

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2020.04.008

通信导航一体化技术研究进展

尹露, 马玉峥, 李国伟, 赵仁明, 邓中亮

(北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876)

摘要:近年来, 大众对泛在位置服务的需求不断增长, 卫星导航在室内等场景下覆盖能力不足, 已无法满足人们的需求。由于通信信号覆盖范围广、用户数量大、信号频带宽, 将通信信号用于定位可成为卫星导航的有效补充。在此背景下, 随着通信和定位技术的快速发展, 通信和导航的耦合程度不断加深, 产生了通信导航一体化技术(CPIT), 并成为了国内外的研究热点。通信系统中毫米波、多入多出(MIMO)、波束成形等技术为 CPIT 的发展带来了新的契机。首先介绍了 CPIT 的演进过程; 然后就 CPIT 中的关键技术进行了总结并分析了其研究现状; 最后对 CPIT 的发展进行了展望。

关键词:通信导航一体化; 5G 定位; 室内定位; 共频带定位

中图分类号: TN967.2

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 2095-8110(2020)04-0064-13



Research Progress of Communication-Positioning Integrated Technology

YIN Lu, MA Yu-zheng, LI Guo-wei, ZHAO Ren-ming, DENG Zhong-liang

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

Abstract: In recent years, the public's demand for location based services has been growing. Moreover, the satellite navigation is unable to meet people's needs because it can't cover the indoor areas. As the communication signal has a wide range of coverage, a large number of users and a wide signal frequency band, it can be an effective supplement for satellite navigation in the way of positioning. With the rapid development of communication and positioning technology, the coupling degree of communication and positioning is being deepened, which leads to the communication-positioning integrated technology (CPIT) and has become a hot research topic worldwide. In communication system, millimeter wave, multiple input multiple output (MIMO), beam forming and other technologies bring new opportunities for the development of CPIT. Firstly, this paper introduces the evolution process of CPIT. Then, the key technologies of CPIT are summarized, and their current research situations are also analyzed. At last, this paper prospects the development of the CPIT.

Key words: Communication-positioning integration; 5G positioning; Indoor positioning; Co-band positioning

收稿日期: 2020-05-08; 修订日期: 2020-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(61801041)

作者简介: 尹露(1987-), 男, 博士, 副教授, 主要从事无线定位技术方面的研究。E-mail: inlu_mail@bupt.edu.cn

0 引言

通信技术发展迅猛,催生了诸如自动驾驶、工业物联网、智慧城市等新兴智能产业的兴起,引发了基于位置的服务(Location Based Services, LBS)需求的新一轮高速增长,定位技术迎来了前所未有的发展机遇。相较于传统的室外位置服务,新兴智能产业对位置服务提出了高性能、泛在化的新需求,具体体现在定位精度、可靠性以及服务范围等诸多方面。

传统全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)信号强度弱、穿透力差、易受干扰,在城市峡谷、室内、地下等环境下应用能力不足,无法提供广域无缝的高性能位置服务。虽然卫星导航常与惯性、地磁、视觉等手段形成组合导航,提高其定位连续性及精度,但当卫星信号长时间不可见时,以卫星导航为核心的组合导航系统难以提供高精度的位置服务。无线通信系统具有覆盖范围广、使用成本低、可靠性高等优点,利用通信系统进行定位,实现通信导航一体化,可有效弥补卫星定位的不足,成为了全球的研究热点。

广义上,移动通信系统(1G~5G)、卫星通信系统、Wi-Fi、蓝牙、超宽带(Ultra-Wide Band, UWB)、广播系统、军用数据链等均属于无线通信系统。从作用范围上看,移动通信、卫星通信、广播等系统和军用数据链可实现广域定位;Wi-Fi、蓝牙、UWB等只能进行局域覆盖。除4G和5G外,可实现广域定位的通信系统在设计过程中基本没有考虑定位功能,因此其定位性能往往较差;局域通信系统虽然大多也未针对定位进行专门设计,但其信号作用距离短、信源密度高、部署灵活等特点使其通常具有更高的定位精度。近年来,以5G和蓝牙5.0等为代表的通信技术在系统设计之初就考虑了高精度定位功能,因此其定位性能得到大幅提升。

将通信和导航功能集成在一个系统中实现,即可称为通信导航一体化。通信和导航的一体化程度经历了由松耦合到紧耦合的发展过程。例如Wi-Fi和早期的蓝牙等系统虽然可以实现定位,但其定位功能完全基于现有通信资源,严格来讲不能算为通导一体化系统,但由于它们能够根据定位性能进行网络布设、节点选取、指纹库构建等操作,因此可认为是信息和算法层面的通导一体化;2G和3G等移动通信网络中,虽然没有专用定位信号,但它们

的协议支持小区识别码(Cell-ID, CID)、辅助GNSS(Assisted GNSS, A-GNSS)等技术以提高定位性能;而4G和5G等系统,在信号体制设计过程中就考虑了定位性能,做到了定位信号与通信信号共存,实现了通信与导航的紧耦合。

本文对通信导航一体化技术(Communication-Positioning Integration Technology, CPIT)的研究进展进行了归纳,并对未来的通导一体化技术进行了展望。文章不针对某特定系统的通导一体化进行讨论,而是着重于通导一体化的共性技术。但由于移动通信网的通导一体化起步早、发展进度快、应用范围广、技术手段丰富、技术方法相对成熟等特点,因此本文在篇幅上对其稍作倾斜。

1 通信导航一体化的演进

1.1 移动通信网的通导一体化进程

移动通信系统是全球使用范围最广、使用人数最多的通信系统。早在20世纪70年代蜂窝通信概念提出之初,就有学者研究了利用蜂窝网对车辆进行定位^[1]。此后,随着移动通信系统的发展,利用移动通信信号进行定位的研究从未间断。但由于1G~3G系统并没有设计专门用于定位的参考信号,在此期间利用移动通信信号定位的研究数量远少于其他定位系统,1G~3G系统的定位性能也十分有限,3G定位精度最高只能达到数十m量级^[2]。随后的4G系统中加入了专门用于定位的定位参考信号(Positioning Reference Signal, PRS),基于移动通信网定位的相关研究开始迅速增多。但由于资源限制(如带宽、时长等),4G定位精度无法突破m级需求。随着5G的到来,毫米波、多入多出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)、波束成形等技术为定位性能的提升带来了新的机遇,5G的理论定位精度也已突破m级,达到亚米甚至cm级^[3],相关研究数量呈井喷式增长。

在移动互联网普及以前,大众对室内定位需求并不迫切,而室外位置服务基本可以由卫星导航提供,因此出于商业因素,通信运营商对定位功能并不感兴趣;另一方面,早期的移动通信系统带宽资源有限,难以实现高精度定位。迫使通信系统加入定位功能的最主要因素是美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)在1996年提出的E911(Enhanced 911)法案,该法案要求基于终端与基于网络的定位精度分别达到

