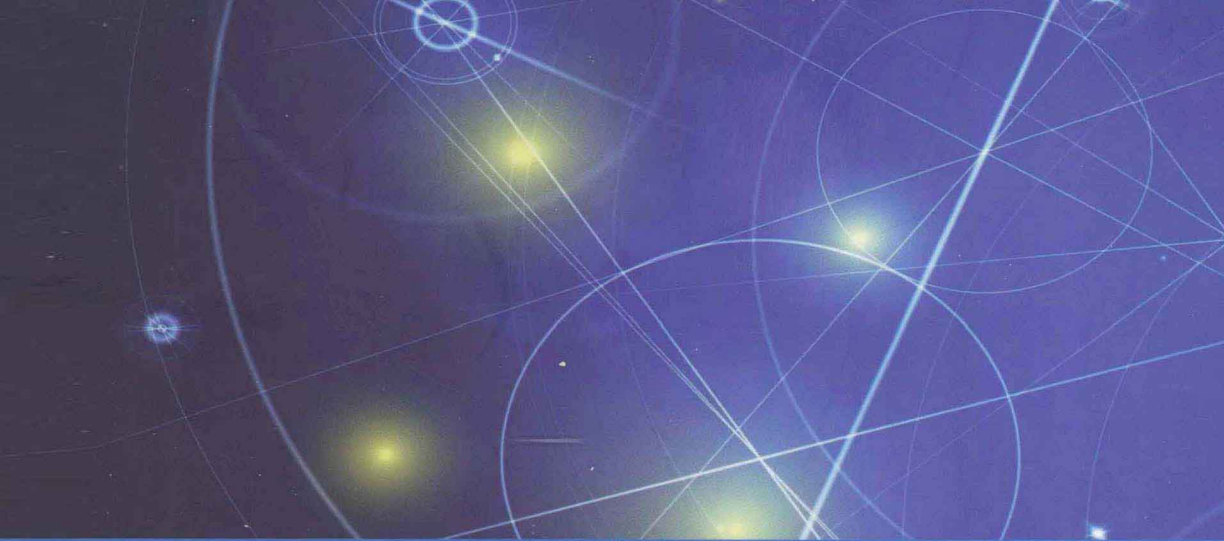




卫星干扰源 双星定位技术及工程应用

Satellite Interference
Location Technology
and Engineering Application

叶尚福 孙正波 夏畅雄 等著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

卫星干扰源双星定位技术 及工程应用

叶尚福 孙正波 夏畅雄 等著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书主要介绍了卫星干扰源定位技术的相关原理与技术,包括干扰源定位的意义、定位技术的现状和发展趋势;双星定位系统的基本原理和定位条件;定位系统中参数估计、提取技术;定位方程求解、定位误差分析以及定位误差校正技术;产生精确星历的无线电卫星定轨原理及方法;定位技术的拓展应用;典型卫星干扰源定位系统的设计及工程实现。

本书适合从事定位技术方向的研究生、工程师、学者阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

卫星干扰源双星定位技术及工程应用/叶尚福等著.

—北京:国防工业出版社,2013.7

ISBN 978-7-118-08689-8

I. ①卫… II. ①叶… III. ①卫星通信—干扰源—定位 IV. ①TN927

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 152331 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 14 字数 247 千字

2013 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 58.00 元



(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前言

近年来,随着卫星通信技术和相关业务的飞速发展,地面射频干扰对卫星通信的威胁也在日益增加。据欧洲电信卫星组织(EUTELSAT)的统计资料显示,每年都会有数百起干扰卫星通信的事件发生,并且这些干扰事件正呈现数量上的增长趋势。

卫星受到的干扰可分为有意干扰和无意干扰。无意干扰是指由于发射系统的结构不完善,上行信号的有关操作失误引起的干扰。比如操作错误的 VSAT 站、上行天线的波束性能较差、波束指向信息错误、临时增加的地面站等。这一类干扰时间短,干扰结果容易处理,影响面也不大。有意干扰主要是指有计划、有预谋的发射功率压制信号,或者有预谋的转发含有攻击信息的信号。这种干扰通常持续时间长,干扰后果严重,影响恶劣,是卫星反干扰需要针对处理的对象。

我国卫星通信系统中的大多数卫星的转发器处于不设防状态,抗干扰能力很低,人为阻塞卫星通信事件时有发生。这些干扰产生了极其恶劣的社会影响,也充分暴露了卫星安全方面的问题,再一次让我们认识到卫星安全防护问题的重要性 and 紧迫性。

