

# 导航、定位与授时技术综述

郑辛<sup>1</sup>, 杨林<sup>2</sup>

(1. 航天科工集团三院, 北京 100074; 2. 成都天奥电子股份有限公司, 成都 611731)

**摘要:** 导航、定位与授时技术是一项重要的国家战略前沿技术和国防关键技术。首先阐述了导航、定位与授时技术的基本概念。针对导航、定位与授时技术包含的惯性导航、无线电导航、数据库参考导航、生物导航、授时等技术, 简要介绍了发展历程, 探讨了技术特点和典型应用, 展望了未来技术发展趋势。

**关键词:** 惯性导航; 无线电导航; 数据库参考导航; 生物导航; 授时

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2095-8110 (2014) 01-0001-07

## Survey on Navigation, Positioning and Timing Technology

ZHENG Xin<sup>1</sup>, YANG Lin<sup>2</sup>

(1. The 3rd Academy of China Aerospace Science & Industry Corp., Beijing 100074, China;  
2. Chengdu Spaceon Electronics Co., Ltd, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** Navigation, positioning and timing technology is an important national strategy forefront technology and militarily critical technology. The concept of navigation, positioning and timing technology is given firstly. Meanwhile, for the technology which includes the inertial navigation, radio navigation, data-base referenced navigation, bio-navigation and timing, the roadmaps are given. Moreover, the technical characteristics and typical applications are discussed. Finally, the development trend is forecasted.

**Key words:** Inertial navigation; Radio navigation; Data-Base Referenced Navigation; Bio-navigation; Timing

## 0 引言

导航、定位与授时既是一项传统的应用技术, 也是代表当代科技发展水平的前沿技术。从古代的观星定位和指南针, 到如今的惯性导航、卫星导航等, 导航、定位与授时已深入国民经济以及国防安全等各个领域, 是重要的国家关键技术, 并且作为国家战略前沿技术不断发展。

导航是指通过测量并输出载体的运动速度和位置, 引导载体按要求的速度和轨迹运动<sup>[1]</sup>。导航方法很多, 按获得导航信息的技术不同可分为惯性导航、无线电导航、天文导航等。定位是指以标准大地坐标系为参照, 按照用户规定的实时性要求, 提供精确的二维或三维位置<sup>[2]</sup>。授时是指通过标准或者定制的接口和协议, 为其它设备或系统提供时间信息。目前世界各国都采用原子

钟来产生和保持标准时间, 即时间基准。授时系统通过短波、长波、电话网、互联网、卫星等手段和媒介将时间基准送达用户, 目前应用最为广泛和可靠的授时手段是卫星授时。

精确制导武器装备、智能化交通运输系统、数字化地球均需要导航、定位与授时技术, 同时, 现代通信网、电力网、全球一体化金融体系也越来越依赖精确时间和频率。2008年, 美国发布了《国家定位导航授时体系结构研究报告》, 随后启动了国家定位导航授时体系建设计划, 将定位导航授时技术提升到国家战略层面。

从现代化国家的大系统工程角度考虑, 导航、定位与授时技术作为国家科技基础中的基础, 对整体社会的支撑几乎是全方位的。

收稿日期: 2014-06-05; 修订日期: 2014-07-14。

作者简介: 郑辛 (1969-), 男, 博士, 研究员, 主要从事导航与定位方面的研究。

## 1 惯性导航技术

惯性导航是指通过惯性测量获得载体的加速度矢量信息,结合给定初始条件(初始位置、速度矢量等)和已知数据(重力、时间等)解算及提供导航参数的导航方式<sup>[3]</sup>。惯性导航是最典型的自主式导航方式之一,不需要地面及其它外部设备的辅助,惯性导航具有自主、连续、隐蔽的特点,是无环境限制的载体运动信息感知技术,是现代精确导航、制导与控制系统的核心信息源。

