

LoRa 无线数据传输模块的设计与实现

资文彬¹ 董楚楚² 曹 康²

¹(桂林电子科技大学 计算机与信息安全学院 桂林 541004)

²(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

摘 要 针对现有无线数据传输模块功耗高、传输距离短、可靠性低的缺陷, 该文提出了一种新型的基于 LoRa 技术的无线数据传输模块。该模块以 SX1276 为射频芯片, 采用低功耗微处理器 STM8L151 为主芯片并移植了 Contiki 嵌入式操作系统。该文详细介绍了数据传输模块的硬件设计、软件设计并测试了模块的主要性能。测试结果表明, 该数据传输模块具有功耗低、传输距离远、可靠性高等优点, 适用于无线抄表、环境监测等系统中。

关键词 LoRa; 数传模块; STM8L151; Contiki

中图分类号 TP 216+.1 **文献标志码** A

Design and Implementation of Wireless Data Transmission Module Based on LoRa

ZI Wenbin¹ DONG Chuchu² CAO Kang²

¹(School of Computer and Information Security, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

²(Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

Abstract Existing wireless data transmission modules have some disadvantages, such as high power consumption, short transmission distance, low reliability and high cost. In this paper, a new design of wireless data transmission module based on LoRa was proposed. The module uses SX1276 as the radio frequency chip and the low-power microprocessor STM8L151 as the main chip, and embeds the contiki operating system. We discuss the design of hardware and software in this module, and evaluate its performance. The final tests indicate that the proposed wireless transmission module has advantages of low power consumption, long transmission distance and high reliability. It is suitable for use in wireless meter reading and environmental monitoring systems.

Keywords LoRa; data transmission module; STM8L151; Contiki

收稿日期: 2017-11-03 修回日期: 2018-02-27

作者简介: 资文彬, 硕士研究生, 研究方向为嵌入式系统、无线传感网络和物联网应用; 董楚楚(通讯作者), 博士, 研究方向为无线传感器网络, E-mail: cc.dong@siat.ac.cn; 曹康, 硕士研究生, 研究方向为无线传感器网络。

1 引言

物联网时代将会有海量的物体接入到网络中^[1]。在传统的无线数据传输模块中, 所用到的接入技术主要有 WiFi、蓝牙、ZigBee 和 2G/3G/4G 等技术。但是, 基于这些技术的无线数据传输模块都有一些缺点导致其并不适合应用于大规模物联网应用场景^[2,3]。如基于 WiFi、蓝牙和 ZigBee 等技术的无线数据传输模块, 其抗干扰能力差、传输距离近、功耗高等; 基于 2G/3G/4G 等技术的无线数据传输模块, 其容量小、模块成本非常高等。事实上, 在物联网时代, 主要是物与物之间的通信, 它和人与人的通信追求高速率高带宽、通信设备需要频繁充电的方式不一样, 其特点是^[4]: 大量设备接入网络后仅需少量数据传输或数据传输频率很低; 很多设备因其所处环境的特殊性和数量巨大, 要求设备功耗低。在这种情况下, 低功耗广域网 (Low Power Wide Area Network, LPWAN) 技术应运而生, 它能够解决物联网应用中低功耗、低成本、广覆盖、大容量等方面的关键问题。因此, LPWAN 技术势必会在物联网市场中具有广阔的发展空间。其中, LoRa 是 SemTech 公司在 2013 年 8 月推出的一种 LPWAN 技术^[5], 由于它在物联网市场中的良好表现而备受关注, 成为目前物联网技术研究热点。LoRa 技术基于线性 Chirp 扩频调制, 具有高时间带宽积和宽频带, 主要有以下 4 个优点^[6-8]: (1) 极大地改善了接收

灵敏度, 降低了功耗; (2) 抗干扰与抗多径衰落能力强; (3) 基于该技术的网关支持多信道多数数据速率的并行处理, 系统容量大; (4) 基于终端和网关的系统可以支持测距和定位。这些关键特征使得 LoRa 技术非常适用于要求功耗低、距离远、大量连接以及定位跟踪等物联网应用, 如智能抄表、智能停车、车辆追踪、宠物跟踪、智慧农业、智慧工业、智慧城市、智慧社区等领域应用。LoRa 技术与其他无线技术的特点对比如表 1 所示。

