

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2018.05.001

# 陆基超远程无线电导航发展研究

胡安平

(中国电子科技集团公司第二十研究所,西安 710068)

**摘要:**定位导航和授时(PNT)系统是保障现代社会正常运转必不可少的基础设施,为了提供可靠的PNT信息服务,需要研发不依赖于卫星导航的PNT系统。介绍了国内外陆基超远程导航系统的发展情况,提出了发展基于甚低频无线电信号的陆基超远程无线电系统架构、关键技术及发展建议,陆基超远程导航系统可以在卫星导航不可用时提供备份,对于构建冗余可靠的国家PNT体系、保障PNT信息的安全及可靠性具有重要意义。

**关键词:**定位导航授时;陆基无线电导航;甚低频

中图分类号:TP393

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2018)05-0001-06

## Research on the Development of Land-Based Ultra-Long-Range Radio Navigation

HU An-ping

(The 20<sup>th</sup> Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Xi'an 710068, China)

**Abstract:** Positioning, navigation and timing (PNT) systems are indispensable infrastructures for ensuring the normal operation of modern society. In order to provide reliable PNT information services, it is necessary to develop PNT systems that do not rely on satellite navigation. This paper introduces the development of land-based ultra-long-range radio navigation systems domestic and abroad, and puts forward the architecture, key technologies and development proposals for developing land-based ultra-long-range very low frequency radio systems. Land-based ultra-long-range navigation systems can provide backup when satellite navigation is unavailable. For building redundant and reliable national PNT system, it is of great significance to ensure the safety and reliability of PNT information.

**Key words:** Position navigation and timing; Land-based radio navigation; Very low frequency

### 0 引言

定位导航授时(Positioning, Navigation, and Timing, PNT)系统是现代信息化社会和军事活动必不可少的基础设施<sup>[1]</sup>。当前的PNT极大地依赖于卫星导航定位系统的大区域覆盖、高性能、高可靠、高可用等能力。但是,受空间条件、卫星导航信

号固有脆弱性等因素的影响,卫星导航定位系统在受到环境遮蔽或电磁干扰条件下,可用性、服务能力存在较大的不确定性。为此,需探索研究各种不依赖卫星导航定位系统的PNT技术,发展在成本、覆盖、精度、抗干扰、生存能力等方面具有综合优势的新型PNT技术,在卫星导航系统遭到拒止的情况下,形成对卫星导航定位系统的增强、补充和备

收稿日期:2018-01-05;修订日期:2018-02-01

基金项目:军委科技委国防科技项目基金(17-H863-01-ZT-001-006-07)

作者简介:胡安平(1970-),男,研究员,主要从事无线电导航定位授时方面的研究。E-mail: hap\_h@163.com

份,在体系上保障用户对 PNT 信息可靠性、安全性以及连续性等方面的需求<sup>[2-3]</sup>。

基于甚低频的陆基无线电导航系统,在系统覆盖、抗干扰以及具有入水和入地能力方面具有很多优势,通过技术手段提升系统服务性能,有望成为卫星导航系统的补充和备份系统<sup>[4]</sup>。

## 1 国外发展情况

### 1.1 早期陆基远程导航系统

20 世纪 40 年代以来,国际上陆续发展了多种地基无线电导航体制和系统,形成了较为完整的地基导航体系。其中,欧米伽、阿尔法是典型的能够提供全球覆盖的超远程地基无线电导航系统,罗兰 C、恰卡是典型的提供区域覆盖的远程地基无线电导航系统。受技术水平和国际环境的制约,当时的

远程概念主要是限于 2000km 以内的区域<sup>[4]</sup>。

欧米伽、阿尔法是典型的采用甚低频(Very Low Frequency, VLF)频段,提供广域乃至全球覆盖的陆基超远程导航系统。

#### (1) 欧米伽导航系统

欧米伽导航系统是美国在 20 世纪 60~70 年代研制的远程陆基无线电导航系统。8 个台站分别位于美国北达科他和夏威夷、挪威、利比亚、法国(法属留尼旺群岛)、阿根廷、澳大利亚和日本(见图 1)。系统采用连续波大功率信号(发射天线的辐射功率为 10kw),每个台站都发射 10.2kHz、11.33kHz、13.6kHz 和 11.05kHz 的信号,信号通过由电离层与地球之间形成的波导传播覆盖全球,从 1982 年开始提供全球服务<sup>[1]</sup>。

