

# 基于 TDMA 的 LoRa 通信网络设计

牛朝, 解振东

(成都理工大学 信息科学与技术学院, 成都 610059)

**摘要:** 针对 LoRa 通信技术具有长距离传输和抗干扰能力强但只支持半双工通信的特点, 提出一种基于 TDMA 的通信组网方法; 该方法通过划分信道和时隙可在同一个信道下容纳多个通信设备, 在信道资源有限的情况下可充分利用信道; 基于 LoRa 的 UE 设备以星型组网的方式接入基于 LoRa 的中心基站, 中心基站可以控制接入的设备以及对信道时隙管理, 加上适当的网关还可以接入互联网; 为提高信道时隙的利用率以及手持 UE 人员的活动范围, 采用随机接入中心基站的方法; 根据该通信组网方式的特性, 设计出对应的上下行通信协议和对 UE 添加唯一标号, 这很好地解决了接入基站过程中的竞争冲突; 实验测试表明基于 TDMA 的 LoRa 组网能随机接入中心基站扩大使用人员的活动范围, 并提高信道利用率。

**关键词:** LoRa; TDMA; 信道; 时隙; 基站; 随机接入

## Design of LoRa Communication Network Based on TDMA

Niu Chao, Xie Zhendong

(College of Information Science and Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** Aiming at the characteristics of long-distance transmission and anti-interference ability of LoRa communication technology but only supporting half-duplex communication, a TDMA-based communication networking method is proposed. The method can accommodate multiple communication devices under the same channel by dividing channels and time slots, and can fully utilize the channel when channel resources are limited. The LoRa-based UE equipment accesses the LoRa-based central base station in a star-shaped networking manner, and the central base station can control the accessed equipment and the channel time slot management, and the appropriate gateway can also access the Internet. In order to improve the utilization of channel time slots and the range of activities of the handheld UE personnel, a method of randomly accessing the central base station is adopted. According to the characteristics of the communication networking mode, the corresponding uplink and downlink communication protocol is designed and a unique label is added to the UE, which satisfactorily solves the contention conflict in the process of accessing the base station. Experimental tests show that the TDMA-based LoRa network can randomly access the central base station to expand the range of activities of the users and improve channel utilization.

**Keywords:** LoRa; TDMA; channel; time slot; base station; RACH

## 0 引言

传统的物联网通信技术一般都是短距离无线通信, 如 Zigbee、WIFI、蓝牙。这些通信技术使用的频段比较高绕射能力差<sup>[1]</sup>, 在一些差的环境条件下例如矿井, 化工厂会使信号大打折扣。很多情况下这些通信技术不得不采用中继或者有线传输的方式进行数据传输, 这无疑会增加组网的复杂度和成本。

LoRa 的扩频调制通信技术编解码方案<sup>[2-3]</sup>拥有超远距离通信和低功耗的特点, 能够实现广域网和低成本覆盖, 在 LoRa 在环境监测、资源勘探、灾害预警等民用行业有很好的应用场景<sup>[4-5]</sup>。但是目前 LoRa 尚未有统一的组网方案和协议而且 LoRa 在同一个信道下只能半双工通信, 这为 LoRa 的推广和使用带来了障碍。基于此提出一种基于 TD-

MA 技术的 LoRa 通讯组网方案, 即 L-T 技术 (或 L-T 网络)。该方法需要设有中心基站, 中心基站对接入的设备进行数据转发和控制从而实现全网状网连接<sup>[6]</sup>。

## 1 L-T 原理

基于 LoRa 的 UE 设备 (以下简称 L-UE, LoRa-UE) 以星型方式进行组网, 这种组网方式需要有基于 LoRa 的中心基站 (以下简称 LC-Station, LoRa Center Station), LC-Station 将会作为控制和数据处理中心, 整个系统的基本框架如图 1 所示。

在星型组网方式下, L-UE 将和 LC-Station 进行数据交互, LC-Station 处理数据之后也可以和计算机进行数据交互, 如果 LC-Station 和计算机之间选择合适的网关系统还可以接入互联网。为了扩充在星型组网方式下的 L-UE 接入数量, L-UE 和 LC-Station 将会采用 TDMA 的通信方式。该方式的主要思想是在同一个信道下将时间划分为不同的时间段, 并且互相不重叠, 称为时隙 (slot)。

