

# 精密测距测速系统的研究与应用

张飞鹏 黄 珉 张忠平

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

## 摘 要

精密测距测速系统 (PRARE) 是由德国发展的双频双程微波卫星跟踪系统, 其空间部分搭载在欧洲航天局 (ESA) 的第二颗资源遥感卫星 ERS-2 上并正常运行至今。该系统具有全天候、全自动、台站便于流动、数据多等特点。其高精度的跟踪信息可用于 ERS-2 的定轨以及某些大地测量与地球物理参数的确定。其双频特性可用于电离层方面的研究。另外, PRARE 还可用于精确的时钟同步。详细介绍了 PRARE 的发展、构成、测量原理、性能以及国际上利用 PRARE 资料所开展的工作, 展望了 PRARE 在我国的应用研究前景。

**关键词** 精密测距测速系统 (PRARE)—人造卫星大地测量—微波

**分类号**: P128.15

## 1 引 言

精密测距测速系统 PRARE (Precise Range And Range Rate Equipment) 是由德国发展的双频双程微波卫星跟踪系统, 其主要功能是精确地测量卫星与地面站之间的距离 (厘米级精度) 和距离变化率 (亚毫米每秒级精度), 这就允许该系统能与其它测量跟踪技术 (如卫星激光测距 (SLR)、雷达测高等) 一起为其空间部分所搭载的卫星提供跟踪支持, 并成为测地等方面研究的重要资料获取手段。该系统自动地全天候收集数据, 并具有星上数据存储和中央数据预处理功能, 可在获得数据后很短的时间内就对其进行分析处理。

PRARE 是由德国斯图加特 (Stuttgart) 大学导航研究所的 Hartl 教授与德国地学科学研究中心 (GFZ) 的 Reigber 教授共同提出的<sup>[1]</sup>, 最初其空间部分拟安装在 ESA 的第一颗资源遥感卫星 ERS-1 上。计划被批准后, 由柏林工业大学和斯图加特大学导航研究所开发 PRARE 空间与地面仪器的硬件, 由 GFZ 慕尼黑分部开发数据管理与分析软件并参与地面站的研制。1991 年 7 月, ERS-1 携带首台 PRARE 空间仪器升空, 但由于该仪器的电子模块故障<sup>[2]</sup>, 首次 PRARE 实验在 ERS-1 发射后不久就失败了。经过改进的 PRARE 空间仪器又被安装在俄罗斯的气象卫星 METEOR-3/7 上, 并于 1994 年 1 月到 1995 年 10 月间成功地进行了试验,

获得一批宝贵的资料。1995年4月21日,该系统空间仪器被安装在ERS-2卫星上升空,至今仍在正常运行。ERS-2上还同时携带有激光逆向反射器和雷达测高仪,从而为其与SLR及海洋测高资料比较提供了方便。

该系统提供的高精度跟踪信息可用于ERS-2的精密定轨和大地测量及地球物理参数(如地球自转参数、台站坐标、地球引力场等)的确定。其双频测量值可用于信号的电离层影响改正,以及电离层中总电子含量( $C_{TEC}$ )的监测。另外,PRARE还可用于精确的时钟比对。

## 2 PRARE 系统概况

### 2.1 系统构成

PRARE系统由空间部分、地面跟踪网、主控站、系统监控站及校验站五个部分组成<sup>[3]</sup>。

(1) 空间部分(space segment): 搭载在ERS-2卫星上,其大小为 $40\text{cm} \times 25\text{cm} \times 18\text{cm}$ ,运行耗电功率约为 $32\text{W}$ ,质量为 $20\text{kg}$ 。其主要功能为:同时对四个地面站进行双程的距离及距离变化率测量;向地面跟踪站发射广播星历;存储内部整理数据、测量数据以及来自地面站的改正数据;将星钟与地面UTC同步。

(2) 地面跟踪网(ground tracking network): 跟踪网目前由31个台站组成,它们的分布如图1所示。地面站的仪器重约 $80\text{kg}$ ,可以安装在任何可提供电源的地方,进行跟踪和信息处理。其功能包括: X波段信号的接收、相干以及脉冲的再生成转发;改正数据(包括转发器的内部延迟、X/S波段信号到达测站的时差以及地面气象数据等)的获取和上行发送;星历数据的处理。

