

LoRa 空口数据的同步与解调*

雷 芳¹, 陈 博¹, 吕京昭¹, 李平安¹, 杜海涛², 栗 栗²

(1.重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2.中国移动通信集团公司研究院, 北京 100053)

摘 要: LoRa 通信技术具有低功耗、远距离的特点, 在生活中越来越受到关注。然而, 对于底层的 LoRa 调制解调技术以及物理层通信链路流程, 官方没有公开的技术文档说明, 只有一些文献提及了这些内容。基于此, 结合官方罗德仪表 LoRa 调制参数配置接口与文献资料, 完善了物理层通信链路流程; 从本质上, 描述了 LoRa 调制解调技术的原理, 从罗德仪表空口采集 LoRa 调制数据, 对文献提出 LoRa 调制解调算法进行验证, 提出了一种 LoRa 空口数据的同步算法, 实现了对 LoRa 空口数据的解调。最后, 对 LoRa 调制技术在 5 种码率下进行抗噪声性能仿真。仿真结果表明, 并不是纠错码位数越多纠错效果越好; 码率为 4/5 效果纠错最佳, 抗噪声性能大约提高 1 dB。

关键词: LoRa; 罗德仪表; 通信链路; 空口数据; 同步算法; 解调

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211637

中文引用格式: 雷芳, 陈博, 吕京昭, 等. LoRa 空口数据的同步与解调[J]. 电子技术应用, 2022, 48(4): 81-85.

英文引用格式: Lei Fang, Chen Bo, Lv Jingzhao, et al. Synchronization and demodulation of LoRa null port data[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(4): 81-85.

Synchronization and demodulation of LoRa null port data

Lei Fang¹, Chen Bo¹, Lv Jingzhao¹, Li Pingan¹, Du Haitao², Li Su²

(1.School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2.Research Institute of China Mobile Communications Group Corporation, Beijing 100053, China)

Abstract: LoRa communication technology has the characteristics of low power consumption and long distance, and has attracted more and more attention in life. However, for the underlying LoRa modulation and demodulation technology and the physical layer communication link flow, the official does not have the public technical document description, only some literature mentioned these contents. This paper improves the physical layer communication link flow by combining the LoRa modulation parameter configuration interface the official Rhode instrument with the literature. The principle of LoRa modulation and demodulation technology is described in essence, and the LoRa modulation data are collected from the Rhode instrument null port. The modulation and demodulation algorithm of LoRa literature is verified, and a synchronization algorithm of LoRa null port data is proposed. The LoRa demodulation of null port data is realized. Finally, the noise resistance performance was simulated for the LoRa modulation technique at 5 code rates. The simulation results show that the reduction of bit rate does not mean that the anti-noise ability of the system will be improved. The code rate is 4/5 with the best effect error correction, and the noise resistance performance improves by about 1 dB.

Key words: LoRa; Rhode instrument; communication links; null port data; synchronization algorithm; demodulation

0 引言

近年来, 智能设备的蜂拥而起, 先后涌现了一系列的无线通信技术, 被大规模应用于各个行业各种应用场景。其中, 在广域网通信技术中, LoRa 是一种前景比较好的低功耗广域网 (Low Power Wide Area Network, LPWAN)^[1-3]技术, 主要应用于具有低功耗、远距离特点的应用场景, 如智能抄表^[4]、智慧农业^[5]、智慧城市^[6]等。

LoRa 技术是由美国 Semtech 公司开发的一种扩频技术, 融合了数字扩频、数字信号处理及前向纠错编码等技术^[7]。与传统扩频技术相比, LoRa 技术增加了链路预算和对带内干扰的抗干扰能力, 扩大了无线通信链路的通信范围^[8]。在 SX1280 技术手册^[9]以及文献^[10]中, 给出了 LoRa 数据包结构以及长度计算方法, 并没有给出物理层 LoRa 数据包的调制解调算法、通信链路流程; 仅有一些文献提到 LoRa 调制解调技术的原理及物理层收发端流程框图^[11-13]。在文献^[14]中, 提到了一种 LoRa 空口