收稿日期: 2018-09-07; 修回日期: 2018-10-11。

作者简介: 牛朝 (1991-), 男, 河南濮阳人, 硕士, 主要从事嵌入式方法技术、智能控制技术方向的研究。

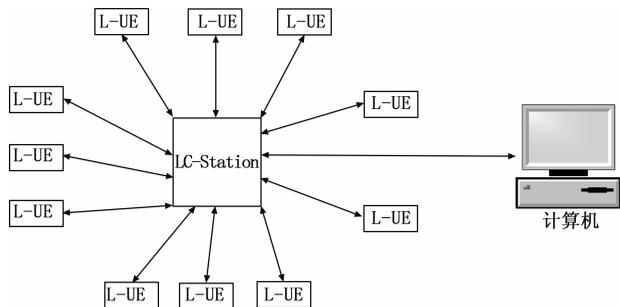


图1 系统基本框架

在同一个信道下,每一个时隙都有一个唯一序号这对判断时隙是否被占用至关重要。时隙既可以是均匀分布的也可以是不均匀的,均匀分布的时隙如图2所示。

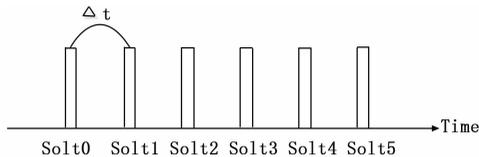


图2 均匀时隙分布

图2中有6个不重叠的唯一时隙每一个时隙间隔为 $\Delta t$ ,为保证通信的可靠性,各个时隙之间要预留一定的保护时间<sup>[7]</sup>。在这些时隙上进行数据交互不会因信道相同而发生数据碰撞,因此解决了多个L-UE设备在同一个信道下都能够不冲突的和LC-Station通信,如图3所示。

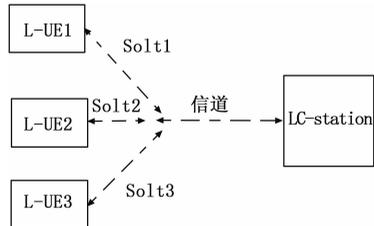


图3 不同时刻下L-UE和LC-Station通信

图3中有3个L-UE和一个LC-Station,这3个L-UE在同一个信道下分别占用编号为solt1, solt2, solt3的三个时隙,每个时隙又相当于一个地址,基站还可以通过不同的时隙(地址)来区分不同的L-UE。另外数据传输必须在一个时隙完成,这称为单时隙协议<sup>[8-9]</sup>。

L-UE和LC-Station通信的时序要求很严格,错误的通信时序将会导致时隙的重叠导致数据丢失。采用的解决办法为LC-Station下行的数据包之中会包含有时隙同步信息,同一个信道下的L-UE收到时隙同步信息之后会复位时隙定时器,然后等待自己的时隙到来。

L-UE设备和LC-Station之间只能以半双工方式进行通信,因此L-UE和LC-Station之间不能同时通信,只能以握手应答的方式进行通信。通信时LC-Station会以周期T下行发送数据包,L-UE收到数据之后将会按照自己的时隙 $\Delta t$ 进行上行数据发送,如图4所示。

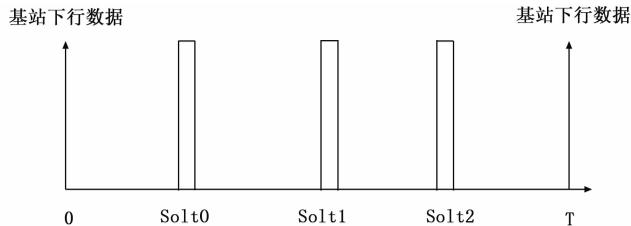


图4 时隙在通信周期上展开

在时隙均匀划分和LC-Station下行周期为T的情况下,一个无线信道可容纳的L-UE数量为:

$$N = T/\Delta t - 1 \tag{1}$$

由式(1)可知在一个无线信道下的L-UE接入数量取决于周期T和时隙 $\Delta t$ ,要想扩充接入数量可增大周期T或者减小时隙 $\Delta t$ 。但是扩大周期T会使通信速度变慢,而减小 $\Delta t$ 需要精确的时钟对硬件的性能要求很高。