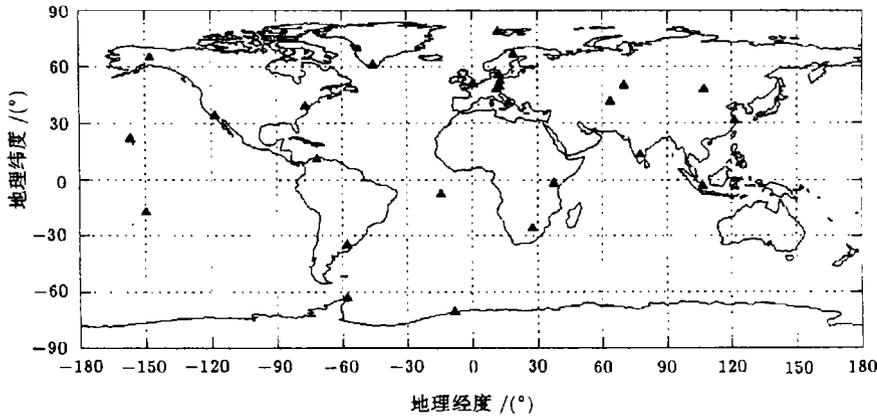


图1 PRARE地面站在全球的分布

最初设计时,地面跟踪站分为一级地面站和二级地面站两种。一级地面站作为再生相干应答器运行,参与空间-地面-空间的距离及距离变化率之测量,数据被用来进行精密定轨和地面站的定位。二级地面站是主要针对局部和地区性大地控制网设计的,它是一种S波段“只收”型台站,用S或S/X波段的单程多普勒信号和卫星的广播星历进行台站的厘米级相对定位。这类台站设计简单,价格便宜,当以干涉模式跟踪时,将特别适合于许多大地测量

和地球动力学的应用。目前还只有一级地面站，二级地面站尚未建立。

(3) 主控站 (master station)：设在德国的上法芬霍芬 (Oberpfaffenhofen)。负责地面跟踪站网的管理以及数据的预处理、质量控制和发布，并协调 PRARE 地面站的运行。

(4) 系统监控站 (monitoring and system command station)：设在斯图加特。并与主控站直接相连，负责空间部分的控制和空间数据的卸载。其主要任务是接收存储在卫星上的跟踪数据，进行时钟比对并向卫星发射轨道数据和地面指令。在无数据传输的时候，该站也用于跟踪卫星。

(5) 校验站 (calibration station)：设在波茨坦 (Potsdam)。用一台第三代激光测卫系统与 PRARE 进行同步观测，以定期对 PRARE 进行系统校验。

### 2.2 测量原理

PRARE 系统的测量原理如图 2 所示。卫星在 X 波段 (频率为 8489MHz) 和 S 波段 (频率为 2248MHz) 向地面同时发射两列经过伪随机噪声编码的微波信号 (这两个频率可让系统全天候运行操作，而且观测值受大气折射的影响很小)。一旦卫星进入了地面站的观测范围之内 (其高度角在 1° 以上)，卫星与地面站就开始通讯，当其高度角在 5° 以上时，即可进行精密测距。这时，地面站接收从卫星同时发射的两列信号，测得它们到达地面站的时差 (精确到 0.1ns)，并记下到达的时间以作为电磁波所经电离层的总电子含量 ( $C_{TEC}$ ) 的直接观测测量。接收到的信号被解调后，将 X 波段信号相干再生成一列伪随机噪声码 (频率为 7225MHz)，重新发射至卫星。通过比较 X 波段接收信号与星钟信号的相位，卫星每秒测一次发射与接收时刻之间信号的双程传播时间 (即距离) 和双程多普勒计数 (即距离变化率)。双程距离测量的原理

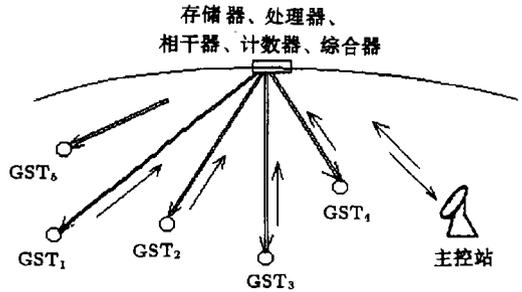


图 2 PRARE 跟踪原理

↓ X 波段和 S 波段下行伪随机噪声码 + 数据 + 广播星历  
 ↑ X 波段上行伪随机噪声码 + 地面测量数据 GST<sub>i</sub> 是地面站，i = 1 ~ 4

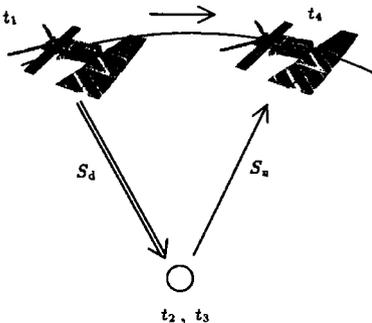


图 3 双程距离测量原理

如图 3 所示。卫星在  $t_1$  时刻向地面站发出信号，地面站于  $t_2$  时刻接收到卫星发来的信号，并于  $t_3$  时刻将相干调制后的 X 波段信号发向卫星，卫星在  $t_4$  时刻接收到地面转发来的信号，并记下从发射到接收所经历的时间 ( $t_4 - t_1$ ) 作为距离的观测值。则有

$$S_d + S_u = c(t_4 - t_1 + \Delta_1)$$

其中， $S_d, S_u$  分别为下行和上行的星 - 地距离， $c$  为真空中光速， $\Delta_1$  为信号传播中的电离层折射、对流层折射、电子元件延迟、相对论效应等引起的信号传递时间改正之总和。