现有研究 LoRa 技术的文献^[6-14]仅从发射功率、接收灵敏度方面考虑了 LoRa 模块的性能, 但忽略了功耗、天线、频偏等因素对模块性能的影响, 因此模块性能没有达到理想效果。本文设计了一种基于 LoRa 技术的无线数据传输模块, 通过该模块可以将各种各样的物联网设备接入到物联网中, 从发射功率、接收灵敏度、天线、频偏等角度较为完整地分析了影响 LoRa 无线数据传输模块性能的要害并给出了详细的测试方案。实测结果表明, 与现有 LoRa 无线数据传输模块相比, 该模块具有功耗低、传输距离远、可靠性高等的优点, 能够为 LoRa 技术在物联网中的应用提供更有效的解决方案。

2 硬件设计

LoRa 无线数据传输模块硬件主要由 STM8L151、SX1276、电池模块、自研天线、

表 1 几种无线技术比较

Table 1 Comparison of several characteristics of wireless technology

技术 类型	性能指标								
	使用频段 (GHz)	调制技术	最大速率 (Mb/s)	功耗	复杂性	覆盖距离 (m)	网络节点	使用成本	安装难度
WiFi	2.4	QPSK	1.00	高	很复杂	50	50	中等	简单
ZigBee	2.4	BPSK, OQPSK	0.25	极低	简单	100	255	低	简单
蓝牙	2.4	GFSK	1.00	中等	复杂	50	127	中等	简单
4G	1.745~2.655	BPSK, QPSK	100	高	复杂	>500	>1 000	高	简单
LoRa	0.137~1.020	GFSK, LoRa TM	0.037	极低	简单	>1 000	>1 000	低	简单

ST-LINK、UART 和 I²C 等模块组成。其与仪器仪表、传感器等设备的连接结构示意图如图 1 所示。

LoRa 无线数据传输模块的微控制单元 (Microcontroller Unit, MCU) 主控芯片 STM8L151C8 是 ST 意法半导体公司推出的基于 STM8 内核的超低功耗 8 位微控制器, 采用哈佛体系结构和三级流水线结构, 最高 16 MHz 工作频率, 内置 64 kB 大容量闪存、2 kB 的 E²PROM 以及 4 kB 高速 RAM, 能够满足物联网在性能上和存储空间上的应用要求, 同时支持等待、低功耗运行、低功耗等待、活跃停机与停机 5 种低功耗工作模式, 方便低功耗设计^[15]。硬件设计中, SX1276 射频模块中的 SX1276 收发器主要采用 LoRaTM 远程调制解调器, 使用 FEC 前向纠错编码, 具有功耗低、数据传输距离远以及可靠性高、信号抗干扰性强和穿透性强、数据接收和发送稳定等特点^[16]。LoRa 无线数据传输模块一般使用电池供电, 本模块使用行业标准电池 ER14505M 锂亚电池供电。鉴于 LoRa 无线数据传输模块安装时物理空间受限, 使用实验室自主研发的弹簧天线。此外, 模块提供 UART、I²C 两种常用通信接口, 用户选择时更灵活。

LoRa 无线数据传输模块主要完成仪器仪表、传感器等设备数据的采集, 上报任务以及接收下发的指令, 从而对仪器仪表、传感器等设备进行相应的控制。

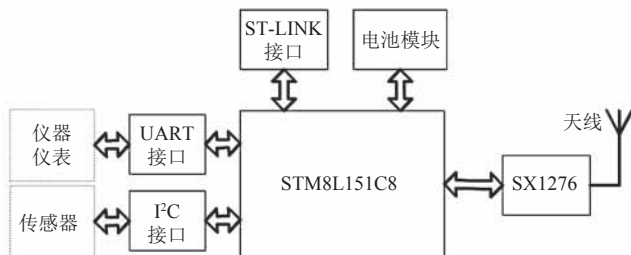


图 1 LoRa 无线数据传输模块结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the structure of LoRa wireless data transmission module

3 软件设计

LoRa 无线数据传输模块的软件在 Contiki 操作系统上运行。其中, Contiki 是一个针对硬件资源受限嵌入式平台的轻量级的、开源的、易于移植的多任务操作系统, 运行时占用的内存空间不到 2 kB^[17]。它引入了很多新的特性, 包括动态链接与装载, Coffee 文件系统, Rime/Chameleon 通信协议栈以及对多线程的支持等^[18]。Contiki 系统运行原理示意图如图 2 所示, 该操作系统以事件驱动机制为核心, 确保了多任务在其上并发执行。