* 基金项目: 教育部-中国移动科研基金(MCM201805-2)

数据锁相环的硬同步算法,但基本没有文献提出软同步算法。

基于此,本文将结合官方的罗德仪表中的 LoRa 调制技术和文献中的资料对 LoRa 物理层进行更详细更完整的说明,提出一种高效的软同步算法,并对罗德仪表生成的 LoRa 空口数据实现解调。

1 LoRa 物理层

1.1 LoRa 数据包结构及各部分作用

根据罗德仪表 LoRa 参数配置界面,可知数据包有显示和隐式两种报头,显示模式数据包结构如图 1 所示,隐式模式是关闭报头。

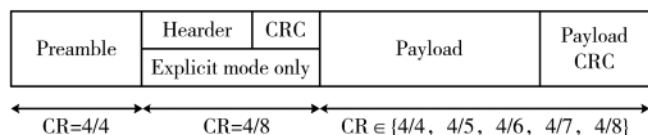


图 1 LoRa 显示模式(Explicit mode only)的数据包结构

在图 1 中,前导(Preamble)主要用于接收端同步,不加密,不添加纠错编码;报头(Header)主要包含有效载荷信息(Payload)的字节数、前向纠错码的码率(CR)以及 Payload 是否添加 CRC,Header 的纠错码率按照最大纠错码率 CR 为 4/8 添加;Payload CRC 部分采用循环冗余校验码。隐式模式在这些报头承载参数信息都已知,直接在接收端配置已知参数,不需要通过解报头来获取这些信息。

Payload 主要承载要发送的信息,数据长度为 1~255 B; Payload CRC 是给 Payload 进行差错检验,不添加纠错编码时占 2 B。Payload 和 Payload CRC 采用的加密方式以及添加纠错编码的码率相同,有 5 种码率(CR ∈ {4/4, 4/5, 4/6, 4/7, 4/8})可选。

1.2 LoRa 收发端流程框图

通过罗德仪表的 LoRa 调制的参数配置接口和文献[9]~[10],绘制 LoRa 收发端流程如图 2 所示。在下文对罗德仪表采集的 LoRa 空口数据进行去前导解调,发

现 Payload 部分解出的符号个数大于实际配置比特长度生成的符号个数。因此,除了上述这些比特数据的处理方式,还涉及 Payload 部分数据的填充规则。

在图 2 中,报头 Header 和 Payload 码率可以不同,因此它们是分开添加纠错码。前导码由 n 个上扫频信号(Upchirps 信号)、两个同步码以及 2.25 个下扫频信号(Downchirps 信号)三部分组成。

其中,根据罗德仪表德 LoRa 调制界面的各个模块功能作用分析,对 Payload 部分比特流数据加密和提高鲁棒性处理的顺序依次为:是否添加 CRC,是否开启低速率优化,是否添加纠错编码,是否打开交织器^[15],白化、格雷码;而在接收端 Payload 数据的解调、解密和去冗余比特,其处理顺序和发送端相反。

在 LoRa 调制中白化是一种扰码技术,是对单个比特进行的,防止出现连续的 0 或 1 导致信道功率分配不均,但 LoRa 技术中没有信道功率分布不均问题,这里作用主要是加密,白化和解白化的过程是一样。

2 LoRa 的调制解调技术

2.1 LoRa 的调制技术

LoRa 调制技术的本质是一种线性频率调制技术,对初始频率的循环偏移点数携带需要传递的信息进行扩频传输。将经过处理和填充的比特数据按扩频因子 N_{sf} 个比特封装成 1 个符号,将 N_{sf} 个比特数据分割为 $2^{N_{sf}}$ 个码片进行扩频传输。一个符号的 LoRa 调制定义如下:

$$sm(n) = \begin{cases} e^{j2\pi(f_c n + \frac{\mu B n^2}{2T_s} + \frac{\mu K n}{T_s} - \frac{\mu B n}{2})} & n \in N_1 \\ e^{j2\pi(f_c n + \frac{\mu B n^2}{2T_s} + \frac{\mu K n}{T_s} - \frac{3\mu B n}{2})} & n \in N_2 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $N_1 = \{[0, 1, \dots, 2^{\frac{N_{sf}}{B}} - K - 1]\}$, $N_2 = \{[2^{\frac{N_{sf}}{B}} - K, \dots, 2^{\frac{N_{sf}}{B}} - 1]\}$,