## 2 L-UE和LC-Station工作机制

### 2.1 L-UE随机接入设计

为了使时隙不发生重叠,每一个L-UE设备必须知道在通信的过程中自己的时隙,为此设计出L-UE信道和时隙表以及L-UE向进行LC-Station接入的过程。信道和时隙表的目的是让L-UE知道自己能够搜索那些信道和时隙,有了信道和时隙表L-UE便可以对号入座接入LC-Station,这决定了L-UE的活动范围。接入的目的是L-UE根据LC-Station下发的数据查找空闲时隙,如果有空闲时隙那么L-UE将会和时隙存比较,如果符合两张表将完成接入转向通信状态。这种接入的方式能够有效的扩大人员活动范围,假设某人员从A区域走向B区域A区域的信号会逐渐变弱,这时L-UE可以重新选择信道和时隙向B区域的LC-Station接入。

在接入过程中不同的L-UE可能会选择相同的信道和相同时隙进行尝试接入,这将会产生冲突,对LC-Station来说哪一个能接入这是不确定的,可能都能接入也可能只有某一个接入,他们之间是竞争的关系所以这种接入是随机竞争的。随机竞争接入方式使L-UE摆脱物理位置的局限性,但也增加了系统的不确定性,因此需要建立一种机制进行解决这种不确定性。随机接入是该通信系统中非常关键的步骤,也是L-UE设备与LC-Station建立通信链路的最后一步。在随机接入过程中,L-UE在不同的条件下可转向不同的状态,共3种状态分别为接入状态、可通信状态和空闲状态,3种状态的转移图如图5所示。

#### 1) 接入状态:

接入状态是L-UE正在接入LC-Station的过程,在接入过程中L-UE通过接收和分析LC-Station的下行数据包来确定当前信道时隙的状态,这个过程决定了L-UE是否能够接入LC-Station参与通信。如果有空闲时隙,则接入当前信道进而转向通信状态;如果没有则搜索其他信道,当搜索完所有信道表之后依然没有可用时隙,由图5

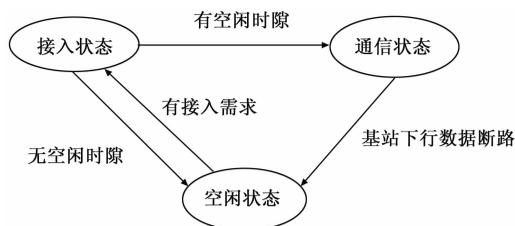


图 5 L-UE 状态转移图

可知 L-UE 将会转向空闲状态。

## 2) 通信状态:

通信状态是 L-UE 接入 LC-Station 后能够正常和基站进行数据传输状态, 只能从接入状态转换到通信状态。此状态下通信 LC-Station 相当于主机而 L-UE 则是从机, 他们之间通信严格按照通信协议进行。如果 LC-Station 发生故障或其他原因导致下行数据不能被 L-UE 接收, L-UE 将会停止数据传输从通信状态进入空闲状态。

## 3) 空闲状态:

空闲状态是指 L-UE 设备既没有进行接入也没有进行通信的其他状态, 可从接入和通信状态转移到该状态。在空闲状态下, L-UE 可以设计为周期性自动尝试接入, 或当使用者有接入需求时主动接入。因为空闲状态下核心的通信功能被不能使用, 所以还可以使 L-UE 进入睡眠或其他低功耗模式以节约电量。

