

# 雾定位及其应用研究

施闯<sup>1,2</sup>, 辜声峰<sup>3</sup>, 景贵飞<sup>4</sup>, 耿江辉<sup>3</sup>, 楼益栋<sup>3</sup>, 唐卫明<sup>3</sup>

(1. 北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083; 2. 卫星导航与移动通信融合技术  
工信部重点实验室, 北京 100083; 3. 武汉大学 卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉 430079;  
4. 北京航空航天大学 前沿科学技术创新研究院, 北京 100083)

**摘要:** 全球卫星导航系统(GNSS)的发展促进了基于位置服务(LBS)的迅速普及,人们对高可靠、高可信、高精度定位、导航、授时(PNT)服务需求日益迫切. PNT 是一个融合多类技术、包括多级系统的体系架构. 围绕 PNT 服务体系优化, 国内外学者相继提出了全源导航定位(All source positioning and navigation)、弹性 PNT(Resilient PNT)、云定位(Cloud Positioning)等新的架构和技术体系. 本文提出以具备通信、计算、存储、定位、感知等能力的异构定位资源为基础设施, 通过智能管理与调度分布在不同地理位置的异构定位资源实现用户高可靠、高可信、高精度的 PNT 信息服务. 并由此给出了雾定位(Fog Positioning)与泛源导航定位(Omnipresent Positioning and Navigation)的定义, 指出雾定位的定义由分布式计算架构演化而来, 强调构成 PNT 服务体系的架构; 而泛源导航定位的概念是从定位技术的发展演化而来, 强调利用可获取的泛在导航定位数据源进行协同融合处理, 实现泛在定位的能力. 在此基础上, 通过与云定位比较, 指出雾定位是云定位向用户端的延伸, 是定位资源的泛在化实现, 同时雾是一种动态的、弹性的云, 因此雾定位是一种具备“弹性”性能的 PNT 架构. 而泛在定位是 PNT 信息服务发展重要目标, 雾定位给出了实现这一目标的潜在手段, 即泛源导航定位. 最后, 结合城市环境、室内环境等复杂场景, 研究了雾定位/泛源导航定位的基本服务模式.

**关键词:** 雾定位; 云定位; 弹性 PNT; 泛在定位; 泛源导航定位

**中图分类号:** P228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-9268(2019)05-0001-09

## 0 引言

2013 年开始, 随着 4G 通信技术的规模化商业应用, 卫星导航与移动通信技术的第一次成功融合应用, 使基于位置信息服务的新业态和新模式出现爆发式增长, 并迅速普及, 改变了人们日常生产、生活方式. 2020 年我国北斗卫星导航系统(BDS)将提供覆盖全球的高精度定位、导航和授时(PNT)服务, 与此同时 5G 通信技术也加快了商业应用步伐, BDS 与 5G 技术的融合, 给位置服务性能和应用范围带来巨大的提升和想象空间, 同时也对高可靠、高可信、高精度的 PNT 服务提出了巨大挑战.

受限于全球卫星导航系统(GNSS)技术本身

的脆弱性, 其在城市、室内等复杂环境下极易受到干扰, 以致无法正常提供导航定位服务. 为此, 国内外学者围绕惯性导航技术、视觉导航技术、无线导航技术(Wi-Fi、UWB、蓝牙等)、激光、雷达、地图/地磁/重力匹配等技术展开了深入的研究. 惯性导航属于航位推算技术, 其基本原理是通过测量载体运动的角速率和比力, 按照严格的数学物理关系积分, 获得相对于初始状态的导航信息<sup>[1-2]</sup>. 随着人工智能、深度学习技术的发展, 以及图像处理器计算性能的提升, 视觉导航在近十年发展迅速. 以 CCD 相机传感器为代表, 视觉导航通过序列影像特征点跟踪, 可实现载体相对位置与姿态变化估算; 另一方面, 也可通过将相机获取的影像与先验高精度地

收稿日期: 2019-10-12

资助项目: 国家重点研发计划(2016YFB0501802)

通信作者: 辜声峰 E-mail: gsf@whu.edu.cn

图进行匹配,获取载体在地图坐标系下的绝对位置<sup>[3-4]</sup>。除此以外,利用激光雷达、声纳等主动探测方式进行环境感知的导航技术也被称为主动视觉导航<sup>[5]</sup>。其中激光雷达技术随着智能驾驶的兴起得到了学术界与产业界的广泛关注,激光雷达能够以厘米级精度测定其与周边车辆或障碍物之间的距离,是实现自动驾驶环境感知的重要手段<sup>[6]</sup>。

无论是 GNSS,或是其他导航定位技术都有其局限性,任何单一技术都无法满足不同场景、不同环境导航需求。因此考虑不同传感器之间的互补性,基于多传感器信息融合,实现多源协同室内外无缝导航定位已成为当前研究热点<sup>[7-8]</sup>。

