

分类号_____

学号 M201872071

学校代码 10487

密级_____

华中科技大学

硕士学位论文

面向足球运动监测的低复杂度

可穿戴系统设计与实现

学位申请人：杨成

学科专业：电子与通信工程

指导教师：郭鹏 研究员

答辩日期：2021年5月20日

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree for the Master of Engineering**

**Design and Implementation of a low-complexity
wearable system for football sports monitoring**

Candidate : Cheng Yang

Major : Electronic and Communication Engineering

Supervisor(s) : Prof. Peng Guo

Huazhong University of Science & Technology

Wuhan 430074, P.R.China

May,2021

独创性声明

本人声明所提交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到，本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：杨成

日期：2021年5月21日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权华中科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本论文 保密，在_____年解密后适用本授权书。
 不保密。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：杨成

日期：2021年5月21日

指导教师签名：郭鹏

日期：2021年5月21日

摘要

近年来,随着国家对足球运动的宣传以及足球运动的普及,人们对于足球运动也越来越重视。可以说,一个国家足球水平的提升离不开青少年足球运动的发展,而校园足球更是青少年足球运动的主力军。在校园足球训练中,对运动员体征数据的实时监测是必要的,这是了解运动员身体素质和健康状态的重要途径。现阶段也有一些针对校园足球运动的监测设备,但是因其复杂度高,架设困难,成本高等一些痛点,以至于应用受限。

本文提出了如何以较小硬件尺寸、功耗来实现一款高集成度可穿戴智能感知终端及其接入系统。它需要在有限的硬件尺寸和功耗的条件下,需要同时满足:实时室外定位、运动状态感知、心率监测、百米以上距离的无线通信能力、以及多点(≥ 30 个)高频次(每秒大于5次数据上报)接入容量、免用户开关的自动唤醒等能力。这其中涉及多项技术挑战,包括:1)在有限的硬件结构尺寸条件下,为保证一定的通信距离和较低的功耗,设计出相应的硬件方案和通信协议;2)在低成本与低功耗的前提下,完成运动状态的辨识;3)在免用户开关的情况下,完成系统低功耗的设计,并且实现低功耗休眠和自唤醒。

针对该系统需要面临的技术挑战,本文的主要贡献如下:

(1)设计了一种低功耗、高信道利用率的物联网接入方案。各接入节点(标签)采用周期性休眠工作模式,定期唤醒监听网关 beacon 指令,定期在指定时隙唤醒接入,节点射频开启时间仅占上电工作时间的 18%,平均工作电流小于 20mA;

(2)提出了一种基于加速度感知的低复杂度人体跳跃行为识别算法。通过深入观测跳跃和跑动下加速度信号的差异,提出基于滞空时间长短为特征的跳跃行为辨识算法,该算法识别准确率约 83%;

(3)设计了一种免用户开关操作的硬件自休眠、自唤醒方案。通过低功耗的心率监测来决策标签的工作模式,从而在低功耗的前提下,完成标签硬件的自休眠和自

华中科技大学硕士学位论文

唤醒；

(4) 完整实现了整个可穿戴式人体运动监测系统，包括可穿戴式佩戴产品硬件设计和软件开发、网关的硬件设计和软件开发，以及上位机系统的开发。其中，可穿戴式硬件在 6cm*3cm*1cm 尺寸下同时实现了多项功能，包括自休眠与自唤醒、GPS 数据采集、运动姿态监测、运动速度采集、心率监测、长达 150m 的通信距离、低于 20mA 的平均工作电流、低于 8% 的丢包率。这是目前市场上同类产品单位空间上集成度最高的可穿戴运动监测硬件，体现了总体方案设计的合理性和先进性。

关键词：可穿戴式 运动感知 接入协议 低功耗

Abstract

In recent years, with the promotion and the popularization of football, people have paid much more attention to football. The level of youth football determines the strength of football in the entire region, and campus football is the key point among them. In campus football training, it is necessary to realize the real-time monitoring of athlete's physical fitness, which can help to learn the health status of athlete and provide timely support to athletes. At this stage, there are also some monitoring equipment for campus football, but they are not widely used because of high complexity, difficulty in erection, high cost, etc.

This topic aims to study how to implement a highly integrated wearable intelligent sensing terminal and connect it to the system, as well as building it on a smaller hardware device with lower power consumption. This subject is a comprehensive system scheme design that emphasizes limited hardware size and lower power consumption. It needs to meet the following functions: real-time outdoor positioning, exercise status perception, heart rate monitoring, wireless communication capabilities at a distance of more than 100 meters, multi-point (≥ 30 points) high-frequency (more than 5 times signal transmissions per second) access capacity, and automatic power-on function. This involves a number of technical challenges, including: 1) designing a smaller-size hardware solution and communication protocol to achieve long-distance communication; 2) completing the identification of the motion state under the requirements of low cost and low power consumption; 3) Complete the low-power design of the system without shutting down the device, and realize low-power sleep and self-wakeup.

With the technical challenges of system, the main contributions of this thesis are as follows:

(1) Designing a low-power, high-channel utilization ratio IoT access solution . Each

华中科技大学硕士学位论文

access node (tag) adopts a periodic sleep mode, periodically wakes up and listens to the gateway beacon command, and periodically wakes up access in the specified time slot. The opening hours for node's radio frequency only accounts for 18% of the power-on working time for the whole system, and the average working current is less than 20mA;

(2) Proposing a low-complexity human jumping behavior recognition algorithm based on acceleration perception. By in-depth observation of the difference between the acceleration signals of jumping and running, a jumping behavior identification algorithm based on the length of time in the air is proposed, and the recognition accuracy of the algorithm is about 83%;

(3) Designing a hardware self-sleep and self-awakening scheme without user switch operation. Through low-power heart rate monitoring to determine the decision label, so as to complete the self-sleep and self-wake-up of the tag hardware under the premise of low power consumption;

(4) Complete realization of the entire wearable human motion monitoring system, including the hardware design and software development of wearable products, the hardware design and software development of the gateway and the development of the host computer system. Among them, the wearable hardware realizes multiple functions at the same time under the size of 6cm*3cm*1cm, including self-sleeping and self-waking up, GPS data collection, exercise posture monitoring, exercise speed collection, heart rate monitoring, communication distance up to 150m, The average working current is less than 20mA, and the packet loss rate is less than 8%. This wearable motion monitoring hardware stands for the highest level of integration among similar products on the market, reflecting the rationality and advancement of the overall design.

Keywords: wearable motion sensing access protocol low power consumption

目录

摘 要.....	I
Abstract	III
目录.....	V
1 绪论.....	1
1.1 选题背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 本文研究内容及结构	3
1.4 本章小结	4
2 相关技术背景.....	5
2.1 心率测量方法	5
2.2 运动姿态估计方法	6
2.3 无线通信技术	7
2.4 室外定位技术	9
2.5 本章小结	12
3 方案设计.....	13
3.1 方案论证	13
3.2 总体方案	17
3.3 硬件设计	18
3.4 软件设计	23
3.5 本章小结	33
4 算法设计.....	34
4.1 通信时隙和校时算法	34
4.2 时分复用算法	35
4.3 GPS 处理算法.....	37
4.4 跳跃行为辨识算法	40

华中科技大学硕士学位论文

4.5 本章小结	43
5 实验结果与分析.....	44
5.1 实验准备	44
5.2 系统性能测试	46
5.3 本章小结	52
6 总结与展望.....	53
6.1 论文总结	53
6.2 研究展望	54
致谢.....	55
参考文献.....	56

1 绪论

1.1 选题背景与意义

随着国家的倡导和师生对足球运动的重视，校园足球运动也^{[1][2]}逐步成为每个学校必不可缺的运动之一，甚至大多数中学、高校都有足球校队，专业的教练和集训场所。对于学校而言，校园足球运动的开展是素质教育提升的重要途径，对于运动员而言，通过参与足球运动能使他们学会如何参与公平竞争、如何培养团队默契等综合能力，这也是足球能成为世界第一运动的重要原因之一。现阶段学校对于校园足球的推广大多都是推广普及、大众参与、定向针对性培养等方式，所以在一些比较专业的足球运动训练过程中，教练员了解运动员的体征信息是至关重要的，这对于了解运动员的身体素质和健康状态有重要意义。

对于足球运动员来说，获取其体征数据的同时，体征数据的丰富度和实时性是非常关键的。例如对教练员而言，需要实时了解运动员的心率信息，避免出现过度劳累而危及生命的情况。需要实时了解运动员的速度信息，这样可以从侧面了解到运动员的爆发力和持久力等信息。需要实时了解运动员的位置信息，这样能够判断运动员站位和移动的正确性，以帮助教练员布置战术。需要实时了解运动员的跳跃信息，这对掌握运动员在比赛过程中的跳跃数据是有帮助的。可以说，体征数据越丰富，实时性越高，可参考借鉴的意义就越大。

上述提到的足球运动监测的需求，是当前业内众多公司研发产品的方向。就产品设计而言，现阶段越来越多运动监测产品朝向可穿戴式^[3]发展，足球运动监测产品也不例外。并且随着科学技术的不断创新和完善，在微电子、多媒体、嵌入式软硬件、无线通信、新型材料、电池等多个基础领域和应用领域的不断更新迭代下，可穿戴式设备得到了良好的发展和快速的普及。在这些技术的加持下，使得可穿戴式设备朝向低功耗化^{[4][5]}、小型化、舒适化、多功能化、持久化等特点发展。

然而，对于足球运动监测系统来说，要解决的问题是相对复杂的。首先它需要解决针对群体运动、较大活动范围的监测并且要保证数据的实时性，这就需要构建合适的无线通信系统来确保通信距离和可靠性。其次它需要设计较小的尺寸并能监测较多的体征数据，这需要合理的完成硬件选型和设计，最后为保证工作稳定、使用方便、避免频繁充电等问题，需要设计合理的低功耗方案，并达到自唤醒和自休眠的目的。

现阶段也慢慢出现了一些针对校园足球运动的监测系统的研究，并去得了一定的进展，也有一些产品逐渐落地，并且服务于足球运动团队。

1.2 国内外研究现状

近几年，虽然基于可穿戴式设备在足球运动领域的研究取得了长足的进展，并且国内外也有一些优秀的产品落地。但由于场景、需求、成本等因素，以至于这些落地的产品比较缺乏普适性，例如体征数据不丰富，场景架设难度大，产品成本过高等问题导致这些产品的应用受限。

在可穿戴式的基础上实现足球运动监测，需要解决的问题主要是：硬件设计尺寸、无线通信系统、体征数据采集。一言蔽之，需要用体积尽量小的硬件设备完成对多个运动员多种特征数据的采集，并将数据统一上传至上位机设备。

对于体征数据采集而言，其包括多种传感器采集数据，例如针对其定位传感器，当前业内的主流设计是采用 UWB（超宽带脉冲雷达）^{[6][7][8]}作为定位服务，这方面的代表产品如 iMYFIT 公司生产的团体体能训练监测方案。然而 UWB 设备虽然精度较高，但是成本太高，并且架设场景较为复杂，以及需要一系列预备的校准等工作，都为它在这个领域上的推广增加了难度。此外还有 adidas 研发的用于足球运动监测的智能球鞋和智能足球，但是它们在体征数据的监测方面还是有一定的局限性。

对于无线通信系统来说，当前存在的设计也大多是采用云服务器^[9]搭建局域网系统，例如 GenGee 公司推出的智慧校园足球解决方案。通过云服务器组网来实现多运动员数据的收集和同步。这种云服务器组网的处理方式增加了研发成本与运维成

本，并且数据上传和下行都引入了云端服务器，脱离了整个硬件系统，给使用和维护都引入了难度。

因此就现阶段而言，还是缺少一种能满足低成本、小尺度、高稳定性的足球运动监测设备。

1.3 本文研究内容及结构

本系统旨在设计一种基于可穿戴式的校园足球运动监测系统，其包括标签节点采集硬件设备、网关硬件设备、标签软件、网关软件、上位机显示服务。标签节点采集设备负责采集运动员心率、速度、跳跃、位置等实时体征数据，并将数据实时发送至网关设备，网关负责将数据离线存储或实时发送至上位机终端用于显示。整个研究内容包括：研究各类传感器模块的工作原理、研究 Tensilica 公司 Xtensa 核的 ESP8266 WiFi 处理器^{[10][11]}、研究基于 ST 公司 ARM 核的 STM32 处理器^{[12][13]}、研究基于 TI 公司 ARM 核的 CC1310 低功耗射频处理器^{[14][15]}。设计系统的整体方案并完成方案论证，在此基础上完成系统的硬件设计、系统的软件设计以及相应的算法设计，最后完成系统的实验测试，并分析系统性能。

综上所述，将划分本论文结构划分为 6 个章节，具体内容安排如下：

第一章是绪论，介绍选题背景与意义，分析国内外研究现状，给出本文对于该系统的研究方向，以及论文的结构安排。

第二章主要介绍相关的技术背景，例如心率测量方法、运动姿态估计方法、无线通信技术、室外定位技术，并分别讨论它们的优劣势与应用场景。

第三章是系统方案设计，详细阐述了整个系统的方案论证，并基于论证得到的方案提出系统的硬件设计和软件设计。

第四章是算法设计，详细阐述了整个系统设计的过程中，针对不同场景所设计的处理算法。

第五章是实验分析，在实现系统的软硬件服务后，通过实验来分析系统的性能稳

定性以及数据处理的精度。

第六章是全文总结，总结了本课题的研究内容以及研究成果，同时对今后该课题进一步的研究方向提出了建议。

1.4 本章小结

本章主要分析了现今校园足球运动普及的原因以及随之催生出的一系列需要用到的服务，并对这些服务的价值做了详细的介绍。同时也介绍了当前业内的一些基于可穿戴式足球运动监测设备及其设计方案，并指出了其中的一些痛点问题。最后提出我们对该系统的构想，并简要概括完成该系统所需要的研究内容，以及对论文总体的写作流程做一个简要的阐述。

2 相关技术背景

在基于可穿戴式的足球运动监测系统的整个工作过程中，重心一定是在数据层面，所有的功能都是为数据服务，这就包括数据的采集、发送、接收，以及数据的可视化等等。从数据角度来看，完整可靠的系统就包括从数据源中获取准确的数据、将获取到的数据做可靠的处理（包括编码）、再将处理好的数据用可靠的无线通信链路传送，发送到接收方，接收方再合理的使用数据（包括解码）并供给上层用户（上位机）显示或使用。数据源的准确性是指在通过合适的传感器获得原始数据后，通过优良的算法使之更为准确或更有利于编码表示，这一部分通常是取决于现今的一些数字传感器的性能和精度。数据处理是指通过制定一系列编解码协议包来对需要的数据进行有效的编解码表示或数据转换等等，而数据传输链路可靠是指通过合适可靠的无线传输协议来稳定的传输数据到接收方，接收方再将数据到上层用户 UI 界面。

在整个工作流上，我们所需的数据来源于运动员的各项体征，包括心率、运动姿态等身体指标数据，实时位置信息等 GPS 数据^[16]。在获取到数据后，我们还需要用到无线通信策略来传输数据。待接收方获取到数据后，再选择本地存储或上传显示。

这一章节将详细介绍当前主流的心率测量方法、运动姿态估计方法、无线通信技术、定位跟踪技术，并进一步分析每个技术中的方案对本课题的优劣势，为后续章节提供了可靠的技术支持。

2.1 心率测量方法

心率信息^[17]是运动员体征数据中比较基础的一项信息，可以说在任何运动监测设备上，都会有心率指标。当前心率测量的主流方式大多分为光电信号测量、动脉血压测量和心电信号测量，下面分别介绍其测量原理与使用场景。

2.1.1 光电信号测量法

光电式的测量方法主要是根据人体血管的吸光度来测量心率。以使用绿光光电

测量法的设备为例,一般主要由两个绿色波长的发光 LED 以及一个光敏传感器组成。因为手臂血管中的血液在脉动时会发生密度改变,这种现象会引起透光率的变化。当 LED 发出绿色波长的光波被手臂反射时,光敏传感器就可以接收到反射光,并感测光场强度的变化,再基于此变化换算成心率。这种方法比较方便,不需要用户采用胸带佩戴方式,但是易受外界影响,需要在比较安静的状态下测量,不太稳定,比较适用于对心率测量不严格的场景,较多用于可穿戴式手表等设备。

2.1.2 动脉血压测量法

动脉血压测量方法是基于心脏跳动时,在手腕或者颈部可以通过皮肤感受到动脉的压力有规律性变化的原理,采用压力传感器将这个压力信号转换成心率。这种方案在针对运动的可穿戴式产品上普及度较低,原因是压力传感器需要长时间佩戴,这会给穿戴者造成不适感,并且传感器很难以合适的方式固定在皮肤表面。医疗场景使用较多,但在运动场景基本不会采用这种方法去测量心率。

2.1.3 心电信号测量法

心电信号测量法是基于人体每次心跳都会产生心动电流的原理。由于人体神经信号都表现为电信号,并且每次心跳产生的电流都会扩散到体表,那么就可以在胸前皮肤通过电极测量心率。这种方法干扰性小,并且数据准确。一般医院的心电仪和日常使用的心率带就是采用这个原理。

2.2 运动姿态估计方法

在足球运动阶段,收集运动员在场上的跳跃信息是比较重要的,跳跃信息能反映出运动员的身体素质。当前主流的运动姿态^[18]的估计方法主要有基于视觉的方法以及基于惯导传感器的方法,下面分别介绍。

2.2.1 基于视觉的姿态估计

基于视觉的姿态估计^[19]是当前用来处理姿态估计的主流方式。前期通过大量的

姿态数据和关键点作为训练标签，训练出一个能判别姿态模型的，再把训练出来的模型用来检测运动员的实时姿态，从而判断跳跃信息。例如当前针对姿态检测网络 HRNet^[20]，在一些公开数据集（COCO^[21]等）上就有比较好的效果。这种方式精确度高，实时性尚可，但是场景复杂，成本开销大。需要在运动场上布置多角度的摄像头，可行性较低。