调制端 μ 取 1, f_c 为载波频率。 n 为 LoRa 调制信号时域采样点位置; B 为调制带宽; T_s 为信号扫频时间,即为符号周期 $2^{N_{sf}}/B$ s; K 为 N_{sf} 个比特数据的十进制数的信息值,即偏移码片数。当 K 等于 0 时, μ 为 1 是上扫频信号(Upchirp), μ 为 -1 是下扫频信号(Downchirp 信号)。

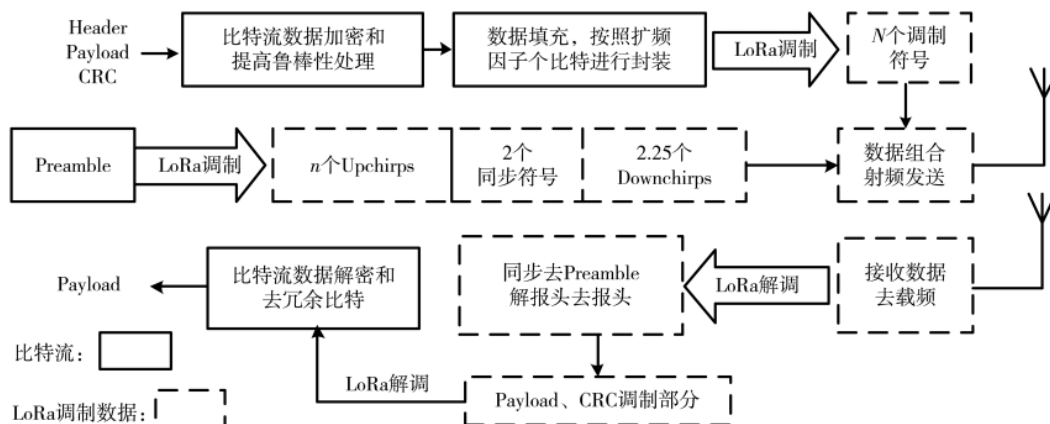


图 2 “LoRa 收发端”的流程框图

由式(1)可知,LoRa 调制信号的频率随时间变换的表达式 $f(n)$ 为:

$$f(n) = \begin{cases} f_c + \frac{Bn}{T_s} + \frac{K}{T_s} - \frac{B}{2} & n \in N_1 \\ f_c + \frac{Bn}{T_s} + \frac{K}{T_s} - \frac{3B}{2} & n \in N_2 \end{cases} \quad (2)$$

2.2 LoRa 的解调技术

根据 LoRa 调制的基本原理,由本地 Upchirp 信号作为基本的调制信号,对初始频点进行循环位移得到调制信号。在接收端应对先接收数据去载频 f_c 和滤波处理,得基带 LoRa 调制信号 $sm(n)'$,在这里 $sm(n)'$ 是在理想情况下,不包含噪声 $n(t)$ 的归一化数据(与 $sm(n)$ 相同);再与 $\mu=-1, K=0$ 的 Downchirp 信号进行相乘得 $sr(n)$ 。

$$sr(n) = sm(n)' e^{-j2\pi(\frac{Bn^2}{2T_s} - \frac{Bn}{2})} = \begin{cases} e^{j2\pi(\frac{Kn}{T_s})} & n \in N_1 \\ e^{j2\pi(\frac{Kn}{T_s} - Bn)} & n \in N_2 \end{cases} \quad (3)$$