要对卫星系统进行防护,首先要解决卫星安全威胁的检测识别问题。国外的卫星通信组织对卫星干扰和反干扰问题的研究起步较早,主要对策是首先通过卫星干扰源定位系统进行威胁定位,然后根据具体情况再采取有效的处理手段。现在在卫星干扰源定位系统研制上比较成功的主要有英国的 SatID 系统、美国的 TLS 2000 系统和法国的 HyperLoc 系统。这些系统都是采用 TDOA 和 FDOA 联合定位的双星(主星、邻星)定位方法,定位系统可以在 30min 内完成整个定位过程。系统的定位精度在 5km ~ 100km 的范围内。系统的关键是接收信号处理技术,国外系统都对其核心算法处理技术申请了专利保护。

卫星干扰源定位技术,国内研制起步较晚。此前从美国租用的 SatID 系统在使用中深感诸多不便,而从国外购置的 TLS2000 系统仅限于民用,执行定位任务十分透明,难以为国家的某些特殊任务服务发挥更大作用。因此,迫切需要我国自行研制相应的系统。

卫星干扰源定位相对于传统的侦测工作而言是一个新的领域,这一技术研

究将拓展我军现有的短波、超短波和雷达信号测向定位手段,开辟新的目标态势情报来源,具有深远的意义。

卫星干扰源定位技术不但可用于卫星干扰源的定位,也可用于卫星上行信号及其载体的侦察定位,如舰船发射站的定位、空中发射站的定位,还可用于对盗用卫星转发器的隐蔽信号(如扩频信号)进行发现和识别,最终实现定位。

双星定位技术的卫星平台也不仅限于地球同步卫星,而是可以拓展到低轨卫星,开发出低轨双星定位、高低轨双星定位等多种式样,以适应不同的需求。

双星定位技术其定位误差强烈依赖于卫星的星历精度,生成高精度的星历是双星定位系统中一项主要内容,因此在编写本书时特将自主生成高精度星历作为一章介绍给读者,以方便应用。

双星定位技术应用于动目标的定位与跟踪一直是我們十分关注的问题,目标运动将使得定位方程出现病态,为此增加先验信息和新的测量信息构造新的补充方程将是去病态的一个重要途径。

本书的组织编排共分为7章,第1章为概述,主要介绍干扰源定位的意义、国内外卫星干扰源定位技术的现状和发展趋势。第2章介绍了双星定位系统的基本原理和定位的条件。第3章主要介绍了定位系统中参数估计、提取的相关内容。第4章讨论了定位方程求解、定位误差分析以及定位误差校正技术。第5章分析了产生精确星历的无线电卫星定轨原理及方法。第6章论述了近年来双星定位技术拓展应用方面的内容,提升了双星定位的应用场景和范围。第7章介绍了研制的卫星干扰源定位系统的设计实现及其工作流程。

本书是西南电子电信技术研究所近年来在该领域探索研究、试验实践的主要成果,书中内容主要取材于各阶段的研究、论证、试验报告,以及各阶段从事相关研究的博、硕士研究生论文内容等。第1、2章由孙正波、马华山编写,第3章由孙正波、严航、魏合文编写,第4章由夏畅雄、瞿文中、杨宇翔编写,第5章由夏畅雄、彭华峰、王俊辉编写,第6章由叶尚福、严航、张韬编写,第7章由叶尚福、孙正波、余烨编写。全书由叶尚福院士统稿,并撰写了前言。

本书的编写得到了多位领导和专家的支持和帮助。国家无线电监测中心牛刚副总书记审阅本书并提出了修改意见;重点实验室万坚副主任、刘国才副主任等对本书的编写给予了大力支持;重点实验室的邓兵、张汇川两位硕士负责了主要的文字编排和校对工作,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中疏漏和不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2012年11月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 通信卫星干扰分析	1
1.1.1 通信卫星干扰事件	1
1.1.2 卫星干扰分析	2
1.2 国内外干扰源定位技术	3
1.2.1 卫星干扰源定位体制	3
1.2.2 同步双星干扰源定位技术的发展	4
1.3 卫星干扰源定位技术发展趋势	8
1.3.1 我国卫星干扰监测定位现状	8
1.3.2 卫星干扰监测定位的技术发展趋势	9
参考文献	10
第 2 章 卫星干扰源双星定位原理	11
2.1 双星定位基本原理	11
2.1.1 定位参数的形成	11
2.1.2 定位参数的估计	14
2.1.3 定位方程的建立	15
2.2 双星定位的条件分析	16
2.2.1 发射天线的旁瓣特性分析	16
2.2.2 卫星转发与地面接收	18
2.2.3 定位参数估计的可行性分析	19
参考文献	21
第 3 章 定位参数估计原理	22
3.1 参数估计模型	22
3.1.1 参数模型	22
3.1.2 估计方法概述	24
3.2 参数估计精度	26
3.2.1 互模糊函数参数估计精度	26