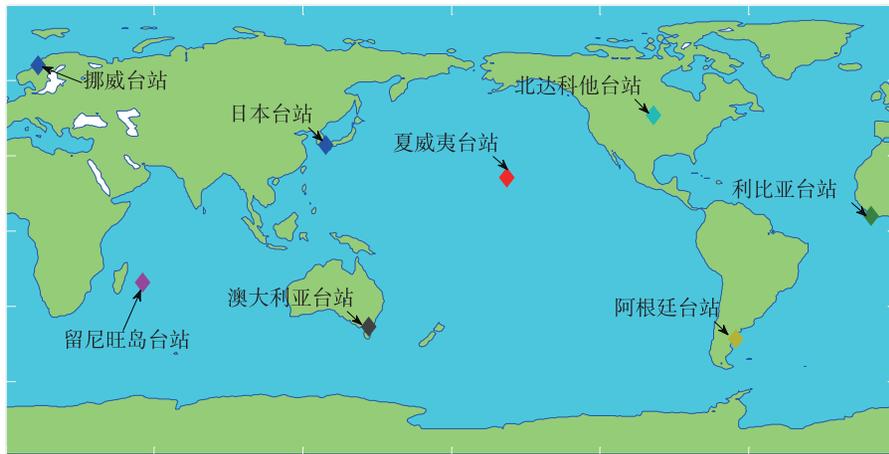


图 1 欧米伽系统台站分布图

Fig. 1 Omega system station distribution

欧米伽导航采用比相测量时间差的双曲线定位体制,为用户提供无源二维定位(地球表面的平面定位)服务,设计精度为 2~4n mile,定位误差与用户地点、观测时刻、所选台站、传播修正等有很大关系,地点相同而时间不同的复现精度为 2~4n mile,时间相同而地点不同的相对精度为 0.25~0.5n mile,利用差分技术可以把定位精度提高到 1n mile(500n mile 范围内)。

欧米伽的可用性为 99% 以上,可靠性为 97%,信息更新率为 10s,是 20 世纪 70~90 年代唯一具有全球覆盖能力并可作为单一导航手段的系统,是越洋航空和航海的重要导航系统。同时,由于其信号能渗入水下 10m 左右,也是当时美国潜艇的水下

导航系统。

欧米伽导航系统虽然具有用途广、覆盖面大和机载设备相对便宜等优点,但是定位精度低。随着全球定位系统(Global Positioning System, GPS)的广泛应用,加快了导航系统更新换代的进程,1997 年美国关闭了欧米伽导航系统。

#### (2) 阿尔法导航系统

阿尔法导航系统是苏联开始建设的类似于欧米伽的超远程导航系统,于 1970 年投入使用,是目前国际上唯一仍在正常运行的 VLF 陆基超远程导航系统(见图 2)。阿尔法导航系统计划共有 5 个台站,发射台的辐射功率为 50~80kW,工作频率为 11.904761kHz (F1)、12.648809kHz (F2)、

14.880952kHz (F3)、14.881091kHz (F3p)、12.090773kHz (F4)、12.044270kHz (F5)、12.500kHz(F6)、13.281kHz(F7)和 15.625kHz (F8)。工作区覆盖全球 70%的面积,几何盲区为东处中太平洋夏威夷与关岛之间一线和西处非洲大陆南大西洋一线<sup>[5]</sup>。



图 2 阿尔法系统发射台链与传播监测网  
Fig. 2 Alpha system transmitting station chain and propagation monitoring network

阿尔法导航系统可以采用测距差、测距与准测距三种方式进行导航定位,通常定位精度在 2~4n mile,为解决电波预测修正问题,俄罗斯在系统工作区内先后建起了 31 个阿尔法信号传播监测站。差分阿尔法的精度比普通的欧米伽的定位精度提高了 3~5 倍,白天的定位精度可达 200~1000m。

