

doi: 10.7690/bgzdh.2022.03.014

安卓 GNSS 与足部 MEMS 融合的单兵导航系统

郭 凌, 杜伟伟, 万 平, 李 睿
(陆军勤务学院军事物流系, 重庆 401311)

摘要: 为建立轻巧便携、功能集成的单兵导航系统, 基于单兵导航系统的功能架构进行探讨。对安卓智能终端与足部微机电系统 (micro electro mechanical system, MEMS) 融合建立单兵导航系统进行适用性和可行性分析, 研究安卓全球导航定位系统 (global navigation satellite system, GNSS) 数据获取和高精度定位加工使用, 将安卓 GNSS 与足部 MEMS 融合, 同时 5G 通信赋能。研究结果表明: 该架构能实现单兵室内外高精度定位的方法, 为单兵导航系统建设提供参考。

关键词: 5G 通信; GNSS; 安卓; MEMS; 单兵导航

中图分类号: TJ01 **文献标志码:** A

Individual Soldier Navigation System Based on Fusion of Android GNSS and Foot MEMS

Guo Ling, Du Weiwei, Wan Ping, Li Rui

(Department of Military Logistics, Army Logistics University, Chongqing 401311, China)

Abstract: In order to establish a lightweight, portable and integrated individual soldier navigation system, discusses based on functional architecture of the individual soldier navigation system. This paper analyzes the applicability and feasibility of the integration of Android intelligent terminal and foot MEMS to establish an individual soldier navigation system, studies the use of Android GNSS data acquisition and high-precision positioning processing, integrates Android GNSS with foot MEMS, and enables 5G communication at the same time. The results show that the architecture realizes the method of indoor and outdoor high-precision positioning of individual soldier, and provides a reference for the construction of individual soldier navigation system.

Keywords: 5G communication; GNSS; Android; MEMS; individual soldier navigation

0 引言

行人导航 (pedestrian navigation, PNS) 是借助专用设备实现对个人实时定位和跟踪, 引导行人快速找到目的地的技术, 而单兵导航因其应用群体的特殊性和适用环境的复杂性, 是 PNS 的一种特殊形式^[1]。当前单兵导航系统主要以全球导航定位系统 (GNSS) 为核心, 辅助地理信息系统 (geographic information system, GIS)、电子地图等实现定位导航。GNSS 在室外开阔地域定位效果较好, 但易受到建筑物、密林的遮挡, 产生多路径效应或观测卫星数不足, 单一的 GNSS 定位无法满足单兵定位需求^[2]。

目前, 多源传感器融合导航是实现单兵导航系统高精度定位的主要解决方案, 运用蓝牙^[3]、射频、超宽带^[4-5]、地标^[6]、WIFI 指纹^[7-8]与惯性导航^[9]等方法可以实现 GNSS 受遮蔽地区的高精度定位导

航, 但蓝牙、WIFI 指纹等技术需预设专用的导航设施或导航环境条件。单兵导航系统适用于遂行特种作业的军警, 应用区域包括丛林、峡谷等未知地域, 不可能预设此类导航条件; 而惯性导航仅依靠单兵携带传感器即可进行自主导航, 并且 GNSS 有源导航提供绝对定位信息与微惯导无源导航进行位置推算可以达到优势互补的效果。

2016 年 5 月, Google 宣布开放 Android GNSS 原始观测值, 可以在支持传感器观测值输出的硬件中通过安卓接口 (application program interface, API) 直接获取到 GNSS 数据, 包括相位、多普勒等可分析解算的数据, 利用安卓智能终端就能实现室外高精度定位。2020 年 10 月 30 日, 华为宣布 HUAWEI Mate 40 系列手机支持车道级导航, 利用安卓智能终端和足部微惯导传感器构建高精度定位的单兵导航系统成为可能。

收稿日期: 2021-11-13; 修回日期: 2021-12-08

基金项目: 军队后勤科研目录 (BS215R012)