其中, N_1, N_2 与式(1)中相同, n 为接收端采样点的横坐标。对 $sr(n)$ 的 $2^{N_{sr}}$ 个码片的行向量进行离散快速傅里叶变化(Fast Fourier Transformation, FFT),可以得到 1 个符号的频谱 $y(n)$ 。根据第 p 个符号的频谱 $y(n, p)$ 的压缩脉冲的最大模值的横坐标 n 乘以 B 为频率突变采样点的位置,得第 p 个符号的解调值为 $K(p)$ 。

$$y(n) = \text{FFT}(sr(n)) \quad n \in \{[0, 1, \dots, 2^{N_{sr}} - 1]\} \quad (4)$$

$$K(p) = \text{find}(\max|y(n, p)|) \cdot B \quad (5)$$

3 LoRa 空口数据的解调

3.1 获取 LoRa 空口数据

通过罗德仪表选择 LoRa 标准,配置相应的参数生成 LoRa 调制数据包。为了下文数据包的 Payload 部分 LoRa 解调简单化,更好地验证文献中提到的 LoRa 解调算法和 Payload 部分数据的加密特点,在参数配置选择隐式模式,关闭可以配置数据编码方式, B 设置为 500 kHz, N_{sr} 设置为 7, Payload 设置 4 字节全 1 数据,只有 LoRa 调制的白化处理以及 Payload 部分独特的数据填充方式是仪表内部自动配置的。通过罗德仪表连续采集的 40 ms 数据的实部、虚部幅值以及模值波形如图 3 所示。

由于通过罗德仪表采集的空口数据噪声很小,因此在图 3 中可以直接区分数据部分和噪声部分;为了能截取到 1 个完整 LoRa 数据包,故在其明显的数据大概的起始位置,向前多取 20 个点。

利用 LoRa 解调算法进行滑动解调,并观察解调数据的 FFT 频谱图判断解调结果的正确性,直到发现解调值为 8 个连续的 0、两个同步字,再接着使用 Upchirp 信号反解为 2 个 0,可得 LoRa 数据包的起点,并结合罗德仪表可视化界面可得该参数配置数据包的点数,截取出一个完整的幅值归一化 LoRa 数据包如图 4 所示,并标出了前导各部分的位置。

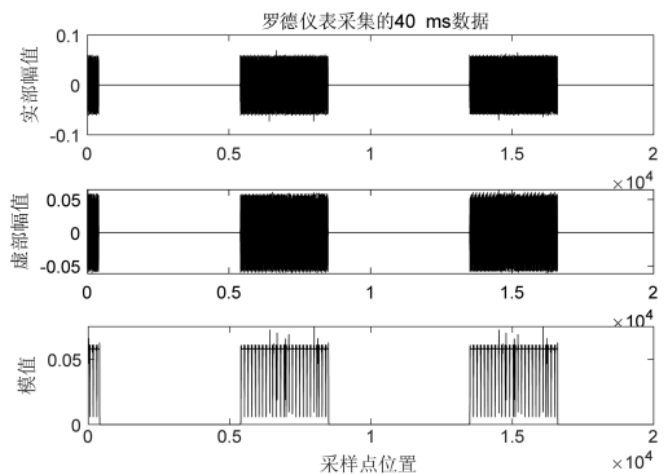


图 3 罗德仪表生成 40 ms 的 LoRa 调制数据

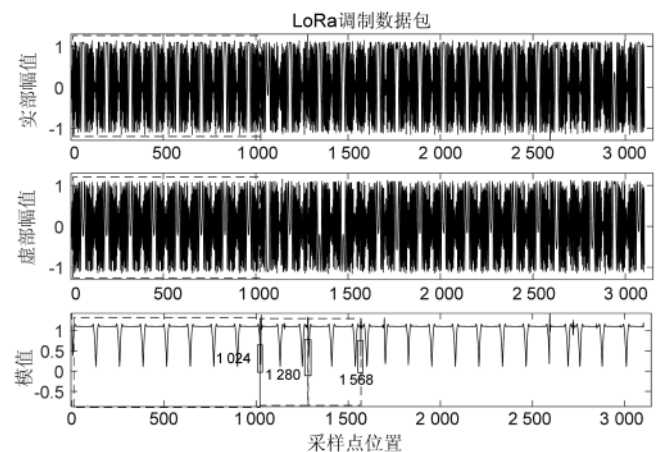


图 4 LoRa 数据包包的时域图

由于 LoRa 调制是一种频率调制技术,并且在传递消息时,1 个符号或相邻会有频率突变的地方,在罗德仪表抓取数据需对数据进行重采样,会经过内部的低通滤波器,因此在图 4 的第 3 子图数据取模的幅度不是一个固定值,而是当频率发生很大突变就会出现凹陷,当频率发生几个采样点或者几十个采样点突变就出现一些小波动。