50m与100m(67%)、150m与300m(95%)^[4]。由于2G和3G网只能利用现有的通信同步及导频信号进行测距,其精度难以达到E911要求。同时,为了实现定位功能,运营商还需要对已有的服务器及软件进行更新,用户终端甚至也需要更换,巨额的成本使运营商没有往下推进的动力。2010年时,FCC甚至降低了E911的精度要求,并且免除了对运营商无法达到E911需求的罚款。

与此同时,一些学者对2G和3G网的定位方法进行了研究,设备商与运营商也在努力推进下一代通信系统对定位功能的原生支持。2009年,在3GPP RAN1 #56b会议¹中,首次就在4G网络中播发定位参考信号达成了一致意见^[5]。该事件也标志着移动通信网正式从信号体制层面进行通导一体化建设。

4G的正式商用促进了移动互联网的快速发展,大众对室内位置服务的需求越来越高,2020年全球位置服务终端出货量较2013年增长了近3倍,达到了80亿部^[6]。在此背景下,2018年3GPP RAN #81会议中首次提出了5G系统的设计应考虑商用定位需求,并在2019年3GPP RAN1 #94b会议中明确了室内外水平定位精度应分别达到3m和10m(80%)、垂直定位精度达到3m(80%)^[7]。商业需求的确定意味着移动通信网定位不再是政府的强制功能,而是有商业前景的业务,极大地促进了通导一体化进步深度耦合的进程。

在5G系统中,定位参考信号得到了进一步的改进,例如5G的定位参考信号支持最大400MHz的带宽和毫米波频段,信号的测距能力相对于4G大幅提升;5G的定位参考信号在comb-6的资源映射模式的基础上,增加了comb-2和comb-4两种新型资源映射模式,提升了定位参考信号的配置灵活性^[8];5G的定位参考信号增加了更多的周期配置,使得在播发定位参考信号时可以选择连续播发的模式以提高定位精度;同时5G定位参考信号支持在MIMO天线下的波束管理功能,使得5G定位参考信号具备测量角度的能力^[9]。

正是由于5G从信号体制层面对通导一体化进行了全面设计,大幅提升了通导一体化程度,使其定位性能一举超过了众多局域定位系统。在最新版本5G标准中,定位的商业需求达到了亚米级(<1m),在工业物联网及车联网领域对定位精度分别提出了0.2m(绝对精度)和0.1m(横向相对精

度)的需求^[10],其性能要求已与成本高昂的UWB定位系统相当。

1.2 其他网络的通导一体化进程

除了移动通信系统,国内外学者对其他通信系统的通导一体化也进行了研究,例如水下通导一体化、空天地通导一体化等。

由于水下对电磁波的衰减严重,因此水下目标的通信与定位面临很大的技术挑战。为此,文献^[11]结合船载测距仪、海面的无线电遥控浮标、海底应答器阵、无线电基站等设备构成水下通导一体化系统,为了降低定位信号与通信信号的干扰,采用了多频方式进行水下信号传输;文献^[12]提出了将通信和定位信息融合在一个数据包中进行水声测距与通信一体化;文献^[13]利用移动水下传感器网络的空间相关性,估计信号多普勒频移以及长动态传播延迟特性,提高了通导一体化系统的时间同步精度;文献^[14]利用基于单信标的单程传播时间定位算法,并通过声学通信向水下设备传递导航信息,实现了水下10900m的声学通导信息传输。

卫星通信与定位的一体化得到了广泛关注。早在铱星通信时代,就有学者对利用铱星系统定位进行了研究^[15];美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提出了空间通导一体化工程,并给出了其网络的体系架构^[16]。我国的北斗导航系统具备了短报文的收发功能,且已经在实际应用中发挥了巨大作用,例如2008年汶川地震时,地面通信、电力、交通都已损坏,救援人员利用北斗卫星的定位和短报文功能,实现了对被困人员的定位和救援;文献^[17]设计了一种基于北斗的野外车辆行动监控系统,用户把自己的定位数据通过短报文的方式传送到监控中心,实现对野外车辆的行动监视;文献^[18]利用北斗独有的短报文通信功能,实现了一种适用于老人定位系统的短报文通信方案。虽然北斗卫星通导一体化已经得到了应用,但总体上定位和通信功能相对独立^[19]。

近年来,随着卫星通信、低轨卫星、无人机等技术的发展,突破了地面网络限制,实现了地面、卫星、机载网络和海洋网络的通导信号无缝覆盖,即空天地通导一体化^[20-21],成为了移动通信网通导一

¹ 3GPP—The 3rd Generation Partnership Project,制定移动通信系统技术规范和技术报告的标准化组织;RAN1—Radio Access Network 1,主要负责物理层标准制定的工作组。

体化外的另一研究热点。文献[21]介绍了空天地通导一体化的必要性和需要解决的主要问题,由于它们的高度较低,因此具有更高的信号强度和更快的几何变化;文献[22]分析了低轨卫星导航增强技术系统未来发展面临的通信导航一体化设计等技术挑战;文献[23]提出了一种基于低轨全球通信星座的全球导航增强系统,该系统不需独立建设,可与低轨通信星座融合发展;文献[24]针对天地一体化网络的天基部分,以能覆盖全球的典型低轨星座作为分析对象,分析了其拓扑结构的动态变化特性与星座的全球覆盖性能;武汉大学利用其发射的珞珈一号科学实验卫星,提供低轨卫星导航增强信号,与现有卫星导航集成以提高实时导航性能^[25]。

除此以外,文献[26]研究了X射线导航通信一体化技术,提出了X射线圆偏振测距方法及X射线通信测距一体化方法;文献[27]研究了卫星编队自主相对导航与通信一体化系统,提出了基于软件无线电的半双工码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)测量通信一体化系统,实现了自主相对导航和星间通信的一体化功能;文献[28]提出了基于正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)调制的WiMAX网络通导一体化系统;蓝牙在其5.0版本中首次加入了定位功能,并支持距离和角度的测量,在Wi-Fi辅助下可以达到1m的定位精度,而在最新的5.1版本中,不需要任何辅助即可实现cm级定位^[29]。

2 通导一体化常见定位方法

在通导一体化系统中,位置解算过程既可在终端侧完成也可在网络侧完成。根据信号的传播方向,可以分为下行定位和上行定位。对于终端之间进行相对定位的端到端(Device to Device, D2D)定位,上行与下行是相对的。无论何种定位方式,常见的定位方法主要有如下几种。

2.1 临近定位

该方法通过一定手段(通常为信号强度)寻找离终端最近的基站,并用基站的位置作为终端位置的近似值,如图1所示。典型的临近定位方法包括CID、增强型CID(Enhanced CID, E-CID)等技术。