作者简介: 郭 凌 (1968—), 男, 重庆人, 博士, 教授, 从事装备信息化研究。E-mail: guoling118@163.com。

1 单兵导航系统功能架构

1.1 系统整体架构

安卓GNSS与微机电系统(MEMS)融合的单兵导航系统主要包括3部分：足部MEMS模块、安卓GNSS终端和指挥端(平台)。系统整体架构如图1所示。

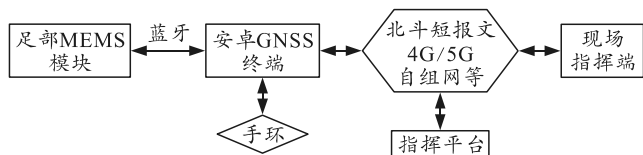


图1 系统整体架构

上图中，将足部微惯导传感器封装成模块形态嵌入特种作业靴内部，足部MEMS模块通过蓝牙与安卓GNSS终端相连；安卓GNSS终端集成北斗定位、通信模组，安装一键任务导航、地图位置共享等软件，并搭配手环等设备实现单兵导航系统终端功能；数据通信可根据需要采用北斗短报文、4G/5G、无线自组网等方式与现场指挥端及指挥平台连接，现场指挥端和指挥平台接收定位数据信息，现场指挥端接收及下发导航任务信息，进行现场指挥；指挥平台实时查看定位信息，远程监控下达任务。

1.2 单兵定位终端功能模块

利用安卓智能终端作为单兵定位终端的核心模块，Android平台具有高度的开放性，可以集成丰富的硬件模块，搭配智能手环、无线耳机等设备使用，不仅提高人机交互性，使单兵定位终端功能更加可视化、智能化。单兵定位终端的核心功能模块应包括定位导航、位置共享、数据通信等功能；扩展功能模块应包括单兵身份验证、作战统一授时、生命体征监测、数据销毁等。在满足功能实现的基础上，还应根据单兵作业需要进行功能升级。单兵定位终端核心功能模块的功能主要为：

1) 定位导航：支持军用地图、3D模型、卫星地图加载；进行北斗有源定位模式切换；接收导航任务后一键定位导航；对目标定位点进行标绘并上传定位信息。

2) 位置共享：实时共享各终端位置，形成我方态势图；基于电子地图定向，方位角、斜率、距离、面积等数据测算。

3) 数据通信：结合不同网络场景进行数据传输，进行语音识别转为北斗短报文传输数据，同时

接收北斗短报文约定格式可自动解析为相关信息。

4) 其他功能：终端完好性检测、导航路径规划等智能决策辅助功能。

1.3 指挥端(平台)功能模块

指挥平台主要包括设备检测、终端授权与安全管理、定位管理、通信管理、导航授时、指挥调度、位置共享管理、服务频度控制、多种坐标系设置、地图建模管理等功能。其核心功能为：

1) 定位管理：设置授时时间、定位方式、相关参数、定位频率和定位坐标系；收集汇总定位信息进行决策分析和导航定位任务下达；设置终端位置共享权限等。

2) 地图建模管理：预先分发电子地图，在陌生地域，利用建模软件预置基本地形地物模块，快速搭建地形地物模型，根据定位终端回传数据，创建3D、2D地物模型并下发终端等。

3) 通信管理：设置通信方式、相关参数和通信频率等；区分通信对象，进行点名通信、组播通信和通播通信等。

2 适用性及可行性分析

单兵导航系统主要适用于抢险救灾、应急救援、战术行动等任务场景，应用群体为军警单兵，既要满足定位导航、指挥协同等功能需求，又要减少对人员战术动作影响，以安卓智能终端为载体建立的单兵导航系统具有独特优势。美军早已开展安卓军用版应用，系统自带专用“应用市场”，5G通信应用也可具有独立生态，与民用5G既结合又隔离，其开发的战术突击工具包(ATAK)，就是基于安卓开发的映射引擎，支持单兵指挥、定位、通信等多种功能。

1) 自主可控：安卓智能终端和足部微惯导融合建立单兵导航系统，Android为开源系统，可对系统及开发程序进行检查，防止后门程序；2018年开始国内自主研发的安卓智能终端开始支持多频GNSS，运用北斗三号(BDS-3)进行定位导航将不受制于人，足部微惯性测量组合(MEMS-IMU)不依赖外部信息进行导航。