3.2.2 互模糊函数实现方法	29
3.3 参数估计的误差来源	30
3.3.1 DTO 估计的误差来源	30
3.3.2 DFO 估计的误差来源	34
3.3.3 DTO/DFO 的时变性	35
3.3.4 混频对 DFO 的影响及复相关处理	37
3.4 参数估计快速计算方法	38
3.4.1 参考信号引导的双模式搜索方法	38
3.4.2 数据分段参数提取方法	46
3.4.3 高效插值算法	54
3.4.4 算例	57
参考文献	58
第4章 定位方程求解	61
4.1 定位方程求解方法	61
4.1.1 迭代法	61
4.1.2 代数完备解	66
4.1.3 二分搜索法	71
4.1.4 算例	74
4.2 双星定位误差分析	75
4.2.1 定位误差的时域分布特性	76
4.2.2 定位误差空域分布特性	79
4.2.3 变参量影响分析	86
4.3 定位误差校正技术	89
4.3.1 利用参考站的定位方程	89
4.3.2 参考信号的相位校正作用	91
4.3.3 多参考站卫星星历补偿技术	94
4.3.4 算例	97
参考文献	100
第5章 无线电卫星定轨原理	101
5.1 卫星定轨模型	101
5.1.1 时间系统	102
5.1.2 IERS 公报和 JPL 星历	103
5.1.3 统计定轨轮廓	104
5.2 卫星动力学模型	106

5.2.1 地球引力场摄动	106
5.2.2 太阳辐射压力摄动	107
5.2.3 日月引力摄动加速度	108
5.3 多站主动定轨技术	109
5.3.1 主动定轨模型	109
5.3.2 仿真验证	110
5.4 多站同收无源测轨方法	115
5.4.1 多站同收无源测轨原理	115
5.4.2 仿真验证	117
5.5 卫星干扰源双星定位系统自主测轨方法	120
5.5.1 定位系统自主测轨原理	120
5.5.2 扩频参考信号参数估计技术	122
5.5.3 仿真验证	129
5.5.4 试验验证	132
参考文献	135
第6章 双星定位技术拓展应用	136
6.1 双星定位约束条件适应性拓展	136
6.1.1 同频对消处理技术	136
6.1.2 相关处理增益增强技术	140
6.2 双星定位信号类型适应性拓展	146
6.2.1 CDMA 信号定位参数估计技术	146
6.2.2 TDMA 信号定位参数估计技术	153
6.3 双星定位目标类型适应性拓展	159
6.3.1 运动属性判证技术	159
6.3.2 海面卫星辐射源定位技术	167
6.4 双星定位信号截获平台拓展	181
6.4.1 低轨双星定位技术	181
6.4.2 高低轨道组合双星定位	184
参考文献	188
第7章 典型卫星干扰源双星定位系统设计与实现	190
7.1 定位系统的组成与实现	190
7.2 定位系统的工作流程	197
7.3 定位体制构想	202
参考文献	204

附录 A 坐标系说明及相互转换	205
A.1 坐标变换旋转矩阵	206
A.2 坐标变换关系	206
附录 B 轨道积分	209
B.1 运动方程和变分方程	209
B.2 数值积分方法	210
B.3 Adams-Cowell 预报-校正算法 (PECE)	211
B.4 轨道积分器精度分析	213
参考文献	216

第 1 章 概 述

1.1 通信卫星干扰分析

1.1.1 通信卫星干扰事件

近年来,随着卫星通信技术和相关业务的飞速发展,地面射频干扰对卫星通信的威胁也在日益增加。据欧洲电信卫星组织(EUTELSAT)的统计资料显示^[1],每年都会有数百起干扰卫星通信的事件发生,并且这些干扰事件正呈现数量上的增长趋势,卫星安全问题备受关注。

世界范围影响巨大、发生较早的通信卫星受干扰事件发生在 1986 年 4 月 26 日^[2]。美国佛罗里达传输中心的操作工程师 John R. MacDougall 生活窘迫,对电视节目 Home Box Office(HBO)的收费政策非常不满。他利用公司闲置的发射天线,以美国电视节目 Captain Midnight 的名义,向转播卫星 Galaxy 1 的 23 号转发器发送信息,并不断调整发射功率压制做出应变措施的正常信号,使得 HBO 的美国东部用户在四分半钟的时间里一直收看到下面的标题信息:

GOOD EVNING HBO
FROM CAPTAIN MIDNIGHT!
\$12. 95/MONTH?
NO WAY!