如图 2 所示, Contiki 系统启动后, 系统首先调用 `clock_init()` 函数初始化系统时钟, 使用 `process_init()` 完成进程初始化。然后, 调用 `process_start(&timer_process, null)` 启动系统进程, 使用 `autostart_start(autostart_processes)` 函数开启用户进程。其中, `autostart_processes` 是一种 `process` 类型的结构体指针数组, 用来存放用户自定义进程模块。在本系统中, `autostart_processes` 存放了 `radio_process` 进程模块, 该进程主要用于处理数据的发送与接收。最后, 系

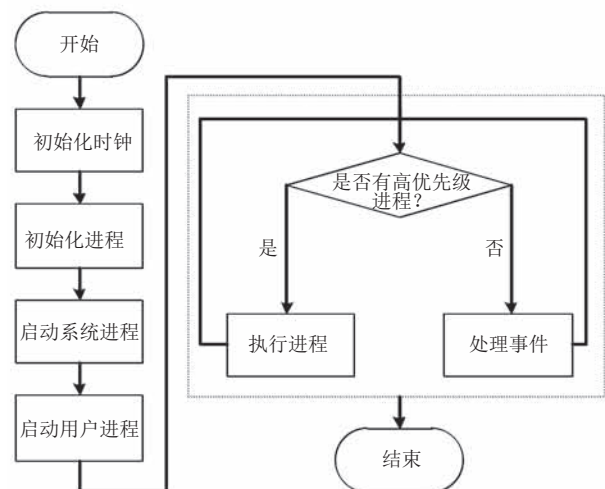


图 2 Contiki 系统运行原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of Contiki system operation principle

统进入到一个 while 无限循环中, 并不断地调用 process_run() 函数, 查询是否有高优先级的进程: 如果有, 则先转去执行高优先级进程再处理事件, 若无则直接转去处理新到达的事件。

4 模块测试与分析

为充分评估 LoRa 无线数据传输模块的性能, 全面地测试了模块的关键参数, 包括静态功耗、天线性能、频偏与发射功率、接收灵敏度、通信距离、传输可靠性和工作温度范围。测试对象为 2 个 LoRa 无线数据传输模块。其中, 一个模块设置为发射模式, 记为模块 S; 另外一个模块设置为接收模式, 记为模块 R。测试时, 模块并未连接仪器仪表或传感器, 此时设置模块 S 与模块 R 的发射功率为 20 dBm, 射频中心频率为 433 MHz。开启 LoRa 模式时, 设置模块 S 与模块 R 的编码率(Coding Rate, CR)为 4/5, 带宽(Bandwidth, BW)为 125 kHz, 扩频因子(Spreading Factor, SF)为 12。开启 FSK 模式时, 设置模块 S 与模块 R 的频偏为 0, 数据率为 1.2 kbit/s, 带宽(BW)为 50 kHz。在测试中, 默认开启 LoRa 模式, 模块 S 发送完数据后即进入低功耗休眠状态, 休眠 10 s 后自动唤醒继续发送数据, 模块 S 重复此过程; 模块 R 则一直处于活跃接收状态, 接收到数据后输出到 UART 串口。最后对测试结果进行了分析论证, 并给出了与现有 LoRa 无线数据传输模块在关键性能上的对比。对比结果显示, 本文模块性能优于现有方案。

4.1 静态功耗测试

静态功耗是评价 LoRa 无线数据传输模块的一个重要指标, 它直接影响电池的使用寿命。本文设计了如图 3 所示的测试电路对模块 S 的静态功耗进行测试。测试时, 首先使用容量为 3.6 V/2 200 mAh 的锂亚电池给模块 S 供电; 然后, 在电路中串联一个多功能万用表测试模块

S 发送数据后处于低功耗休眠状态时的电流; 最后, 万用测试结果表显示模块静态电流为 1.6 μ A, 结果如图 4 所示。测试结果比 LoRa 模块静态电流 3.6 V/2.5 μ A 的应用标准^[13]降低了 0.9 μ A, 符合实际应用要求。

