



中国伽利略测试场研究进展

蔚保国^{①*}, 李隽^①, 王振岭^②, 王珏^②

① 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄 050081;

② 河北省卫星导航技术与装备工程技术研究中心, 石家庄 050081

*E-mail: ybg_cti@263.net

收稿日期: 2011-03-14; 接受日期: 2011-03-25

摘要 本文以中国伽利略测试场(CGTR)项目为背景, 详细介绍了基于微波暗室的室内测试环境、基于伪卫星网络的室外测试环境和基于软件接收机和仿真设施的多媒体综合应用推广平台的整体方案, 并介绍了这些系统的最新研究进展, 以及主要的技术突破情况. 本文对卫星导航接收机测试、室内外测试环境建设、软件接收机研究、以及相关应用推广仿真具有重要的参考价值.

关键词 伽利略, CGTR, 室内测试, 室外测试, 应用仿真, 软件接收机

PACS: 91.10.Fc, 93.85.Bc, 94.20.Cf, 91.10.Sp, 95.75.Tv

1 引言

卫星导航系统建设是技术密集、资金密集型的系统工程. 其测试试验环境是支撑卫星导航系统建设的重要设施, 也是卫星导航系统长期运营的基础条件; 它对地面设施及其接收机研制和生产也具有十分重要的保障作用. 国外特别重视卫星导航测试试验环境的建设, 出现了专门用于卫星导航专业的测试场, 包括: 美国的“反向 GPS 测试场”(IGR), 欧洲德国的“伽利略测试环境”(GATE)和“海港伽利略测试环境”(SEA GATE), 意大利计划建设的“伽利略测试场”(GTR)等^[1]. 在中国接收机与用户终端的生产厂商需要对其生产的接收机进行测试和认证的环境, 同时他们还需要能够支持其接收机与用户终端研发的实验环境; 伪卫星研究机构需要伪卫星实验平台进行信号与体制的研究; 公众需要增加对卫星导航性能与应用的了解. 基于这些需求我国与欧盟合作

开展了中国伽利略测试场(CGTR)项目的建设. 本文对 CGTR 项目当前研究进展和主要技术突破情况进行了详细介绍.

2 室内测试环境

2.1 总体方案

室内测试环境(Indoor Test Environment, ITE)是由中国权威机构授权的一个受控的导航接收机及用户终端测试认证环境.

它能完成导航接收机的功能、性能、环境、安全、电磁兼容测试认证工作. ITE 环境中还有一个基于氢原子钟的时频中心, 它能维持一个独立连续的时频基准, 并可与外部卫星导航系统(如 GPS 和 Galileo)等保持时间同步. ITE 系统如图 1 所示.

CGTR 室内测试认证环境(ITE)依托中国国家通信导航质量监督检验中心建设. CGTR-ITE 可完成对

引用格式: 蔚保国, 李隽, 王振岭, 等. 中国伽利略测试场研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 528–538

Yu B G, Li J, Wang Z L, et al. China Galileo test range research and status (in Chinese). Sci Sin Phys Mech Astron, 2011, 41: 528–538, doi: 10.1360/132011-331

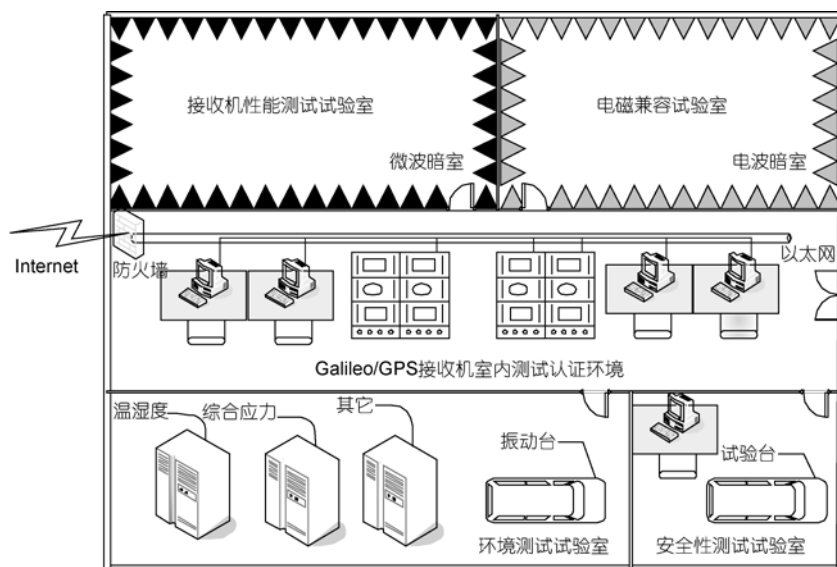


图 1 室内测试环境系统示意图

Figure 1 Indoor test environment system diagram.