这次干扰被称为“Captain Midnight”事件,它在美国的军用和商用卫星安全问题上产生了巨大影响,直接导致了一系列关于卫星安全管理、使用防护措施的实施。

我国卫星通信系统的大多数卫星转发器处于透明转发状态,抗干扰能力很低,人为阻塞卫星通信事件时有发生。

1998 年 3 月,“亚太一号”卫星 2A 转发器受到不明信号干扰,造成国家地震预报卫星通信网等无法正常工作。

2002 年 6 月和 9 月,“鑫诺”卫星受到非法电视信号攻击,致使中央电视台“村村通”节目和中国教育电视台、部分省级电视台的节目传输受到严重干扰。

2003 年 10 月 15 日,实况转播“神州 5 号”载人航天的“鑫诺”卫星 2A、3A

转发器受到恶意干扰。

2004 年 11 月 20 日晚和 2005 年 3 月 14 日晚,我国“亚洲”3S 卫星受到恶意干扰,致使多个省市电视台信号中断达 4 个小时。

这些干扰事件产生了极其恶劣的社会影响,充分暴露了卫星安全方面的问题,体现了卫星安全防护和干扰查处问题的重要性和紧迫性。

1.1.2 卫星干扰分析

根据目的性和持续特点,通信卫星受到的射频干扰可分为有意干扰和无意干扰两类。有意干扰或无意干扰都是不能允许的行为,必须受到查处。

无意干扰是指由于发射系统的性能不够完善、上行信号的误操作引起的干扰。这一类干扰时间短,干扰结果容易处理,影响面也不大。引起干扰的主要原因有以下几个^[3]:

(1) 空间干扰,包括邻星干扰(上行天线的波束性能较差,使得主瓣过宽或者旁瓣太强,对邻近卫星造成干扰)、相邻信道干扰、不规范操作误发信号干扰(地面站波束指向信息错误,临时调试的地面站工作功率过大使转发器信号过载等)。

(2) 地面干扰,包括地球站设备杂波干扰和电磁干扰(干扰及杂波进入射频单元被发射到卫星上)、互调干扰(中频信号泄漏到邻近射频单元被调制并回授到自己的射频单元)、交叉极化干扰(极化隔离度不够)。

(3) 自然干扰,包括雨衰、日凌、电离层闪烁、卫星蚀等。

(4) 地面雷达、微波站等辐射源对卫星的干扰。

有意干扰主要是指有计划、有预谋的发射功率压制信号,或者有预谋地转发含有攻击信息的信号。这种干扰通常持续时间长,干扰后果严重,造成非常恶劣的影响,是卫星反干扰需要针对处理的对象,前面提到的几次干扰事件就属于有意干扰。这种干扰从形式上看,种类很多,对我国通信卫星实施的干扰主要有堵塞式干扰(强占转发器功率,将转发器全部阻塞,干扰源频谱可与正常信号重叠,也可不重叠)和插播干扰(即利用“功率掠夺”插播非法信号,使正常工作的接收台站收到干扰方的非法信号)两种形式。另外,对于那些未经卫星运营商同意而擅自使用星上频率资源的非合作用户,或者采用扩频等手段非法盗用星上频率资源的不明载波,对通信卫星而言通常也认为是有益的射频干扰。

从干扰信号的形式上看,有强固定信号干扰、弱强固定信号干扰、宽带脉冲信号干扰、宽带视频信号干扰、连续波信号干扰、扫频干扰等。随着 VSAT 通信

设备的广泛使用,窄带扫频干扰成为最普遍的形式,但也存在同时干扰多个转发器的宽带干扰,如“法轮功”邪教组织对我国“鑫诺”卫星、“亚洲”3S 卫星的干扰就属于宽带扫频干扰。

针对通信卫星的射频干扰,对卫星系统进行安全防护,是一项复杂的系统工程,涉及诸如卫星的原始安全防护设计等多方面的问题,应统一规划,协同配合实施。尽管卫星情况各有不同,但所有卫星在系统进行安全防护时都必须首先解决对卫星安全构成威胁的诸种因素的检测、识别和定位问题,以提供为维护我国卫星安全运行必需的技术支持,因此研制卫星安全威胁的检测、识别和定位的手段和装备十分必要。目前,由于我国在用的地球同步通信卫星绝大多数都没有针对干扰配置必要的星上处理手段,只能依靠以地面设备为主的干扰源探测定位装备。