GNSS+INS 是目前研究最成熟、应用最广泛的组合导航技术之一,各国学者分别提出了基于位置/速度等信息的松组合,基于观测值信息的紧组合以及 INS 辅助 GNSS 信号跟踪的深组合<sup>[9-11]</sup>。通过将单目相机和惯性传感器结合,香港科技大学推出了即时定位与建图 SLAM 解决方案 VINS, VINS 采用预积分等处理方式,解决了相机和惯导采样频率对齐问题,进而实现了影像信息和惯性信息的深度耦合<sup>[12]</sup>。对于装备有视觉、磁力计等具有环境感知能力的载体,可通过将其与带有位置信息的地图或数据库匹配,辅助 GNSS/INS 实现可靠的、连续的导航定位<sup>[13]</sup>。卡尔曼滤波是组合导航领域最经典的数据处理算法之一,然而面对越来越复杂的导航环境,非高斯、非线性模型下,卡尔曼滤波难以保障导航解算的最优性,因此粒子滤波、凸优化等非线性算法逐渐成为导航定位数据处理领域热点研究方向<sup>[14-15]</sup>。

瞄准多源导航传感器集成的小型化、低功耗、低成本化的研究主要围绕传感器组合和算法的优化展开,并取得了丰富的研究成果。然而,PNT 是一个融合多类技术、包括多级体系的体系架构<sup>[16]</sup>。众多导航定位技术还依赖于导航场景上下文信息,例如,GNSS 终端模型算法的选择除了依赖于接收机传感器,还依赖于 GNSS 精密服务端产品的解算与播发;视觉导航的模式与性能不仅依赖于视觉传感器,还依赖于高精度地图数据库的获取与更新。因此,高可靠、高可信、高精度时空信息服务也依赖于 PNT 服务体系的优化。

考虑 PNT 体系架构,美国国防高级研究计划局(DARPA)等部门相继提出全源导航与定位(All source positioning and navigation)、安全 PNT (Assured PNT)、可选择 PNT(Alternative PNT)、

弹性 PNT(Resilient PNT)等新体系<sup>[17-20]</sup>。我国提出“2035 年前还将建设完善更加泛在、更加融合、更加智能的综合时空体系”的战略目标,为此,杨元喜院士深入研究了综合 PNT 以及弹性 PNT 等,指出综合 PNT 服务体系是未来 PNT 发展主要方向,弹性 PNT 强调 PNT 组件的弹性集成、多源 PNT 函数模型的弹性调整和随机模型的弹性优化<sup>[21-22]</sup>。

不同的架构与服务模式显著影响 PNT 服务的性能,施闯等<sup>[23]</sup>提出将互联网技术、云计算技术与 PNT 技术相结合,建立云定位服务:通过网络统一管理 and 调度包括对地观测卫星、移动基站、地图数据库等定位资源,建立“云定位服务器”,用户“端”收集可用于定位的信息上传到云,云经过信息综合处理实现对端的云定位服务。云定位的优势在于能够充分利用各类定位资源,满足不同场景下 PNT 服务需求,同时通过虚拟化技术提高服务系统的可靠性、可扩展性。然而随着万物互联时代的到来,一方面,越来越多的“物”需要获取高时效的 PNT 服务,这对“物”与云定位平台间的数据传输时延以及云定位平台数据处理效率等提出了极大的挑战;另一方面,万物互联时代中“物”都将具有一定的计算、感知能力,也具有一定的数据存储、处理与服务功能<sup>[24]</sup>,因此为 PNT 架构优化提供了新的契机。

实际上,随着物联网的发展,为解决云计算在时延、隐私等方面的弊端,Bonomi 等<sup>[25]</sup>首次提出了雾计算,通过在用户端与传统云平台之间部署雾节点,将一部分计算任务从云端迁移至更靠近用户的网络边缘,即雾节点处理。与云计算相比,雾计算更好的满足了用户应用的移动性、位置感知以及低延迟需求<sup>[26]</sup>。显然,导航定位应用对移动性、位置感知以及低延迟的需求更为迫切,为此本文在云定位基础上,进一步提出了雾定位。首先给出了雾定位的定义、架构,并由此引出泛源导航定位的概念;其次,讨论了雾定位/泛源导航定位与云定位、弹性 PNT、泛在定位等的区别与联系;再次,结合城市与室内等复杂场景下定位,介绍了雾定位基本流程;最后是本文总结。

## 1 雾定位与泛源导航定位

在云定位平台中,典型的工作流程为用户终端产生数据,数据经由互联网传输至云端,云端结合平台各类定位资源,为用户提供高可靠、高可信、高

精度位置服务.云定位平台通过计算资源虚拟化提高了其服务的可靠性、可扩展性,通过定位资源的统一管理调度实现了用户高精度连续无缝的 PNT 服务<sup>[23]</sup>.

传统云定位平台虽然是基于多计算、多存储设备协同工作的分布式系统,但这些设备在地理空间往往是集中式的.导航定位用户在地理空间必然是移动的、广域分布的,这意味着用户端链接通常为移动互联网,且需要多次通讯才能实现与云定位平台的数据传输,这对网络传输带宽提出了极大的挑战.