双程距离变化率是基于下行和上行的载波频率之多普勒效应来进行测量的。卫星以频率

$f_t$  发射的信号到达地面站时的频率为

$$f_{rg} = f_t \cdot \left( 1 - \frac{\dot{S}_d}{c} \right)$$

其中,  $\dot{S}_d$  是在信号向下传播过程中卫星相对于地面站方向上的速度。频率  $f_{rg}$  在地面站被相干变调到向上传播的频率波段并重新向卫星发射, 卫星接收到的频率为

$$f_{rs} = f_t \cdot k \cdot \left( 1 - \frac{\dot{S}_d}{c} \right) \left( 1 - \frac{\dot{S}_u}{c} \right)$$

式中,  $k$  为地面站中相干频率调制的常数因子,  $\dot{S}_u$  为在信号向上传播过程中卫星相对地面站的径向速度。

时间间隔  $t_1$  到  $t_2$ (如图 4 所示) 的多普勒计数为

$$N = \int_{t_1}^{t_2} (f_0 - f_{rs}) dt$$

式中,  $f_0$  是与  $f_t$  有一个固定偏差的频率。可以得到:

$$N = (f_0 - k \cdot f_t)(t_2 - t_1) + \frac{k \cdot f_t}{c} [S_{d2} - S_{d1} + S_{u2} - S_{u1}] + \Delta_2$$

式中, 下标 1、2 分别对应于积分的开始和结束时刻,  $\Delta_2$  为包括二阶多普勒、大气折射、电子冲击及相对论效应等引起的改正。

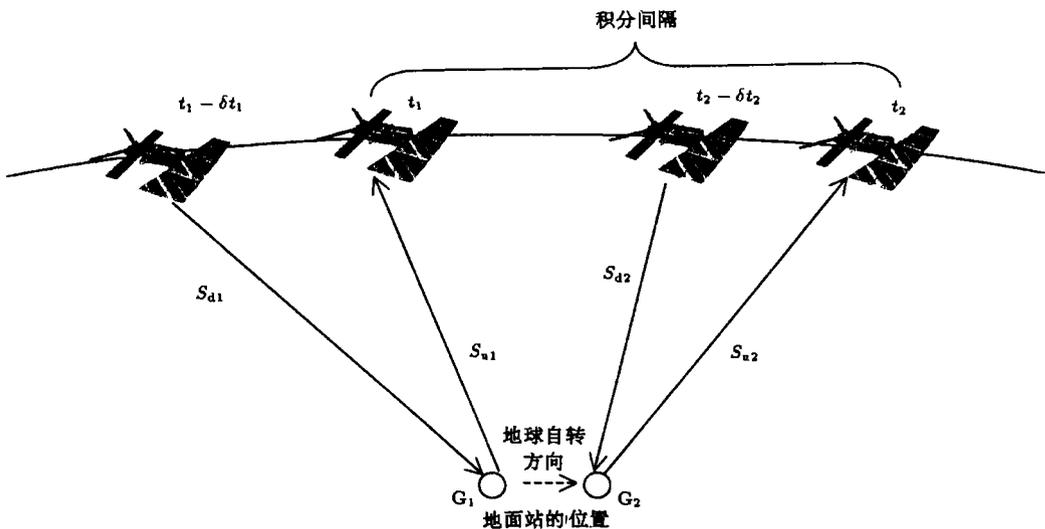


图 4 双程距离变化率测量原理

$G_1$ 、 $G_2$  为同一台站由于地球自转所处相应位置,  $\delta t_1$ 、 $\delta t_2$  为信号在积分开始和结束时刻的双程传输时间

地面站接收到的伪随机噪声序列有 4 个可能的转换正交序列, 而由地面重新发射到卫星上的伪随机噪声序列仅是其中之一。在卫星上, 有 4 个延迟锁环单元用来同时区分最多达 4 个

地面站的信号,这样就可以对4个地面站同时进行双程测量(即所谓的码多路传输)。另外,卫星和地面站都具有以低速率发射数据的能力:在下行段,空间部分发射用于地面站操作运行的控制码和广播星历;而上行段包含了校验数据、电离层测量结果和地面气象数据,其中,电离层数据和地面气象数据将分别用于跟踪数据的电离层折射和对流层延迟改正。所有的测量数据均被高度压缩后存储在卫星的存储器中,在卫星下一次通过地面监控站上空时,卫星自动调节到缩减电耗/缩减带宽的模式,将数据自动转储到监控站(一般每天进行两次),从而可以及时地获得全球跟踪网的跟踪数据以及各地面站的信息。

### 2.3 数据流 (data flow) 和数据的预处理

所有地面站的跟踪和改正数据自动由空间部分收集起来,并与后来的星上内部整理数据和校验数据一起高度压缩后存储在空间部分的数据存贮器中。在每次卫星与系统监控站合适的联系过程中,这些数据被附在常规的跟踪信号上以4或10kb/s的速率下载,其速率依赖于存贮器的存储速度。每天夜里,下载的数据被自动送到主控站以作进一步的预处理<sup>[4]</sup>。

数据的预处理分为三步。首先,主控站把原始数据解码并转换为各站按时间为顺序的物理量,并把星上的时间标度用主控站守时系统的结果转化为UTC。然后确定所有由硬件校验、测量模型和大气引起的测距和多普勒的改正。除跟踪信息外,电离层测量值以及倾斜方向和垂直方向的 $C_{TEC}$ 也可同时得到,并以数据文件的形式存储下来。最后,每秒的距离和多普勒完整数据被压缩成每15s的标准点数据并通过波茨坦GFZ数据中心的ftp服务器提供给PRARE的用户。同时,地面跟踪网的状况和预处理的统计信息也定期发布给PRARE地面跟踪站和使用PRARE资料的用户。

