

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.02.002

通信导航融合定位技术发展综述

邓中亮, 王翰华, 刘京融

(北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876)

摘要:详细分析了蓝牙、Wi-Fi、超宽带、移动通信网络等多种无线网络通信导航融合定位技术的发展现状,并阐述了其面临的挑战,提出了多网融合方法可以提升室内无缝高精度位置服务的可靠性。利用5G移动通信网络,与北斗/GNSS卫星导航系统结合,可以实现相互增强。最后,从天地一体定位导航与授时体系和仿生通信定位导航两方面介绍了通信导航融合定位技术的未来发展趋势。

关键词:通信导航融合;无线网络定位;移动通信网络;5G

中图分类号:TN961 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-8110(2022)02-0015-11

Status and Trend of Communication-Navigation Integrated Positioning Technology

DENG Zhong-liang, WANG Han-hua, LIU Jing-rong

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: The development status of the communication-navigation integrated positioning technology for wireless networks, such as Bluetooth, Wi-Fi, ultra-wideband and mobile communication network, are analyzed in detail, and the challenges of the technologies are explained. The effect of multi-network integration method on the reliability of indoor seamless high-precision location services is described. Utilizing 5G mobile communication network, combined with Beidou/Global Navigation Satellite System, a mutual enhancement can be achieved. Finally, future development trend of communication-navigation integrated positioning technology is introduced from the two aspects of the space-ground integrated positioning navigation and timing system and the bionic communication positioning and navigation.

Key words: Communication-navigation integrated; Wireless network positioning; Mobile communication network; 5G

0 引言

习近平总书记在十九大报告中提出建设智慧社会。泛在的高精度时空信息是智慧社会建设的核心基础,已成为国家安全、经济建设的关键,在未来社会中将扮演重要角色^[1-2],例如:

- 1)赋能安全生产,实时监控工人、装备位置,预测生产态势,使救援模式从被动响应变为主动防御;
- 2)赋能智能制造,实现工厂高效无人化运行,提升生产效率;
- 3)赋能智慧农耕,实现大农业区范围的无人化作业,降低人工成本;

收稿日期:2021-09-20;修订日期:2021-11-30

基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0502000)

作者简介:邓中亮(1965-),男,博士,教授,主要从事室内外无缝通信导航融合定位技术方面的研究。

4) 赋能智慧交通, 实现自动驾驶和车辆与设施的智能调度, 缓解交通压力, 提高运行效率;

5) 赋能物流运输, 构建基础设施体系, 支撑无人车、无人机精确控制与监管;

6) 赋能智慧医疗, 提升疫情预警与防控效率, 增强病患关怀能力。

目前, 全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS) 在室外可提供高精度位置服务, 但在室内、山区、地下等障碍物遮蔽环境下存在信号覆盖盲区^[3], 仅依赖 GNSS 进行定位难以满足泛在的高精度时空信息需求。同时, 独立工作的 GNSS 接收机需要 10s 级的初始定位时间, 也存在定位服务延迟较长的问题。

通信导航融合定位技术成为解决室内定位问题、增强位置服务能力的有效手段。近年来, 由于无线通信技术的普及, 以移动通信网络为代表的无线网络已经成为人们生活的必需品, 我国 2G、3G、4G 网络已经在城市、乡村、道路等区域达到了 90% 以上的覆盖率。研究者将无线网络作为解决室内定位问题的手段, 利用无线网络在室内场景中实现精准的定位导航, 与 GNSS 结合形成泛在、高精度的时空信息感知能力。因此, 通信与导航的融合已经成为了当下的研究热点。

本文首先阐述了通信与导航的融合方式, 讨论了无线网络通信导航融合定位技术面临的挑战, 并重点分析了几种常用无线网络通信导航融合定位技术的发展现状, 然后讨论了多网融合的作用, 阐述了北斗与 5G 结合产生的增强效应, 最后讨论了通信与导航融合的未来发展趋势。

1 通信与导航的融合

通信与导航的融合可分为以下三种方式: 1) 导航系统对通信系统的增强; 2) 通信系统对导航系统的增强; 3) 无线网络的通信导航一体化融合。

1.1 导航系统对通信系统的增强

如图 1 所示, 导航系统提供的高精度时空信息可赋能通信系统, 提高网络运行效率与安全性。例如:

1) GNSS 可以为通信网络提供高精度纳秒级甚至亚纳秒级的网络时间同步, 用于提升通信网络运行的安全性和稳定性^[4];

2) 高精度的终端位置信息还能够辅助通信系统提高移动管理效率和天线波束管理准确性, 增强网络运行效率^[5]。

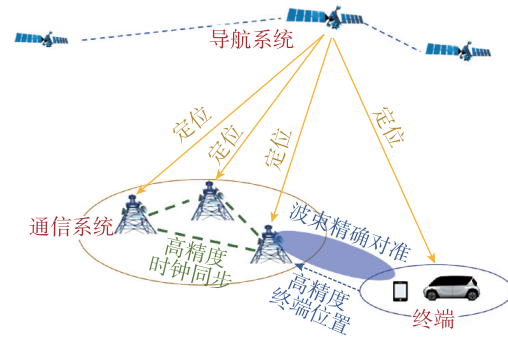


图 1 导航系统对通信系统的增强示意图

Fig. 1 Schematic diagram of enhancement of the communication system by the navigation system

1.2 通信系统对导航系统的增强

如图 2 所示, 通信系统可作为导航辅助信息与增强信息的传输通道, 对导航系统进行增强。例如:

1) 辅助 GNSS (Assisted GNSS, A-GNSS) 技术, 利用通信网络转发导航电文、概略位置、时间信息和频率信息等至用户终端, 辅助融合终端接收卫星信号, 减少捕获时间, 提高灵敏度^[6];

2) 差分增强系统也可使用通信网络作为改正数等增强信息的传输通道, 提高终端的定位精度^[7]。

这种方式下定位服务仍然依靠导航系统实现, 并不能解决室内、山区、地下等环境下的定位问题。

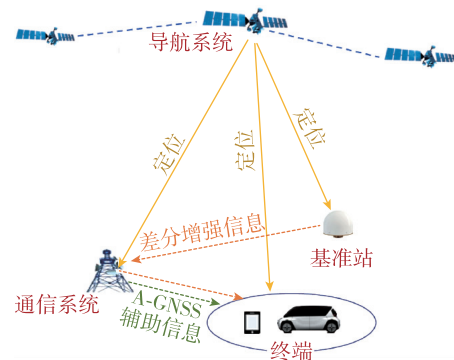


图 2 通信系统对导航系统的增强示意图

Fig. 2 Schematic diagram of enhancement of the navigation system by the communication system

