

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.02.17

基于移动通信网络的导航定位体系的探讨

梁志国

(航空工业北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术重点实验室, 北京 100095)

摘要: 因导航定位有不可替代的作用, 本文简要介绍了几种常用的导航定位方法, 并对几种常用导航定位系统进行阐述, 总结归纳了不同导航定位系统的特点。进而, 提出了一种基于移动通信网络基站的低成本、高精度、快速、全球导航定位体现框架, 并对其特点、优势和技术可行性进行了讨论。该导航体现框架有望在未来的智能交通、智能机器人、智能物流、智能边防、港口自动化、军事行动等领域有良好的应用前景。

关键词: 导航; 体系; 移动通信; 基站; 全球

中图分类号: TB9; V24

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)02-0124-06

Discussion on Building a Navigation and Positioning System Based on Mobile Communication Networks

LIANG Zhiguo

(National Key Laboratory of Science and Technology on Metrology & Calibration, Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Several commonly used navigation and positioning methods are briefly introduced, some navigation and positioning systems are described, and the characteristics of different navigation and positioning systems are summarized. A low-cost, high-precision, fast, global navigation and positioning framework based on base stations of mobile communication network is proposed, and its characteristics, advantages and technical feasibility are discussed. The navigation framework is expected to have good application prospects in the future intelligent transportation, intelligent robots, intelligent logistics, intelligent nation defense, port automation, military operations and other fields.

Key words: navigation; system; mobile communication; base station; global

0 引言

在现实世界中, 人们表述任何行动时, 都会面临三个环节判定: 起始点在哪儿; 现在处于哪儿; 目标点在哪儿。其中的核心是定位问题, 在定位问题解决以后, 由起始点向目标点所进行的行动规划和引领则完全是一个导航问题。

导航被认为是涉及确定位置和方向的任何一种技能和研究。广义上, 导航是将航行载体从起始点引导到目的地的活动过程。狭义上, 导航是指给航行载体提供实时位置、速度和姿态信息的活动。可以认为, 从一个位置向另外一个位置行动的规划和引领可称为导航。其中, 起始点在行动中是随时间而不断变化的, 称为导航点。终点则既可能是固定目标, 也可能是另外一个不断变化坐标位置的运动目标, 如航行中的舰船、行驶中的车辆、运行中的卫星等。如果不能进行有效定位, 将无法确定运动目标点与导航点的相对位置, 无法进行有效的导航, 将造成迷航。

由于我们生活在三维空间和一维时间构成的四维

物理世界中, 因而, 完整的定位表述应该是三维空间和一维时间的定量表征。

导航的基础性工作包括: ①构建导航坐标系; ②确定导航起始点和目标点的坐标; ③制定并执行导航行动规划。

导航的范围不同, 其坐标系可以截然不同。对于小的局部区域导航定位, 仅使用本区域内的标志性固定参照物即可以完成。但用于局部区域以外的广泛区域时, 则十分不便。而对于没有视野内固定不变参照标志物的场合, 如沙漠、大洋深处、丛林深处等, 则无法简单以自然参照物方式进行导航定位, 需要另行人工构建。因而, 人们发明了经度、纬度、海拔高度等, 来定义地球上任何一处位置的空间坐标。而对于外太空, 则需要以恒星、星系为参照物进行空间定位, 才能进行更恰当的导航表征。其核心意图不过是导航坐标参照物的尺度应与导航的航程相适应, 两者差异过大将带来应用不便。

导航定位是人们生活中极为重要的一类活动, 在航空、航海、宇航、地面交通运输、地质勘察测绘、

军事行动等各个方面都有不可替代的作用。

1 几种典型的导航手段

为了实现导航定位,人们发明了多种不同的手段避免迷航^[1-13]。其中一些手段,无需另外构建辅助设施,单凭自身的功能即可实现定位导航,如指南针等,称为自主式导航;而另外一些手段则需要借助于构建的辅助设施组成导航系统来共同完成导航定位,称为非自主式导航。这些辅助导航的设施因自身的特征不同,而被冠以不同的称呼,例如:航标灯塔、导航信标、导航站、导航台、导航车、导航卫星等等,可以将它们统称为导航基站。

它们都是一些可以发射约定的明确导航信息的、自身绝对坐标已知的导航参考点,以主动发射方式或被动应答方式发送各种约定的导航信号,以辅助导航。例如航标灯塔会以闪烁灯光方式引导船舶航行。