1.2 国内外干扰源定位技术

1.2.1 卫星干扰源定位体制

卫星干扰源定位技术是指利用各种监测定位手段,对向卫星发射的干扰辐射源信号实现定位的技术统称,通常是指对于非合作发射站的定位。目前该领域的研究和装备以通信发射站为主要目标,兼顾雷达等其他电子目标。在平台模式上,目前以地面接收处理为主要方式,并正在发展星载监测处理手段。

从定位技术的不同侧面进行分析,对卫星上行信号的定位存在多种技术体制。

如果按照定位对象的不同,定位体制可以划分为两大类:第一类是对合作用户的导航定位。这种定位通过用户自身发射信号或者接收由定位服务方发射的信号,利用伪码测距与测时差相结合等方法,可以获得几十米的定位精度,如GPS 和我国自行研制的“北斗”卫星导航定位系统。第二类是对非合作用户或者干扰辐射源的定位。这种定位由于定位对象和定位平台之间不存在合作关系,必须由定位平台独立完成对目标上行信号的定位,通信卫星干扰源定位工作主要就是围绕这种对非合作用户的定位展开。

如果按照定位平台的不同,定位体制也可以划分为两大类:第一类是采用空中平台作为定位设备载体,空中平台可以是高轨或者同步卫星,也可以是低轨卫星或者飞机等快速移动平台。第二类主要是利用地面平台进行处理,卫星只是进行简单的信号转发。

根据定位所用卫星数量的不同,实现定位的技术体制可以划分为单星定位、双星定位和多星(三星及更多)定位3种。而广义的双星上行信号定位包括双

地球同步卫星定位体制、地球同步卫星/低轨卫星的异轨双星定位体制、双低轨卫星编队定位体制三大类。

开展对非合作发射信号的定位主要是用于卫星的安全防护、在轨卫星的频谱资源管理等目的,因此主要立足于利用后期建设的地基系统。双同步卫星定位体制在定位条件方面容易满足,且定位精度等综合性能较好,因此得到了广泛的研究和应用。本书的重点内容也是围绕该定位体制展开。

1.2.2 同步双星干扰源定位技术的发展

国外对卫星上行信号定位问题研究起步较早,现有比较成功的卫星干扰源定位系统主要有英国的 SatID 系统、美国 TLS 2000 系统和法国的 HyperLoc 系统。添加 Insnech 三套系统的核心处理技术都是利用上行信号通过双同步卫星引起的时差/频率差进行定位,然后根据具体情况采取有效的手段进行查证。

1982 年,英国国防评估研究局(Defense Evaluation and Research Agency, DERA)开始研究利用时间差和频率差进行 UHF 频段移动通信信道的干扰定位问题,S. Stein 等对利用模糊函数估计时间差和频率差参数开展了大量的模型和方法研究^[4];1986 年—1990 年又开展了利用 SHF 频段的卫星信道进行干扰源定位的研究;1993 年开始,以 DERA 为主的 EUTELSAT 研究小组对卫星干扰源定位的各种关键技术进行了详细的研究^[5-7],D. P. Haworth、N. G. Smith 等分析设计了系统模型与框架。

在这些研究基础上,DERA 与英国 Merlin 国际通信有限公司合作,联合生产了相应的定位系统—SatID^[8]。配置相应频段的射频前端后,系统可以在几分钟内完成对卫星上行信号的定位,误差为 5km ~ 100km,现在已经在欧洲、北美、新加坡等地区或国家进行了部署,图 1.1 所示为主要设备组成图。

作为卫星技术的领先国家,美国在卫星上行信号定位研究方面起步比英国更早。20 世纪 70 年代末,美国麻省理工学院(MIT)的林肯实验室就开展了利用卫星对地面发射源进行定位的研究工作^[9]。该研究的初始定位目标是地面的跳频发射源,虽然在 1986 年的“Captain Midnight”事件发生之后,主要研究方向转向卫星干扰源定位,但原有研究仍在继续,Alexander Sonnenschein 等还就此发表了专门的研究文章^[10]。

1987 年,美国海军航空指挥部与 DERA 联手,开展了 UHF 卫星信道的干扰源定位技术研究^[11]。另外,美国海军研究生院自 20 世纪 90 年代以来持续的研究利用时间差和频率差的定位技术^[12]。1996 年、1997 年和 2000 年,利用双同步卫星进行上行信号定位的关键技术在美国和欧洲申请了专利^[13-18],标志着整个定位系统的核心技术已经成熟。