由于PRARE直接利用卫星进行数据的采集,故与其它空间测量技术相比,其资料的采集速度更快。

### 2.4 系统的性能

在主控站,定期测定空间部分的平均温度(记录在下载的内部整理数据中)以及中央振荡器的频率偏移和频率漂移(把秒脉冲与主控站的守时系统进行比对分析),这样就可以检查有关的参数是否仍在它们指定的范围之内,以保证校验操作的有效性。对1995年5月到1996年4月之间的分析<sup>[4,5]</sup>表明:

(1) 空间部分的平均温度很好地保持在设计范围(26°C到30°C,见图5(上))之内,在这一温度范围内,可以得到平滑的跟踪数据改正值。

(2) 振荡器的老化率很低( $2.11 \times 10^{-11}$ Hz/d),而且几乎保持不变(见图5(下))。从跟踪数据的生成和时间标记的角度来看,这一性能是非常好的。

图5中的横坐标均为在历元J2000.0前的天数,故其标注值为负数。

### 2.5 数据量及数据质量

目前的PRARE跟踪网有20个左右正常运行的地面台站(但由于受空间部分存贮容量的限制,个别台站在某段时间内不能参加观测;有时个别台站的仪器不能正常运行),每周约可得到600次卫星通过的资料。只要没有障碍物遮掩,地面站几乎可以跟踪观测卫星位于地平面之上的全部弧段。极区的台站(如NyAlesund)每天可得到14次卫星通过的资料(由于ERS-2轨道的倾角以及测量的全天候性)。预处理后的完整测距数据的一般噪声为2.5~6.5cm(依赖于ERS-2上太阳翼板造成的多路径效应),多普勒数据为0.1mm/s(30s的积分间隔)。标准点的噪声分别为1cm和0.015mm/s。

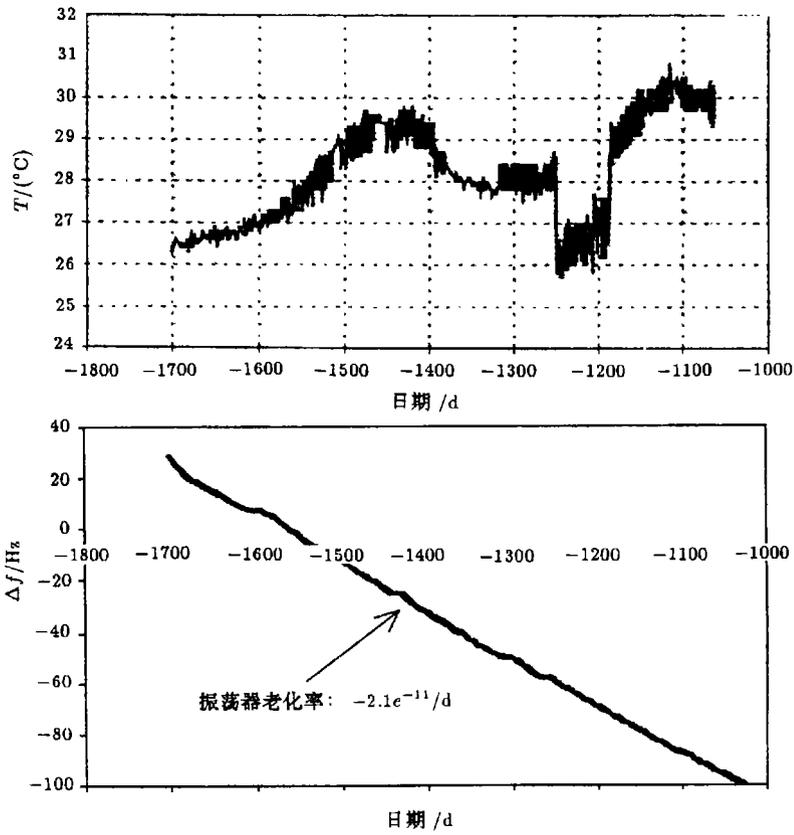


图 5 PRARE 空间部分的性能 [5]