2.2.2 基于惯导传感器的姿态估计

基于惯导传感器^[22]的姿态估计是传统领域中比较常见的处理方法，惯导传感器可以得到三轴加速度信息，根据三轴加速度信息，即可判定传感器感应位置的受力情况。实际使用过程中，可以通过分析传感器数据和运动员的实际运动情况，设计相应的算法进行处理。例如基于加速度脉冲阈值的跳跃行为辨识处理方法等等。

2.3 无线通信技术

在足球运动监测系统中，要进行群体运动监测，就必然要获得每个运动员的实时运动数据，这些数据只能通过无线的方式进行传输。当前主流的无线通信方式主要存在通信距离、通信速率、通信功耗等区别，下面分别介绍。

2.3.1 Zig-Bee

Zig-Bee^[23]是基于 IEEE802.15.4 标准建立的通信技术，遵循 ZigBee 协议栈。其特点是功耗低，时延短，但是通信速率和数据吞吐量都比较低，工作频段有 2.4GHz 以及低于 1GHz 的频段。常用工作速率在 20-250kbps 之间，工作频段在较低带宽区间。

2.3.2 Bluetooth

蓝牙^[24]是基于 IEEE802.15.1 标准建立的通信技术，遵循 BLE 协议栈。其特点是工作频段高，通常工作在 2.4GHz~2.485GHz 之间。通信速率快，近距离稳定通信时，最新的蓝牙协议能达到 2MB/s 以上。能够在百米范围内实现较为稳定的数据传输，

多用于 PC、打印机、耳机、数码设备等等。但其抗干扰能力较差，并且一些蓝牙芯片价格较昂贵。如图 2-1 所示，是 TI 公司生产的一款蓝牙模块。

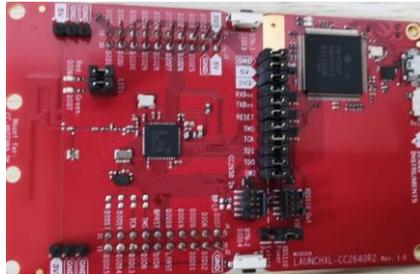


图 2-1 蓝牙模块

2.3.3 Wi-Fi

Wi-Fi^[25]是基于 IEEE802.11 标准建立的通信技术，遵循 Wi-Fi 协议栈。其特点是传输速率快，可达 54Mbps(802.11.a)，覆盖范围较广。在 AP 模式下支持多 STA 接入，适合小范围内的高速通信，但不适合应用于一些长距离通信的场景。如图 2-2 所示，是一款 ESP8266 Wi-Fi 模块。



图 2-2 ESP8266 Wi-Fi 模块

2.3.4 UWB

UWB 是一种无线载波通信技术。其特点是不采用正弦载波，而是利用非正弦波窄脉冲来传输数据。其特点是数据传输快，工作频段和频宽范围广，所以能达到上百兆的通信速率。但 UWB 传输距离有限，通常工作范围在百米内，并且成本较高，架设场景复杂，不太适合通用的可穿戴式产品使用。如图 2-3 所示，是研创物联研发的一款 UWB 模块。



图 2-3 UWB 模块

2.3.5 低功耗射频

低功耗射频^{[26][27]}是一种工作在较低频段的无线通信方式，因其频段低，功耗低而著名。近几年，以 TI 公司为例，生产了一系列基于 IEEE802.15.4g 标准的 Sub-1GHz 通信芯片，这些芯片遵循 TI 15.4^{[28][29]}协议。TI15.4 协议是一个具有比较完备的底层服务应用协议，其目标就是朝着低功耗、远距离、高稳定性发展，比较适合用于一些可穿戴式设备。

2.4 室外定位技术

在足球运动监测系统中，要对每个运动员的实时位置进行监测，这有利于教练员实时了解运动员的位移和站位，也方便后期复盘时的战术布置。而对运动员位置的实时监测就需要用到定位跟踪技术。

当前主流的室外定位方法主要是基于全球卫星导航系统 (GNSS) 而实现的定位。GNSS 分别是指我国的 BDS、美国的 GPS、欧盟的 GALILEO、俄罗斯的 GLONASS。其定位方式都是通过接收卫星以无线电波形式发送的数据报文并进行解算，从而得出接收方的地理位置。如图 2-4 所示，是 u-Blox 公司生产的一款 GPS^[30]接收模块。GPS 的定位方式主要分为单点定位和差分定位。

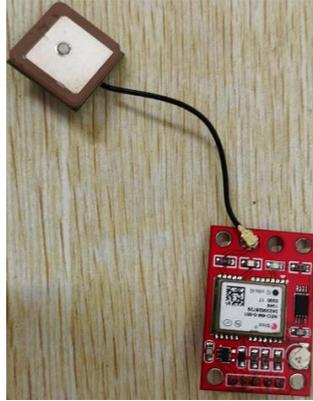


图 2-4 GPS 接收模块

2.4.1 单点定位

在单 GPS 接收器的情况下，理论上能接收到三个卫星的数据包即可实现地理位置的定位，但一般为实现较高精度的定位，需要收到四个卫星的数据包，如图 2-5 所示。这是因为无线电波的传输速度接近光速，并且一般的 GPS 接收器不存在铯原子钟，所以 GPS 定位精度的误差会受时间误差的影响而放大，所以这时就需要再加一个卫星来校正误差。对于 GPS 接收器而言，能接收到的卫星数量越多，定位的精度就越高。一般来说，若能稳定接收到八颗卫星的数据，定位精度就能达到接收器的定位精度标准。四星定位的基本原理如下。

根据某卫星星历，能解算出其地心坐标 (x_s, y_s, z_s) ，设接收机所在的坐标为 (x_u, y_u, z_u) ，考虑到其它的误差项，则卫星到接收机的伪距为 P 可表示为：

$$P = p + c \times dt + \Delta t_{rop} + \Delta i_{on} + \epsilon \quad (2-1)$$

p 就是接收机和卫星间的理论距离：

$$p = \sqrt{(x_s - x_u)^2 + (y_s - y_u)^2 + (z_s - z_u)^2} \quad (2-2)$$

在式 (2-1) 中， c 为光速， dt 是卫星和接收机的时钟误差， t_{rop} 为对流层产生的延迟， i_{on} 是电离层产生的延迟， ϵ 是伪距噪声，这些都是已知量。式中共有四个未知量： x_u, y_u, z_u, dt ，所以至少需要四个方程进行求解。

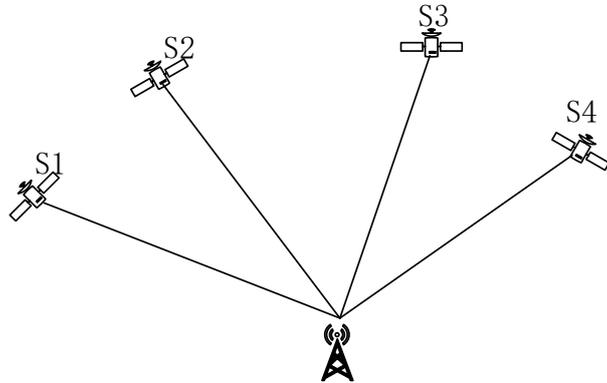


图 2-5 单点 GPS 定位示意图

2.4.2 差分定位

就 GPS 定位而言，现阶段定位精度最高的是差分定位。相对于单点定位，实现差分定位需要加入一个已知位置的 GPS 基准站，如图 2-6 所示。GPS 精准站实时记录 GPS 的定位信息，通过与已知的位置信息做对比处理得到修正量，并将修正量运用到测区 GPS 接收器上，从而得到更精准的测量值。根据 GPS 基准站发送给测区 GPS 接收器的差分信息的不同，可将差分定位技术分为位置差分技术、伪距差分技术、载波相位差分技术等。

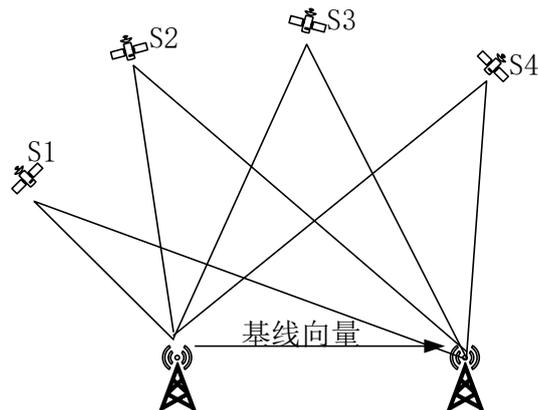


图 2-6 差分 GPS 定位示意图

2.5 本章小结

本章主要是对该系统所需要的技术背景做充分的调研，其包括调研心率测量方法、运动姿态估计方法、无线通信技术、定位跟踪技术，为接下来系统方案的论证与设计提供了比较全面的参考。

3 方案设计

本章节主要完成整个系统的方案论证，并基于论证得到的结论来完成整个系统的设计，包括：结合通信距离和数据量的需求设计合适的无线通信方案，结合实际定位需求选择合适的定位方案，结合低功耗和自唤醒休眠的需求设计合适的方案，结合对运动姿态的辨识需求选择一定的姿态信息采集方案，并在此基础上完成标签与网关硬件的制作，完成标签节点、网关与上位机的软件程序的设计。下面详细介绍整个系统的方案。

3.1 方案论证

对于该系统，我们需要考虑的因素有网关和标签之间的通信方案，标签的定位方案，低功耗和自唤醒休眠方案（包括心率采集），运动姿态的检测与判断方案。这使得在有限的硬件尺寸下需要完成多项挑战，包括：1) 远距离通信的低频段要求与下位机之间通信的高数据流量构成矛盾；2) GPS 定位的精度需求与 GPS 天线尺寸和增益构成矛盾；3) 免用户开关设计与低功耗节点控制构成矛盾；4) 运动状态感知计算和低功耗成本设计构成矛盾。下面分别介绍应对这些挑战的方案分析与选择。

3.1.1 网关和标签的通信方案

为保证网关和标签的通信满足实际需求，我们需要考虑其通信距离、通信频率以及通信过程中产生的数据量。

(1) 通信距离

现阶段标准足球场的尺寸大约长 105m，宽 68m，而我们设计整个系统时，为了避免使用的局限性，应该把通信距离标准设定在 150m 以上。

(2) 通信频率

结合运动员的实际运动情况，以 1Hz 的频率采集心率信息，5Hz 的频率采集运动员的位置信

息、200Hz 的频率采集运动状态信息并处理，最后以 1Hz 的频率上传运动员的运动体征信息，这一系列的处理频率是足以完整的描述运动员体征信息的。

(3) 通信数据量

采用合适的编码策略能提升编码效率，我们在保证数据包信息充分的情况下，将一个标签发送的一个数据包控制在 44 个字节。我们设定在一秒的时间内，采集 5 组速度信息、5 组 GPS 经纬度信息、1 组心率信息、1 组跳高次数和跳高距离信息以及时间戳等信息。在编码的过程中，我们采用差分编码的策略，例如在一秒的时间内，采集 5 组 GPS 的经纬度信息，而一组经纬度信息需要 8 个字节来表示，那么 5 组需要 40 个字节。如若我们采用“参考经纬度+差分经纬度”的方式来编码 5 组 GPS 经纬度信息，即每个数据包除了参考经纬度使用 8 字节编码，其余 4 组 GPS 经纬度信息采用参考经纬度的差值信息来存储，这样对于每组差分信息，只需要 2 个字节即可表示，一共只需 16 个字节即可表示 5 组 GPS 的经纬度信息。

综合以上 3 个因素，我们需要在通信距离和通信的数据量上做一个折中。对于主流的无线通信方案而言，频率越高，带宽越大，通信速率越快，也更易受到人体干扰。我们的系统对于通信速率没有特别高的要求，所以我们应该选择一种通信距离长且稳定，不易受人体干扰方案，因此我们选择 CC1310 作为我们处理无线通信的 MCU。CC1310 是 TI 生产的基于 Sub-1GHz 的低功耗协议特性的无线通信芯片，我们选其工作在 433MHz 左右的频段能达到我们在通信方面的需求。

3.1.2 标签节点的定位方案

为保证运动员在运动过程中的实时位置能在上位机进行显示，就需要对其做实时定位处理，当前主流的室外定位方式就是 GPS 定位，少数情况下会用到 UWB 等方式。

(1) UWB 定位

UWB 一般是用在室内定位，在某些情况也将其用在室外场景，但本质还是用室内定位的方式解决室外场景下固定范围内的定位需求。UWB 定位技术虽然精度高，

但是对设备和架设成本都有一定的要求，不太符合我们系统的解决方案。

(2) GPS 定位

GPS 定位又分单点 GPS 定位和差分 GPS 定位。在正常情况下对于一个 GPS 接收器，获取四个以上数量的卫星数据即可实现较高精度的定位。而差分 GPS 定位则是为解决 GPS 接收机共有误差而提出的方法，它需要在已经位置上架设一个 GPS 基站，这也提升了系统的复杂度。

综上所述，我们采用 NEO-M8N 这款 GPS 接收器来做高精度的单点 GPS 定位。NEO-M8N 体积小，能接受多个 GPS 卫星数据。正如前面所说，GPS 接收器能接收到的卫星数量越多，定位精度越高，而天线的性能会直接影响接收器接收卫星的数量。图 3-1 是几款我们在使用 NEO-M8N 过程中测试的一些有源天线和无源天线，结合尺寸和性能考虑，最终选择图 3-1 (c) 作为我们的 GPS 天线。经我们测试，在信号比较稳定的场景下，输出的 GPS 精度能控制在 2m 之内（采用 L1 距离度量）。

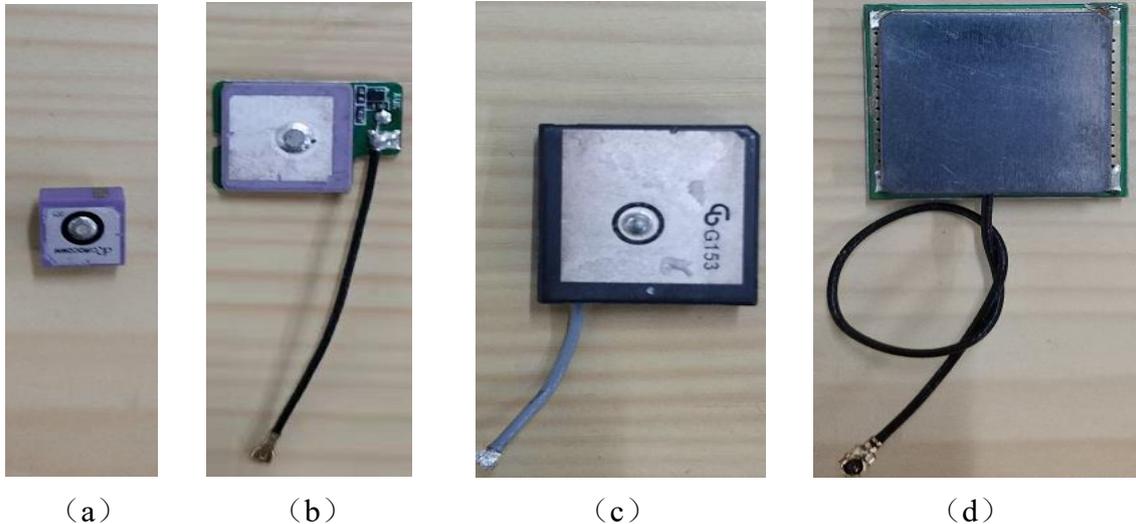


图 3-1 测试过程中的天线类别

3.1.3 低功耗和自休眠自唤醒方案

在穿戴式产品中，低功耗是保证系统能长时间工作的保障。然而产品的设计需要充分为用户考虑，尽量降低使用门槛。在我们的系统中，实现了免用户开关的低功耗设计和自休眠自唤醒设计，具体如下。

在标签上电后，默认进入休眠状态，此时除了心率传感器正常工作外，射频不工作，惯导、GPS 等传感器不导通（MOS 管作为开关），这时系统进入休眠状态，功耗低于 1mA。当检测到心率时，完成自动唤醒，此时 GPS 和惯导传感器开始工作，并根据网关的广播和时隙来回切换标签 CC1310 的射频开关，以此来降低系统功耗。在正常工作的情况下，标签平均工作电流小于 20mA。

我们采用 BMD101^[31]心率传感器来处理。它能保证我们在休眠状态下，以小于 1mA 电流功耗运行。在检测到运动员心率后再唤醒标签，进入工作模式。在发现长时间丢失心率后，自动进休眠模式。在免用户拨动开关的前提下，实现低功耗自休眠和自唤醒。

3.1.4 运动姿态的判断方案

在系统的实际应用中，能够对运动员的姿态进行判断是一个比较重要的功能。因为运动姿态的体征数据是判定足球运动员体能的最直观表现，这就包括运动员的奔跑的速度以及跳跃次数和高度等信息。

例如对于足球运动员而言，大部分时间都在奔跑，偶尔会有跳跃行为，所以我们就需要对其运动速度和跳跃行为进行判定。

（1）运动速度的判定

运动速度可以随着 GPS 的报文一起输出，经过对其进行方位角处理后，可以直接转换为我们需要的平面坐标速度，NEO-M8N 在一般情况下可以将速率精度控制在 0.5m/s 左右。

（2）跳跃信息的判定

跳跃信息分为跳跃次数和跳跃高度，我们标签在唤醒后，会对跳跃的次数进行累加计数，并实时反馈运动员累计的跳跃次数和当前时间区间内运动员的跳跃高度信息。对于奔跑和跳跃这两种运动姿态的判别，我们可以采用“加速度检测+滞空时间估计”的策略实现。加速度的采集我们可以选择成本较低的 MPU6050^[32]来完成，结合一定的算法处理，就能辨识运动员的运动姿态。一般来说，在 1 秒左右的时间内，