1.3 无线网络的通信导航一体化融合

通信和导航的一体化融合是指使同一套系统实现两方面功能, 我国北斗卫星导航系统的短报文功能就是这一融合方式的典型案例^[8], 但更多的融合还是用于地面无线通信网络实现定位功能, 解决卫星定位系统的室内服务盲区问题。例如:

1) 蓝牙技术除了用于设备间通信外, 还能通过接

收信号强度指示(Received Signal Strength Indication, RSSI)^[9]和信号到达角度(Angle of Arrival, AOA)^[10]进行终端定位;

2) Wi-Fi 技术除了无线路由外,也可支持基于 RSSI^[11]、AOA^[12]和信号飞行时间(Time of Flight, TOF)^[13]的定位;

3) 超宽带(Ultra-Wideband, UWB)技术作为无线个域网(Wireless Personal Area Network, WPAN)通信技术也支持基于 TOF 的定位^[14];

4) 移动通信网络则支持小区标识法(Cell-ID)^[15]和基于信号到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)、TOF 以及 AOA 等多种观测信息的定位方法,还设计了专用的定位参考信号(Positioning Reference Signal, PRS)以支持更高精度的终端定位^[16]。

无线网络通信导航融合定位技术已经成为了解决室内定位问题的主要手段之一。

2 无线网络通信导航融合定位技术面临的挑战

无线网络通信导航融合定位技术面临以下几方面挑战:

1) 可测性。在室内、山区和地下等环境下具有信号被遮挡和反射面多的特点,导致多径干扰严重、非视距问题频发,对无线信号的测量带来极大挑战。

2) 可靠性。单一网络存在覆盖盲区,需要融合多种网络实现高可靠的定位,但不同网络之间在基准、观测量、方式、能力上都存在明显差异,如何融合异构的多种网络实现定位能力的提升是面临的一大挑战。

3) 精确性。传统无线网络通信导航融合方法采用非连续信号测量,在测距精度上具有先天不足,实现厘米级的测距能力还需要进一步技术突破。

4) 鲁棒性。主流的导航控制与决策方法中测算技术独立实现,通信导航融合后可与关联大数据、智能控制等实现一体化整合,但相应技术仍需进一步研究。

5) 实时性。未来将面临秒级响应和千亿量级的位置服务访问需求,巨量位置感知计算的实时性处理则是必须克服的挑战。

3 无线网络通信导航融合定位技术发展现状

3.1 蓝牙定位

蓝牙技术是一种常用的短距离无线技术标准,工

作于非授权 ISM(Industrial Scientific Medical)频段,主要用于 WPAN,由蓝牙技术联盟(Bluetooth Special Interest Group, Bluetooth SIG)进行管理和标准化,早期的 1.1 和 1.2 版本曾被电气与电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)作为 802.15.1 标准,但后续版本仍主要由 Bluetooth SIG 进行标准化。蓝牙定位技术的演进过程如图 3 所示。

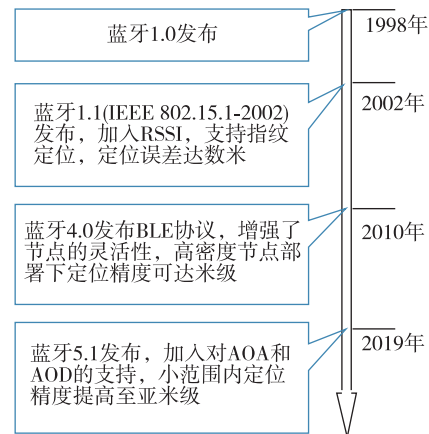


图 3 蓝牙定位技术演进过程

Fig. 3 The evolution process of Bluetooth positioning technology

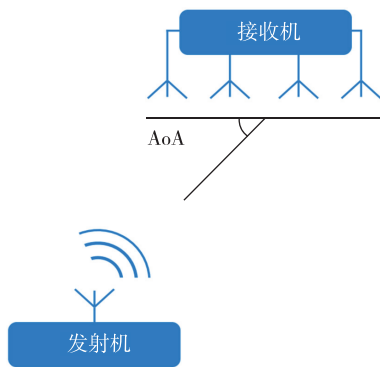
作为一种最初仅为通信功能创立的无线技术标准,蓝牙在定位方面的发展可分为 3 个阶段:

1) 2002 年,蓝牙 1.1 即 IEEE 802.15.1-2002 标准中引入了对 RSSI 的测量功能^[17],使得基于蓝牙可以实现信号强度的指纹匹配定位,或通过路径损耗模型计算信号传播距离后的三边定位,定位误差可达数米^[18],但这一阶段的蓝牙技术功耗较高,难以支撑长时间的信号收发,实际应用能力较差。

2) 2010 年,蓝牙 4.0 版本低功耗蓝牙(Bluetooth Low Energy, BLE)协议推出^[19],极大降低了蓝牙设备的续航时间,至 2013 年后苹果公司等多家企业相继推出了蓝牙信标(Beacon)产品,使得蓝牙定位网络的部署成本极大降低^[20],但这一阶段蓝牙仍然主要依靠 RSSI 进行定位,在阶段部署密度较高的情况下,定位精度最高能达到米级。

3) 2019 年,蓝牙 5.1 标准中加入了对 AOA 和信号离去角度(Angle of Departure, AOD)的支持^[21],融合 RSSI 和 AOA 测量结果可提高定位精度,能够提供亚米级的定位精度^[22],如图 4 所示。

蓝牙定位存在两方面问题:1) BLE 信号带宽仅为 2MHz,在室内环境中受到多径干扰严重,定位精

图 4 蓝牙 5.1 的 AOA 测量示意图^[23]Fig. 4 Schematic diagram of AOA measurement using Bluetooth 5.1^[23]

度的进一步提高较为困难^[24]；2) 蓝牙技术面向 WPAN 设计, Beacon 节点覆盖范围一般仅为 10m 左右, 如需大范围无缝定位服务则需要部署巨量节点, 成本较高。

