· 农业信息与电气技术 ·

面向大面积渔业环境监测的长距离低功耗 LoRa 传感器网络

张 铮[1]，曹守启[1]，朱建平[1]，陈佳品[2]

（1. 上海海洋大学工程学院，上海 201306；2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院，上海 200240）

摘 要：该文针对近海渔业和大面积水产养殖环境监测应用周期长，覆盖面积大等特点，设计了基于 LoRa 技术的长距离低功耗无线传感网络系统。该系统设计了低成本的双信道 LoRa 网关，并在此基础之上提出了一种新颖的速率自适应的双信道同步调度无线通信策略。该策略充分利用 LoRa 技术多扩频因子多数据率的特点，对网关不同距离范围内的终端节点自动分配不同的扩频因子以确保网络连通性，并通过 MAC 层同步调度，在保证监测网络大面积覆盖的同时，大大降低了无线信道碰撞的概率，提高了异常数据上传的实时性和终端节点的平均网络寿命。通过仿真和现场试验验证了本方案的有效性，系统可有效覆盖半径 3 km 的监测区域，100 个终端节点的网络规模；对于视距通信，该策略的投递率从单一扩频因子的 0.8 提升到 0.99，对于数据上传周期为 10 s 的快速通信，投递率从单一扩频因子的 0.4 提升到 0.95 以上；如采用 3 600 mA·h 锂电池，数据上传周期为 10 min，终端节点寿命可达 1 a。

关键词：水产养殖；监测；无线传感器网络；LoRa；同步；速率自适应

doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2019.01.020

中图分类号：TN929.5; S951.2 **文献标志码**：A **文章编号**：1002-6819(2019)-01-0164-08

张 铮，曹守启，朱建平，陈佳品. 面向大面积渔业环境监测的长距离低功耗 LoRa 传感器网络[J]. 农业工程学报，2019，35(1)：164－171. doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2019.01.020 http://www.tcsae.org

Zhang Zheng, Cao Shouqi, Zhu Jianping, Chen Jiapin. Long range low power sensor networks with LoRa sensor for large area fishery environment monitoring[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(1): 164－171. (in Chinese with English abstract) doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2019.01.020 http://www.tcsae.org

0 引 言

近年中国对水产品的市场需求不断上涨，近海渔业和大面积水产养殖业发展迅猛。渔业环境的自动监测预警技术越来越受到重视，引起了许多学者的研究兴趣。基于物联网技术设计渔业环境无线监测系统已成为目前的研究热点[1-4]。

大多数研究人员在设计物联网无线通信方案时使用 Zigbee 和 GPRS 技术[5-12]。杨旭辉等[6]基于 Zigbee 协议采用分时分区供电和数据融合技术延长了节点寿命；蒋建明等通过 LEACH(low energy adaptive clustering hierarchy)优化协议提高能效性[8,9]。Zigbee 的单跳通信距离最长为几百米，如需大面积的网络覆盖，则需依赖于路由节点和 Mesh 协议，随着路由跳数的增加，实时性和可靠性都会下降，且路由节点能耗大，多跳路由协议复杂，路由节点难以采用电池供电，因此适用于中小面积的渔业环境监测[5,6,8,9,10]。有些方案采用 GPRS 技术来实现渔业环境的远距离数据传输和大范围监测[7, 11,12,13]，GPRS 模块功耗较大，Alippi 等使用太阳能为网络系统供电[12]，但移动通信技术按流量计费，而有些偏远地区或近海海域的网络信号尚未覆盖。申庆祥等提出了基于量子遗传算法的水质监测路由优化算法提高全网寿命[14]，但没说明具体实现技术。李慧等开发了 Android 平台进行水产养殖监控[15]，通过 Zigbee 技术进行现场数据采集，并利用 30 m×30 m 的鱼塘进行了试验。

以 LoRa 为代表的 LPWAN（Low power wide area network）技术以其低功耗、长距离、低成本、大网络容量等特点无疑将拥有巨大的农业物联网应用空间[1,16]。LoRa 是 Semtech 公司的一种基于扩频技术的超远距离无线通信方案，有效传输距离可达数千米以上[16]。目前 LoRa 技术的应用主要采用 LoRa Alliance 的 LoRaWAN[17]协议，LoRaWAN 的网关芯片采用 Semtech 公司的 SX1301[18]，其能并行接收 8 个信道的数据包，每个信道可以接收扩频因子 SF7~SF12 共 6 种速率的 LoRa 信号，极大提高了吞吐率。但其开发资料不公开，仅当用户付费成为 LoRa Alliance 会员，才能获得相关资料和技术，SX1301 网关商品单价在 3000 元以上，成本很高。

目前学者对于 LoRa 技术的研究还主要集中在性能评估方面[19-22]；Augustin 等通过理论和试验分析评估了 LoRa 的扩频因子等配置参数对于网络覆盖及性能的影响[19]；文献[21]通过试验评估了 LoRa 技术在移动条件下的性能；文献[22]从理论的观点分析了 LoRaWAN 的网络规模和吞吐量。文献[23]在能源物联网项目中利用了 LoRa 技术进行大面积网络覆盖，并与 GPRS 技术方案进行了比较分析。目前对于 LoRa 通信协议的改进优化方面的研究较少。Kim 等提出了基于 LoRaWAN 的物联网数据传输和网络架构[24]；Pham 也提出了 SX1301 网关成本过高的问题，自行开发了基于 LoRa 终端芯片的低成本单

收稿日期：2018-09-06 修订日期：2018-10-30

基金项目：国家自然科学基金（61362017）；上海市科委 2017 年度“创新行动计划”（17050502000）；上海海洋大学科技专项基金（A2-0203-17-100209）；2017 年上海市（临港）产学研合作项目（沪临地管委经[2017]56 号）