Galileo/GPS 组合接收机以及用户终端的测试与试验。CGTR-ITE 将是未来中国区域 Galileo 接收机国家级测试认证中心, 并具有欧盟测试认证资质。

另外, ITE 的体系结构为一灵活的可扩展的体系结构, 通过升级, 可支持:

(1) BEIDOU, Compass, Glonass 等用户接收机的测试;

(2) GPS/Galileo/Beidou/Compass/Glonass 多模用户接收机的测试;

(3) 多功能的用户终端的测试, 如 SAR, 通信导航一体化终端;

(4) 本地增强用户接收机和广域增强用户接收机的测试。

2.2 关键技术及进展

ITE 系统中包含的设备与关键技术比较多, 主要的关键技术及难点包括: 双模导航信号模拟器技术, 多模测试接收机技术, 多模接收机测试评估方法等。

2.1 双模导航信号模拟器技术

卫星导航信号模拟器是一种高精度的标准信号源, 可以模拟产生卫星导航信号 (GPS, Glonass, Galileo 等), 为导航接收机的研制开发、测试提供仿真环境。它功能强大, 应用非常广泛: 比如可以产生特定的导航信号, 验证测量方案的可行性; 产生高动

态导航信号, 检验接收机的捕获跟踪性能; 以及作为比较标准, 检验导航接收机的动态测量精度^[2]。

在 ITE 系统中的导航信号模拟器能够实现 GPS 和 Galileo 多颗卫星、多个频点的导航信号模拟产生, 关键技术涉及信号的产生与精度控制、电离层折射误差模拟等方面。

当前采用导航信号由硬件产生, 各种模型的模拟在软件实现的方案, 已经顺利完成了该双模模拟器的研制, 其主要指标都已得到验证。这种实现方法的优点是能够实时产生测试信号。

由于软件主要模拟缓慢变化的信号特征, 硬件实现对快速变化信号特性的模拟实现; 包括信息调制、伪码调制、以及中频调制等都由硬件完成, 它能保证信号的实时产生与精度要求, 因此该导航信号模拟器能够及时完成对这些模拟的计算^[3]。采用这种实现方式的导航信号模拟器, 能够完成长时间的测试任务。该模拟器如图 2 所示。

2.2 多模接收机测试评估方法研究

多模卫星导航接收机测试可以分为仿真、室内与室外测试三种模式。计算机仿真评估环境是一个全软件的信号仿真模拟环境。其主要由多模卫星导航信号模拟器和多模软件接收机构成。多模卫星导航信号模拟器完成星座模拟、信号产生、信号模拟等功能。软件接收机实现信号的捕获和跟踪。数据后处理

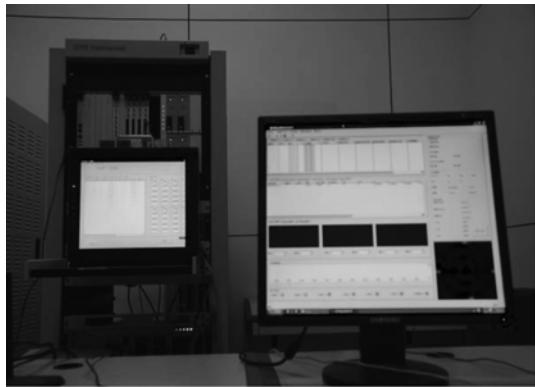


图2 GPS/Galileo 双模导航信号模拟器
Figure 2 GPS/Galileo signal generator.

模块完成必要的后处理工作. 室内测试环境包括可配置的多模 GNSS 接收机平台和多模 GNSS 信号模拟器, 两者通过有线或无线连接. 室外测试环境除包括

多模 GNSS 接收机平台外, 还包括空间在轨卫星及地面伪卫星网络, 共同提供多模 GNSS 信号^[4]. 多模接收机测试环境如图 3 所示.

基于本课题的研究, 当前已经完成了基于该环境的多模接收机下列主要指标的测试评估方法研究:

- (1) 接收机启动到定位测试;
- (2) 多模卫星导航接收机伪距测量精度测试;
- (3) 多模卫星导航接收机灵敏度测试;
- (4) 多模卫星导航接收机兼容性测试;
- (5) 多模卫星导航接收机互操作性测试.

2.3 多模导航接收机技术

CGTR 系统内的多模卫星导航接收机既用于 ITE 和 OTE 环境下作为测试接收机进行闭环检验, 也用于 ITE 导航信号模拟器中作为自环标定的一个必备设备. 它同时支持伪距和载波相位测量, 伪距测量精