## L-UE 随机竞争解决机制设计:

对所有的 L-UE 设备来说, 他们自身在接入的过程中首先会随机的选择信道和时隙进行进行试探性接入。假设一种极端的情况下, 某一网络中所有的 L-UE 都处于空闲状态, 然后在同时使这些 L-UE 设备进入接入状态, 但不同的 L-UE 可能会搜索到相同的信道和时隙。当这些 L-UE 接收到 LC-Station 的数据时, 由于信道和时隙相同他们会同时向 LC-Station 发起接入请求。如果 LC-Station 同意请求并下发带有时隙的数据, 不同的 L-UE 可能会接入到相同的信道和时隙, 这是非常危险的, 因为同信道同时隙通信会造成数据的冲突导致数据丢失。

为解决上述的问题必须建立一种随机竞争的解决机制, 在接入基站的过程中可能会有多个 L-UE 设备同时向基站发出入网请求, 但是每次这些 L-UE 设备只有一个或者多个能接入 LC-Station。为了区分 LC-Station 接收到的是哪一个 L-UE, 需要给每一个 L-UE 建立一个唯一标识 (以下简称 SN, Serial Number) 并烧录到 L-UE 中, 在同一系统中这些 SN 是绝对的不能更改。当 LC-Station 接收到带有 SN 的 L-UE 之后在下发的数据包中包含此 SN, 收到此数据包的 L-UE 设备会进行 SN 判断, 如果符合则完成接入不符合则继续进行接入。具体哪一个接入取决于基站收到了那些带有 SN 的 L-UE 的入网请求, 这是随机竞争的结果。这种机制下, 同一个信道下相同时隙的 L-UE 将会越来越少直到所有的时隙都不相同或者时隙满换信道。

L-UE 通过随机接入后与基站进行数据交互, 完成其他的操作如呼叫、资源请求、数据传输等。L-UE 的随机接入的过程为:

- (1) 基站下行发送时隙同步和时隙状态消息
- (2) L-UE 上行发送随机接入请求
- (3) LC-Station 下行发送入网权证
- (4) L-UE 接收权证进行入网

在步骤 (1) 中基站下发的时隙状态中主要是包含当前信道下时隙状态, 即是否还有空闲时隙; 步骤 (2) 中随机接入请求包含本机的 SN 和接入请求指令; 步骤 (3) 中的权证包含允许接入的 L-UE 设备 SN 和被分配的时隙。

## 2.2 LC-Station 功能设计

LC-Station 在 L-T 网络中相当于主机位置固定, 一般可将 LC-Station 中设计为单信道或多信道基站, 信道的多少决于 LoRa 芯片的数量。假如需要将 L-T 网络与互联网相连接, 可以给 LC-Station 加上以太网或 WIFI 芯片, 再配合路由器或其他网关就可以实现。LC-Station 在网络中设计为 3 个功能: 信道管理、L-UE 控制和数据处理。

### 1) 信道的管理:

信道管理不善会引起信道和时隙的错乱, 严重影响 L-UE 接入。每一个 LC-Station 里面都需要建立一张信道和时隙表, 这和 L-UE 相似但又不同。相似的是, 他们都需要知道自身支持那些信道, 而且 L-UE 和 LC-Station 的时隙表一样; 不同的是, L-UE 具体使用的是哪一个信道不确定的, 但 LC-Station 的信道是确定的, 而且信道表的范围要比 LC-Station 的多。这是因为, 在 L-T 网络中为主机角色它的位置固定, 信道数量取决于 LoRa 芯片的数量, 一个芯片对应一个信道。L-UE 是可移动的手持设备, 手持人员可以在不同的区域行走从而接入不同的基站, 因此 L-UE 的信道表数量要比 LC-Station 的多。

LC-Station 的信道数量是不能增加但是可以删减, 具体的信道频率和时隙数量也可以更改。更改时隙数量意味着通讯的周期也会做出相应的更改, 假设原先的通讯周期为  $T$ , 时隙均匀每个时隙为  $\Delta t$ , 增加隙后的周期  $T = T + N * \Delta t$ ,  $N$  为增加的时隙数量。这些更改都是可以通过软件层面进行配置, 比如通过 USART、以太网通信接口进行配置, 但需要拟定配置协议。