惯性导航与惯性仪表、惯性制导、惯性测量及惯性稳定等统称惯性技术。1907年,德国科学家安修茨制造了第一个实用化陀螺。1949年,美国麻省理工学院 Draper 实验室研制出第一套平台惯性导航系统<sup>[4]</sup>。随着物理学原理的发现,在材料、电子、精密加工等技术发展的支持下,惯性技术取得了快速发展,并在国防军事和国民经济建设各个领域广泛应用。如在航天领域,美国霍尼韦尔公司的“Spirit”惯性参考单元用于航天器姿态控制与指向,采用4轴全冗余捷联式惯测单元,可靠性与长期稳定性达15年;在航空领域,美国诺斯罗普·格鲁曼公司的LN100G激光陀螺捷联惯导系统,装备于“全球鹰”无人机和F-22战机等,导航精度0.6 n mile/h;在航海领域,法国iXSea公司的MARINS光纤陀螺惯导系统,装备于英国海军攻击核潜艇和英国新一代航母,导航精度1 n mile/24 h;在制导弹药领域,霍尼韦尔和罗克韦尔·科林斯合作研制的IGS-2/3××系列微惯性/卫星深组合系统抗宽带白噪声干扰能力达到88 dB以上,具备耐15750g以上冲击能力;在测量测绘领域,加拿大Applanix公司的POS AV610,后处理定位精度可达0.05m;在消费电子领域,意法半导体公司的MEMS加速度计LIS344AHH,具有±18g量程、高带宽、低噪声等优点,用于可穿戴电子产品、机器人等。

经过近百年的时间,惯性技术发展形成了基于经典牛顿力学的机械式、基于Sagnac效应的光学式、基于哥式振动效应的微机电式以及以原子干涉和原子自旋陀螺为代表的量子式惯性仪表。以牛顿经典力学原理为基础,静电陀螺、三浮陀螺、动力调谐陀螺、陀螺摆加速度计、机械摆加速度计等为代表的第一代惯性仪表,具有精度高、

技术成熟的特点,典型精度覆盖战略至导航级领域,其高端产品已广泛应用于战略导弹、远程轰炸机、核潜艇、航母等战略级武器系统及作战平台,但存在体积大、成本高、结构复杂、使用维护难度大等问题。基于Sagnac效应的激光陀螺和光纤陀螺作为第二代惯性仪表的主要代表,具有无机械转子、动态适应范围宽等优点,典型精度覆盖导航至战术级领域,已广泛应用于导弹、陆用战车等武器系统及作战平台,并且随着技术的进步已经开始逐步向战略级应用领域发展。微机电陀螺和微机电加速度计作为第三代惯性仪表的主要代表,主要应用于战术级精度(10(°)/h、1mg)领域,具有体积小、成本低、耐冲击等优点,近年来发展迅速,并且已开始精确制导弹药、小型无人机等新型战术武器系统中获得应用,进一步提高精度是其面临的主要问题。基于原子自旋和原子干涉原理的第四代量子惯性技术,进展迅猛,在超高精度导航和小型低成本导航级领域具有巨大潜力,核磁共振陀螺已经从原理样机的状态走出,偏值稳定性已达到0.02(°)/h,标志着惯性技术已经开始进入量子时代。

## 2 无线电导航技术

无线电导航是指载体借助于无线电导航设备,确定自己在指定坐标系中的位置,引导载体沿预定航线航行的技术手段<sup>[1]</sup>。无线电导航具有不受昼夜和气象条件限制、全天候工作、定位精度高、可附带广播和通信功能的特点。无线电导航分为导航台定位导航和自主无线电导航,其中,导航台定位导航是指载体借助于携带的导航接收机接收导航台播发的无线电信号,利用电波传播的直线性、恒速性和多普勒效应,测量相对于导航台的方向、距离、速度,解算载体在指定坐标系的位置和引导载体航行;自主无线电导航是指载体仅借助自己携带的导航设备,测量其相对于地面或其他目标的方向、距离、速度,进行定位导航。