足球运动员最多也只能完成一次跳跃行为。再结合运动员跳跃时理论加速度范围，可配置 MPU6050 工作在较高精度的状态。

3.2 总体方案

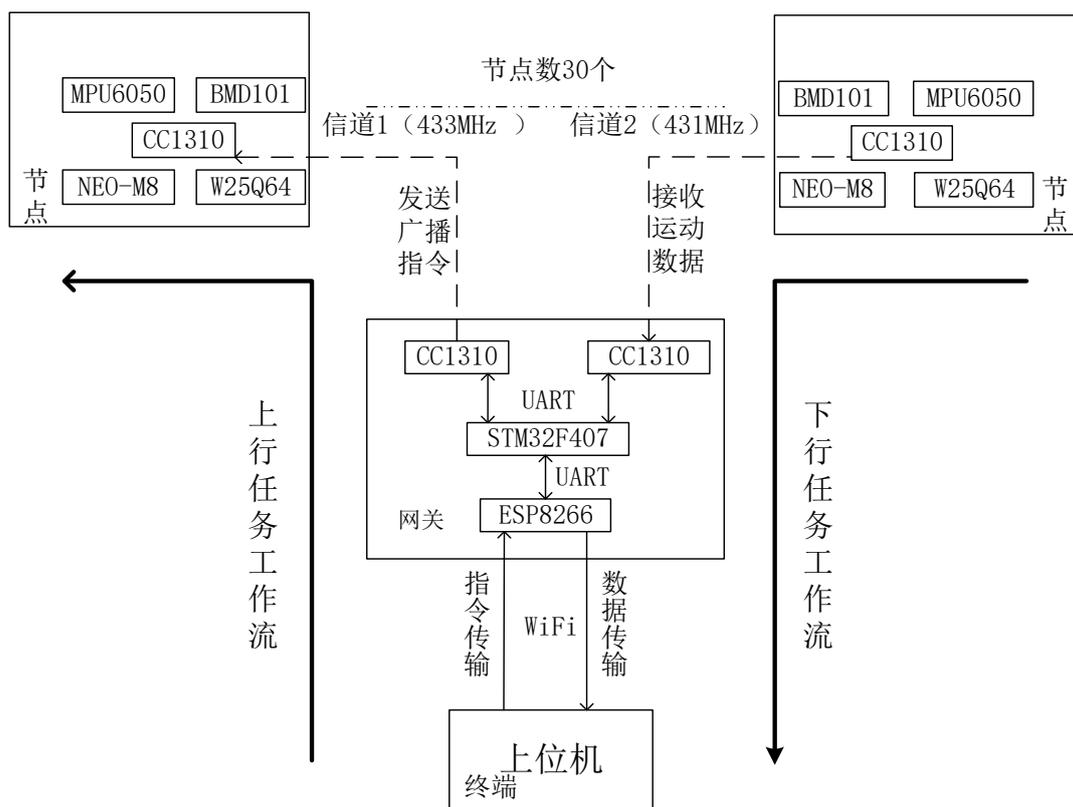


图 3-2 系统总体方案示意图

该系统总体方案简图如图 3-2 所示，每个标签节点由 CC1310 作为主 MCU，负责和周围 FLASH 模块(W25Q64)、GPS 模块(NEO-M8N)、陀螺仪模块(MPU6050)通信，目的是通过传感器采集运动员的运动信息，并和网关的两个 CC1310 做收发通信。网关是主节点，由 STM32F407 作为主控单元，除了其基础电路外，还连接两块负责和标签节点做收发通信的 CC1310 芯片，连接一个负责和终端上位机通信的 ESP8266 模块。ESP8266 模块主要负责网关和终端上位机之间的数据收发以及指令传输。每个 MCU 维护自身状态机，所有事件的触发由任务指令驱动。

系统的简要工作流程大致分为下行任务 workflow 和上行任务 workflow，如图 3-2 所

示。上行任务 workflow: 终端通过 Wi-Fi 发送指令到网关的 ESP8266, 网关 ESP8266 解析命令通过 UART 串口发送到网关 STM32, 网关 STM32 重构指令操作并发送到负责发送任务的网关 CC1310, 网关 CC1310 再将指令广播到各个标签节点。下行任务 workflow: 标签节点收到来自网关的广播指令后触发相应事件, 并把结果统一上报到网关负责接收数据的 CC1310, 网关 CC1310 再通过串口返回至网关 STM32, 网关 STM32 再将数据通过 UART 发送给 ESP8266, ESP8266 做一定处理后将数据传回终端上位机进行显示。

3.3 硬件设计

系统硬件设计的过程包括硬件芯片的选型以及原理图和 PCB 的绘制, 下面分别介绍。

3.3.1 关键芯片介绍

STM32F407 是意法半导体推出的一款主控 MCU, 采用自带浮点运算功能的 Cortex™-M4 内核, 具有高达 168MHz 的工作频率, 根据其小型号的不同, 具有 100~176 个 GPIO 口不等, 集成了 512KB FLASH 和 192KB SRAM, 比较适合应用于功能复杂并且有一定体量的可穿戴式系统。

CC1310 是 TI 公司近几年推出的超低功耗、低频 (Sub-1GHz) 的无线 MCU 芯片, 采用 Cortex™-M3 作为内核处理器, 48MHz 的工作频率, GPIO 口数量较多, 硬件层面支持多种通信协议 (I2C, I2S, UART)。宽电源电压 (1.8V~3.8V) 满足低功耗需求, 并且低功耗射频 (RF) 具有出色灵敏度、可选择性、阻断性能的特点, 输出功率可编程, 比较功能需求多样但体积轻量的可穿戴式系统。

ESP8266 是上海乐鑫信息科技有限公司推出的一款低功耗, 高集成度的 Wi-Fi MCU, 内置超低功耗 Tensilica L106 32 位 RISC 处理器, 具有丰富的 SDK, 能运行 RTOS。其工作频率最高可达到 160MHz, 专为轻量级移动设备、可穿戴电子产品设计, 比较适用于功能专一体积轻量的可穿戴式系统。

W25Q64 是具有 64Mb 存储容量的 FLASH 芯片，支持 SPI 协议存取，写入、擦除操作方便。工作电压低体积小，比较适合处理数据流量不大的离线存储需求。

NEO-M8N 是具有并行全球卫星导航系统（GNSS）功能的模块，支持 BeiDou、GPS、GLONASS、Galileo 导航系统，数据格式读取简单，GPS 定位和运动速率采集精度都比较高。

MPU6050 是 InvenSense 公司生产的一款能同时检测三轴加速度、三轴角速度的数据芯片，内置 DMP 模块（Digital Motion Processor, DMP），可对内置传感器数据进行滤波、融合处理，其姿态解算频率最高可达 200Hz，比较适合用于对姿态控制实时要求较高的领域。常见应用于智能手环、四轴飞行器、计步器等可穿戴式设备中。

3.3.2 原理图和 PCB 设计流程

该系统需要对网关 PCB 和标签 PCB 进行相应的设计，其设计流程和注意事项大多相似，均采用多层板电路设计，设计软件采用 Altium Designer14^{[33][34][35]}，整体流程分为如下步骤：

画出网关和标签设计简图；

1) 根据硬件器件的 datasheet，使用 Altium Designer 来为每个 component 设计相应的原理图和封装库；

2) 为网关和标签画出相应的原理图；

3) 为网关和标签的原理图添加相应的封装；

4) 根据网关和标签的原理图，生成相应的 PCB；

5) 完成 PCB 图中 component 的布局以及手动连线；

6) 检查 PCB 图中电气连接的完备性，并完成 DRC^[36]（Design rules checking, DRC）检查；

7) 送入工厂并完成器件贴片等操作。

以上便是网关和标签硬件电路设计的整体流程，然而实际设计远比此描述复杂，对于一些步骤需反复推敲测试。由于网关是放置在比较固定的位置，硬件面积可以相

对较大，所以对于网关采用的是双层板设计。而标签是需要佩戴在运动员身上，所以面积不宜过大，因此对于标签采用四层板设计。

在整个硬件的设计细节中，需要格外注意的是，RF 天线电路的设计与板层布局布线的设计：

(1) RF 天线电路的设计

如图 3-3 所示，是典型的天线收发电路示意图，可见一个天线的电路结构分为：TX/RX（发射机/接收机）、MN（匹配网络）、TL（传输线）以及天线。从 TX 处发送的能量越大，在其它因素限定的条件下，能使得传输距离越远。而 RF 的天线选型、布局和匹配网络的设计是直接影响传输功率的重要因素，也是影响传输距离的根本因素。由于要考虑到标签大小和成本因素，所以采用长度为波长四分之一的天线放置于标签的出口处，使得它具有较广的辐射范围和较好的辐射能力。

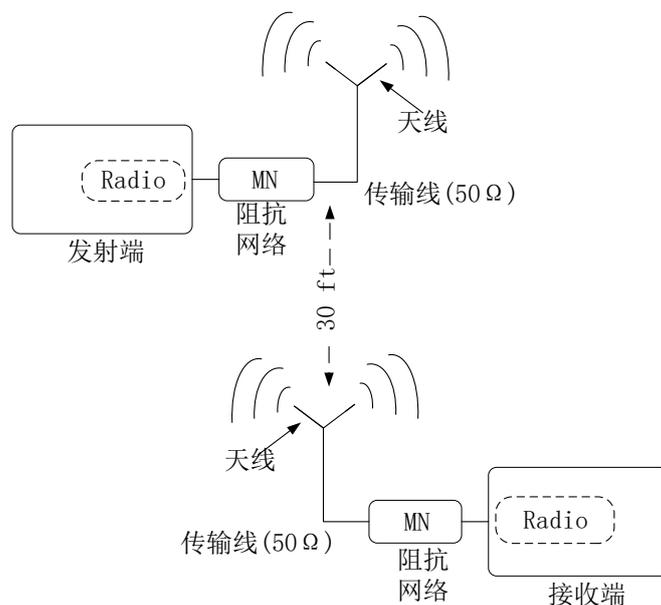


图 3-3 典型天线收发电路示意图

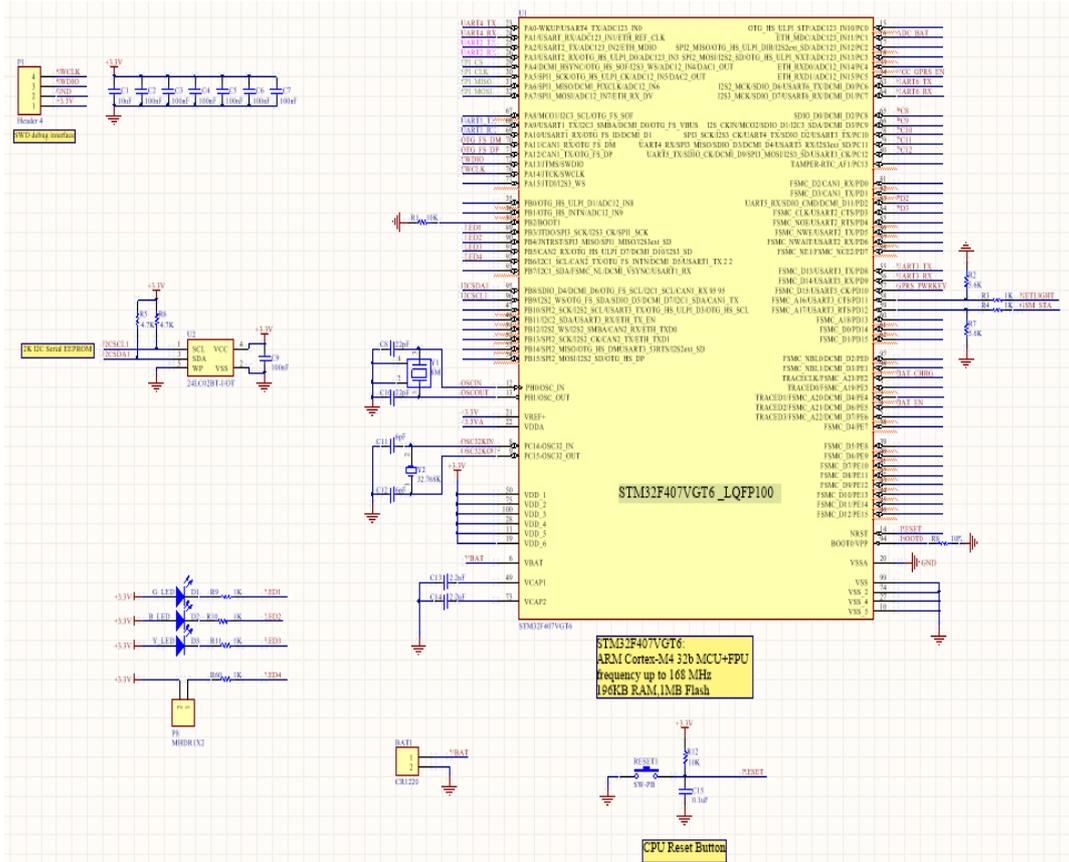
(2) 板层布局布线的设计

在设计标签硬件时，因为是四层板设计，所以用中间两层专门作为电源层（VCC）和地线层（GND），尽量减小电源线和地线的电感，从而减少相应的噪声电压。最外层走信号线，这样能直接看到走线，出了问题方便分析电路。同时因为两层信号线中

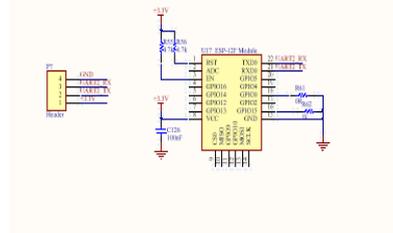
华中科技大学硕士学位论文

间有 VCC 和 GND，所以不需要刻意走平行信号线来缓解信号串扰的问题，方便电路布局。

设计完原理图和 PCB 后，在我们的系统中，网关的主要原理图和整体 PCB 分别如图 3-4 (a) - (b) 和图 3-5 所示。



(a) STM32 模块



(b) Wi-Fi 模块

图 3-4 网关原理图 (部分)