作者简介：张 铮，讲师，博士，主要从事物联网工程、智能仪器设计研究。Email：z-zhang@shou.edu.cn

信道网关[25]。目前针对大面积渔业环境和水产养殖监测的低成本专用 LoRa 低功耗传感网络方案研究很少见到。

本文针对大面积渔业环境监测的需求，研究基于 LoRa 技术的专用低功耗传感网络方案，设计了低成本双信道网关，并在此基础上提出了低功耗低延迟的双信道 MAC 层同步调度通信策略。通过仿真和现场试验验证网络系统的性能，以期为大面积渔业环境监测研究提供新思路。

1　网络架构

1.1　硬件设计

本系统自行设计开发低成本网关，采用 2 个基于单通道 LoRa 终端芯片 SX1278[26]（价格仅 10 元）的 LoRa 模块构成双通道，并通过优化改进无线通信协议，使其完全满足大面积渔业环境监测应用需求。网关的硬件原理框图如图 1a 所示，采用高性能微控制器 STM32F429[27]，GPS 模块用于定位和网关授时，以太网和 4G 模块用于感知数据的云端接入，网关采用太阳能板或直流电源供电。

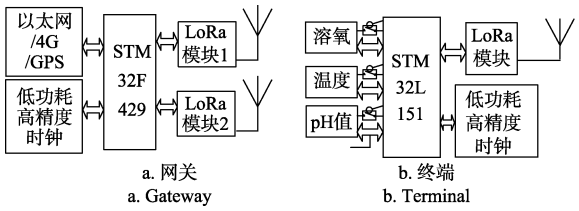


图 1　传感网硬件原理框图

Fig.1　Hardware block diagram of sensor network

终端节点主要负责将各种渔业环境监测数据通过 LoRa 无线方式发送给网关。其硬件原理框图如图 1b 所示，采用低功耗微控制器 STM32L151[28]，和一个基于 SX1278 芯片的 LoRa 模块外，还集成温度、溶氧、pH 值、盐度、浊度等各种水质传感器的一种或几种。终端节点部署在环境监测现场，通常采用锂电池供电。

1.2　网络拓扑

本方案设计的网络拓扑如图 2 所示。LoRa 终端节点与 LoRa 网关构成星形拓扑架构，消除了 Zigbee 网状网技术的路由转发开销，具有较低的通信延迟[21]。LoRa 终端节点发送完数据后立即进入休眠状态，直到下一个数据采集周期才被唤醒，可大大降低功耗，延长网络寿命。网关对各个终端的上传数据进行汇聚分类，并通过 Internet 上传到云端服务器，然后推送到远程终端，如各种移动终端、计算机等。远程终端应用软件对数据进行信息管理、分析统计、智能决策、预警控制等处理。

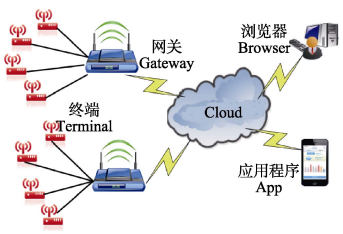


图 2　网络拓扑

Fig.2　Network topology

2　LoRa 通信方案

在渔业环境监测系统中，既有需要周期性上传的现场环境感知常规数据，又有需要实时上传的紧急异常数据，如某一监测指标严重超标，需要发送报警信息。为满足应用需求，本文在低成本双通道 LoRa 网关的基础上提出了一种速率自适应的双信道同步通信策略 LoRa-DSADR（dual-channel synchronous communication with adaptive data rate）。在满足终端节点低功耗通信的同时，又满足紧急数据实时上传的需求。

2.1　LoRa-DSADR 的双信道策略

对于 LoRa 技术，网关的 SX1278 模块与终端的 SX1278 模块进行无线通信必须满足无线信道频段、带宽、扩频因子设置相同[29]。

LoRa 射频芯片的通信距离与接收灵敏度有关，而接收灵敏度主要取决于扩频因子；扩频因子设置值越高，接收灵敏度越高，通信距离越远[21,26]。各个终端节点的部署位置不同，其到网关的距离也不同，处于相同距离范围的节点可采用相同的扩频因子，如图 3 中，通信距离大于半径 r_1，小于半径 r_2 范围内的节点的扩频因子 SF 可设置为 11。表 1 所示为 SX1278 通信带宽设置为 125 kHz 时，不同的扩频因子 SF 设置值与数据率 DR_i 的对应关系。如果按位置对节点进行分组，对于距离网关越近的节点组，设置的扩频因子数值越低，可获得的数据率越高，相同长度的数据包射频发射时间越短，这样有利于提高吞吐量，减少节点的通信能耗和碰撞概率。如图 3 中，通信半径小于 r_1 的节点设置 SF=10，可获得比 SF=11 高 1 倍的速率。

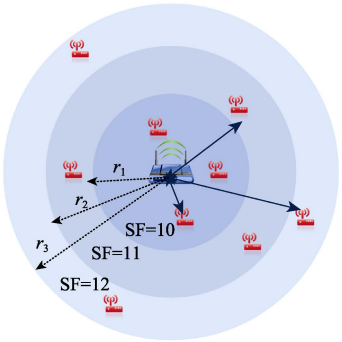


图 3　扩频因子（SF）与通信距离（r）

Fig.3　Spreading factor(SF) and communication distance(r)

表 1　扩频因子与数据率

Table 1　Spreading factor and data rate

数据率 Data rate（DR_i）	扩频因子 Spreading factor（SF）	比特率 Bit rate/(bit·s^{-1})
0	12	250
1	11	490
2	10	980
3	9	1 760
4	8	3 125
5	7	5 470