### 1.2 新型超远程无线电导航系统

20 世纪末,随着 GPS 的建成和广泛应用,美国政府认为不再需要远程无线电导航服务,在争议之中关闭了欧米伽系统。近年来,随着电磁环境的日益复杂和对 GPS 脆弱性的深入认识,美国出于远程作战的考虑,重新开展了针对下一代的超远程 VLF 无线电导航系统的研究<sup>[6]</sup>。

2014 年,美国国防高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 启动了竞争环境中的空间、时间和方向信息 (STOIC) 项目,旨在研发不依赖 GPS 但具有与 GPS 同级别精度的 PNT 系统,STOIC 将在 GPS 性能退化或无法使用时提供抗干扰的 PNT 能力<sup>[7]</sup>。

为了实现上述目标,DARPA 征询了以下 4 个相关技术领域的创新型建议。

- 1) 技术领域 1: 强壮的基准信号
- 2) 技术领域 2: 极稳定的战术时钟
- 3) 技术领域 3: 多功能系统 PNT
- 4) 技术领域 4: 辅助技术

每个技术领域的研发和评估都要求在 36 个月内分 3 个阶段进行,每个阶段 12 个月,如图 3 所示。在完成第三阶段后,DARPA 将根据第三阶段的性能去投标后续集成系统展示,所有已开发的 STOIC 组件和系统将被整合在一起,并在多个环境和多个平台中进行测试。

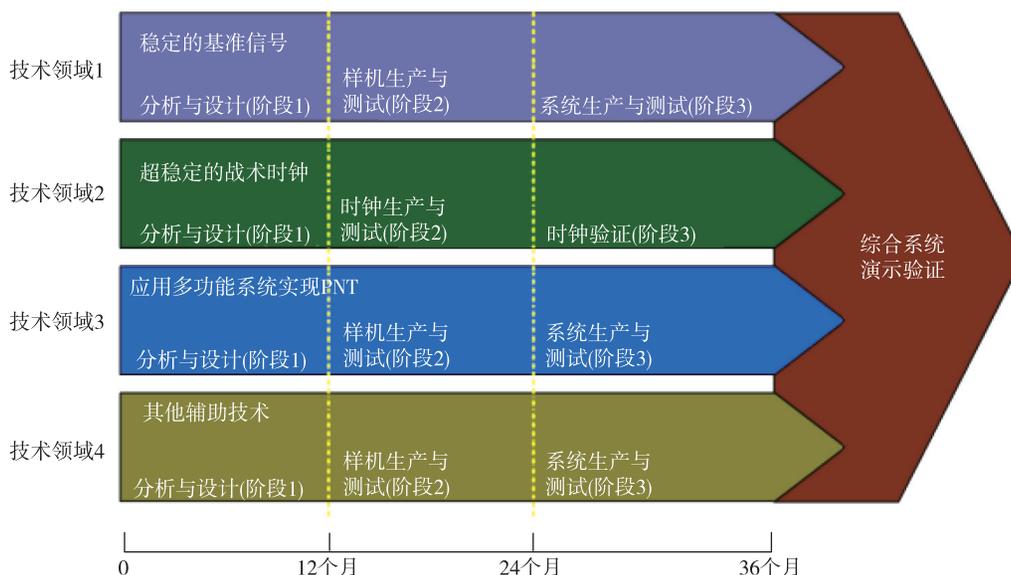


图 3 STOIC 计划的时间进度表  
Fig. 3 STOIC plan schedule

在基准信号技术领域,意在寻求不依赖 GPS,且适用场景广泛、抗干扰性强的 PNT 系统,形成一个适用于对抗环境、相对于地固坐标系的 PNT 系统。当 GPS 功能衰退或不可用时,为离台站更远作战区域(10000km)提供可靠、高精度的 PNT 服务。在竞争环境及其附近无需部署基础设施,也无需进行维护,定位精度优于 10m,时间精度优于 30ns。该项目在第一阶段重点关注了基于建模、仿真、数据收集的系统设计和分析,并提出了甚低频定位系统(VLF Position System, VPS)架构,目前已完成第一阶段研究,进入第二、三阶段研究<sup>[8]</sup>。