图 4 的第 3 个子图中,标出了前导 3 个部分所处的采样点数所在的区间,可以明显发现,前 8 个符号都是以高频开始和高频结束的;在罗德仪表参数配置时,数据包前导的 8 个 Upchirp 信号起始频率为 $-B/2$,以 $B/2$ 结束,通过这一特点就很容易找到了 LoRa 数据包的前导,也符合 LoRa 官方文档中提到的 LoRa 前导的结构特点。

3.2 LoRa 空口数据的同步

在 3.1 节中,由于罗德仪表生成的空口数据噪声很小,可以直接找到数据的大概位置,可以直接通过 LoRa 解调算法进行滑动解调,找到 LoRa 数据包的精同步点,从而得到完整的 Payload 部分。但在噪声比较大的环境

下, LoRa 信号被噪声淹没, 不能直接找到大概的数据区, 如果使用滑动解调的方法进行同步, 获得 Payload 部分, 同步复杂度很高, 需要的时长很长, 该方法只适用于本文的特殊情况作验证。

针对这个问题, 在这里结合 LoRa 数据包的前导特点, 提出了一种高效的同步算法, 按符号进行偏移解调, 直到解调疑似前导的连续 Upchirp 信号部分, 再进行频点偏移检测同步码, 最后再检测 2 个 Downchirp 信号。算法详细过程如下:

(1) 检测 LoRa 信号的到来, 提供 2 种方式: 检测信号强度(RSSI)进行判断; 检测信号频率突变边缘。

(2) 检测 LoRa 信号的前导: 通过 2.2 节的解调算法, 持续解调信号直到出现 3 个连续相同符号, 并记录解调值 K , 也就是整个符号的解调向后偏移了 K 个点。

(3) 检测两个同步字和两个 Downchirp 信号: 由于在 LoRa 数据包的 Payload 部分, 也可能存在连续 3 个及以上的相同的符号, 因此在步骤(2)可能检测到的是 LoRa 数据包的前导码或 Payload 部分, 前移 K 个点, 再继续持续解调信号直到出现 5 个连续符号为 0、同步字 1、同步字 2, 继续解调使用 Upchirp 信号进行反解得两个连续的 0, 只需要这个 5 个符号中有 4 个符号解调正确, 则同步成功, 进入步骤(4)。若解调次数超过前导符号数, 则继续执行步骤(1)和步骤(2)。

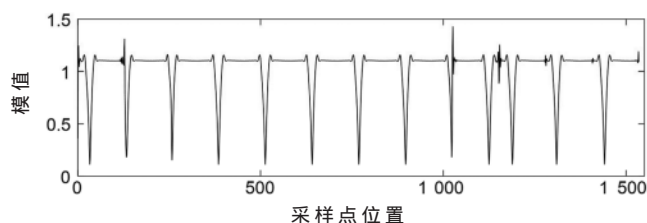
(4) 对同步信号向后偏移 0.25 个 Downchirp 信号, 得到有效载荷 Payload 部分。根据 LoRa 调制配置的参数, 可以计算出 Payload 及 Payload CRC 的长度, 得到其进行编码后的 n 个符号。

3.3 LoRa 数据包的解调

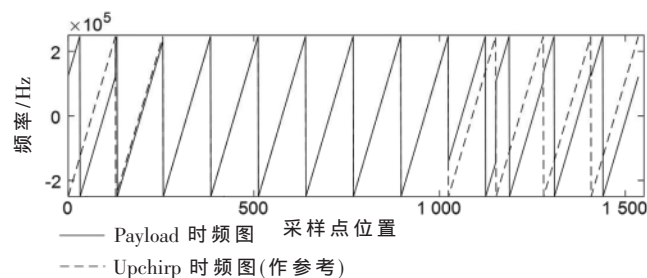
将罗德仪表采集的空口数据直接经过上文提出同步算法, 得 Payload 部分的数据模值图及对应数据的 LoRa 解调数据的时频图如图 5 所示。根据配置的参数, 计算得 Payload 部分为 1536 个采样点 12 个符号。