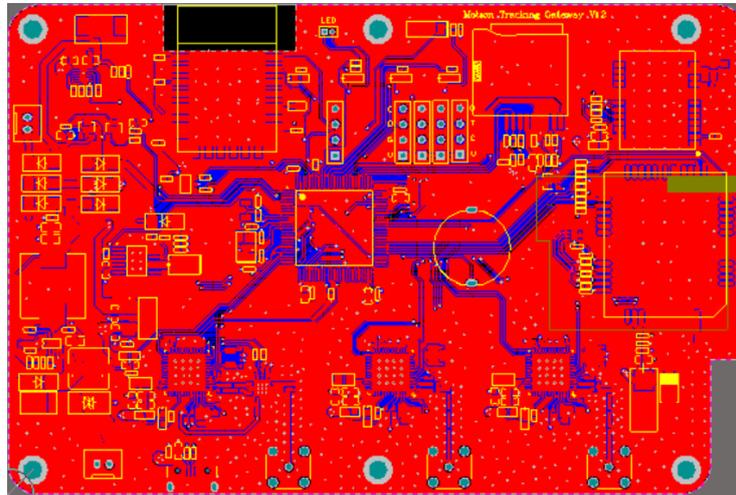


图 3-5 网关 PCB 图

标签节点的主要原理图和整体 PCB 分别如图 3-6 和图 3-7 所示。

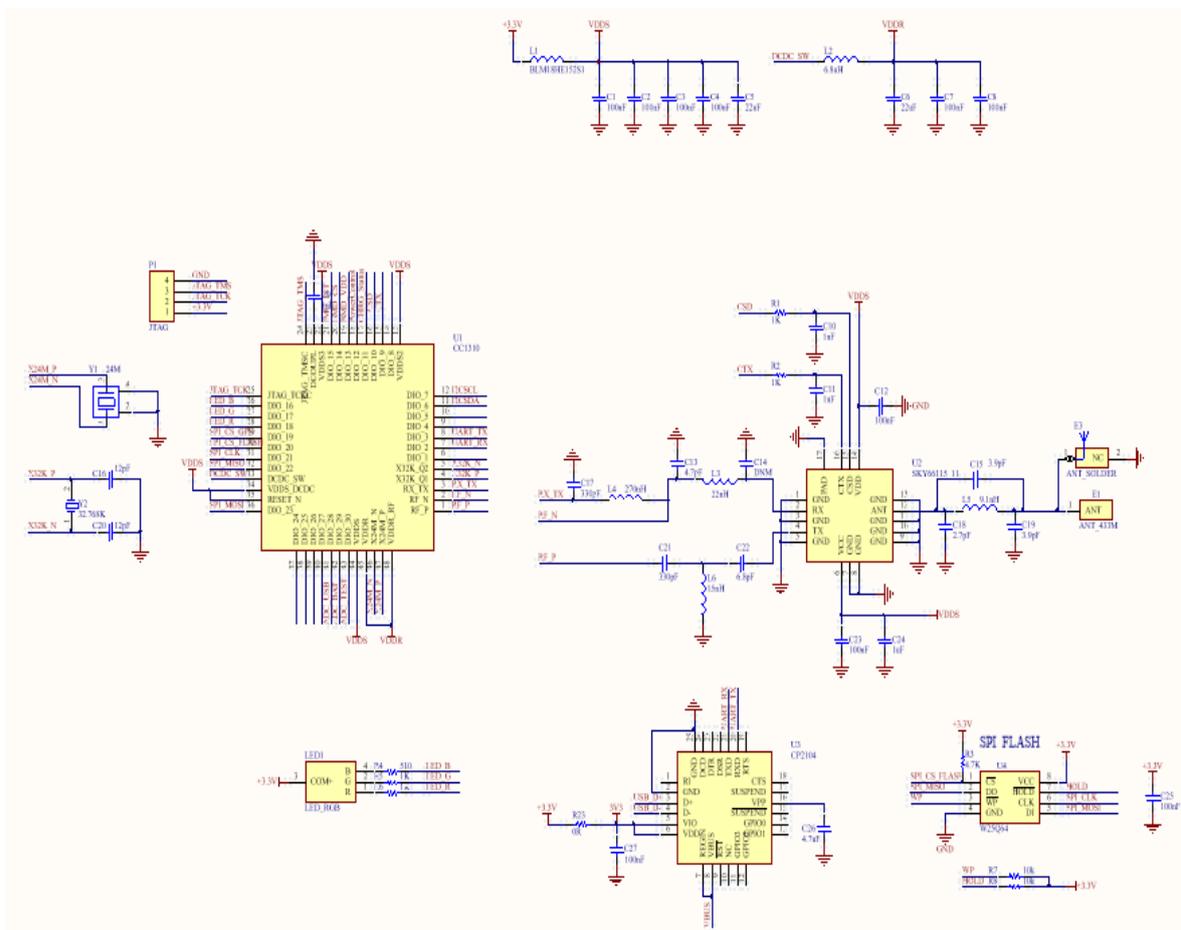


图 3-6 标签原理图（部分）

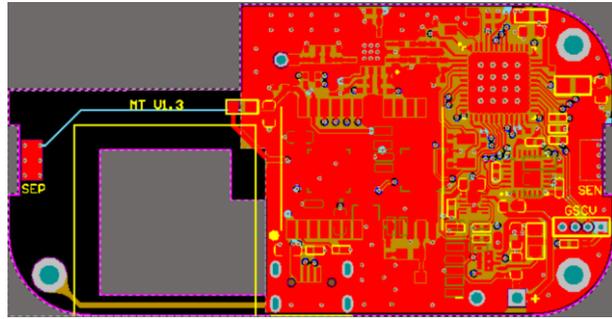


图 3-7 标签 PCB 图

最后生产并贴片后的网关和标签的实物图分别如图 3-8 和图 3-9 所示。

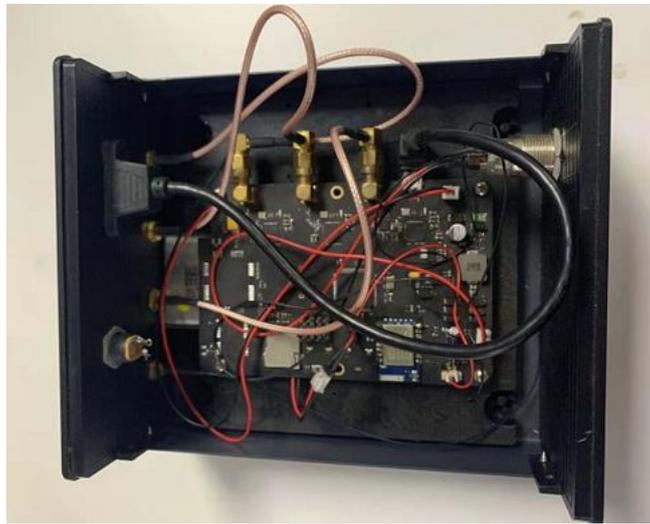


图 3-8 网关实物图



图 3-9 标签实物图

3.4 软件设计

系统软件设计包括了解系统开发过程中软件工具、标签节点软件设计、网关节点软件设计、终端显示软件设计以及相应的通信数据包协议设计，下面分别介绍。

3.4.1 软件工具介绍

从软件设计层面，需要为系统的 MCU 找到适合的开发工具链，完成该系统所需的软件工具主要 Virtual Box5.2、Altium Designer14、Keil、IAR、Ubuntu、Docker、xtensa-lx106-elf-gcc 等。我们的系统在 Windows 下开发 STM32 与 CC1310，在 Ubuntu 的 Docker 镜像下开发 ESP8266，下面简单介绍用到的各个软件工具。

1) Ubuntu 是具有桌面化功能的 Linux 系统，因其基于 Linux 系统而又有友好的桌面可视化环境而著名，广泛用于众多嵌入式开发环境。

2) Docker^{[37][38]}是一个应用容器引擎。开发者可以使用 Docker 打包软件以及其依赖库到容器中，进而发布到 Linux 机器上。相对于虚拟机套件而言，docker 容器的开销很低，并且能有效的保证生产与开发环境的统一，提高开发、调测与发布效率。由于在 Docker 对 Linux 的支持更友好，所以对于 ESP8266 的开发，我们首先用 Dockerfile 打包好 xtensa-lx-106 交叉编译工具链与 esptool 下载环境的镜像，再运行 Docker 镜像来编译 ESP8266 工程。

3) Virtual Box 是一款虚拟机套装，允许用户同时创建和运行多台虚拟机，因其开源、小巧、提供虚拟化解决方案而广泛用于众多开发环境中。我们系统前期开发时候采用的是 Virtual Box 作为 ESP8266 的开发环境，后期为了方便考虑，把整个 ESP8266 的开发工具链迁移到 Docker 镜像中。

4) Keil 是一款 C 语言软件开发系统。提供了编译、汇编、链接等一系列服务，并具备优秀的库管理和 Debug 方案。本系统中我们使用 Keil 来发开 STM32。

5) Xtensa-lx106-elf-gcc 是 Xtensa 架构下的 gcc 编译工具，由于 ESP8266 的核心处理单元就是 Xtensa 架构，所以采用 Xtensa-lx106-elf-gcc 编译 ESP8266 工程。在本系统中，该工具链也已经打包在 Docker 镜像中。

6) IAR 全程 IAR Embedded Workbench，是一款集成 C/C++编译调试器的 IDE，支持多种架构，如 ARM、RISC-V、NXP。在该系统中，我们使用 IAR 来开发 CC1310。

3.4.2 标签软件设计

标签节点的功能是监测来自网关的指令，并根据指令进行相应的事件，如有需要再讲事件结果返回到网关。主要是发送注册请求和采集运动员运动状态信息至网关。其具体的事件如下：

- 1) 上电后，默认为“上电休眠状态”，等待心率触发；
- 2) 心率触发后，状态改为“初始待命状态”，同时信道 1 监听网关的周期性指令信息；
- 3) 当信道 1 监听到网关发送的“在线读取”或“离线读取”的指令包并校验通过后，会从此指令包中查看自身的标签 ID 是否已在网关注册过以及分配过时隙。若已注册，则重启 Timer，并在相应的时隙发送从传感器采集到的数据包至网关；若未注册，则从信道 2 上发送 ID 的注册请求，注册成功后，在下次监听到网关发送的“在线读取”指令包后，再将采集的数据发送到网关。数据采集只保留最近一次的数据。若未校验通过，则丢弃，等待后续的命令包；
- 4) 在通信过程中，若超过五个周期未接收到网关的包，则修改状态到“初始待命状态”，并监听信道 1；
- 5) 当信道 1 监听到网关发送的“停止读取”指令包后，状态改成“停止读取状态”，返回网关应答包（和数据包相同，但是包类型不一），进入低功耗模式，若重新上电唤醒，重复事件 1-3；

标签节点程序基于 FreeRTOS^{[39][40]} 并采用 FSM^{[41][42]} (Finite State Machine) 的调度方式来完成逻辑程控。标签节点有多种工作状态，正常情况下，整个状态机调度都是由标签收到网关的指令来驱动，这样既能保持通信状态完整，又能起到时隙校准，分时间片处理的目的，避免所有标签同一时刻向网关发送数据造成通信拥塞或者丢包。同时为避免长期无应答而造成功耗等问题，标签也会主动触发相应的机制来修改自身状态作为兜底策略。标签节点具体的状态机转移图如图 3-10 所示。

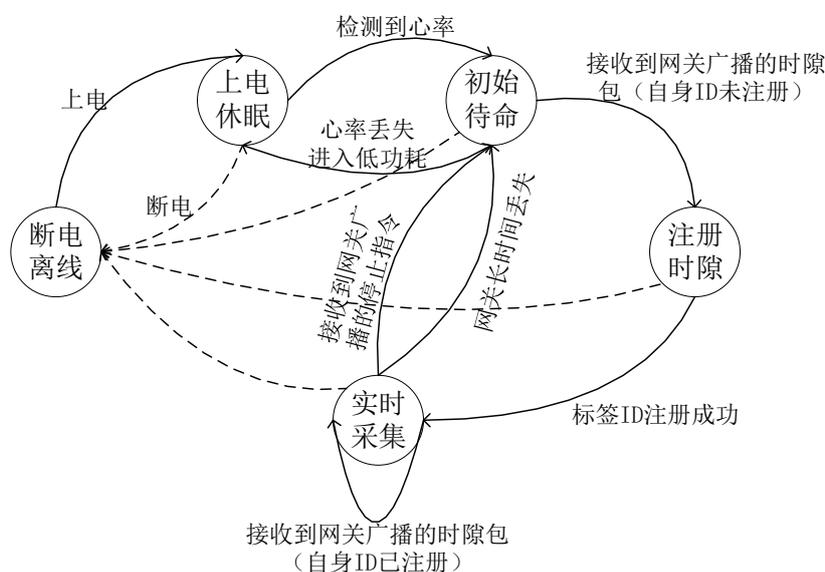


图 3-10 标签状态机转移图

3.4.3 网关软件设计

网关的功能是监测来自终端的命令（网关 ESP8266 负责）并做出相应的决策（网关 STM32 负责），再通过负责发送任务的网关 CC1310 将命令广播。负责接收任务的网关 CC1310 负责监听来自标签节点的数据，并返回给网关 STM32，网关 STM32 再将数据发送至网关 ESP8266 进行处理，随后发送至终端。网关有 2 个信道，分别负责收发，其具体的事件如下：

- 1) 上电初始化完成后，网关 ESP8266 作为 AP 监听端口，获取来自上位机的命令；
- 2) 若网关 ESP8266 接收到来自上位机的“在线读取”、“离线存储”命令，则网关 CC1310 在信道 1 上周期性广播“在线读取”、“离线存储”指令包；
- 3) 网关 CC1310 在信道 1 广播指令的同时，网关 CC1310 在信道 2 上监听来自标签的注册请求包，将其 ID 追加到已注册 ID 中，并分配时隙（分配的时隙间隔为 30ms），未注册的 ID 在广播包中以字节 0xFF 补充；
- 4) 负责发送任务的网关 CC1310 周期性广播指令包，同时负责接收任务的网关 CC1310 接收来自标签的数据包；

5) 负责接收任务的网关 CC1310 将接收到的数据包通过 UART 发送至网关 STM32, 网关 STM32 负责对数据做一系列处理(校验、过滤、去重等等)。若是“在线读取”指令驱动的, 则将处理后的数据包发送到网关 ESP8266, 若是“离线存储”指令驱动的, 则将处理后的数据包存储在网关的 FLASH;

6) 网关 ESP8266 将数据处理后发送至上位机, 以供显示。重复事件 2-6;

7) 若网关 ESP8266 接收来自上位机的“离线读取”命令, 则网关将原本存储在 FLASH 的数据通过网关 ESP9266 发送到上位机, 以供显示。

8) 若网关 ESP8266 接收来自上位机的“停止读取”命令, 则网关 CC1310 在信道 1 上周期性广播“停止读取”指令包, 并在标签的相应应答后, 将标签 ID 从以注册过的标签列表移除;

9) 若网关超过 5 个时隙周期未接收到某个已注册过的标签的数据包, 就认为该标签已脱网, 将其 ID 移除注册列表, 待其入网后再追加。

网关程序也是基于 FreeRTOS 并采用 FSM (Finite State Machine) 的调度方式来完成逻辑程控。正常情况下, 网关通过终端的命令完成状态切换, ESP8266 通过 TCP 协议和终端进行数据收发交互, 同时监测终端网络状态, 如若终端发生网络中断等异常, ESP8266 也能对 STM32 进行报警提示。值得一提的是, 每个包的传输阶段都会进行相应的校验, 若通过, 则进入后续处理, 反之则丢弃。为了避免由于通信问题造成的丢包问题以及由于小概率的信道拥塞造成的同周期时间内收到某个 ID 的多个包(重包)问题, 我们的解决策略是:

1) 若某个周期内, 连续收到某个 ID 的重复包, 经过“数据预处理后”, 以时间戳靠后的包为准;

2) 若某个周期内, 某个 ID 一个包未收到, 则生成一个“伪包”, 用该标签前两次的值做一个平滑处理, 并且对该 ID 计数, 如果连续 5 个周期都未收到, 那么考虑标签信号丢失的可能, 就将这个 ID 从列表中删除, 待其恢复正常后, 再重新注册。

网关具体的状态机转移图如图 3-11 所示, 下层任务由上层任务驱动。

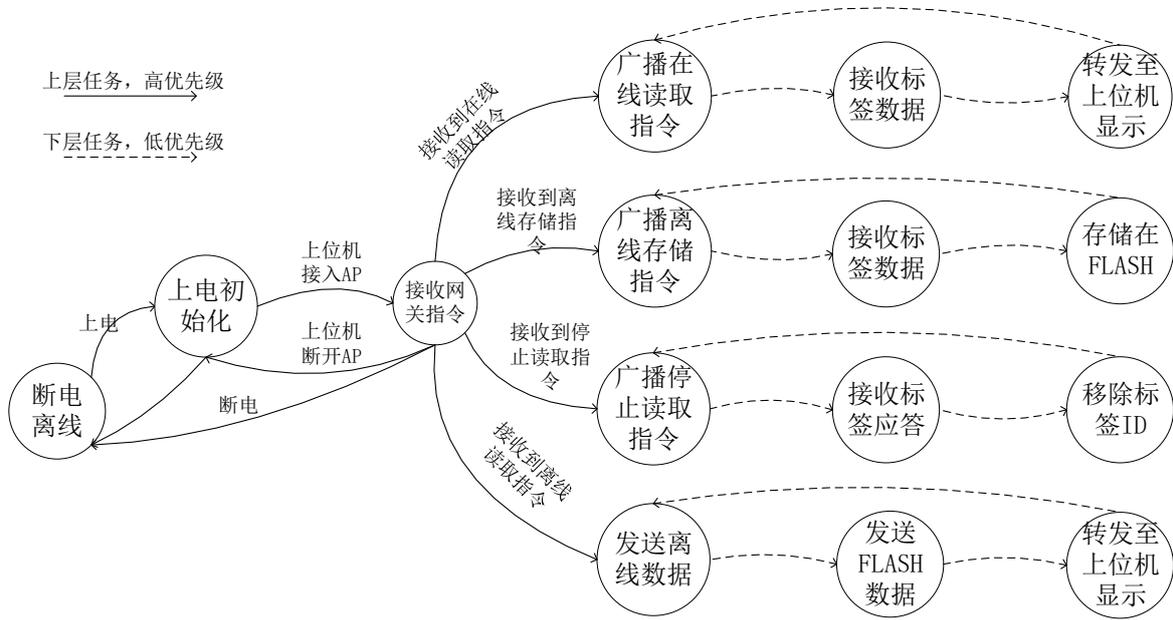


图 3-11 网关状态机转移图

3.4.4 终端软件设计

PC 终端的上位机程序使用 Python 完成,通过其自带精简轻量的 UI 设计库 tkinter 进行界面绘制。上位机主要功能是保证和网关的 TCP 通信、统计数据包接收量、完成指令传输和数据接收并对标签节点中运动数据和坐标轨迹进行实时的显示等。

如图 3-12 所示,是我们上位机服务示意图。当上位机连接到充当 AP 的网关 ESP8266 并完成网关 IP 和 TCP 通信端口的键入后,即可选择一系列指令去控制系统的工作流程。可选的指令一共四种,分别是:“在线读取”、“离线存储”、“离线读取”、“停止读取”。例如,设置指令为“在线读取”,点击“发送指令”控件,即可在区域 1 位置实时显示接收到的数据包,上位机实时对数据包进行解析,并将每个标签的运动信息显示在区域 2 的位置,同时在区域 3 实时显示每个标签的坐标位置。设置指令为“停止读取”并发送指令,即可停止整个系统的工作流程。其中,左侧栏目“RX 包数目”是用来统计上位机接收到网关数据包的个数。

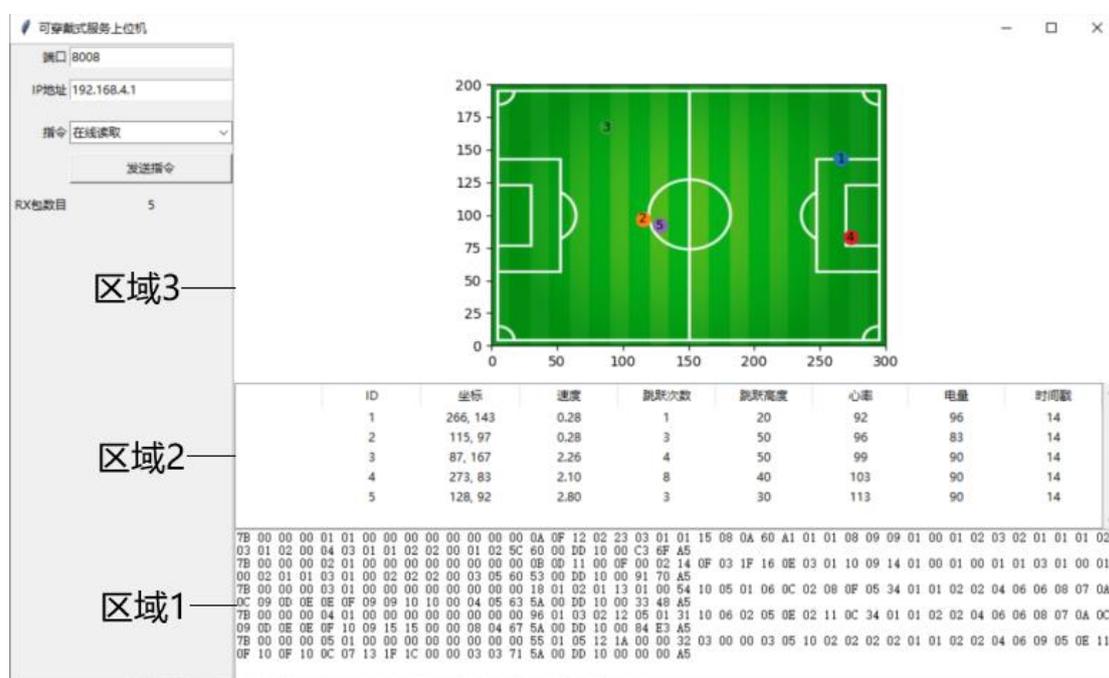


图 3-12 上位机服务示意图

3.4.5 通信指令包与数据包协议设计

根据整个系统的工作流，需要设计多类通信协议，设计通信协议的过程中，对于一些非周期性的数据包（比如指令包），因其流量较小，即便数据包中没有太多的信息，还是可以为它扩充一定的冗余信息，以达到和此工作流中数据包的相同的长度，这样可保证在不引入通信压力的情况，使得程序设计更简洁高效。数据协议内，全部采用十六进制编码。