### 1.1 雾定位(Fog Positioning)

随着物联网、5G 时代的到来,以及路由、Wi-Fi、通信基站等的智能化升级,未来云定位平台中的网络中转节点将不仅仅是数据传输枢纽,还将具备数据存储、计算、定位服务等功能,进而分担一部分云定位平台数据处理任务、降低链路数据传输量及系统功耗.基于该思路,雾定位定义如下:

雾定位是一种 PNT 服务架构,该架构以具备

通信、计算、存储、定位、感知等能力的异构定位资源为基础设施,通过智能管理与调度分布在不同地理位置的异构定位资源实现用户高可靠、高可信、高精度的 PNT 信息服务.

该定义中服务架构的含义也可由服务模式,或服务模型表达.图 1 为雾定位架构示意图,其中上述雾定位定义中定位资源即为雾定位节点.一系列雾节点构成的基础设施,联合运行在该基础设施上的标准、软件、协议等共同构成了雾定位平台,雾定位平台是介于用户定位终端与云定位平台的中间层:一方面从云定位平台获取全局信息,如全球参考框架、雾定位节点拓扑结构等;另一方面响应 PNT 终端请求,综合调用终端上传数据、云定位平台与雾定位平台资源为用户提供服务.云定位平台由一个网络机房中服务器集群构成,因此在地理位置上属于集中式,而雾定位平台由一系列雾定位节点构成,在地理位置上广域分布,因此离 PNT 终端用户更近,有利于提高数据本地化程度,减少网络数据传输.

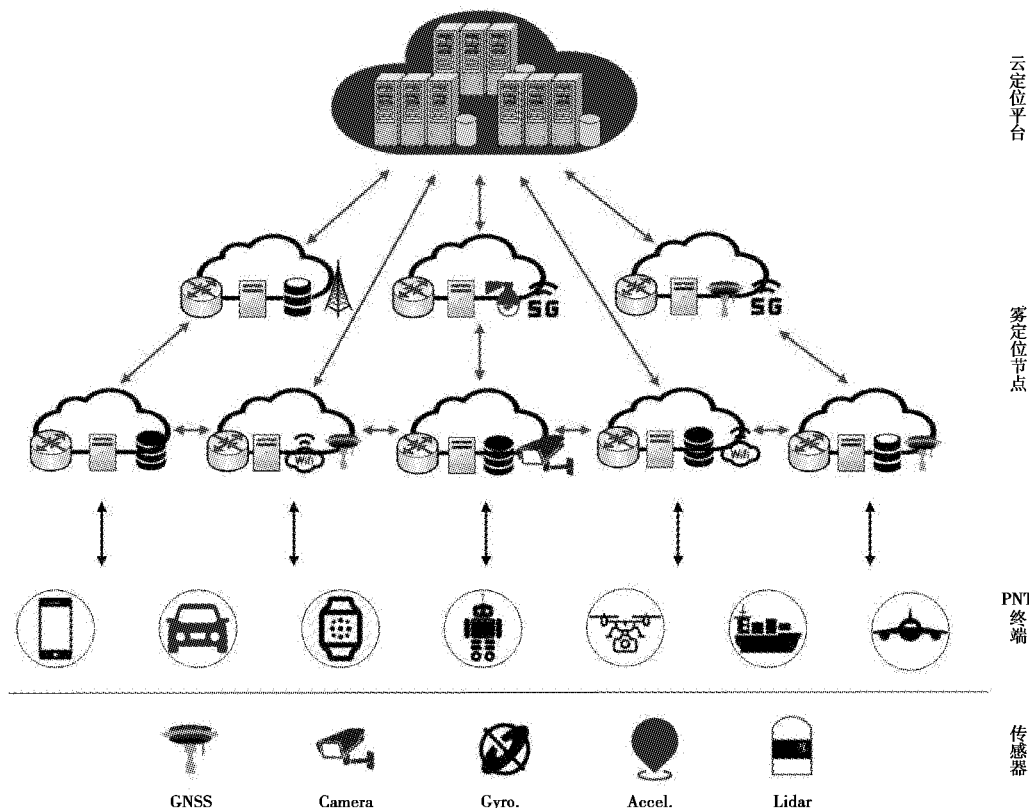


图 1 雾定位架构示意图

和雾计算中雾节点一样,雾定位节点至少具备网络、存储、计算等模块.网络模块用于终端-雾节点、雾节点-雾节点、雾节点-云平台间数据传输等;存储模块用于 PNT 终端数据缓存、地图/磁场数据库记录等;计算模块可用于雾节点数据库更新、用户 PNT 服务等.在此基础上,雾定位节点还可配备摄像头,使其具备环境感知与建图能力;配备 GNSS 接收机,使其具备 RTK 参考站服务、大气延迟建模能力;配备通信基站/Wi-Fi/ZigBee,使其具备无线导航能力.

