

清 华 大 学

综 合 论 文 训 练

题目：基于 LoRaWAN 的校园共享单车
系统的实现与分析

系 别：软件学院

专 业：软件工程

姓 名：马子俊

指导教师：曹志超 助理研究员

2018 年 6 月 12 日

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文的复印件，允许该论文被查阅和借阅；学校可以公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存该论文。

（涉密的学位论文在解密后应遵守此规定）

签 名：_____导师签名：_____日 期：_____

中文摘要

物联网（IoT）是当代信息社会继因特网和移动网络之后的又一次伟大创新，有着极为广阔的应用前景。据估计，到 2020 年全球将有约 240 亿个 IoT 设备。不同于因特网和移动网络，理想的 IoT 须同时具备功耗低和通讯距离长的特点。正因为如此，在过去的十年间，针对 IoT 的一系列低功耗广域网（LPWAN）协议不断被提出。作为最近提出的 LPWAN 协议，LoRaWAN 协议由于在物理层创新性地引入了基于啁啾扩频（CSS）的调制技术，显著提高了信号接受端的信号敏感度和噪声容忍度而备受关注。而当下，诸如共享单车等众多 IoT 应用使用的仍然是移动网络的通信技术。可以预见，使用 LPWAN 技术将是 IoT 应用的演进趋势。

本文应此趋势而作，探索了将 LoRaWAN 协议应用于校园共享单车系统的可行性。我们的工作如下：

1. 分析了校园共享单车系统的系统参数，提供了网关通讯范围的计算方法。
2. 实现了能够实时追踪骑行路径的校园共享单车系统原型，对校园环境下的节点发包率（PDR）和信噪比（SNR）之间的关系进行数学建模。
3. 对信号冲突下的节点 PDR，节点数量，占空比之间的关系进行数学建模，并通过数值模拟实验进行验证。
4. 结合 1 至 3，计算了网关的通讯范围，给出了利用 LoRaWAN 构建校园共享单车系统的方案。该方案相比采用移动网络具有低成本和低功耗的优势。

关键词：LoRaWAN；LPWAN；共享单车；物联网

ABSTRACT

Internet of Things(IoT) is another great innovation after the Internet and mobile network in the modern information society, which has a very wide application prospect. It is estimated that by 2020, there will be around 24 billion IoT devices in the world. Different from the Internet and mobile network, an ideal IoT must bear the characteristics of low power consumption and long communication distance. Therefore, a series of Low Power Wide Area Network(LPWAN) protocols targeted at IoT have been put forward over the past decade. As the latest LPWAN protocol under the spotlight, LoRaWAN protocol creatively introduces a modulation technology based on Chirp Spread Spectrum(CSS) in the physical layer and greatly improves the signal sensitivity and noise tolerance of the receiver. At present, many IoT applications such as shared cycling are still using the communication technology of mobile network. It is predictable that the employment of LPWAN technology will become an evolution of IoT applications.

This paper, serving as a step toward the evolution, explores the feasibility of using the LoRaWAN protocol to build a shared cycling system on campus. Our work is listed as follows:

1. We clarified parameters of the campus-shared cycling system and provided the method to determine the communication range of a gateway.
2. We implemented a prototype of the shared cycling system which is able to track the cycling route in real time, and mathematically modeled the relationship between the Packet Delivery Rate(PDR) and Signal to Noise Ratio(SNR) under in campus environment.
3. We mathematically modeled the relationship among the PDR, the number of devices and the duty cycle under the circumstance of singal collison and justified it through numerical simulation.
4. Combining 1 to 3, we calculated the communication range of a gateway and offered a solution for establishing a shared-cycling system on campus by LoRaWAN, which has the advantage of low cost and power consumption over

the mobile network.

Keywords: LoRaWAN; LPWAN; Shared Cycling; IoT

目 录

第 1 章	引言.....	1
1.1	课题背景、目的和意义	1
1.2	主要工作	2
1.2.1	系统分析和参数设定	2
1.2.2	系统原型的搭建	2
1.2.3	网关通讯范围的计算	2
1.2.4	应用方案的设计与评估	2
1.3	论文组织结构	2
第 2 章	预备知识.....	4
2.1	LoRa 通讯技术	4
2.2	LoRaWAN 协议	7
2.2.1	网络组成	7
2.2.2	数据传输模式	8
2.2.3	消息格式	9
2.2.4	中国地区参数	10
2.3	LDPL 模型	10
第 3 章	应用分析与原型实现.....	12
3.1	应用分析	12
3.1.1	单车需求量分析	12
3.1.2	数据传输模式选择	12
3.1.3	数据传输参数选取	13
3.1.4	节点占空比分析	13
3.2	原型实现	15
3.2.1	节点部分	16
3.2.2	网关部分	17
3.2.3	网络服务器部分	17
3.2.4	监控应用部分	18

第 4 章 计算网关的通讯范围.....	19
4.1 通讯范围的定义和计算方法	19
4.1.1 定义	19
4.1.2 计算方法	19
4.2 噪声环境下的 PDR.....	21
4.2.1 PDR 和 SNR 的关系	21
4.2.2 SNR 和传输距离的关系.....	22
4.2.3 PDR 和传输距离的关系.....	24
4.3 信号冲突下的 PDR.....	25
4.3.1 理论推导	25
4.3.2 模拟验证	26
4.3.3 结论推广	28
4.4 计算网关的通讯半径	28
第 5 章 方案阐述与评估.....	30
5.1 网关部署方案设计	30
5.2 应用方案阐述	31
5.3 应用方案评估	31
第 6 章 论文总结与下一步工作.....	33
6.1 论文总结	33
6.2 下一步工作	33
插图索引	34
表格索引	35
参考文献	36
致 谢	38
声 明	39
附录 A 外文资料的调研阅读报告	40
A.1 Modulation Technique	40
A.2 MAC Layer Protocol	40
A.3 Peer Comparison	41

A.4	Experiment Evaluation.....	41
A.5	Industrial Case	42
A.6	Conclusion.....	42

主要符号对照表

IoT	物联网 (Internet of Things)
LPWAN	低功耗广域网 (Low Power Wide Area Network)
CSS	啁啾扩频 (Chirp Spread Spectrum)
PDR	收包率 (Packet Delivery Ratio)
RSSI	信号强度指示 (Received Signal Strength Indicator)
LPDL	对数距离路径损耗 (Log-distance Path Loss)
BW	带宽 (Bandwidth)
SF	扩频因子 (Spreading Factor)
CR	编码速率 (Code Rate)
FEC	前向纠错码 (Forward Error-correction Code)
ACK	确认 (Acknowledgement)

第1章 引言

1.1 课题背景、目的和意义

IoT 是当代信息社会继因特网和移动网络之后的又一次伟大创新。IoT 通过通信感知技术将网络终端从计算机和移动通讯设备扩展到生活中的寻常物件，以期实现“万物互联”。而在 IoT 的部署过程中，一个直接的想法是将已经成熟的移动网络的通信技术“舶来”使用——这便是以共享单车为代表的诸多 IoT 应用当下的做法。但是，移动网络诞生的目的是为了解决人与人之间的通信问题。在面对物联网应用时，它暴露出了高功耗，高部署成本等一系列问题。为了让通信技术更好地贴合 IoT 的实际需求，近十年间涌现出许多针对 IoT 而设计的 LPWAN 协议。利用 LPWAN 技术改良现有 IoT 应用的通讯机制是 IoT 发展的必然趋势。

而 LoRaWAN 协议作为最新提出的开源 LPWAN 协议，其物理层创新性地引入了基于 CSS[4]的调制解调技术——LoRa 技术，这使得信号的传输可以很好地抵抗多径效应和多普勒效应的影响，极大地提高了信号接收端的解码性能，因而备受业界关注。例如，SX1276 型 LoRa 天线能够解码的 LoRa 信号的信号强度指示（RSSI）可以低至-148dBm，SNR 可以低至-20dB[2]。目前，LoRa 技术的专利持有者 Semtech 公司[3]正向 IoT 应用市场推行此通讯技术。

本文从校园共享单车这一实际 IoT 应用出发，探索利用 LoRaWAN 技术改良现有共享单车通讯机制的可能性。本文的工作旨在回答如下三个重要的问题：

1. 在满足校园共享单车通信需求的情况下，LoRaWAN 网关（以下简称网关）的通讯范围有多大？
2. 若共享单车需在整个校园内保持与网关的良好通信，应当如何在校园内部署网关？
3. 用 LoRaWAN 取代共享单车现有的移动通信机制，将获得哪些优势？

以上三个问题不仅是针对共享单车应用而提出，而且是 LPWAN 技术在众多 IoT 应用中真正落地生根所必须考虑的共性问题。因此，在给出一套可行的将 LoRaWAN 协议应用于共享单车的技术方案的同时，本文所阐释的分析思路也能够为其他 IoT 应用提供借鉴。

1.2 主要工作

1.2.1 系统分析和参数设定

为了将 LoRaWAN 技术应用于校园共享单车系统，我们首先合理估计了清华园内共享单车的总需求量。同时，我们从实时追踪用户骑行路径这一需求出发，定义了网关的通讯范围，设定了满足这一需求时 LoRaWAN 信号收发器（以下简称节点）的占空比，并为节点发送数据选择了合理的通讯模式和物理频段。

1.2.2 系统原型的搭建

当前市面上共享单车的车身智能锁普遍使用 GPRS 技术与蜂窝基站进行数据传输。而在我们的系统原型中，基于 STM32L0 控制器和 SX1276 天线的节点代替了智能锁；基于 STM32L0 控制器并依托三代树莓派的可编程网关代替了蜂窝基站；NEO-7N GPS 定位模块连接并实时采集节点所处的经纬度信息；云端的监控程序则利用百度地图 API 对节点的移动路径进行实时渲染。

1.2.3 网关通讯范围的计算

校园共享单车应用的实现离不开对网关通讯范围的合理考量。一方面，我们依托系统原型收集节点与网关之间的通讯距离和信噪比等实验数据，利用对数距离路径损耗（LDPL）模型描述了校园环境节点 PDR 与通讯距离之间的关系。另一方面，我们通过概率计算和数值模拟实验，揭示了信号冲突的情况下节点 PDR 与节点数量、占空比之间的关系。我们将两部分的实验结果相结合，计算得出了网关通讯范围的具体大小。

1.2.4 应用方案的设计与评估

在以上工作的基础上，我们给出了一套可行的利用 LoRaWAN 搭建校园共享单车系统的方案，具体包括能够容纳的单车数量，单车的通信模块的占空比，合理的网关数量和部署位置等。我们证实了将 LoRa 通信技术应用于校园共享单车系统相较于移动网络技术具有低功耗、低成本的优势。

1.3 论文组织结构

本文的其它章节安排如下：

第二章介绍了本文的预备知识，包括 LoRa 通讯技术，LoRaWAN 协议以及

LDPL 模型。

第三章讲述了校园共享单车系统的系统参数的分析过程和系统原型的实现。

第四章给出了网关通讯范围的定义和计算方法，介绍了为确定网关通讯范围的大小所做的工作，包括利用系统原型收集数据对校园环境下节点 PDR 和通讯距离之间的关系进行数学建模，计算并通过数值模拟实验验证信号冲突时节点 PDR 和节点数量、占空比之间的关系。