尽管人们进行导航的最终目的是确定导航点和目标点的绝对坐标,并指导后续行动。但是其过程的实施,首先是确定它们与不同导航基站之间的相对坐标关系,并以此为基础,再通过计算转换成其绝对的导航坐标。相对坐标关系通常以距离、方向、角度、姿态、速度等方式进行表征。

1.1 测角与测向

地球是一个高速自旋转的悬空陀螺,由于物理原理,其自旋的轴线方向保持稳定不变,称作极轴。以此定义了参考方向的南与北和地球的子午线、经纬线,以地球的大地水准面定义了海拔高度。

地面上,导航点与地面导航基站测向产生的方向直线和导航点运动方向间的夹角 θ ,用于表征航行中导航点与基站之间的相对方位角,如图1所示。

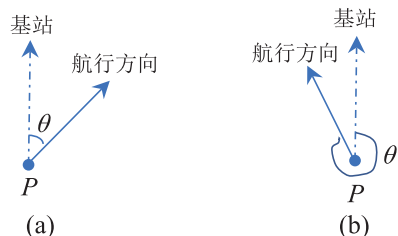


图1 导航点P的方位角 θ

通过相对方位角,可以确定导航点与导航基站点之间的相对方向位置。

仅凭一个相对方位角无法完成导航定位,需要借助其它手段确定导航点的坐标,由此产生了不同的导航定位原理。

在二维地平面假设模型下:

1)使用相对于两个不同基站的相对方位角,用双

直线交叉方式,可唯一确定导航点的坐标。

2)使用相对于一个基站的相对方位角,以及基站与导航点之间的距离,用直线与圆相交方式,可唯一确定导航点的坐标。

3)与两个固定导航基站之间距离差为恒定值的点的轨迹为双曲线。

4)与两个固定导航基站之间距离和为恒定值的点的轨迹为椭圆。

5)与一个固定基站之间的距离为恒定的点的轨迹为圆。

使用两个双曲线相交叉的方式:双曲线与直线交叉、双曲线与圆交叉、双曲线与椭圆交叉等方式均可以确定导航点的坐标。

这些包含各种不同规则的曲线相交点的确定,均可作为地平面上导航定位的基本原理。

1.2 测距与距离差

测距主要是通过测量确定导航点与基站间的直线距离。

当只有一个导航基站可用时,由于与该基站的距离为定值的点的轨迹为圆。人们只能判断导航点是在该圆周上,具体是哪一点,还不能由测距简单判定。

当存在两个导航基站点可以使用时,通常可以使用导航点到两个基站之间距离差为双曲线,从而进行导航点的确切定位。

1.3 导航定位

在地平面上,通过:①测向+测角,以两条直线相交方式实现导航点相对于基站点的定位;②测向+测距,以直线与圆的交点方式实现导航点相对于基站点的定位;③测距+距离差,以圆与双曲线交点方式实现导航点相对于基站点的定位;④测向+距离差,以直线与双曲线交点方式实现导航点相对于基站点的定位;⑤双距离差,以不同双曲线交点方式实现导航点相对于基站点的定位。

从空间距离上分,导航被分为进场导航、近程导航、中远程导航、全球导航、外空间导航等几种。

进场导航包括船舶的进港导航、飞行器的进场着陆导航、车辆的进场导航与运行调度等;

近程导航,通常指500 km以内范围的区域导航;中远程导航指500 km以上范围的区域导航;全球导航指可用于全球范围的陆、海、空域的导航定位。

若构建全球导航系统,则将地球看作是一个球体是必然的。相应地,导航定位也将不再局限于使用平面定位,而变成三维空间的坐标定位。

目前,影响力最大,应用最广泛,用户最多,准确度最高的全球导航定位系统即是卫星导航系统。它与地

面上布设固定基站的导航系统不同,是将导航基站放置到在轨运行的卫星上。它们不停地围绕地球高速飞行,坐标每时每刻都在不停地变化。因而,以它们为参照基准进行地面或空中导航点的坐标定位,需要同时关注时间和空间信息。只有在时间点精确已知的前提下,导航卫星的空间坐标才能精确确定,并以它为参照系,通过导航点在同一时刻与不同卫星的距离信息,用解算矩阵方程的方式,给出导航点的坐标位置信息。

2 几种导航系统及其特点

到目前为止,人们曾经应用过的导航系统有很多,其中,不依赖于导航基站的自主式导航系统主要有陀螺惯性导航系统、多普勒导航雷达系统等,其导航使用平面坐标系,导航点的定值主要依靠初始点的坐标,