由上述讨论可知,雾定位节点的模块构成并不唯一,在满足网络、存储、计算等基本功能后,可以根据需求灵活增减.这也意味着,云定位平台、用户终端设备都可以视为雾定位平台节点之一.

## 1.2 泛源导航定位

上述雾定位定义从计算服务架构角度给出,而从定位技术发展角度,基于本文提出雾定位架构有望实现泛源导航定位.

考虑任何单一导航定位技术都无法满足不同场景、不同环境导航需求,由此国内外学者提出多源导航定位,采用多种定位传感器协同实现连续、可靠的导航定位. DARPA 进一步提出全源导航定位,指出不仅可协同定位传感器,还可协同传统非定位传感器,如通信信号等提升用户定位性能.显然,多源导航定位、全源导航定位都强调用户终端多传感器的集成,然而考虑基于如 GNSS、视觉导航、通信信号等技术的导航都依赖于大气延迟模型、高精度地图、指纹库等用户场景上下文信息,单纯终端多源导航也无法充分发挥各传感器优势.

相比云定位中定位资源的高高在上,雾定位中,凡是具备通讯、计算、存储等功能的定位资源都可作为雾节点,实现了定位资源的泛在化,因此有望进一步提高用户 PNT 服务性能.由此,我们给出泛源导航定位定义:泛源导航定位是一种以用户周边具备导航场景上下文信息的平台为泛在化的导航定位资源,通过定位资源同一管理调度,实现用户基于场景上下文信息增强的导航定位技术.该技术使终端用户沉浸在定位资源中,为用户提供随时、随地、按需获取的导航定位上下文信息,进而提高用户 PNT 服务的可靠性、可信度以及精度.

可以认为,雾定位和泛源导航定位两者定义是相通的,例如雾定位中雾节点即为泛源导航定位中的定位资源.但两者角度不同,雾定位的定义由分布式计算架构演化而来,强调 PNT 服务的体系;

而泛源导航定位的概念是从定位技术的发展演化而来,强调导航定位数据融合处理.

## 2 与现有 PNT 架构关系

考虑雾定位和泛源导航定位是同一技术的不同方面,下面主要从雾定位出发,讨论其与云定位、弹性 PNT 以及泛在定位的区别与联系.

### 2.1 云定位

考虑用户终端数据信息与计算资源有限,终端独立定位模式难以满足高可靠、高可信、高精度需求,为此,施闯等<sup>[23]</sup>提出构建云定位平台,通过对网络中各类定位资源的统一管理和调度提高了用户 PNT 服务质量.

然而云定位中定位资源聚合度较高,用户需要向云端开放其数据资源,不仅破坏了数据隐私性,同时数据传输压力也难以满足 PNT 服务时效性需求.因此,终端定位与云定位各有优缺点,而雾定位是云定位模式与终端定位模式的中间形态.与云定位一样,雾定位同样依赖于网络技术、虚拟化技术、分布式处理技术.同时考虑雾定位平台由一系列分布在不同地理位置的雾节点构成,因此雾定位中资源聚合度相对较低.

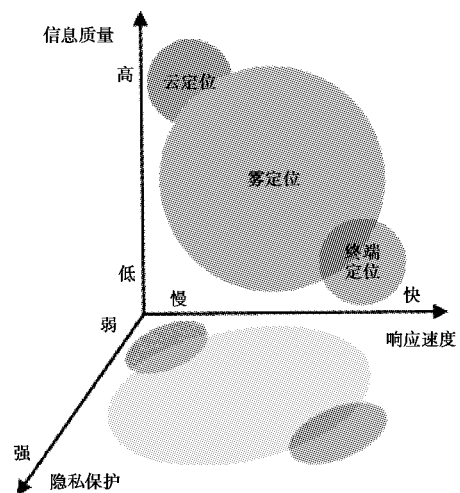


图 2 终端定位、云定位、雾定位 PNT 服务质量对比图

进一步从 PNT 信息质量、请求响应速度以及用户隐私保护级别三个维度比较了终端定位、云定位、雾定位三种 PNT 服务模式.如图 2 所示,雾定位可以认为是云定位向用户终端的延伸,由此实现了定位资源的泛在化.结合图 1 和图 2,云定位和雾定位有一定的重叠,这是由于云定位平台可以看作雾定位节点之一,而雾定位平台是更接近于用

户、动态弹性的云,同时由于用户终端本身可以作为雾节点,因此终端定位与雾定位也有一定的重叠。

## 2.2 弹性 PNT

瞄准“连续”、“稳健”和“可靠”的 PNT 信息生成,杨元喜院士指出弹性 PNT 服务体系是未来研究热点,并定义“以综合 PNT 信息为基础,以多源 PNT 传感器优化集成为平台,以函数模型弹性调整和随机模型弹性优化为手段,融合生成适应多种复杂环境的 PNT 信息,使其具备高可用性、高连续性和高可靠性,即为“弹性 PNT”<sup>[22]</sup>。