第五章给出了网关通讯范围的具体大小和利用 LoRaWAN 搭建校园共享单车系统中的方案，并对其进行了评估。

第六章对本篇论文的工作进行了总结，并对未来的工作进行了展望。

第2章 预备知识

2.1 LoRa 通讯技术

LoRa 通讯技术为 Semtech 公司的专利技术。该技术使用 CSS 对信息进行编码。由于 CSS 的射频脉冲信号在一个周期内的频率随时间做单调递增或者单调递减的变化，所以 LoRa 信号发射器和接收器之间的载波频率偏移可等价于时间偏移从而很容易在接收器的解码过程中被消除（即使频率偏移量达到了信道带宽的 20%，仍不影响解码性能[2]）。这给予 LoRa 通讯技术两个优点：1）LoRa 信号解码不受低速运动节点产生的多普勒效应的影响；2）LoRa 节点不必安装昂贵的高精度的晶振。不仅如此，该技术引入了前向纠错码（FEC），进一步降低了环境噪声和多径效应对信号的影响。这远优于传统信号调制方案如频移键控的解码性能，因而十分适合远距离通讯。

LoRa 通讯技术中有如下 3 个重要的参数可供使用者设定：带宽（BW），扩频因子（SF）和编码速率（CR）。BW 规定了信号的载波频率范围；SF 规定了调制过程中一个 Symbol 能够包含的 bit 数；CR 规定了信号在编码过程中的冗余度。这三个参数影响着发射节点的数据发送速率以及接收节点所能感知的 RSSI 和所能容忍的 SNR。

BW 是 LoRa 信号调制技术中最重要的参数。一个 Symbol 由 2^{SF} 个 Chirp 组成，这些 Chirp 的频率跨度恰好覆盖了整个信道频带。一个 Symbol 以一系列频率连续增加的 Chirp 开始，当某一个 Chirp 的频率达到信道频带的频率上界时，下一个 Chirp 的频率从信道频带的频率下界开始连续增长。图 2.1 给出了 $BW = 4\text{Hz}$, $SF = 2$ 时对应的 4 种不同的 Symbol 频率随时间的变化示意图。注意到不同 Symbol 中 Chirp 频率的间断位置是不一样的，这也就造成不同 Symbol 所表示的 bit 信息不同。一个 Symbol 可以有 2^{SF} 个可能的频率间断的位置，这意味着一个 Symbol 可以表示 SF 个 bit 信息。值得一提的是，具有不同 SF 的 LoRa 信号在同一个物理信道内传输时不会发生冲突，因此可以在一个物理信道中根据 SF 的不同划分出多个逻辑信道。

下面给出 LoRa 信号的数据发送速率与 BW, SF, CR 之间的关系。在 LoRa 中，一个 Chirp 的持续时间 T_c （单位 s）只取决于 BW，关系如下：

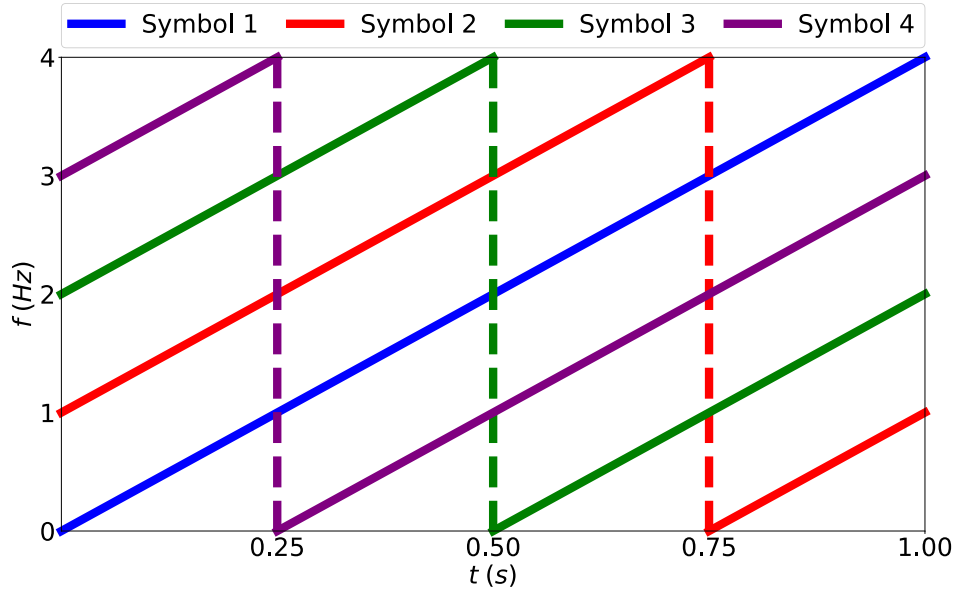


图 2.1 不同 Symbol 频率随时间的变化示意图

$$T_c = \frac{1}{BW} \quad (2-1)$$

考虑到一个 Symbol 由 2^{SF} 个 Chirp 组成，则一个 Symbol 的持续时间 T_s (单位 s) 为：

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (2-2)$$

由于一个 Symbol 包含了 SF 个 bit 信息，那么 bit 发送速率 R'_b (单位 bps) 为：

$$R'_b = \frac{SF}{T_s} = SF \times \frac{BW}{2^{SF}} \quad (2-3)$$

此外，LoRa 由于引入了 FEC 而使得传输的数据带有冗余。冗余度用 CR 表示如下：

$$CR = \frac{4}{n+4}, \quad n \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (2-4)$$

综上，有效数据发送速率 R_b （单位 bps）为：

$$R_b = SF \times \frac{BW}{2^{SF}} \times CR \quad (2-5)$$

以一个典型的参数配置为例：

$$BW = 125\text{kHz}, SF = 7, CR = \frac{4}{5}$$

数据的有效发送速率为：

$$R_b = 5.5\text{kbps}$$

BW，SF，CR 除了决定数据的发送速率，同时也影响接收端的解码性能。一般说来，BW 的增加会降低接收端的信号灵敏度，而 SF 的增加则可以提高接收端的信号灵敏度（如表 2.1 所示）。此外，SF 的增加也可以提高接收端的噪声容忍度（如表 2.2 所示）。而提高 CR 由于增加了数据的冗余度，因此也会提高接收端的噪声容忍度。

表 2.1 不同 BW 和 SF 下 SX1276 接收端信号敏感度[2]

BW(kHz) RSSI(dBm) \ SF	SF					
	7	8	9	10	11	12
125	-123	-126	-129	-132	-133	-136
250	-120	-123	-125	-128	-130	-133
500	-116	-119	-122	-125	-128	-130

表 2.2 不同 SF 下 SX1276 接收端噪声容忍度[2]

SF	SNR(dB)
7	-7.5
8	-10

9	-12.5
10	-15
11	-17.5
12	-20

2.2 LoRaWAN 协议

与 LoRa 通讯技术的封闭性不同，LoRaWAN 协议是一个构建在 LoRa 通讯技术之上的开源链路层协议，由 LoRa 联盟[5]进行维护。本小节对于 LoRaWAN 协议的介绍基于最新的 LoRaWAN 协议说明 V1.1[1]（2017 年 10 月发布）和 LoRaWAN 地区参数说明 V1.1[6]（2018 年 1 月发布）。

2.2.1 网络组成

LoRaWAN 协议中定义了组成一个 LoRaWAN 必须的 3 个部分：节点、网关和网络服务器（如图 2.2 所示）。它们的作用分别如下：

- 节点——使用 LoRa 通讯技术发射数据包的低功耗传感器。
- 网关——将来自节点的数据包转发到网络服务器，转发使用 IP 链路（如以太网或者 3G 网络），目的是为了提高网关的吞吐量。一个 LoRaWAN 中可以部署多个网关。一个节点发送的数据包也可以被多个网关接收并转发。
- 网络服务器——负责对网关发送的数据包进行去重和解码，必要时会选择一个网关以发送对于来自节点的数据包的应答。

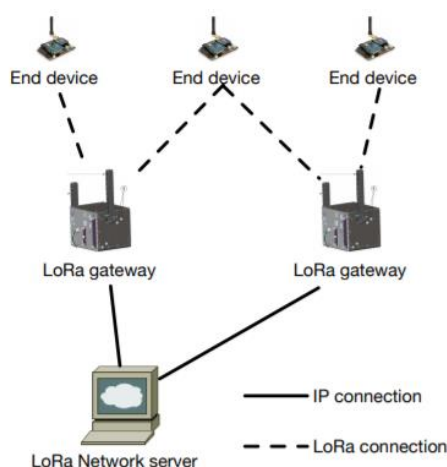


图 2.2 LoRaWAN 组成[15]

与传统的移动网络不同，节点接入 LoRaWAN 并不需要绑定特定的网关。只要节点发送数据包所用信道处于网关的监听频段之中，网关就会接收并转发数据包。而网络服务器在没有得到节点接入信息的情况下可以选择拒绝接收网关转发的数据包。网关只是简单地负责对节点和网络服务器之间传输的数据包进行中继，并在中继的过程中向数据包添加有关链路质量的信息（如 RSSI 和 SNR）。节点只与网络服务器相关联（网络服务器存储节点 ID 等信息）。所以从逻辑上讲，网关对于节点和网络服务器均是透明的。

2.2.2 数据传输模式

为了满足不同类型的 IoT 应用需求，LoRaWAN 协议中规定了 3 种节点和网络服务器之间的数据传输模式：

A 类模式：该类传输模式下，上行传输（即节点向网络服务器发送数据）比较灵活；而下行传输（即网络服务器向节点发送数据）则比较被动。节点在每次完成上行传输之后才会开启两个短暂的下行传输的接收窗口。这意味着服务器若需要进行下行传输，必须等到下一次上行传输发生之后方可。节点在 A 类模式下的功耗最低，这是以下行传输缺乏灵活性为代价的。协议规定所有接入 LoRaWAN 的节点必须支持此种数据传输模式。

B 类模式：该类传输模式在 A 类传输模式的基础之上，还允许节点开启额外的接收窗口以便让服务器主动进行下行传输。为了使得网络服务器能够知道节点何时在侦听，打开额外接受窗口的时间需要双方约定。为此还需传输用于同步时钟的信标。B 类模式的下行传输比 A 类模式更为灵活，但这是以降低网络实际吞吐量和增加节点功耗为代价的。接入 LoRaWAN 的节点可以不支持此种工作模式。

C 类模式：该类传输模式下的节点没有休眠期。节点在除发送数据以外的时间里都在等待接受数据包。毫无疑问，该类数据传输模式下消息延迟最小，节点运行功耗最大。

值得注意的是，为了提高系统的抗干扰能力，LoRaWAN 允许系统中的节点进行跳频传输（即改变使用的物理信道）。此外，LoRaWAN 协议不启用设备到设备的通信（尽管这在技术上是可行的）。数据包只能够以网关为中继在节点和网络服务器之间传输。如果的确需要进行设备到设备的通信，则需要利用上行传输和下行传输进行实现。