再叠加两个方向的运动距离的累积。在惯性导航系统中,距离是通过对惯性加速度的二次积分获得距离增量,在多普勒雷达导航系统中,距离则是通过对多普勒频移对应的运动速度的积分获得的距离增量。

它们的优点是均无需额外构建导航基站,单凭自身即可实现导航定位。缺点是距离增量通过积分获得,因而,随着积分时间的增加,导航定位误差被累积,致使导航精度受限,不容易做到很高。

此外,多数是需要构建导航基站的导航系统,先后有无线电罗盘、无线电信标、甚高频全向信标(VOR)、塔康(TACAN)、罗兰(LORAN)、欧米伽(OMEGA)、卫星全球定位系统(GPS)、格洛纳斯(GLO-NASS)、伽利略(GALILEO)、北斗等等。

几种典型的导航手段的特点总结如表1所述。

表1 几种典型导航系统的特点

导航设备与系统	基站	基本原理	作用距离	导航精度	主要用途	优点	缺点
磁罗盘	无	地磁场与磁铁相互作用	全球	一般	航海、陆地方向导航。	简单易用;成本低。	仅定向,无法定位,易受磁性物质影响。
惯性导航系统	无	加速度积分测距离+陀螺定坐标系	全球	中等	空中、地面、水面、水下、太空全域导航。	全球全天候,无需基站,不受干扰;可得运动速度、坐标、航向角、姿态参数;实时更新导航数据;短期准确度高。	导航误差与时间成正比例关系;设备昂贵;初始准备时间较长;无时间信息。
多普勒导航雷达	无	速度积分测距离	全球	中等	飞行器导航	全球全天候,无需基站,不受干扰。	导航误差与导航时间成正比例关系。
无线电罗盘	有	差分测向	中远程	$\pm 3^{\circ} \sim \pm 10^{\circ}$ 较低	飞行器导航	简单易用;可选基站较多。	仅航向相对基站角度;无绝对方位;噪声干扰较大。
无线电信标	有	引导相对方位	近场归航 25英里	中等	飞行器进场、着陆,提示固定距离	简单易用。	作用距离近。
甚高频全向信标(VOR)	有	相位差表征相对方位角	近程导航 200英里	较高	航空无线电导航	以单个基站测方位角。	仅给出与地面基站间的磁方位角;与测距机联合方可定位。
测距机(DME)	有	应答时间差	几百公里	\	与基站距离	简单易用。	不能独立定位;需要多值解算。
塔康(TACAN)	有	测距+测向定位	几百公里	较高	舰载机导航、着舰	单基站定位;中近距离精确空中战术导航。	1948~1952年研制,技术较老。
罗兰(LORAN)	有	双曲线定位	2400公里	几十英里;数百英尺	航空,航海	中长距离;全天候导航。	系统昂贵;准确度较低;二战期间开发。
欧米伽(OMEGA)	8个基站	双曲线定位	1.2万公里;全球	1.6~3.2公里;200~300m	航空,航海	全球全天候;用长波频率可用于潜艇。	需要多基站定位;导航准确度较低。
GPS	24颗卫星基站	4星同步测距定位	全球	10~100m	海、陆、空全方位三维导航与定位	全天候;全球覆盖;三维定速定时高精度;快速省时高效率;应用广泛多功能。	地面基站维护成本较高,卫星易受敌方攻击干扰。
格洛纳斯(GLONASS)	24颗卫星基站	4星同步测距定位	全球	1.5m	海、陆、空全方位三维导航与定位	全天候;全球覆盖;三维定速定时高精度;快速省时高效率;应用广泛多功能。	地面基站维护成本较高,卫星易受敌方攻击干扰。
伽利略(GALILEO)	30颗卫星基站	4星同步测距定位	全球	几米	海、陆、空全方位三维导航与定位	全天候;全球覆盖;三维定速定时高精度;快速省时高效率;应用广泛多功能。	地面基站维护成本较高,卫星易受敌方攻击干扰。
北斗	30颗卫星基站	4星同步测距定位	全球	1~2米、分米级和厘米级精度	海、陆、空全方位三维导航与定位目标搜救	全天候;全球覆盖;三维定速定时高精度;快速省时高效率;应用广泛多功能。	地面基站维护成本较高,卫星易受敌方攻击干扰。

