



LoRa 扩频通信系统参数设计

张玲丽

(武汉职业技术学院 电子信息工程学院,湖北 武汉 430074)

摘 要:从系统组成、帧结构、参数设计与调整三方面对 LoRa 通信系统的应用要点作了深入的剖析。深入探讨了影响系统性能的三个关键参数:纠错编码率、调制带宽、扩频因子各自的作用及之间的关系。最终总结出三个参数是如何在链路预算、抗干扰能力、频谱占用和数据率之间进行制衡的。对如何针对特定的应用场景,通过合理的参数设计来优化 LoRa 扩频的性能有参考价值。

关键词:长距离无线通信;扩频通信;扩频因子

中图分类号:TN914.42

文献标识码:A

文章编号:1671-931X (2023) 02-0110-06

DOI: 10.19899/j.cnki.42-1669/Z.2023.02.018

一、设计背景

LoRa(Long Range)是一种基于扩频技术的超远距离无线传输方案。所谓扩频即带宽被扩展成原信息信号的很多倍,最终传输信号带宽远大于信息信号的带宽。例如,传输一个 64Kbps 的语音流,其基带带宽只有 64KHz 左右,但用扩频技术传送时,它所占据的信道带宽可以被扩展到几十 MHz,几百 MHz,甚至更大。同时,发射到空间的无线电功率谱却大大降低了。通常为了提升信道的利用率,会使用与数据速率相适应的尽可能小的带宽,从而达到多个用户共享信道的目的。设计扩频通信系统时却使一路信号尽可能使用最大带宽数,同样的能量在一个大的带宽上传播。带宽的展宽是利用与被传输信息无关的扩频函数对被传输信息进行调制实现的,且在接收端使用相同的扩频函数对扩频信号进行相关解调,还原出原始信息。

线性扩频在军事和空间通信领域使用了数十年,由于可以实现长通信距离以及对干扰有良好的鲁棒性,最终被广泛应用在寥无人烟的岛屿、湿地等监控候鸟等的生态环境,监控天然气、汽油等输送管道等无线接入的场景。Semtech 的 SX126x/SX127x 系列 LoRa 芯片^[1]采用线性扩频调制与前向纠错技术相结合,它保持了像 FSK 调制相同的低功耗特性,通信距离长达 10km,且 LoRa 技术工作于 ISM 波段,用于超远距离无线通信系统,因其抗干扰能力强、功耗低、成本小等优势被广泛应用。

二、LoRa 扩频通信系统组成

传统调制解调技术,在低信噪比下,信号可能淹没在噪声中导致接收端无法解调出发射的调制信号。采用 LoRa 扩频技术,即使在极低信噪比下,有用信号的带宽在发送端被极大程度地展宽,不太

收稿日期:2022-11-28

基金项目 2018 年武汉职业技术学院校级科研重点项目“基于 LoRa 技术的无线长距离数传模块的设计与研制”(项目编号:2018YK033)。

作者简介:张玲丽(1980—),女,湖北武汉人,武汉职业技术学院电子信息工程学院副教授,研究方向:通信技术。

可能淹没在一般的噪声中,从而使得接收端较能够就能从干扰中提取出有用信号,LoRa 扩频技术有效提高了射频传输系统的灵敏度及系统抗干扰能力。LoRa 扩频通信系统发送端需要对用户数据进行调