无线电导航典型代表包括:伏尔/地美伊(VOR/DME)<sup>[5]</sup>、塔康(TACAN)<sup>[6]</sup>、增强罗兰(eLORAN)<sup>[7]</sup>、奥米伽(Omega)<sup>[8]</sup>等近、远程无线电导航系统;无线电高度表、气象雷达、多普勒导航<sup>[9]</sup>等自主导航系统;GPS、GLONASS、北斗

卫星导航系统等全球或区域卫星导航系统<sup>[10]</sup>。

卫星导航是导航台定位导航的典型代表。卫星导航系统作为当前获取时空信息的关键手段,其发展与应用为导航、定位与授时带来了革命性的变化,已成为无处不在的导航、定位与授时信息源,广泛应用于武器装备和作战平台中,给作战模式带来了显著的变革。凭借卫星导航的高精度导航、定位与授时功能,一方面实现了指挥系统、侦察探测系统、武器平台以及以“单兵”为代表的作战单元在时间和空间上的高度协调,提升了体系化作战能力;另一方面大幅度提高了导弹、制导炮弹的命中精度,提升了武器作战效能。在民用方面,卫星导航在个人/车辆导航、移动通讯、电力等领域均发挥重要作用。

目前卫星导航系统主要有美国 GPS 卫星导航系统、俄罗斯 GLONASS 卫星导航系统、我国北斗卫星导航系统、欧洲 GALILEO 卫星导航系统、印度 IRNSS 卫星导航系统以及日本 QZSS 卫星导航系统。GPS 卫星导航系统于 20 世纪 70 年代开始建设,1993 年前后投入使用,可提供定位、导航、授时服务,是当前军、民领域应用最为广泛,也是最为成熟的卫星导航系统。

北斗卫星导航系统是我国全球性导航系统,具备定位、测速、授时、双向短报文及通信功能。2012 年,北斗卫星导航系统正式提供区域服务,服务区域覆盖东经 55 度到 180 度,定位精度水平 10 m、高程 10 m;测速精度 0.2 m/s;授时精度达到单向 50 ns<sup>[11]</sup>。预计 2020 年北斗二代导航系统建成后,由 5 颗地球同步轨道卫星(GEO)、3 颗倾斜同步轨道卫星(IGSO)和 27 颗中轨道卫星(MEO)组网,在 B1、B2 和 B3 三个频点上提供卫星导航信号,其中 B3 频点在战时具有信号增强功能,能够提高应用的可靠性和安全性。北斗卫星导航系统的建成和使用标志着我国天基导航定位与授时能力全面建立,对我国国家导航定位与授时体系产生重大而深远的影响。

随着卫星导航的全面应用,卫星导航抗干扰能力日益受到重视,自适应滤波、数字波束形成、惯性辅助深组合等技术<sup>[12]</sup>陆续取得突破。综合采用上述技术的一体化、高动态、高抗干扰卫星导航接收机在美国已经投入使用<sup>[13]</sup>,综合抗干扰能

力优于 100dB。典型抗干扰产品包括:雷神系统公司 AGR 抗干扰接收机,应用于战斧系列巡航导弹;霍尼韦尔公司 IGS-250 深组合惯性/GPS 系统,应用于无人机和制导武器。

卫星导航技术的发展趋势是高动态、抗干扰、小型化,随着电子、材料共性基础技术的发展,将进一步实现微型化。

### 3 景像匹配导航技术

景像匹配导航是指利用载体高分辨率雷达或光电图像传感器实时获取地面景物图像,与预先存储的二维景像数字地图相比较,确定载体位置的技术手段。景像匹配导航属于数据库参考导航,具有定位精度高的特点,尤其适用于景像特征明显的地区。在 1990 年初的“海湾战争”中,美军“战斧”巡航导弹就应用光学景像匹配导航技术出色地完成了对伊拉克地面目标的精确打击任务。