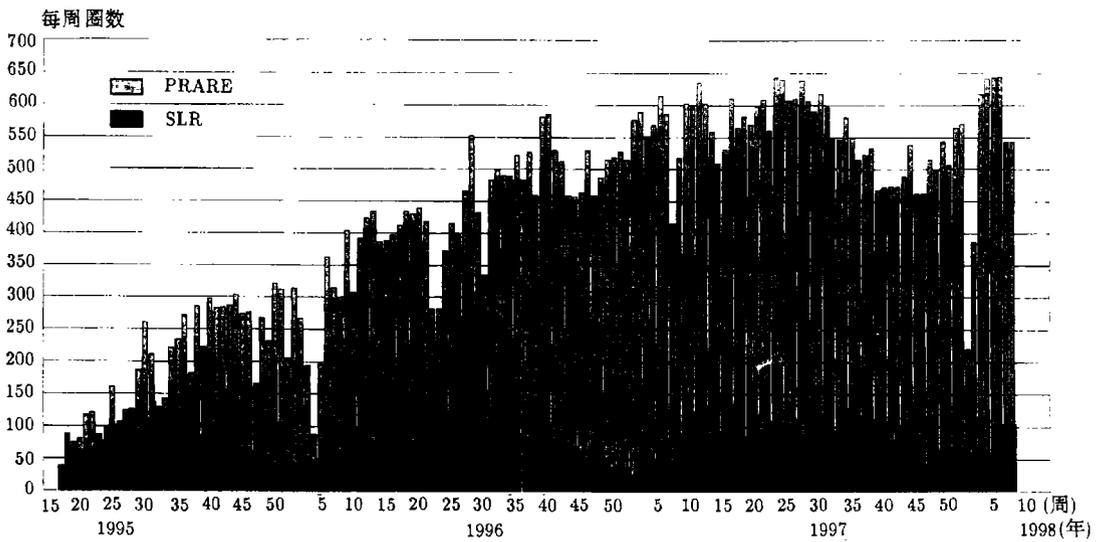


图 6 ERS-2 卫星 PRARE 与 SLR 每周观测圈数比较 (标准点数据)[6,7]

## 2.6 PRARE 技术的特点

- (1) 全天候: 运行可以不受天气情况的影响;
- (2) 全自动: 在正常运行时, 极少需要人的干预, 可以做到无人值守;
- (3) 易流动: PRARE 地面站很轻便, 可以方便地安装到任何地方;
- (4) 数据多: 由于可以全天候、全自动测量, PRARE 的数据很多, 且密度大, 分布均匀。

图 6 是 PRARE 与 SLR 的资料数比较<sup>[6,7]</sup>, 可知, PRARE 资料远比 SLR 多。

## 3 目前国外开展的工作及初步结果

在国际上, 德国、美国、荷兰、英国、挪威等几个国家的科研机构利用 PRARE 的观测资料开展了以下几方面的工作:

### (1) 精密定轨

利用 PRARE 资料做 ERS-2 定轨工作的有 GFZ<sup>[8,9]</sup>、CSR (Center for Space Research, 美国)<sup>[10]</sup>、DEOS (Delft Institute for Earth-Oriented Space Research, 荷兰)<sup>[11,12]</sup>、NDRE (Norwegian Defense Research Establishment, 挪威)<sup>[13]</sup> 和 ESA/ESOC (European Space Agency/European Space Operation Center, 德国)<sup>[14]</sup> 等科研机构。一般来说, 只是在试验中才单独用 PRARE 的资料定轨, 而在实际工作中, 普遍采用将 SLR、PRARE 及测高资料联合起来定轨。

总的来说, PRARE 资料与计算轨道拟合得较好<sup>[4]</sup>, 距离拟合的 RMS 约为 7cm (与 SLR 水平相当), 距离变化率为 0.5 ~ 0.7 mm/s。求得的 PRARE 特有参数表明: (1) 没有高于 10 $\mu$ s 水平的显著时间偏差; (2) 台站的距离偏差因站而异, 但每站在数周之内是十分稳定的; (3) 对流层尺度因子也接近于常数, 只有百分之几的变化。

为了研究不同类型的跟踪数据对卫星定轨的影响, Flechtner 等人用各种数据的组合计算了 1996 年 7~11 周的轨道, 并互相作了比较<sup>[4]</sup>(见表 1)。研究表明, 不同类型数据组合确定的轨道之间在径向具有很好的一致性 (2~3cm), 而横向和沿轨方向的差别分别为 4~6cm 和 7~18cm(表中未给出)。

表 1 不同类型数据组合确定的 ERS-2 轨道之差的 RMS cm

数据类型	SLR	PRA	PRD	SLR+PRA	SLR+PRD	PRA+PRD	SLR+XO
PRA	2.6						
PRD	2.8	1.2					
SLR+PRA	2.3	0.6	1.2				
SLR+PRD	2.2	1.1	0.9	0.8			
PRA+PRD	2.6	0.4	1.1	0.7	1.0		
SLR+XO	1.2	2.4	2.6	2.1	2.0	2.3	
SLR+PRA+PRD	2.3	0.7	1.1	0.4	0.7	0.4	2.1

注: PRA=PRARE 测距, PRD=PRARE 多普勒, SLR=激光测卫, XO 测高交叉点

目前, 各机构对 ERS-2 卫星定轨的精度大致相当, 径向精度一般为 7~8cm。对 ERS 卫星的精密定轨, ESA 有一套自己的规范<sup>[15]</sup>, 但各机构目前并未统一, 主要的差别在于引力场模型, 而引力场模型的不完善正是误差的一个主要来源。用不同的引力场模型进行的定轨试验<sup>[10,11]</sup>表明, CSR 的 TEG-3 模型和 DEOS 的 DGM-P02 模型 (由 NASA 的 JGM-3 模型发展而来) 是目前对 ERS-2 定轨较好的引力场模型。