制,接收端进行解调。

LoRa 扩频调制系统由纠错编码器、交织器、扩频序列产生器、笛卡尔极坐标转换器、Delta-sigma 调制器等组成^[2],具体如图 1 所示。

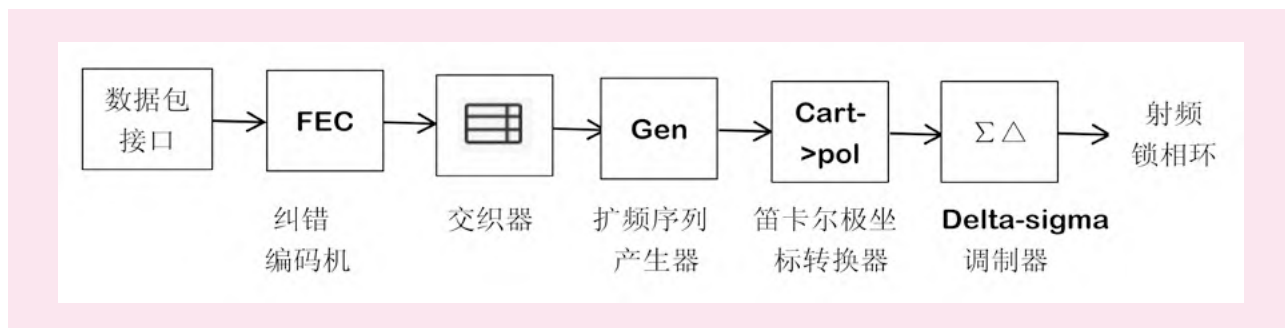


图 1 LoRa 扩频调制系统组成

当用户数据即 Payload 送入数据包接口时,调制过程开始,首先将数据载荷分为 4bit 一组,每一组末位按编码速率 CR 添加 1 到 4bit 冗余的 FEC(前向纠错编码),FEC 采用广义的软汉明码,能够有效进行错误检测和自动纠错;通过纠错编码后,会产生多组(4+CR)比特段,随后就被存储到交织器的存储阵列中,每个交织器有(4+CR)列, SF 行 Bit 空间,例如配置为 CR=1, SF=7,有效数据比特流为 00000001 00100011 01000101 01100111。先将比特率按 4bit 一组划分:0000 0001 0010 0011 0100 0101 0110 0111;然后通过纠错编码在每组后加 1bit 的纠错码:00000 00011 00101 00110 01001 01010 01100 01111;再将这些比特流填充到交织器中,该交织器存储空间为 5 列 7 行,每一行数据按照一定的映射关系被

塞入码元(symbol)中;数据发射数据包除了有效载荷以外,每个包前面都有一个前导码,目的是向接收方提供具有特性的可检查序列,以确定频率和同步,前导码由一定数量未经调制的码元和结束标记组成。其中结束标记长度固定为 4.25 个码元,初始未经调制的码元长度为 6~65535,最终输出是一个具有恒定包络的复杂采样流;利用笛卡尔极坐标变换器提取相位信息,相位分量被区分,从而产生瞬时频率调制送往 Delta-sigma 调制器,最终调制器的数字输出驱动锁相环的反馈分配器,最后连接功率放大器和天线将 LoRa 信号发送出去。