对于系统的任务工作流，可以划分为上行任务工作流和下行任务工作流两部分，其简图如图 3-13 所示，下面分别介绍每个任务工作流中数据包的协议设计。

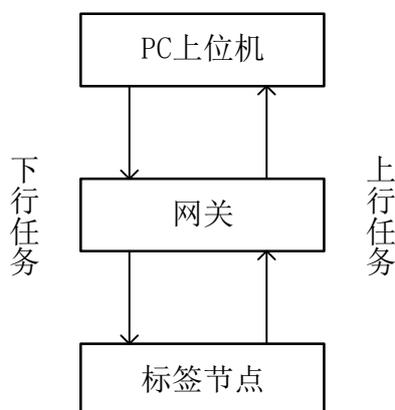


图 3-13 系统 workflow 简图

(1) 数据包的协议设计（上行任务）

数据包的传输体现在上行任务 workflow 中，数据从标签节点出发，经过负责接收任务的网关 CC1310、网关 STM32、网关 ESP9266 后到达上位机进行实时显示。为了避免字段的释义冗余，对于一些重复的数据位只在最初介绍一次，后续如无特殊的逻辑变化，则不再说明：

1) 标签发送到负责接收任务的网关 CC1310 的数据包，共 44 个字节，如表 3-1 所示。

表 3-1 标签发送到网关 CC1310 的数据包格式

包头	包类型	节点 ID	参考 GPS	差分 GPS	五组速度	跳跃次数	跳跃高度	心率	电量	时间戳	CRC	包尾
1B	1B	4B	8B	8B	10B	2B	1B	1B	1B	4B	2B	1B

包头、包尾：用于判定每个数据包的起始位和结束位，用于避免丢包、黏包等情况导致程序判定出错等问题，各 1 个字节，包头固定为 0x7B，包尾固定为 0xA5；

包类型：用于判断当前的工作方式，0x00 表示在线读取，0x0C 表示离线存储，0x0E 表示离线读取，0xFF 表示停止读取；

节点 ID：用于判断数据包的来源是哪一个标签节点，4 个字节方便扩展标签 ID 的数目；

参考 GPS：参考 GPS 的经纬度信息，占用 8 个字节（放大 10^6 倍）；

华中科技大学硕士学位论文

差分 GPS: 收集连续 4 次的 GPS 信息, 采用相对于参考 GPS 的差分数据进行编码, 提高编码效率, 共 8 个字节 (放大 10^6 倍);

五组速度: 收集连续 5 次的 x, y 方向的速度信息, 占用 4 个字节;

跳跃次数: 当前包采集期间的累计跳跃次数, 占用 1 个字节;

跳跃高度: 当前包采集期间的最大跳跃高度, 占用 1 个字节;

心率: 标签所采集到的实时心率信息, 占用 1 个字节;

电量: 标签的实时电量信息, 占用 1 个字节;

时间戳: 用于表示当前数据包采集时的系统时间, 共 4 个字节, 精确到微秒;

CRC: 用于对接收到的数据包做校验处理, 把从包头到 CRC 之前的数据都做一遍 CRC 校验得到的 CRC16 码, 共 2 个字节;

2) 负责接收任务的网关 CC1310 发送到网关 STM32 的数据包, 共 44 个字节, 如表 3-2 所示。

表 3-2 网关 CC1310 发送到网关 STM32 的数据包格式

包头	包类型	节点 ID	参考 GPS	差分 GPS	五组速度	跳跃次数	跳跃高度	心率	电量	时间戳	CRC	包尾
1B	1B	4B	8B	8B	10B	2B	1B	1B	1B	4B	2B	1B

其字段释义和数据包 1) 相同。

3) 网关 STM32 发送到网关 ESP8266 的数据包, 共 44 个字节, 如表 3-3 所示。

表 3-3 网关 STM32 发送到网关 ESP8266 的数据包格式

包头	包类型	节点 ID	参考 GPS	差分 GPS	五组速度	跳跃次数	跳跃高度	心率	电量	时间戳	CRC	包尾
1B	1B	4B	8B	8B	10B	2B	1B	1B	1B	4B	2B	1B

其字段释义和数据包 1) 相同。

4) 网关 ESP8266 发送到上位机的数据包, 共 64 个字节, 如表 3-4 所示。

华中科技大学硕士学位论文

表 3-4 网关 ESP8266 发送到上位机的数据包格式

包头	包类型	节点 ID	平面坐标	差分坐标	十组速度	跳跃次数	跳跃高度	心率	电量	时间戳	CRC	包尾
1B	1B	4B	8B	18B	20B	2B	1B	1B	1B	4B	2B	1B

平面坐标：经过参考 GPS 转换后平面坐标，共 8 个字节；

差分坐标：经过差分 GPS 和平面坐标转换后的平面坐标信息，分 x, y 两个方向，并基于 5 组原始坐标数据完成插值，得到十组坐标数据，共 18 个字节；

十组速度：分 x, y 两个方向，并基于 5 组原始速度数据完成插值，得到十组速度数据，共 18 个字节；

其余字段释义和数据包 1) 相同。

(2) 指令包的协议设计（下行任务）

指令包的传输体现在下行任务 workflow 中，指令从上位机出发，经过网关 ESP8266、网关 STM32、负责发送任务的网关 CC1310 后到达标签节点。正如前文提到的，指令包是属于非周期性的数据包，其在系统中占用的通信流量非常小，所以为了处理方便，我们可以通过引入占位符将其扩展至 44 字节处理。

1) 上位机发送到网关 ESP8266 的指令包，共 44 个字节，如表 3-5 所示。

表 3-5 上位机发送到网关 ESP8266 的指令包格式

包头	包类型	占位符	CRC	时间戳	包尾
1B	1B	35B	2B	4B	1B

其余位置是占位符，为了填满 44 字节，全部填充为 0xFF。其余字段释义和数据包 1) 相同。

2) 网关 ESP8266 发送到网关 STM32 的指令包，共 44 个字节，如表 3-6 所示。

表 3-6 网关 ESP8266 发送到网关 STM32 的指令包格式

包头	包类型	占位符	时间戳	CRC	包尾
1B	1B	35B	4B	2B	1B

其字段释义和数据包 1) 相同。

3) 网关 STM32 发送到负责发送任务的网关 CC1310 的指令包, 共 44 个字节, 如表 3-7 所示。

表 3-7 网关 STM32 发送到网关 CC1310 的指令包格式

包头	包类型	占位符	时间戳	CRC	包尾
1B	1B	35B	4B	2B	1B

其字段释义和数据包 1) 相同。

4) 负责发送任务的网关 CC1310 广播到标签的时隙包, 共 44 个字节, 如表 3-8 所示。

表 3-8 网关 CC1310 广播到标签的时隙包格式

包头	包类型	标签 1	标签 2	标签	时间戳	CRC	包尾
1B	1B	1B	1B	33B	4B	2B	1B

标签 x: 表示对应的 ID 的标签是否已经加入到注册了时隙的 ID 列表中, 或者是否已经在注册了时隙的 ID 列表中删除掉, 以此来驱动后续的操作。其余字段释义和数据包 1) 相同。

3.5 本章小结

本章主要是对整个系统的设计方案做一个详细的论证。并根据论证得到的结论完成系统的硬件设计和软件设计, 为设计一个高稳定性的系统而打下坚实的基础。

4 算法设计

在我们的系统中，为保证其良好的性能，需要为其设计一系列处理算法。这包括设计良好的通信机制保证通信的稳定性，设计良好的时分复用算法控制标签的射频开关，从而显著降低标签的功耗，设计良好的数据处理方法得到 GPS 平面坐标和平面速度信息，设计良好的处理惯导数据的策略来分析跳跃信息，下面分别介绍。

4.1 通信时隙和校时算法

在处理多对一的组网通信中，设计合适的通信时隙和校时逻辑对于整个网络的稳定性是至关重要的。如若所有的子节点在同一时刻向主节点发送数据包，那么很容易造成数据的拥塞，轻则给主节点的数据处理造成压力，重则造成主节点底层数据接收区的 FIFO^{[43][44]}溢出，导致数据包的丢失。而由于主节点和子节点的系统时钟始终存在误差，随着系统的运行，通信时隙也会受到影响，所以还需要添加校时逻辑。在主、子节点的通信过程中，伴随着通信时隙和校时逻辑的驱动，整个系统工作流就能稳定。完整的工作流如图 4-1 所示。

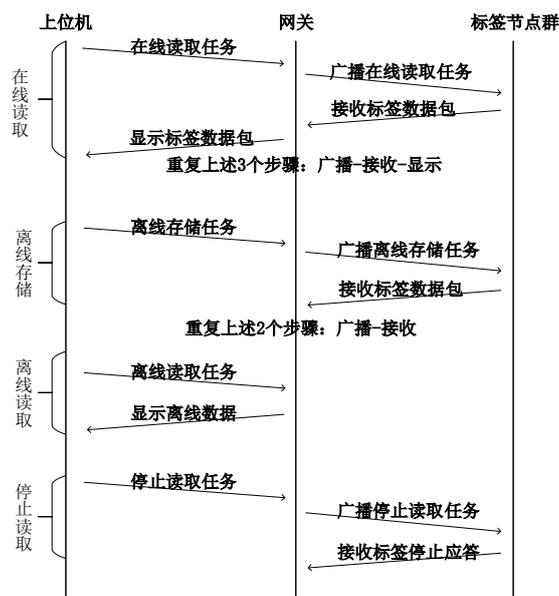


图 4-1 完整工作流示意图

华中科技大学硕士学位论文

如图 4-1 所示，以“在线读取”、“离线存储”、“离线读取”、“停止读取”指令为例，解析整个工作流程：

- 1) 在线读取任务：用户通过上位机发送“在线读取”指令到网关；
- 2) 广播在线读取任务：网关将“在线读取”指令处理后，将指令（包含通信时隙）广播到标签节点群中；
- 3) 接收标签数据包：标签节点群把从网关发来的广播包作为校时包，收到校时包后找到其对应的时隙，在对应时隙往网关发送数据包至网关；
- 4) 显示标签数据包：网关将接收到的数据处理后，发送至上位机进行显示；
- 5) 离线存储任务：用户通过上位机发送离线存储的指令；
- 6) 广播离线存储任务：网关将“离线存储”指令处理后，将指令（包含通信时隙）广播到标签节点群中；
- 7) 接收标签数据包：标签节点群把从网关发来的广播包作为校时包，收到校时包后找到其对应的时隙，在对应时隙往网关发送数据包至网关，网关将数据存储到 FLASH 中；
- 8) 离线读取任务：用户通过上位机发送“离线读取”指令到网关；
- 9) 显示离线数据：网关将离线存储时的数据发送到上位机，以供显示；
- 10) 停止读取任务：用户通过上位机发送“停止读取”指令到网关；
- 11) 广播停止读取任务：网关将指令处理后，将指令（包含通信时隙）广播到标签节点群中；
- 12) 接收标签停止应答：标签节点群把从网关发来的广播包作为校时包，收到校时包后找到其对应的时隙，在对应时隙往网关发送停止读取应答包。随后标签回退到“初始待命”状态，网关将此标签 ID 从注册时隙列表中删除。

4.2 时分复用算法

在标签工作过程中，为满足远距离的通信需求，需配置 CC1310 寄存器以保证输

出射频信号的功率要求。但对于标签硬件而言，射频模块是耗电大户。在系统下位机设计过程中，采用的是通信时隙和校时算法来完成每个周期网关和各个标签的同步通信。在每个周期通信周期中，每个标签和网关都会进行一次数据收发。因此只需每个标签在其所在的时隙开启射频开关，其余时隙关闭射频开关，即可节约相当可观的功耗。而为了保证一定的时隙容错率，我们选择让标签在接收网关广播的时隙和发送数据到网关的时隙作为标识时隙，在标识时隙和其前后一个时隙区间中，射频模块处于工作状态，其余时隙射频模块处于关闭状态。在一个通信周期过程中，大约 33 个时隙，其中两个标识时隙和其前后一个时隙区间最多占用 6 个时隙。可见这种时分复用的策略相比正常的工作模式能大约节约 82%的功耗。标签射频模块的时分复用算法示意图如图 4-2 所示：

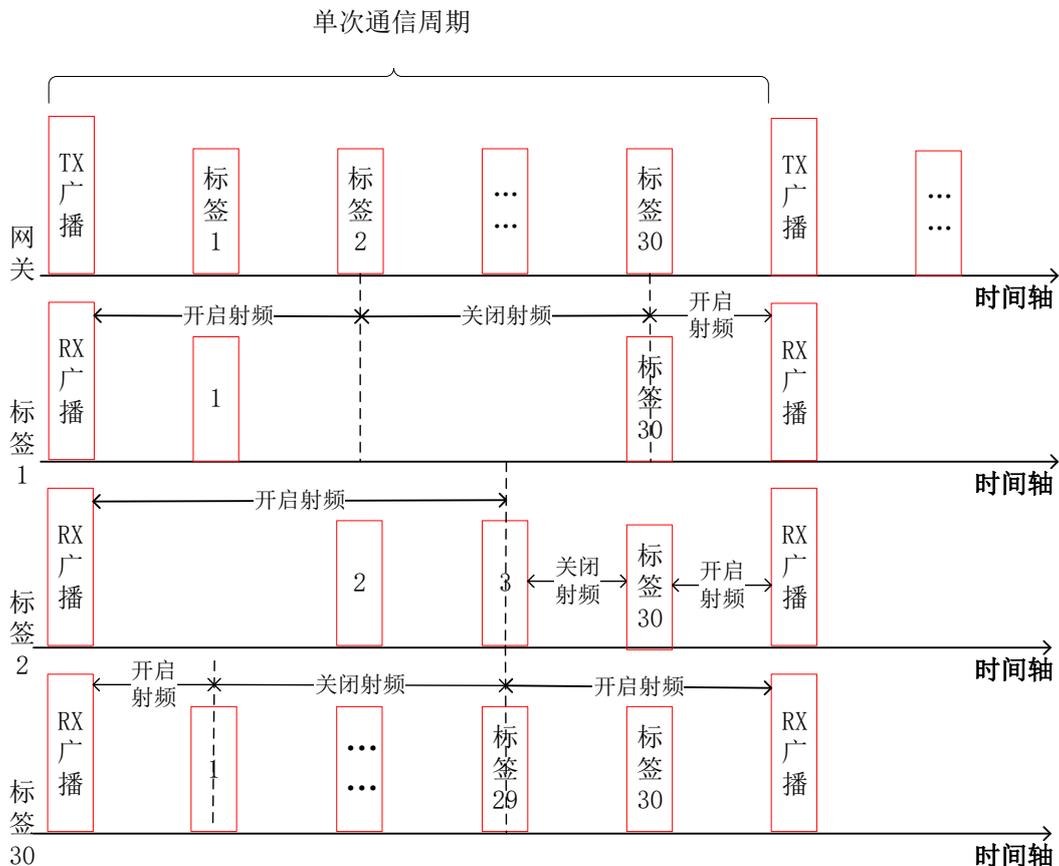


图 4-2 标签射频模块时分复用算法示意图

4.3 GPS 处理算法

在我们的系统中，GPS 经纬度信息、速度值与方向角均来自于 NEO-M8N 传感器，下面针对 NEO-M8 的某个报文（GNRMC 语句）进行字段解析，下面整条语句是一个文本行：

```
$GPRMC,010101.130,A,3606.6834,N,12021.7778,E,0.0,238.3,010807,,A*6C
```

字段 0: \$GNRMC, 语句 ID, 表示整条语句是一个 Recommended Minimum Specific GPS/TRANSIT Data (RMC), 即“推荐最小定位信息”；

字段 1: 010101.130, 表示 UTC 时间, hhmmss.sss 格式；

字段 2: A, 表示定位状态, A 表示定位, V 表示未定位；

字段 3: 3606.6834, 表示纬度信息, 格式为 ddm.mmmm 度分格式；

字段 4: N, 表示纬度方向, N 表示北纬, S 表示南纬；

字段 5: 12021.7778, 表示经度信息, 格式为 dddmm.mmmm 度分格式；

字段 6: E, 表示经度方向, E 表示东经, W 表示西经；

字段 7: 0.0, 表示地面速度, 单位是节 (Knots)；

字段 8: 238.3, 表示地方方位角, 以正北为 0° , 正东为 90° ；

字段 9: 010807, 表示 UTC 时间, ddmmyy 格式；

根据此报文信息, 我们即可推测出当前的平面坐标与平面速率。

(1) GPS 经纬度转换为平面坐标

网关以接收到的第一个数据包中的参考 GPS 经纬度作为初始点, 后续的 GPS 经纬度都根据此初始点来计算相对的平面坐标。由于我们的计算范围是在方圆 150m 之类, 因此可以引入 GPS 的简化计算方式来处理, 并且这种方式引入的计量误差^{[45][46]}几乎可以忽略不计。