### (2) 台站坐标的解算

Raimondo 等人利用全球 PRARE 跟踪网 45 周 (1996-01-29~1996-12-30) 的测距和多普勒资料以及 SLR 资料解算了 23 个 PRARE 台站的坐标, 并作了内部与外部的比较<sup>[16]</sup>。用测距和多普勒资料分别解算的结果比较显示, 台站坐标普遍可以符合到好于 5 cm 的水平, 个别站的差别较大, 最大达 20 cm。再把用测距和多普勒资料联合解算的台站坐标与只用测距资料解算的结果比较, 发现绝大部分台站符合在 3~5 cm 之间, 只有极个别台站的向上分量(向北、向东、向上三分量之一)符合得不好(5~15 cm)。对 16 个具有多种跟踪技术的跟踪站, Raimondo 等人把用 PRARE 测距资料解得的台站坐标与由其它技术(GPS、DORIS、VLBI 或 SLR 等)获得的台站坐标进行比较<sup>[16]</sup>, 结果显示绝大部分台站符合在 15 cm 以内(个别站优于 10 cm, 最差的达 30 cm)。用多普勒资料解算的结果再做外部比较, 结果表明符合程度有所改善, 大部分台站符合在 10 cm 以内, 但仍有个别台站符合较差(最差达 30 cm)。重复试验得到的结果相似<sup>[4]</sup>。可见, 台站坐标的符合并不理想, 原因是 ERS-2 卫星的定轨模型(主要是力学模型)缺陷使得该卫星不太适合于高精度的定位。

### (3) 地球引力场模型的建立

Raimondo 等人还利用 PRARE 资料做了地球引力场模型的改进工作<sup>[16]</sup>。他们利用全球 PRARE 跟踪网的测距和多普勒数据以及 ERS-2 的 SLR 数据, 资料时段取 1996-08-26~1996-11-25(这 14 周内无大的机动操作), 解算弧段为 7d, 解算了以下参数: 6 个轨道根数、每天两个大气阻力系数、每圈一个全局的沿轨和横向经验加速度项、每个 PRARE 站和几个 SLR 站的距离偏差以及 PRARE 的时间偏差。然后用 ERS-2 的轨道改进 PGM055 引力场模型(该模型是在 GRIM4-S4 模型的基础上, 由 34 颗卫星的资料解得的), 求解地球引力场模型的系数。新的引力场模型用于 SLR 和测高交叉点资料的轨道拟合, 结果表明有小于 1 cm 的改进。

### (4) 地球指向参数(EOP)的解算

尽管 ERS 卫星对于这项任务并不完全适合, 但由于 PRARE 数据具有良好的地域和时间分布, 可以利用它来做 EOP 的快速计算。Raimondo 等人利用 ERS-2 卫星的轨道对 35d 时段内(1996-09-09~1996-10-14)每天的极移参数进行了估计<sup>[16]</sup>。轨道弧长为 1d(从中午到中午), 在午夜时刻估计极移分量  $x_p$ 、 $y_p$ , 同时求解的参数包括: 6 个轨道根数、全局的大气阻力系数  $C_d$ 、每圈一个全局的沿轨和横向的经验加速度参数、每圈一个对流层尺度因子以及各站的距离偏差。解算的结果表明, 用 ERS-2 卫星上的 PRARE 资料解得的极移参数与 IERS 的解符合得较好(3~4 mas), 与用其它低轨卫星(如 SPOT-2/3、TOPEX/POSEIDON)上的 DORIS 资料解得的结果比较, 精度相当(但 PRARE 跟踪网不如 DORIS 网密集)。

### (5) 电离层模型的建立

如前所述, 地面站每秒测量一次 X 波段与 S 波段伪随机噪声码信号的单程传输时间差作为  $C_{TEC}$  的直接测量, 然后以低速率将测量值重新发射到空间部分, 并存储在卫星的存储器中, 用作以后测距和多普勒资料的电离层改正。这些测量值被称为电离层的码数据。由于 S 波段信号的噪声, 电离层码数据的噪声大约为 3~5 cm<sup>[4]</sup>。

由于测距信号的传播速度是群速度, 而多普勒信号则以相速度传播, 这样, 每秒一次的双程测距和多普勒数据就可用于确定电离层的特征。原理是对于这两种信号的电离层改正项刚好反号, 而所有其它改正(质心、对流层折射等)都要以相同的符号施于这两种类型的数据, 这样在两个邻近的距离数据和相对应的多普勒(距离变化率)数据之间作差分就可以得到电离层的双倍影响。这被称为“差分距离与积分多普勒(DRVID, Differenced Range Versus

Integrated Doppler) ” [5]。

为了得到初始时刻的电离层改正,可以使用电离层码数据。这样, DRVID 数据的噪声就由距离信号的噪声(约 3cm)决定。

如果电离层数据已被校准,就可以用电离层跟踪数据得到沿地面站与卫星之间倾斜方向的  $C_{TEC,s}$ 、沿卫星下点垂直方向的  $C_{TEC,v}$  以及精确的距离和距离变化率跟踪数据的改正值。要得到电离层数据与测站有关的未知偏差,可以有三种方法:共视技术、与夜间稳定的电离层比较和区域电离层模型法。把由 PRARE 得到的  $C_{TEC}$  数据与国际参考电离层模型 IRI 95、由 GPS 得到的全球电离层图和 TOPEX 双频测量值比较 [5], 结果表明仍然存在约 5TECU(1TECU=  $10^{16}$  电子 / $m^2$ ) 的偏差。