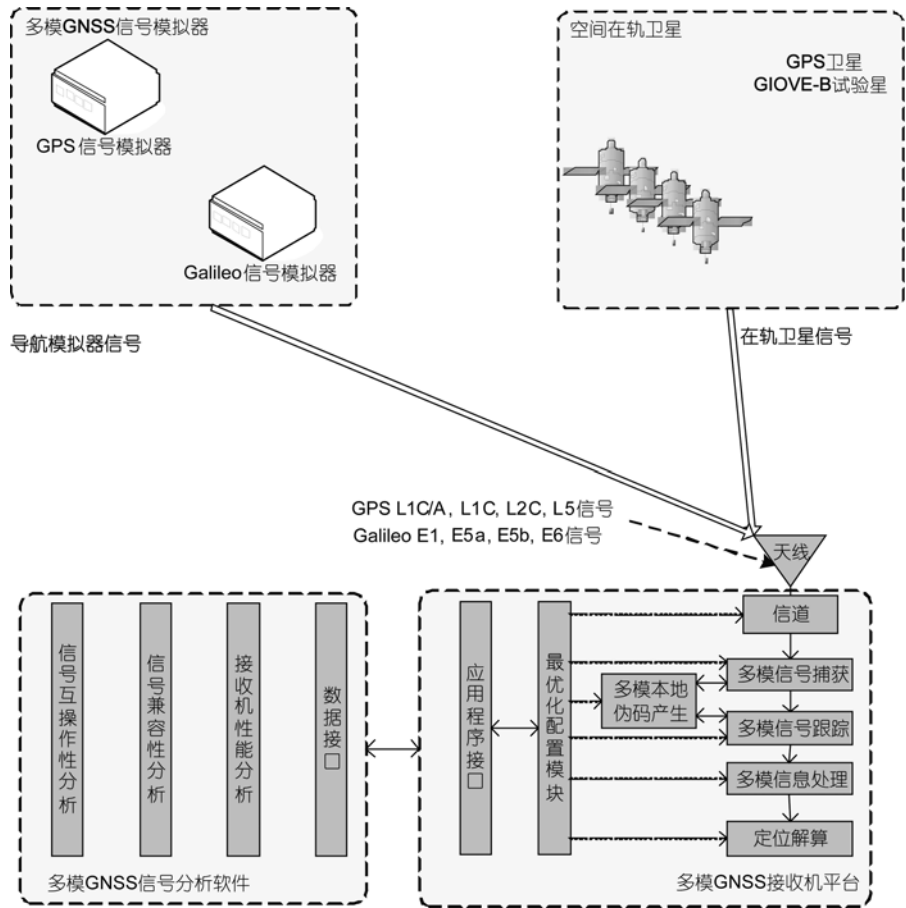


图3 多模卫星导航接收机测试环境
Figure 3 Test environment for multimode receivers.

度 15 cm RMS, 相位测量精度 1% cycle RMS, 与其他测试环境接收机水平相当^[5].

由于目前 Galileo 系统和 GPS 系统在各个频点上共同占用频谱, 它们采用不同的信号调制技术以保证信号的兼容性^[6]. 因此 CGTR 系统中的多模导航接收机需要使用更多的新调制解调技术, 并通过技术手段保证解调的高精度实现.

当前满足 CGTR 系统使用需求的各种多模导航接收机都已研制完毕, 正在配合系统进行集成、联调与测试.

3 室外测试环境

室外测试环境(Outdoor Test Environment, OTE)是一个通过地基伪卫星提供 Galileo 开放服务空间信号的无线电导航系统, 其主要任务并不是在某一区域内取代 Galileo, 而是用于评估 Galileo 系统可用用户所具备的响应能力, 并支持户外条件下的系统测试和试验. 作为 CGTR 的重要组成部分, 该系统实现了原型 Galileo 卫星 GIOVE-A, 第一颗 Galileo 卫星(IOV)以及现有的 GPS 系统的集成. 目前, 该系统全部设备已经制造完毕, 正处于系统试验和出厂验收准备阶段.

3.1 总体方案

OTE 的主要组成部分包括 6 个 OTE 信号发射站、2 个监测接收机站(OMR)、1 个 OTE 移动用户测试平台(OUT)、1 个 OTE 运行控制中心站(OOC)、以及 OTE 通信网络(OCN)及其他附属设施, 其中运行控制中心站包括 OTE 处理设施(OPF)、OTE 监控设施(OMCF)、OTE 存档与数据服务设施(OAF)以及 OTE 任务规划设施(OMPF). 图 4 给出了 OTE 的组成及部署示意图.

整个 OTE 区域可以分为测试床区域(Test Bed Area, TA)和用户服务区域(User Service Area, SA)两类. 测试床区域, TA 是一个可以提供精确位置服务的区域, 具有性能测试和验证能力, SA 是为用户合理的实验选定的部分区域, 在其中能够至少同时收到 4 个发射平台的信号从而实现全 3D 定位能力.

空间 GPS 卫星、伽利略卫星和地面 OST 伪卫星可以同时向 OTE 测试场区域发射无线信号.

安装于 OUT 的测试接收机和用户接收机同时接收这些信号, 完成导航定位和时间测量, 并向 OTE

处理中心(OPF)实时发送自身 GPS 定位信息. 同时监测站接收这些空间信号, 对 OST 的信号进行测量, 将测量结果送到 OPF 进行处理, 以便完成 6 个 OST 发射导航信号的时间同步; 并对 GPS 信号进行测量, 输出 GPS 时间给 OPF 处理.

OTE 利用共视技术完成与 CGTR 时间的同步, 并利用授时服务器完成对 OTE 的授时, 并将同步观测结果送给 OPF, 由 OPF 进行共视数据处理. OPF 一方面对监测站送来的 GPS 时间和共视的 OTF 时差信号进行处理, 将监测站时间同步到远端 CGTR 时间; 另一方面还对 6 个 OST 伪卫星的时间拨发信号进行处理, 将 6 个伪卫星的时间同步到监测站的时间上, 这样 OST 伪卫星、监测站和远端 OTE 时间就建立了同步关系; 同时 OPF 在不同的工作模式下, 完成导航电文生成和控制信息, 通过无线网络发送给 OST 伪卫星.

OTE 的监控中心(OC)完成对整个 OTE 系统的监控, 并对设备工作状态和信息进行记录. 整个 OTE 的工作按照由 OMPF 产生的用户任务计划来运行, 用户计划规定了整个系统的运转任务.