3.2 Wi-Fi 定位

Wi-Fi 是一种基于 IEEE 802.11 标准的无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)技术。Wi-Fi 定位技术的演进过程如图 5 所示, 也可分为 3 个阶段:

1) 1999 年, 最初的几种 Wi-Fi 版本都支持基于通信信号的 RSSI, 可进行指纹匹配或三边定位^[25], 但与蓝牙不同的是, 基于 IEEE 802.11a 的 Wi-Fi 和之后的多数版本都采用正交频分复用调制(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术, 可以提供信道状态信息(Channel State Information, CSI)^[26], CSI 相比 RSSI 具有更高维度, 能够提供亚米级的指纹定位精度^[27], 但 CSI 特征会随时间动态变化, 导致定位精度随时间延长而降低;

2) 2009 年发布的基于 IEEE 802.11n 标准的 Wi-Fi 4 版本中, 加入了对天线阵列多入多出技术(Multiple Input Multiple Output, MIMO)的支持, 可以实现基于 AOA 的三角定位, 可提供米级的定位精度^[28];

3) 在 IEEE 802.11-2016 版本发布后, Wi-Fi 加入了精密定位测量(Fine Time Measurement, FTM)^[29], 支持往返时间(Round-Trip Time, RTT)的测量, 与 RSSI 融合可以支撑更为准确的距离测量^[30], 与 AOA 结合则可以使单接入点在小范围内提供亚米级的定位精度^[31], 如图 6 所示。

Wi-Fi 定位技术的问题在于 Wi-Fi 标准面向

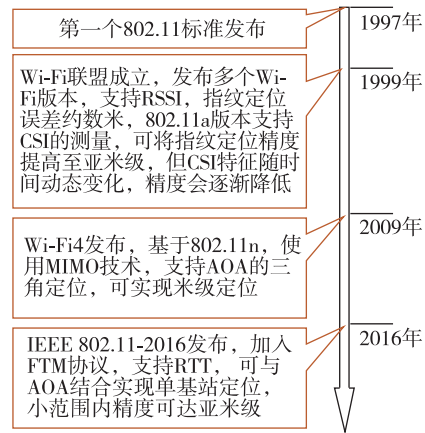
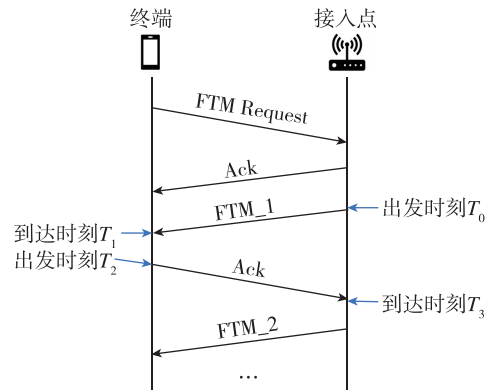


图 5 Wi-Fi 定位技术演进过程

Fig. 5 The evolution process of Wi-Fi positioning technology

图 6 Wi-Fi 的 FTM 协议 RTT 测量流程示意图^[32]Fig. 6 Schematic diagram of Wi-Fi FTM protocol RTT measurement^[32]

WLAN 设计, 信号覆盖范围为 10m 级, 且不具有类似于蓝牙 Beacon 的小型化节点, 导致进行大范围覆盖需要极高的建设成本。

3.3 UWB 定位

UWB 技术是一种短距离、低功耗、大带宽的无线技术, 主要用于 WPAN 通信。在定义上, 相对带宽大于 0.2 的无线技术都能称为 UWB 技术^[33], 但是在当前应用中, 使用较为广泛的是 IEEE 802.15.4a 标准中规定的基带窄脉冲 UWB 技术^[34]。

UWB 技术在定位上的优势在于其信号具有最低 499.2MHz 的大带宽, 使得该技术具有较高的时间分辨率和较强的抗多径能力, 同时 UWB 信号支持双向测距(Two-Way Ranging, TWR)协议获得 TOF 观测信息, 基于三边定位可实现厘米级的定位精度^[35]。

UWB 定位技术的问题包括两方面: 1) 与蓝牙、Wi-Fi 等技术相同, 信号覆盖范围较小, 大规模覆盖

需要极高的网络建设成本;2)现有终端对 UWB 的支持较少,绝大多数终端都不支持 UWB 技术。

3.4 移动通信网络定位

移动通信网络作为现今应用最为广泛的广域通信网络之一,在城市、乡村、道路等区域实现了广域覆盖,依托该网络进行通信导航融合,可实现高精度定位,能够避免大规模通信导航融合专用网络的建设,极大降低了网络建设成本。移动通信网定位技术的演进过程如图 7 所示。

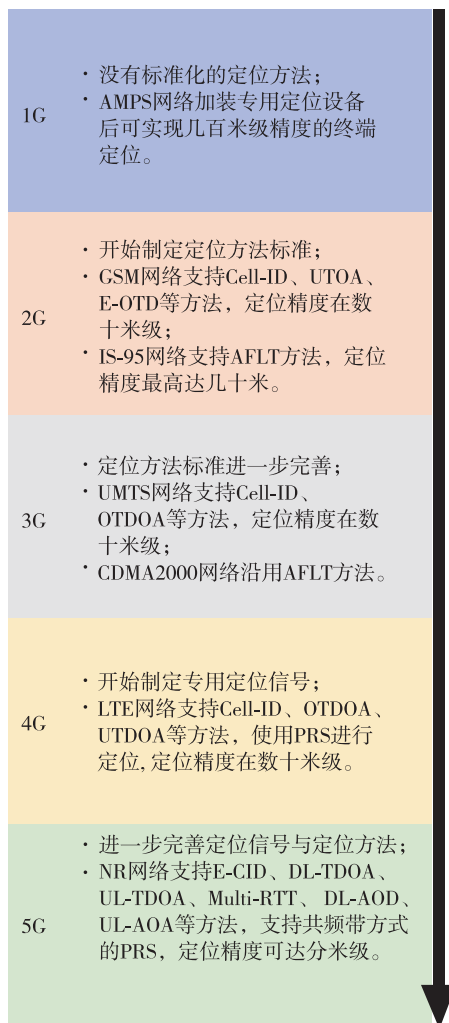


图 7 移动通信网定位技术演进过程

Fig. 7 The evolution process of mobile communication network positioning technology

3.4.1 1G/2G/3G 网络定位技术

1G 网络采用模拟通信,各国之间也没有统一的标准,但在当时也有研究者借助移动通信网进行定位。例如, TruePosition 公司在美国的 1G 网络高级移动电话系统(Advanced Mobile Phone System,