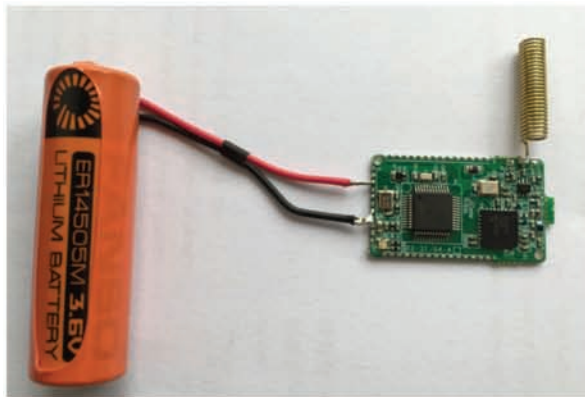


图 3 静态功耗测试电路

Fig. 3 Static power test circuit



图 4 静态功耗测试结果

Fig. 4 Test result of static power

4.2 天线性能测试

天线是远距离无线数据传输模块的一个非常重要的部件, 因此对天线的配置要求较高。普通天线的性能难以满足实际需求, 且针对不同的无线数据传输模块、不同的应用, 由于需要不同的匹配电路, 天线要求也不同, 故需要设计一款高性能的天线。通过大量反复的调试, 我们自主研发了一款适合本研究 LoRa 无线数据传输模块的弹簧天线。用矢量网络分析仪对安装在模块 S 的自研弹簧天线进行测试, 实测其性能如图 5 所

示。该天线中心频率为 433 MHz，功率信号衰减标识 S11 系数为 -12 dB，小于 -10 dB 的标准。天线性能测试结果表明，信号反射功率仅为 6%，94% 的能量都被发射到空中，从而极大地增加了信号的传输距离，能够很好地满足应用需求。

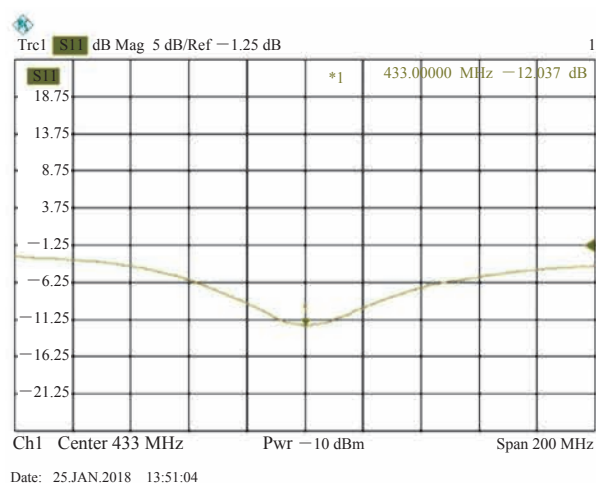


图 5 天线性能图

Fig. 5 Antenna performance diagram

4.3 频率偏移与发射功率测试

LoRa™ 是扩频调制模式，故在 FSK 模式下测试频偏与发射功率更接近实际值。用频谱分析仪测试模块 S 的频偏与发射功率时，模块 S 开启 FSK 模式，设置频谱分析仪的扫频宽度 (SPAN) 为 5 MHz，分析带宽 (RBW) 为 47 kHz，显示带宽 (VBW) 为 470 kHz，并设置为跟踪功率最大值。实测模块 S 的频偏与发射功率如图 6 所示，射频中心频点为 433.003 MHz，故频偏为 3 kHz。在误差范围 1~5 kHz 内，发射功率为 20.044 dBm，接近理论值 20 dBm，频偏和功率性能都比较好。

4.4 接收灵敏度测试

测试时，用模块 R 连接信号发生器，并选择使用与模块 R 的参数设置保持一致的 LoRa 波形输出文件。设置信号发生器的输出波形频率为 433 MHz，Level 值为 -136.9 dBm，信号