2.2.3 消息格式

LoRaWAN 协议中详细描述了帧格式。根据帧的用途、是否需要确认（ACK）等，大体上分为 8 种。不同种类的帧在域的设置和取值上有所不同。图 2.3 展示了用于传输数据信息（而非控制信息）的上行帧的结构。相关域的说明和长度在表 2.3 中进行了梳理。

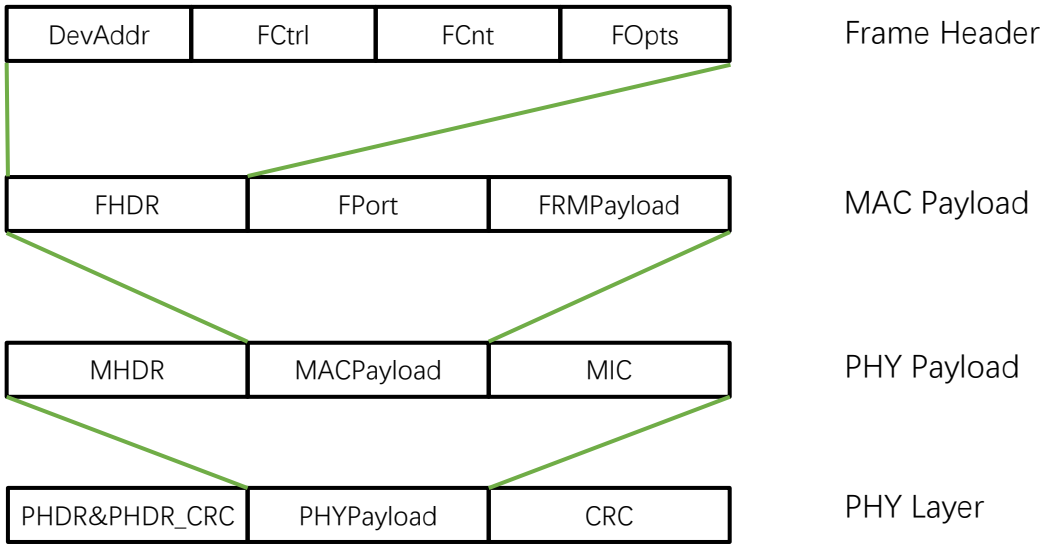


图 2.3 上行数据帧结构

表 2.3 上行数据帧说明

域	内容说明	包含的 bit 数
PHDR &PHDR_CRC	物理层包头及其循环冗余校验码	20
CRC	物理层有效载荷的循环冗余校验码	16
MHDR	链路层包头	8
MIC	消息完整码	32
FPort	消息发往的端口	8
FRMPayload	加密后的数据信息	不确定
DevAddr	消息源的短地址	32
FCtrl	额外的控制信息，如是否需要 ACK	8
FCnt	帧的序列号	16

2.2.4 中国地区参数

LoRaWAN 地区参数说明中规定了全球各地区的 LoRaWAN 的通讯参数，包括通信的 ISM 物理频段，节点发送数据的最大功率以及一次数据发送的最大时长等。表 2.4 列举了中国地区 LoRaWAN 的通讯参数。

表 2.4 中国地区 LoRaWAN 的通讯参数

物理频段(MHz)	470-510	779-787
BW(kHz)	125	125
信道数量	144=上行信道 96+下行信道 48	36，不区分上/下行信道
SF	7-12	7-12
CR	4/5	4/5, 4/6, 4/7, 4/8
前导码长度(symbol)	8	8
发送功率限制(dBm)	<19.15	<12.15
发送时长限制(ms)	≤5000	无
占空比(%)	无	<1

需要说明的是，尽管 LoRaWAN 协议在 470-510MHz 的物理频段中划分出 96 个上行传输信道（按照信道频率递增编号 0-95）。但编号为 6-38 和编号为 45-77 的信道事实上被国家电网占用。实际部署 LoRaWAN 时若采用此物理频段需在未被国家电网占用的信道中进行通讯。

2.3 LDPL 模型

相比于有线链路，信号在无线链路中的传播会受到更多来自环境的干扰，比如传播路径上建筑物对信号的遮挡、反射以及环境噪声。因此，对无线信号在传播过程中的衰减情况进行准确描述是一件困难的事情。

LDPL 模型[19]被广泛用于描述远距离传输（传输距离远大于信号波长）情况下无线信号衰减情况。在该模型中，接收信号强度 P_r （单位 dBm）和传输距离 d （单位 m）之间满足如下关系式：

$$P_r(d) = P_t - \overline{PL}(d_0) - 10n \lg \frac{d}{d_0} - X_\sigma \quad (2-6)$$

其中 P_t 为信号的发射功率, $\overline{PL}(d_0)$ 是传输距离为 d_0 时的平均路径损耗, n 是路径损耗系数, $X_\sigma \sim N(0, \sigma)$ 则代表了由于环境中不同位置的遮挡和反射等情况不同而造成的路径损耗的波动。

考虑环境噪声 $P_n \sim N(\overline{p_n}, \sigma_n)$ 与 X_σ 独立, 可以得到接受信号的信噪比SNR(d) (单位 dB) 和传输距离 d (单位 m) 之间存在如下关系:

$$\text{SNR}(d) = P_r(d) - P_n \sim N(\overline{\text{SNR}}(d), \sigma_{\text{SNR}}) \quad (2-7)$$

其中

$$\overline{\text{SNR}}(d) = b - 10n \lg d \quad (2-8)$$

$$\sigma_{\text{SNR}} = \sigma + \sigma_n \quad (2-9)$$

式(2-8)中的 b 和 n 可以通过在实际环境中收集信噪比和通讯距离数据进行线性回归分析求得。式(2-9)中的 σ_{SNR} 可以通过对实际信噪比和线性回归预测值之间的差值进行高斯分布估计求得。进而我们可以得到当传输距离为 d 时, SNR(d)不小于阈值 γ 的概率:

$$P(\text{SNR}(d) \geq \gamma) = Q\left(\frac{\gamma - \overline{\text{SNR}}(d)}{\sigma_{\text{SNR}}}\right) \quad (2-10)$$

其中Q函数的定义如下:

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^\infty e^{(-\frac{x^2}{2})} dx \quad (2-11)$$

第3章 应用分析与原型实现

3.1 应用分析

一个完善的共享单车系统应当具备单车开锁，单车关锁，单车定位等多种功能，因而共享单车与网关之间传输的数据内容可能有多种，如单车经纬度信息，开锁关锁控制信息，必要的 ACK 等。考虑到对单车骑行路径进行实时追踪这一功能对系统的网络传输性能要求较高（处于骑行状态下的单车需较停放状态下的单车更快地发送位置信息），因而我们以“骑行路径追踪”这一系统功能为研究对象。

3.1.1 单车需求量分析

合理估计校园师生对共享单车的需求量是确定 LoRaWAN 部署方案的先决条件。我们依据校园内共享单车高峰期使用量估计需求总量，即

$$\text{Demand} = P * (1 + R) \quad (3-1)$$

其中 Demand 为需求总量，P 为高峰期使用量，R 为冗余比例，用于应对高峰期存在的其他单车使用需求。我们采用校内学生上早课时的单车使用量估计 P：

$$P = A * B * C \quad (3-2)$$

其中 A 为清华大学的在学学生人数，截至 2017 年 12 月 31 日共计 47762 人 [7]。B 为上早课的学生比例。假设每个学生平均 1 天要上 1 节课，而学校 1 天排 5 节课，则 B 定为 20%。C 为上早课的学生中使用共享单车的学生比例，定为 5%。冗余比例 R 取 20%。据此得到 $P = 478$ ， $\text{Demand} = 573$ 。考虑到清华园的校园面积为 450.38 公顷 [7]，则共享单车的需求量密度 $\rho = 1.27 * 10^{-4}$ 辆/m²，即平均每 7860m² 的校园占地上将停放 1 辆共享单车。

3.1.2 数据传输模式选择

由于单车在骑行过程中的位置变化比较迅速，为了“骑行路径追踪”的实时性，节点在发送单车的地理位置信息时不要求网络服务器返回 ACK。否则，由于

地理位置信息或者 ACK 丢失而导致节点重传数据会造成网络服务器获取到的单车地理位置信息具有滞后性。

如 2.2.2 所述, LoRaWAN 协议规定了数据传输的三类模式。考虑到“骑行路径追踪”仅需 LoRaWAN 存在上行传输——节点上传单车的经纬度信息, 网络服务器无需回复 ACK, 因此选择 A 类数据传输模式。这样既能满足“骑行路径追踪”功能对于数据传输的需求, 又能降低节点功耗。

3.1.3 数据传输参数选取

为了保证“骑行路径追踪”的实时性, 节点需要具有较短的数据发送周期。如 2.2.4 所述, 在中国地区 LoRaWAN 的两个可用频段 470-510MHz 和 779-787MHz 中, 前者对节点的占空比没有限制; 后者限制了节点的占空比必须小于 1%, 显然无法满足“骑行路径追踪”对数据发送周期的要求。故系统选择 470-510MHz 频段进行通讯。表 3.1 给出了系统的其他数据传输参数的设置。

表 3.1 系统数据传输参数设置

数据传输参数	取值	理由
发送功率(dBm)	19	扩大网关通讯范围
BW(kHz)	125	协议规定
SF	7-12	提高信道利用率
CR	4/5	协议规定
上行信道编号	80-87	LoRaWAN 网关最多监听 8 个物理信道, 同时规避国家电网占用的信道
通讯频率范围(MHz)	486.3-487.7	对应上行信道编号

3.1.4 节点占空比分析

为确定节点传送地理位置信息的占空比, 我们首先考虑节点传输地理位置信息所需要的时间。本研究所用的 NEO-7N GPS 定位模块采集 128bit 的经纬度信息, 后经链路层和物理层封装进行发送, 数据传输时间:

$$T_{tx} = T_{pre} + T_{data} \quad (3-3)$$

T_{pre} 是前导码的发送时间, 考虑到前导码长度为 8 symbol, 则

$$T_{pre} = 8 \times T_s \quad (3-4)$$

T_{data} 是数据部分的发送时间，考虑到系统中只包括无需 ACK 的上行数据帧，故数据部分长度为 268bit。结合表 2.3 可知

$$T_{data} = \frac{268}{R_b} \quad (3-5)$$

因此节点实际发送地理信息所需要的时间随采用的 SF 不同而不同(见表 3.2)。

表 3.2 不同 SF 下的地理信息发送时间

SF	7	8	9	10	11	12
$T_{tx}(ms)$	57	102	185	340	630	1177

接下来考虑节点的数据传输周期。数据传输周期不可过长，否则节点上传的地理位置信息不足以对骑行路径进行准确追踪。下面结合校园内实际的道路情况，给出节点占空比的合理范围。