LoRa 扩频解调系统由前向数字抽取滤波器、中频混频器、信道滤波器、解交织器、纠错解码器等组成,具体如图 2 所示。

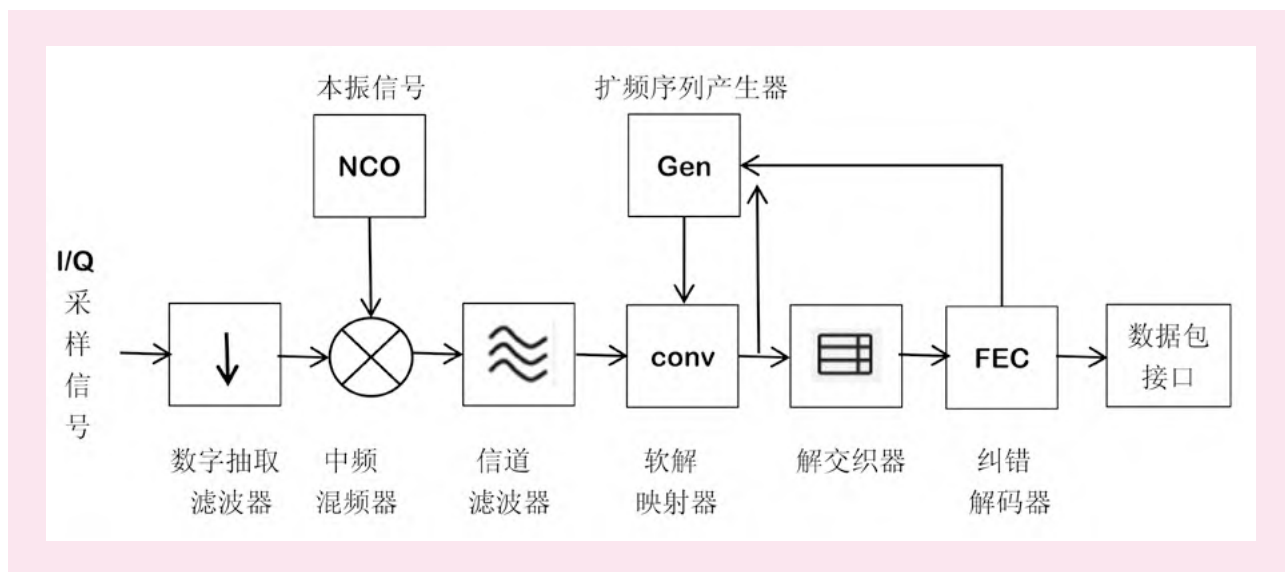


图 2 LoRa 扩频解调系统组成

LoRa 信号经过同相、正交 I/Q 采样后进入解调链路,首先由数字抽取滤波器将来自模数转换的 ADC 信号的高采样率流转换为高精度,低速率的样本流,接着中频混频器通过将样本流乘以复指数本振信号来执行复频率转换,然后信道滤波器负责消除多余的带外信号,使得邻道衰减大于 70dB,信道滤波器的输出信号通过软解映射器与发射机中使用的扩频序列做复共轭卷积,此后软解映射器解调的