对从罗德仪表获取的 LoRa 空口数据经过去前导后, 经过使用上文提到的 LoRa 解调算法分别对剩余的 Payload 部分进行解调, 得 12 个符号为: 96、124、0、0、0、0、0、0、28、92、99、96。从图 5 可以直接观察到, 时频图(b)的每个符号内部频率变化和模值图(a)的凹陷以及波动的地方是一一对应, 说明了解调结果是正确的, 所以文献中提供的解调算法没有问题。

在罗德仪表 LoRa 调制参数界面中, Payload 部分只配置 4 字节 32 bit 数据, 而实际上解出了 84 bit, 明显是对 32 bit 数据填充了 52 bit, 从而对传输数据达到了提升鲁棒性和加密的目的。在上文中, 选择从罗德仪表采集的 LoRa 空口数据, 主要有两个原因: 一个是由于罗德仪表的是官方提供的 LoRa 仿真仪器; 另一个是由于采集数据的噪声比较小, 数据部分和噪声部分区分明显, 数据部分的时域模值波形的特征明显, 容易观察解调的正误。



(a) 数据包 Payload 部分模值图



(b) 数据包 Payload 部分时频图

图 5 Payload 数据模值图及对应的时频图

4 性能仿真

在文献[7]中, 对 LoRa 调制的 7 种扩频因子分别在 高斯信道和多径衰落下进行 MATLAB 性能仿真, 可以发现在误码率小于 0.01 时, 扩频因子增加 1, 抗噪声性能可以带来 3 dB 的增益。为了观察 LoRa 调制前向纠错编码位数对通信链路带来的增益, 在下文中, 对 LoRa 调制的不同纠错码率在 高斯信道进行了 MATLAB 性能仿真。

由于官方没有给出确切的前向纠错编码方式, 而汉明码纠错码要求 $2^r - 1 \geq n$, r 是监督位数, n 是编码后的 bit 数。若采用汉明码, 其中纠错编码码率为 4/4、4/5、4/6 就不满足要求, 因此在这里采用循环纠错编码。在图 6 性能仿真中给出了 LoRa 扩频因子为 7、基带带宽为 500 Hz 调制的 5 种码率的仿真曲线。