2.2 三边定位

通过测量终端与基站之间的距离,利用几何解算进行定位,由于三维定位时最少需要测量3组终端与基站间的距离,因此称为三边定位,如图2所示。

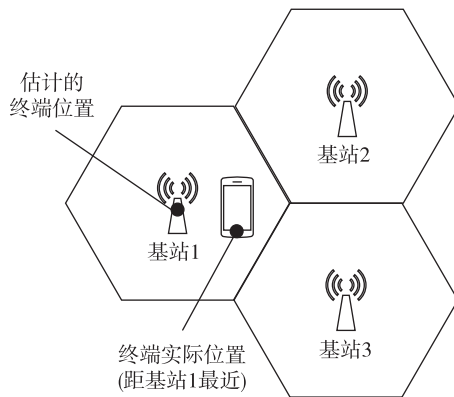


图1 邻近定位示意图

Fig. 1 Schematic diagram of proximity positioning

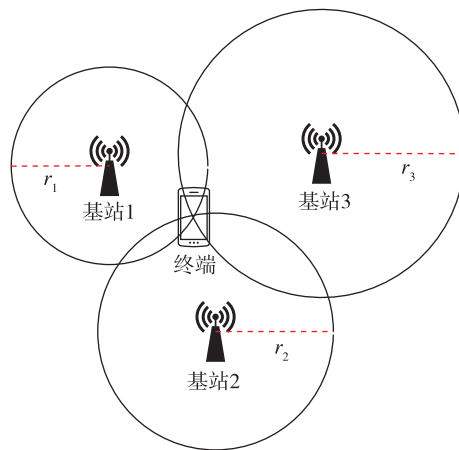


图2 三边定位示意图

Fig. 2 Schematic diagram of trilateration positioning

最常用的测距方法为测量信号在基站和终端之间的传播时间再转换为距离。由于时间测量往往需要基站间的时钟同步,因此高精度时钟同步是通导一体化中的关键问题之一,而时钟同步误差也是制约三边定位法精度提升的重要因素之一。此外,利用电磁波衰减模型通过信号强度估算距离也是常用的测距方法之一,该方法不需要时钟同步,但受环境影响巨大。

根据测量方式的不同,三边定位可包含多种定位模型,如到达时间(Time of Arrival, ToA)、到达时间差(Time Difference of Arrival, TDoA)、观测时间差(Observed Time Difference, OTD)等。

2.3 角度定位

通过测量终端与基站之间的角度,利用几何解算进行定位,如图3所示。

角度测量一般需要天线阵列,如果信号发射端

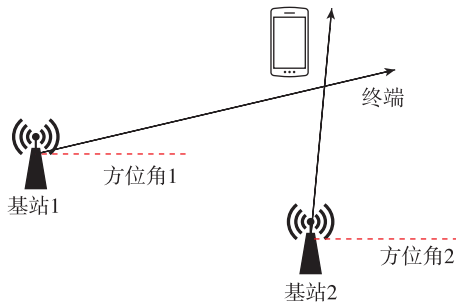


图3 角度定位示意图

Fig. 3 Schematic diagram of triangulation positioning

是单天线、接收端是多天线,可测出信号的到达角(Angle of Arrival, AoA)或到达方向(Direction of Arrival, DoA);反之若发射端是多天线、接收端是单天线,可测出信号的出发角(Angle of Departure, AoD)或出发方向(Direction of Departure, DoD)。

2.4 指纹匹配定位

信号的传播与周围环境有很强的相关性,该相关性可体现在信号的强度、信道状态信息、信号时延等特征与位置之间的对应关系上。若信源与环境状态稳定,则信号在每个位置上的特征是唯一的,因此可认为这些特征是该位置的指纹,如图4所示。

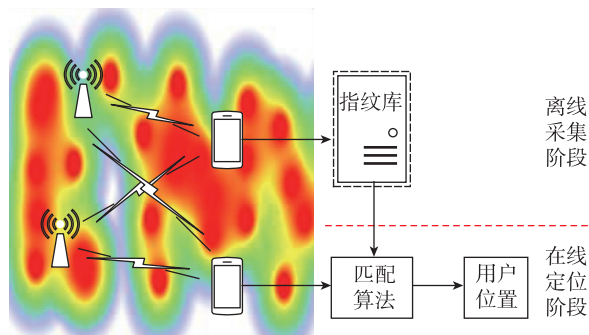


图4 指纹匹配定位示意图

Fig. 4 Schematic diagram of fingerprint positioning

指纹定位主要分为2个阶段:离线采集阶段和在线定位阶段。离线采集阶段通过采集定位区域内的信号特征建立指纹数据库;在线定位阶段将终端在待测点采集到的信号特征与指纹库中的数据进行匹配,得出待测点所在的位置信息。

2.5 混合定位

同时利用上述多种方法进行位置估计可称为混合定位。混合定位可将不同定位方法进行优势互补,从而得到更优的定位结果。

3 通导一体化关键技术

根据通导一体化耦合程度不同,需要利用不同技术实现对必要信息的测量及获取,以利用第2节所述方法实现基于通信网的定位。例如,在早期通信系统的设计中,并未考虑定位需求,因此只能利用已有信号或信息通过一定方法进行位置估算,常见如小区识别码定位技术和指纹定位技术;进一步地,可通过信号体制设计实现更高的信号测量精度,但这会带来通信与导航信号的干扰问题;为了实现更高的定位精度及鲁棒性,可以利用多种专用或非专用定位系统进行组合定位,但这会带来不同系统间的兼容互操作问题。本节针对现有常见的通导一体化技术进行介绍。

3.1 小区识别码定位技术

小区识别码定位是移动通信系统中使用最广泛的定位技术,也是常见通导一体化定位方法中复杂度最低、使用最简单的定位方法。在蜂窝通信系统中,每个基站都有一个唯一的识别码,即 Cell-ID,在定位过程中移动设备只需上报自身所处位置附近基站的小区号,处于核心网的位置服务平台可以根据小区号回传该基站的经纬度坐标,从而粗略估计出用户位置^[30]。

该方法的精度主要取决于蜂窝小区的半径、蜂窝形状以及终端距基站的距离。在早期蜂窝系统中,由于基站间距可达数百 m 甚至 km 级,因此 CID 方法的定位精度十分有限,可通过估算终端与基站间的距离来提高 CID 的定位精度。例如 Borenovic 介绍了 2G 系统中利用时间提前量(Timing Advance, TA)技术辅助 CID 的定位方法,并提出了改进的增强型 E-CIDTA 技术^[31]; Borkowski 研究了用往返时间(Round Trip Time, RTT)技术辅助 CID 的定位方法,并提出了利用软切换技术来进一步提高定位精度^[32]。为了获得所需要的小区识别码,需要通过信令与核心网进行交互,当定位并发数过多时,大量信令交互会占用核心网资源,严重时可导致网络堵塞。针对这一问题, Hongman Wang 提出了一种基于信号监测的 CID 定位方法,通过从信号监控系统获取 Cell-ID,避免了基于位置的服务与核心网络之间的相互作用^[33]。

3.2 指纹定位技术

指纹定位被广泛应用于 Wi-Fi、蓝牙等局域定位系统中。在移动通信系统中,常把指纹定位技术

称为射频模式匹配(Radio Frequency Pattern Matching, RFPM)定位技术。3GPP 将 RFPM 技术写入了 LTE 定位协议² (LTE Positioning Protocol, LPP)和 LTE 定位协议附件 A(LPPa)中^[34],将 RFPM 作为增强定位的方法之一。在此之前,也有学者对 2G 和 3G 的指纹定位方法进行了研究^[35-36]。