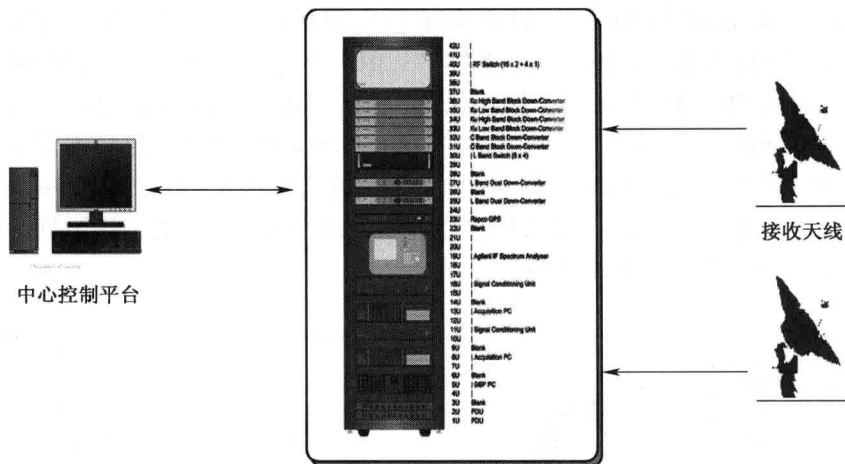


图 1.1 SatID 主要设备组成图

此后,具有美国军方背景的 INTERFEROMETRICS 公司将上述研究和关键技术成功进行了系统设计和产品定型,并于 1999 年推出了商业化定位系统—TLS Model 2000^[19]。该系统在美国本土进行了部署,国家无线电监测中心也在 2003 年成功引进了相应系统。该系统定位时间通常为 30min 以内,定位误差为 5km ~ 20km,但系统的核心技术和技术维护升级都由美方掌握。图 1.2 是其设备组成框图。

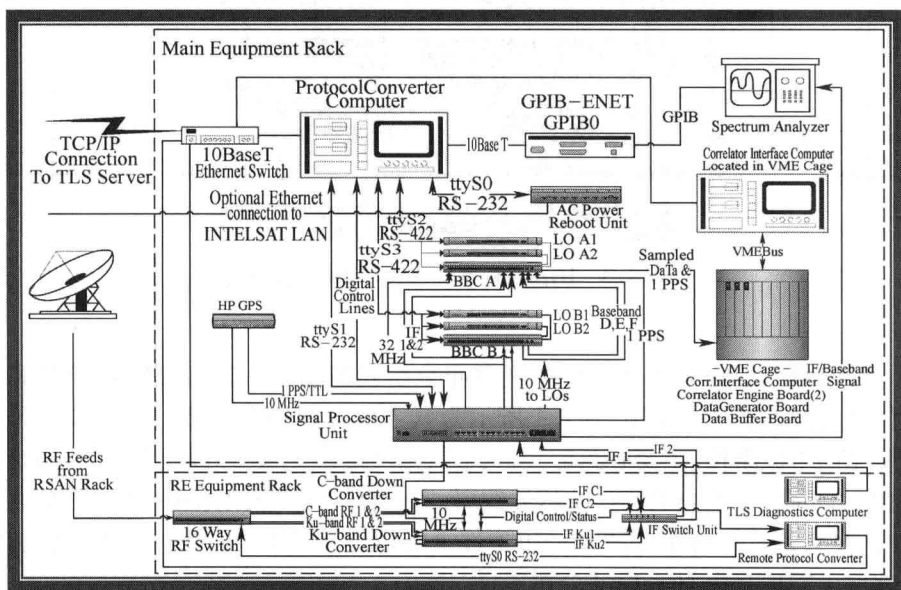


图 1.2 TLS 2000 设备组成框图

2004 年,法国 THALES Land & Joint 宣布研制成功了一套卫星频谱监测和上行信号定位设备——HyperLoc 系统^[20],图 1.3 是其主要设备组成框图。该系统主要由 THALES 公司的合作承包商——法国的 NovaGrid 公司研究完成频谱分析、上行信号定位、信号仿真分析等核心处理软件,具备卫星频谱监测和转发器分析能力,可以在 5min ~ 15min 内处理完成几秒的信号数据,在 L 频段的典型定位误差为 80km,在 Ku 频段的典型定位误差为 150km。关于该系统的研制过程和核心技术,尚无公开的资料。