图 3.1 是利用路网分析工具 osmnx[9]从开源街道图 OpenStreetMap[9]上获取的校园内可骑行道路拓扑图。拓扑图中的点为道路的交汇点或者是道路的尽头，边则代表了无分叉的路段(以下称为单元路径)。整个清华园内可骑行的单元路径共有 1237 个，平均长度为 73.4m。假设人的骑行速度为 4m/s，则骑行经过一段单元路径的平均用时为 18.35s。为了保证“骑行路径追踪”的效果，用户平均每骑行完一段单元路径，节点要发送 $\tau(\tau \geq 1)$ 个数据包(以下称 τ 为占空比因子)。故数据传输周期的合理取值为：

$$T_{\tau} = \frac{18.35}{\tau} \quad (\tau \in N^+) \quad (3-5)$$

同时节点的占空比不超过 1。即

$$du = \frac{T_{tx}}{T_{\tau}} \leq 1 \quad (3-6)$$

据此可得不同的 SF 对应的占空比因子和占空比的取值范围(如表 3.3 所示)。

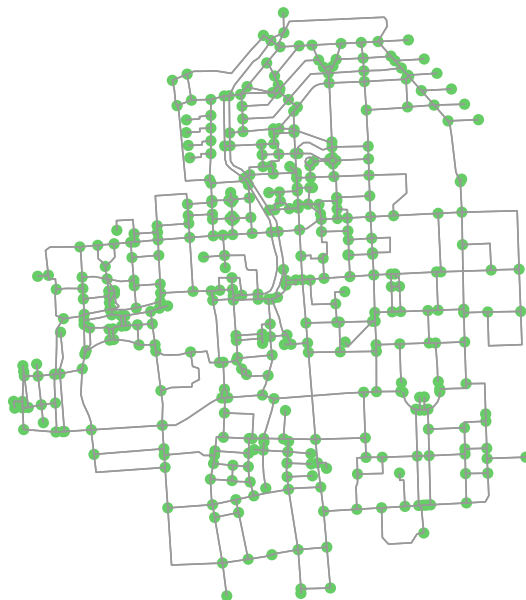


图 3.1 校园内可骑行道路拓扑图

表 3.3 不同的 SF 对应的占空比因子和占空比的取值范围

SF	7	8	9	10	11	12
τ	[1, 321]	[1, 179]	[1, 99]	[1, 53]	[1, 29]	[1, 15]
du	[0.003, 1]	[0.006, 1]	[0.010, 1]	[0.019, 1]	[0.034, 1]	[0.064, 1]

3.2 原型实现

依照 3.1 中分析得到的系统参数，我们搭建了校园共享单车的系统原型（如图 3.2 所示）。在此系统原型中，节点采集并上传地理位置信息发送至网关，网关将数据包通过 IP 链路转发至网络服务器，网络服务器从数据包中解析出地理位置信息后以 HTTP Post 的方式发送给监控应用进行可视化。以下分小节具体阐述系

统各部分实现。

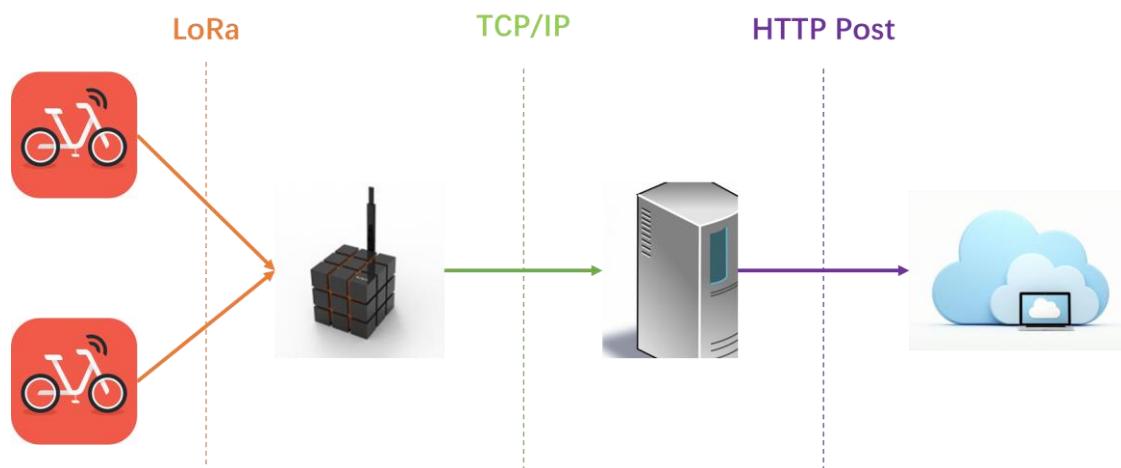


图 3.2 校园共享单车系统原型架构

3.2.1 节点部分

节点采用 STM32L0 系列控制单元和 SX1278 型号的天线，并连接 NEO-7N GPS 定位模块用于采集地理位置信息（如图 3.3 所示）。数据包发送程序参考了 Github 开源实现 LoRaMac-node[10]。通过修改开源实现中的宏定义，我们可以适配节点通讯使用的物理信道，BW，SF，CR 等参数。系统运行时，程序经 JLink 仿真器烧录到节点，随后节点被放置到单车的车筐内，用于模拟共享单车的智能锁。



图 3.3 连接 GPS 模块的节点（左）和三代树莓派的网关（右）

3.2.2 网关部分

网关采用 STM32L0 系列控制单元和 SX1276 型号的天线，连接三代树莓派方便进行编程（如图 3.3 所示）。数据包转发程序直接采用了 Github 开源实现 `lora_gateway`[11]和 `packet_forwarder`[12]。`lora_gateway` 实现了对网关设备中寄存器、SPI 等的操作，编译后生成静态链接文件被 `packet_forwarder` 引用，为其提供硬件抽象层。`packet_forwarder` 则实现了 LoRaWAN 协议中规定的网关转发操作。通过修改开源实现中的 `json` 配置文件，我们可以适配网关监听的逻辑信道，目标网络服务器的 IP 地址等。系统运行时，网关被放置在东配楼 500 教室门前的窗沿上并接入校园网。

3.2.3 网络服务器部分

网络服务器通过 Github 开源 Ansible 脚本[13]部署在了 Digital Ocean[14]的公有云中。系统运行前，管理员需要登陆网络服务器中的管理界面创建 IoT 应用，并且利用网关和节点的 ID 信息进行网关和节点的注册，以便网络服务器能够识别由本网络内的网关转发的来自本网络内节点的数据包。系统运行时，网络服务器会对来自本网络内的网关的数据包进行解析操作。利用管理界面可以实时查看网络服务器解析数据包的结果，方便管理员对网络中的故障进行诊断（如图 3.4 所示）。网络服务器会把数据包的解析结果通过 HTTP Post 的方式发送给监控应用。

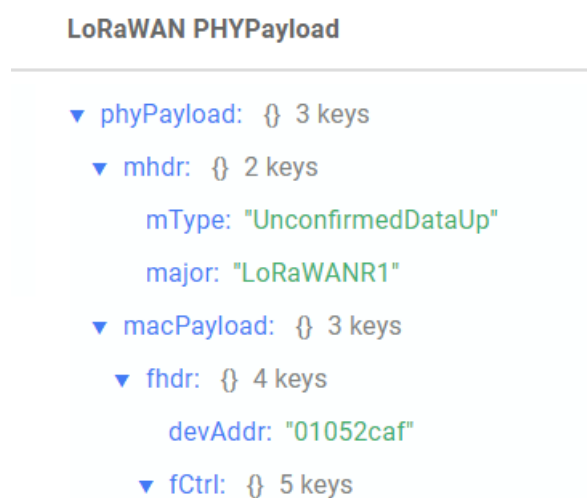


图 3.4 通过网络服务器的管理界面实时查看数据包解析结果

3.2.4 监控应用部分

监控应用同样部署在 Digital Ocean 公有云中，其后端采用 Django 2.0.4 Web 框架，从来自网络服务器的 HTTP Post 请求中提取节点的 ID，经纬度等信息；其前端利用百度地图 JavaScript API 3.0 对地理位置进行可视化展示(如图 3.5 所示)，同时计算节点与网关之间的通讯距离，显示网关接受到的 LoRa 信号的 RSSI 和 SNR，为后续实验提供数据支持。

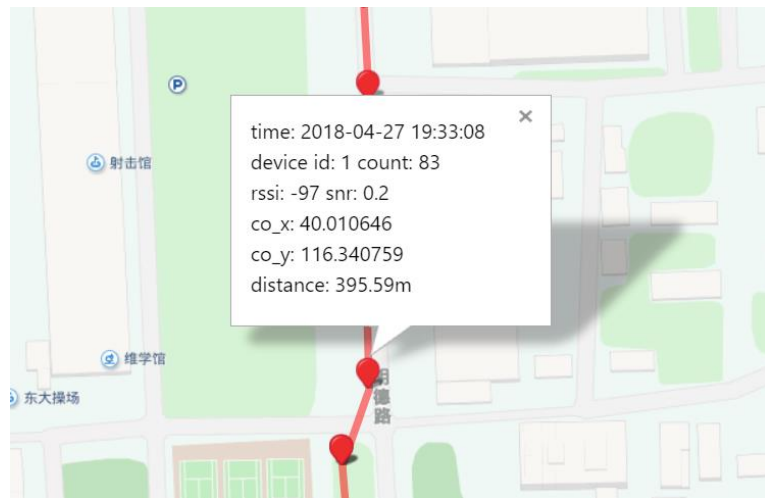


图 3.5 监控应用中单车地理位置的可视化展示

第4章 计算网关的通讯范围

本章中我们将依据第 3 章中的应用分析和系统原型，通过实验计算网关通讯范围的具体大小。我们首先给出网关通讯范围的定义和计算方法；之后围绕计算方法阐述进行的实验及结果；最后给出网关通讯范围的计算结果。

4.1 通讯范围的定义和计算方法

4.1.1 定义

网关的通讯范围有多大？这是任何一个星型网络架构在实际部署过程中都必须回答的一个问题。我们首先假定：

- 1) 网关的通讯范围是圆形区域，则问题转化为求通讯半径 r 。
- 2) 校内共享单车实际数量长期稳定在需求量附近。

我们对网关的通讯半径 r 定义如下：

距离 $d \leq r$ ，当且仅当所有通讯距离不大于 d 的单车在以网关为圆心， d 为半径的圆周附近骑行时，每辆单车在一段单元路径上发送的所有数据包中平均至少有一个被网关接收。此时称该单车与网关之间存在有效连接。

对通讯半径 r 的这一定义是“苛刻”的。其一，从空间上看，位于通讯范围内的所有单车几乎不可能同时集中在通讯范围的边缘处（即圆周处）；其二，从时间上看，通讯范围内的单车不太可能同时处于骑行状态。该定义的“苛刻”是为了保证计算得到的通讯半径在实际的网关部署中是可行的。