OTE 具有 5 种“工作模式”, 即初始化模式(IM)、基本模式(BM)、扩展基本模式(EBM)、全仿真(VFOC)模式、脉冲模式(PM)和混合模式. IM 用于“初始化”OTE 系统, 仅用于启动 OTE 系统, 其主要任务是将 OMR 时钟和所有 OST 时钟同步到 OTE 时间, 而不需要向进行接收机测试的用户提供 OTE 信号. 在 BM 模式下, 发射站以恒定功率电平发送未调制(相位与多普勒)的 OTE 信号, 只要用户位于定义的业务区内, OTE 就能够为任意数量的用户提供服务. EBM 模式下, 系统根据用户位置对发射站的信号功率电平进行动态调整从而补偿远近效应, 对 BM 进行扩展, 但此时 OTE 仅能为一个用户提供服务. VFOC 模式下的多普勒频移和载波与码的信号功率电平经过调制与来自空间真实卫星的信号基本一致, 这要求在 OPF 内完成对卫星运动、信号路径延迟等的高精度仿真, 导航电文广播则包括虚拟卫星的星历, 进而可以实现真实卫星与 OTE 的联合服务. PM 是 OTE 特有的一种模式, 该模式与基本模式 BM 类似, 信号发射机以恒定功率电平发射信号, 但采取脉冲控制措施避免 OST 伪卫星与其他真实卫星间的远近问题. 混合模式下, OTE 作为对另一系统的增强系统, 这一点主要通过将广播时钟参数改为所需值(OPF 的功能)来完成.

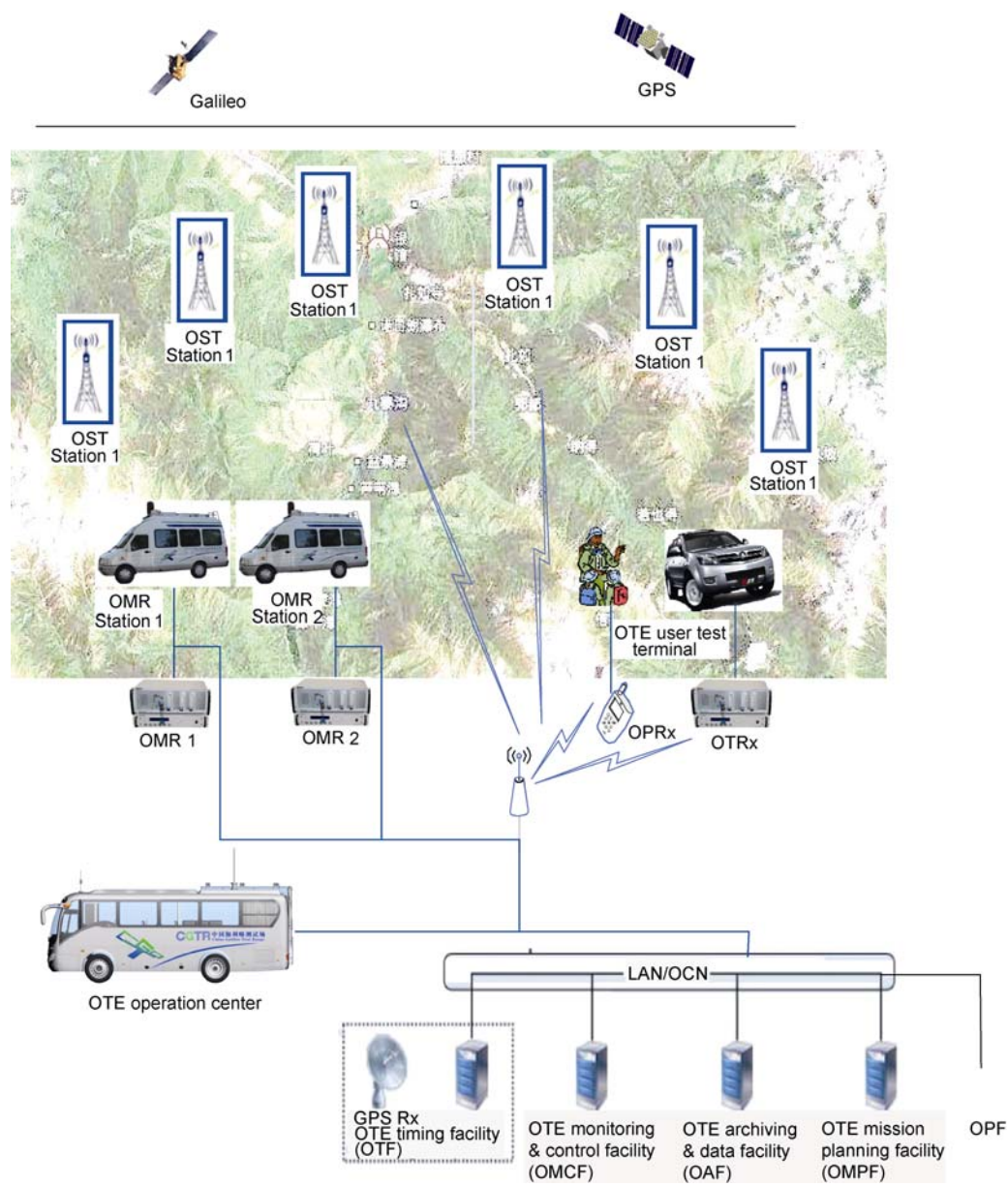


图 4 OTE 的组成及部署示意图
Figure 4 OTE system diagram.