网关的 2 个 SX1278 模块分别对应 2 个物理信道：周期性数据信道 1 和特殊功能信道 2，而终端节点只使用一个 SX1278 模块。基于 LoRa 技术的上述特点，LoRa-DSADR 策略协调 MAC（Media access control）层的信道、

扩频因子切换与分时同步调度。

周期性数据信道 1 只用来进行常规数据包的周期性上传，通过 LoRa-DSADR 的自适应数据率算法，为不同距离范围的终端节点分配不同的扩频因子，并周期性地进行信道 1 的扩频因子切换。

特殊功能信道 2 主要完成 3 个功能：节点加入、紧急数据上传、时间同步维护。为保证网络的连通性，该信道设置扩频因子 SF=12。

2.2 LoRa-DSADR 策略的节点入网与时间同步

新的终端节点在上电初始化阶段工作在特殊功能信道 2；LoRaWAN 通信没有采用类似 CSMA(carrier sense multiple access)的机制，其通信性能与 ALOHA[30]机制近似；因此，为了降低信道碰撞概率并节能，本策略首先进行高频的低功耗侦听（low power listening，LPL[31]），如图 4 所示，即节点周期性地进入信道活动检测（channel activity detection，CAD）模式，当检测到信道忙时，节点进入短暂休眠状态，当连续两次检测到信道空闲时，节点向网关发送加入请求。

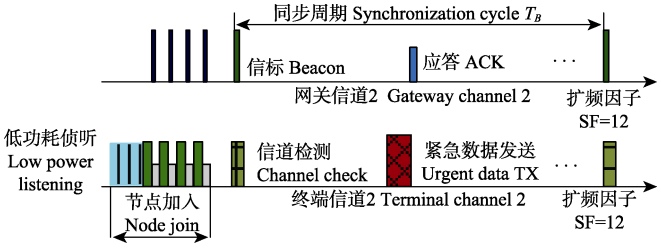


图 4 LoRa-DSADR 特殊功能信道 2 调度图

Fig.4 Schedule for LoRa-DSADR (dual-channel synchronous communication with adaptive data rate) of special function channel 2

为了进行终端节点与网关的高精度时间同步，本策略采取了 MAC 层时间同步的方法，其过程如图 5 所示。网关在确认请求时，将本地定时器当前值附加在确认帧的尾部；当终端节点接收到确认帧的前导码，则 SX1278 会产生一个中断通知 MCU，记录本地定时器的当前值。当终端节点接收完该帧，就能够计算出网关与终端节点两端定时器的差值。

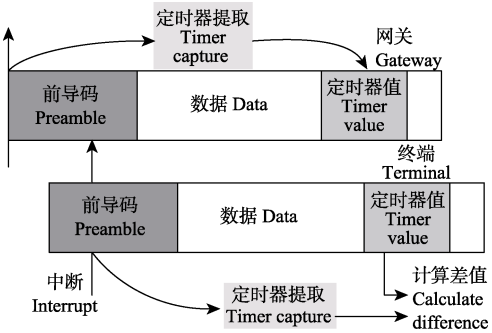


图 5 时间同步过程

Fig.5 Time synchronization process

接下来终端节点首先设置从本地定时器值中减去该差值，然后再减去一个小的同步退避值 τ。τ 的设置值应正好满足捕捉到确认帧前导码所需的时间（依前导码检测长度 PreambleDetectSize 和位率 BitRate 而定[26]）。这样在终端节点入网阶段就完成了与网关的时间同步。

确认帧中还包括 Beacon 周期 T_B 和下一次发送 Beacon 的时间偏移量信息。

如图 4 所示，网关以 T_B 为周期发送 Beacon，终端节点入网成功并完成时间同步后，在下一次 Beacon 接收时间切换到特殊功能信道 2，完成 Beacon 接收后再切换回周期性数据信道 1。通过周期性地接收 Beacon，节点就完成了与网关的时间同步维护。

2.3 LoRa-DSADR 策略的自适应数据率

各个终端节点的周期性数据信道 1 的扩频因子 SF 由网关根据接收信号强度 RSSI(received signal strength indication)和信噪比 SNR(signal noise ratio)自动调整。终端节点距离网关越近，接收信号强度越大，信噪比越高，则分配的扩频因子值越低，数据率越高。

$$\begin{aligned}&\overline{\mathrm{RSSI}_C}=W_U\cdot\overline{\mathrm{RSSI}_U}+W_D\cdot\overline{\mathrm{RSSI}_D}\\&\overline{\mathrm{SNR}_C}=W_U\cdot\overline{\mathrm{SNR}_U}+W_D\cdot\overline{\mathrm{SNR}_D}\\&W_U+W_D=1\end{aligned}\tag{1}$$

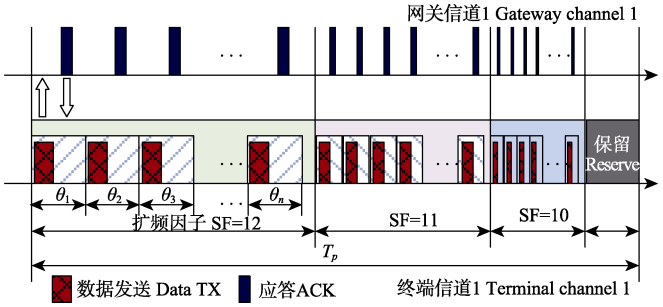
在终端节点加入网络阶段，网关根据交互过程中的上行和下行数据 RSSI 和 SNR 的均值 $\overline{\mathrm{RSSI}_U}$、$\overline{\mathrm{RSSI}_D}$、$\overline{\mathrm{SNR}_U}$、$\overline{\mathrm{SNR}_D}$ 计算当前节点的 $\overline{\mathrm{RSSI}_C}$ 和 $\overline{\mathrm{SNR}_C}$，如式（1）所示，$W_U$、$W_D$ 分别表示上行和下行数据 RSSI 与 SNR 均值的权重；然后根据式（2）确定终端节点的扩频因子，并返回给终端节点。SNR_{th1}、SNR_{th2}、RSSI_{th1}、RSSI_{th2} 分别表示在某距离范围内数据能可靠上传的 RSSI 与 SNR 的门限。