VPS 架构由三部分组成,分别为信号传输部分、控制部分、用户部分(见图 4)。数据处理中心将监测站测量到的环境信息实时传输给 STOIC 甚低频台站,由台站将携带导航信息的基准信号发送给用户端,由用户端完成基于相位测量的定位解算。

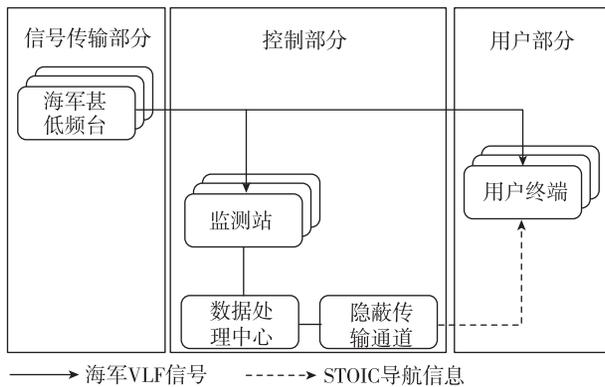


图 4 STOIC 项目 VPS 系统架构

Fig. 4 STOIC project VPS system architecture

2016 年 2 月,STOIC 项目提出了借用现有的海军甚低频通信系统支撑后续的第二、三阶段研究工作,研究时间预计各 12 个月,研究重点主要是信号体制、信号传播、接收处理以及系统在机载和海上平台的应用<sup>[9-10]</sup>。

重点研究内容主要包括:信号体制、信号传播以及接收处理方面。

在信号体制方面,DARPA 重点关注基于 VLF 发射机和接收机的方案。这是因为 VLF 信号在地表-电离层波导中的传播损失非常低,用户能够接收到来自远程发射机的高信噪比信号,为系统提供必要的精度。现有的 VLF 发射台都是以大电场天线为基础,而 DARPA 希望发展新型的发射技术,将 VLF 信号进行远距离传播并具有较高带宽,可以将

电波修正信息发送至用户端,与此同时,也对可快速部署的移动发射机感兴趣。

信号传播方面,DARPA 将重点关注 VLF 传播特性的研究,拟采用数值计算方法建立更逼近真实特性的电波传播模型,并通过建立全球电离层监测网,实时获取环境参数,并结合修正模型预测以得到更精确的电波修正信息。

接收处理方面,DARPA 重点关注提高接收机相位测量精度、抗干扰能力以及减小接收机体积等方面的解决途径,拟采用全向磁天线设计改善以上问题。

同时,对信号带宽、积分时间、信噪比(Signal-Noise Ratio, SNR)等信号体制内容进行设计、分析和验证,并采取创新的手段对偏差进行补偿以达到目标精度。

## 2 国内研究情况

我国在地基无线导航方面经历了长期的发展过程,一直以来,地基导航系统在我国 PNT 服务方面发挥着重要的作用。早在 20 世纪 60 年代初,我国就十分重视研究并建设我国自主的无线电导航系统,在国际上提出新的地基导航系统时,我国也同步开展了技术研究。我国先后发展了中程无线电导航系统、远程无线电导航系统,并开展了超远程无线电导航系统研究<sup>[1,11]</sup>。

我国中程无线电导航系统技术体制与美国的罗兰-A 相同。系统由海军和交通部共同投资建设,1965 年开始实施。一期工程 3 个导航台(山东荣成、江苏射阳、浙江嵊泗)于 1966 年建成并投入使用;二期工程 7 个导航台于 1970~1974 年建成并投入使用。10 个导航台分别位于辽宁庄河、天津上古林、山东荣成、江苏射阳、浙江嵊泗、浙江温岭、福建平潭、广东惠来、广东珠海与海南万宁,构成 9 条基线,全系统海上覆盖范围白天 700n mile,夜间 500n mile。系统开始由海军实施管理,1983 年移交交通部管理,于 1997 年关闭。

我国长波远程无线电导航系统由 6 个导航台、3 个监测站和 1 个监控管理中心构成,形成南海、东海和北海 3 个台链。1994 年国务院批复交通部、海军,同意该系统对国外用户开放。长波远程无线电导航系统的技术体制与罗兰-C 相同。发射台辐射功率 1.2MW,海上地波作用距离 900~1300n mile,典型定位精度 460m<sup>[11]</sup>。