如图 4-3 所示, 是计算坐标示意图。已知 O, C 的经纬度信息, 将 O 点作为参考点, 计算 C 相对于 O 点的平面坐标偏移量。以 O 点建立平面坐标系, X 轴代表纬度线, Y 轴代表经度线, 沿经度线的偏移量 OA 就是 C 点的 Y 轴坐标。同理, 沿纬度

华中科技大学硕士学位论文

线的偏移量 OB 就是 C 点的 X 轴坐标，虽然地球是个椭球体， OA 和 OC 是一段弧线，但是在我们的 150m 范围内，足以将 OA 和 OC 作为直线看待，求出 OA 和 OC 即可得到 C 点的平面坐标。下面以 OA 为例，计算其长度。

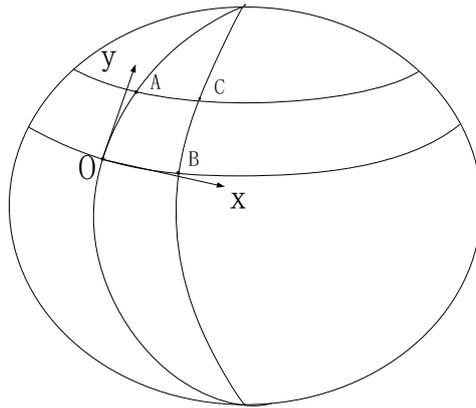


图 4-3 计算坐标示意图

如图 4-4 所示，是沿着 OA 线段所在的经度线截取椭球体得到的一个截面椭圆图。正如前文所述，把弧长 OA 看作线段。在这个截面内，求得 O, A 的直角坐标即可得出 OA 的长度。同时，地球上某点的纬度就是赤道平面和该点沿着椭球表面法线方向的夹角，即 O 点法线与 X 轴的夹角。设 O, A 的坐标分别是 (x_0, y_0) 和 (x_A, y_A) ，已经地球长半轴和短半轴的长分别是 a 和 b 。

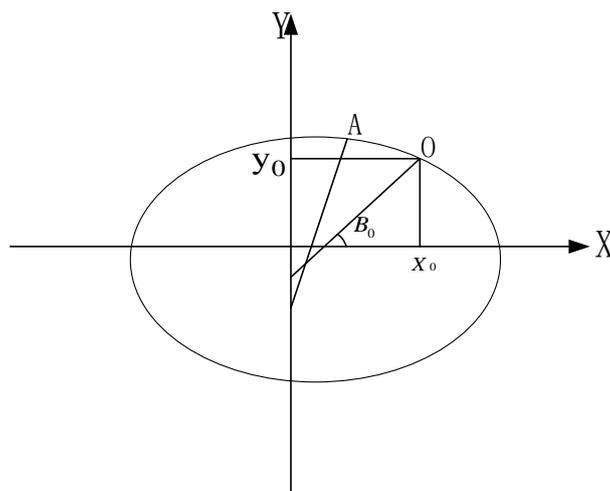


图 4-4 截面椭圆图

其中椭圆方程是：

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (4-1)$$

在椭圆上，过 O 点的切线方程是：

$$\frac{x_0}{a^2}x + \frac{y_0}{b^2}y = 1 \quad (4-2)$$

已知 O 点的纬度是 B_0 ，根据纬度的定义和式 (3-2) 可得出：

$$\cot B_0 = \frac{x_0 b^2}{y_0 a^2} \quad (4-3)$$

利用式 (4-1)、(4-2)、(4-3)，可以得出椭圆 O 点的坐标与该点的纬度值的数学关系：

$$x_0 = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 + b^2 \tan^2 B_0}} \quad (4-4)$$

$$y_0 = \frac{b^2}{\sqrt{b^2 + a^2 \cot^2 B_0}} \quad (4-5)$$

对 A 点坐标 (x_A, y_A) 的处理亦如是，联立式 (4-4) 和式 (4-5) 即可求得线段 OA 的长度：

$$OA = \sqrt{(x_A - x_0)^2 + (y_A - y_0)^2} \quad (4-6)$$

式 (4-6) 即可表示为 C 点的 Y 轴坐标。同理，亦可对 X 轴进行处理，最后所得即为 C 点的 X, Y 轴坐标。

(2) 方位速度转换为平面速度

已知从 GPS 传感器 NEO-M8N 得到的是速度值 V 和其方位角 A ，该速度的单位是节 (Knots)，单位符号 kn ，节是专用于航海的速率单位，我们可以将其转换为平面速度单位：

$$1kn = 1.852km/h \quad (4-7)$$

则可得其平面速度分别为：

$$V_x = \left(V \times \frac{1.852}{36} \right) \times \sin \left(A \times \frac{\pi}{180} \right) \quad (4-8)$$

$$V_y = \left(V \times \frac{1.852}{36} \right) \times \cos \left(A \times \frac{\pi}{180} \right) \quad (4-9)$$

其中 V_x 和 V_y 分别表示平面坐标正东方向和正北方向的速率。

4.4 跳跃行为辨识算法

我们可以认为，跳跃和奔跑这两种运动状态的不同，在数据指标上的本质区别就是滞空时间的不同。而滞空时间是由运动员的弹跳力决定的。所以我们提出“基于滞空时间的跳跃行为辨识算法”，以此在滞空时间和加速度上寻找某种普适性的联系。从而完成跳跃行为的辨识和跳跃高度的预测。这比仅通过加速度脉冲阈值进行跳跃行为辨识的方法更加准确可靠。

如图 4-5 和图 4-6 分别表示进行某一次跳跃运动时加速度的变化曲线和进行某一次奔跑运动时加速度的变化曲线，横轴是采样点（频率 200MHz），纵轴是加速度值。可见在奔跑和跳跃状态下，z 轴加速度差距并不大，这时单靠加速度脉冲阈值来判定起跳的方法并不合理。如图 4-5 所示，一共有五次跳跃行为，以第一次跳跃时 z 轴的加速度进行分析。运动员在完成一次完整的起跳时会经历：向下蓄力（加速度朝下）、上升起跳（加速度朝上）、上升和下落（加速度朝下）、触地缓冲（加速度朝上）、逐渐停止（加速度会有一些抖动最后接近 0 值），共五个阶段。如图 4-6 所示，可以看到在奔跑过程中 z 轴的加速度比较有规律的上下抖动，并且其持续时间相对较长。这能明显的观察到两种姿态下滞空时间的差距，这也印证了我们辨识跳跃行为的理论基础（区分不同运动状态的滞空时间）是比较可靠的。

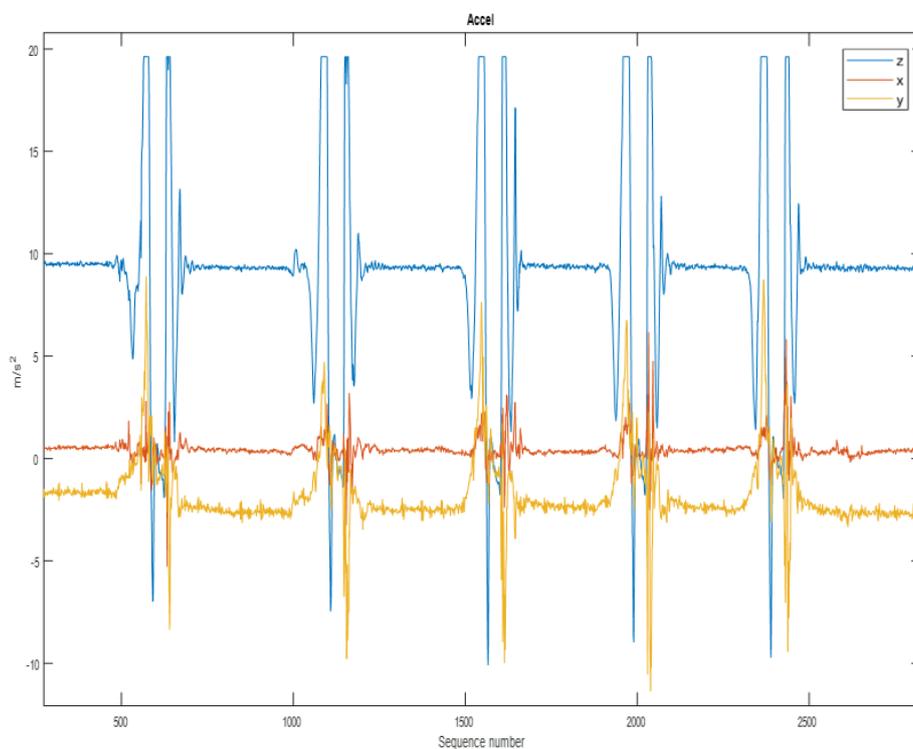


图 4-5 跳跃时加速度的变化曲线

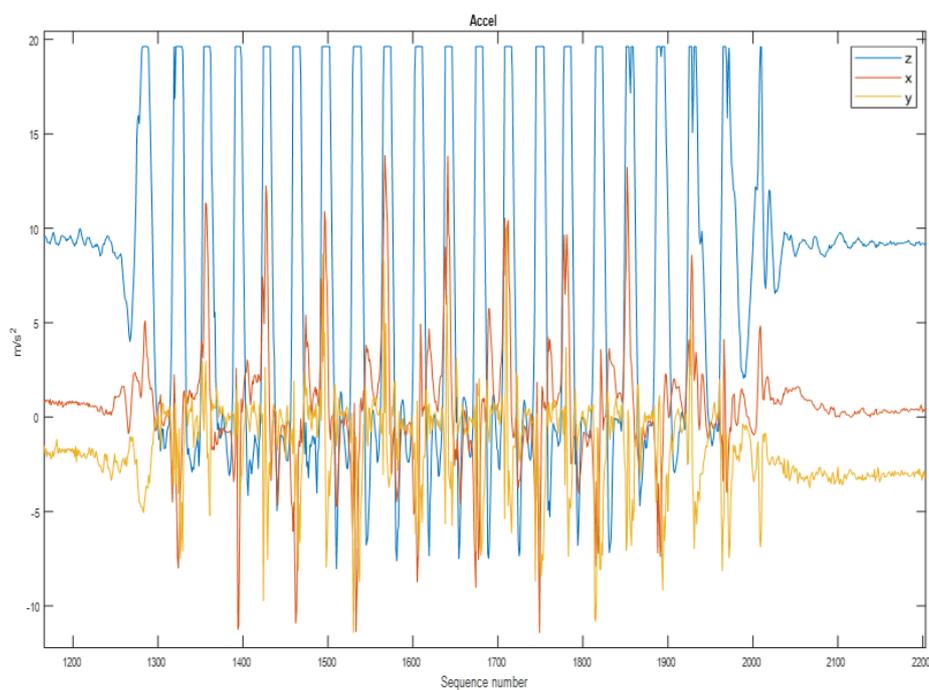


图 4-6 奔跑时加速度的变化曲线

在系统中，我们可以使用 MPU6050^[47]以 200Hz 的采样频率获取 z 轴加速度，设

某个时刻获取到的加速度序列为 $\{z_1, z_2, z_3, \dots, z_n\}$ 。对于一次跳跃动作，假设在 t_1 时刻离开地面，其 z 轴的加速度值 z_{\max} 应该是当前某个区间内最大的加速度值（方向向上），并且在 z 轴正方向的加速度会有一个明显的上升沿。随后在上升和下落阶段， z 轴的加速度值接近于重力加速度 g （方向向下）。在 t_2 时刻触地缓冲， z 轴的加速度值开始变为正值。在 t_3 时刻逐渐停止，其 z 轴的加速度有一个渐变到0值的过程。所以 $t_2 - t_1$ 即为滞空时间， $t_3 - t_1$ 即为完成整个跳跃所需的时间。

可见，跳跃发生的先决条件是，存在某个 z 轴方向向上的加速度。判别条件是随后会有一段比较明显的加速度变化曲线（对应于上文提到的 $t_1 \sim t_3$ 时刻）。所以我们可以通过估计先决条件中加速度的阈值来判断后续某个时刻是否可能发生跳跃动作，其次再估计理论的滞空时间来判断是否发生了跳跃，最后在我们正确判断跳跃行为的基础上，通过获得真实的加速度值估算出跳跃的近似高度。

（1）先决条件中加速度阈值的近似估算方法

假定运动员质量为 m ，跳跃的高度为 h ，起跳速度为 v ，在起跳前脚接触地面的时间为 t ，产生向上的加速度为 a ，已知重力加速度 $g = 9.8\text{m/s}^2$ ，理想情况下根据能量守恒定律，人的弹跳力做功等于跳到最高点过程中重力的做功：

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh \quad (4-10)$$

根据式（4-10）则可得出起跳速度：

$$v = \sqrt{2gh} \quad (4-11)$$

由于人起跳前的初速度为0，起跳速度为 v ，结合式（4-11）可得出起跳时的加速度：

$$a = \frac{v}{t} = \frac{\sqrt{2gh}}{t} \quad (4-12)$$

例如，假设起跳高度 $h=0.3\text{m}$ ，起跳时间 $t=0.15\text{s}$ ，则 $a \approx 16.2\text{m/s}^2$ ，即为近似估计到的加速度阈值。

（2）跳跃高度估计

经过我们实验测试，发现人们完成一个跳跃动作所需要的滞空时间 $t \in$

[0.7s, 1.3s]。所以我们可以根据这个时间来判断先决条件满足后，是否发生了跳跃动作。若是，则通过传感器获取到的真实的最大加速度，根据式（4-13）来近似估算跳跃高度，其中 t 为估计的起跳时间：

$$h = \frac{(at)^2}{2g} \quad (4-13)$$

4.5 本章小结

本章主要是对整个系统用到处理算法及其细节做一个详细的介绍。通过这些设计的算法，为系统的通信稳定性、标签的低功耗、GPS 和速度的精度、跳跃行为识别，都提供了比较可靠的保障。

5 实验结果与分析

在上一章，我们完成了系统的方案论证，并结合论证的方案完成了系统的软硬件与算法设计，本章将对系统做一系列测试实验来分析系统的性能。

5.1 实验准备

我们的实验场地选在学校的中田径场，一共招募了 30 个志愿者协助帮忙测试，每个志愿者佩戴好我们设计的标签。我们将网关放置在球场长边界的中心，使得通信的有效距离尽可能多的覆盖操场。观察者再使用我们的上位机进行监测。

5.1.1 实验场景和流程



(a) 实验场景图

(b) 标签佩戴细节图

图 5-1 真实场景示意图

如图 5-1 所示，是我们系统工作的实景图，其中图 5-1 (a) 是我们实验室两位同学在操场佩戴标签时的场景，图 5-1 (b) 是标签佩戴的细节图像。

如图 5-1 所示的实验场景，运动员佩戴好心率带，将网关摆放在合适的位置（球场长边界中心的位置），观察员使用我们的上位机发送指令。以“在线指令”为例，

1) 上电：对网关进行上电，待有可接入点（Access Point, AP）信号后，上位机通过 Wi-Fi 连入网关，并发送指令，如“在线读取”指令；

华中科技大学硕士学位论文

2) 定点：让一个运动员站在指定的原点位置（操场边角处），戴上标签，打开开关，此时信号灯红色指示。待收到 GPS 信号后（大约 30s），信号灯变为绿色指示。同时，该位置就是此次系统工作的参考位置，后续所有标签的坐标都是以位置作为参考；

3) 运行：让其余运动员佩戴上标签，等待 GPS 信号；

4) 观察：观察员即可通过上位机界面实时查看运动员的体征数据和运动轨迹等信息。

完成上述步骤后，上位机的显示简图如图 5-2 所示（共 30 个志愿者）。

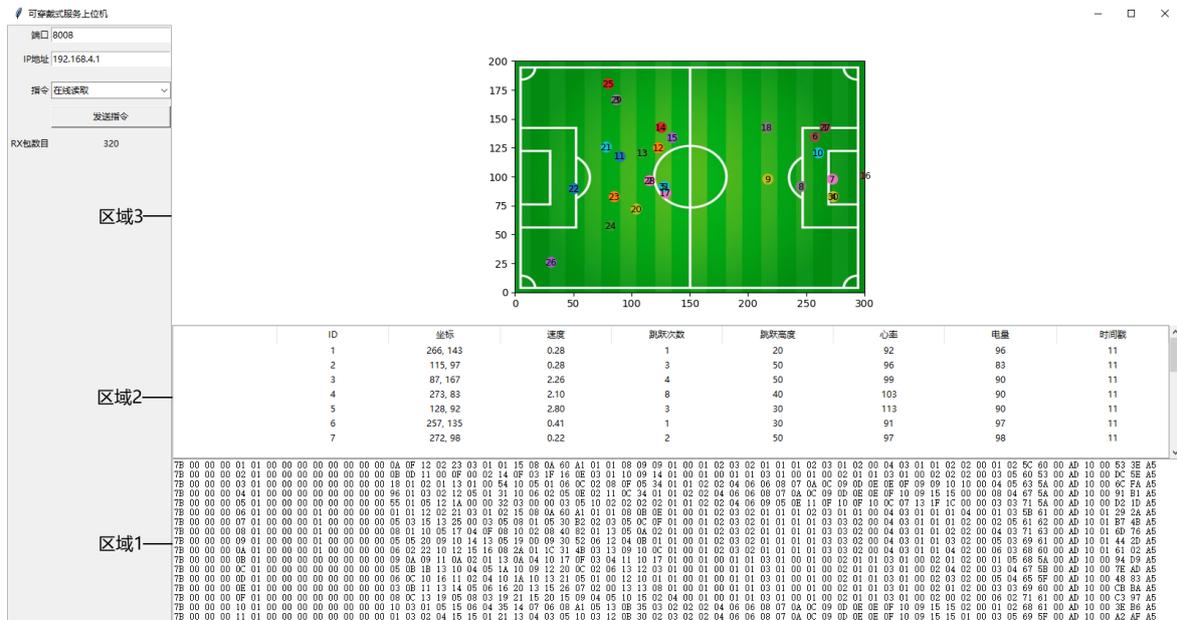


图 5-2 上位机显示简图

左边是需要连入网关的端口、IP 地址，需要发送的指令类型，发送指令的控制按钮以及上位机接收到的包的总量，区域 1 实时显示接收到的数据包，区域 2 是对数据包进行解析后得到的各个标签的传感器数据，区域 3 是对标签的轨迹进行实时的可视化显示。