渔业环境监测多为较空旷区域，因此门限值可通过现场试验测试获得。

$$\mathrm{SF}=\begin{cases}10 & \text{if } \mathrm{SNR}_{th2}<\overline{\mathrm{SNR}_C}\\ & \quad\text{and } \mathrm{RSSI}_{th2}<\overline{\mathrm{RSSI}_C}\\ 11 & \text{if } \mathrm{SNR}_{th1}<\overline{\mathrm{SNR}_C}<\mathrm{SNR}_{th2}\\ & \quad\text{and } \mathrm{RSSI}_{th1}<\overline{\mathrm{RSSI}_C}<\mathrm{RSSI}_{th2}\\ 12 & \text{else}\end{cases}\tag{2}$$

2.4 LoRa-DSADR 策略的数据传输

对于周期性常规数据，如图 6 所示，网关根据网络内节点的数量和扩频因子的分配情况，将信道 1 的数据采集上传周期 T_p 划分为若干个时段，每个时段采用不同的扩频因子；在每个时段内为处于相同距离范围的节点分配时隙 θ_n；通过自适应数据率策略，终端节点根据网关返回的扩频因子设置信道 1，并在分配的时隙上传周期性数据，网关返回 ACK 确认帧。扩频因子值每降低 1，数据率提高一倍，数据率越高，相同长度数据上传的时间越短。终端节点发送完数据立即进入休眠状态，直到下一个周期分配的时隙到来才唤醒进行数据上传。如果终端节点连续 3 次上传数据，未接收到网关返回的 ACK，则切换到特殊功能信道 2，通过数据测试重新评估扩频因子。网关会根据测试数据重新为终端节点分配扩频因子和时隙。

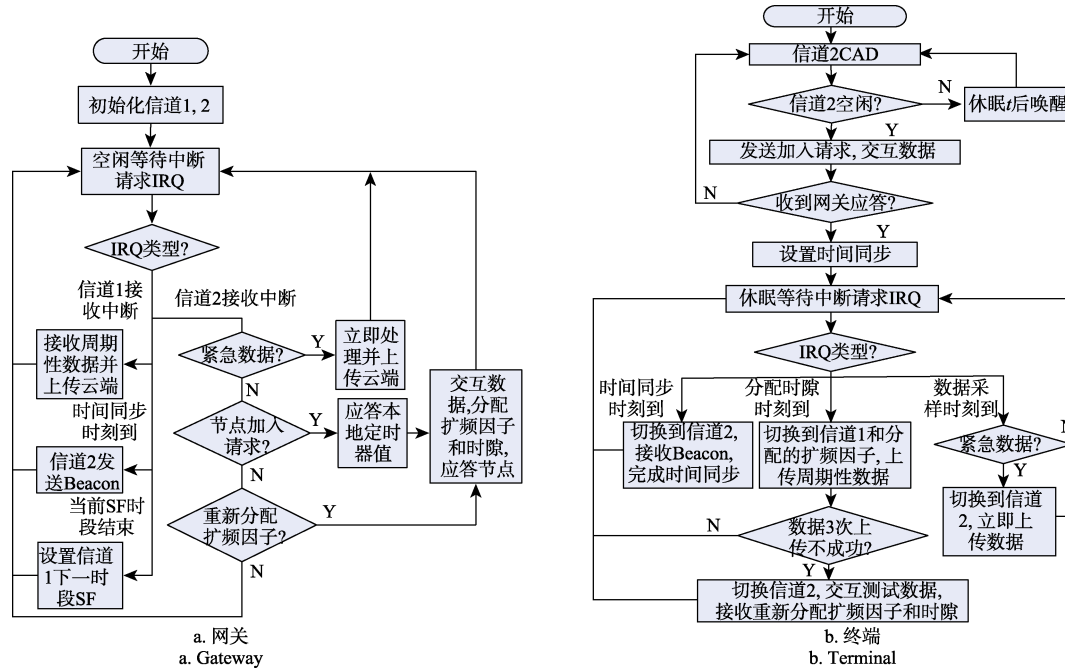


注：θ_n 表示同一距离范围内第 n 个节点分配的时隙，T_p 表示数据上传周期。
Note: θ_n denotes the allocated slot of the n^{th} node in the same distance range; T_p denotes the data upload cycle.

图 6　LoRa-DSADR 周期性数据信道 1 调度图
Fig.6　Schedule for LoRa-DSADR of periodic data channel 1

对于紧急数据，当节点需要上传时，不必等到分配时隙的到来，直接切换到特殊功能信道 2，进行紧急数据的实时上传，如图 4 所示。由于采用了不同的信道，不会和其他节点的周期性上传数据产生通信碰撞，大大提高了系统响应的实时性。

网关的 LoRa-DSADR 流程图如图 7a 所示。网关在信道初始化完成后空闲等待中断请求 IRQ（interrupt request），当有中断到来时，根据中断类型进行相应的处理。终端节点的 LoRa-DSADR 流程图如图 7b 所示。终端节点在加入网络并时间同步后，休眠等待中断请求 IRQ，当有中断到来时，根据中断类型进行相应的处理，如：时间同步、信道切换、紧急数据上传、周期性数据上传等。



注：IRQ 表示中断请求，CAD 表示信道活动检测。
Note：IRQ denotes interrupt request, and CAD denotes channel activity detection.