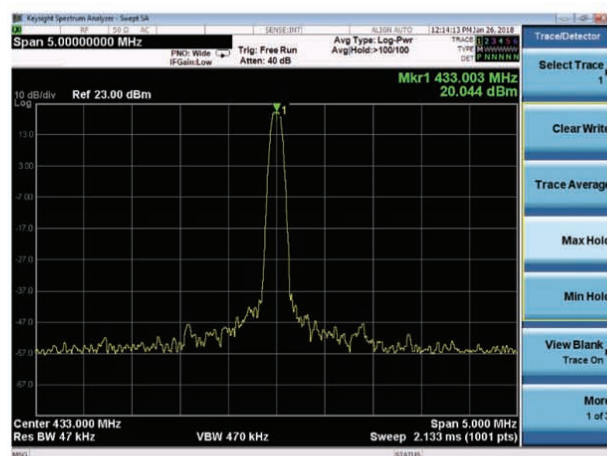


图 6 频偏与功率测试结果

Fig. 6 Frequency offset and power test results

发生器设置界面如图 7 所示。用示波器测量模块 R 的串口输出引脚波形，跟踪测试 10 min，测试结果如图 8 所示。测试全程波形正常稳定，无丢包、无误码，故模块 R 的接收灵敏度小于 -136.9 dBm。Semtech 官方资料显示，当带宽 (BW) 设置为 125 kHz、编码率 (CR) 设置为 4/5、扩频因子 (SF) 设置为 6~12 时，接收机灵敏度典型值如图 9 所示。其中，红色圈圈标出当扩频因子为 12 时，接收机灵敏度典型值为 -137 dBm。通过以上分析，在与原厂 LoRa 模块参数配置相同的情况下，实测模块 R 接收灵敏度为 -136.9 dBm，与原厂提供的灵敏度典型

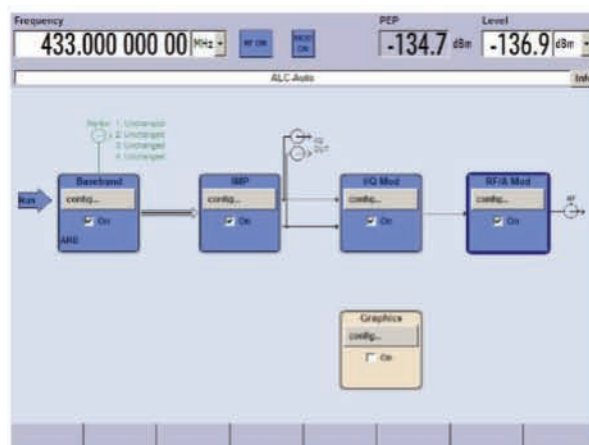


图 7 信号发生器设置界面

Fig. 7 Signal generator setting interface

值非常接近, 符合 LoRa 模块对接收灵敏度的设计要求。

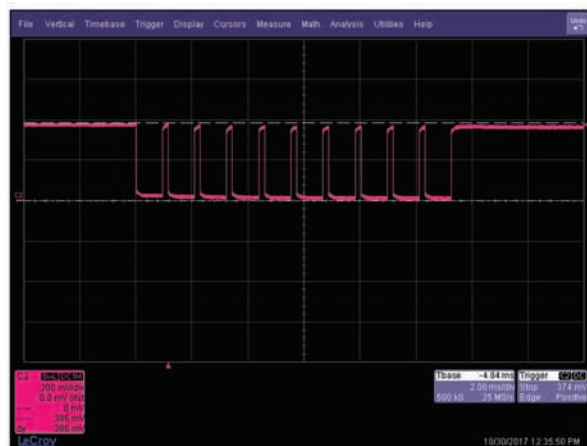


图 8 串口输出波形图

Fig. 8 Serial output waveform diagram

Symbol	Description	Conditions	Min.	Typ	Max	Unit
RFS_L125_LF	RF sensitivity, Long-Range Mode, highest LNA gain, Band 3, 125 kHz bandwidth	SF = 6	-	-121	-	dBm
		SF = 7	-	-125	-	dBm
		SF = 8	-	-128	-	dBm
		SF = 9	-	-131	-	dBm
		SF = 10	-	-134	-	dBm
		SF = 11	-	-136	-	dBm
		SF = 12	-	-137	-	dBm

图 9 接收机灵敏度几种典型值

Fig. 9 Several typical values of receiver sensitivity

4.5 通信距离测试

LoRa 无线数据传输模块的传输距离对其在物联网的应用中有着十分重要的意义。本文选择在广东虎门大桥附近的水域对模块通信距离进行点对点的外场测试。如图 10 所示,在 A 、 B 、 C 、 D 四个地点进行点对点收发测试。其中,模块 S 置于 A 地离地面约 2 m 的位置,模块 R 先后置于 B 、 C 、 D 地离地面同样高度的位置,实测 A 和 B 相距 2.9 km ,通信成功率为 100% ,信号强度(RSSI)为 -56 dBm ; A 与 C 相距 3.7 km ,通信成功率为 100% ,信号强度为 -81 dBm ; A 与 D 相距 4.9 km ,通信成功率为 98% ,信号强度为 -92 dBm 。测试结果表明,LoRa 无线数据传输模块的通信距离能够满足物联网应用的需求^[19]。