2) 轻巧便携：安卓智能终端主要包括功能集成化的手机、小型平板或智能手表，足部MEMS-IMU固定于单兵作战靴等特制鞋内，具有体积小、成本低、功耗低、可靠性高、易于集成等优势，是单兵传感设备信息化的优选。

3) 功能集成: 为达到多样功能需求和便携化的要求, 系统终端功能集成是必须的, 基于 Android 系统的程序开发已较为成熟, 通信、定位、任务管理及其他功能软件均可集成至安卓智能终端, 也可将北斗导航模块集成至终端, 利用模块开发 APP、北斗卫星进行通信, 北斗海聊 APP 已为北斗导航卫星独有的短报文通信技术实现即时通信。

4) 稳定可靠: 安卓智能终端集成北斗导航模块, 搭配军标级的 MEMS, 辅助气压计和磁力计等方式, 同时安卓智能终端均包含微型传感器器件, 虽精度较低, 但可实现多重定位手段互补; 通过卫星通信、5G 通信、自组网可实现多种通信手段互补; 硬件终端加强容差设计、电磁兼容(EMC)设计和抗力学环境结构设计可增加硬件终端可靠性。

更重要的是凭借安卓智能终端, 单兵定位系统可以便捷地进行 5G 赋能。5G 作为无线通信网的军事意义非凡, 5G 不仅具有通信高速率、超宽带、低功耗、低时延等通信优势^[10], 也是海量互联网物联网的基础, 在 5G 基站覆盖地域, 安卓 GNSS 还可融合 5G 定位提高单兵导航系统定位精度和系统可靠性^[11]。基于安卓智能终端开发的单兵导航系统功能具有多样化、集成化、智能化的发展趋势, 但其最核心的导航定位功能还需要安卓 GNSS 融合多源传感器实现高精度的室内外定位支持。

3 安卓 GNSS 数据获取及加工使用

3.1 安卓 GNSS 数据获取

根据 Android 开发者文档^[12], 自 Android Nougat 版本 (Version 7.0) 开放原始 GNSS 观测值, 由 Android 系统各个 API 接口获取, 根据设备的不同, GNSS 原始测量数据包含伪距和伪距率、导航消息、累计变化量或载波、硬件时钟等全部或部分数据, 并可直接获取载波相位和多普勒观测值。获取常用原始 GNSS 观测数据需用到的类如表 1。

表 1 Android 7.0 中获取常用原始 GNSS 观测数据类的定义

类	注释
LocationManager	用于注册 GNSsmasurement
GnssMeasurementsEvent.Callback	用于从 GNSS 引擎接收 GNSS 卫星测量值
GnssMeasurementsEvent	一个包含测量值数据的容器
GnssClock	包含 GNSS 时钟时间戳记的类
Gnssmeasurement	代表 GNSS 卫星测量的类, 其中包含原始信息和计算信息

1) 计算伪距。

伪距是 GNSS 定位中最重要的基本参数之一,

而安卓智能终端一般不直接提供伪距, 需要通过 GNSS 原始数据进行计算, 伪距计算公式如下:

$$\rho = (t_{RX} - t_{TX}) \times c \times 10^9 \quad (1)$$

其中: t_{RX} 为智能手机接收到信号的时间; t_{TX} 为卫星发射信号的时间(从当前 GNSS 周开始); c 为光速。 t_{TX} 可以直接通过 `GnssTime.ReceivedSvTimeNanos()` 获取; 而 t_{RX} 则无法直接获取, 需要经过计算, 由于卫星系统的时间基准不同, 采用不同的方法。

对于 t_{RX} 的计算, 首先定义在完整 GNSS 时间中测得的时间 t_{RXgnss} :

$$t_{RXgnss} = \text{TimeNanos} - (\text{FullBiasNanos} + \text{BiasNanos}) \quad (2)$$

将其化为 GNSS 周内秒(取值范围在 0~604 800 s), 即将其与 604 800 取模:

$$t_{RXgps} = t_{RXgnss} \bmod (\text{weeksecNanos}) \quad (3)$$

上面计算的值是 GPS 时间下的 t_{RX} , 其他定位系统需进行时间转换, 对北斗系统:

$$t_{RX} = t_{RXgps} - 14 \text{ s} \quad (4)$$

2) 其他数据直接获取。

相位观测值获取方式:

$$L_{\text{fir}} = \text{GNSSMeasurement.AccumulatedDeltaRangeMeters} \quad (5)$$