合成孔径雷达(SAR)是一种基于距离和方位二维分辨原理的成像雷达<sup>[14]</sup>,能在能见度极差的气象条件下,提供类似于光学照相的高分辨率图像。随着 SAR 技术的不断发展,基于 SAR 的景像匹配导航技术日益成熟。SAR 景像匹配导航利用实时 SAR 图像信息与事先准备好的数字地图或景像信息进行比较和辨识,从而确定载体位置<sup>[15]</sup>,具有图像分辨率高、穿透屏蔽成像、适应全天候和全天时导航应用等特点。

俄罗斯白杨-M 地对地洲际导弹,射程 20000km,采用 SAR 景像匹配,打击精度优于 60 m(CEP)。美国洛拉尔公司的 SAR 导引头,采用平板阵列天线,可向侧面旋转或向侧前方直视,既可用于中段匹配导航,也可在导弹临近目标时提供具有较好分辨率的目标 SAR 图像,提高打击精度。

景像匹配导航的发展方向是:快速高品质实时成像、惯性辅助动态误差补偿以及基于特征提取与识别的同/异类图像匹配。

### 4 地形匹配导航技术

地形匹配导航是指载体飞越特定地区(称为匹配区)时,利用地形特征传感器(如雷达高度表、大气传感器等)对载体下方的地形剖面或者

其他特征进行采样,将得到的数据(实时图)在预存的地形数据(基准图)中搜索出最佳拟合的地形特征,从而实现载体导航定位。地形匹配导航具有自主、隐蔽、连续、全天候等优点,在精确制导方面得到广泛应用<sup>[16]</sup>。

地形匹配产生于20世纪50年代,是提高航空机种战斗力和导弹打击精度的重要手段之一。英国BAE公司TERPROM系统(地形匹配剖面系统)是世界领先的数字地形系统,已应用于14个国家的多种飞机平台(轰炸机、运输机和直升机),水平定位精度10~25 m,垂直定位误差1~5 m<sup>[17]</sup>。

地形匹配导航的发展趋势是利用可视化3D地形匹配技术,实现基于地形跟踪的路径规划与导航,特别适用于航空领域,还可利用海底的地形起伏为潜艇、水下潜行器等水下应用提供自主性导航,具有很高的军、民用价值。

## 5 天文导航技术

天文导航是指以已知准确空间位置的、不可毁灭的自然天体(月球、地球、太阳、其他行星和恒星等)为基准,并通过光电或射电方式被动探测天体位置,解算测量点经度、纬度、航向和姿态等信息的技术手段<sup>[18]</sup>。天文导航是一种既传统、又前沿的自主导航技术。早在元代,航海家已掌握“牵星术”,通过观测星的高度来定位。目前,天文导航在航天、航空和航海领域获得广泛应用,具有被动式隐蔽测量、全自主导航、长时间导航精度高的特点,适合长时间自主运行和导航定位精度要求较高的领域,如远程侦察机、轰炸机、卫星、飞船、空间站、远程导弹、舰船、潜艇等。

20世纪50年代以来,国外开始利用星光导航设备得到的精确位置和航向数据来校正惯性导航系统或辅助其进行初始对准,主要应用于机动发射、水下发射的远程长航时导弹以及高空长航时飞机<sup>[19]</sup>。美国海军三叉戟-II D5潜射战略导弹高精度制导系统MK6-LE,采用惯性星光组合导航方案,其制导精度约90m/8000km(CEP)。RC-135侦察机上的LN-120G高精度惯性/星光组合导航系统,位置精度 $[0.15 + 0.15(t)^{1/2}]$  n mile,速度精度 $[0.37 + 0.12(t)]$  m/s,其中 $t$

表示小时数。

天文导航的发展趋势是:以X射线脉冲星导航为代表的新型天文导航技术;以临近空间高动态和深空探测应用为背景的天文导航应用领域拓展。

## 6 地磁导航技术

地磁导航是指利用载体磁场传感器实时测量载体所在磁场,与地磁基准数据库相比较,确定载体位置的技术手段。地磁导航是一种无源自主导航方式,具有无源、无辐射、全天时、全天候、全地域的特征,在航天器定轨、水下自主导航、远程跨海飞行器自主导航等领域体现了巨大的应用潜力。