AMPS)上通过加装设备实现了上行信号的 TDOA 测量与终端位置估计,该方案在基站侧安装信号接收机,监听终端播发的特定拨号并记录信号到达基站的时间,利用相邻基站间的时间相减获得 TDOA 观测信息并对终端进行三边定位,定位精度约 600 英尺(182.88m)^[36]; Grayson 公司采用类似的方案,但在基站侧加装的接收机上使用天线阵列,在 TDOA 观测信息之外增加了对终端上行信号 AOA 观测信息的支持,实现了三边与三角的融合定位,使平均定位精度提高到 108m^[36]。

在 2G 时代,由于美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)在 1996 年颁布 E911 法案后,要求电信运行商必须为用户提供应急呼叫时的定位服务^[37],导致移动通信网开始进行通信与导航的融合。欧洲的 Global System for Mobile Communications, GSM)网络标准采用时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)方式,终端与基站之间的通信过程需要测量时间提前量(Timing Advance, TA),即信号从基站传播至终端的时延,因此在定位方面 GSM 网络除了支持最基础的 Cell-ID 方法外,还支持 Cell-ID + TA、UTOA 和 E-OTD 等多种基于测时的定位方法^[38]。最基础的 Cell-ID 定位方式将终端位置定位在当前接入的小区的基站位置^[39],并且由于 GSM 网络支持 TA 的测量,因此 GSM 网络还可支持在 Cell-ID 定位中加入 TA 计算终端与基站间的距离,将终端定位在小区基站朝向的相应距离处,但受到小区大小和 TA 测量精度的影响,该方法的定位误差高于 100m^[40]。而 UTOA(Uplink TOA)技术则采用类似 AMPS 中定位的方式,通过在基站上加装位置测量单元(Location Measurement Unit, LMU)接收终端随机接入信道(Random Access Channel, RACH)的突发脉冲,并记录到达时刻,利用到达时刻之间的差值计算终端位置^[41]。而 E-OTD(Enhanced Observed Time Difference)技术则是由基站播发信号,终端通过记录来自不同基站的广播控制信道(Broadcast Control Channel, BCCH)的到达时刻,记录时间差,再通过 TDOA 进行三边定位^[42]。UTOA 和 E-OTD 两种方法都使用 TDOA 进行定位,由于 E-OTD 采用下行信号,在信号功率上具有一定优势,因此两者在定位精度上有微弱区别,但两种方法的定位误差都高于 50m^[39]。而另一项常用的 2G 网络 IS-95 中,则使用了一种在原理上与 E-OTD 类

似的技术进行终端定位,并命名为高级前向链路三角定位(Advanced Forward Link Trilateration, AFLT),在定位精度上也与 E-OTD 相近,仅能提供几十米至上百米的定位精度^[43]。

3G 时代的通用移动通信系统(Universal Mobile Telecommunications System, UMTS)网络标准仍然保留了 Cell-ID 定位方法,并支持通过测量下行专用物理信道(Dedicated Physical Channel, DPCH)和上行专用物理控制信道(Dedicated Physical Control Channel, DPCCCH)的信号到达时间实现 RTT 的测量,可与 Cell-ID 结合确定终端位置,但定位精度仍然在几十米至百米量级^[44]。此外,UMTS 中还新规定了观测到达时间差(Observed TDOA, OTDOA)定位方法,由基站进行信号播发,终端接收不同基站的公共导频信道(Common Pilot Channel, CPICH)并记录信号到达时间差以计算定位结果,定位误差在几十米量级^[45]。也有研究人员使用我国的 TD-SCDMA 网络实现了 Cell-ID 和 OTDOA 定位,定位精度与 UMTS 网络相近^[46]。而另一项 3G 网络标准 CDMA2000 则沿用了 IS-95 的 AFLT 方法,定位精度仍为几十米量级^[47]。

综合上述方法可以发现,早期移动通信网络的通信导航融合中定位功能的实现主要依赖于通信过程中本身所需的导频或控制信号,定位精度较低。

3.4.2 4G 网络定位技术

4G 时代的长期演进技术(Long Term Evolution, LTE)网络标准与之前的移动通信网在通信导航融合上最大的不同在于 LTE 网络定义了专用的 PRS^[48]。该信号是一组经过正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)调制的 Gold 伪随机序列,资源映射过程中 PRS 所映射到的资源单元根据梳状结构排列,并不占用全部带宽,如图 8 所示,经 OFDM 调制后由基站播发,终端可在本地产生相同的序列并进行相关运算,根据相关峰的位置确定信号的到达时刻。

终端接收临近的多个基站播发的 PRS 并记录其到达时刻,计算 TDOA 后就可以通过多边定位确定终端位置,该方法在标准中同样被称为 OTDOA 方法,专用的定位信号显著提高了定位过程的灵活性和到达时刻测量的准确性,定位精度可优于 50m,但仍然在几十米的量级^[49]。此外, LTE 网络明确了 Cell-ID 方法与 Cell-ID 和 RTT 融合定位方法的区别,并将 Cell-ID 和 RTT 融合方法称为增强小区标识(En-

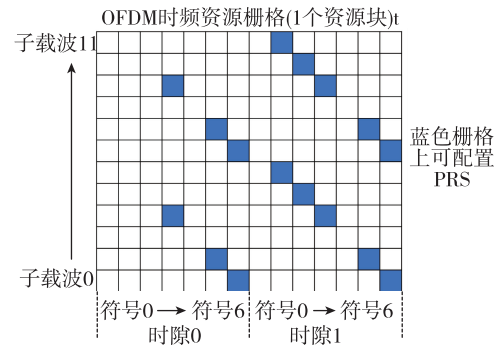


图 8 LTE 网络中 1 个资源块内可映射 PRS 的资源单元

Fig. 8 Resource elements that can map PRS in LTE resource block

hanced Cell-ID, E-CID)^[50]。与 UMTS 网络不同的是, LTE 网络中还增加了上行到达时间差(Uplink TDOA, UTDOA)方法,基站可以通过接收终端播发的上行探测参考信号(Sounding Reference Signal, SRS)并计算信号到达不同基站的时间差进行定位^[51],但由于 SRS 本身主要服从终端上行信号的功率分配,其功率并不能保障距离较远的基站接收,因此存在可听性问题,定位精度较低。