图 7　网关与终端的 LoRa-DSADR 流程图
Fig.7　Flowchart of LoRa-DSADR at the gateway and terminals

3　LoRa-DSADR 性能仿真

为了评估 LoRa-DSADR 策略的性能，应用 Matlab 编写了计算机仿真程序，LoRa 通信物理层仿真模型设计参考文献[20]。在如图 3 所示的半径 3 km 的范围内随机均匀部署终端节点，网关位于原点。节点信道 1 扩频因子 SF=12，信道 2 扩频因子 SF 分时段采用 10~12，数据包有效负载 51 字节。所有终端节点数据采集上传周期 T_p 为 5 min，同步周期 T_B 为 1 h。LoRa-DSADR 与单信道 LoRa 和时间同步的单信道 LoRa-SYN 进行性能比较；假设单信道 LoRa 的数据包发送时间偏移服从泊松分布；时间同步的单信道 LoRa-SYN 按平均分配的时隙发送数据包。单信道 LoRa 和 LoRa-SYN 都采用扩频因子 SF=12。每轮仿真时间为 5 h，取 6 轮仿真的平均值。仿真评估网络性能随终端节点数量增加的变化情况，评价指标如下：

1）碰撞率：数据包同时发送发生信道碰撞的次数与发送的数据包总数的比值。

2）通信延迟：数据包从发送到被网关成功接收的时间，包括数据空中传输和发送失败重传的时间等。

3）能量消耗：终端节点平均成功发送 1 位数据的能耗。

如图 8a 所示，单信道 LoRa 通信没有采用类似 CSMA 的机制，其通信性能与 ALOHA 近似，碰撞率随通信终端个数的增加而增大。LoRa-SYN 因为各个终端节点都平均分配时隙周期性同步上传数据，碰撞率较低；但随着节点数量的增加碰撞率略有上升，这是因为单信道单扩频因子通信，当终端节点有紧急数据需要上传且不在自己的分配时隙内时，数据碰撞的概率很大。LoRa-DSADR 由于双信道多扩频因子通信且加入了 CAD 功能，紧急数据上传不会影响到其他节点的周期性数据上传，只有两个节点同时上传紧急数据时才有可能发生冲突，因此碰撞率非常低，且几乎不受网络节点个数增加的影响。

如图 8b 所示，由于单信道 LoRa 和 LoRa-SYN 都采用单一扩频因子 SF=12，因此其位速最慢（表 1），数据包空中传输时间最长。由于信道碰撞和数据重传，单信

道 LoRa 的通信延迟随节点数量的增大而增大。LoRa-DSADR 由于采用了自适应数据率机制，距离网关较近的节点具有较快的数据率，因此平均通信延迟最低且保持稳定。

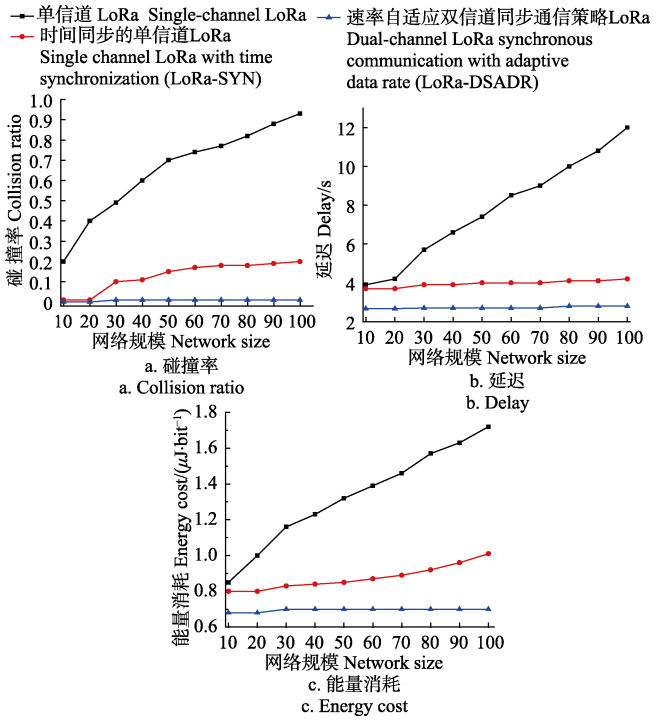


图 8 网络性能随终端节点数量的变化

Fig.8 Performance varies with the network size (node number)

如图 8c 所示，数据碰撞和重传会进一步增加单信道 LoRa 通信的能耗，减小电池寿命。LoRa-SYN 由于采用扩频因子 SF=12，因此传输相同长度数据的平均能耗要比 LoRa- DSADR 高。LoRa-DSADR 采用多扩频因子同步调度通信机制，且时间同步开销很小，随着节点数量的增加，其低功耗优势非常明显。根据仿真结果推算，如果采用 7.4 V 的 3600 mA·h 锂电池，此场景下采用 LoRa-DSADR 机制的终端节点平均工作寿命在 1 a 以上。