20世纪60年代,美国E-systems公司提出了基于地磁异常场等值线匹配的MAGCOM系统<sup>[20]</sup>。20世纪80年代,瑞典Lund学院开始研究地磁导航技术,提出了“磁地形导航”概念<sup>[21]</sup>。NASA Goddard空间中心针对卫星导航等空间应用开展了地磁导航研究<sup>[22]</sup>。俄罗斯SS19导弹采用地磁等高线制导系统,实现导弹变轨制导,以增强突防能力,对抗美国反弹道导弹拦截系统。

地磁导航的发展趋势是提升磁传感器水平和地磁信息图精度,加强外干扰场补偿技术研究,持续提升导航精度和技术成熟度,实现推广应用。

## 7 重力导航技术

重力导航是指利用载体重力/重力梯度传感器实时测量载体所在重力场,并通过重力图匹配实现导航定位的技术手段。重力导航是从重力测量、重力异常和垂线偏差测量与补偿的基础上发展起来,具有精度高、不受时间限制、无辐射等优点,主要用于潜艇等战略平台的自主导航。

20世纪70年代,美国海军为了提高三叉戟弹道导弹潜艇性能,开始重力导航研究。20世纪80年代中期以前,研究主要集中在运动基座重力梯度仪、重力辅助导航原理、匹配理论。W. G. Heller提出了重力梯度仪辅助导航<sup>[23]</sup>,奠定了重力导航研究的基础。90年代前后,贝尔航空公司成功研制了旋转式重力梯度仪,利用重力图匹配技术改善惯性导航系统性能。贝尔实验室成功开发了

重力辅助惯性导航系统<sup>[24]</sup>，导航精度 6 ~ 305 m (CEP)。美国俄亥俄级导弹核潜艇采用静电陀螺惯性平台及惯性/重力匹配组合导航系统，定位精度 0.2 n mile/d，重调周期 10 ~ 14 d。90 年代后期，洛克希德·马丁公司成功研制通用重力模块 (Universal Gravity Module, UGM)<sup>[25]</sup>。该系统提供无源重力导航和地形估计，可直接应用于现有导航系统。美国海军在 1998 年和 1999 年分别在水面舰船和潜艇上对 UGM 进行了演示验证。实验数据表明，采用重力图匹配技术，可将导航系统误差降低至导航系统标称误差的 10%。

重力导航的发展趋势是重力传感器向高精度、小体积、轻质方向发展；单轴传感器向三轴集成传感器发展；重力图采用卫星测高反演、航空重力测量和地面点测等多种重力测量手段综合应用，满足高精度导航基准需求；系统向通用化方向发展，应用领域从最初的弹道导弹核潜艇将逐渐扩展到航空、陆地车辆和地质勘探等。

## 8 生物导航技术

生物导航是指利用生物的五种感知能力（立体视觉、听觉、嗅觉、触觉和味觉）进行自主导航<sup>[26]</sup>，从而在复杂和不断变化的环境中为智能自主运载器或移动机器人进行导航与定位。

立体视觉是指进行三维观测或者同时观测长度、宽度和距离的能力。Marr 创立的视觉计算理论是立体视觉发展的重要里程碑<sup>[27]</sup>。立体视觉导航采用光学传感器，利用自适应学习型视觉算法，具备昼夜和全天候的基于视觉的自主导航能力，供智能自主运载器或移动机器人使用，可实现小于 10m (CEP) 的导航精度。美国喷气推进实验室 (JPL) 研制的“勇气号”和“机遇号”火星机器人配备 9 台摄像机，其中 2 台用于视觉导航，4 台用于避障<sup>[28]</sup>。JPL 的 DEMOIII 军用地面机器人<sup>[29]</sup>、Carnegie Mellon 大学立体视觉无人驾驶<sup>[30]</sup>采用立体视觉系统等导航设备，可实现在各种复杂道路环境下的自主行驶。立体视觉导航的核心是立体图像匹配，在结构化环境（如室内）中，由于存在比较规则的边缘线条、纹理等特征信息，因此主要采用机遇特征的立体匹配方法。在非结构化环境下，由于受环境因素的影响，特