该定义重点强调了终端传感器的集成、函数模型弹性调整和随机模型弹性优化。然而除了终端传感器与数学模型外,PNT 作为一种融合了导航定位、电子信息、高性能计算等学科的综合技术,其服务性能也受限于体系架构。

结合雾定位定义,以及终端定位、云定位、雾定位三种模式比较分析,一方面,考虑单个雾定位节点的不确定性,雾定位平台必然是动态的,低耦合的;另一方面,雾定位建立了一种介于终端定位与云定位模式之间的服务架构,终端定位与云定位都可以认为是雾定位的特例或延伸,因此雾定位具有较高的伸缩性。

因此,本文作者认为雾定位是一种具备“弹性”的 PNT 架构。

## 2.3 泛在定位

实时化、智能化发展推动了传统测绘的创新升级,在此背景下,刘经南院士提出泛在测绘,并由此衍生定义了泛在定位:“泛在测绘是指用户在任何地点、任何时间为认知、环境与人的关系而创建和使用地图的活动。泛在定位是指用户在泛在测绘的过程中,利用多种感知技术来感知目标位置、环境及其变化的活动”<sup>[27]</sup>。

泛在定位强调了服务效果具备大众性、按需获取能力,同时模糊了用户与服务提供者的界限。云定位通过降低用户终端软硬件门槛,提高了服务的普适性,另一方面,作为云计算技术的实例,云定位本身即支持用户通过网络以按需、易扩展的方式获得所需服务<sup>[23]</sup>。雾定位是云定位向用户端、即网络边缘的延伸,不仅继承了云定位的上述优势,还有望进一步降低服务获取的成本。同时考虑用户终端也可作为雾节点,为其他用户提供服务,因此与泛在定位一样,雾定位中用户也具备双重身份。

实际上,雾定位将具备通信、计算、存储等基本

功能的定位资源视为雾节点,并通过一系列分布在不同地理位置的异构定位资源聚合管理,使用户沉浸在定位资源中,可以认为实现了定位资源的泛在化,即泛源导航定位。

综上,作者认为泛在定位是 PNT 信息服务发展重要目标,雾定位给出了实现这一目标的潜在手段:泛源导航定位。

## 3 雾定位应用研究

下面结合案例进一步说明雾定位/泛源导航定位运行模式。图 3 是包括城市、室内等复杂环境下,雾定位场景示意图。图中高楼大厦、交通信号灯、通信基站、无人机等都为雾节点。各雾节点都可配备摄像头,实现周边环境感知和建图;高楼大厦雾节点还可维护自身三维模型;通信基站可并置 GNSS 基准站。无人机也可作为移动雾节点,通过与车辆的伴飞,实现车辆-无人机联动定位。

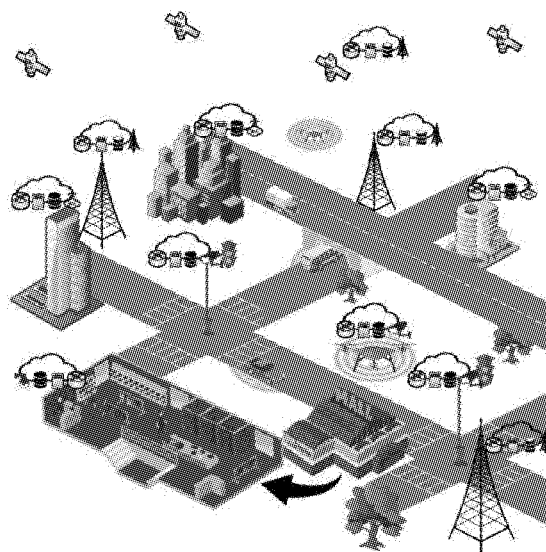


图 3 雾定位场景示意图

图 4 示出了基于雾定位的协同精密定位流程。图中符号及函数功能如表 1 所示。该场景下精密定位流程概括如下:

传感器层包括 GNSS 芯片、相机、陀螺仪、加速度计、激光雷达等,通过底层统一接口输入到上层处理层,上述传感器的观测数据记为  $G/C/G_y/A/L$ ,其数据传输/请求响应时间毫秒级。

载体计算机采集到最新的数据后,向雾节点发送相关数据,包括 GNSS 数据,原始的相机或/和雷达数据,其中 GNSS 数据传输延迟为毫秒级,相机或/和雷达数据传输延迟为亚秒级。雾节点收到