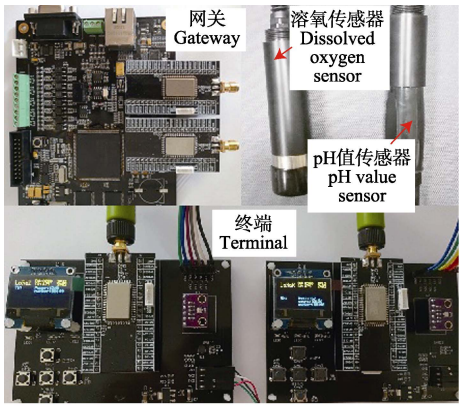
4 滴水湖现场试验

4.1 现场试验系统与部署

为了进一步验证 LoRa-DSADR 策略的有效性和可靠性，本文在上海临港新城滴水湖进行了现场试验。图 9a 为本试验自行开发的双信道网关和终端节点，以及终端节点配备的溶氧（RDO-206 型）、pH 值（PHG-202 型）传感器等硬件设备。LoRa-DSADR 策略采用 C 语言，在 Semtech 公司提供的 SX1278 驱动程序 Firmware Drivers V2.1.0 的 MAC 层上设计实现。

终端节点部署如图 9b 所示，渔业环境监测应用多为较空旷区域，因此选择节点 1、3、4 与网关为视距通信，节点 2 与网关之间有丛林遮挡。由于 LoRa 网络的终端节点与网关构成星型拓扑，进行一跳通信，因此影响网络性能的因素主要是终端节点到网关的距离，是否有障碍物遮挡，还有数据发送的间隔。

本文针对此传感网络系统专门开发了安卓手机 APP 程序，通过连接云端服务器，可查询 4 个节点的监测数据。其软件界面以及 2 号节点的溶氧、pH 值、温度数据监测界面如图 10 所示。



a. 硬件设备

a. Hardware devices

b. 节点部署图

b. Nodes deployment diagram

图 9 硬件设备与节点部署图

Fig.9 Hardware devices and nodes deployment diagram

图 10 手机 APP 程序监测界面

Fig.10 Monitoring interface of mobile APP program

4.2　现场试验测试与性能评估

首先测试 4 个终端节点采用扩频因子 SF=10、11、12 和 LoRa-DSADR 机制时的数据投递率，测试数据网关不进行 ACK 应答，终端节点不进行数据重传，终端节点发射功率为 25 mW，数据包有效负载 51 字节，数据周期 T_p 为 2 min。

由于部署节点较少且数据发送间隔为 2 min，所以信道碰撞概率很低，所以投递率主要受距离和扩频因子的影响。如图 11a 所示，终端节点 1 距离网关最近，4 种机制的投递率都接近 1；在节点 3 和 4，扩频因子 SF=10、SF=11 的投递率随着距离的增加而下降，SF=12 为 0.99，而 LoRa-DSADR 由于采用扩频因子自适应机制数据投递率为 0.99。对于节点 2，虽然距网关的距离较节点 3、4 近，但由于无线信号传输路径上有丛林遮挡，信号衰落最严重，所以扩频因子 SF=10、SF=11 的数据投递率都低于 0.8，SF=12 和 LoRa-DSADR 的投递率均为 0.95，如开启 ACK 应答机制，数据通信的可靠性会进一步提高。由此可以看出，虽然采用 SF=12 可以获得和 LoRa-DSADR 一样的投递率，但对于节点 1、3，LoRa-DSADR 机制会选择更小的扩频因子进行周期性数据上传，在保证投递率的同时，有利于进一步提高能效性；而对于节点 2，LoRa-DSADR 会选择最大的扩频因子，以保证网络的连通性。

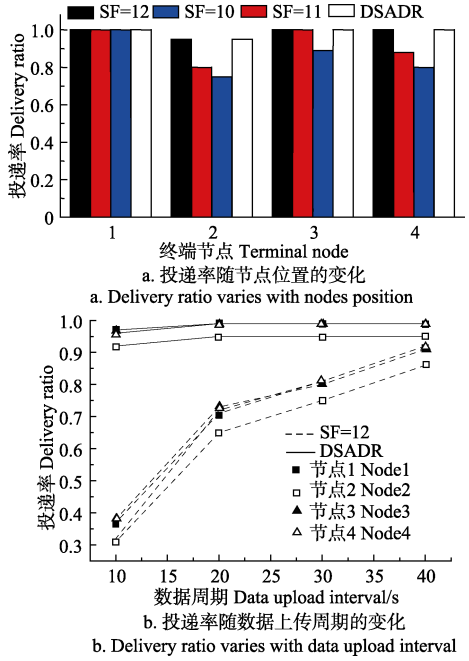


图 11　投递率性能测试

Fig.11　Delivery ratio performance testing

接下来，测试 4 个终端节点采用扩频因子 SF=12 和 LoRa-DSADR 机制时，数据投递率随数据上传周期 T_p 变化的情况，取 10 轮试验的平均结果。如上述试验所述，扩频因子 SF=12 的数据投递率在本试验范围内不受距离因素的影响，因此，同一数据周期 T_p 下，各位置节点的投递率相差不多，如图 11b 所示，采用扩频因子 SF=12 时，4 个节点的投递率都随数据上传周期的减小而降低，当数据周期 T_p 为 10 s 时，信道碰撞的概率大大增加，投递率不到 0.4。LoRa-DSADR 机制由于协调 MAC 层扩频因子切换与分时同步调度，信道碰撞概率大大降低，除节点 2 外，T_p 为 20、30、40 s 时，各节点数据投递率都在 0.98 以上；当数据周期降为 10 s 时，各节点的投递率仍在 0.95 以上，由此也验证了本策略时间同步机制的有效性。节点 2 由于有丛林遮挡，投递率略为降低。

由试验结果可知，LoRa-DSADR 策略大大降低了信道碰撞的概率，保证了数据上传的可靠性；同时，分配低扩频因子的节点，提高了数据率，因此可以减小了数据上传的能耗，提高了节点的电池寿命。