征难于提取，因此主要采用基于区域的匹配方法。

声音导航是指通过辨识目标特定的声音类型（语音或其他特有声音特征）自主导向该声源从而实现导航，预计可实现 30° 内确定方向以及优于 10 m (CEP) 的导航精度，通常在黑暗或光线不佳环境下替代视觉导航，用于搜索和救援等。声音导航的关键是声源定位，利用声音传感器阵列获取声音信息后，采用信号处理技术对其处理分析，从而确定和跟踪声源。常用方法有时延估计法、高分辨率谱估计法、可控波束形成法等<sup>[31]</sup>。

气味导航是通过化学传感器感知气味的浓度，根据气味的浓度和气流的方向来控制载体的运动。气味传感器具有灵敏度高、响应速度快以及鲁棒性好等特点，可用来寻找化学药品泄露源<sup>[32]</sup>。

生物导航研究正处于起步阶段，多目立体视觉导航、偏振光导航、仿生复眼导航等新理念、新技术研究方兴未艾。虽然大多数生物导航技术尚处于理论研究阶段，但其能够使智能自主运载器或移动机器人具备复杂和不断变化环境的自主通过能力，具有宝贵的研究价值和广阔的应用前景。

## 9 授时技术

授时就是将标准时间传递给用户，以实现时间统一的技术手段<sup>[33]</sup>。由于人类日常生活、经济活动、科学试验、国防等都需要在统一的时间基础上进行，因此需要建立标准时间产生、保持、传递和使用的完整体系。独立自主的时间体系甚至作为国家安全保障和综合实力的体现，美国、俄罗斯、日本都分别建立了国家时间频率体系，欧盟和我国也正在建立自己的时频体系<sup>[34-36]</sup>。

1) 标准时间：时间由周期运动的标准周期来衡量，时间标准经历了天文时和原子时。早期利用天体运动，如地球自转周期（日）的平均值——平太阳日，作为世界时 (UT0)，1 秒 = 1/86400 平太阳日，以公元前 4713 年 1 月 1 日 12 时为计时起点（历元），考虑到地极移动引起的经度变化，对 UT0 修正后成为 UT1。现今利用原子内部电子运动的周期作为标准时间秒，1 秒定义为铯 133 原子基态超精细能级之间跃迁 9192 631 770 个周期所持续的时间，称为原子时 (TAI)，原子

时从1958年1月1日0h0min0s (UT1) 起算。为避免原子时与天文时因秒长定义不一致而可能产生“昼夜颠倒”不协调现象,原子时通过闰秒(快或慢1 s)以产生接近UT1的特殊原子时标,这就是协调世界时(UTC)。UTC由国际计量局(BIPM)根据国际原子时数据给出,各地具有原子钟的守时实验室(i)在参与国际原子时合作的基础上给出地方时UTC(i)。

2) 守时:由于时间是流逝的,为保持时间坐标不中断,时间标准必须永远不间断地长期连续工作,这就叫守时。国际守时由分布在全球42个国家共74个实验室的约400台原子钟组(铯钟或氢钟)来执行,他们定期向BIPM上报地方原子时数据,BIPM对每台钟给出统计权重,算出国际原子时(TAI)和协调世界时(UTC),并每月发布公告。由于时间是关乎国家安全的战略资源,发达国家高度重视标准时间的管理。美国标准时间由国家标准技术研究院(NIST)和美国海军天文台(USNO)来保持;俄罗斯国家标准时间由国防部、标准化与计量委员会等九部委组成的委员会管理,由俄罗斯时间与空间计量研究所来保持;我国的标准时间由国家授时中心(NTSC)、中国计量科学研究院(NIM)和北京无线电计量测试研究所(BIRM)分别保持,“北斗”系统也有自己的独立守时机构。