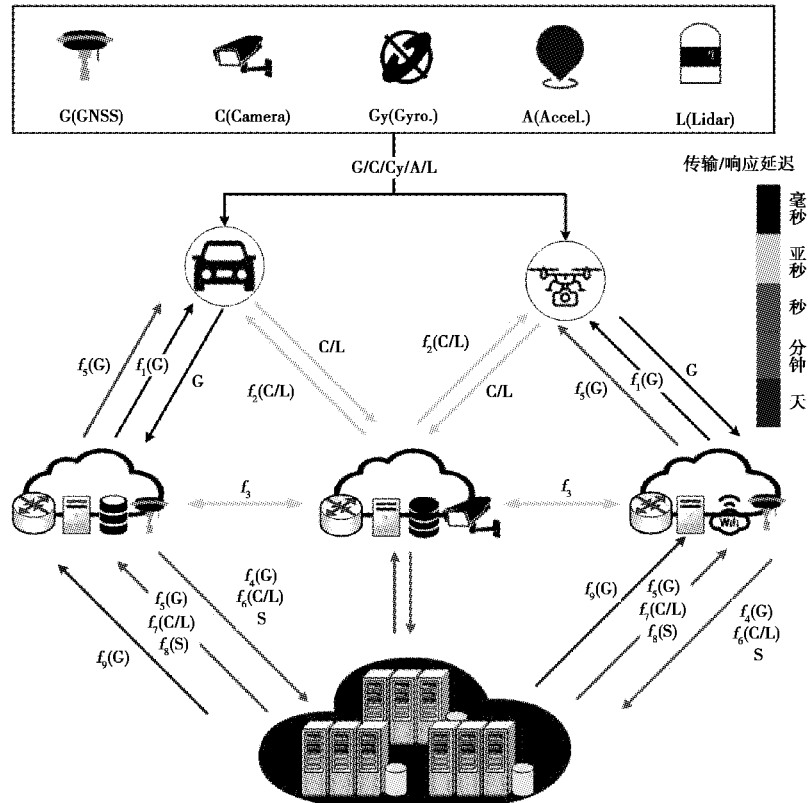


图 4 基于雾定位/泛源导航定位的协同 PNT 流程图(符号及函数功能说明如表 1 所示)

表 1 图 4 中符号函数及功能

符号	功能
$G/C/Gy/A/L$	卫星、相机、陀螺、加速度计、LiDAR 观测数据
$S$	雾节点状态信息
$f_1$	结合用户 GNSS 输入,返回大气增强信息、雾节点基站信息、虚拟参考站信息等
$f_2$	输入终端 Camera 或/和 Lidar 数据,结合雾节点区域内的高精度地图信息,匹配对应的数据,实现高精度影像信息或/和点云信息的解算与处理
$f_3$	终端设备进行雾节点切换时信息迁移
$f_4$	对原始 GNSS 数据进行处理,包括抽稀,预处理等
$f_5$	基于雾节点 GNSS 观测数据,处理生成 GNSS 全局增强信息,包括轨道、钟差、信号偏差等
$f_6$	基于相机数据或/和激光雷达数据更新的高精度地图增量信息
$f_7$	高精度地图更新信息
$f_8$	全局雾节点拓扑信息
$f_9$	全球参考框架信息

GNSS 原始数据后,利用雾节点基准站数据,构建高精度的 GNSS 大气增强等数据信息反馈到载体终端,即图中  $f_1$  函数,其数据传输/请求响应时间秒级;雾节点收到相机或/和雷达数据,与雾节点高精度地图信息匹配,反馈结合高精度地图约束或/和点云信息,即图中  $f_2$  函数,其数据传输/请求响应时间为亚秒级。

雾节点采集 GNSS 基准站数据  $f_4(G)$ 、各类环

境信息  $f_6(\frac{C}{L})$ 、并联合雾节点状态信息  $S$  等一起上传至云端。云端综合雾节点信息,采用自适应滤波、神经网络、深度学习等技术实现全球参考框架建立  $f_9(G)$ 、全局 GNSS 增强信息生成  $f_5(G)$ 、高精度高可靠全局地图更新  $f_7(\frac{C}{L})$ ,以及有效雾定位节点拓扑图维护  $f_8(S)$ 。云端解算完成全局信息

后,则划分相应的雾节点数据,分发到各个雾节点,更新雾节点的增强数据和高精度地图信息,其数据传输/请求响应时间一般为分钟级至天级。

同时,在终端设备运动到一定条件需要进行雾节点切换时,雾节点与雾节点之间需要实现载体终端的相关信息迁移,如双差定位时的双差模糊度基准等,即图中  $f_7$  函数的作用,其数据传输/请求响应时间一般为亚秒级。

在某些终端设备观测条件不好时(如城市峡谷中的车辆),通过协调相同或相邻雾节点中其他观测条件较好的设备(如高空中无人机)进行联动定位,具备高性能处理器的终端,可以充当雾节点,负责相关增强信息的计算,从而实现相同/相邻区域内多终端的联动定位技术。