可以发现, LTE 网络虽然比之前的 1G、2G、3G 更加注重定位功能并设计了专用的定位信号,但是由于信号带宽最大仅为 20MHz 并且基站间距在百米级,因此定位精度仍然较低。

3.4.3 5G 网络定位技术

随着物联网和位置服务应用需求的发展,研究者与厂商们逐渐意识到了使用移动通信网络在室内、地下等场景中实现高精度定位所具有的市场潜力,国际移动通信网标准制定组织 3GPP(3rd Generation Partnership Project)在 2016 年就明确了 5G 网络标准将支持高精度定位能力^[52],将在 2022 年冻结的 Release 17 标准更期望为工业互联网场景提供 90% 情况下 0.2m 的定位精度^[53]。5G 新空口(New Radio, NR)网络标准在通信导航融合定位方面具有大带宽、超密集组网和大规模天线阵列等多方面先天优势,信号带宽的增加(低于 6GHz 频段信号带宽可达 100MHz,毫米波频段信号带宽可达 400MHz)使得 5G 信号获得了更强的抗多径能力,同时 5G 网络中基站间距可缩小至 10m 级,极大提高了信号的可听性,保障了高质量信号的接收,而大规模天线阵列则为 5G 网络带来了信号角度观测信息的测量能力,实现了基于角度的定位方法^[53]。

区别于 LTE 网络, 5G 在保留了 E-CID 方法的基

基础上,将 OTDOA 方法演进为下行 TDOA(Downlink TDOA, DL-TDOA),将 UTDOA 方法演进为上行 TDOA(Uplink TDOA, UL-TDOA),并增加了多往返测距(Multi-RTT)方法、下行信号离去角度(Downlink AOD, DL-AOD)方法和上行到达角度(Uplink AOA, UL-AOA)方法,极大丰富了移动通信网络支持的定位方法种类^[54]。

5G 网络对 SRS 进行了改进,增加了专用于定位的配置方式,可在上行信号最大发射功率下播发 SRS,保障了信号的可听性^[55],提高了 UL-TDOA 定位能力^[56]。此外,SRS 可听性的提高使得 5G 可与周边基站都进行 RTT 测量,在 Multi-RTT 方法中,基站和终端分别记录收发 PRS 与 SRS 的时刻,并通过计算获得终端和基站间的 RTT 实现三边定位^[57]。

大规模天线阵列使得 5G 网络可支持基于角度的定位方法。UL-AOA 方法中,临近终端的多个基站可以依靠基站天线阵列测量 SRS 的到达角度后估计终端位置^[58]。DL-AOD 方法则将下行信号离去的波束方向作为终端与基站间的角度用于三角定位^[58]。

北京邮电大学邓中亮教授团队在科技部“羲和计划”支持下形成的 TC-OFDM 定位信号体制的基础上,在国家重点研发计划“室内混合智能定位与室内 GIS 技术研究及示范应用”项目的支持下提出了隐嵌信噪定位技术,极大提升了移动通信网定位能力,形成了 5G 共频带 PRS,并在天津搭建了基于 5G 网络的室内外无缝定位示范系统,成为了国际 5G 高精度定位标准。相比 4G 网络,5G 网络 PRS 得到了如下增强^[59]:

1)5G 网络中映射 PRS 的资源单元的间隔可小至 2 个子载波,而 LTE 网络中 PRS 仅支持资源单元频率间隔为 6 个子载波的梳状结构,使得 5G PRS 在相同带宽下占用的频谱资源能达到 4G PRS 的 3 倍,5G PRS 的抗干扰能力得到显著提高;

2)在时间资源方面,5G PRS 可以占用连续的 12 个符号,而 4G PRS 在一个子帧内(共 14 个符号)仅能映射在 7 个符号上,5G 极大地增加了 PRS 的序列长度,如图 9 所示,提高了抗噪声能力,还延长了信号播发时间,为信号的跟踪打下了基础;

3)5G PRS 还缩短了循环间隔,可支持 PRS 的循环连续播发,而 LTE 网络的 PRS 前后 2 个周期之间需要间隔最少 4 个子帧;

4)5G PRS 增加了对功率的配置功能,而 4G PRS 仅能以通信信号相同功率进行播发,5G 可支

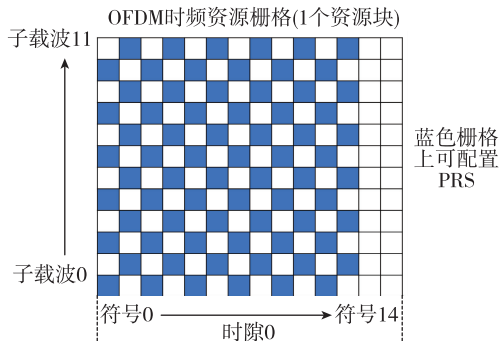


图 9 5G 网络中 1 个资源块内可映射 PRS 的资源单元

Fig. 9 Resource elements that can map PRS in 5G resource block

持 PRS 以极低功率隐嵌在通信信号的背景噪声下,实现通信和定位信号的同频共载,在不影响通信能力的情况下进行定位信号的连续播发。

隐嵌信噪定位技术将定位信号以极低功率隐嵌在通信信号的背景噪声下,实现通信和定位信号的同频共载与共时复用,在不影响通信能力的情况下可实现定位信号的长时间连续广播^[60-61],能够支持终端对信号的连续跟踪与高精度 TDOA 测量,使得 5G 网络 DL-TDOA 定位精度得到极大提高。

邓中亮教授团队基于 5G 网络隐嵌式的共频带 PRS 实现了优于 0.1m 的高精度定位^[62-63],而国际上其他 5G 定位方法精度仅为亚米级^[56]。

移动通信网定位精度在 5G 时代迎来了巨大提升,能够实现厘米级的室内定位精度,已经成为解决室内定位问题的答案之一,是泛在的高精度时空信息服务的有效支撑。

3.5 无线网络通信导航融合定位技术对比分析

蓝牙、Wi-Fi 和 UWB 等局域或个域网定位技术能够支撑小范围的高精度定位,在移动通信网 2G、3G、4G 时代定位精度较低时起到了重要的补充作用。但随着 5G 网络的逐渐完善,移动通信网定位技术不仅在定位精度上实现了超越,同时由于运营商本身需要搭建广域覆盖的 5G 通信网络,因此免去了专用定位网络建设成本,在应用前景上具有明显优势,是现今解决室内泛在高精度定位问题的有效手段。无线网络定位技术对比如表 1 所示。