与其他定位方式相比,由于信号强度、信道状态等参数的易获取性,往往不需要对现有通信设备进行更改就可以进行指纹定位。移动互联网以及 Wi-Fi、蓝牙等设备的普及,也促进了指纹定位的发展。其缺点是由于噪声的存在及定位环境复杂等因素,不同的定位设备在相同的环境中产生的指纹信息也可能不同,导致定位的结果出现偏差。因此,众多学者运用非线性最小均方^[37]、权重最小均方^[38]、最大似然估计^[39]、凸优化^[40]等方法提升指纹定位性能。

3.3 通导一体化信号体制设计

上述定位方法均以现有通信信号为基础,在协议层或算法层进行通导一体化设计。由于通信信号的设计过程未考虑定位功能,上述方法在距离、角度等定位重要参数的测量上存在严重瓶颈。因此需要在通信系统的信号体制设计过程中考虑定位功能,同时实现具有高速数据传送与高精度定位复合功能的通导一体化系统,形成通信导航的深度融合。

4G LTE 中加入了专门用于下行定位的 PRS。PRS 由一组频域具有伪随机特性的序列生成,终端本地产生的参考信号与接收的 PRS 进行互相关得出信号传播时延的估计值,所以 PRS 需具备较强的自相关特性。同时,为了保证通信系统容量,PRS 不应占用频带内过多资源,因此 PRS 被设计为在很短的周期内播发,如图 5 所示。区别于在通信信号带宽外独立设置定位信号,图 5 所示信号也被称为带内参考信号。

国内外学者对带内定位进行了大量研究。文献^[41]提出了一种使用复合 PRS 传输的新型减少量化误差的方法,该方法利用一种比 PRS 常规采样结构分辨率更高的新型采样结构,有效地减少了量化误差;文献^[42]针对不同干扰场景,从最大似然的角度出发评估 PRS 可实现的定位精度;文献^[43]提出了一种改进的带内高精度定位网络架构,提高了信号的同步性能,实现了同一带宽内通信网和定位网的结合或者分离;文献^[44]针对传统的无线定

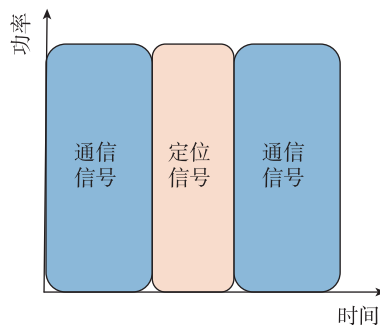


图 5 带内定位信号资源占用示意图

Fig. 5 Schematic diagram of inband positioning signal resource occupation

位方法容易受到接收信号信噪比低和无法接收直射信号的影响,提出了一种基于非线性多基站分布式混沌随机共振信号增强技术的无线通信系统定位方法。

带内定位信号的缺点之一是无法连续播发,否则会占用通信资源,大幅降低通信容量,因此终端无法对其进行信号跟踪,导致其测距精度严重受限。为解决该问题,文献^[45]提出了时分码分正交频分复用(Time & Code Division Orthogonal Frequency Division Multiplexing, TC-OFDM)定位信号,在通信信号背景噪声中嵌入定位信号,在通信的同时实现定位信号的连续捕获和跟踪,从而实现精确的测距与定位。由于该信号不占用独立的频率资源,因此也称其为共频带信号,如图 6 所示。

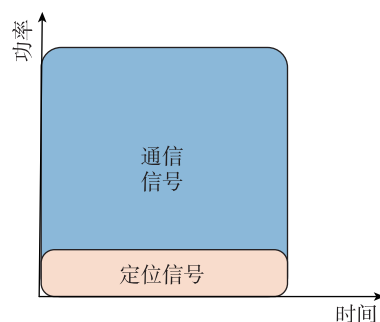


图 6 共频带定位信号资源占用示意图

Fig. 6 Schematic diagram of co-band positioning signal resource occupation

由于共频带定位信号功率远低于通信信号(甚至低于背景噪声),因此共频带定位信号几乎不会影响通信容量,其时间连续特性允许终端采用更加

² LTE 是 Long Term Evolution 缩写,译为长期演进,是 3.9G 标准,也常被视为 4G 标准。

精确的测距方式,实现比其他信号更加精确的定位。3GPP在R16阶段对其进行了研究^[46],仿真结果显示,其定位精度在室内场景中可达0.125m(67%@FR1、100MHz带宽)^[47],比带内的0.4m(67%@FR1、100MHz带宽)精度提升68.75%^[48]。2019年,3GPP就PRS的连续播发达成了一致意见^[49],使5G的定位性能较4G得到了大幅提升。

国内外学者基于共频带定位方法进行了大量研究。文献[50]利用共频带思想设计了5G上行定位信号,并分析了其测距误差下界;文献[51]将共频带信号运用到小倾角倾斜同步轨道卫星的通导一体化信号体制设计中,导航与通信共用转发器频率和功率资源,在同一个转发器上实现实时双向通信以及高精度定位;文献[52]提出了一种基于TC-OFDM系统的室内定位算法,提升了定位鲁棒性;文献[53]针对物联网终端定位需求的差异性,通过非正交多址接入技术将不同时长和带宽的共频带定位信号分配给不同用户,实现了通信与定位性能的最大化;文献[54]提出了一种融合带内和共频带的新型定位参考信号,该信号可根据终端定位需求为其提供普通带内定位或高精度共频带定位。

除此以外,国内外学者还从调制方式、信号波形设计、信道编码等方面就通导一体化开展了大量研究。文献[55]设计了一种基于通用滤波多载波调制技术的通信与导航一体化系统,并针对该一体化系统的结构给出了基于训练符号的测距方法;文献[56]提出了基于向量正交频分复用调制的卫星通导一体化系统,并对信道分配、导频设计、信道估计、信号检测、码元同步等关键技术进行了研究;文献[57]从信号调制的角度研究通信、导航信号的融合方法,提出了一种频域符合OFDM调制的方法,将扩频序列应用于频域调制,并与通信系统中的OFDM相结合,从而实现通导信号良好的兼容性;文献[58]围绕通导融合系统中定位信号的体制设计,提出了一种新型的扩频码,并对使用该新型扩频码的定位信号的定位性能进行了评估。

3.4 通信导航间干扰的消除

由于终端通过寻找参考信号的相关峰来确定传播时延,原则上任何链路参考信号均可作为定位参考信号用于距离测量。例如,LTE中可采用小区参考信号(Cell Reference Signal,CRS)、主同步信号(Primary Synchronization Signal,PSS)以及信道状态信息参考信号(Channel State Information Refer-

ence Signal,CSI-RS)作为定位信号^[59]。然而,这些下行链路参考信号是用于支持数据通信目的而设计的,在通信过程中终端仅需对单个基站进行连接以保证资源优化和干扰最小化。所以,终端难以从相邻小区中捕获足够数量的其他参考信号进行观察到时间差(Observed Time Difference of Arrival,OTDOA)解算。