3) 授时:国家标准时间的发播有天基系统(导航卫星授时)和地基系统(长波/短授时、电视、广播、网络、电话等)及搬运钟(现在已很少应用)等主要传递方式。原则上搬运授时精度最高,可以达到ns级,导航卫星授时可以达到50ns以下,长波授时可以到 $\mu\text{s}$ 级精度。

4) 用时:用户利用接受到的标准时间信号来统一采取行动,例如电力系统用标准时间来实现电网调度与故障定位,通信系统用标准时间来保障用户分时使用网络资源,金融系统用标准时间来实现资金调拨与股票交易,军事用户用标准时间来定时、定位、测速与导航。在信息化时代,不同用户可以实时分享和交互带有精密时间标记的信息,并据此生成新的信息,实现协同与联合,不仅可以提高活动的精准度,还可以大大提高效率与效能。

## 10 结束语

导航、定位与授时作为历史悠久且日新月异的技术,用统一的时间系统和空间坐标系表示时间、空间信息,满足国防和经济建设领域中陆、海、空、天用户需求。

科学技术的迅猛进展,将导航、定位与授时带到了一个新的发展时代。推进导航、定位与授时体系建设,开展导航、定位与授时技术研究,将产生显著的社会效益和经济效益,具有重要而深远的意义。

### 参考文献

- [1] 中国惯性技术学会. 惯性技术词典 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009. [China Inertial Technology Society. Inertial Technology Dictionary [M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2009.]
- [2] 冉承其. “北斗”卫星导航系统建设与发展 [J]. 国际太空, 2013, 10: 11 - 15. [Ran Chengqi. “Beidou” Satellite Navigation System Construction and Development [J]. Space International, 2013, 10: 11 - 15.]
- [3] 杨立溪. 惯性技术手册 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2013. [Yang Lixi. Inertial Technology Handbook [M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2013.]
- [4] 中国惯性技术学会. 惯性技术学科发展报告 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010. [China Inertial Technology Society. Report on Advances in Inertial Technology [M]. Beijing: China Science and Technology Publishing, 2010.]
- [5] Winick A. B., Brandewie D. M. VOR/DME system improvements [J]. Proceedings of IEEE, 1970, 58 (3): 430 - 437.
- [6] DOD of USA. Standard Tactical Air Navigation (TACAN) Signal. Mil - STD - 291C, 1998.
- [7] Helwig A., Offermans G., Last D., Bransby M., Williams P., Basker S. Enhanced Loran: Real - time maritime trials [C]. Proc. of PLANS 2008, 2008.
- [8] Creamer P. M., Warren R. S., Gupta R. R., Morris P. B. Omega Navigation System Course Book. Volume 1 [R]. Technical Report, AD - A285 948, 1994.
- [9] Buell H., Doremus D. The AN/ASN - 157; a single LRU Doppler Navigation System for helicopters [C]. AIAA/IEEE 12th Digital Avionics Systems Conference, 1993.
- [10] Kaplan E. D. Understanding GPS Principles and Applications [M]. Artech House, Inc. 1996.
- [11] 冉承其. 北斗卫星导航系统的发展 [J]. 卫星应用, 2013, 4: 4 - 7. [Ran Chengqi. Beidou Satellite Navigation System Development [J]. Satellite Application, 2013, 4: 4 - 7.]
- [12] Hay C., Lach S. AntiJam GPS for Precision Guided Munitions