多普勒观测值获取方式:

$$D_{\text{fir}} = \text{GNSSMeasurement.PseudorangeRatepreSecond} \quad (6)$$

载噪比获取方式:

$$C / N_0 = \text{GNSSMeasurement.Cn0DbHz} \quad (7)$$

频率获取方式:

$$\text{fre} = \text{GNSSMeasurement.CarrierFrequencyHz} \quad (8)$$

3.2 数据获取的加工

通过实验, 将安卓 GNSS 获取的原始测量数据与测量型接收机进行对比^[13], 其伪距定位精度误差约为 5~10 m, 高程误差约为 10 m, 高精度定位需求难以得到满足, 目前主要采用 3 种方法进行数据加工, 以提高定位精度。

1) 滤波模型。

经测试研究, 虽然安卓 GNSS 直接进行伪距测算精度低且粗差多, 但利用获得的多普勒观测值进行单点测速, 载波相位观测值进行位移解算精度能达到较高精度^[14], 对原始的 GNSS 观测值进行预处理后, 将伪距观测值用于标准单点定位解算, 将多普勒观测值用于标准单点测速解算, 将载波相位观测值用于历元间相位差分(TDCP)测位移解算; 最

后用 Kalman 滤波器融合估计得到当前时刻精确的滤波位置，可提高定位精度，平滑伪距定位噪声。滤波模型的处理流程如图 2 所示。

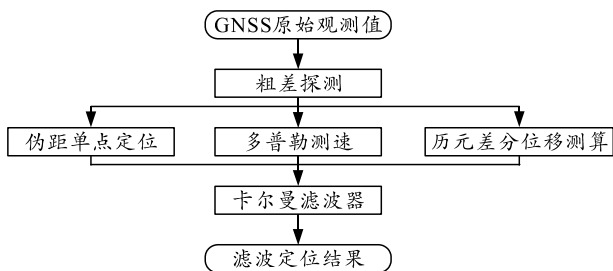


图 2 滤波模型的处理流程

2) RTK 技术。

北斗地基增强系统于 2014 年 9 月启动研制建设，由超过 2 500 个地基增强站组成，形成全球规模最大、密度最高、自主可控和全国产化的北斗地基增强系统“全国一张网”，具备在全国范围内提供实时米级、分米级、厘米级，后处理毫米级高精度定位基本服务能力^[15]。安卓 GNSS 运用 RTK (real-time kinematic) 载波相位差分技术，就是在接收到基准站坐标和采集的载波相位观测值后，与自身测得的载波观测值组成双差方程，解算得到基线向量，并将基线向量加上基准站地心坐标，得出安卓终端坐标，能够得到高精度的定位结果^[16]。

3) 广域精密单点定位。

此类方法一般需要双频定位的安卓 GNSS 终端，利用 GNSS 卫星精密星历及精密卫星钟差，以单台双频 GNSS 采集的载波相位数据作为主要观测值进行解算，实现精密单点定位。核心问题是如何解决众多系统误差的影响，基本模型为：

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \rho_k^p + c\delta t_k - c\delta t^p + \delta T_k^p + \delta I_{k,1}^p + L_{P_1} \\ \lambda_1\varphi_1 &= \rho_k^p + c\delta t_k - c\delta t^p + \delta T_k^p - \delta I_{k,1}^p - \lambda_1 N_{k,1}^p + L_{\varphi_1} \\ P_2 &= \rho_k^p + c\delta t_k - c\delta t^p + \delta T_k^p + (\lambda_2^2/\lambda_1^2)\delta I_{k,1}^p + L_{P_2} \\ \lambda_2\varphi_2 &= \rho_k^p + c\delta t_k - c\delta t^p + \delta T_k^p - (\lambda_2^2/\lambda_1^2)\delta I_{k,1}^p - \lambda_2 N_{k,2}^p + L_{\varphi_2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中： P 为计算所得的伪距； φ 为相位观测值； δT 为对流层延迟； λ 为载波波波长； δI 为站星视线方向的电离层延迟； L 为模型化后的各系统误差累计值。实验结果表明，广域精密单点定位可有效提高定时定位精度^[17]。