5.2 系统性能测试

在做性能测试的之前，我们应该分析影响整个系统的变量，再通过控制变量法对每个变量逐个分析，最后从实验出发，探究它们对系统性能的影响。对此，我们使用系统稳定工作十分钟过程中的丢包率来衡量系统的稳定性。实际接收数据包的个数由上位机计算得出，理论应收的包由系统的配置计算得出。

对于整个系统而言，要尽量保证系统的通信稳定性以及数据处理精度。在各模块正常工作的基础上，通信层面主要是影响系统的通信稳定性，需要考虑通信时隙包的间隔、标签的接入量、标签和网关的通信距离以及运动员佩戴标签时的朝向。算法层面主要是影响数据处理精度，需要测量 GPS 转换后的实际精度、跳跃判断的准确率和精度，具体如下：

5.2.1 通信设计对系统通信稳定性的影响

在通信层面，影响系统稳定性的因素有：时隙包间隔、标签接入量、通信距离、运动员姿态，下面分别实验分析：

(1) 时隙包间隔对系统的影响

时隙包间隔：用于对每个标签分配固定的时隙，相邻标签发送数据包的时间差就是时隙包间隔。为避免同一时刻往网关发送数据，造成通信压力或丢包，我们应该根据系统的实际运行环境而设定合适的时隙包间隔。在接入 30 个标签，标签间隔网关 150m，运动站位随机朝向的条件下，设定不同的时隙包间隔，查看其对丢包率的影响，结果如图 5-3 所示。

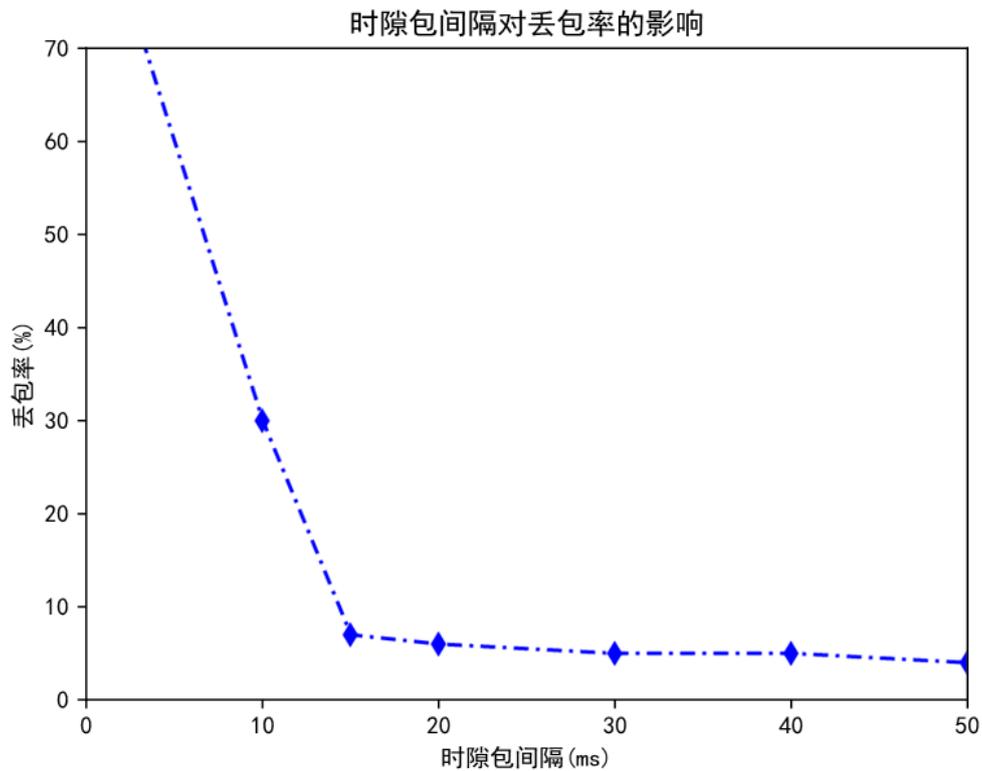


图 5-3 时隙包间隔对系统丢包率影响

可见，丢包率随着时隙包间隔的增加而不断减小，当间隔大于 15ms 后，基本能稳定保证丢包率小于 8% 左右。我们在实际测量网关和标签通信时，一个数据包的往返耗时大约是 15ms，实验测试的结论符合我们的预期。在实际使用中，为保证系统的稳定性，我们将时隙设置为 30ms。

(2) 标签接入量对系统的影响：

标签接入量：用于设置标签同时接入的数目，在通信时隙固定为 30ms，通信距离为 150m，运动员站位随机朝向的情况下，设定不同的标签接入数目，查看其对丢包率的影响，结果如图 5-4 所示。

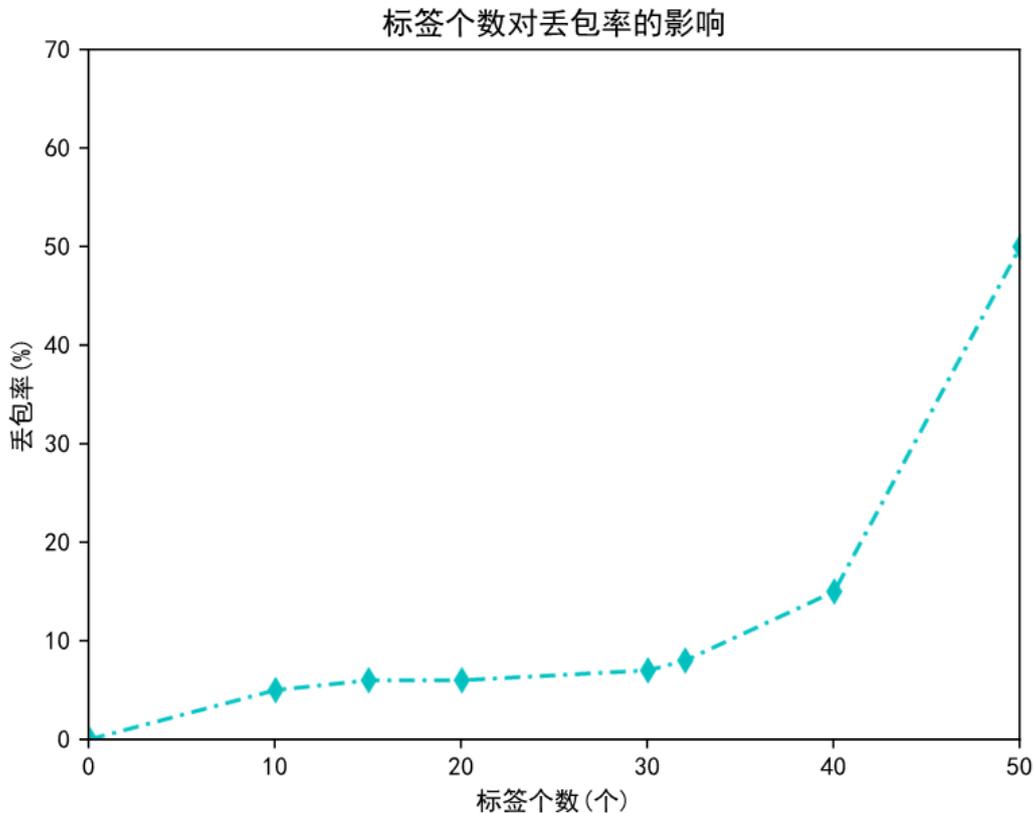


图 5-4 标签个数对系统丢包率影响

可以看到，标签接入量小于 33 个的情况下，丢包率基本会维持在 8% 以下。理论上，在 1Hz 的周期性广播的前提下，通信时隙选择 30ms，对应的标签数大约是 33 左右，这也符合我们的预期的推论。当接入的标签数大于 33 之后，可以看到丢包率明显上升。为保证系统的稳定性，我们一般设定标签接入量最多为 30。

(3) 通信距离对系统的影响

通信距离：用于查看标签和网关在不同距离下，对丢包率的影响。对此，我们在保持时隙间隔 30ms，运动员站位随机朝向的基础上，对单个标签和多个标签(30 个)分别实验，比较通信距离对系统工作的影响，结果如图 5-5 所示：

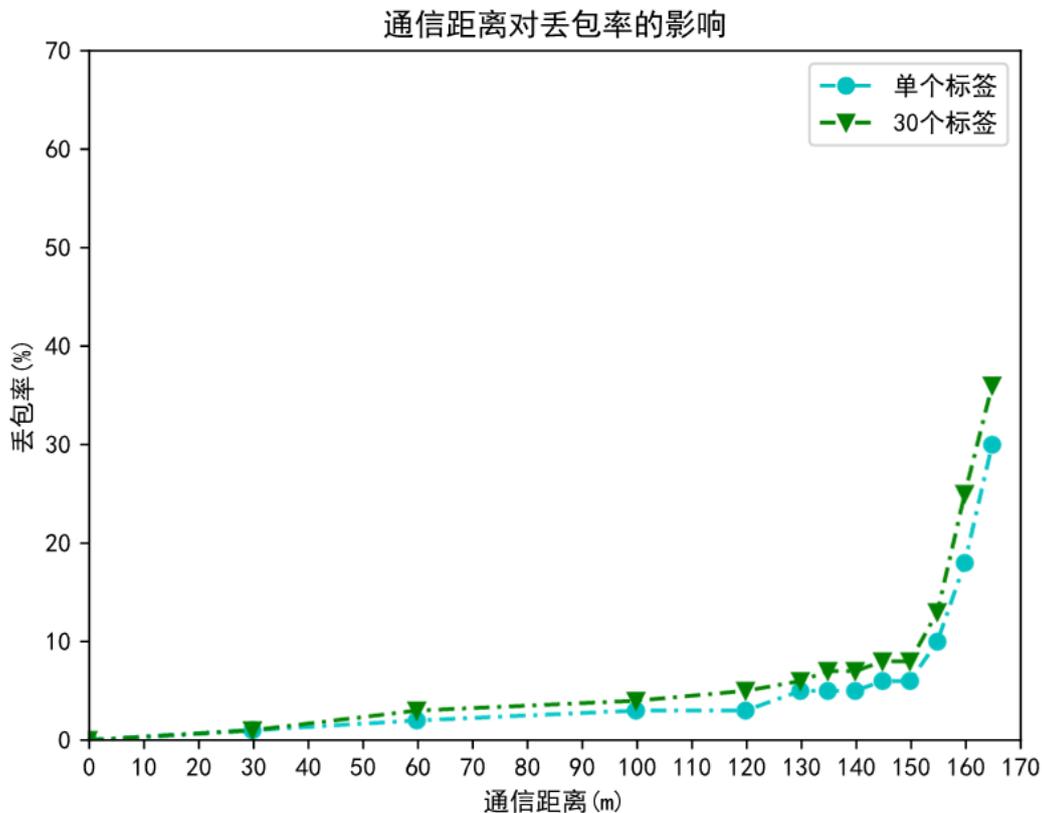


图 5-5 通信距离对系统丢包率影响

由上图可见，在 150m 的通信距离内，系统的丢包率维持在 8%以下，大于 150m 的通信距离后，系统的丢包率增长得比较快。同时，标签数目对系统运行时的丢包率影响很小，这也从侧面印证了通信时隙和标签接入数目的设计是合理的。在实际工作中，为保证稳定性，通信距离一般不高于 150m。

(4) 运动员站位朝向对系统的影响

运动员站位朝向：由于运动员佩戴标签时的朝向相对于网关是随时变化的，人体的遮挡理论上也会影响系统通信的质量。对此，我们在保持时隙间隔 30ms 的情况下，在不同通信距离的基础上测试单个标签接入时，运动员相对网关的朝向对系统的影响，结果如图 5-6 所示。

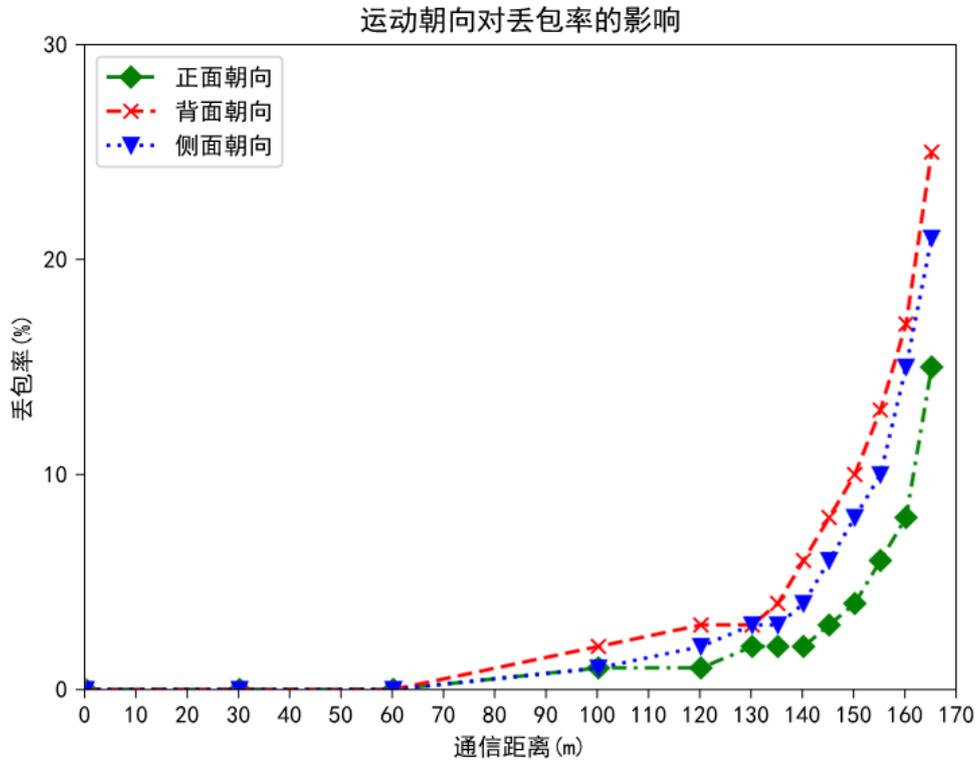


图 5-6 运动朝向和通信距离对系统丢包率影响

从上图可知，正面朝向网关时，系统稳定性最佳，侧面次之，背面最差。这也说明人体的遮挡在一定距离后，还是会对系统产生比较明显的影响。但总体来说，在 150m 的通信距离内，平均的丢包率仍然较低，证明系统稳定性尚可。

5.2.2 算法设计对系统数据处理精度的影响

在算法层面，影响数据精度的因素有：GPS 转换后的实际精度、跳跃判断的准确率和精度，下面分别实验分析。

(1) GPS 转换后的实际精度

在学校田径场的半球场上，实验人员佩戴一个标签，沿着半球场、大小禁区以不同的速度走一圈，得到的轨迹如图 5-7 所示，图中有三个轨迹，一个是采用实验确定的 GPS 模块 NEO-M8（蓝色轨迹）进行测试，一个是采用 GPS 模块 NEO-M6（红色轨迹）进行的测试，一个是实际测量的操场轨迹（黑色虚线）。

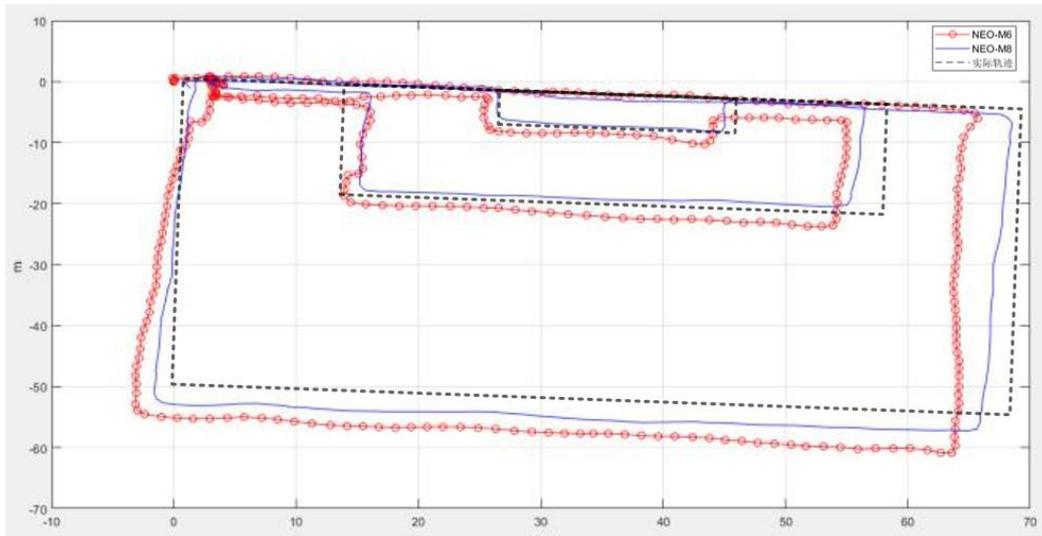


图 5-7 GPS 轨迹和实际操场轨迹

我们采用 L1 距离^[48]（曼哈顿距离）作为度量轨迹偏差的指标。对于每一个度量点，若在横轴上，则计算其和实际轨迹在 y 轴方向上的 L1 距离。若在竖轴上，则计算其和实际轨迹在 x 轴上的 L1 距离。对于 N 个计算点，设预测轨迹点的坐标是 (x_{g_i}, y_{g_i}) ，真实轨迹点的坐标是 (x_{r_i}, y_{r_i}) ，其中 $i \in [1, N]$ ，则 x 和 y 方向轨迹的累计偏差计算方法如式 (5-1) 和式 (5-2)：

$$x_{sum} = \sum_i |x_{g_i} - x_{r_i}| \quad (5-1)$$

$$y_{sum} = \sum_i |y_{g_i} - y_{r_i}| \quad (5-2)$$

根据式 (5-1) 和式 (5-2) 可得平均精度：

$$\text{precision} = \frac{x_{sum} + y_{sum}}{N} \quad (5-3)$$

带入实际的轨迹坐标至式 (5-3)，验证得到实验确定的 NEO-M8 模块的精度比 NEO-M6 高，这也从侧面验证了 GPS 方案选型的合理性。最终求得实验的平均精度 $\text{precision} \approx 1.796\text{m}$ ，符合预期。