上述问题的本质是信号间干扰问题,通信的单基站连接和定位的多基站解算形成了矛盾。为此,4GPRS在设计过程中并未填满所有资源栅格,以便避开CRS和物理下行链路控制信道(Physical Downlink Control Channel,PDCCH)^[60],如图7所示。在5GPRS中,由于不再采用CRS,因此可以支持更加灵活的信号配置方案,例如多种梳状结构等。

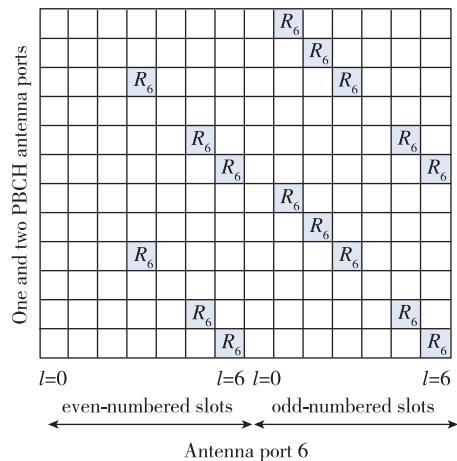


图7 4G PRS信号资源栅格映射方式之一^[61]

Fig. 7 One of the 4G PRS resource grid mappings

由于用于测距的伪随机序列会出现来自不同的基站信号多址干扰的问题,即信号的强弱干扰。为此,传统PRS采用了轮播的方式播发,不同小区的基站分时播发,避免小区间干扰^[61]。PRS也可以通过设计较大的频率复用因子(Frequency Reuse Factor,FRF),将不同小区的定位信号分配到不同频带上,降低强弱干扰^[62]。文献[63]提出了一种多尺度非正交多址接入(Multi-Scale Non-Orthogonal Multiple Access,MS-NOMA)的新型共频带通导一体化信号,利用正交频分复用使不同定位用户的信号相互正交,从而降低强弱干扰,如图8所示。

文献[64]提出了一种用于PRS传输的时分复用和码分复用方案,以解决异构网络中的干扰问题;文献[65]提出了基于改进最小二乘信道估计的综合迭代时延估计干扰消除算法,降低时延估计的

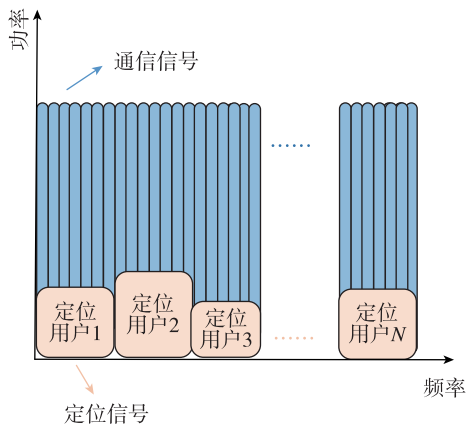


图 8 MS-NOMA 信号结构

Fig. 8 Structure of MS-NOMA signal

时间,提高信号时延的检测精度,从而提高定位精度;文献[66]提出了一种面向共频带技术的伪随机码复用策略,在实现基站码复用的同时解决互干扰问题;文献[67]提出了一种基于特征分离算法的井下救援人员准确定位方法,对采集的信号进行连续小波变换处理,去除信号中的干扰信息,提高信号的准确性。同时,通导一体化信号的设计还应满足较低的峰均比,以提升功放效率、较强的自相关和正交特性,从而使接收机更容易获取相关峰^[68]。

3.5 多系统融合定位协议

多系统融合定位可以发挥各系统优势,提升定位性能,是定位技术的一大分支。在通导融合方面,多系统融合定位的支持是十分必要与重要的,这在通信系统里更多地体现在协议的支持上。

早在 2G 网络,其就支持辅助 GPS (Assisted Global Positioning System, A-GPS)^[69]。在 LTE 网络中,增加了对其他卫星导航系统的支持,形成了 A-GNSS 协议^[70]。

近几年,3GPP 陆续又增加了移动通信网与其他系统的融合定位协议,如基于伪卫星技术的地面信标系统 (Terrestrial Beacon Systems, TBS)、Wi-Fi、蓝牙、气压计^[71]等。由于这些系统间的融合与信号体制无关,因此也称为与无线接入无关的技术 (Radio Access Technology independent, RAT-independent)。

4 通导一体化技术展望

通信技术的发展,给定位技术带来了更多的机遇,以 5G 为代表的移动通信技术,具有高速率、低延迟、低功耗、大容量和大规模等特点。5G 中引入

的新技术可为通导一体化提供多种全新的可能。

4.1 MIMO 技术

MIMO 系统利用发射端的多个天线独立发送信号,并在接收端利用多个天线接收信号,如图 9 所示。MIMO 技术主要包括波束成形技术、空时编码技术和空间复用技术,可以在保持带宽不变的前提下提高通信容量和频谱利用率^[72]。

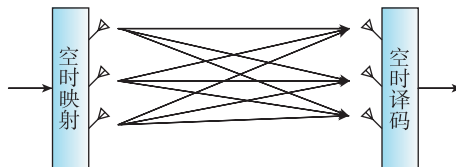


图 9 MIMO 技术

Fig. 9 MIMO technology

大规模 MIMO 为信号提供了角度测量能力,从而使通信网具备角度定位能力。测角与测距的结合还可以实现单基站定位。单基站定位可有效解决强弱干扰等原因带来的可见基站数量不足的问题,同时也可降低由建筑物遮挡等因素造成的非视距定位问题。

4.2 毫米波

毫米波在 30~300GHz 之间的频率下工作,具有很大的可用带宽(如 5G 毫米波频段最大带宽可达 400MHz),满足了未来无线系统不断增长的带宽需求。除了较大带宽外,由于波长短使得毫米波可在很小体积内实现 MIMO,进一步促进了 MIMO 技术的规模化发展^[73]。在定位领域,MIMO 播发的毫米波信号由于带宽高、波长短、信道稀疏等特点,使其能够提供更加准确的距离和角度估计值,为高精度定位提供了新的技术途径^[74]。同时,毫米波的宽带特性可以为终端提供更高的多径分辨率,降低多径对定位的影响^[9]。

但毫米波比低频信号会产生更大的路径损耗,其信噪比损失必须通过在发送端和/或接收端进行复杂的波束成形来补偿,从而形成方向性强的链路^[75]。高路径损耗的好处是可以进一步减弱反射径的强度,从而降低多径的影响,但整个系统复杂度会大幅上升。因此,在 5G 初期更多地使用频率范围在 450MHz~6GHz 的 sub-6G 频段,毫米波的大规模应用还需若干年的发展。

4.3 协同定位

协同定位最早出现在无线传感器网络的研究

中,其基本思想为:允许未知位置节点与锚节点进行测量的同时,也允许节点之间互相测量,以提高复杂环境下的定位精度和可靠性,如图10所示。5G关键技术之一——D2D通信,为协同定位提供了网络基础,利用终端之间的通导一体化信号可以实现高精度的协同定位。