5　结　论

本文针对大面积渔业环境和水产养殖监测应用需求，通过对现有无线方案的分析比较，提出了基于 LoRa 的低功耗传感网络系统。首先自行设计了低成本的双通道 LoRa 网关，并在此基础上研究设计了自适应数据率的双信道同步通信策略 LoRa-DSADR（dual-channel Synchronous communication with adaptive data rate）。仿真和试验结果表明：本设计可根据终端节点部署位置自动调整数据率，并根据工作状态自动进行信道切换，在保证 LoRa 无线通信大面积覆盖的同时，满足低功耗低延迟和高可靠性无线通信的需求。系统可有效覆盖半径 3 km 的监测区域，100 个终端节点的网络规模，采用 3600mA·h 锂电池，数据上传周期为 10 min 时，终端节点寿命可达 1 a。渔业环境监测实际应用中的数据上传周期要比试验的数据上传周期要长，因此会获得更长的电池寿命。由于渔业和水产养殖应用环境较复杂，下一步需要进行更多的长期的现场试验，进行功耗的详细评估，通过更多的数据包 RSSI 和 SNR 样本采集分析，提高 Lora-DSADR 机制的可靠性。另外，在网关端准备研究适用于渔业环境监测的数据融合算法，并加入对渔业装备的控制功能，如增氧机、投饲机等，进一步完善系统应用的智能化程度。

[参　考　文　献]

[1] 李道亮，杨昊. 农业物联网技术研究进展与发展趋势分析[J]. 农业机械学报，2018，49(1)：1－20.
Li Daoliang, Yang Hao. State-of-the-art review for Internet of Things in agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 1－20. (in Chinese with English abstract)

[2] 李瑾，郭美荣，高亮亮. 农业物联网技术应用及创新发展策略[J]. 农业工程学报，2015，31(增刊 2)：200⇢ 209.
Li Jin, Guo Meirong, Gao Liangliang. Application and innovation strategy of agricultural Internet of Things[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(Supp.2): 200－209. (in Chinese with English abstract)

[3] Xu G, Shen W, Wang X. Applications of wireless sensor networks in marine environment monitoring: A survey[J]. Sensors, 2014, 14(9): 16932－16954.

[4] 黄建清，王卫星，姜晟，等. 基于无线传感器网络的水产

养殖水质监测系统开发与试验[J]. 农业工程学报，2013，29(4): 183↛ 190.
Huang Jianqing, Wang Weixing, Jiang Sheng, et al. Development and test of aquacultural water quality monitoring system based on wireless sensor network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(4): 183－190. (in Chinese with English abstract)

[5] 马从国，赵德安，王建国，等. 基于无线传感器网络的水产养殖池塘溶解氧智能监控系统[J]. 农业工程学报，2015，31(7): 193↛ 200.
Ma Congguo, Zhao Dean, Wang Jianguo, et al. Intelligent monitoring system for aquaculture dissolved oxygen in pond based on wireless sensor network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(7): 193－200. (in Chinese with English abstract)

[6] 杨旭辉，周庆国，韩根亮，等. 基于 ZigBee 的节能型水产养殖环境监测系统[J]. 农业工程学报，2015，31(17)：183↛ 190.
Yang Xuhui, Zhou Qingguo, Han Genliang, et al. Energy-efficient aquaculture environmental monitoring system based on ZigBee[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(17): 183－190. (in Chinese with English abstract)

[7] 颜波，石平. 基于物联网的水产养殖智能化监控系统[J]. 农业机械学报，2014，45(1): 259↛ 265.
Yan Bo, Shi Ping. Intelligent monitoring system for aquiculture based on internet of things[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 259－265. (in Chinese with English abstract)

[8] 蒋建明，史国栋，赵德安，等. 基于 LEACH 协议的水产养殖参数智能监控系统[J]. 农业机械学报，2014，45(11): 286↛ 291.
Jiang Jianming, Shi Guodong, Zhao Dean, et al. Intelligent monitoring system of aquaculture parameters based on LEACH protocol[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 286－291. (in Chinese with English abstract)

[9] 蒋建明，史国栋，赵德安，等. 水产养殖参数无线测量网络的长生命周期研究[J]. 农业工程学报，2014，30(7)：147↛ 154.
Jiang Jianming, Shi Guodong, Zhao Dean, et al. Research on life cycle of wireless network for measuring environmental parameters in aquaculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(7): 147－154. (in Chinese with English abstract)

[10] Simbeye D S, Zhao J, Yang S. Design and deployment of wireless sensor networks for aquaculture monitoring and control based on virtual instruments[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2014, 102(3): 31－42.

[11] Luo H, Li G, Peng W, et al. Real-time remote monitoring system for aquaculture water quality[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2015, 8(6): 136－143.

[12] Alippi C, Camplani R, Galperti C, et al. A robust, adaptive, solar-powered WSN framework for aquatic environmental monitoring[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(1): 45－55.

[13] 陈海磊. 基于物联网的大面积水产养殖远程监控系统设计[D]. 镇江：江苏大学，2016.
Chen Hailei. Design of Remote Monitoring System for Large Area Aquaculture Based on Internet of Things[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese with English abstract)

[14] 申庆祥，张宇华. 生命周期最大化的无线水质监测网络路由优化研究[J]. 软件工程，2017，20(9)：45↛ 48，41.
Shen Qingxiang, Zhang Yuhua. Research on route optimization of the wireless water quality monitoring network based on lifetime maximization[J]. Software Engineering, 2017, 20(9):45↛ 48, 41. (in Chinese with English abstract)

[15] 李慧，刘星桥，李景，等. 基于物联网 Android 平台的水产养殖远程监控系统[J]. 农业工程学报，2013，29(13)：175↛ 181.
Li Hui, Liu Xingqiao, Li Jing, et al. Aquiculture remote monitoring system based on IOT Android platform[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(13): 175－181. (in Chinese with English abstract)

[16] Ali A, Shah G A, Farooq M O, et al. Technologies and challenges in developing Machine-to-Machine applications: A survey[J]. Journal of Network & Computer Applications, 2017, 83: 124－139.