4 多网融合定位导航

虽然 5G 网络通信导航融合技术与其他局域和个域网相比具有明显优势,但蓝牙、Wi-Fi 和 UWB 的定位技术仍然具有重要意义。

表 1 无线网络定位技术对比

Tab. 1 Comparison of wireless network positioning technologies

无线网络	定位精度	终端支持	网络成本
蓝牙	亚米级	好	高
Wi-Fi	亚米级	好	极高
UWB	厘米级	差	高
移动通信网	厘米级	好	低(无需单独建网)

单一网络存在盲区,多种网络的融合是解决无缝位置服务问题的重要手段。一方面,已经部署了的基于蓝牙、Wi-Fi 和 UWB 技术的定位网络可以与 5G 网络进行融合,提供冗余观测信息,提高定位精度;另一方面,在 5G 网络信号覆盖较差的室内区域,也可以通过部署蓝牙、Wi-Fi 和 UWB 节点作为定位信号的补充,以提供连续的定位结果^[64]。

5 北斗+5G 的增强 PNT 服务

5G 网络的高精度定位能力使得北斗与 5G 的融合能够提供室内外无缝的高精度定位服务^[65],将产生巨大的增量效应,使定位导航的产业化走向位置服务的商业化。

5G 可为北斗系统带来室内定位服务补充和双重覆盖区域的精度增强^[66],以及高速实时辅助信息传输能力,改变现有卫星导航系统服务盲区多、室内/地下定位难、抗欺骗能力弱的现状,使北斗系统具有区别于其他三大导航系统的差异化服务优势,为北斗走向全球服务提供有力支撑。

北斗则为 5G 带来了高精度时空基准和室外广域定位服务覆盖,为万物互联提供了精确的时空信息感知能力支撑,为 5G 服务的产业化应用提供了重要抓手。

6 未来发展趋势

6.1 天地一体定位导航与授时体系

未来低轨卫星网络将能与北斗、地面无线网络共同组成天地一体定位导航与授时体系^[67],如图 10 所示。

低轨卫星网络凭借更多的卫星数量(数千甚至上万颗卫星)可以与 GNSS 结合提供更高精度的室外定位服务,还能与地面无线网络融合在边远地区提供低成本的通信数据覆盖,满足高精度位置服务需求^[68]。

天地一体网络为高质量无缝位置服务提供了基础,需要在系统深度融合方面进行研究,建立泛在、无缝、通导一体化位置服务基础设施,实现精

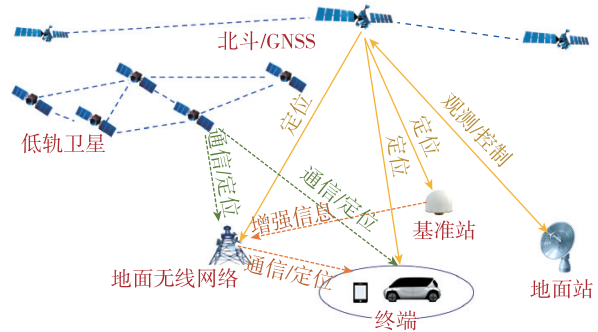


图 10 天地一体定位导航与授时体系

Fig. 10 System of space-ground integrated positioning, navigation and timing

准、可信空间信息的时空连续支撑。

6.2 仿生通信定位导航

仿生通信定位导航是未来通信导航融合定位技术的重要发展方向,是解决传感器小型化和导航决策智能化的潜在手段。

对昆虫、鸟类等动物导航行为、协作机制以及功能性神经细胞的研究将为终端间协同与终端自主导航技术研究提供新的思路;仿生光罗盘、仿生磁罗盘、仿生复眼等仿生传感器是取代现有导航传感器,提供更高准确度航向与位姿信息的潜在手段^[69];而多智能体协同、群智决策、导航经验知识表达、多源异质导航信息柔性融合等仿生技术,则可能在未来提供准确性与实时性更强的位置感知能力。

7 总结

通信导航融合定位技术作为当下导航领域的研究热点之一,获得了极大进步,移动通信网定位技术在 5G 时代的巨大提升使得泛在高精度时空信息的获取更加便利。蓝牙、Wi-Fi、UWB 等网络能够在 5G 网络信号较差区域提供信号补充,实现室内无缝高精度定位。5G 和北斗卫星导航系统的融合则可以激发彼此,形成增量效应,使定位导航的产业化走向位置服务的商业化。

但是,通信导航融合定位技术仍有很大研究空间:

1)5G 网络自身定位能力还未充分释放,进一步提高信号的抗多径、抗噪声能力,降低站间同步误差影响,准确识别非视距信号等方法都能够使 5G 网络定位精度获得进一步的提高;