OTE 系统采用了模块化的设计, 还可以通过增加监测接收机(OMR)进行控制从而操作更多的伪卫星(最多可以有 12 个). 所选测试区内发射站址的选择决定了伪卫星信号设计, 特别是发射功率和脉冲方案. 在选择特定区域配置时, 要利用仿真软件考虑干扰问题(OTE 系统内以及对卫星号航系统的外部用户).

3.2 OTE 关键技术

根据总体方案, OTE 系统的研制和部署涉及多项关键技术, 包括信号设计、核心设备研制、系统部署等多个方面, 其中以伪卫星研制及其组网、专用监测接收机研制、时间同步、基于无线网络通信的统一调度管理、场地选址等最为重要.

3.2.5 场地选址

OTE 的选址将为系统部署提供满足地形、电磁环境、配套设施等各种要求的部署场地, 并且作为 OTE 建设的前提和基础, 选址工作决定了整个系统的部署、运行和可实现的性能, 该工作的实施需要根据 CGTR 的整体系统需求并综合考虑中国境内区域的地理环境和条件来进行, 因而至关重要。

选址工作共分为预选、仿真筛选和实地勘测三个阶段, 课题组进行了大量的工作, 选址区域目前集中在华北地区以及北京市周边, 并已进入仿真筛选阶段, 图 6 给出了其中的两个预选区域的示意图。

根据 OTE 的部署需求, 场地在满足一定面积(不小于 25 平方公里)的前提下, 应满足伪卫星发射站部署区域、中心监测站区域和测试区域等区域划分要求, 可以理解为一个盆地、或四面环山、或周围能够提供海拔较高山峰的地理环境。并且中心监测站区域附近需要具备供电条件和基本的后勤保障条件。

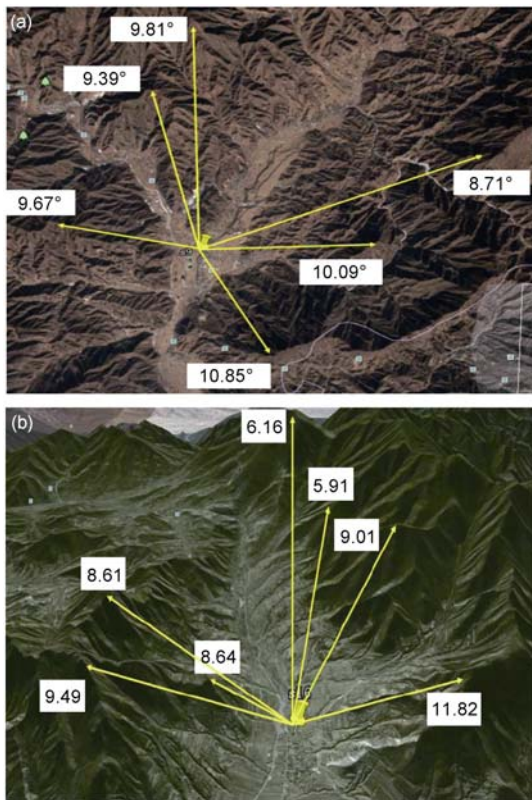


图 6 OTE 预选场地

(a) 预选场地之一; (b) 预选场地之二

Figure 1 OTE candidate fields. (a) Candidate fields I; (b) candidate fields II.

目前选址工作已经进入仿真筛选阶段, 并将在系统设备全部完成出厂验收之前完成实地勘测, 并做好部署准备。

3.3 OTE 系统进展

3.3.1 设备研制进展

截至 2011 年 1 月, OTE 系统的全部分机研制设备已研制并测试完毕, 目前在德国进行集成和系统试验。共包括 6 套伪卫星发射设备、两套 OTE 监测站接收机设备以及配套的控制单元、计算机软件等。

为完成部署前的缩微场系统验收和试验, 项目集成了 8 辆工程车辆, 包括 OST 移动站 4 辆、OMR 移动站 2 辆、OUT 测试平台一辆以及控制中心车一辆, 目前全部工程车辆已具备加电和试验条件。图 7 给出了有关车辆的照片。

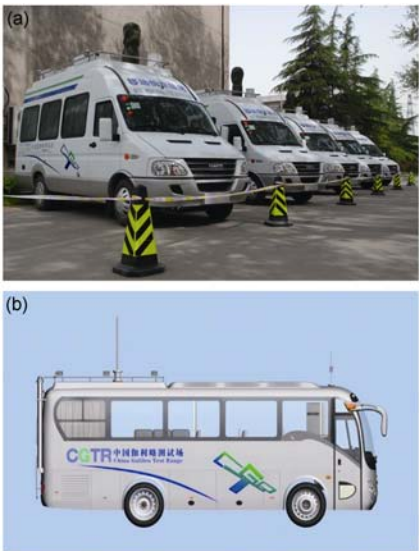


图 7 OTE 工程车辆

(a) 机动式 OST 及 OMR; (b) OOC 车辆

Figure 7 OTE components. (a) Flexible OST and OMR; (b) OOC components.

3.3.2 系统试验进展

2010 年 11 月, 在德国完成了 OTE 初样系统的验收测试工作, 目前由 CETC54 研制的设备已全部运抵德国合作伙伴 IFEN 公司, 正在进行核心系统的集成和联试工作。各种配套软件、基本设施也正处于联调试验和远程控制性能验证, 通信设备正在紧张的

进行实地通信试验.