我国在 20 世纪 70 年代初,开展了超长波无线

电导航系统的分析和论证,超远程无线电导航系统的技术体制与欧米伽、阿尔法系统相同,可实现长波水下导航,后因转向以经济建设为中心以及全球覆盖布站条件不足等因素而停止了发展<sup>[12]</sup>。

近年来,国内开展了卫星导航拒止环境下的导航技术研究,开展了基于 VLF 的导航技术研究。VLF 信号具有传播衰减小、穿透能力强的特点,能够在地面和电离层之间波导传播。因此,采用 VLF 信号可以进行超远程导航,在全球只需部署少量发射台,即可实现全球覆盖。新型 VLF 导航技术研究的关键在于提升 PNT 的精度以及可靠性,以便达到卫星导航备份的要求。

### 3 陆基远程无线电系统架构及关键技术

陆基远程导航系统通过建立地面发射台,播发

大功率 VLF 信号,为各类用户提供广域覆盖的定位、导航、时频传递播发服务,可以作为卫星导航系统的备份和补充系统。在卫星导航不可用时(系统失效、系统被赛博攻击、用户区域信号被干扰或阻塞),陆基超远程导航替代卫星导航工作,保障 PNT 连续服务。在卫星导航信号不可达区域(如茂密森林、水下、地下),陆基远程导航作为卫星导航的补充,提供 PNT 信息服务。

陆基超远程导航系统,在大体上可以分为发播台、监控站、系统控制网络以及用户端。根据高精度定位和授时需要,还可以建立全球甚低频/极低频电波传播实时监测及修正播发网络,为用户提供实时的电波传播修正数据。陆基超远程导航系统体系架构如图 5 所示。

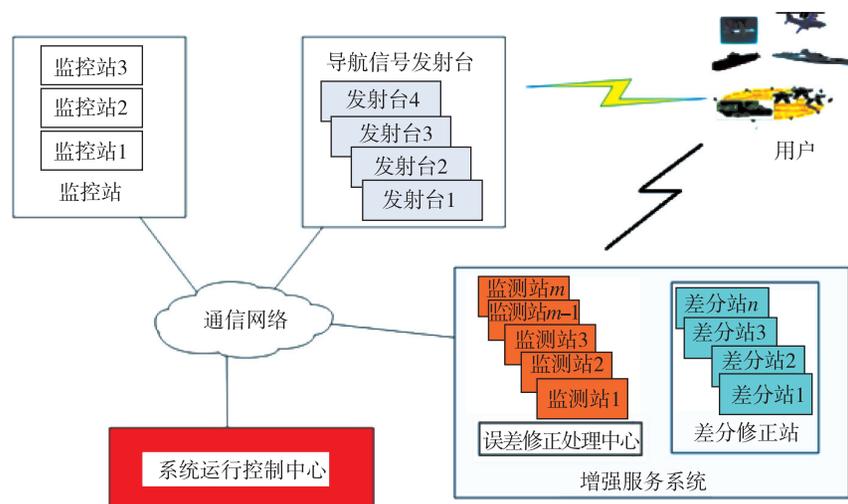


图 5 陆基超远程导航系统体系架构

Fig. 5 Land-based ultra-long-range navigation system architecture

#### (1) 导航信号发射台

发射台涉及时空基准、电文生成、信号播发、同步监测等要素,由天线、大功率发射机、同步监测和测量、信号发播同步控制、差分数据播发、网络通信节点等功能单元组成。通过通信网接收来自控制中心的差分数据和同步控制参数,实现台站信号发播同步控制和大功率导航信号及差分数据播发。

#### (2) 监控站

监测站涉及传播误差监测、完好性监测、服务性能监测等要素,由多通道多功能监测和网络通信节点等功能单元组成,完成高精度相位/伪距/时差测量和信号监测,并通过通信网将测量数据发给控制中心。

#### (3) 增强服务系统

增强服务系统涉及差分修正以及多个传播误差修正监测站构成的网络化误差修正等要素,由多个差分站、多个监测站以及网络化误差修正处理中心等单元组成。完成局域/广域的不依赖于发射台站的特定用户实时或近实时差分修正增强服务。