2)天地一体化定位导航与授时体系与基础设施建设是未来精准、可信、时空连续的空间信息获

取的关键支撑；

3) 仿生通信定位导航技术则是通信导航融合定位技术未来发展的关键方向之一,是解决传感器小型化和导航智能化问题的潜在手段。

参考文献

- [1] Zafari F, Gkelias A, Leung K K. A survey of indoor localization systems and technologies[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(3): 2568-2599.
- [2] Witrals K, Hinteregger S, Kulmer J, et al. High-accuracy positioning for indoor applications: RFID, UWB, 5G, and beyond[C]// *Proceedings of 2016 IEEE International Conference on RFID, RFID 2016*. IEEE, 2016: 1-7.
- [3] Deng Z, Yu Y, Yuan X, et al. Situation and development tendency of indoor positioning[J]. *China Communications*, 2013, 10(3): 42-55.
- [4] 胡昌军, 李信, 刘佳, 等. 北斗授时在通信领域应用现状及推广建议[J]. *电信网技术*, 2015(3): 36-39. Hu Changjun, Li Xin, Liu Jia, et al. The application status of Beidou timing in the field of communication and recommendations for promotion[J]. *Telecommunications Network Technology*, 2015(3): 36-39 (in Chinese).
- [5] Taranto R D, Muppirisetty S, Raulefs R, et al. Location-aware communications for 5G networks: how location information can improve scalability, latency, and robustness of 5G[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014, 31(6): 102-112.
- [6] Deng Z, Zou D, Huang J, et al. The assisted GNSS boomed up location based services[C]// *Proceedings of 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM 2009*. IEEE, 2009: 9-12.
- [7] Jokinen A, Pirsiavash A, Mendonça M, et al. Challenges and opportunities in mass market RTK[C]// *Proceedings of 33rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS+ 2020*. IEEE, 2020: 2896-2910.
- [8] Yang Y, Liu L, Li J, et al. Featured services and performance of BDS-3[M]. *Science Bulletin*, Science China Press, 2021.
- [9] Devanshi D, Agrawal S, Singh S. Indoor localization based on bluetooth technology: a brief review[J]. *International Journal of Computer Applications*, 2014, 97(8): 31-33.
- [10] Cominelli M, Patras P, Gringoli F. Dead on arrival: an empirical study of the Bluetooth 5.1 positioning system[C]// *Proceedings of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MOBICOM*. IEEE, 2019: 13-20.
- [11] He S, Chan S H G. Wi-Fi fingerprint-based indoor positioning: recent advances and comparisons[J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2016, 18(1): 466-490.
- [12] Yimwadsana B, Serey V, Sanghla S. Performance analysis of an AoA-based Wi-Fi indoor positioning system[C]// *Proceedings of 19th International Symposium on Communications and Information Technologies, ISCIT 2019*. IEEE, 2019: 36-41.
- [13] Yu Y, Chen R, Liu Z, et al. Wi-Fi fine time measurement: data analysis and processing for indoor localisation[J]. *Journal of Navigation*, 2020, 73(5): 1106-1128.
- [14] Malajner M, Planinsic P, Gleich D. UWB ranging accuracy[C]// *Proceedings of 22nd International Conference on Systems, Signals and Image Processing, IWSSIP 2015*. IEEE, 2015: 61-64.
- [15] Borkowski J, Niemelä J, Lempiäinen J. Enhanced performance of Cell ID+RTT by implementing forced soft handover algorithm[J]. *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2004, 60(5): 3545-3549.
- [16] Fischer S. Observed Time Difference of Arrival (OTDOA) positioning in 3GPP LTE [R]. *Qualcomm Technologies, Inc.*, 2014.
- [17] Committee P. IEEE standard for telecommunications and information exchange between systems-LAN/MAN-specific requirements-Part 15: wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs) [S]. *IEEE Std 802.15.1-2002*, IEEE, 2002.
- [18] Zhou S, Pollard J K. Position measurement using Bluetooth[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2006, 52(2): 555-558.
- [19] Mendoza-Silva G M, Matey-Sanz M, Torres-Sospedra J, et al. BLE RSS measurements dataset for research on accurate indoor positioning[J]. *Data*, 2019, 4(1): 12.
- [20] Li Z, Yang Y, Pahlavan K. Using iBeacon for newborns localization in hospitals[C]// *Proceedings of International Symposium on Medical Information and Communication Technology, ISMICT*. IEEE, 2016.
- [21] Fu Y, Zhang H, Zhang H. Bluetooth AoA positioning based on backscatter technology[C]// *Proceedings of International Conference on Communication Technology (ICCT)*. IEEE, 2020: 559-565.

- [22] Pau G, Arena F, Gebremariam Y E, et al. Bluetooth 5.1: an analysis of direction finding capability for high-precision location services[J]. *Sensors*, 2021, 21(11): 1-16.
- [23] Woolley M. Bluetooth direction finding[R]. 2021.
- [24] Faragher R, Harle R. An analysis of the accuracy of bluetooth low energy for indoor positioning applications[C]// *Proceedings of 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS 2014*. IEEE, 2014; 201-210.
- [25] Xue W, Qiu W, Hua X, et al. Improved Wi-Fi RSSI measurement for indoor localization [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(7): 2224-2230.
- [26] Chapre Y, Ignjatovic A, Seneviratne A, et al. CSI-MIMO: indoor Wi-Fi fingerprinting system [C]// *Proceedings of IEEE Conference on Local Computer Networks*. IEEE, 2014; 202-209.
- [27] Liu W, Cheng Q, Deng Z, et al. Survey on CSI-based indoor positioning systems and recent advances [C]// *Proceedings of 2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, IPIN 2019*. IEEE, 2019; 1-8.
- [28] Tian H, Zhu L. MIMO CSI-based super-resolution AoA estimation for Wi-Fi indoor localization [C]// *Proceedings of ACM International Conference, 2020*; 457-461.
- [29] Yu Y, Chen R, Chen L, et al. A robust dead reckoning algorithm based on Wi-Fi FTM and multiple sensors[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(5): 3383996.
- [30] Guo G, Chen R, Ye F, et al. Indoor smartphone localization: a hybrid WiFi RTT-RSS ranging approach [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 176767-176781.
- [31] Rea M, Abrudan T E, Giustiniano D, et al. Smartphone positioning with radio measurements from a single wifi access point[C]// *Proceedings of 15th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies, CoNEXT 2019*. IEEE, 2019; 200-206.
- [32] Sun M, Wang Y, Xu S, et al. Indoor positioning tightly coupled Wi-Fi FTM ranging and PDR based on the extended Kalman filter for smartphones[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 49671-49684.
- [33] Breed G. A summary of FCC rules for ultra wideband communications[J]. *High Frequency Electronics*, 2005, 4(1): 42-44.
- [34] Karapistoli E, Pavlidou F N, Gragopoulos I, et al. An overview of the IEEE 802.15.4a standard[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2010, 48(1): 47-53.
- [35] Mahfouz M R, Fathy A E, Kuhn M J, et al. Recent trends and advances in UWB positioning[C]// *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Wireless Sensing, Local Positioning and RFID, IMWS 2009*. Croatia, 2009; 15-18.
- [36] Reed J W, Krizman K J, Woerner B D, et al. An overview of the challenges and progress in meeting the E-911 requirement for location service [J]. *IEEE Communications Magazine*, 1998, 36(4): 30-37.
- [37] Federal Communications Commission. Report and order and further notice of proposed rulemaking on revision of the FCC rules to ensure compatibility with enhanced 911 emergency calling systems[R]. 1996.
- [38] ETSI TS 101 724. Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Location Services (LCS); (Functional description)-Stage 2 (GSM 03.71 version 8.0.0 Release 1999)[S]. 1999.
- [39] Trevisani E, Vitaletti A. Cell-ID location technique, limits and benefits; an experimental study[C]// *Proceedings of IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, WMCSA*. IEEE, 2004; 51-60.
- [40] Borenović M N, Simić M I, Nešković A M, et al. Enhanced cell-ID+TA GSM positioning technique[C]// *Proceedings of International Conference on Computer as a Tool, EUROCON 2005*. IEEE, 2005; 1176-1179.
- [41] Zhao Y. Mobile phone location determination and its impact on intelligent transportation systems [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2000, 1(1): 55-64.
- [42] Chantanetra S, Noppanakeepong S. Mobile positioning location using E-OTD method for GSM network [C]// *Proceedings of Student Conference on Research and Development: Networking the Future Mind in Convergence Technology, SCOREd 2003*. IEEE, 2003; 319-324.
- [43] Peral-Rosado J D, Raulefs R, López-Salcedo J A, et al. Survey of cellular mobile radio localization methods: from 1G to 5G[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(2): 1124-1148.
- [44] Borkowski J, Niemelä J, Lempiäinen J. Performance of Cell ID + RTT hybrid positioning method for UMTS Radio Networks[C]// *Proceedings of 5th European Wireless Conference Mobile and Wireless Systems beyond 3G*, 2004; 24-27.
- [45] Porcino D. Performance of a OTDOA-IPDL positioning receiver for 3GPP-FDD mode[C]// *Proceedings of 2nd International Conference on 3G Mobile Commu-*