在解决多项关键技术之后, 目前整个 OTE 系统的多项试验进展顺利, 各项基础条件也正在逐步的完善之中.

4 应用演示中心(ADC)

4.1 总体方案

应用演示中心(ADC)承担中国区域内对卫星导航技术、伽利略系统应用技术及其他相关技术的应用推广任务, 由应用仿真设施(ASF)、多媒体演示培训设施(MDTF)和多模软件接收机(SWRx)部分组成, 各部分通过局域网相互连接. ADC 系统架构如图 8 所示.

ASF 可提供针对 Galileo 系统功能、性能与服务的仿真, 为潜在用户决策提供依据. ASF 包括仿真软件与集成、仿真支持环境和仿真数据处理三部分. 仿真软件与集成部分是 ASF 的核心, 由仿真软件核心、集成仿真环境和仿真软件本地化包组成. 仿真数据处理能够为未来仿真用户提供仿真处理算法扩展能力. 仿真服务器与软件接收机的处理计算机及 MDTF 的服务器相连接.

MDTF 可用于以多媒体方式展示 Galileo 演示活动结果, 对潜在用户的多媒体培训等任务. 为实现其目标, MDTF 由三部分组成: 多媒体演示环境、多媒体制作工具和多媒体管理工具. 多媒体演示环境负责演示、培训活动的实现, 包括影音系统、多媒体控制中心、演示效果生成包、演示数据处理包、演示管理软件包和演示模型包. 多媒体演示培训子系统提供 GNSS 相关多媒体资源来对演示、培训活动进行支持. 多媒体制作工具包括多媒体硬件工具和多媒体软件工具两部分, 支持视频编辑、音频加工等工作. 多媒体管理工具负责多媒体资源的存储与管理, 它包括多媒体管理软件和多媒体资源库两部分. MDTF 的硬件设备包括多媒体服务器、演示培训控制设备和影音设备.

为了支持多模 GNSS 接收机技术研究, 同时便于对 Galileo 系统的演示活动, ADC 配备了多模软件接收机, 以灵活实现对多种业务的演示任务.

4.2 关键技术及进展

4.2.1 应用仿真技术

应用仿真设施(ASF)由导航系统仿真设施(NSSF)、

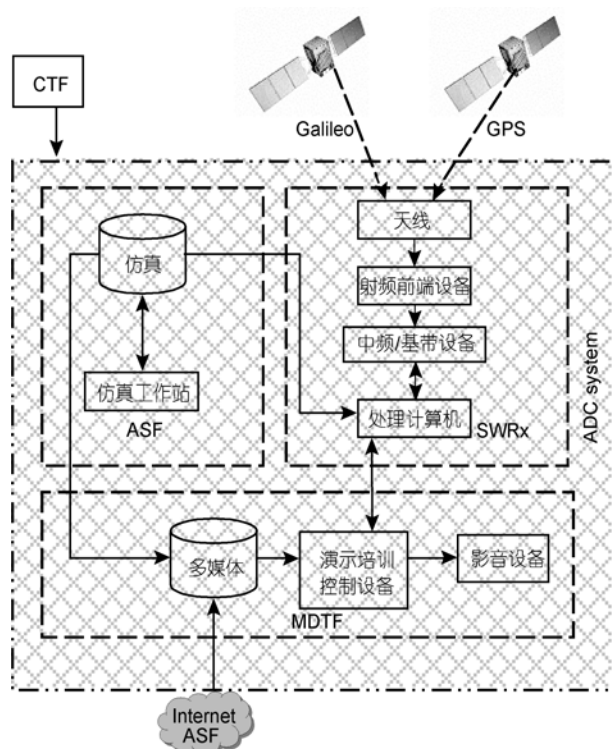


图 8 ADC 系统架构图

Figure 8 Architecture of ADC.

软件导航信号模拟器(SNSS)和集成仿真环境(ISE)三部分组成, 体系结构如图 9 所示; 导航系统仿真设施(NSSF)集成了 ESA 的伽利略系统仿真设施(GSSF), 同时留有可定制的接口, 以便将来集成其他具有类似功能的软件. 软件导航信号模拟器(SNSS)由导航电文产生器(Navigation Messages Generator, NMG)、导航信号产生器(Navigation Signal Generator, NSG)和导航信号合成器(Navigation Signal Synthesizer, NSS)三部分组成, 可生成多模 GNSS 仿真中频信号.

集成仿真环境(ISE)协调调度导航系统仿真设施和软件导航信号模拟器相关进程, 输入相关入口参数, 输出和显示相关仿真模拟量. 导航系统仿真设施(NSSF)以文本文件或图形文件形式为多媒体演示培训设施(MDTF)提供业务量仿真和原始数据仿真等导航信息数据. 软件导航信号模拟器以文本文件形式向软件接收机提供用户接收机端可见卫星模拟信号.