4.1.2 计算方法

节点发送的信号被网关接收^①需要满足 2 个相互独立的条件：

1. SNR 不低于网关对信号的噪声容忍度；
2. 没有受到同一逻辑信道内其他信号的干扰而变得不可解。

如 2.1 所述，网关对信号的噪声容忍度取决于信号采用的 SF；如 2.3 所述，SNR 与通讯距离 d 相关。我们用二元函数 $Y_1(d, SF)$ 表示通讯距离为 d ，节点采用 SF 发送信号时，条件 1 为真的概率。

而信号的相互冲突情况则与节点的数量 n ，节点的占空比因子 τ ，信号采用的 SF 相关。我们用三元函数 $Y_2(n, \tau, SF)$ 表示节点采用 SF 发射信号，占空比为 τ ，节

^① 无特殊说明，信号被网关接收指信号被网关收到且 CRC 校验正确。

点个数为 n 时，条件 2 为真的概率。

考虑通讯距离为 d_0 ，采用扩频因子 SF_0 并且占空比因子为 τ_0 的节点与网关之间存在有效连接，那么根据通讯范围的定义，有：

$$Y_1(d_0, SF_0) \times Y_2(n, \tau_0, SF_0) \times \tau_0 \geq 1 \quad (4-1)$$

则

$$n \leq Y_2^{-1}\left(\frac{1}{\tau_0 \times Y_1(d_0, SF_0)}, \tau_0, SF_0\right) \quad (4-2)$$

记 $\text{Capacity}(d, SF, \tau)$ 表示通讯距离 d 处，能够与网关建立有效连接的采用扩频因子 SF 并且占空比因子为 τ 的节点的最大数目。则

$$\text{Capacity}(d, SF, \tau) = Y_2^{-1}\left(\frac{1}{\tau \times Y_1(d, SF)}, \tau, SF\right) \quad (4-3)$$

记 $\text{Capacity}(d, SF)$ 表示通讯距离 d 处，能够与网关建立有效连接的采用扩频因子 SF 的节点的最大数目。则

$$\text{Capacity}(d, SF) = \max_{\tau \geq 1} Y_2^{-1}\left(\frac{1}{\tau \times Y_1(d, SF)}, \tau, SF\right) \quad (4-4)$$

记 $\text{Capacity}(d)$ 表示通讯距离 d 处，能够与网关建立有效连接的节点的最大数目。则

$$\text{Capacity}(d) = \sum_{SF=7}^{SF=12} \text{Capacity}(d, SF) \quad (4-5)$$

另一方面，3.1.1 中分析了校园内共享单车的需求量密度 ρ ，因此在以网关为圆心，半径为 d 的范围内需要建立有效连接的节点数为

$$\text{Demand}(d) = \rho \times \pi \times d^2 \quad (4-6)$$

当通讯距离 d 增加时，能够与网关建立有效连接的节点的最大数目 $\text{Capacity}(d)$ 是减少的；需要与网关建立有效连接的节点数 $\text{Demand}(d)$ 是增加的。必然存在一个通讯距离 r ，使得

$$\text{Capacity}(r) = \text{Demand}(r) \quad (4-7)$$

此时的通讯距离 r 即为网关的通讯半径。

上述计算得以实施的关键在于求得 $Y_1(d, SF)$ 和 $Y_2(n, \tau, SF)$ 。在 4.2 节中，我们将依托 LDPL 模型和系统原型的实验结果给出 $Y_1(d, SF)$ ；在 4.3 节中，我们将理论推导结合数值模拟实验验证的方式给出 $Y_2(n, \tau, SF)$ 。

4.2 噪声环境下的 PDR

4.2.1 PDR 和 SNR 的关系

在信号的调制模式和数据包大小一定的情况下，节点的 PDR 主要与 SNR 有关。由于网关在向网络服务器转发来自节点的数据包时会附加有 SNR 的信息，因此我们使用系统原型提供的 SNR 信息，探究了 PDR 和 SNR 的关系。

我们将网关部署在东配楼 500 教室门前的窗外沿台上，将一个节点放置在校园内的不同位置并采用不同的 SF 发送信号进行实验。每个位置节点使用一个 SF 连续发送 50-100 个数据包。对于被网关接收的数据包（以下简称有效数据包），其帧序号和 SNR 会记录并显示在监控应用当中。对于一个特定的 SF，我们取有效数据包的个数与发送的数据包总个数的比值，作为信噪比为有效数据包 SNR 的平均值 \overline{SNR} 时的 PDR。据此得到不同 SF 下 PDR 和 SNR 之间的关系（如图 4.1 所示）。

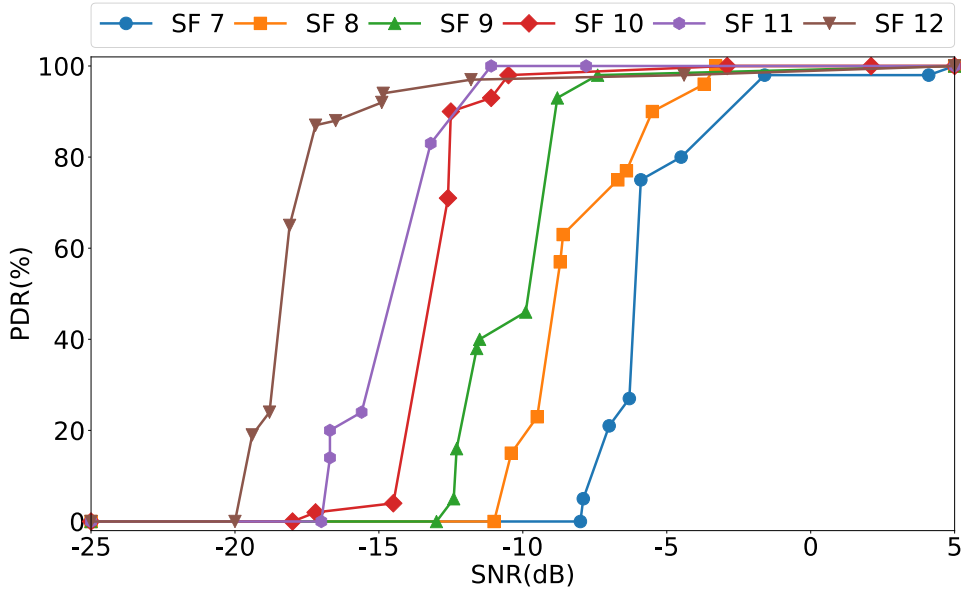


图 4.1 不同 SF 下 PDR-SNR 实验曲线

图 4.1 展示了不同 SF 下 PDR-SNR 实验曲线。这些曲线有着相同的特点，即随着 SNR 的不断降低，PDR 依次经历三个阶段：接近 100%，急剧下降，基本为 0。考虑到模型计算的可行性，我们用如下阶梯函数对上述曲线进行近似描述：

$$\text{PDR}(\text{SNR}, \text{SF}) = \begin{cases} 1, & \text{SNR} \geq r_{\text{SF}} \\ 0, & \text{SNR} < r_{\text{SF}} \end{cases} \quad (4-7)$$

不同 SF 下的 γ 值如表 4.1 所示：

表 4.1 不同 SF 下的 SNR 阈值 γ

SF	7	8	9	10	11	12
$\gamma(\text{dB})$	-6.1	-8.9	-9.8	-13.2	-14.5	-18.4

4.2.2 SNR 和传输距离的关系

我们利用 2.3 中介绍的 LDPL 模型刻画校园环境下 SNR 和传输距离之间的关系。我们将网关部署在东配楼 500 教室门前的窗外沿台上，用一辆单车载着节点

在校园内骑行。节点发送数据包的功率为 19dBm，骑行过程中节点和网关的通讯距离最远可达 1.2km。骑行过程中节点共发送 508 个数据包，其中有效数据包有 314 个。对于每一个有效数据包，监控应用都会记录并且显示数据包的 SNR，并且根据数据包内的经纬度信息计算传输距离 d 。我们对采集到的 $(\text{SNR}, \lg d)$ 进行线性回归分析，给出 $\overline{\text{SNR}}(d)$ 的具体表达式，之后对实际 SNR 和回归预测得到的 SNR 之间的残差进行高斯分布估计，给出 σ_{SNR} 。

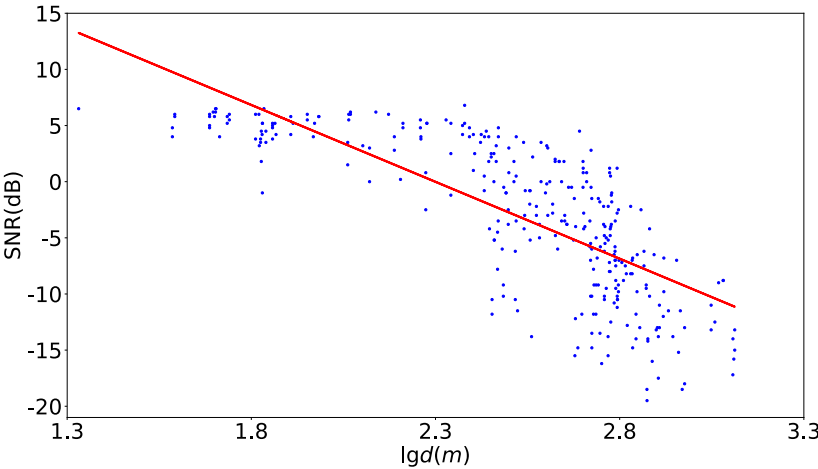


图 4.2 SNR- $\lg d$ 关系图

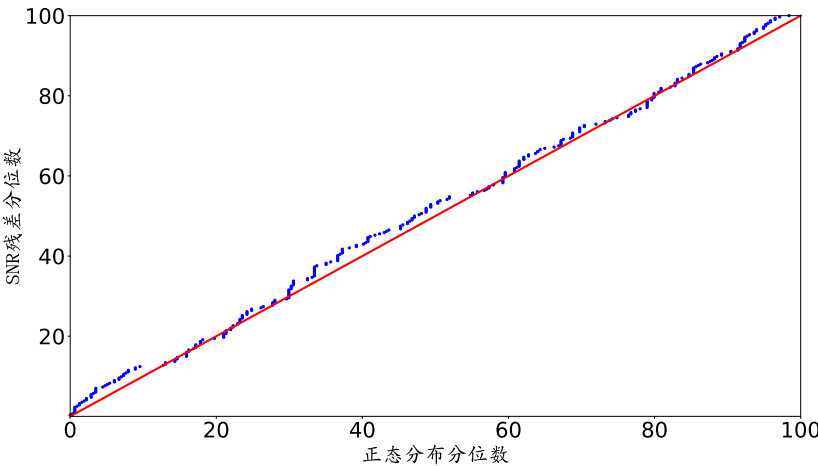


图 4.3 SNR 残差分布与 $N(0, 4.4)$ 分布的 Q-Q 图

图 4.2 给出了针对 $(\text{SNR}, \lg d)$ 的线性回归分析结果，回归直线方程为：

$$\overline{SNR}(d) = 31.5 - 13.7 \lg d \quad (4-8)$$

在线性回归分析的基础上，我们选用 Q-Q 图[16]来校验 SNR 的残差是否服从正态分布。图 4.3 给出了 SNR 残差分布与正态分布 $N(0,4.4)$ 的 Q-Q 图。图中两个分布的联合分位点均较好地落在了直线 $y = x$ 附近，这说明 SNR 的残差服从 $N(0,4.4)$ ，由此得 $\sigma_{SNR} = 4.4$ 。