LC-Station 发送的下行协议中包含当前信道的时隙数量和状态, 当前信道的时隙数量和状态会根据接入的 L-UE 设备数量进行改变。L-UE 接入 LC-Station 后, LC-Station 会记录哪个信道下哪一个时隙已经被占用, 如果 L-UE 设备由通信状态转为空闲状态 LC-Station 将会释放相应的时隙留给有需要的 L-UE 设备。

### 2) L-UE 控制:

LC-Station 在 L-T 网络中处于控制中心的地位, 它主要对接入的 L-UE 设备进行控制。这些控制包括允许 L-UE 接入, 严禁某 L-UE 接入, 强制 L-UE 下线。允许

L-UE 接入则是对其开放了权限, L-UE 可以根据当前信道下的时隙状态进行接入。严禁某 L-UE 设备接入则是将其列入黑名单, 无论是否有空闲时隙该设备均无法接入。强制下线是当 L-UE 设备已经接入了 LC-Station, 但由于其他原因需要将其从网络中剔除或其占用的时隙需要释放则进行强制下线。

### 3) 数据处理:

LC-Station 的数据处理有 3 方面, 包括对上行协议中特殊字段、有效数据的提取以及对有效数据的处理。特殊字段表征当前 L-UE 设备的各种状态, 提取后用以分析和向管理人员显示, 如电量状态。有效数据提取则是手持 L-UE 的人发出的, 可以是文字、语音和图片, LC-Station 需要将其进行提取。特殊字段和有效数据的提取都需要 LC-Station 进行处理, 处理可以由 LC-Station 进行, 也可以进行转发交给电脑终端。

## 3 L-UE 组网通信协议

L-UE 和 Station 通信必须建立通讯协议, 该通信协议可保证每个 L-UE 设备都能顺利的接入基站并和基站通信。通信协议分两部分: (1) 下行通信协议即基站端发送; (2) 上行通信协议即 L-UE 设备发送。

基站端向 L-UE 设备发送数据时遵循的是下行通信协议, 下行通信协议格式如表 1 所示。

表 1 下行通信协议

Header	C_ Channel	Solt_ State	AC_ Wat	Des_ SN	PayLoad	Off_ Line	End
报头	当前 信道	时隙 状态	入网 权证	目的 SN	有效 数据	L-UE 离线	报尾

下行通信协议分三类, 入网协议和数据通信协议以及控制 L-UE 协议。信道、时隙状态、入网权证为入网协议, 目的 SN、负载数据为数据通信协议, L-UE 离线为控制协议。下行协议的长度是定长的, 各个部分具体作用如下:

①数据头 (Header): 用于数据开头的检验以及该数据包长度的说明, 因为有效数据是不固定的因此数据包的长度也是不定的。

②当前信道 (C\_Channel): 当前通信的信道

③时隙状态 (Solt\_State): 当前信道的各个时隙是否有空闲

④入网权证 (AC\_Wat): 允许 L-UE 设备接入的命令, 包含允许接入的设备 SN 以及允许接入的时隙。

⑤目的 SN (Des\_SN): 要与 L-UE 设备通信的 SN

⑥数据负载 (PayLoad): 与 L-UE 设备交互的数据

⑦L-UE 下线 (Off\_Line): L-UE 设备进行强制下线控制字段

⑧报尾 (End): 用于数据结尾的检验

L-UE 设备向基站发送数据时遵循的是上行通信协议,

上行通信协议格式如表 2 所示。

表 2 上行通信协议

Header	UE_SN	AN_State	PayLoad	UE_State	End
报头	本机 SN	入网状态	有校数据	本机状态	报尾

该上行协议支持入网和向基站发送数据, 各个协议部分作用如下:

①数据头 (Header): 用于数据开头的检验以及该数据包长度的说明, 因为有效数据是不固定的因此数据包的长度也是不定的。

②本机 SN (L-UE\_SN): L-UE 设备的唯一序列号

③入网状态 (AN\_State): 向 LC-Station 说明当前设备是处于接入状态, 数据通信状态或离线状态。接入状态是在接入过程中有响应, 接入成功之后该字段变为通信状态。离线状态对应 LC-Station 的 L-UE 离线, L-UE 收到强制下线命令后会在入网状态中响应, 并发送给 LC-Station。