4.2.2 软件接收机技术

根据 CGTR 系统需求, 针对多模 GNSS 接收机技术研发需要, CGTR 系统配置了多模 GNSS 软件接收

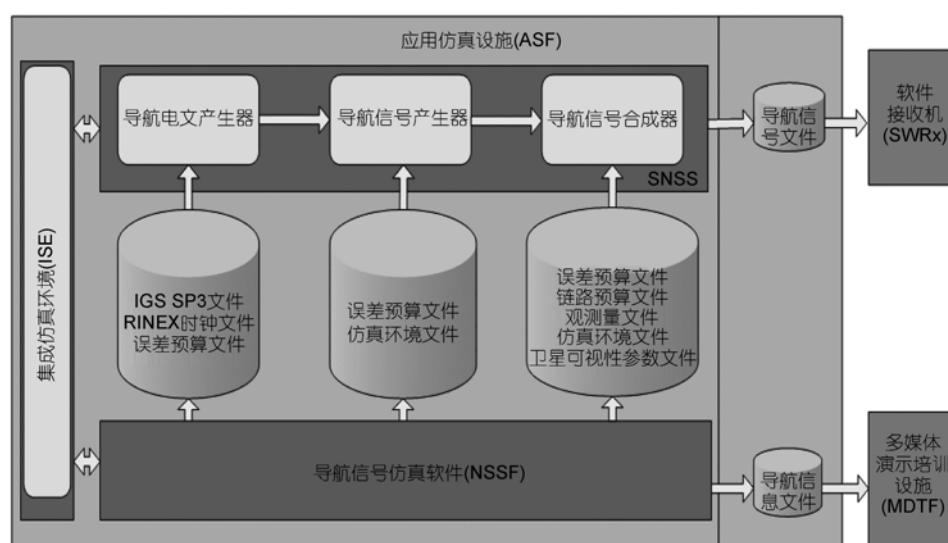


图9 ASF系统架构图

Figure 9 ASF system diagram.

机平台。该平台支持 Galileo、GPS 双系统。

Galileo/GPS 软件接收机包括射频单元、中频信号采样处理单元、主控单元、信号处理单元、解算处理单元、中频数据存储管理单元、网络通信单元，设备组成如图 10 所示。

射频单元：由天线接收 GPS 的 L1 和 Galileo 的 E1 信号，经过低噪声放大器后，送入下变频器进行处理，输出模拟中频信号。

主控单元：负责软件接收机的系统配置、调度、显示等功能。

中频信号采样处理单元：主要由具有 PCI 总线接口的数据采集卡对射频单元输出的模拟中频信号进行采样，然后利用板上 FPGA 对原始采样数据进行必要的处理，以降低信号频率和数据速率，满足对高速数据传输的要求。

信号处理单元：对中频数据采样单元提供的中频采样数据进行信号处理，完成对指定导航信号的捕获、跟踪、导航电文的解调解码、观测量提取等功能。

解算处理单元：根据提取的观测量和导航电文进行解算处理，得到 PVT, DOP 等信息数据。

中频数据存储管理单元：将中频信号采样处理单元送过来的数据流按一定的文件格式进行存储和管理，以备后续研究和处理。

网络通信单元：通过网络发送接收机的定位信息，同时接收来自网络的控制命令。

4.2.3 多媒体演示培训

MDTF 由多媒体服务器、演示培训控制设备和影音设备组成，设备组成如图 11 所示。

多媒体服务器主要负责演示培训活动相关的数据资料的保存和发布，包括多媒体资源管理模块和远程访问服务器两部分。多媒体资源管理模块以数据库为核心，管理组织存储在数据服务器上的图像、音频和文字等多媒体资料，实现对这些资料的输入、检索、发布和备份。

在利用软件接收机进行真实环境下的演示活动时，演示培训控制设备从 SWRx 获取 PVT 信息，控制生成演示数据，并对演示过程进行实时控制。演示培训控制设备由演示虚拟环境模块、演示控制模块、演示效果处理模块和系统维护模块组成。

影音设备包括视频设备和音频设备，用于将多媒体信息展现为具体的声音信息和影像信息。ADC 系统已完成设备的研制工作，正在积极开展系统联试与验证工作，预计 2011 年 3 月具备系统验收条件。

5 结论

“中欧伽利略计划合作是迄今为止中国最大的对外科技合作项目，对中国具有十分重要的战略意义”^[6]。CGTR 项目又是目前为止中欧伽利略计划合作中最大和最复杂的项目，也是一个能够促进卫星导航应用和产业发展的项目。