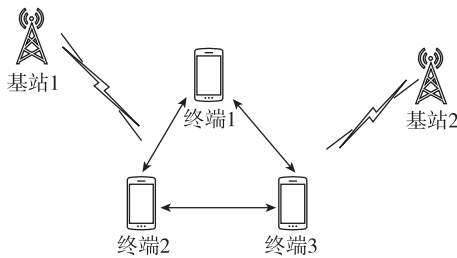


图10 协同定位原理

Fig. 10 Cooperative localization

协同定位主要可分为集中式和分布式,集中式将网络中的信息集中在服务器端进行联合解算;分布式指每个节点通过节点间共享信息独立计算自身位置,两种方法的选取主要取决于计算量、时延要求和精度要求。文献[76]就5G D2D与GNSS的组合定位进行了研究,并提出了高效率的5G D2D测距协议。文献[77]提出了一种利用多径的几何特征进行协同定位的模型。文献[78]提出了一种基于最小约束系统的分布式协作定位方法,该方法通过极大化由节点间测量引出的似然函数获得位置估计。文献[79]提出了一种基于5G边缘云的协同定位架构,结合了集中式和分布式协同定位的优点,具有精度高、时延低、计算量适中的优点,为无人驾驶等高精度、低时延定位需求提供了基础;同时,其建立了大规模协同定位中海量测量值的可信度评估模型,降低了劣质测量值的影响,大幅提高了定位精度与鲁棒性。

4.4 超密集网络

5G技术中通过小蜂窝、微微蜂窝和毫微微蜂窝来克服毫米波频率下的无线电传播问题,形成超密集网络(Ultra-Dense Network,UDN)。UDN通常由大量低功耗、小覆盖的小型基站系统组成,部署在人群密集的车站、商场、办公楼等热点地区。由于UDN的高密度特性,可以为终端提供更高的定位性能,例如高密度的基站将增加信号视距传播的可能性。

尽管UDN有利于5G网络中的用户定位,但仍

然存在一些问题。例如,多个小区之间的时钟同步问题;UDN的空闲模式功能对于缓解相邻基站之间的干扰非常重要,也会影响定位性能^[80]。小型基站因为地理位置的随机性、分布的密集性、不确定性等,将不可避免地导致小区间干扰的上升,这又会降低UDN的性能,因此如何有效降低小区间干扰并合理地分配资源是改善UDN性能成为了一个亟待解决的关键问题^[81]。

4.5 人工智能

人工智能技术发展迅速,已经与通信、互联网、汽车、金融等领域相结合,发挥了强大的功能,对各行各业的发展具有深刻的影响,人工智能与通导一体化的结合也必然是未来的发展方向之一。

5 结论

本文首先介绍了通导一体化的演进进程,然后针对通导一体化中的几个关键技术,分析了其研究现状,最后对通导一体化的发展进行了展望。从本文分析可以看出,通信技术的发展给定位技术带来了新的机遇,MIMO、毫米波、D2D、UDN、人工智能等技术对定位性能的提升产生了巨大的促进作用,通信与导航的结合成为了必然趋势。近年来,通导一体化技术已经得到了长足发展,随着技术的进步,二者的一体化程度仍会不断加深,并相互促进以实现更高的通信与定位性能,通导一体化将具有广阔的研究与应用前景。

参考文献

- [1] Ott G D. Vehicle location in cellular mobile radio systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 26(1): 43-46.
- [2] Tang H, Park Y, Han G, et al. Location tracking of mobile stations in TD-SCDMA system[C]// Proceedings of the 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC '07). IEEE, 2007.
- [3] Shahmansoori A, Garcia G E, Destino G, et al. Position and orientation estimation through millimeter wave MIMO in 5G systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 17(3): 1822-1835.
- [4] Federal Communications Commission. Third report and order on E-911 phase II requirements[R]. Washington, DC, USA, Rep. 99-245, 1999.
- [5] 3GPP. Way forward on OTDOA positioning[R]. So-

- phia Antipolis, France, Rep. R1-091648, 2009.
- [6] European Global Navigation Satellite System. 2019 GNSS market report [EB/OL]. https://www.gsa.europa.eu/system/files/reports/market_report_issue_6.pdf, 2019.
- [7] 3GPP. Chairman's notes of AI 7.2.10 study of NR positioning support[R]. Spokane, USA, Rep. R1-1813849, 2018.
- [8] Chairman's notes of AI 7.2.10 study of NR positioning support[R]. Reno, Nevada, USA, Rep. R1-1913386, 2019.
- [9] 张平, 陈昊. 面向5G的定位技术研究综述[J]. 北京邮电大学学报, 2018, 41(5): 1-12.
Zhang Ping, Chen Hao. A survey of positioning technology for 5G [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018, 41(5): 1-12 (in Chinese).
- [10] 3GPP. New WID on NR positioning enhancements [R]. Sitges, Spain, Rep. RP-193099, 2019.
- [11] 张光普, 梁国龙, 王燕, 等. 分布式水下导航、定位、通信一体化系统设计[J]. 兵工学报, 2007, 28(12): 1455-1462.
Zhang Guangpu, Liang Guolong, Wang Yan, et al. Research on the incorporate technology of distributed underwater navigation, orientation and communication [J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(12): 1455-1462 (in Chinese).
- [12] 张立川, 许少峰, 刘明雍, 等. 多无人水下航行器协同导航定位研究进展[J]. 高技术通讯, 2016, 26(5): 475-482
Zhang Lichuan, Xu Shaofeng, Liu Mingyong, et al. Advances in cooperative navigation and localization for multi-UUV systems [J]. Chinese High Technology Letters, 2016, 26(5): 475-482(in Chinese).
- [13] Liu J, Wang Z, Zuba M, et al. DA-Sync: a Doppler-assisted time-synchronization scheme for mobile underwater sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(3): 582-595.
- [14] Webster S E. Decentralized single-beacon acoustic navigation: combined communication and navigation for underwater vehicles[DB/OL]. <http://www.researchgate.net/publication/235166017>, 2010.
- [15] Haddock P C, Hatley J W, Morse W D, et al. Integrated communications and navigation module[C]// Proceedings of 2012 IEEE International Carnahan Conference on Security Technology(ICCST). Boston, MA, 2012: 1-5.
- [16] Uzo-Okoro E E, Hudiburg J J, Shaw H C, et al. NASA Space Communication and Navigation Network Integration Project (SNIP) [C]// Proceedings of SpaceOps Conferences. Pasadena, CA, 2014.
- [17] 向贵虎, 卞树檀, 刘生林, 等. 基于“北斗一号”卫星系统的野外车辆行动监控系统[J]. 兵工自动化, 2009, 28(1): 51-53.
Xiang Guihu, Bian Shutan, Liu Shenglin, et al. Movement monitoring system of field vehicles based on satellite system of “Triones No. 1”[J]. Ordnance Industry Automation, 2009, 28(1): 51-53 (in Chinese).
- [18] 李永乐. 基于北斗导航和 Android 平台的老人定位系统研究[D]. 上海: 东华大学, 2017.
Li Yongle. Research of the aged people positioning system based on BDS and Android platform [D]. Shanghai: Donghua University, 2017(in Chinese).
- [19] 沈华飞. 北斗卫星一代短报文通信技术及应用[J]. 电子制作, 2014(23): 106.
Shen Huafei. Beidou satellite generation short message communication technology and application[J]. Practical Electronics, 2014(23): 106(in Chinese).
- [20] Juntti M, Kantola R, Kyosti P, et al. Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence[R]. Technical Report, 2019.
- [21] 李德仁. 论军民深度融合的通导遥一体化空天信息实时智能服务系统[J]. 网信军民融合, 2018(12): 12-15.
Li Deren. On the integration of leading and remote control in the deep integration of military and civil air-space information real-time intelligent service system [J]. Civil-Military Integration on Cyberspace, 2018(12): 12-15(in Chinese).
- [22] 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): 144-152.
Wang Lei, Li Deren, Chen Ruizhi, et al. Low Earth Orbiter(LEO) navigation augmentation: opportunities and challenges[J]. Engineering Sciences, 2020, 22(2): 144-152(in Chinese).
- [23] Meng Y, Bian L, Han L, et al. A global navigation augmentation system based on LEO communication constellation[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019, 17(2): 209-215.
- [24] 黎亚. 天地一体化网络结构分析与性能评估技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
Li Ya. Research on the structural analysis and performance evaluation of the integrated space-ground net-