- [R]. AIAA 994481. Zhou Zhiyu, Chen Hao. , Space Electronic Technology.
- [13] Groves P. D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems [M]. Artech House, 2008.
- [14] 高社生, 李华星. INS/SAR 组合导航定位技术与应用 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2004. [Gao Shesheng, Li Huaxing. INS/SAR Integrated Navigation Position Technology and Application [M]. Xian: Northwestern Polytechnical University Publishing, 2004.]
- [15] Blasch E. P., Layne J. R.. Integrated Synthetic Aperture Radar and Navigation Systems for Targeting Applications [R]. ADA337532, WL-TR-97-1185, 1997.
- [16] 齐战杰, 高璟. 地形匹配辅助导航的地形适配性分析 [J]. 无线电工程, 2001, S1: 29-31. [Qi Zhanjie, Gao Jing. Terrain Adaptation Analysis for Terrain Matching Aided Navigation [J]. Radio Engineering of China, 2001, S1: 29-31.]
- [17] Cowie M., Wilkinson N., Powlesland R. Latest Development of the TERPROM Digital Terrain system (DTS) [C]. Proc. of Location and Navigation Symposium, 1219-1229, Monterey, CA. 2008.
- [18] 房建成, 宁晓琳. 天文导航原理及应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006. [Fang Jiancheng, Ning Xiaolin. Celestial Navigation Principle and Application [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Publishing, 2006.]
- [19] 谭汉清, 刘垒. 惯性/星光组合导航技术综述 [J]. 飞航导弹, 2008, 5: 44-51. [Tan Hanqing, Liulei. Survey on Inertial/Star Integrated Navigation Technology [J]. Winged Missiles Journal, 2008, 5: 44-51.]
- [20] Goldenberg F. Geomagnetic Navigation beyond Magnetic Compass [C]. Proc. of PLANS 2006, 684-694. San Diego, CA. 2006.
- [21] Tyren C. Magnetic Terrain Navigation [C]. Proc. of 1987 5th Int. Symposium on Unmanned Submersible Technology, 245-256. 1987.
- [22] Thienel J. K., Harna R. R. Results of the Magnetometer Navigation (MAGNAV) in Flight Experiment [C]. AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit. Providence, Rhode Island, 2004.
- [23] Warren G. H. Gradiometer - Aided Inertial Navigation [M]. Analytic Sciences Corporation, 1975.
- [24] Jircitano A., Daniel E. Gravity Aided Inertial Navigation System. US Patent: 5339684, 1994.
- [25] John M., Hugh R., Stanley S. The Universal Gravity Module for Enhanced Submarine Navigation [C]. Proc. of IEEE PLANS 1998, 324-331, Palm Springs, CA, 1998.
- [26] DoD of USA. Developing Science & Technologies List, Section 16: Position, Navigation and Time Technology [R]. 2006.
- [27] Marr D. Vision [M]. W. H. Freeman and Company. 1982.
- [28] [http://mars.jpl.nasa.gov/mer/mission/spacecraft\\_rover\\_eyes.html](http://mars.jpl.nasa.gov/mer/mission/spacecraft_rover_eyes.html).
- [29] Kurtz J. DEMO III Experimental Unmanned Vehicle Autous Mobility System Overview [C]. Proc. of 1998 IEEE ISIC/CI-RA/ISAS joint Conference, 14-17, Gaithersburg, MD. 1998.
- [30] Williamson T. A. A High-Performance Stereo Vision System for Obstacle Detection [D]. Ph. D Thesis of Carnegie Mellon University, 1998.
- [31] Brandstein M. S., Silverman H. F. A Practical Methodology for Speech Source Localization with Microphone Arrays [J]. Computer Speech & Language, 1997, 11 (2): 91-126.
- [32] Russell R. A. Survey of Robotic Applications for Odor-sensing Technology [J]. The International Journal of Robotics Research. 2001, 20 (2): 144-162.
- [33] 童宝润. 时间统一系统 [M]. 国防工业出版社, 2003. [Tong Baorun. Time Uniform System [M]. Defense Industry Press, 2003.]
- [34] 王义道. 原子钟与时间频率系统 [M]. 国防工业出版社, 2012. [Wang Yiqiu. Atomic Clock and Time Frequency System [M]. Defense Industry Press, 2012.]
- [35] Matsakis D, Time and Frequency Activities at US Naval Observatory. Proc. of 41st PTTI Meeting, 2009, 261.
- [36] Domnin Y, Koshelyaevsky N, et. al. Activities and Updates at State Time and Frequency Standard of Russia, Proc. of 41st PTTI Meeting, 2009, 175.