4.6 传输可靠性测试

测试地点为深圳南山崇文花园小区, 该小区



图 10 LoRa 通信距离测试图

Fig. 10 LoRa communication distance test chart

房屋密集且楼层普遍在 30 层以上,符合实际应用场景。测试时,模块 S 置于中国科学院深圳先进技术研究院 C 栋 3 楼阳台离地面约 1 m 的位置,模块 R 通过串口与平板电脑连接,并通过平板电脑上的串口调试助手打印接收到的数据。手持平板电脑先后到达测试点 1~10 位置进行收发测试,测试点位置分布如图 11 所示。实测



图 11 接收模块位置分布示意图

Fig. 11 The position distribution chart of the receiving module

测试点 1~10 距离模块 S 的距离分别为 287 m、294 m、398 m、454 m、504 m、540 m、483 m、554 m、560 m 和 471 m。测试时,模块 R 每次在一个测试点接收 100 组数据,共测试 10 次,用串口调试助手统计接收结果。根据测试结果,发送模块在以上各个测试点的发送数据平均成功率依次为 100%、100%、100%、100%、100%、100%、100%、99.8%、99.8% 和 100%。实验结果表明,模块信号穿透力强、传输距离远、可靠性高。

4.7 高低温测试

测试时,将模块 S 放置在高低温交变试验箱内部离地面约 1 m 的位置上,模块 R 通过串口与平板电脑连接,并通过平板电脑上的串口调试助手打印接收到的数据。其中,平板电脑放置在离高低温交变试验箱约 1 m 的桌上(距地高度约 1 m)。根据 LoRa 芯片 SX1276 的参考手册,其工作温度范围为 $-40\sim 85^{\circ}\text{C}$,据此选取 5 个具有代表性的温度值并设置试验箱参数,然后启动高低温交变箱对 LoRa 模块 S 进行测试。通过串口调试助手记录测试结果,具体结果如表 2 所示。表 2 结果表

表 2 高低温测试结果

Table 2 High and low temperature test results

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	测试结果
-40	正常工作
-30	正常工作
-20	正常工作
60	正常工作
85	正常工作

明,LoRa 无线数据传输模块能在理论标准温度范围内正常收发数据,符合设计要求。

4.8 结果分析

测试结果中,模块的频偏、发射功率、接收灵敏度和工作温度与官方的理论值一致,在休眠功耗、数据传输距离和可靠性方面与现有的基于 LoRa 技术的无线数据传输模块相比都有改进,达到了预期的效果。从现有的基于 LoRa 技术的无线模块中选取几种做比较,性能对比结果如表 3 所示。本文方案与赵太飞等^[12]、罗贵英^[13]和 Bor 等^[14]方案相比,在静态电流、数据传输距离和丢包率上均有明显的改善。其中,本文方案与罗贵英^[13]方案在静态电流和数据传输距离比较接近,但平均丢包率较后者更低;本文方案与 Bor 等^[14]方案在通信距离与丢包率上大体一致,但静态电流更低。

本文在设计硬件上采用 STM8L151、SX1276 超低功耗芯片,软件上通过配置主芯片 STM8L151 的 GPIO 引脚工作方式、裁剪不必要的功能,同时,让主芯片进入 halt 模式、射频芯片进入 sleep 模式,有效地降低了模块的功耗。通过反复地调试、不断地测试,设计了一款高性能天线,增加了模块的通信距离。其中,模块采用性能较好的温补晶振,频率漂移小、误差低,降低了模块的频偏。在射频输出电路上增加了功放部分,从而提高了发射功率,增大了模块的传输距离。通过不断调节射频接收电路上电容、电感、电阻匹配值,找到了较好的匹配方案,提

表 3 几种 LoRa 无线传输模块性能比较

Table 3 Performance comparison of several LoRa wireless transmission modules

研究方案	性能指标		
	静态电流 (μA)	传输距离 (km)	丢包率 (%)
本文方案	1.6	4.9	0.2
赵太飞等 ^[12]	9.8	2.4	18.0
罗贵英 ^[13]	1.8	4.8	1.6
Bor 等 ^[14]	2.1	4.9	0.8