4 多源传感融合

4.1 足部 MEMS 方案

单兵导航系统微惯导传感器一般安装在特种作

业靴内，不额外增加携带设备，不影响人员行动，多采用零速修正 (zero speed correction, ZUPT) 方式校准，INS-ZUPT 采用加速度和角速度积分获取 3 维位移，以脚触地速度为 0 作为卡尔曼滤波器的观测值抑制惯导外推的发散，但是航向角、高程状态仍旧发散；同时，因为单兵人员动作幅度较大，脚与地接触的接触时间、受力大小、接触面积等不一，固定阈值探测识别零速状态效果不佳，还需增加约束和调整探测识别方法增加足部 MEMS 的 3 维航位推算能力。足部微惯导与北斗导航融合流程如图 3 所示。

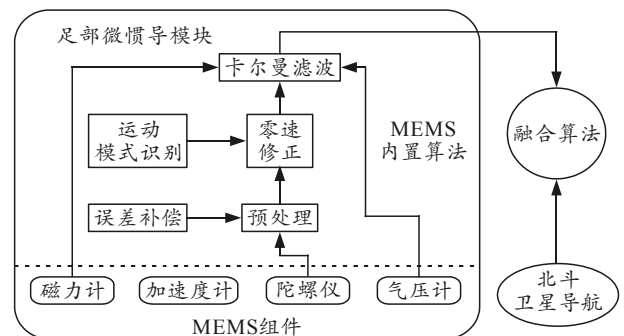


图 3 足部微惯导与北斗导航融合流程

1) 采用自适应零速探测方法，使用自适应阈值代替固定阈值探测，针对单兵运动速度复杂多变，减少漏探情况，增强连续递推的可靠性^[18]。

2) 采用气压计高程约束，将 MEMS 级别的气压计测量的高程变化值增加到观测方程，抑制高程方向累积误差发散。

3) 采用调平磁航向约束，在静止状态调平足部 MEMS，将 MEMS 级别的磁力计测得的调平磁航向增加到观测方程，抑制因 INS-ZUPT 航向角可观测性弱导致的误差累积。

4.2 5G 通信辅助

1) 通信功能。

5G 通信最大的优势是高速率、低时延的无线移动通信，无线移动通信最早起源于军用。随着 5G 基础设施建设推进，城乡地域 5G 网络覆盖将得到保证，而在野外地域也不妨碍 5G 通信的军事赋能，5G 基站发展向小型化、移动化发展，野外使用可采取预设小基站或自带移动基站的方式，构建行动地域局域网，保障单兵定位终端间互联和地图数据更新；同时，小分队战术级单兵定位系统网络覆盖需求有限，用户挂载量相对较少，仅在需要时保证基站运转，野外移动基站重量、功耗等都可以进一步优化。

2) 定位辅助。

首先 5G 本身就具有一定的定位功能，信号到达时间差 (TDOA) 和到达角度测距 (AOA) 是无线电定位的主流实现方式，5G 具有毫米波通信和大规模天线技术，理论上具有更好的测距和测角特性，5G 定位可在基站网络覆盖地域丰富定位手段，同时辅助单兵定位系统提高定位精度^[19]。

4.3 实时多源融合

安卓 GNSS 是有源导航，采用绝对定位方式，无误差累积，长期定位精度高，提供时间信息，但易受环境影响，动态响应滞后；INS-ZUPT 是无源导航，采用相对定位方式，全自主工作，动态特性好，但缺乏绝对位置且无时间信息，递推累积误差严重。笔者将安卓 GNSS 与 INS-ZUPT 融合，充分将 GNSS 和惯性导航的优势互补，实现 MEMS 误差校正和单兵位置准确、连续解算。融合的主要步骤：① 安卓 GNSS 与 MEMS 观测值时间同步；② 使用安卓 GNSS 定位、测速、测向；③ INS-ZUPT 递推相对位移；④ 安卓 GNSS 校正 INS-ZUPT 误差；⑤ 安卓 GNSS 与 MEMS 融合滤波定位。