④有效数据 (PayLoad): 与基站交互的数据

⑤本机状态 (UE\_SN): 该字段在通信状态下用来表示当前 L-UE 某些硬件状态, 例如电量等。

⑥报尾 (End): 用于数据结尾的检验

## 4 实验过程

### 4.1 实验设计

本实验采用 SX1278 LoRa 模块 + STM32F103MCU 组成 L-UE 终端; 用 SX1278 LoRa 模块 + STM32F407MCU 组成基站; 用 USART 转以太网接口模块连接基站和电脑。为了能反映在复杂的环境中 LoRa 也能很好的通信, 实验环境选择复杂的公寓中狭窄走廊以及房间中。

### 4.2 实验步骤

(1) 根据上述上下行协议, 分别为 L-UE 和基站编写程序并将三个设备信道频率均设置为 433 MHz, 即相同的信道。通信周期设置为 1 200 ms, 每一个时隙为 100 ms 加 20 ms 冗余, 共 10 个时隙。

(2) 选两个 L-UE 设备, 一个基站, 一台 PC, 将 L-UE 设备放在公寓下一层走廊尽头, 基站放在公寓上一层另一走廊尽头, 两者水平相距大约 200 m。

(3) 让两个 L-UE 均接入 LC-Station, 接入后如果收到 LC-Station 的命令后两个 L-UE 将按设定的程序向 LC-Station 发送数据, 收到强制下线命令后 L-UE 将会停止数据的发送。L-UE1 发送” L-UE1 LoRa Communication is OK!”, L-UE2 发送” L-UE2 LoRa Communication is OK!”。

(4) 将基站通过 USART 转以太网接口模块连接 PC, 通过 PC 端网络调试工具发送” L-UE Are you OK”, 并观察调试工具中两个 L-UE 的数据, 最后强制 L-UE2 下线。

### 4.3 实验结果

PC 端发送命令后经基站转发到 L-UE 设备, 两个 L-UE 均能收到命令并给予回复, 通过时间戳可观察数据的时隙, 实验结果如图 6 所示。

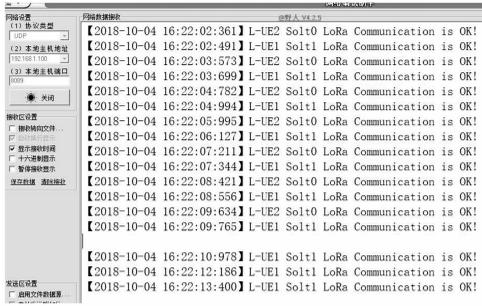


图 6 L-UE 的数据接收

由实验数据可知, L-UE1 占用的是第 1 个时隙, L-UE2 占用的是第 0 个时隙, 理论上这两个时隙相差 120 ms 但由于硬件和软件方面的因素有一些延迟, 延迟的时间也在 10 几毫秒, 相应的通信周期也有一定的延迟, 也在 10 几毫秒。在第 9 秒的时候强制 L-UE2 下线, 这时只剩下 L-UE1。该实验证实了以 TDMA 的方式对 LoRa 进行组网是可行的, 这两个 L-UE 均随机接入了相同的信道并且在不同的时隙下进行通信互不影响, 并且 LC-Station 还能对两个 L-UE 进行控制。

### 5 结束语

根据 LoRa 目前的发展现状以及其自身特点, 提出了 L-T 技术并设计对应的上下行协议, 该方法能有效的使 L-UE 设备进行大规模组网以及扩大 L-UE 使用人员活动范围。L-UE 数量的增多和通信周期成正比, L-UE 越多需

(上接第 205 页)

称的精度, 又加快了电子称重量显示的速度。在工厂流水线生产模式中, 如果需要称量产品的重量, 本设计将节省大量时间。

### 参考文献:

[1] 王德清, 胡晓毅, 贾宏, 等. 基于 SPCE061A 的高精密电子秤设计与实现 [J]. 测控技术与仪器仪表, 2008, (5): 84-85.