4.2.3 PDR 和传输距离的关系

由于 4.2.1 中用阶梯函数近似描述了 PDR 和 SNR 的关系。因此当传输距离为 d 时，

$$PDR(d, SF) = P(SNR(d) \geq \gamma_{SF}) \quad (4-9)$$

结合(2-10)式有

$$PDR(d, SF) = Q\left(\frac{\gamma_{SF} - \overline{SNR}(d)}{\sigma_{SNR}}\right) \quad (4-10)$$

即

$$Y_1(d, SF) = Q\left(\frac{\gamma_{SF} - \overline{SNR}(d)}{\sigma_{SNR}}\right) \quad (4-11)$$

由于 4.2.1 和 4.2.2 给出了 γ_{SF} ， $\overline{SNR}(d)$ 和 σ_{SNR} ，因而我们可以得到

$$Y_1(d, SF) = Q\left(\frac{13.7 \lg d - 31.5 - \gamma_{SF}}{4.4}\right)$$

相应 $Y_1(d, SF)$ 曲线如图 4.4 所示。

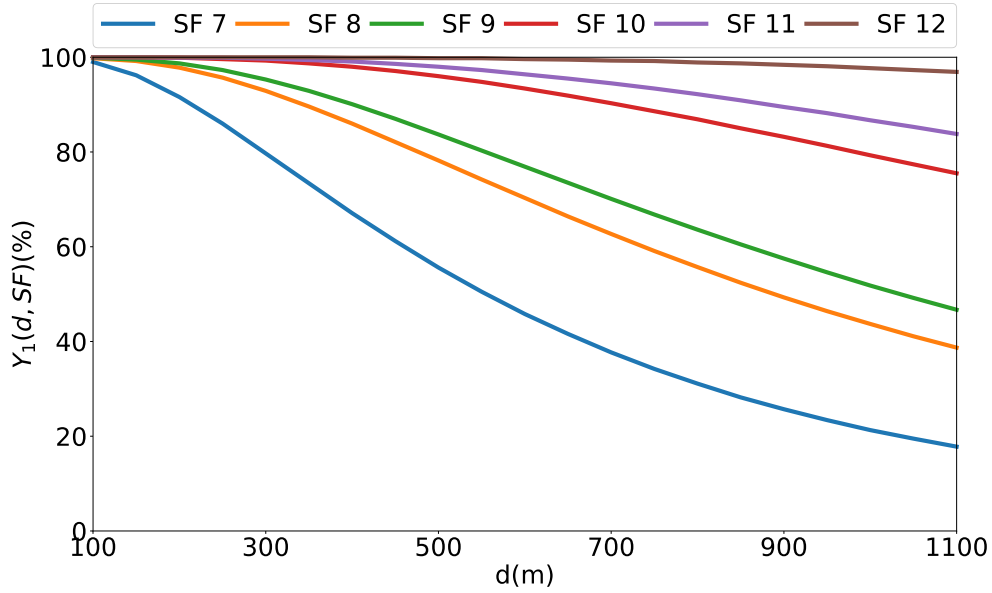


图 4.4 $Y_1(d, SF)$ 函数曲线

4.3 信号冲突下的 PDR

LoRaWAN 协议没有规定冲突机制，节点可以在任意时刻发送数据。本节中，我们将首先给出单一逻辑信道内信号冲突下 PDR 与节点个数 n ，占空比 du 的数学关系。介绍信号冲突模拟实验的实验方法，之后给出单一逻辑信道中的信号冲突结果，最后将实验结果推广到多逻辑信道，给出 $Y_2(n, \tau, SF)$ 。

4.3.1 理论推导

$$T_A = T'_A = du \times T$$



图 4.5 一个传输周期内网关接收信号

对于 LoRa 信号 a ，我们判定 a 信号由于冲突的缘故而无法被网关接收当且仅当同一逻辑信道内存在 LoRa 信号 b ，二者被网关接收的过程存在时域上的重

合。考虑在同一逻辑信道内有 n 个节点，占空比均为 du 。如图 4.5 所示，在某一个传输周期内网关在时间段 T_A 接收了来自节点 A 的 a 信号。为了使节点 A 的 a 信号不会受到冲突，则网关接受节点 B 的 b 信号的时间段 T_B 不得与 T_A 和 T'_A 重合。因此

$$P(\text{a 信号不与 b 信号冲突}) = \frac{T - T_A - T'_A}{T} = 1 - 2du \quad (4-12)$$

a 信号在该周期内不被冲突当且仅当网关接受其他节点的信号的时间段均不与 T_A 和 T'_A 重合。考虑到各节点的信号到达网关的时间是独立的，因此

$$P(\text{a 信号不被冲突}) = (1 - 2du)^{n-1} \quad (4-13)$$

又因为

$$du = \frac{T_{tx}(SF)}{T_\tau} = \frac{\tau \times T_{tx}(SF)}{18.35} \quad (4-14)$$

故单一信道内由于信号冲突的缘故，节点的 PDR 为

$$PDR(n, \tau, SF) = [1 - \frac{\tau \times T_{tx}(SF)}{9.175}]^{n-1} \quad (4-15)$$

4.3.2 模拟验证

我们通过数值模拟实验验证（4-11）的结论。模拟方法如表 4.2 所示：

表 4.2 数值模拟方法

数值模拟方法	
输入:	节点数 n , 占空比因子 τ , 扩频因子 SF , 周期数 $m=100$
输出:	n 个节点的平均 PDR
1:	<code>packet_failure = 0</code>
2:	<code>for i = 1 → n do</code>

```

3:      for j = 1 → m do
4:           $T_{begin}[i] = (i - 1) \times T_\tau + rand(0, T_\tau - T_{tx}(SF))$ 
5:           $T_{end}[i] = T_{begin}[i] + T_{tx}(SF)$ 
6:      for i = 1 → n do
7:          for j = 1 → m do
8:              for k = 1 → n do
9:                  for l = 1 → m do
10:                     if i ≠ k then
11:                         if ( $T_{begin}[k] \leq T_{begin}[i] < T_{end}[k]$  or
12:                             $T_{begin}[k] < T_{end}[i] \leq T_{end}[k]$  or
13:                             $T_{begin}[i] \leq T_{begin}[k] < T_{end}[i]$  or
14:                             $T_{begin}[i] < T_{end}[k] \leq T_{end}[i]$ ) then
15:                             packet_failure ++
16:      PDR = packet_failure / (n × m)

```

我们依照实验结果绘制了部分 SF 和 τ 取值下 PDR 与 n 之间的关系曲线（如图 4.6 中实线所示），依照 (4-11) 绘制了相应的理论曲线（如图 4.6 中虚线所示）。两类曲线高度重合表明模拟实验结果支持了理论推导。

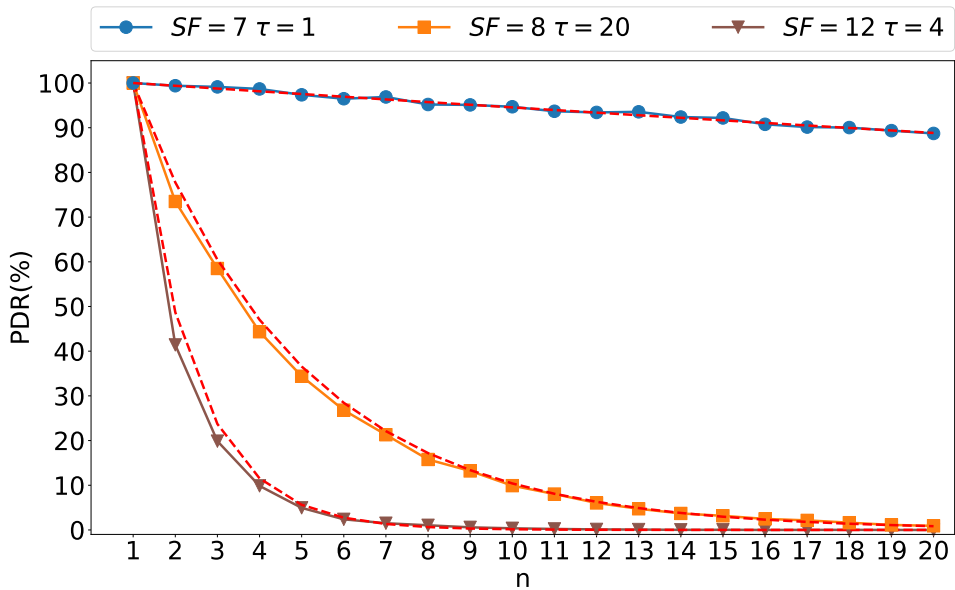


图 4.6 信号冲突模拟实验结果曲线和理论曲线

4.3.3 结论推广

由于 1) 不同物理信道中的信号不会相互冲突, 2) 节点在跳频传输的过程中对物理信道的选择是随机的。所以 4.3.1 中关于单逻辑信道内并发传输的结论可以直接推广到多物理信道的并发传输中, 即

$$Y_2(n, \tau, SF) = \text{PDR}\left(\frac{n}{8}, \tau, SF\right) = \left[1 - \frac{\tau \times T_{tx}(SF)}{9.175}\right]^{\frac{n}{8}-1} \quad (4-16)$$

4.4 计算网关的通讯半径

在 4.2 和 4.3 的基础上, 我们给出 Capacity(d)的表达式:

$$\text{Capacity}(d) = \sum_{SF=7}^{SF=12} \max_{\tau \geq 1} \left\{ 8 \log_{1 - \frac{\tau \times T_{tx}(SF)}{9.175}} \frac{1}{\tau \times Q\left(\frac{13.7 \lg d - 31.5 - r_{SF}}{4.4}\right)} + 8 \right\}$$

图 4.7 给出了 Capacity(d)和 Demand(d)的函数曲线。当 $d = 1031\text{m}$ 时, Capacity(d)恰好略大于 Demand(d)。据此可知校内网关的通讯半径 r 可达 1031m , 最多可以允许 423 辆单车同时与其建立有效连接。通讯范围内各 SF 对应的节点