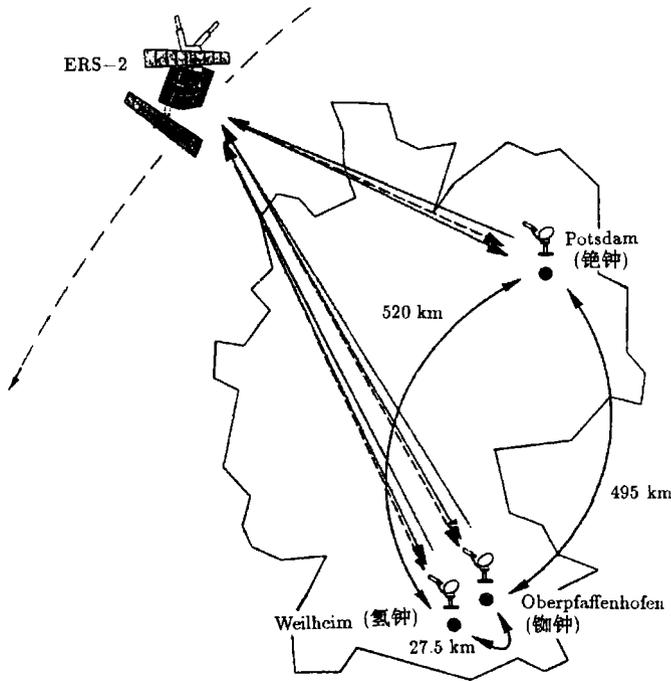


图 7 利用 PRARE 共视原理进行地面站间时钟比对实验示意图 [17]

#### (6) 时间传输与时间同步

利用 PRARE 空间部分可同时对 4 个地面站进行测距测速的特点,可以较方便地实现地面几个站共视空间目标。由于 PRARE 的测距测速可达很高的精度,我们就可以利用这种共视,进行地面站之间的高精度时钟同步。这被称为共视(Common View)技术。它可以应用在诸如导航、射电天文、SLR、大地测量等方面。

与目前其它方法一样,这种方法也需要一个具有高精度时频系统的地面站为标准站,地面其它站利用共视测距进行时间同步比对。当然,要进行这项工作,共视的地面站必须具备准确的计数器以记录地面 PRARE 的秒脉冲信号和由空中传递下来的信号的间隔,另外,还要有精确的频率标准(如铯钟或铷钟)。

图 7 是利用 PRARE 的共视原理进行地面站间时间同步实验的示意图。利用该共视手

段,目前同步精度可达 ns 量级,这在当今的时间同步方法中精度是相当高的。与以往常规的比对方法比较,共视时间短是该技术目前的一个缺陷,因而人们又提出了利用高轨卫星进行 PRARE 测距和时间同步的建议<sup>[17]</sup>。

## 4 PRARE 在我国应用研究之展望

目前, PRARE 技术在国际上的发展正处于方兴未艾的阶段。由于该技术具有全天候、全自动、台站便于流动以及数据多等特点,所以引起了国际上许多研究机构的重视。同样,我国也已开展了对该技术的研究<sup>[18]</sup>。1996年3月,根据中德科技合作协议,GFZ提供给上海天文台一套 PRARE 地面跟踪设备,并于同年5月安装调试成功,正式加入了全球的 PRARE 观测跟踪网<sup>[19]</sup>。该套系统的建立,弥补了 PRARE 跟踪网在亚洲区域的不足,也为我国开展这方面的研究提供了方便。PRARE 地面跟踪系统在我国的建设与实际观测,势必推动国内微波跟踪技术的多方面发展,对我国在大地测量学、天文地球动力学以及电离层等方面的研究提供了又一种有效的技术手段。按照协议,我国可以获得大部分 PRARE 台站的观测资料,这是我们开展对该技术研究的有利条件。

由于卫星精密轨道的确定是其它一切工作的基础,必须首先开展利用 PRARE 资料对 ERS-2 卫星精密定轨的研究。而 ERS-2 卫星的轨道较低(平均高度约 780km),对地球引力场的变化比较敏感,故可利用 PRARE 大量的高精度资料来做地球引力场模型的改善工作。同时,因 PRARE 可以全天候、全自动观测,有大量的观测资料,且台站的流动性较强,为我们利用其双频观测资料开展电离层方面的研究提供了便利的条件,若与探空气球相比,该项研究花费不大(每套 PRARE 地面跟踪设备约 10 万美元),将有很大的应用前景。另外,也可作为其它技术手段的补充来解算台站坐标及地球自转参数。但由于我国目前尚没有精密计数器,所以还不具备利用 PRARE 技术开展时间传输与时间同步方面研究的条件。

造价上,SLR 台站的花费约为 PRARE 跟踪站的 20 倍,又需占用很多土地,所以,从长远看来,PRARE 技术必将得到很大的发展。另外,PRARE 的自动化程度很高,它的设计概念也将为今后空间测量技术的发展带来新的启发和思考。