[2] 周继裕, 陈思露, 符少文. 基于均值滑动滤波算法和 STM32 电子秤的设计 [J]. 现代电子技术, 2017, 40 (10): 10-12.

[3] 罗及红. 一种高精度的电子称设计 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (8): 1995-1997.

[4] 张江辉, 陈翠华, 宁全利, 等. 几种滤波在数据自动平滑处理中的对比分析 [J]. 四川兵工学报, 2013, 34 (4): 102-103.

[5] 李文宝, 陈建政, 邓霏. 电子天平无线遥测子系统的研究与实现 [J]. 中国测试, 2013, 39 (5): 99-101.

[6] 冯新宇. ARM Cortex-M3 体系结构与编程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.

要的时隙越多, 从而必须扩大通信周期, 因此数量和速度有时候需要做一个权衡。随机竞争的解决方案避免了时隙的冲突, 使 L-UE 能顺利的接入 LC-Station。LC-Station 的设计不仅能够高效的对 L-UE 进行控制还可以灵活的对数据处理, 信道和时隙管理功使 L-T 网络更加人性化。

### 参考文献:

[1] 徐松松, 周西峰, 郭前岗. 基于 ARM 平台的 ZigBee 网关设计 [J]. 微型机与应用, 2013, 16: 51-53.

[2] Lewark U J, Antes J, walheim J, et al. Link budget analysis for future E-band gigabit satellite communication links [J]. CEAS Space Journal, 2013, 4 (1), 41-46.

[3] Mohamed Aref, Axel Sikora. Free Space Range Measurements with Semtech LoRaTM Technology [A]. 2014 2nd International Symposium on Technology and Applications (IDAACS-SWS) [C]. Offenburg, 2014: 19-23.

[4] 李建中, 高宏. 无线传感网络的研究进展 [J]. 计算机研究与发展, 2008, 45 (1): 1-15.

[5] 李瑞芳, 李仁发, 罗娟. 无线多媒体传感器网络 MAC 协议研究综述 [J]. 通信学报, 2008, 29 (8): 111-123.

[6] 吕海寰, 蔡剑铭, 甘仲民等. 卫星通信系统 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1993.

[7] 刘丽宏, 李维. TDMA 帧结构研究 [J]. 无线电通信技术, 2007, 33 (4): 5-7.

[8] Park M, Rodopl V. Uwan-Mac: an energy-efficient MAC protocol for underwater acoustic wireless sensor networks [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2007, 32 (3): 710-720.

[9] Kurtis I, Kredo B, Mohapatra P. A hybrid medium access control protocol for underwater wireless networks [A]. Proc ACM WUWNET [C]. Montréal, Québec, Canada, 2007. 33-40.

[7] 中华人民共和国国家计量检定规程. JJF1336-2012 非自动称通用检定规程 [S]. 北京: 国家技术监督局, 2012.

[8] 苏振超, 薛艳霞, 赵兰敏. 材料力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.

[9] He B X, Lu G R, Chu K B, et al. Developing of high accuracy and low capacity strain gage based load cell for electronic scale [J]. Electronic Measurement & Instruments, IEEE Press, 2009, 2: 554-555.

[10] 李巧真, 李刚, 韩钦泽. 电阻应变片的实验与应用 [J]. 实验室研究与探索, 2011, 30 (4): 134-136.

[11] 焉晓贞, 罗清华. 基于卡尔曼滤波的动态传感数据流估计方法 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34 (8): 1849-1850.

[12] 钱华明, 夏全喜, 阙兴涛, 等. 基于 Kalman 滤波的 MEMS 陀螺仪滤波算法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31 (9): 1218-1219.

[13] 吕国英, 任瑞整, 钱宇华. 算法设计与分析 [M]. 北京, 清华大学出版社, 2006.

[14] Zhu P W, Hu C H. Design of wireless electronic scale based on MSP430 microprocessor [A]. 2012AASRI Conference on Computational Intelligence and Bioinformatics [C]. Elsevier, 2012: 581-587.