从表1可见,各种不同的导航系统和手段,均有其特定的主要应用场合,并在不同的历史时期,起着决定性作用。目前,最重要的主流系统和手段有两个,其一为惯性导航手段,它是目前唯一一种可以适应海、陆、空、天、水下等任何场合的全天候自主式导航系统。但由于复杂、昂贵而不能普及应用。其二为卫星导航手段,它是一种全球、全天候、高精度、廉价导航系统。其它导航手段均无法与它们相比拟。

尽管卫星导航系统目前处于主流,但也存在一些弱点和隐患。由于卫星处在轨道半径约为2万公里的空间,且在不停地运行,电磁波穿越如此长的距离将产生较大的不可忽略的延迟,因而卫星基站导航定位的基本算法,需要电离层补偿、大气延迟补偿修正、基站轨道误差的补偿修正等,且最终获得的距离称为伪距,换算成真正的距离仍然需要补偿修正。这导致其用于地面精确导航定位时,难度较大,需要额外引入差分方式进行补偿修正。

若能在地面上构建坐标尺度比较小的基站组合进行导航,基站坐标固定,不存在轨道修正;彼此间距离较短,时间延迟很短;没有电离层问题,无需另行修正;因而,将有效克服卫星导航系统的不足。但由于成本因素,不容易构建起全球导航定位系统。

2 基于移动通信基站的导航体系构建

2.1 基本思想

综上所述可见,自主式导航系统,无需额外的导航基站支持,即可实现全球、全天候导航定位,但系统复杂昂贵。其中,惯性导航系统是使用加速度二次积分产生距离的原理,进而推算定位;多普勒雷达导航则以速度积分获得距离,从而实现推算定位;导致它们的定位误差随着导航时间而累积。长时间导航时,导航精度下降较多。

非自主式导航系统,皆需要建设各种相应的导航基站,基站的建设和运行维护成本较高,一旦发生战争,容易成为敌方攻击目标,以至于丧失部分或全部导航功能。

有鉴于此,世界上各个主要军事强国,均千方百计地保护自己的独立导航定位系统不受敌方控制、攻击和瘫痪,同时,又一直在努力发展对敌方系统的摧毁和打击能力,如各种精确制导和打击武器,各种反卫星武器等等。构建一套低成本、高精度的导航定位系统,也是一种技术选择。

目前,基于无线网络通信的移动通信基站业已覆

盖全球。其中,4G及以下的通信基站网络已经完成全球覆盖,5G通信网络基站正蓬勃发展。

实际上,绝大多数通信基站均属于几何位置固定的定点基站,每一个基站拥有自己独特的物理空间坐标。它们完全可以通过精确测量、标定而准确测定。

移动通信基站通常通过移动终端的拨号申请、应答、建立通信链路,拨号与应答信号之间的时间差包含移动终端与基站之间的距离信息,可以尝试用于距离测量。

在移动通信信号覆盖的多数区域,每一个移动终端可以搜索到多个基站的信号。使用同一终端与多个不同基站之间的相互位置关系,完全可以用于移动终端的导航定位。

关于导航定位原理,若以测距技术为核心,则以测距为基础的各种原理皆可以使用,如双曲线定位、圆弧定位,以及直接使用卫星定位的基本算法,但无需电离层补偿、大气延迟补偿修正、基站轨道的补偿修正等等。

若以测向为核心,则测向、测角定位的各种定位原理可以使用。

2.2 基本原理

为简便起见,直接使用激励响应法测距原理进行导航定位。

首先,构建一个统一的导航空间坐标系;

其次,选取三个不在一条直线上的坐标位置已知的三个不同的导航基站 $A(x_a, y_a, z_a)$, $B(x_b, y_b, z_b)$, $C(x_c, y_c, z_c)$;则三个基站坐标点构成基站三角形 $\triangle ABC$ 和坐标平面。

设定待导航定位点 $P(x, y, z)$ 。通过激励响应法测距可以获得导航定位点相对于三个导航基站的距离分别为 $PA=r_a$, $PB=r_b$, $PC=r_c$,如图2、图3所示。