高了模块的接收灵敏度。此外, PCB 板材采用 FR-4 材料, 增强了模块的耐寒与耐高温性能, 提高了电路的稳定性。本文在硬件与软件各个环节上, 综合全面地考虑了影响模块性能的要素并找到了有效的解决方案, 与现有 LoRa 模块相比, 提高了模块的性能, 不足之处是模块成本偏高。

5 结束语

本文设计了一种基于 LoRa 技术的无线数据传输模块, 为物联网应用市场提供了一种可靠、高效的解决方案。采用 STM8L151 作为主控芯片, SX1276 作为射频芯片, 降低了系统的功耗, 提高了信号的传输距离, 增强了系统的抗干扰能力, 提升了系统的可靠性, 具有良好的开发性和使用价值, 应用前景较好。但与基于 LoRa 技术的物联网无线数据传输模块售价 5 美元的标准相比, 在价格上有一定的劣势。在未来的工作中, 我们将在确保模块良好性能的基础上, 进一步降低模块的成本。

参 考 文 献

- [1] 郝行军. 物联网大数据存储与管理技术研究 [D]. 安徽: 中国科学技术大学, 2017.
- [2] 郑浩. LoRa 技术在低功耗广域网络中的实现和应用 [J]. 信息通信技术, 2017, 11(1): 19-26.
- [3] 杨磊, 梁活泉, 张正, 等. 基于 LoRa 的物联网低功耗广域系统设计 [J]. 信息通信技术, 2017, 11(1): 40-46.
- [4] 夏莹莹, 刘琛, 邵震. LPWA, 物联网产业发展的新机遇 [J]. 通信企业管理, 2015(10): 68-70.
- [5] 刘琛, 邵震, 夏莹莹. 低功耗广域 LoRa 技术分析与应用建议 [J]. 电信技术, 2016(5): 43-50.
- [6] Yao Y, Chen X, Rao L, et al. LORA: loss differentiation rate adaptation scheme for vehicle-to-vehicle safety communications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 66(3): 2499-2512.
- [7] Gaelens J, Van Torre P, Verhaevert J, et al. LoRa mobile-to-base-station channel characterization in the antarctic [J]. Sensors, 2017, 17(8): 1903.
- [8] Haxhibeqiri J, Van der Abeele F, Moerman I, et al. LoRa scalability: a simulation model based on interference measurements [J]. Sensors, 2017, 17(6): 1193.
- [9] Aloÿs A, Yi JZ, Thomas C, et al. A study of LoRa: long range & low power networks for the internet of things [J]. Sensors, 2016, 16(9): 1466.
- [10] Petäjäjärvi J, Mikhaylov K, Hämäläinen M, et al. Evaluation of LoRa LPWAN technology for remote health and wellbeing monitoring [C] // 2016 10th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT), 2016: 1-13.
- [11] 王瑞. 基于 LORA 通信的无线水表抄表系统的设计 [D]. 抚州: 东华理工大学, 2016.
- [12] 赵太飞, 陈伦斌, 袁麓, 等. 基于 LoRa 的智能抄表系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(9): 298-301.
- [13] 罗贵英. 基于 LoRa 的水表抄表系统设计与实现 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
- [14] Bor M, Vidler J, Roedig U. LoRa for the Internet of Things [C] // International Conference on Embedded Wireless Systems and Networksg, 2016: 361-366.
- [15] STMicroelectronics Company. STM microprocessor datasheet [Z/OL]. 2017-02[2018-02-06]. <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/40/f1/71/46/14/08/4b/00/CD00284933.pdf/files/CD00284933.pdf/jcr:content/translations/en.CD00284933.pdf>.
- [16] SEMTECH Company. SX1276 transceiver datasheet [Z/OL]. 2016-08[2018-02-06]. <https://www.semtech.com/uploads/documents/sx1276.pdf>.
- [17] 苏铅坤. 无线传感器网络文件系统与重编程技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [18] 徐顶鑫, 易卫东. 基于 Contiki/COOJA 平台的 Deluge 协议性能测试 [J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(Suppl 2): 290-294.
- [19] 东辉, 唐景然, 于东兴. 物联网通信技术的发展现状及趋势综述 [J]. 通信技术, 2014, 47(11): 1233-1239.