总之,掌握 PRARE 这项技术,并合理、高效地利用其资料,势必为我国的大地测量、天文地球动力学等方面的研究提供新的支持,也为我国将来发展自己的跟踪系统打下坚实的理论和技术基础。

**致谢** 董晓军、廖新浩、严豪健及冯初刚提出了许多宝贵的建议,作者谨向他们致以衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- 1 Hartl Ph, Reigber Ch. CSTG Bull. 8, Munich: DGFI, 1985: 124-134
- 2 Schäfer W, Shumann W. PRARE-2—Building on the Lessons from ERS-1. 1997 (retrieved from Internet: <http://esapub.esrin.esa.it/bullet83/schaf83.htm>)
- 3 Reigber Ch, Massmann F H, Flechtner F. CSTG Bull. 14, Munich: DGFI, 1997: 11-19
- 4 Flechtner F, Bedrich S, Massmann F H. CSTG Bull. 13, Munich: DGFI, 1997: 67-71
- 5 Bedrich S, Flechtner F, Teubel A. EGS(European Geophysical Society) XXII General Assembly, Vienna, 1997 (retrieved from Internet: <http://florence97.ers-symposium.org/data/flechtner/>)
- 6 Bedrich S, Flechtner F, Förste Ch et al. Proc. 3rd ERS Sci. Symp., Florence, Italy, 1997, ESA SP-414, Florence: ESA, 1997

- 7 Enninghorst K, Massmann F H, Neumayer K H *et al.* EGS XXII General Assembly, Vienna, 1997 (retrieved from Internet: <http://earth1.esrin.esa.it/florence/date/massmann/abstract.html>)
- 8 Massmann F H, Flechtner F, Raimondo J C *et al.* Impact of PRARE on ERS-2 POD. (retrieved from Internet: <http://www.gfz-potsdam.de>)
- 9 Massmann F H, Neumayer K H, Raimondo J C *et al.* Proc. 3rd ERS Sci. Symp., Florence, Italy, 1997, ESA SP-414, 1997
- 10 Ries J C, Bordi J J, Shum C K *et al.* EGS XXII General Assembly, Vienna, 1997(retrieved from Internet: <http://earth1.esrin.esa.it/florence/data/shum/369c.htm>)
- 11 Visser P N A M. AFRICAR Scientific Meeting, Delft, Faculty of Geodesy, 1996 (retrieved from Internet:<http://dutlru8.lr.tudelft.nl>)
- 12 Visser P N A M, Scharroo R, Floberghagen R *et al.* Proceedings of 12th International Symposium on Space Flight Dynamics, ESOC, Darmstadt, 1997, ESA SP-403, 1997: 115-120
- 13 Andersen P H, Aksnes K, Skonnord H. EGS XXII General Assembly, Vienna, 1997(retrieved from Internet: <http://earth1.esrin.esa.it/florence/data/andersen1/010c.htm>)
- 14 Fadrique F M M, Dow J M, Zandbergen R C A *et al.* ERS-2 Orbit Determination with PRARE. ESA/ESOC, Darmstadt, Germany, 1997(retrieved from Internet: <http://earth1.esrin.esa.it/florence/data/zandbergen/447c.htm>)
- 15 Zhu S Y, Reigber Ch. ERS Standards used at D-PAF, Technical Report of The German PAF for ERS, Oberpfaffenhofen: D-PAF, 1991
- 16 Raimondo J C, Bode A, Enninghorst K. EGS XXII General Assembly, Vienna, 1997(retrieved from Internet: <http://earth1.esrin.esa.it/florence/data/massmann/257c.htm>)
- 17 Bedrich S. EGS XXII General Assembly, Vienna, 1997(retrieved from Internet: <http://earth1.esrin.esa.it/florence/data/bedrich/abstract.html>)
- 18 张忠平, 刘乃苓. 测绘通报, 1997, 第 1 期, 27
- 19 张忠平, 谭德同. 中国科学院上海天文台年刊, 1997, 18: 107

## Research and Applications of PRARE

Zhang Feipeng Huang Cheng Zhang Zongping

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

### Abstract

PRARE (Precise Range And Range Rate Equipment) is a space-borne, two-way, two-frequency microwave tracking system which has been developed in Germany. Since April 21, 1995 the system has been working well onboard the second ESA European remote sensing satellite ERS-2. PRARE can operate automatically in all weather conditions. Thus, PRARE has more abundant data than SLR. Moreover, the ground stations, which are small in size and highly mobile, operate almost without man's control. The precise tracking information is used to derive preliminary and precise ERS-2 orbits as well as other geodetic/geophysical parameters like Earth orientation, station coordinates or Earth gravity field model. The two-frequency down-link measurements are used to correct the ionospheric influences on the signals and to monitor the total electron content  $C_{TEC}$  of the ionosphere. Additionally, it has been proved that PRARE can be used for precise clock synchronization. The paper introduces the development, the components, the measurement principle and the performance of PRARE in detail, gives retrospect of the research work on PRARE which had been doing by some international institutes, and reviews the prospects of PRARE applications in China.

**Key words** Precise Range And Range Rate Equipment (PRARE)—Satellite geodesy—microwave