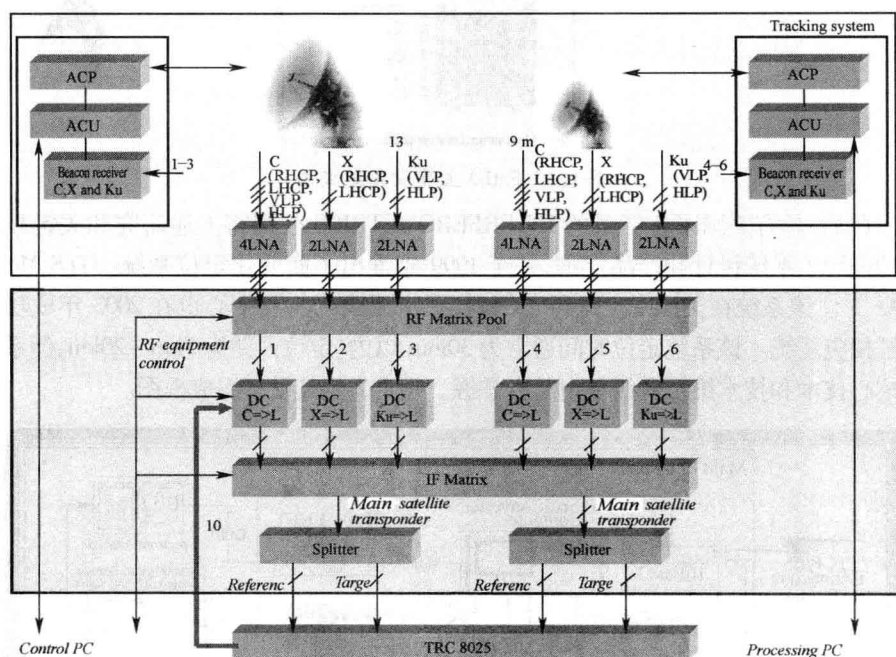


图 1.3 HyperLoc 系统主要设备组成框图

2009 年,法国的 IN-SNEC 公司宣布也研制成功了一套卫星频谱监测和上行信号定位设备——CGL,图 1.4 所示为其主要设备组成框图。该系统也采用紧凑型的组成架构,主要有频谱分析、上行信号定位等核心处理软件。该系统可以在 10min 内处理完成几秒的信号数据,定位精度比之前的 HyperLoc 系统有所提升,在具备较好的参考站和星历条件下可以达到 30km 以内。系统配属的定位软件可能也是由 NovaGrid 公司提供。