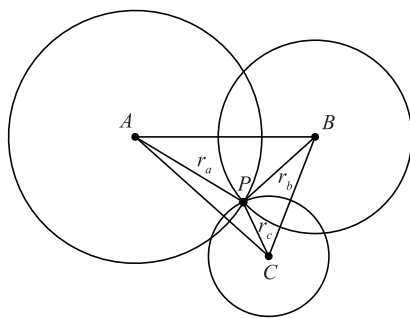


图2 导航点P与基站A, B, C位置关系图

其中,图2为导航点在坐标平面上的投影在基站三角形 $\triangle ABC$ 内的情况,是优先推荐的导航基站选取

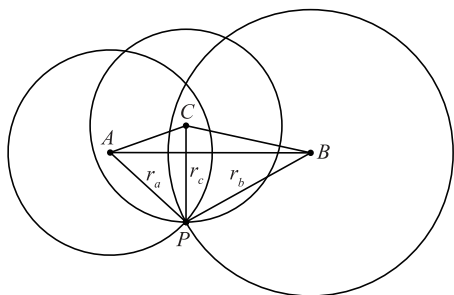


图3 导航点P与基站A, B, C位置关系图

方案;图3为导航点在坐标平面上的投影在基站三角形 $\triangle ABC$ 外的情况,是另一种导航基站选取方案。

实际上,通过移动通信终端P向基站A发送脉冲信号,并接收基站A发出的通信链路响应脉冲,测量获得两者的时间差 t_{PA} 。

$$t_{PA} = \tau_0 + \tau_{PA} \quad (1)$$

式中: τ_0 为基站A的系统响应延迟时间; τ_{PA} 为导航点P与基站A之间距离造成的时间延迟。则有,

$$r_a = c\tau_{PA} \quad (2)$$

其中, c 为光速。同理可得 r_b, r_c ;

满足 $PA=r_a$ 的点的轨迹是一个以 $A(x_a, y_a, z_a)$ 为圆心、半径为 r_a 的球面A;

满足 $PB=r_b$ 的点的轨迹是一个以 $B(x_b, y_b, z_b)$ 为圆心、半径为 r_b 的球面B;

满足 $PC=r_c$ 的点的轨迹是一个以 $C(x_c, y_c, z_c)$ 为圆心、半径为 r_c 的球面C;

球面A、球面B、球面C两两相交的轨迹通常是圆。

导航定位点 $P(x, y, z)$ 一定在三个球面的公共交点上。因而有方程组

$$\begin{cases} (x-x_a)^2 + (y-y_a)^2 + (z-z_a)^2 = r_a^2 \\ (x-x_b)^2 + (y-y_b)^2 + (z-z_b)^2 = r_b^2 \\ (x-x_c)^2 + (y-y_c)^2 + (z-z_c)^2 = r_c^2 \end{cases} \quad (3)$$

通过解上述方程组(3),可以获得导航定位点的坐标值 (x, y, z) ,从而完成导航定位,其定位原理与卫星导航基本相同^[1,5,8]。

关于导航定位误差问题,已经有众多先期研究可供参考^[14-21],本文这里不再赘述。唯一需要说明的是,本文所述的定位方法,其误差来源要比卫星导航系统少,可以使用更简化的模型进行处理,因而,可以获得更高的导航精度,由于北斗导航目前最高可以达到厘米级精度,本文所述方案,应该可以达到基本相同的导航精度。

如图4所示,若三个导航基站A, B, C在同一直线上时,由上述方程组(3)最后确定的三个球交点不唯一,通常是一个圆,例如点 P' 也满足方程组(3),因而无法唯一确定导航点的坐标。所以,导航基站的选择需要避免出现三个导航基站共线的情况。

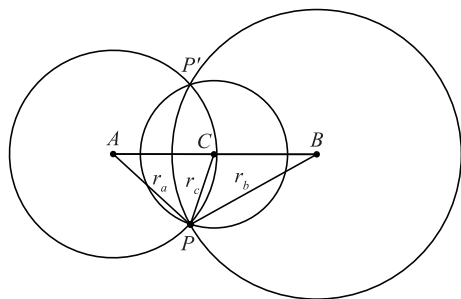


图4 导航点P与基站A, B, C位置关系图

2.3 应用讨论

在我国,目前有移动、联通、电信三大运营商,既可以使用每一个运营商自己的地面通信基站独立成体系,从而构建3套不同的、互相冗余备份的、基于移动通信基站的导航定位系统。也可以将三者整合为一,形成一套同时包含三家通信基站的统一的导航定位系统。

另外,也可以基于不同频段的通信技术,建立以频段划分为特色的导航定位系统。例如:5G移动通信技术正蓬勃发展,其通信基站将比4G移动通信及以下频段更为密集,通信速率更高,因而,其用于导航定位可望达到更高的精度和更快的速度,用于中近程导航定位,将更有优势。

在面临敌对势力的攻击和破坏时,每一个导航定位区域全部通信基站均被摧毁而不能工作的概率显然要小于卫星全部被毁的概率。并且,在智能无人驾驶汽车、港口自动化、智能无人机导航、边境无人巡航巡逻等应用中,应该具有独特的优势。