(2) 跳跃辨识算法的精度

在第三章算法设计部分已经详细阐述了跳跃信息辨识的处理算法。对此，我们通过实验找寻相对最优的阈值，再通过此阈值去估算跳跃高度。我们找三位志愿者，每

华中科技大学硕士学位论文

人跳跃 20 次，跳跃高度在 20cm-40cm 左右，并且穿插一定频率的行走和奔跑。实验统计如表 5-1 所示。

表 5-1 跳跃信息统计表

加速度阈值(m/s^2)	跳跃计数准确率(%)	跳跃高度精度(%)
10	30	-
12	42	-
14	60	-
16	79	65
17	83	70
18	80	67
19	75	-
20	71	-

需要说明的是，实际的跳跃高度是目测得出，所以有一定的测量误差。同时，由于跳跃次数本身存在计数准确率的问题，所以挑选测试中表现较优的加速度阈值所在的实验组进行跳跃高度精度的精算。

在实验中我们发现：1) 阈值选择过小，易产生误判，把一些行走或奔跑产生的加速度抖动误判为跳跃行为；2) 阈值选择过大，易产生漏判，把一些低高度的跳跃行为漏判了，这也符合我们事先的预期规律。所以最终我们在系统中选择加速度阈值为 $17m/s^2$ 来辨别跳跃信息。

5.3 本章小结

本章主要是对整个系统的性能做全面的分析，分析影响它们的因素，并且基于这些因素变量做一系列测试实验，得出相应的结论。从实验效果来看，证实了该系统的整体稳定性，同时这些实验也能为系统后续的改进方案提供一些可行的思路。

6 总结与展望

6.1 论文总结

随着足球运动的愈发普及，足球运动在变得大众化的同时，也有不少专业化的运动团队涌现，这些青少年们也是在用自己对足球的热爱支持着足球运动。本课题根据基于可穿戴式的校园足球运动监测系统的需求，提出了系统的解决方案，最终得到了一个能解决需求的高稳定性系统。

本文的主要内容是设计能满足多种体征数据（位置、心率、运动状态、速度）监测，多点接入（ ≥ 30 ），远距离通信（ ≥ 150 米），免用户开关的低功耗休眠和自唤醒需求，并具有低成本、小尺度优势的校园足球运动监测系统。

针对系统设计过程中带来的挑战，我们通过阅读大量文献以及研究各类芯片的使用并进行比较，设计出系统的整体方案。在完成方案论证的基础上，完成整个系统硬件部分的设计，包括标签和网关的硬件设计。再基于硬件完成软件部分的设计，包括标签、网关、终端的软件设计、三者通信协议设计、相应的数据处理算法设计。最后经过相应的实验，论证了系统的稳定性以及数据精度。

通过我们的方案，我们完成了整个系统的设计。高效解决了小尺度体积（ $6\text{cm} \times 3\text{cm} \times 1\text{cm}$ ）、低功耗（ 20mA ）、多点接入（ ≥ 30 ），远距离通信（ ≥ 150 米）的需求，使得可穿戴硬件能以每秒 1 次心率数据、5 次 GPS 数据、1 次运动状态数据的上传频率，以低丢包率（ $\leq 8\%$ ），较高位置精度（ ≤ 1.8 米），较低功耗的性能稳定工作。具体包括：

（1）设计了一种低功耗、高信道利用率的物联网接入方案。标签节点的功耗节约 82%，平均工作电流小于 20mA ；

（2）提出了一种基于加速度感知的低复杂度人体跳跃行为识别算法。以滞空时间长短为特征，辨识跳跃行为，该算法识别准确率约 82%；

（3）设计了一种免用户开关操作的硬件自休眠、自唤醒方案。通过低功耗的心

率监测来决策标签的工作模式，从而在低功耗的前提下，完成标签硬件的自休眠和自唤醒；

(4) 完整实现了整个可穿戴式人体运动监测系统，包括可穿戴式佩戴产品硬件设计和软件开发、网关的硬件设计和软件开发，以及上位机系统的开发。其中，可穿戴式硬件在 6cm*3cm*1cm 尺寸下同时实现了多项功能，包括自休眠与自唤醒、GPS 数据采集、运动姿态监测、运动速度采集、心率监测、长达 150m 的通信距离、低于 20mA 的平均工作电流、低于 8% 的丢包率。

这是目前市场上同类产品单位空间上集成度最高的可穿戴运动监测硬件，体现了总体方案设计的合理性和先进性。

6.2 研究展望

本文在基于低复杂度可穿戴足球运动监测系统的需求上提出了低成本、高可靠性的解决方案。虽然从实验角度而言，系统具有相应的实用性，但是从产品角度出发，该系统还有一些不足之处有待探讨和解决：

1) 系统整体的功耗仍需要降低。现今各种穿戴式服务都在往低功耗靠拢，我们系统虽然在标签节点上有低功耗处理，但是网关也是一个耗电大户，也需要为其制定低功耗策略，这就需要使得整个系统的通信更加缜密；

2) OTA 技术需要引入。OTA^{[49][50][51]} (Over-the-Air Technology) 即“空中下载技术”，当前主流的可穿戴产品都有支持 OTA 技术的趋势。它能帮助我们更好的更新烧写在标签和网关中的软件，避免插拔等繁杂的步骤。更重要的是，当我们的系统成为一个真正的产品时，这个技术能带来非常高效的软件服务；

3) 硬件设计应该更有突破。当前虽然各项指标达到预期要求，但是距离硬件所提供的一些性能指标还是有少量的距离。忽略其中的一些理想条件，性能应该是还有上升的空间，例如通信距离等等。这也是后期可以进行改进的一个重要方向。

致谢

行文至此，意味着我的硕士生涯已至谢幕时刻。回首这三年在华中大的学习和生活，百感交集，有应对课程学业的压力，有面临项目进度的紧迫，还有因自身专业技能不足产生的焦虑，但此时心中充盈的更多是感激。

本文是在我的恩师郭鹏研究员殷切关怀和耐心指导下完成的，衷心感谢郭老师的谆谆教诲和悉心关怀。从课题选择、项目设计与调试，直至论文最终完成，郭老师始终给我耐心的指导和支持。在这三年的求学历程中，郭老师教授我处理难题的思维方式，如何整合问题再拆解问题最后解决问题；教授我面对困难的心态调整，办法总比困难多，困难也只是前行路上的一些必会经过的路标。我也要感谢张奎老师在工程实践方面给我的指导，使得我在完成学业的同时能夯实工程能力。张奎老师对技术的严谨和热爱深深地感染着我，让我明白精益求精是该有的工作态度，兴趣是最好的老师。在此谨向二位老师致以衷心的感谢和崇高的敬意。

最后，我还要感谢硕士生涯一起在南一楼西 207 学习和生活的各位同门，因为有你们的帮助，让我感受到存在于校园的温暖；感谢我的女朋友瑶瑶，正是有你的陪伴和支持，让我觉得从不孤单，也期待未来我们可以携手并进，越走越远；感谢我的家人们，谢谢你们对我的理解以及毫无保留的支持，让我坚信无论何时何地，我都能走好自己的路。

长风破浪会有时，直挂云帆济沧海。我们都将踏上新的旅途，愿我们都越来越好！

参考文献

- [1] 任永峰,林诚.论素质教育视域下足球运动的教育价值[J].湖北经济学院学报(人文社会科学版),2021,18(04):140-144.
- [2] 彭志伟,李先雄.我国青少年校园足球宣传体系构建的途径研究[J].湖南工程学院学报(社会科学版),2021,31(01):114-120.
- [3] 戎善奎,江潇,张艳丽,余新华.可穿戴式设备管理现状分析与思考[J].中国医疗设备,2021,36(05):177-179+183.
- [4] 曹红芳,王青,步宏飞.低功耗广域物联网在高校智慧校园中的应用研究[J].物联网技术,2021,11(03):64-67.
- [5] Gorrepotu R, Korivi N S, Chandu K, et al. Sub-1GHz miniature wireless sensor node for IoT applications[J]. Internet of Things, 2018, 1: 27-39.
- [6] Choi S H, Park J K, Kim S K, et al. A new ultra - wideband antenna for UWB applications[J]. Microwave and optical technology letters, 2004, 40(5): 399-401.
- [7] Chung W C, Ha D. An accurate ultra wideband (UWB) ranging for precision asset ocation[C]//IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies, 2003. IEEE, 2003: 389-393.
- [8] Li Z, Li X, Mou G, et al. Design of Localization System Based on Ultra-Wideband and Long Range Wireless[C]//2019 IEEE 11th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT). IEEE, 2019: 142-146.
- [9] 房崇鑫,张正华,徐杰,张嘉烽,钱锦,苏权,黄星.基于云服务的远程数据传输系统的设计与实现[J].无线电工程,2019,49(08):661-665.
- [10] Mesquita J, Guimarães D, Pereira C, et al. Assessing the ESP8266 WiFi module for the Internet of Things[C]//2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). IEEE, 2018, 1: 784-791.

华中科技大学硕士学位论文

- [11] Srivastava P, Bajaj M, Rana A S. IOT based controlling of hybrid energy system using ESP8266[C]//2018 IEEMA Engineer Infinite Conference (eTechNxT). IEEE, 2018: 1-5.
- [12] Brown G. Discovering the STM32 microcontroller[J]. Cortex, 2012, 3: 34.
- [13] Zhang H, Kang W. Design of the data acquisition system based on STM32[J]. Procedia Computer Science, 2013, 17: 222-228.
- [14] Ismail D, Saifullah A. Handling Mobility in Low-Power Wide-Area Network[J]. arXiv preprint arXiv:2101.01518, 2021.
- [15] Huang L T, Ha D S, Cho H. Low Power Design of a Wireless Sensor Node to Monitor Electric Car Batteries[C]//IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2018: 3045-3050.
- [16] 李本玉, 胡晓. GPS 实时动态定位技术的发展与应用研究[J]. 2008 年测绘科学前沿技术论坛, 2010: 1-9.
- [17] 徐礼胜, 靳雁冰, 王琦文, 等. 多传感器融合的穿戴式心率监测系统[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015 (2015 年 05): 97-103.
- [18] 邱鸿鑫, 余淑仪, 林玲璇, 梁梓豪, 徐福仁, 熊爱民. 二维运动目标姿态检测和轨迹追踪系统[J]. 工业技术创新, 2020, 07(04): 63-68.
- [19] Jain A, Tompson J, LeCun Y, et al. Mdeep: A deep learning framework using motion features for human pose estimation[C]//Asian conference on computer vision. Springer, Cham, 2014: 302-315.
- [20] Chen Y, Xiao X, Dai T, et al. Hrnet: Hamiltonian Rescaling Network for Image Downscaling[C]//2020 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). IEEE, 2020: 523-527.
- [21] Lin T Y, Maire M, Belongie S, et al. Microsoft coco: Common objects in context[C]//European conference on computer vision. Springer, Cham, 2014: 740-755.
- [22] Groves P D. Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems, [Book review][J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2015, 30(2): 26-27.

华中科技大学硕士学位论文

- [23] Safaric S, Malaric K. ZigBee wireless standard[C]//Proceedings ELMAR 2006. IEEE, 2006: 259-262.
- [24] Conti M, Moretti D. System level analysis of the bluetooth standard[C]//Design, Automation and Test in Europe. IEEE, 2005: 118-123.
- [25] Verma L, Fakharzadeh M, Choi S. Wifi on steroids: 802.11 ac and 802.11 ad[J]. IEEE Wireless Communications, 2013, 20(6): 30-35.
- [26] Aust S, Prasad R V, Niemegeers I G M M. Performance evaluation of Sub 1 GHz wireless sensor networks for the smart grid[C]//37th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks. IEEE, 2012: 292-295.
- [27] Vetti S, Olsson J, Copley J. 'Sub-1 GHz long-range communication and smartphone connection for IoT applications[J]. Texas Instrum., Dallas, TX, USA, White Paper, 2016: 1-9.
- [28] Raksanta S, Kumar P P, Saxena P. A Sub-1GHz Rectangular Dielectric Resonator Antenna for IoT[C]//2019 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE). IEEE, 2019: 1-4.
- [29] Brini O, Deslandes D, Nabki F. A model-based approach for the design of ultra-low power wireless sensor nodes[C]//2018 16th IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS). IEEE, 2018: 248-251.
- [30] Drawil N M, Amar H M, Basir O A. GPS localization accuracy classification: A context-based approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 14(1): 262-273.
- [31] 韩国成,古旺,朱健铭,陈真诚.基于 BMD101 芯片的便携式心电监护仪研制[J].中国医学物理学杂志,2017,34(08):850-854.
- [32] Fedorov D S, Ivoilov A Y, Zhmud V A, et al. Using of measuring system MPU6050 for the determination of the angSub-1GHz miniature wireless sensorular velocities and linear accelerations[J]. Automatics & Software Enginry, 2015, 11(1): 75-80.
- [33] Zhang H, Zhang P. Integrated design of electronic product based on altium designer [j][J]. Radio Commun. Technol, 2008, 6: 19.

华中科技大学硕士学位论文

- [34] Beltran Jr A A, Hiwatig C D, Laguna–Agustin N J R, et al. Teaching Electronic Circuits Using Altium Designer[J]. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, 2014, 3(10): 1239-1243.
- [35] Cheng Y Q, Zhu M, Ge W. Signal integrity simulation design of image processor PCB combined with electromagnetic compatibility analyses based on Altium Designer 6[C]//2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. IEEE, 2009: 745-749.
- [36] Tseng F, Liu C K. Efficient design rule check (DRC) review system: U.S. Patent 6,397,373[P]. 2002-5-28.
- [37] Merkel D. Docker: lightweight linux containers for consistent development and deployment[J]. *Linux journal*, 2014, 2014(239): 2.
- [38] Boettiger C. An introduction to Docker for reproducible research[J]. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, 2015, 49(1): 71-79.
- [39] Déharbe D, Galvao S, Moreira A M. Formalizing freertos: First steps[C]//Brazilian Symposium on Formal Methods. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009: 101-117.
- [40] Guan F, Peng L, Perneel L, et al. Open source FreeRTOS as a case study in real-time operating system evolution[J]. *Journal of Systems and Software*, 2016, 118: 19-35.
- [41] Gladyshev P, Patel A. Finite state machine approach to digital event reconstruction[J]. *Digital Investigation*, 2004, 1(2): 130-149.
- [42] Yuang M C. Survey of protocol verification techniques based on finite state machine models[C]//1988 Computer Networking Symposium. IEEE Computer Society, 1988: 164-172.
- [43] Lê N M, Guatto A, Cohen A, et al. Correct and efficient bounded FIFO queues[C]//2013 25th International Symposium on Computer Architecture and High Performance Computing. IEEE, 2013: 144-151.
- [44] Gordon-Ross A, Abdel-Hafeez S, Alsafrjalni M H. A One-Cycle FIFO Buffer for Memory Management Units in Manycore Systems[C]//2019 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI). IEEE, 2019: 265-270.

华中科技大学硕士学位论文

- [45] 赵罗明,熊永良.GPS-RTK 求坐标转换参数误差及点校正实质[J].测绘与空间地理信息,2013,36(10):176-178.
- [46] 肖体琼,陈怡群,常春. GPS 经纬度坐标转平面坐标的简化计算方法及精度分析[A]. 中国农业工程学会.农业工程科技创新与建设现代农业——2005 年中国农业工程学会学术年会论文集第三分册[C].中国农业工程学会:中国农业工程学会,2005:4
- [47] Cismas A, Ioana M, Vlad C, et al. Crash detection using imu sensors[C]//2017 21st International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS). IEEE, 2017: 672-676.
- [48] Ye Q, Yang J, Liu F, et al. L1-norm distance linear discriminant analysis based on an effective iterative algorithm[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2016, 28(1): 114-129.
- [49] Odat H A, Ganesan S. Firmware over the air for automotive, fotomotive[C]//IEEE International Conference on Electro/Information Technology. IEEE, 2014: 130-139.
- [50] Idrees M S, Schweppe H, Roudier Y, et al. Secure automotive on-board protocols: A case of over-the-air firmware updates[C]//International Workshop on Communication Technologies for Vehicles. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011: 224-238.
- [51] Bauwens J, Ruckebusch P, Giannoulis S, et al. Over-the-Air Software Updates in the Internet of Things: An Overview of Key Principles[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(2): 35-41.