需要特别指出的是,在该场景中仅列出了部分定位资源,实际上包括低轨卫星、VLBI、SLR 等都可作为雾节点,实现协同 PNT 服务。

## 4 结束语

受限于 GNSS 技术本身的脆弱性,其在城市、室内等复杂环境下极易受到干扰,以致无法正常提供导航定位服务。为此,国内外学者提出了多源系统精密定位。考虑协同精密定位中,各类导航定位技术不仅依赖于终端传感器数据本身,导航环境上下文信息的获取与更新也至关重要,因此,高可靠、高可信、高精度时空信息服务也依赖于 PNT 服务体系的优化。云定位通过各类定位资源的统一调度,提高了 PNT 服务的可靠性、可扩展性。然而传统云定位平台在地理空间往往是集中式的,难以满足导航定位用户对服务移动性、位置感知以及低延迟的需求。

为此,通过将一系列分布在不同地理位置的、具备通讯、计算、存储、感知等能力的定位资源作为雾节点统一管理,提出了雾定位,指出雾定位实现了云定位向网络边缘、即用户端的延伸,以及导航定位资源的泛在化,并由此衍生定义了泛源导航定位。作者认为,雾定位和泛源导航定位定义是相通的,两者是同一技术的不同方面。在此基础上,本文比较了雾定位/泛源导航定位与云定位、弹性 PNT、泛在定位的关系。最后给出了雾定位和泛源导航定位的应用场景和基本服务模式。

需要指出的是,由于 PNT 服务体系本身的复杂性,雾定位/泛源导航定位虽然为实现随时、随地、按需获取的 PNT 服务提供了潜在途径,但为

实现雾定位/泛源导航定位本身存在着巨大挑战,如网络节点数据一致性、数据传输处理协议、编程模式等都是未来亟需解决的问题。

## 参考文献

- [1] WOODMAN O J, WOODMAN C O J. An introduction to inertial navigation[J]. *Journal of Navigation*, 1956, 9(3):249-259.
- [2] 邓正隆. 惯性导航原理[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1994.
- [3] 王力. 影像/GNSS/INS 组合精密定位定姿方法研究[D]. 武汉:武汉大学博士毕业论文, 2015.
- [4] 朱锋. GNSS/SINS/视觉多传感器融合的精密定位定姿方法与关键技术[D]. 武汉:武汉大学博士毕业论文, 2019.
- [5] 黄显林, 姜肖楠, 卢鸿谦, 等. 自主视觉导航方法综述[J]. *吉林大学学报(信息科学版)*, 2010, 28(2): 158-165.
- [6] WOLCOTT R W, EUSTICE R M. Visual localization within LIDAR maps for automated urban driving[C]//*IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2014.
- [7] GROVES P D. The complexity problem in future multisensor navigation and positioning systems: A modular solution[J]. *The Journal of Navigation*, 2014, 67(2): 311-326.
- [8] GREJNER-BRZEZINSKA D A, TOTTH C K, MOORE T, et al. Multisensor navigation systems: A remedy for GNSS vulnerabilities [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2016, 104(6): 1339-1353. <http://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2528538>.
- [9] SCHWARZ K P, CHAPMAN M A, CANNON M W, et al. An integrated INS/GPS approach to the georeferencing of remotely sensed data[J]. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 1993, 59(11): 1667-1674.
- [10] EL-SHEIMY N. The development of VISAT: a mobile survey system for GIS applications[M]. Calgary, 1996.
- [11] BUCK T M, WILMOT J, COOK M J. A high G, MEMS based, deeply integrated, INS/GPS, guidance, navigation and control flight management unit [C]//*2006 IEEE/ION Position, Location, And Navigation Symposium*. IEEE, 2006: 772-794.
- [12] QIN T, LI P L, SHEN S J, SHEN S. VINS-mono: A robust and versatile monocular visual-Inertial state Estimator [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, PP(99):1-17.