由于该技术可以直接扩展应用于军事目标上行信号定位,具有良好的军用

价值,因此上述几套系统都对其核心处理技术申请了专利保护,特别是对中国保密,很难获得核心处理技术的相关资料。

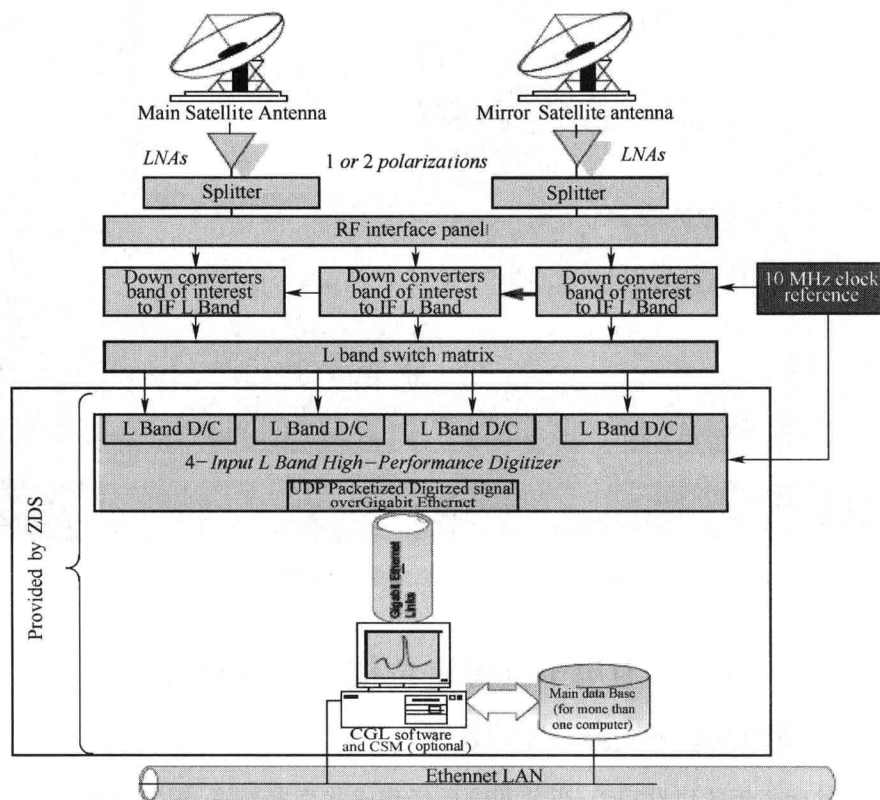


图 1.4 CGL 系统主要设备组成框图

国内对该定位体制的研究开展较少^[21-24],只有西南电子电信技术研究所开展了系统研制工作,2005年9月研制成功了“天眼”系统。经过几年的持续改进,“天眼”系统已经集成具备了卫星通信信号监测、上行信号定位跟踪、同步轨道卫星无线电测轨等几大功能。目前该系统可以快速监测 800MHz 的通信带宽,实现调制识别和参数测量;对上行信号定位的精度优于 30km,并具备运动发射站的定位跟踪能力;对同步轨道卫星的测轨精度可达 1km 以内,如图 1.5 所示。

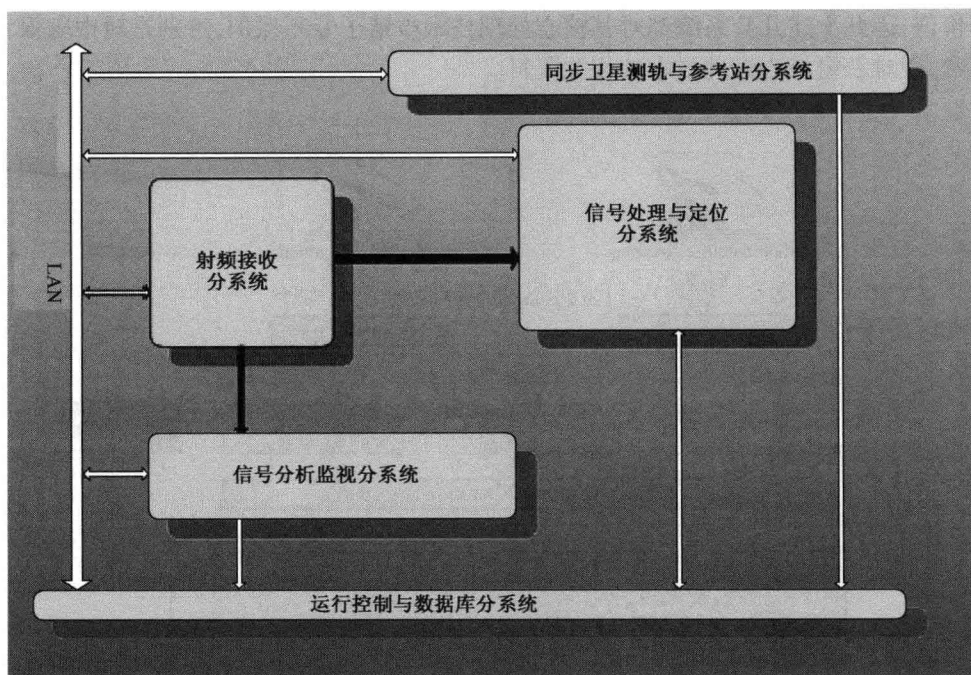


图 1.5 “天眼”系统主要组成框图

1.3 卫星干扰源定位技术发展趋势

1.3.1 我国卫星干扰监测定位现状

经过近些年的建设完善,目前我国已经建成北京大兴站、深圳站南北两个卫星通信监测定位的中心,具备对我国上空 $50^{\circ}\text{E} \sim 180^{\circ}\text{E}$ 的通信卫星信号开展监测和定位的能力,基本满足了我国十几颗在轨通信卫星安全保障的要求。但随着卫星通信技术的发展,已建的监测定位系统也逐步凸显出一些应用的局限。

(1) 对于特殊信号的适应性尚待加强。近几年来,TDMA、CDMA 等组网方式在卫星通信中大量采用,对于卫星频谱的监测管理带来较大影响,而时短信号、同频插播信号、单频扫描信号等特殊的干扰形式也大大增加了开展定位和查处的难度,现有系统在对这些特殊信号的参数估计和定位处理方面还缺乏针对性方法。

(2) 对于特殊平台的适应性不够。随着“动中通”技术的不断成熟应用,具备卫星通信发射能力的移动终端日益增加,再加上近年来我国卫星通信监测定位能力提升对潜在恶意干扰者的威慑,车载、船载甚至机载都可能成为今后用于