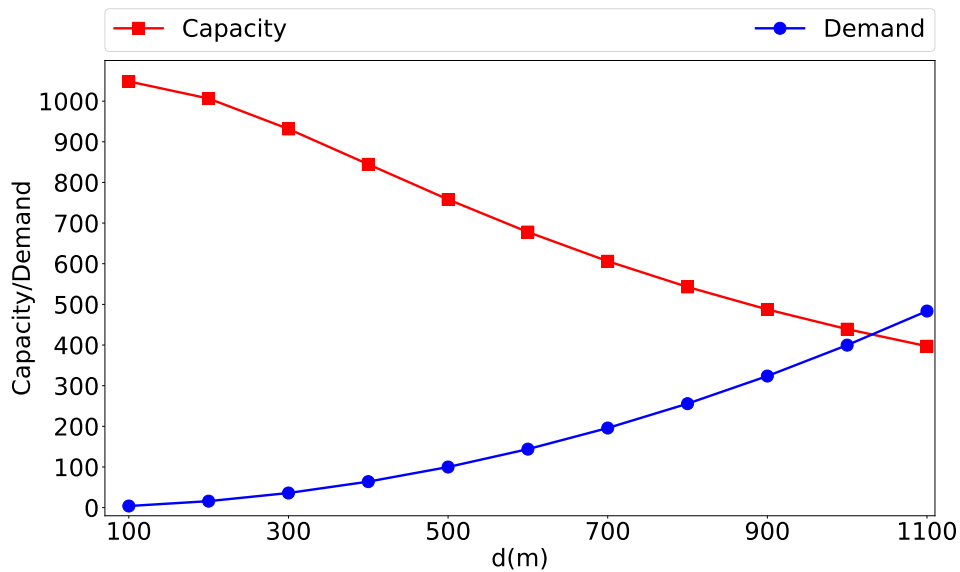


图 4.7 Capacity(d)和 Demand(d)的函数曲线图

数量 n ，占空比因子 τ 和占空比 du 如表 4.3 所示。注意到在网关的通讯范围内，不同 SF（即不同信道）对应的节点数量是不同的。因此就容量而言，信道之间是存在优劣之分的。这与直觉上每个信道的容量相同是相违背的。

表 4.3 通讯范围内各 SF 对应的节点数量 n ，占空比因子 τ 和占空比 du

SF	7	8	9	10	11	12
n	99	115	77	66	40	26
τ	12.9	6.2	5.1	3.2	2.8	2.3
$du(\%)$	0.040	0.034	0.051	0.059	0.096	0.148

第5章 方案阐述与评估

5.1 网关部署方案设计

3.1 中给出了校园的总占地面积为 450.38 公顷；4.4 中给出了网关的通讯半径为 1031m。则为使网关的通讯范围覆盖整个校园，网关的个数至少为：

$$\left\lceil \frac{450.38 \times 10^4}{\pi \times 1031^2} \right\rceil = 2$$

利用 Google 地图提供的用于绘制地图覆盖层的 API，我们给出了一个可能的网关部署方案（如图 5.1 所示），图中两个实心小圆点表示网关的位置（分别为第五教学楼和环境楼的屋顶），两个圆形覆盖层表示网关的通讯范围。

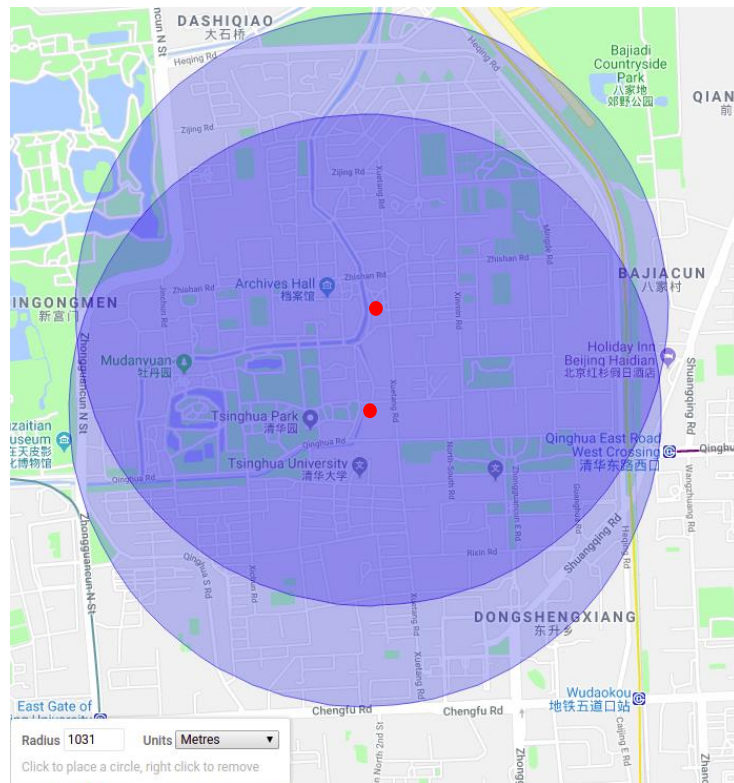


图 5.1 网关部署方案

5.2 应用方案阐述

结合前文对于系统的需求分析以及实验结果，表 5.1 对应用 LoRaWAN 搭建校园共享单车系统的方案进行了阐述。

表 5.1 应用 LoRaWAN 搭建校园共享单车系统的方案

参数	取值
节点发送功率(dBm)	19
BW(kHz)	125
SF	7-12
CR	4/5
上行信道编号	80-87
通讯频率范围(MHz)	486.3-487.7
网关的通讯半径(m)	1031
网关的最大有效连接数(个)	423
部署的网关总数量(个)	2
网关部署位置	第五教学楼屋顶，环境楼屋顶
支持的共享单车总数量(台)	573

5.3 应用方案评估

表 5.2 对 LoRaWAN 与 2G/3G 网络在设备成本,通信功耗等方面进行了比对:

表 5.2 LoRaWAN 与 2G/3G 比对

指标	LoRaWAN	2G/3G/4G
通讯模块成本(元/个)	120-150	50-200
频段付费(元/MHz/年)	0	千万
发射态电流(mA)	120(20dBm)	153-340
接收态电流(mA)	10-12	77-78
休眠态电流(mA)	10^{-3}	/

在部署成本方面，LoRaWAN 与 2G/3G 在通讯模块上的价格相近。考虑到国

内主要移动运营商每年要缴纳数以亿计的频段租赁费用，这部分成本会被转嫁到 2G/3G 网络用户身上；LoRaWAN 由于使用 ISM 开放频段进行通信，免去了频段租赁费用。所以 LoRaWAN 相较于 2G/3G 网络有着更低的部署成本。

在通信功耗方面，无论是发射态还是接收态，LoRaWAN 通信模块相较于 2G/3G 通讯模块都有着更低的功耗。此外，在依托 LoRaWAN 搭建的校园共享单车系统中，节点在大部分时间都处于休眠状态（骑行状态下节点的占空比不超过 0.15，停放状态在占空比会更低）；而 2G/3G 模块不存在休眠态。所以 LoRaWAN 相较于 2G/3G 网络有着更低的通信功耗。

第6章 论文总结与下一步工作

6.1 论文总结

本文以 LoRaWAN 协议和校园共享单车系统作为研究案例，阐述了 LPWAN 协议应用于 IoT 所应当考虑的问题和可能的解决方法。我们首先对校园共享单车系统进行具体的需求分析；其次实现了一套基于 LoRaWAN 的共享单车系统原型，证明了利用 LoRaWAN 搭建校园共享单车系统的可行性；之后进行了基于系统原型的实验和数值模拟实验，并依据实验结果计算了校内网关通讯范围的大小；最后给出了一个利用 LoRaWAN 搭建校园共享单车系统的方案，并证明了该方案相较于目前采用的移动网络通讯方案具有低功耗和低成本的优势。

6.2 下一步工作

正如 20 世纪著名的统计学家乔治·博克斯所言，“所有的模型都是错误的，但有些是有用的。”在本文为解决 LoRaWAN 的应用问题所建立的模型中，存在如下两个可在下一步工作中加以改进的地方：

1. 本文采用 LDPL 模型刻画节点在有噪声环境下的 PDR。该模型的优点是简单易使用，但由于自变量仅为通讯距离，这也使得该模型不够准确。一个更好的方法是综合考虑 RSSI, SNR 和历史 PDR 来预测节点的发包率 [18]。
2. 本文在关于信号冲突的模拟实验中认为如果同一逻辑信道内的两个信号在时域上有冲突，则两个信号都无法被网关接收。但实际上网关在接收 LoRa 信号的过程中存在捕获效应 [17]，这使得单从时域上建立的信号冲突模型无法正确反映 LoRa 信号被网关接收的情况（现有的冲突判定模型更为“严格”）。一个更好的方法是利用信号的 RSSI 和时域信息共同判定信号的冲突情况。

插图索引

图 2.1 不同 Symbol 频率随时间的变化示意图	5
图 2.2 LoRaWAN 组成[15].....	7
图 2.3 上行数据帧结构	9
图 3.1 校园内可骑行道路拓扑图	15
图 3.2 校园共享单车系统原型架构	16
图 3.3 连接 GPS 模块的节点（左）和三代树莓派的网关（右）	16
图 3.4 通过网络服务器的管理界面实时查看数据包解析结果	17
图 3.5 监控应用中单车地理位置的可视化展示	18
图 4.1 不同 SF 下 PDR-SNR 实验曲线.....	22
图 4.2 SNR-lgd 关系图	23
图 4.3 SNR 残差分布与 $N(0, 4.4)$ 分布的 Q-Q 图.....	23
图 4.4 $Y_1(d, SF)$ 函数曲线	25
图 4.5 一个传输周期内网关接收信号	25
图 4.6 信号冲突模拟实验结果曲线和理论曲线	27
图 4.7 Capacity(d)和 Demand(d)的函数曲线图	28
图 5.1 网关部署方案	30

表格索引

表 2.1 不同 BW 和 SF 下 SX1276 接收端信号敏感度[2].....	6
表 2.2 不同 SF 下 SX1276 接收端噪声容忍度[2]	6
表 2.3 上行数据帧说明	9
表 2.4 中国地区 LoRaWAN 的通讯参数	10
表 3.1 系统数据传输参数设置	13
表 3.2 不同 SF 下的地理信息发送时间	14
表 3.3 不同的 SF 对应的占空比因子和占空比的取值范围	15
表 4.1 不同 SF 下的 SNR 阈值 γ	22
表 4.2 数值模拟方法	26
表 4.3 通讯范围内各 SF 对应的节点数量 n , 占空比因子 τ 和占空比 du	29
表 5.1 应用 LoRaWAN 搭建校园共享单车系统的方案	31
表 5.2 LoRaWAN 与 2G/3G 比对	31