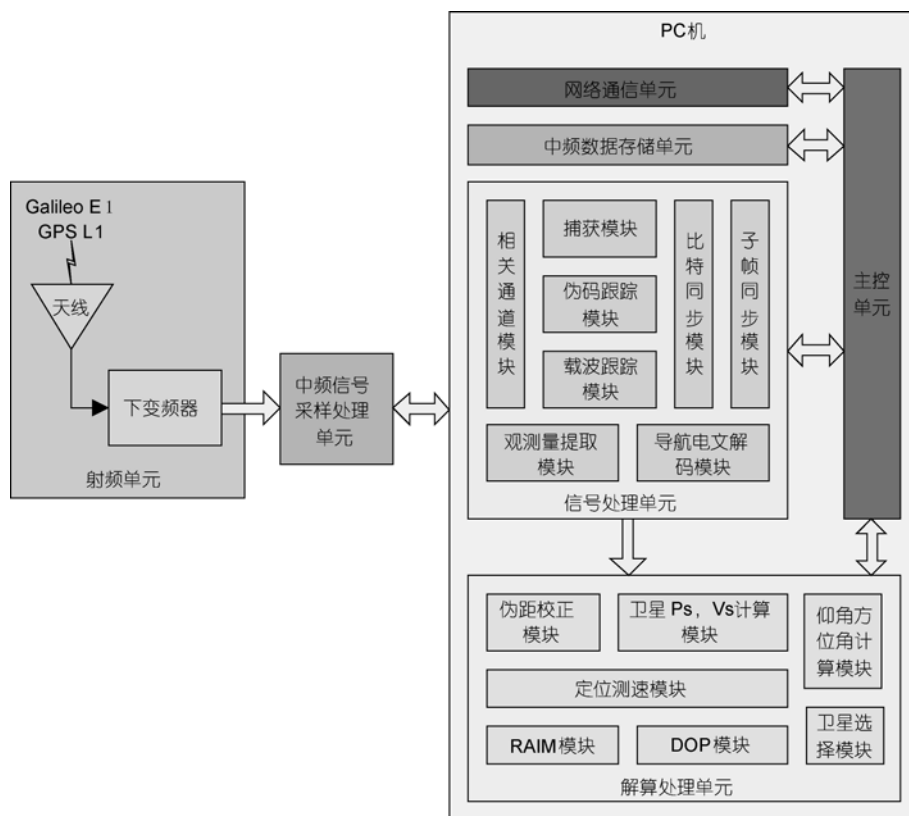


图 10 软件接收机设备组成图

Figure 10 SWRx composition diagram.

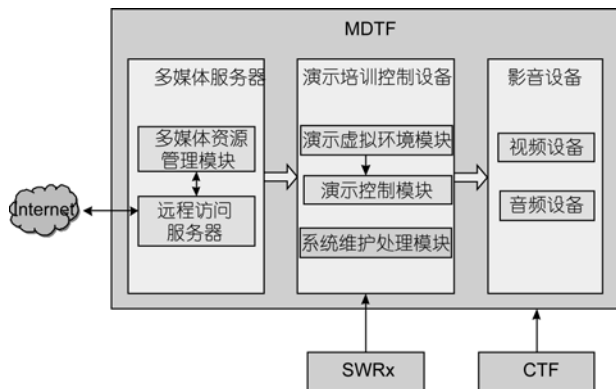


图 11 MDTF 设备组成图

Figure 11 MDTF composition diagram.

CGTR 项目中的关键技术研究在有力推动本项目实施的过程中, 也部分填补了我国在该领域的研究空白。特别是针对卫星导航测试场建设的总体性关键技术, 如: “测试场仿真与评估技术”、“时间同步与维持技术”、“伪卫星 TDMA 信号设计技术”等, 这些关键技术的突破对 CGTR 的建设具有重要意义, 同时也为我国未来卫星导航测试场建设打下了技术基础。

CGTR 的建设完成将有力地推动伽利略系统在我国的应用推广; 将成为我国卫星导航接收机研制与应用开发的国家基础设施; 大大推动导航接收机及其应用系统的研究开发, 为卫星导航的产业化发展提供平台。

参考文献

- 1 赵静. 多模卫星导航接收机测试与评估技术研究. 博士学位论文. 北京: 北京师范大学, 2010
- 2 Li J. Analysis on the architecture of satellite navigation simulator (in Chinese). Radio Eng China, 2006, 8: 30–31 [李隽. 卫星导航信号模拟器体系结构分析. 无线电工程, 2006, 8: 30–31]
- 3 Brown A, Gerein N. Modeling and simulation of GPS using software signal generation and digital signal reconstruction. In: Proceedings of

- the ION National Technical Meeting. Anaheim CA: The Institute of Navigation, 2000
- 4 孟波. 走前无古人的路——中欧伽利略计划合作回顾与展望. 卫星与网络, 2006, Z1: 32–33
 - 5 Luck T, Bodenbach M, Winkel J. An experimental multi band receiver for the german galileo test environment (GATE). In: ION GNSS 2005 Proceedings. Long Beach, CA: The Institute of Navigation, 2005. 1896–1905
 - 6 Wang C, Hao R, Kan H B. MBOC modulation and its performance analysis in Galileo system (in Chinese). Radio Eng China, 2008, 10: 32–34 [王超, 郝然, 阚海波. Galileo 系统中 MBOC 调制信号及性能分析. 无线电工程, 2008, 10: 32–34]

China Galileo test range research and status

YU BaoGuo^{1*}, LI Jun¹, WANG ZhenLing² & WANG Jue²

¹ The 54th Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China;

² Hebei Satellite Navigation Technical & Equipment Engineering Institution Center, Shijiazhuang, 050081, China

This article introduces the research and development for the China Galileo Test Range (CGTR) system, which includes indoor test environment (ITE) based on the microwave anechoic chamber, outdoor test environment (OTE) based on the pseudolite network and multimedia demonstration and training facility (MDTF) with multimode GNSS software receiver, application simulating facility, and multimedia platform. This article presents the key technical topics of CGTR and the system status by now. The topics are valuable for GNSS receiver testing, in indoor and outdoor test environment designing, multimode GNSS software receiver designing and GNSS application simulations.

Galileo, CGTR, indoor test, outside test, application simulation, software receiver

PACS: 91.10.Fc, 93.85.Bc, 94.20.Cf, 91.10.Sp, 95.75.Tv

doi: 10.1360/132011-331