- work [D]. Xi'an: Xidian University, 2018 (in Chinese).
- [25] Wang L, Chen R, Li D, et al. Initial assessment of the LEO based navigation signal augmentation system from Luojia-1A satellite [J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 3919.
- [26] 宋诗斌. X射线导航通信一体化技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016.
Song Shibin. Study on X-ray navigation and communication integration [D]. Xi'an: Xidian University, 2016(in Chinese).
- [27] 王春锋. 一种基于软件无线电的卫星编队相对导航与通信一体化系统设计[C]// 第八届中国卫星导航学术年会. 上海, 2017: 69-73.
Wang Chunfeng. Design of an integrated system for relative navigation and communication of satellite formation based on software radio [C]// Proceedings of 8th China Satellite Navigation Conference (CSNC). Shanghai, 2017:69-73(in Chinese).
- [28] Diez J, De Castro D, Palomo J M, et al. Integrated navigation and communication system based on OFDM [C]// Proceedings of 2010 5th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC). Noordwijk, 2010: 1-5.
- [29] 王玮. Bluetooth 5.1 标准特性以及测试方案[J]. *信息技术与政策*, 2019(5): 91-92.
Wang Wei. Bluetooth 5.1 standard features and test solutions [J]. *Information and Communications Technology and Policy*, 2019(5): 91-92(in Chinese).
- [30] 王雪靖, 戴亚丽. 基于 Cell-ID 的区域定位方法的研究与实现[J]. *软件*, 2016, 37(11): 110-113.
Wang Xuejing, Dai Yali. Research and implementation of zone location method based on Cell_ID positioning [J]. *Computer Engineering & Software*, 2016, 37(11): 110-113(in Chinese).
- [31] Borenovic M N, Simic M, Neskovic A M, et al. Enhanced Cell-ID + TA GSM positioning technique [C]// Proceedings of the International Conference on Computer as a Tool, Eurocon. IEEE, 2006.
- [32] Borkowski J, Niemela J, Lempiainen J, et al. Enhanced performance of cell ID + RTT by implementing forced soft handover algorithm [C]// Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference Fall (VTC-Fall). Los Angeles, CA, USA, 2004: 3545-3549.
- [33] Wang H, Ma S, Hong Z, et al. Design and implementation of cell-ID location system based on signal monitoring [C]// Proceedings of International Conference on Mechatronic Sciences. IEEE, 2014
- [34] Del Peral-Rosado J A, 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.
- [35] 赵庆贺. 无线网络位置指纹定位技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
Zhao Qinghe. Research on fingerprint positioning in wireless networks [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012(in Chinese).
- [36] 朱时立, 邓平. 具有位置指纹定位功能的 WCDMA 移动终端设计[J]. *通信技术*, 2013, 46(9): 92-95.
Zhu Shili, Deng Ping. Design on WCDMA mobile terminal with fingerprint location techniques [J]. *Communications Technology*, 2013, 46(9): 92-95(in Chinese).
- [37] Wang G, Chen H, Li Y, et al. On received-signal strength based localization with unknown transmit power and path loss exponent [J]. *IEEE Wireless Communication Letters*, 2012, 1(5): 536-539.
- [38] Li D, Huang J. RSS based method for sensor localization with unknown transmit power and uncertainty in path loss exponent [J]. *Sensors*, 2016, 16(9): 1452.
- [39] Coluccia A, Ricciato F. On ML estimation for automatic RSS-based indoor localization [C]// Proceedings of International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC). Modena, Italy. IEEE, 2010: 495-502.
- [40] Zhang Y, Xing S, Zhu Y, et al. RSS-based localization in WSNs using gaussian mixture model via semidefinite relaxation [J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(6): 1329-1332.
- [41] Kim H J, Lee K, Choi H, et al. A multiple PRS transmission based quantization error reduction for 3GPP LTE systems [C]// Proceedings of 2016 22nd Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), Yogyakarta, 2016: 32-37.
- [42] Peralrosado J A, Lópezsalcedo J A, Zanier F, et al. Achievable localization accuracy of the positioning reference signal of 3GPP LTE [C]// Proceedings of 2012 International Conference on Localization and GNSS. Starnberg, 2012: 1-6.
- [43] 陈诗军, 王慧强, 陈强, 等. 带内高精度定位网系统及其关键技术[J]. *电子科学技术*, 2017, 4(1): 93-101.
Chen Shijun, Wang Huiqiang, Chen Qiang, et al. High precision inband positioning network system and