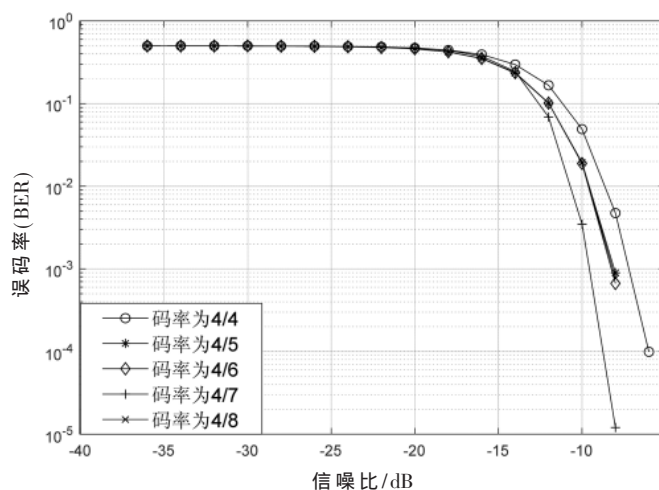


图 6 LoRa 的 SF7 不同码率误码性能曲线图

由图 6 可知, 在 LoRa 的前向纠错编码中, 并不是循环纠错码位数越多对系统性能提升越大; 在误码率小于

0.01 时,码率为 4/5、4/6 或 4/8,抗噪声性能大约增加了 1 dB;码率为 4/7,抗噪声性能大约增加了 2 dB。

在 LoRa 调制技术中,除了添加纠错编码、增大扩频因子,还可以配置 Payload 部分低速率优化来提高信息传输的鲁棒性。在实际应用中,LoRa 技术传输对设备进行控制命令时,只要传输几个比特信息,由于 LoRa 传输是以符号为单位进行传输的,而且有预留空间,至少可以传输几个字节的信息,因此在保证发送数据能同步的基础上,无需通过增加发送数据包的长度来增加传输信息之间的码距,进而提高信息传输的可靠性,如配置几个比特表示 1 bit 信息。

5 结论

本文根据罗德仪表的 LoRa 参数界面配置接口结合文献提供通信链路流程,对 LoRa 物理层进行了详细说明;通过罗德仪表生成的 LoRa 空口数据,对文献提到的 LoRa 调制解调算法进行验证,完成了对该数据的解调;根据 LoRa 数据包前导的特点,提出了一种高效的 LoRa 空口数据的同步算法;最后,通过 LoRa 调制扩频因子为 7 时的 5 种码率的仿真,说明添加 1 位纠错码的效果最佳。

参考文献

- [1] QADIR Q M, RASHID T A, AL-SALIHI N K, et al. Low power wide area networks: a survey of enabling technologies, applications and interoperability needs[J]. IEEE Access, 2018, 6: 77454-77473.
- [2] 郑宁, 杨曦, 双力. 低功耗广域网络技术综述[J]. 信息通信技术, 2017(1): 47-54.
- [3] 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(1): 19-26.
- [4] LI Y, YAN X, ZENG L, et al. Research on water meter reading system based on LoRa communication[C]//International Conference on Smart Grid and Smart Cities, Singapore, ROS: IEEE, 2017: 248-251.
- [5] CHEN T, EAGER D, MAKAROFF D. Efficient image transmission using LoRa technology in agricultural monitoring IoT systems[C]//International Conference on Internet of Things, Atlanta, GA, USA: IEEE, 2019: 937-944.
- [6] VANGELISTA L, CENTENARO M, MAGRIN D. Performance evaluation of LoRa networks in a smart city scenario[C]//International Conference on Communications(ICC) IEEE, 2017: 1-7.
- [7] AUGUSTIN A, YI J, CLAUSEN T. A study of LoRa: long range & low power networks for the Internet of Things[J]. Sensors, 2016, 16(9): 1466.
- [8] 柳永波. 基于 LoRa 的无线自组网 MAC 协议研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [9] Semtech Corporation. LoRa's SX1280 design guide[EB/OL]. (2020-03-xx)[2021-04-14]. https://www.semtech.cn/products/wireless-rf/loras-sx1280.
- [10] EDWARD P, MUHAMMAD A, ELZEINY S, et al. Enhancing the capture capabilities of LoRa receivers[C]//SmartNets 2019, International Conference on Smart Applications, Communications and Networking, 2019: 1-6.
- [11] 孙楠. 基于分数傅里叶变换的 LoRa 调制与解调研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [12] 刘树聃, 孙继. LoRa 调制技术及解调算法[J]. 电讯技术, 2018, 58(12): 1447-1451.
- [13] GHANAATIAN R, AFISIADIS O, COTTING M, et al. LoRa digital receiver analysis and implementation[C]//International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing, Brighton, UK: IEEE, 2019: 1498-1502.
- [14] POTÉREAU M, VEYRAC Y, FERRE G. Leveraging LoRa spreading factor detection to enhance transmission efficiency[C]//International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Florence, Italy: IEEE, 2018: 1-5.
- [15] ELSHABRAWY T, ROBERT J. Interleaved chirp spreading LoRa-based modulation[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 3855-3863.

(收稿日期: 2021-04-14)

作者简介:

雷芳(1972-), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向: 基于 FPGA 的无线通信系统。

陈博(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: LoRa 数据包的解调与解密、LoRaWAN 协议及 LoRa 网关设计。

吕京昭(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 物理层 FPGA 实现。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所