1) 在开阔条件下，安卓 GNSS 定位能接收到 4 颗以上卫星信号，安卓 GNSS 起主导作用，为提高定位精度，安卓 GNSS 一般需要运用 RTK、PPP 等高精度定位方法，此时足部 MEMS 辅助安卓 GNSS 定位进行粗差探测、周跳探测与修复、整周模糊度保持等，以其独立可靠的信息源来提高安卓 GNSS 定位的稳健性。

状态方程为：

$$X_k = \Phi_{k/k-1} X_{k-1} + \Gamma_{k/k-1} W_{k-1} \quad (10)$$

观测方程为：

$$Z_k = \begin{bmatrix} p_{INS}^n - p_{GNSS}^n \\ v_{INS}^n - v_{GNSS}^n \end{bmatrix} = H_k X_k + V_k \quad (11)$$

其中：X_k 为状态向量，表示地心地固系下的 3 维坐标和接收机钟差 [x, y, z, d_i]^T；Z_k 为量测向量；Φ_{k/k-1}, Γ_{k/k-1} 分别为状态转移矩阵、系统噪声分配矩阵，与 MEMS 中陀螺仪、加速度计误差有关；W_{k-1} 为系统噪声向量；V_k 为高斯观测白噪声；H_k 为量测矩阵。

在 5G 基站覆盖地域，可利用网络辅助卫星定位 (A-GNSS) 技术提高定位精度，安卓智能终端和网络基站都接收到 GNSS 信息后，网络基站可快速确定系统所在区域上空的 GNSS 卫星信息并发送给

系统，可缩短系统搜星时间，加速搜索过程，同时系统终端计算出的位置信息回传给网络定位中心进行解算，可得到更为精准的位置信息^[20]。

2) 在遮蔽条件下，安卓 GNSS 接收卫星数少于 4 颗，仍有可能接收到 1~3 颗卫星定位信息，安卓 GNSS 观测信息不完整，无法发挥定位主导作用，此时不使用安卓 GNSS 的定位结果，将安卓 GNSS 接收到的多普勒观测值、载波相位观测值等原始观测信息与足部 MEMS 紧组合，来修正足部 MEMS，防止定位点跳变或定位缺失的情况，在能接收到 5G 信号的室内位置，各终端间可互相修正，最终实现定位的无缝衔接，发挥融合定位效应。安卓 GNSS 与足部 MEMS 紧组合流程如图 4 所示。

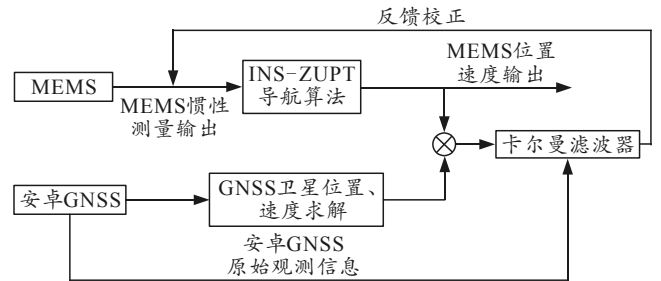


图 4 安卓 GNSS 与足部 MEMS 紧组合流程

5 结束语

安卓 GNSS 数据经加工处理后，可满足开阔地域定位需求，足部微惯导进行约束补偿后可进行室内自主定位，两者融合可满足室内外高精度定位需求。随着卫星导航技术和通信技术快速发展，我国自主研发的 BDS-3 各项性能指标在 GNSS 中趋于领先水平；我国 5G 通信发展走在世界前列，多源融合是实现单兵室内外高精度定位的发展趋势，利用安卓智能终端和足部微惯导融合实现高精度定位，同时 5G 通信赋能，建立便携式、智能化、集成化的单兵导航系统，从而满足单兵高精度定位导航需要，是对现阶段技术优势进行的有效转化。

参考文献：

[1] 徐海刚, 吴亮华, 杨军, 等. 单兵自主导航技术研究[J]. 导航定位与授时, 2014, 1(1): 13-17.
[2] 潘献飞, 穆华, 胡小平. 单兵自主导航技术发展综述[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(1): 1-11.
[3] LI X, WANG J, LIU C. A Bluetooth/PDR Integration Algorithm for an Indoor Positioning System[J]. Sensors, 2015, 15(10): 24862-24885.
[4] TONG H B, XIN N, SU X L, et al. A Robust PDR/UWB Integrated Indoor Localization Approach for Pedestrians in Harsh Environments[J]. Sensors, 2019, 20(1).