#### (4) 系统运行控制中心及通信网络

控制中心涉及时空基准溯源、系统控制、信息网络管理、数据存储和管理等要素。由数据处理、数据中心和网络通信等功能单元组成。通过通信网接收来自发播台和监测站的数据,分析主要误差源和变化,完成覆盖区差分数据估计。同时,接收

发播台的绝对时间同步数据,通过分析数据的变化确定发播台同步控制参数,并通过通信网将差分数据和同步控制数据发给发播台。

#### (5)用户终端

用户终端涉及高性能接收天线、接收机通道信号测量、数据解调以及导航定位解算等要素,接收发射台导航信号以及增强差分信息,完成用户定位和授时。

陆基超远程导航系统的关键技术:

#### (1)信号体制设计技术

在信号体制设计时,要考虑在带宽受限、传播特性、远近效应等约束条件下,开展台站同步、多台站组网、高精度导航测距信号设计、导航与数据通道波形融合等技术途径和方法。

#### (2)传播误差修正技术

针对 VLF 导航信号波导传播受电离层、气象条件等因素影响大的特点,开展导航信号传播时延模型及精化技术、信号监测网络设计、实时和非实时差分技术、网格化传播修正服务等技术途径和方法<sup>[12]</sup>。

#### (3)高性能用户接收技术

在陆基超远程导航系统信号天波、大气、工业等干扰环境和作用距离远、精度高、抗干扰能力强等服务要求下,开展现代信号处理、全视野接收处理、实时误差修正和建模、高动态应用等技术途径和方法。

## 4 发展建议

PNT 信息是现代社会的正常运行不可或缺的基础信息,采用星基、陆基和自主相组合的多导航系统构成的 PNT 体系,可以保障 PNT 服务的可靠性和安全性。因此,在进一步发展卫星导航系统的同时,应大力开展陆基超远程导航技术研究,促进形

成完备的国家 PNT 体系,服务于国家军民用户<sup>[3]</sup>。

## 参考文献

- [1] 干国强,邱致和. 导航与定位——现代战争的北斗星[M]. 北京:国防工业出版社,2002:101-105.
- [2] 杨元喜,李晓燕. 微 PNT 与综合 PNT[J]. 测绘学报,2017(10):1249-1254.
- [3] 杨元喜. 综合 PNT 体系及其关键技术[J]. 测绘学报,2016,45(5):505-510.
- [4] 沃特. 甚低频无线电工程[M]. 北京:国防工业出版社,1973:25-45.
- [5] 黄辉,吉春生. 俄罗斯阿尔法导航系统技术与发展[J]. 导航,2005(2):10-18.
- [6] 刘畅. 美国空军为战略部队寻求通用甚低频/低频通信技术[J]. 导弹与航天运载技术,2017(5):12.
- [7] Strategic Technology Office. Spatial Temporal and Orientation Information in Contested Environments (STOIC)[S]. DARPA-BAA-14-41,2014.
- [8] Strategic Technology Office. Spatial Temporal and Orientation Information in Contested Environments (STOIC) Very Low Frequency (VLF) positioning system[S]. DARPA-BAA-16-23,2016.
- [9] Rockwell Collins wins DARPA award to develop GPS backup technologies for contested environments[DB/OL]. [https://www.rockwellcollins.com/Data/News/2015\\_Cal\\_Yr/GS/FY15GSNR54-STOIC.aspx](https://www.rockwellcollins.com/Data/News/2015_Cal_Yr/GS/FY15GSNR54-STOIC.aspx).
- [10] Ramona A. DARPA eyes 'Very Low Frequency' signals for PNT systems as GPS backup[DB/OL]. [2016-06-16]. <http://www.executivegov.com/2016/06/darpa-eyes-very-low-frequency-signals-for-pnt-systems-as-gps-backup/>.
- [11] 刘辛涛,胡安平. 长波导航系统拓展应用研究[J]. 现代导航,2013(2):116-119.
- [12] 田育庶,潘威炎,余运超,等. 甚低频(VLF)无线电系统场强与相位计算方法[S]. 中华人民共和国国家军用标准,1994.