数据推入解交织器,按调制顺序进行数据比特流的整理,数据比特率经过纠错解码器进行校验和纠错,最终得到有效载荷输出给数据包接口,完成获取原始有用信号的完整过程。

三、LoRa 帧结构

LoRa 数据包包含 4 个部分^[3]:前导码、可选报头、数据有效载荷、有效载荷校验,其结构如图 3 所示。

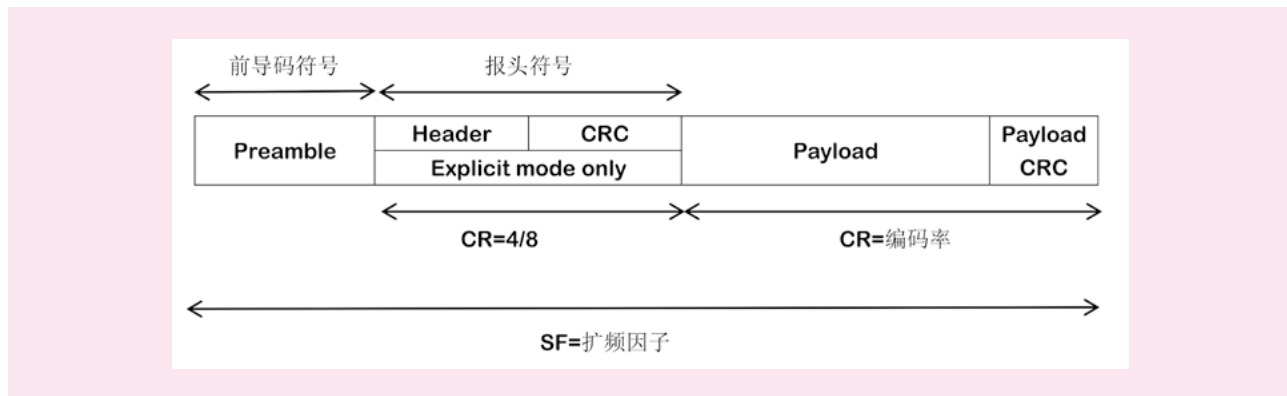


图 3 LoRa 帧结构

前导码的目的是向接收方提供具有特性的可检查序列,以确定频率和同步。前导码由一定数量未经调制的码元和结束标记组成。其中结束标记长度固定为 4.25 个码元,初始未经调制的码元长度可调,总前导码长度为 10 ~ 65535 个符号。接收机会周期地重启前导检测操作,所以需配置和发射机一样的前导码长度。如果不知道前导码长度或者可变的情况下,接收机需将前导码长度设置为最大。前导码中固定的 4.25 个码元就是同步字,发射和接收双方的同步字需一致才能正常通信。报头符号是可选的,如果使能,数据包就是显性数据包。报头包含两部分:报头和报头自身的 CRC 校验,固定以 CR=4/8 传输,报头提供了如下信息:有效载荷字节数,编码速率 CR,有效载荷 CRC 类型。Payload 是有效载荷,即实际用户需传输的数据,最大 255 字节。有效载荷 CRC 可灵活选择多项式和初值。相比默认或者说显性数据包,隐性数据包是不带显性报头部分,一般用于发射和接收方都提前知道有效载荷长度,编码率 CR 以及有效载荷 CRC,可以通过隐性数据包模式来减少传输时间。需要双方都提前配置好相同的参数。

四、LoRa 扩频通信参数设计

按照工信部从 2020 年 1 月 1 日开始执行的民

用计量仪表规范,要求无线电设备的单次发射持续时间不超过 1 秒,如果我们使用 lora 技术做仪表类的项目,需要注意满足规范要求,其中最主要的一点其实是针对单次发射持续时间,也就是 lora 数据包的空中时间。

模块工作在 LoRa 模式下,主要配置的参数有三个^[4]:纠错编码率(CR)、调制带宽(BW)、扩频因子(SF)。针对特定应用,开发人员可通过对此三个关键设计参数的调整来实现对 LoRa 调制解调技术的优化。而在同一 LoRa 通信系统中,所有节点的此三个主要参数均相同才能相互通信,三者中有一个不同将不能相互通信。

LoRa 扩频调制采用多个信息码片来代替有效负载的每个位。扩频信息的发送速度称为符号率(RS)。码片速率与标称符号率间的比值称为扩频因子,表示每个信息位发送的符号数量,例如有 1 bit 的“1”数据需要传送,当扩频因子为 1 时,传输的时候数据 1 bit 的“1”就用一个 1 来表示,而当扩频因子为 6 时,传输 1 bit 的“1”就用一个 111111 这样的 6 个码片来表示。当然也就是说需要传输总的数量增大了 6 倍,这样扩频后传输可以降低误码率也提升了信噪比,但是在同样数据量条件下却减少了可以传输的实际数据^[3],且由于每个扩频因子间正交,故可以在同一信道间传输多个信号而不会相

互干扰。符号率和码片率之间的关系可以表示为式 1。

$$R_b = SF \cdot \frac{BW * CR}{2^{SF}} \quad \text{式 1}$$

LoRa 数据包持续时间为前导码时间与数据包传输时间之和。LoRa 数据包时间求解过程如下:

$$(1) \text{求符号速率 } R_s = \frac{BW}{2^{SF}};$$

$$(2) \text{计算前导码时间 } T_{prembble};$$

$$T_{prembble} = (n_{prembble} + 4.25) T_{sym} \quad \text{式 2}$$

第一种情况(SF=5 或者 6)是:

$$payloadSymbNb = 2 + 8 + \max \left(\left\lceil \frac{8PL - 4SF + 20 + 16 - 20H}{4 * (SF - 2DE)} * (CR + 4) \right\rceil, 0 \right) \quad \text{式 3}$$

第二种情况(SF=7~12)是:

$$payloadSymbNb = 8 + \max \left(\left\lceil \frac{8PL - 4SF + 28 + 16 - 20H}{4 * SF} * (CR + 4) \right\rceil, 0 \right) \quad \text{式 4}$$

第三种情况(开启低速率优化,即 LowDataRate Optimize 位设置 1)时:

$$payloadSymbNb = 8 + \max \left(\left\lceil \frac{8PL - 4SF + 28 + 16 - 20H}{4 * (SF - 2DE)} * (CR + 4) \right\rceil, 0 \right) \quad \text{式 5}$$

其中: PL 指有效负载字节数; SF 为扩频因子; 使用报头时 H=0, 没有报头时 H=1; LowDataRateOptimize 位设置 1 时, DE=1, 否则为 DE=0, 此时式 5 等同于式 4; CR 为编码率; max() 取最大值函数; ceil() 取整函数。