移动通信基站用于导航定位,从本身上讲,已经在无线通信公司的运营维护之中,无需另外增加构建和维护成本。而移动通信终端也有很多平台,在此基础上开发导航定位功能,其移动导航装置可望制作成低成本、高精度、高效率、高速的全球导航装备。除此以外,唯一需要做的是,首先通过测量标定,对每一个基站的空间坐标进行精确测定及编号,并形成基站坐标数据库。

由于移动通信标准的国际化,全球范围内遍布移动通信基站,而将其变为导航基站唯一要做的是对其

空间坐标进行标定和编号。若果然如此,在快速测量并定位任何一个通信基站以后,都可以立即将其转化为导航定位基站,用于导航定位。这使得利用各国的移动通信基站构建全球导航定位网络成为可能。为短期内在陌生地域快速构建导航定位手段提供了另外一种技术途径。

3 结束语

本文所提出的一种基于移动通信网络的导航定位体系,其基本思想是有效利用遍布全球的移动通信基站,在对它们进行几何空间的坐标定位标定后,将其变成天然的无线电导航基站,无需增加额外的构建、运营、维护成本,以现行的通信应答方式完成测距功能,进而完成导航定位。

由于地面移动通信基站多属于固定点目标,间隔密集,可选基站较多,与导航定位点之间的距离较短,没有电离层的影响,无需再进行地面差分补偿修正,有望获得比卫星导航系统更快、更高精度的导航结果。

由于移动通信标准的全球一体化,导致即使是敌方境内的地面通信基站,通过对其进行标定和赋值,也能变成我方的导航地面基站,从而进行导航定位。

这种基于移动通信基站的无线电导航体系框架,主导思想是以低成本、高精度方式为未来人工智能中的无人驾驶汽车的导航定位,智能机器人的导航定位等提供一种可供选择的低成本导航框架体系,并希望能在实用中有更好的生存性和容错性。目前仅是一种构想,后续工作需要研究予以确定和证实。

参 考 文 献

- [1] 魏光顺. 无线电导航原理[M]. 南京: 东南大学出版社, 1989.
- [2] 房建成. 天文导航原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [3] 倪育德, 卢丹, 王颖, 等. 导航原理与系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [4] 房建成, 宁晓琳, 田玉龙. 航天器自主天文导航原理与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [5] 黄智刚, 孙国良. 无线电导航原理与系统[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.

- [6] 杨晓东, 王炜. 地磁导航原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [7] 罗建军. 组合导航原理与应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2012.
- [8] 关惠平. 全球卫星导航定位系统及其定位原理[J]. 兰州: 兰州交通大学学报, 2003, 22(4): 68-71.
- [9] 邓正隆. 惯性导航原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1994.
- [10] 王丹. 塔康系统测位与测距技术的研究与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [11] 孙晶. 基于差分技术的罗兰系统授时精度提升[J]. 现代导航, 2020, 11(05): 9-11, 19.
- [12] 朱济杰. 欧米伽导航系统即将退出历史舞台[J]. 民航经济与技术, 1997(04): 44-48.
- [13] 邱丹, 黄圣国. 组合航向系统中数字磁罗盘的罗差补偿研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(22): 1369-1371.
- [14] 程新文, 陈性义. 手持式 GPS 定位精度研究[J]. 测绘通报, 2004(9): 20-22.
- [15] 赵传华, 吴智亮, 潘山, 等. 手持 GPS 单点定位精度分析[J]. 矿山测量, 2018, 46(2): 68-71.
- [16] 宋茂忠. 提高 GPS 定位精度的数据处理技术[J]. 数据采集与处理, 2001, 16(2): 220-226.
- [17] 高成发, 陈安京, 陈默, 等. GPS 精密单点定位精度测试与分析[J]. 中国惯性技术学报, 2006(06): 23-26.
- [19] 王晓华, 郭敏. GPS 卫星定位误差分析[J]. 全球定位系统, 2005(01): 45-49.
- [20] 刘林, 范平志. 一种降低定位误差的无线传感器网络节点定位改进算法[J]. 电路与系统学报, 2007, 12(2): 1-4.
- [21] 吕睿, 阳宪惠. 减少无线传感器网络节点定位误差的方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(S2): 145-149.

收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2021-03-10

作者简介

梁志国(1962-), 男, 黑龙江巴彦人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为数字化测量与校准、模式识别、动态校准、精确测量。