- nication Technologies, 2001: 221-225.
- [46] 李文龙, 邹德财, 焦荣华. TD-SCDMA 系统 OTDOA-IPDL 定位方法[J]. 现代电子技术, 2014, 37(10): 123-131.
Li Wenlong, Zou Decai, Jiao Ronghua. OTDOA-IPDL positioning method for TD-SCDMA systems [J]. Modern Electronics Technology, 2014, 37(10): 123-131(in Chinese).
- [47] Wang S S, Green M, Malkawi M. E-911 location standards and location commercial services[C]// Proceedings of 2000 IEEE Emerging Technologies Symposium on Broadband, Wireless Internet Access. IEEE, 2000: 1-5.
- [48] 3GPP. TS 36.211 Physical channels and modulation, Version 15.0.0[S]. 2017.
- [49] 3GPP. TR 36.857 Study on indoor positioning enhancements for UTRA and LTE, Version 13.1.0 [R]. 2015.
- [50] Vaghefi R M, Buehrer R M. Improving positioning in LTE through collaboration[C]// Proceedings of 2014 11th Workshop on Positioning, Navigation and Communication, WPNC 2014. IEEE, 2014: 12-17.
- [51] Vaghefi R M, Buehrer R M. Cooperative UTDOA positioning in LTE cellular systems [C]// Proceedings of 2015 IEEE Global Communications Conference Workshops, GC Wkshps 2015. IEEE, 2015.
- [52] 3GPP. TS 22.261, Service requirements for the 5G system, Version 16.7.0[S]. 2019.
- [53] Ghosh A, Maeder A, Baker M, et al. 5G evolution: a view on 5G cellular technology beyond 3GPP release 15[J]. IEEE Access, 2019, 7: 127639-127651.
- [54] 3GPP. TS 38.305, Stage 2 functional specification of User Equipment (UE) positioning in NG-RAN, Version 16.3.0[S]. 2020.
- [55] Keating R, Yoon D, Tao T, et al. Opportunities and challenges for NR RAT-dependent based positioning [C]// Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference. IEEE, 2019: 1-6.
- [56] 3GPP. TR 38.855 Study on NR positioning support, Version 16.0.0[R]. 2019.
- [57] Keating R, Saily M, Hulkkonen J, et al. Overview of positioning in 5G new radio[C]// Proceedings of International Symposium on Wireless Communication Systems. VDE Verlag GmbH, 2019: 320-324.
- [58] Wang Y, Shi Z, Yu Y, et al. Enabling angle-based positioning to 3GPP NR systems[C]// Proceedings of 2019 16th Workshop on Positioning, Navigation and Communication, WPNC 2019. IEEE, 2019: 1-7.
- [59] 3GPP. TS 38.211, Physical channels and modulation, Version 16.4.0[S]. 2020.
- [60] 邓中亮, 尹露. 基于 TC-OFDM 体制的室内定位系统[J]. 电信网技术, 2015(3): 32-35.
Deng Zhongliang, Yin Lu. Indoor positioning system based on TC-OFDM system[J]. Telecommunications Network Technology, 2015(3): 32-35(in Chinese).
- [61] Liu Y, Han K, Deng Z, et al. Not only communication: Co-band signals used in 5G MIMO system for indoor positioning[C]// Proceedings of 2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, WCSP 2019. IEEE, 2019.
- [62] BUPT. R1-2007720, Evaluation of achievable positioning accuracy[S]. 2020.
- [63] 3GPP. TR 38.857, Study on NR positioning enhancements, Version 17.0.0[R]. 2021.
- [64] Chai M, Li C, Huang H. A new indoor positioning algorithm of cellular and Wi-Fi networks[J]. Journal of Navigation, 2020, 73(3): 509-529.
- [65] Liu J, Gao K, Guo W, et al. Role, path, and vision of "5G + BDS/GNSS" [J]. Satellite Navigation, Springer Singapore, 2020, 1(1): 1-8.
- [66] Yin L, Ni Q, Deng Z. A GNSS/5G integrated positioning methodology in D2D communication networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(2): 351-362.
- [67] 杨元喜. 综合 PNT 体系及其关键技术[J]. 测绘学报, 2016, 45(5): 505-510.
Yang Yuanxi. Concepts of comprehensive PNT and related key technologies[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(5): 505-510(in Chinese).
- [68] 王磊, 李德仁, 陈锐志, 等. 低轨卫星导航增强技术——机遇与挑战[J]. 中国工程科学, 2020, 22(2): 144.
Wang Lei, Li Deren, Chen Ruizhi, et al. Low Earth Orbiter (LEO) navigation augmentation: opportunities and challenges[J]. Chinese Journal of Engineering Science, 2020, 22(2): 144(in Chinese).
- [69] 胡小平, 毛军, 范晨, 等. 仿生导航技术综述[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(4): 1-10.
Hu Xiaoping, Mao Jun, Fan Chen, et al. Bionic navigation technology: a survey[J]. Navigation Positioning and Timing, 2020, 7(4): 1-10(in Chinese).