- [13] 徐兴柱, 赵然, 危志英, 等. 嵌入式微惯导/GPS/磁力计组合导航系统设计[J]. 战术导弹技术, 2012(3): 111-114.
- [14] GEORGY J, NOURELDIN A, KORENBERG M J, et al. Low-cost three-dimensional navigation solution for RISS/GPS integration using mixture particle filter[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(2): 599-615.
- [15] ZHANG L, XIONG Z, LAI J, et al. Research of optical flow aided MEMS navigation based on convex optimization and ROF denoising[J]. Optik, 2018, 158: 1575-1583.
- [16] FISCHER J, OCONNOR M, SCHUE C. A holistic approach to trusted, resilient PNT: GNSS, STL and eLoran. [P/OL]. [https://www.rolia.com/sites/default/files/document-files/Holistic-Approach-to-Trusted-Resilient-PNT\\_0.pdf](https://www.rolia.com/sites/default/files/document-files/Holistic-Approach-to-Trusted-Resilient-PNT_0.pdf).
- [17] NARINS M. The benefits of alternative positioning, navigation, and timing (APNT) to aviation and other users: The need for robust radio navigation, integrated communications [C]// Navigation and Surveillance Conference. Herndon, VA, USA: IEEE, 2012: 1-37.
- [18] PARKINSON B. Assured PNT for our future: PTA actions necessary to reduce vulnerability and ensure availability [C]// Proceedings of the 25th Anniversary GNSS History Special Supplement: GPS World Staff, 2014.
- [19] BURKE J. DARPA positioning, navigation, and timing (PNT) technology and their impacts on GPS users [P/OL]. 2018[2019-09-30]. <https://www.gps.gov/governance/advisory/meetings/2019-06/burke.pdf>.
- [20] HAMILTON B A. More resilient positioning, navigation and timing (PNT) through open architecture and analytics viewpoint. [P/OL]. 2019[2019-09-30]. 2019. [https://www.govexec.com/media/more-resilient-positioning-navigation-and-timing-pnt-through-open-architecture-and-analytics\\_\(1\).pdf](https://www.govexec.com/media/more-resilient-positioning-navigation-and-timing-pnt-through-open-architecture-and-analytics_(1).pdf)
- [21] 杨元喜. 综合 PNT 体系及其关键技术[J]. 测绘学报, 2016, 45(5): 505-510. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2016. 20160127.
- [22] 杨元喜. 弹性 PNT 基本架构. 测绘学报[J], 2018, 47(7): 893-898. DOI: j. AGCS. 2018. 20180149.
- [23] 施闯, 章红平, 辜声峰, 等. 云定位技术及云定位服务平台[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(8): 995-999.
- [24] 施巍松, 孙辉, 曹杰, 等. 边缘计算: 万物互联时代新型计算模型[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(5): 907-924.
- [25] BONOMI F, MILITO R, ZHU J, et al. Fog computing and its role in the internet of things [C]// Proceedings of the first edition of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing. ACM, 2012: 13-16.
- [26] YI S, LI C, LI Q. A survey of fog computing: concepts, applications and issues [C]// Proceedings of the 2015 Workshop on Mobile Big Data. ACM, 2015: 37-42.
- [27] 刘经南. 泛在测绘与泛在定位的概念与发展[J]. 数字通信世界, 2011(s1): 28-30.
- [28] PETER T, OLIVER M. Springer handbook of global navigation satellite systems [M]. Springer, 2017.

#### 作者简介

**施闯** (1968—), 男, 博士, 北京航空航天大学电子信息工程学院教授, 主要从事数据平差、GNSS 与低轨卫星定轨以及实时精密定位等方面科研、教学等工作。

**辜声峰** (1986—), 男, 博士, 武汉大学卫星导航定位技术研究中心副教授, 主要从事高精度 GNSS 数据处理、电离层建模等方面科研、教学等工作。

**景贵飞** (1968—), 男, 博士, 目前为北京航空航天大学前沿科学技术创新研究院研究员, 主要从事北斗系统、导航与位置服务的科研、教学工作。



## Fog positioning and its applications

SHI Chuang<sup>1,2</sup>, GU Shengfeng<sup>3</sup>, JING Guifei<sup>4</sup>, GENG Jianghui<sup>3</sup>, LOU Yidong<sup>3</sup>, TANG Weiming<sup>3</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China;  
2. Laboratory of Navigation and Communication Fusion Technology, Ministry of Industry and Information  
Technology, Beijing 100083, China; 3. GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079,  
China; 4. Research Institute of Frontier Science, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** With the development of GNSS, the LBS (Location Based Service) has been popularized rapidly. Meanwhile, people's demand for PNT service with high reliability, high credibility and high precision is increasingly urgent. PNT is a system which integrates multi-technology and multi-level systems. Focusing on the optimization of PNT service, domestic and overseas scholars have put forward several new architectures and technical systems such as All Source Positioning and Navigation, Resilient PNT and Cloud Positioning. This study states, that with heterogeneous positioning resources which are capable in communication, calculation, storing, positioning and sensing as infrastructure construction, PNT service with high reliability, high credibility and high precision can be realized by intelligent management and scheduling of heterogeneous positioning resources distributed in different geo-locations. Further, the definitions of Fog Positioning and Omnipresent Positioning and Navigation are given. It is argued that the definition of Fog Positioning is evolved from distributed computing architecture and emphasizes the architecture for PNT service. While the definition of Omnipresent Positioning and Navigation is evolved from the development of positioning technology and emphasizes the ability to realize omnipresent positioning by collaborative fusion processing of omnipresent positioning resources. On this basis, by comparing Fog Positioning with Cloud Positioning, this study points out that Fog Positioning is the extension of Cloud Positioning towards the user side and the omnipresent realization of positioning resources. Meanwhile, Fog Positioning is one kind of dynamic and elastic cloud, so Fog Positioning can be seen as a PNT architecture with the property of elasticity. Omnipresent positioning is an important target of PNT architecture, and Fog Positioning gives the potential means for this target, e. g. , Omnipresent Positioning and Navigation. At last, this contribution analysis the basic service mode for Fog Positioning or Omnipresent Positioning and Navigation under the city environment and indoor environment.

**Keywords:** fog positioning; cloud positioning; resilient PNT; ubiquitous positioning; omnipresent positioning and navigation