[17] LoRa Alliance. LoRaWAN™ 1. 1 Specification[EB/OL]. (2017-10-11)[2018-08-01].https://lora-alliance.org/sites/default/ files/2018-04/lorawantm_specification_-v1. 1. pdf.

[18] Semtech. SX1301 Datasheet[EB/OL]. (2017-06-01)[2018-08-01]. https://www.semtech. com/uploads/documents/sx1301. Pdf.

[19] Augustin A, Yi J, Clausen T, et al. A study of LoRa: Long range & low power networks for the Internet of Things[J]. Sensors, 2016, 16(9): 1466.

[20] Casals L，Mir B，Vidal R，et al. Modeling the energy performance of LoRaWAN [J]. Sensors, 2017, 17(10): 2364.

[21] Petajajarvi J, Mikhaylov K, Pettissalo M, et al. Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2017, 13(3): 1－16.

[22] Georgiou O，Raza U. Low PowerWide Area Network Analysis: Can LoRa Scale?[J]. IEEEWirel. Commun. Lett. 2017, 6(2): 162－165.

[23] Song Y H, Lin J, Tang M, et al. An internet of energy things based on wireless LPWAN[J]. Engineering, 2017, 3(4): 460－466.

[24] Kim D Y, Jung M. Data transmission and network architecture in long range low power sensor networks for IoT[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 93(1): 119－129.

[25] Pham C. Building Low-Cost Gateways and Devices for Open

LoRa IoT Test-Beds[M]//Guo S, Wei G, Xiang Y, et al. Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities. Cham: Springer International Publishing, 2016: 70－80.

[26] Semtech. SX1278 Datasheet[EB/OL]. (2013-09-01) [2018- 08-01]. https://www.semtech.com/uploads/documents/DS_SX1276-7-8-9. pdf.

[27] STMicroelectronics. STM32F429 Datasheet[EB/OL]. (2013-03-19)[2018-08-01].https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f429ze. pdf.

[28] STMicroelectronics. STM32L151 Datasheet[EB/OL]. (2014-03-12)[2018-08-01].https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l151rb-a. pdf.

[29] Semtech. LoRa™ Modulation Basics[EB/OL]. (2015-05-01) [2018-08-01].https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22. pdf.

[30] Abramson N. The Aloha System: Final Technical Report[R]. Hawaii University: Honolulu, HI, USA, 1974.

[31] Polastre J, Hill J, Culler D. Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of the 2nd ACM SenSys Conference, Baltimore, MD, USA, 2004: 95－107.

Long range low power sensor networks with LoRa sensor for large area fishery environment monitoring

Zhang Zheng[1], Cao Shouqi[1], Zhu Jianping[1], Chen Jiapin[2]

(1. *College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai* 201306, *China;*
2. *School of Electronics Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai* 200240, *China*)

Abstract: The design of wireless monitoring system for fishery environment based on Internet of Things technology has become a research hotspot at present. Aiming at the characteristics of long monitoring period and large coverage area in applications of inshore fishery and large area aquaculture environment monitoring, -the long range low power sensor networks was designed based on LoRa technology-. Due to the expensive price and technology closedness of commercial LoRa gateway SX1301, a low cost open dual-channel gateway was designed, based on two LoRa SX1278 transceivers. Based on the hardware design of dual-channel gateway, a dual-channel synchronous communication scheme with adaptive data rate was proposed. Two LoRa SX1278 transceivers corresponded to two independent channels, namely periodic data channel 1 and special function channel 2. The periodic data channel was used to upload regular packets, data collecting cycle of which was divided into several periods using different spreading factor (SF). Each period was equally split into several slots to the nodes within the same distance range in which the spreading factor was the same. The special function channel 2 was used to upload urgent packets, join in network, and synchronize time. For urgent packets, the terminal nodes could directly upload by switching channel 2 without waiting for the allocated slot arriving , to improve the real-time response of the network system. The scheme fully took the advantage of the characteristics of multiple spreading factors based on LoRa. Different spreading factors was assigned to terminal nodes according to the distances to gateway automatically with the different received signal strength indication and signal noise ratio of the received packets to ensure network connectivity. The scheme was built into a custom Matlab simulator to evaluate the data collision ratio, communication delay and energy cost performance varying with the network size(number of terminal node). With the terminal nodes increasing to 100, the performance of proposed scheme was nearly constant; but the collision ratio with single channel and single spreading factor was nearly linearly increasing to 1, and energy cost increased much more. The field experiment was carried out to test the effectiveness and reliability in Dishui Lake in Shanghai. An application program(App) for Android mobile phone was developed for monitoring field data. Four terminal nodes with dissolved oxygen sensor and pH value sensor were deployed in different distance to gateway. To line-of-sight communication, the average delivery ratio of proposed scheme increased from 0.8 to 0.99 compared with single spreading factor. To the rapid communication with 10 s uploading interval, the average delivery ratio increased from 0.4 to 0.95 compared with single spreading factor of 12. The proposed scheme largely reduced the wireless channel collision probability, improving the real-time performance for urgent data and the average lifetime of terminals, while ensuring large coverage area of monitoring network by the MAC layer synchronization scheduling. The simulation and experiment results showed the effectiveness of the proposed scheme. The designed sensor network system could cover a monitoring region with radius of 3 km, with the capacity of 100 terminal nodes and terminal node with 3600 mA·h lithium battery could work for 1 a with the 10 min data uploading interval.

Keywords: aquaculture; monitoring; wireless sensor networks; LoRa; synchronous; adaptive data rate