- [5] LIU F, WANG J, ZHANG J X, et al. An Indoor Localization Method for Pedestrians Base on Combined UWB/PDR/Floor Map[J]. *Sensors*, 2019, 19(11): 2578.
- [6] WANG X, JIANG M X, GUO Z W, et al. An Indoor Positioning Method for Smartphones Using Landmarks and PDR [J]. *Sensors*, 2016, 16(12): 2135.
- [7] 杨海效, 吴虹, 田菟玉, 等. 基于 Wi-Fi 指纹与惯性导航的室内定位技术研究[C]//第十一届中国卫星导航年会论文集——S10 PNT 体系与多源融合导航. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心, 中科北斗汇(北京)科技有限公司, 2020: 5.
- [8] 郝森鑫. 基于 WI-FI/PDR 融合的室内定位技术研究[D]. 成都: 西华大学, 2020.
- [9] 王瀚. 基于 MEMS 惯性器件的行人导航技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2020.
- [10] IMT-2020(5G)推进组. 5G 概念白皮书[EB/OL]. <http://www.imt2020.org.cn/zh/documents/1?currentPage=3&content=>.
- [11] SUN C, ZHAO H B, BAI L, et al. GNSS-5G hybrid positioning based on TOA/AOA measurements[C]//第十一届中国卫星导航年会论文集——S10 PNT 体系与多源融合导航. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心, 中科北斗汇(北京)科技有限公司, 2020: 1.
- [12] Google Inc. Raw GNSS measurements[EB/OL]. [2018-08-20]. <https://developer.android.google.cn/guide/topics/sensors/gnss>.
- *****
- (上接第 67 页)
- [4] TIAN Y, TOMUS D, HUANG A, et al. Experimental and statistical analysis on process parameters and surface roughness relationship for selective laser melting of Hastelloy X[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2019, 25(7): 1309-1318.
- [5] ROBICHAUD J, VINCENT T, SCHULTHEIS B, et al. Integrated computational materials engineering to predict melt-pool dimensions and 3D grain structures for selective laser melting of inconel625[J]. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 2019, 8(3): 305-317.
- [6] YOON J, HE D, HECKE B V. A PHM approach to additive manufacturing equipment health monitoring, fault diagnosis, and quality control[C]//Conference of the Prognostics & Health Management Society. 2014, 29: 1-9.
- [7] LOTT P, SCHLEIFENBAUM H, MEINERS W, et al. Design of an optical system for the in-situ process monitoring of selective laser melting(SLM)[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12(part-PA): 683-690.
- [8] RAO P K, LIU J P, ROBERSON D, et al. Online real-time quality monitoring in additive manufacturing processes using heterogeneous sensors[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering: Transactions of the ASME*, 2015, 137(6): 061007.
- [9] RIEDER H, DILLHÖFER A, SPIES M, et al. Ultrasonic online monitoring of additive manufacturing processes based on selective laser melting[C]. *AIP Conference Proceedings*, 2015, 34: 184-191.
- [10] GRASSO M, DEMIR A G, PREVITALI B, et al. In situ monitoring of selective laser melting of zinc powder via infrared imaging of the process plume[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, 49: 229-239.
- [11] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题[J]. *航空学报*, 2014, 35(10): 2690-2698.
- [12] MATTHEWS M J, GUSS G, KHAIRALLAH S A, et al. Denudation of metal powder layers in laser powder bed fusion processes[J]. *Acta Materialia*, 2016, 114: 33-42.
- [13] GUO C, LI S, SHI S, et al. Effect of processing parameters on surface roughness, porosity and cracking of as-built IN738LC parts fabricated by laser powder bed fusion[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 285: 116788.