- key technologies [J]. *Electronic Science & Technology*, 2017, 4(1): 93-101(in Chinese).
- [44] 何迪, 张毅, 郁文贤. 基于非线性多基站分布式混沌随机共振方法的无线通信系统定位技术研究[J]. *导航定位与授时*, 2019, 6(2): 58-66.
He Di, Zhang Yi, Yu Wenxian. Research on location technology of wireless communication system based on nonlinear multi-base station distributed chaotic stochastic resonance method[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2019, 6(2): 58-66(in Chinese).
- [45] Deng Zhongliang, Yu Yanpei, Yuan Xie, et al. Situation and development tendency of indoor positioning [J]. *China Communications*, 2013, 10(3): 42-55.
- [46] 3GPP. Study on NR positioning support (Release 16) [R]. Athens, Greece, 3GPP TR38.855, 2019.
- [47] 3GPP. DL reference signals for NR positioning[R]. Reno, US, R1-1906387, 2019.
- [48] 3GPP. Performance evaluations for NR positioning [R]. Athens, Greece, R1-1901577, 2019.
- [49] Chairman's notes of AI 7.2.10 NR positioning support[R]. Prague, Czech Republic, R1-1909759, 2019.
- [50] Celik G, Celebi H. TOA positioning for uplink cooperative NOMA in 5G networks[J]. *Physical Communication*, 2019, 36: 100812.
- [51] 徐劲松. 一种新的卫星导航与通信融合信号体制研究[C]// 北京: 第十届中国卫星导航年会, 2019: 50-54.
Xu Jinsong. A new satellite navigation and communication fusion signal system[C]// Proceedings of 10th China Satellite Navigation Conference (CSNC). Beijing, 2019: 50-54(in Chinese).
- [52] 张正舵, 陈远知. 一种基于 TC-OFDM 系统的室内定位算法[J]. *无线电工程*, 2017, 47(9): 55-59.
Zhang Zhengduo, Chen Yuanzhi. A new indoor positioning algorithm based on TC-OFDM system[J]. *Radio Engineering*, 2017, 47(9): 55-59(in Chinese).
- [53] Han L, Liu R, Wang Z, et al. Millimeter-wave MI-MO-NOMA based positioning system for internet of things applications[J]. DOI: 10.1109/JIOT.2020.2995916, 2020.
- [54] 3GPP. Discussion of potential techniques for NR positioning [R]. Chengdu, China, CATT-94B-R1-1810532, 2018.
- [55] 李智勇. 基于 UFMC 的通信与导航一体化系统 [C]// 北京: 第十届中国卫星导航年会, 2019: 20-23.
Li Zhiyong. Integrated communication and navigation system based on UFMC [C]// Proceedings of 10th China Satellite Navigation Conference (CSNC). Beijing, 2019: 20-23(in Chinese).
- [56] 冯奇. 基于 V-OFDM 调制的卫星通信与导航一体化系统[D]. 南京: 南京大学, 2017.
Feng Qi. Integrated satellite communication and navigation system based on V-OFDM modulation [D]. Nanjing: Nanjing University, 2017(in Chinese).
- [57] 刘江. 频域复合的通信一体化 OFDM 调制方法[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
Liu Jiang. Frequency domain composite OFDM modulation method for communication and navigation integrated signal [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2019(in Chinese).
- [58] 王如霞. 通导融合系统中定位信号的设计与性能评估[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
Wang Ruxia. The design and performance evaluation of positioning signal in integration system of communication and navigation system [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018(in Chinese).
- [59] 王宝全. 基于 TDOA 参数估计的 LTE 定位技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2015.
Wang Baoquan. Research on LTE positioning technology based on TDOA parameter estimation [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2015(in Chinese).
- [60] Fisher S. Observed Time Difference of Arrival (OTDOA) positioning in 3GPP LTE [S]. Qualcomm Technologies, Inc, 2014.
- [61] 张毅, 徐昌庆, 万群. 移动网络定位研究进展[J]. *导航定位与授时*, 2019, 6(2): 1-11.
Zhang Yi, Xu Changqing, Wan Qun. Research progress in mobile network positioning [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2019, 6(2): 1-11(in Chinese).
- [62] Lopez E M. Muting pattern strategy for positioning in cellular networks [D]. Linköping University, 2017.
- [63] Yin L, Cao J, Lin K, et al. A novel positioning-communication integrated signal in wireless communication systems [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(5): 1353-1356.
- [64] Zhang T, Xiao D, Cui J, et al. A novel OTDOA positioning scheme in heterogeneous LTE-advanced systems [C]// Proceedings of 2012 3rd IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content. Beijing, 2012: 106-110.
- [65] 卞玉军. 面向 LTE 定位的干扰消除算法研究[D].

- 北京: 中国科学院大学, 2015.
- Bian Yujun. Research on interference cancellation technology oriented to position location in LTE[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015(in Chinese).
- [66] 唐宗山. 面向5G共频带技术的PN规划算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- Tang Zongshan. Research on PN planning algorithms for 5G common band technology[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019(in Chinese).
- [67] 胡平, 鞠捷. 井下救援人员定位中的信号抗干扰技术研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(4): 208-211+216.
- Hu Ping, Ju Jie. Signal anti-jamming technology research in the downhole rescue personnel positioning [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 30(4): 208-211+216(in Chinese).
- [68] 欧阳俊, 陈诗军, 黄晓明, 等. 面向5G移动通信网的高精度定位技术分析[J]. 移动通信, 2019, 43(9): 13-17.
- Ouyang Jun, Chen Shijun, Huang Xiaoming, et al. High precision localization technology for 5G mobile communication networks [J]. Mobile Communications, 2019, 43(9): 13-17(in Chinese).
- [69] 3GPP. Location services (LCS); functional description; stage 2, release 98, V7.0.0[R]. Sophia Antipolis, France, Rep. 3GPP TS 03.71, 1999.
- [70] 3GPP. Stage 2 functional specification of UE positioning in E-UTRAN, release 9, V9.10.0[R]. Sophia Antipolis, France, Rep. 3GPP TS36.305, 2013.
- [71] 3GPP. Stage 2 functional specification of UE positioning in E-UTRAN, release 13, V13.0.0[R]. Sophia Antipolis, France, Rep. 3GPP TS 36.305, 2016.
- [72] 陈林山, 鲁晓飞. 5G移动通信的关键技术及发展趋势探索[J]. 中国新通信, 2020, 22(5): 1.
- Chen Linshan, Lu Xiaofei. The key technology of 5G mobile communication and the exploration of development trend [J]. China New Telecommunications, 2020, 22(5): 1(in Chinese).
- [73] Sayeed A M, Brady J. Beam-space MIMO for high-dimensional multiuser communication at millimeter-wave frequencies [C]// Proceedings of 2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Atlanta, GA, 2013: 3679-3684.
- [74] 张书楠. 基于5G毫米波信号的TOA估计及定位算法的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- Zhang Shunan. TOA estimation and location based on 5G millimeter wave signal[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019 (in Chinese).
- [75] Hur S, Kim T, Love D J, et al. Millimeter wave beamforming for wireless backhaul and access in small cell networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(10): 4391-4403.
- [76] 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.
- [77] Shen Y, Win M Z. On the use of multipath geometry for wideband cooperative localization [C]// Proceedings of 2009 IEEE Global Telecommunications Conference. Honolulu, HI, 2009: 4380-4385.
- [78] 章平, 王炎, 王桥. 基于最小约束系统的分布式协作定位研究[J]. 导航定位与授时, 2019, 6(2): 67-72.
- Zhang Ping, Wang Yan, Wang Qiao. Research on distributed cooperative localization under minimally constraint system [J]. Navigation Positioning and Timing, 2019, 6(2): 67-72(in Chinese).
- [79] Yin Lu, Ni Qiang, Deng Zhongliang. Intelligent multisensory cooperative localization under cooperative redundancy validation[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019(99): 1-13.
- [80] Liu Y, Shi X, He S, et al. Prospective positioning architecture and technologies in 5G networks [J]. IEEE Network, 2017, 31(6): 115-121.
- [81] 程万里, 张晶, 王慧. 超密集网络中基于聚类的资源分配方案[J]. 系统工程与电子技术.
- Cheng Wanli, Zhang Jing, Wang Hui. Cluster-based resource allocation scheme in ultra-dense networks [J]. Systems Engineering and Electronics (in Chinese).