m 至 3006.0m。预报误差主要集中在 T 方向上。需要指出的是，当目标轨道越低真实的大气分布越复杂，大气模型

难以完全模拟低轨大气环境，且仿真观测资料时使用的大气模型和定轨时采用的相同，因此实际的 24 小时预报精度会比仿真的结果差一些。

2.3 仿真数据单站多圈定轨

分别利用 1500km、800km 和 400km 的三圈仿真资料进行单站多圈定轨，解算大气和光压参数，结果如表 8 至表 10 所示。

表8 仿真1500km目标单站多圈定轨结果

圈次	定轨类型	定轨精度/m				24小时预报精度/m			
		R方向	T方向	N方向	三维位置	R方向	T方向	N方向	三维位置
1+2+3	测角	6.5	3.3	4.1	8.3	19.9	72.3	10.8	72.7
	测角+测距	2.8	3.0	1.1	4.0	5.3	21.2	2.6	21.2
2+3+4	测角	5.5	4.0	3.4	6.3	22.1	98.1	14.2	98.4
	测角+测距	4.3	4.7	0.7	6.3	2.5	16.7	1.7	16.7

表9 仿真800km目标单站多圈定轨结果

圈次	定轨类型	定轨精度/m				24小时预报精度/m			
		R方向	T方向	N方向	三维位置	R方向	T方向	N方向	三维位置
1+2+3	测角	6.1	2.3	4.7	8.0	5.2	23.7	7.1	23.9
	测角+测距	1.6	0.9	0.9	1.9	1.1	8.7	1.2	8.8
2+3+4	测角	11.3	6.4	5.4	11.8	20.9	59.5	7.5	59.5
	测角+测距	2.2	1.6	1.3	2.6	3.8	20.4	2.2	20.4

表10 仿真400km目标单站多圈定轨结果

圈次	定轨类型	定轨精度/m				24小时预报精度/m			
		R方向	T方向	N方向	三维位置	R方向	T方向	N方向	三维位置
1+2+3	测角	5.2	2.6	11.9	13.0	12.0	41.9	32.1	44.2
	测角+测距	1.1	0.6	0.3	1.1	3.6	14.9	1.6	15.0
2+3+4	测角	5.3	3.2	1.3	6.0	16.7	70.4	4.5	70.6
	测角+测距	2.1	1.0	1.5	2.3	3.9	15.4	3.7	15.4

从表8仿真计算结果可以看出,只采用测角数据进行单站多圈定轨时,定轨精度从6.3m至8.3m,24小时预报精度从72.7m至98.4m。测距数据的加入,使得定轨精度提高到4.0m至6.3m,24小时预报精度提高到16.7m至21.2m。预报误差主要集中在T方向上。与表5相比较,多圈定轨精度通常高于单圈,多圈定轨的24小时预报精度更是优于单圈定轨的结果。

从表9仿真计算结果可以看出,只采用测角数据进行单站多圈定轨时,定轨精度从8.0m至11.8m,24小时预报精度从23.9m至59.5m。测距数据的加入,使得定轨精度提高到1.9m至

2.6m,24小时预报精度提高到8.8m至20.4m。预报误差主要集中在T方向上。与表6相比较,多圈定轨精度高于单圈,多圈定轨的24小时预报精度更是优于单圈定轨的结果。

从表10仿真计算结果可以看出,只采用测角数据进行单站多圈定轨时,定轨精度从6.0m至13.0m,24小时预报精度从44.2m至70.6m。测距数据的加入,使得定轨精度提高到1.1m至2.3m,24小时预报精度提高到15.0m至15.4m。预报误差主要集中在T方向上。与表7相比较,多圈定轨精度高于单圈,多圈定轨的24小时预报精度更是优于单圈定轨的结果。基于2.2节同样

的原因,实际的预报精度会比仿真结果差一些。

3 结论

通过对卫星 Ajisai 实测数据的单站定轨研究表明:①对于单站单圈定轨,加入不太短(如时长大于 4min)的测距数据,使得定轨精度从几公里提高到几十米,24 小时预报精度从几十至上千公里提高到几公里。②加入较短(如时长小于 1min)的测距数据,能使定轨精度提高到两百米以内。③对于单站两圈定轨,测距数据的加入,使得定轨精度从 50 米提高到 5 米,24 小时预报精度从 350 米提高到 18 米。④单站多圈的定轨和预报精度高于单站单圈。⑤预报误差主要集中在 T 方向上。

通过对 1500km、800km 和 400km 的目标仿真计算表明:①对于单站单圈定轨,测距数据的加入,使得定轨精度从几十米至几百米,提高到 12 米以内;24 小时预报精度从几十至一百多公里,提高到三公里以内。②对于单站多圈定轨,测距

数据的加入,使得定轨精度从十多米,提高到 7 米以内;24 小时预报精度从近百米,提高到 22 米以内。③单站多圈的定轨和预报精度高于单站单圈。④预报误差主要集中在 T 方向上。

参考文献

- [1] 吴连大. 人造卫星与空间碎片的轨道和探测 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011
- [2] 叶叔华, 黄城. 天文地球动力学 [M]. 济南: 山东科技出版社, 2000
- [3] 李济生. 人造卫星精密轨道确定 [M]. 北京: 解放军出版社, 1995
- [4] 赵铭. 天体测量学导论 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2006
- [5] 陈国平, 何冰, 张志斌, 等. CPF 星历精度分析 [J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2010 (31)
- [6] 于涌, 毛银盾, 李岩, 等. 上海天文台 30cm 旋转 CCD 漂移扫描望远镜的天体测量精度分析 [J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2010 (31)