参考文献

- [1] LoRa Alliance. LoRaWAN v1.1 specification. Accessed June 9, 2018. https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_specification_-v1.1.pdf.
- [2] Semtech. SX1276/77/78/79 transceiver datasheet. Accessed June 9, 2018. https://www.semtech.com/uploads/documents/DS_SX1276-7-8-9_W_APP_V5.pdf.
- [3] Semtech. official site. Accessed June 9, 2018. <https://www.semtech.com>.
- [4] Springer, A., W. Gugler, M. Huemer, L. Reindl, C.C.W. Ruppel, and R. Weigel. 2000. “Spread Spectrum Communications Using Chirp Signals.” In IEEE/AFCEA EUROCOMM 2000. Information Systems for Enhanced Public Safety and Security (Cat. No.00EX405), 166–70.
- [5] LoRa Alliance. official site. Accessed June 9, 2018. <https://lora-alliance.org>.
- [6] LoRa Alliance. LoRaWAN v1.1rB regional parameters specification. Accessed June 9, 2018. https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_regional_parameters_v1.1rb_-_final.pdf.
- [7] 清华大学. 学校概况统计资料 [EB/OL]. (2017-12-31)[2018-06-09]. http://www.tsinghua.edu.cn/publish/newthu/newthu_cnt/about/about-6.html.
- [8] Boeing, Geoff. 2017. “OSMnx: New Methods for Acquiring, Constructing, Analyzing, and Visualizing Complex Street Networks.” Computers, Environment and Urban Systems 65: 126–39.
- [9] OpenStreetMap. OpenStreetMap. Accessed June 9, 2018. <https://www.openstreetmap.org>.
- [10] GitHub. Lora-net/LoRaMac-node. Accessed June 9, 2018. <https://github.com/Lora-net/LoRaMac-node>.
- [11] GitHub. Lora-net/lora_gateway. Accessed June 9, 2018. https://github.com/Lora-net/lora_gateway.
- [12] GitHub. Lora-net/lpacket_forwarder. Accessed June 9, 2018. https://github.com/Lora-net/lpacket_forwarder.
- [13] GitHub. brocaar/lorserver-setup. Accessed June 9, 2018. <https://github.com/brocaar/lorserver-setup>.
- [14] Digital Ocean. official website. Accessed June 9, 2018. <https://www.digitalocean.com>.
- [15] Augustin, Aloÿs, Jiazi Yi, Thomas H. Clausen, and William Mark Townsley. 2016. “A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things.” Sensors 16 (9): 1466.
- [16] Wikipedia. Q-Q plot. Accessed June 9, 2018. https://en.wikipedia.org/wiki/Q-Q_plot.

- [17] Haxhibeqiri, Jetmir, Floris Van den Abeele, Ingrid Moerman, and Jeroen Hoebeke. 2017. “LoRa Scalability: A Simulation Model Based on Interference Measurements.” *Sensors* 17 (6): 1193.
- [18] Liu, T., & Cerpa, Liu, Tao, and Alberto E. Cerpa. 2011. “Foresee (4C): Wireless Link Prediction Using Link Features.” In *Proceedings of the 10th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, 294–305.
- [19] Rappaport, Theodore S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. 1996.

致 谢

感谢曹志超老师在本人毕业设计期间耐心和用心的指导，包容一个刚踏入研究领域的本科生在分析和解决问题的过程中“不成熟，不懂事”的表现。

感谢 LoRa 项目研究组的徐振强学长分享自己的 LoRa 硬件编程经验，使我在短期内较为顺利地完成了系统原型的搭建。

感谢我的父亲马道超先生和母亲李效梅女士含辛茹苦的养育之恩。

感谢清华大学和软件学院四年来对我的培养！

声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名：_____ 日 期：_____

附录 A 外文资料的调研阅读报告

A Review Essay on LoRa

In the last few years, several communication technologies have emerged based on Low Power Wide Area Network (LPWAN), providing promising solutions for the Internet of Things (IoT) applications. As the latest LPWAN technology, LoRa (Long-Range) has its own advantages and rapidly attracts vast research effort. We hereby briefly review some related works as follows.

A.1 Modulation Technique

LoRa modulation technique is a proprietary technology from Semtech [1] . It operates on unlicensed ISM bands, with the frequency range varying among regions (e.g., 779-787MHz in China). It uses a derivative of the Chirp Spread Spectrum (CSS) [2] modulation technique to tolerate large frequency offset between the transmitter and the receiver. This not only makes LoRa resistant against multipath fading and Doppler effect but also renders opportunities for low-cost devices without extremely accurate timing components. What is more, the employment of the forward error correction code further improves LoRa's decoding performance. The sensitivity of LoRa receivers could achieve -130dBm [3] . Besides, LoRa utilizes different sets of orthogonal spreading sequences. Thus simultaneous transmissions are feasible in one physical channel. During the LoRa deployment, there are three important parameters which need to be customized: bandwidth, spreading factor, coding rate. Different choices of value sets lead to different trade-offs among data bit rate, interference tolerance and receiver sensitivity [4] .

A.2 MAC Layer Protocol

Unlike the proprietary modulation technique, the MAC layer protocol of LoRa (LoRaWAN) is maintained as an open standard by LoRa Alliance [5] . According to the documentation [6] , it adopts the star network topology and defines three components of

the network: end-devices, gateways and the network server. In a real deployment, multiple gateways communicate with multiple end-devices through LoRa connections and with one network server through IP connections. The protocol bears several distinguishing features: 1) in order to fit various IoT application contexts, end-devices are categorized into three classes which mainly differentiate on the timing of receptions. 2) All messages are encrypted with session keys installed in end-devices and the network server. 3) The network server is allowed to send commands to end-devices and change their data rates according to the link quality.

A.3 Peer Comparison

Taking similarities from both classical cellular technology (e.g., 3G/4G) and WSN technology (e.g., ZigBee), different LPWAN technologies share common features like large geographical coverage, low data rate, low power consumption and low device cost. Centenaro et al. [7] provides a detailed survey on physical features of different LPWAN technologies. Rashmi et al. [8] offers a comparison between LoRa and NB-IoT, another leading technique in the LPWAN family, with regard to high-level IoT factors. It shows that compared to NB-IoT, LoRa is a stronger candidate for IoT applications with core considerations on lower energy consumption, cheaper deployment and wider geographical coverage. Nevertheless, LoRa network fails to provide Quality of Service and low latency which NB-IoT network is capable of.

A.4 Experiment Evaluation

Many researches have been done to evaluate LoRa performance under real conditions, in terms of both the physical layer and MAC layer. As for the physical layer, evaluations are mainly related to the receiver sensitivity and communication coverage. In [9] [10], LoRa receivers could receive a minimum LoRa signal around -120dBm, approaching the specified lower bound. However, since the environmental factors are hard to quantify and unify, the link qualities appear unstable among various evaluations. In [9], no LoRa packet was lost up to a communication distance of 25km in a line-of-sight condition. However, over 10% packets were lost in a range of 2km in an urban

environment [11] . Cattani et al. [12] reveals a correlation between temperature, receiver sensitivity and network coverage. Other factors (e.g., humidity, elevation difference between the gateway and end-devices) have not been fully investigated. As for the MAC layer, experiments are conducted to test a single device maximal throughput [4] . In [13] , by numerical simulation of LoRa signal self-collision, the author concludes that LoRa scalability is worse than promised. It is worth noticing that current real-world evaluations are done in a small scale, namely one or several devices plus one gateway. Furthermore, spotlights of LoRaWAN such as MAC command, acknowledgement, adaptive data rate and retransmission are manually disabled during evaluations, which fails to explore the real capacity of LoRaWAN.

A.5 Industrial Case

Currently, Semtech is looking for industrial partners so as to integrate LoRa technique into IoT applications in the production environment. It is reported that LoRa technology has been adopted for people tracking by service provider [14] and integrated into advanced wireless products by other manufacturer [15] . Considering that LoRa is still in its roll-out stage, few relevant IoT application cases together with performance metrics for study are publicly available.

A.6 Conclusion

To conclude, on the strength of CSS modulation technique as well as the standardized open protocol, LoRa seems to be a promising communication solution for the fast-growing IoT market. Although many researches have tested the physical features of LoRa. Few experiments give a complete profile of the LoRa performance on MAC layer, not to mention the commercial effort in a long run. Therefore, we wish to establish a prototype of campus bike sharing system using LoRaWAN. Such system could serve as an improvement for the current bike sharing system using cellular network, meanwhile shed light on the deployment solution, performance metrics and potential problems of LoRaWAN.

参考文献

- [1] Semtech, official site, <https://www.semtech.com>, Accessed 12-March2018.
- [2] A. Berni, W. Gregg, Utility of chirp modulation for digital signaling, IEEE Transactions on Communications CO21 (1973) 748–751.
- [3] Semtech, Sx1272/73 transceiver datasheet, <https://www.semtech.com/uploads/documents/sx1272.pdf>, Accessed 12-March-2018.
- [4] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, W. M. Townsley, A study of lora: Long range & low power networks for the internet of things., Sensors 16 (2016).
- [5] L. Alliance, official site, <https://lora-alliance.org>, Accessed 12- March-2018.
- [6] L. Alliance, Lorawan v1.1 specification, <http://net868.ru/assets/pdf/LoRaWAN-v1.1.pdf>, Accessed 12-March-2018.
- [7] W. Guibene, K. Nolan, M. Kelly, Survey on clean slate cellular-iot standard proposals, in: 2015 IEEE International Conferences on Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; and Pervasive Intelligence and Computing (CIT/IUCC/DASC/PICOM). Proceedings, IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, USA, 2015, pp. 1596–9.
- [8] R. S. Sinha, Y. Wei, S.-H. Hwang, A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT, ICT Express 3 (2017) 14–21. 5
- [9] J. Gaelens, P. V. Torre, J. Verhaever, H. Rogier, Lora mobile-to-base-station channel characterization in the antarctic., Sensors (basel, Switzerland) 17 (2017).
- [10] T.-M. CA, R. Blasco, R. Casas, A. Asensio, A network performance analysis of lora modulation for lpwan sensor devices, Ubiquitous Computing Ambient Intelligence, Ucam 2016, Pt Ii 10070 (2016) 174–181.
- [11] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hanninen, M. Pettissalo, On the coverage of lpwans: Range evaluation and channel attenuation model for lora technology, 2015 14th Int. Conference On Its Telecommunications (itst) (2015) 55–59.
- [12] M. Cattani, C. A. Boano, K. Roemer, An experimental evaluation of the reliability of lora long-range low-power wireless communication, Journal of Sensor and Actuator Networks 6 (2017) 7.
- [13] O. Georgiou, U. Raza, Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale?, IEEE Wireless Communication Letters 6 (2017) 162–165.
- [14] Semtech, press release, <https://www.semtech.com/company/press/semtechs-lora-technology-locates-and-actively-monitors-residents-with-demen>, Accessed 12-March-2018.
- [15] Semtech, press release, <https://www.semtech.com/company/press/advantech-delivers->

innovative-iot-solutions-using-semtechs-lora-technology, Accessed 12-March-2018.

综合论文训练记录表

学生姓名	马子俊	学号	2014013408	班级	软件 41
论文题目	基于 LoRaWAN 的校园共享单车系统的实现与分析				
主要内容以及进度安排	<div>指导教师签字：_____</div> <div>考核组组长签字：_____</div> <div>年 月 日</div>				
中期考核意见	<div>考核组组长签字：_____</div> <div>年 月 日</div>				

指导教师评语	<div>指导教师签字：_____</div> <div>年 月 日</div>
评阅教师评语	<div>评阅教师签字：_____</div> <div>年 月 日</div>
答辩小组评语	<div>答辩小组组长签字：_____</div> <div>年 月 日</div>

总成绩：_____

教学负责人签字：_____

年 月 日