有效负载时间等于符号周期数与有效负载符号数之积:

$$T_{payload} = payloadSymbNb * T_{sym} \quad \text{式 6}$$

(4) LoRa 数据包持续时间为前导码时间与有效负载时间之和

$$T_{packet} = T_{prembble} + T_{payload} \quad \text{式 7}$$

以扩频因子为 12, 带宽为 250KHz, 编码率为 0.8, 负载长度 32B, 前导码长度为 8 符号位, 为例计算数据包传输时间:

$$\begin{aligned} T_{payload} &= payloadSymbNb * T_{sym} = 8 + \max \left(\left\lceil \frac{8PL - 4SF + 28 + 16 - 20H}{4 * (SF - 2DE)} * (CR + 4) \right\rceil, 0 \right) \\ &= \left[8 + \max \left(\left\lceil \frac{8 * 32 - 4 * 12 + 28 + 16}{4 * 10} * (0.8 + 4) \right\rceil, 0 \right) \right] * 16.38 = 622.6ms \end{aligned} \quad \text{式 10}$$

$$T_{packet} = T_{prembble} + T_{payload} = 823.3ms \quad \text{式 11}$$

$$T_{sym} = \frac{1}{R_s}, n_{prembble} \text{ 已设定前导码长度, 其值可}$$

以由寄存器设置;

(3) 计算有效负载时间

当 SF 设置较高, BW 设置较低情况下, Rs 会很低, 或者说符号时间 Symbol Time 大于 16ms 的情况下, 此时建议开启 LowDataRateOptimize 功能作为低速优化。因此有效负载符号数的计算依据配置分三种情况。

$$T_{sym} = \frac{1}{R_s} = \frac{2^{SF}}{BW} = \frac{4096}{250K} = 16.38ms \quad \text{式 8}$$

数据发射数据包除了有效载荷以外, 每个包前面都有一个前导码, 目的是向接收方提供具有特性的可检查序列, 以确定频率和同步。前导码由一定数量未经调制的码元和结束标记组成, 其中结束标记长度固定为 4.25 个码元。

$$\begin{aligned} \text{前导码传输时间: } T_{prembble} &= (n_{prembble} + 4.25) T_{sym} \\ &= (8 + 4.25) T_{sym} = 200.7ms \end{aligned} \quad \text{式 9}$$

据计算符号时间 Symbol Time 为 16.38, 大于 16ms, 此时建议开启 LowDataRateOptimize 功能作为低速优化。

因此采用上述第三种情况下的计算公式来计算有效负载时间:

用 LoRa Modem Calculator Tool 计算结果如图 4

所示,计算结果正确。

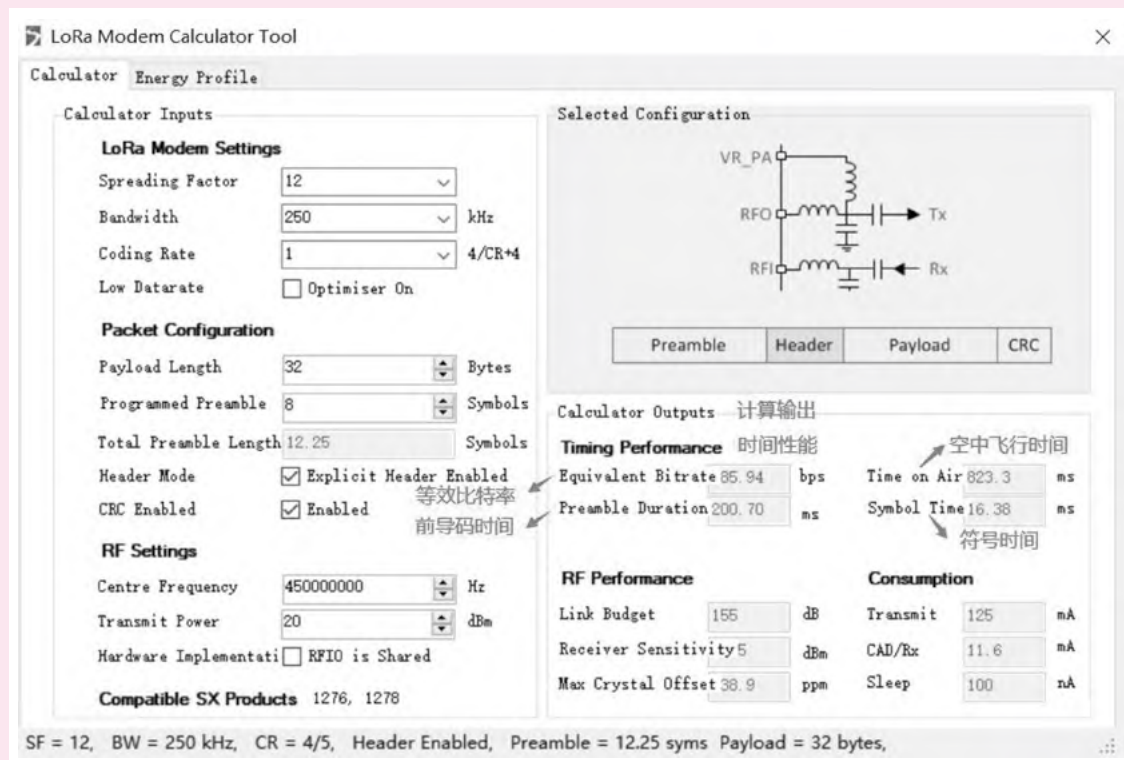


图4 LoRa Modem Calculator Tool 计算结果

使用 LoRa Modem Calculator Tool 计算,若设计采用的 Lora Wan 协议,其 BW 为 125,当负载长度为 32 个字节空中飞行时间为 823.3ms,临近工信部的标准,所以如果使用 LoRa Wan 协议,我们用的 SF 一般都要在 5-10 之间,否则传输时间会超标。当然我们如果使用非 LoRa Wan 协议,我们的 BW 使用 500k,负载长度即使更长也不太存在这类问题。使用 LoRa 私有协议,从机应答时间设置时也应该使得超时时间大于空中飞行时间。

使用 LoRa Modem Calculator Tool 软件可以计算出等效比特率 Equivalent Bitrate,但这个等效比特率实际应该中意义不大,因为 LoRa 扩频芯片需要将要发送的数据进行多种的功能编码,编码后的数据量不同于该等效比特率,所以实际使用中需要计算有效波特率。

有效比特率 = $1000 \div (\text{Time on Air} \div (\text{Payload Length} \times 8)) = 1000 \times 32 \times 8 \div 823.3 = 311(\text{bps})$ 式 12

实际应用时应基于该计算结果来设计系统的波特率。

五、小结

采用 SF=12 的 LoRa 扩频的通信系统发送的数字信号将调制带宽 BW 划分为 2^{12} 个频率段的码片^[5]。假设该系统工作频率为 470Mhz, BW=250kHz, 那么相邻码片间隔为 $250\text{kHz}/4096=61.04\text{Hz}$ 。此时各码片为 $f_0=470\text{Mhz}$, $f_1=470.000061\text{Mhz}$, $f_2=470.000122\text{Mhz}$..., $f_{4095}=470.249939\text{Mhz}$ 。每 4096 个码片代表一个码元(Symbol),一个码元传输 12bit 数据。

增加 BW,可以提高 Rb。根据香农定理,在信道容量不变的情况下,信号带宽的增加又是以降低信噪比为代价的。所以 SF 和 BW 对应一种 LoRa 调制,接收机需采取对应的 SF 和 BW 值才能正常解调,否则信号在相干解调中会淹没在噪声中。LoRa 调制在不同 SF/BW 组合下是相互正交的,即可以共用同一个工作频点。但需满足解调信噪比才能正常解调。

前向纠错能够在干扰情况下有效提高链路的可靠性, LoRa 调制解调器采用循环纠错编码来实现前向纠错与纠错,提高了链路鲁棒性。纠错性能的提

升又是以增加传输开销为代价。可见,三个参数间相互约束制衡,实际应用时是根据应用场景适当牺牲某些指标而提升另外一些指标。

参考文献:

- [1] 马鹏程.基于Lora的PAC无线通信模块的开发与实现[D].武汉:华中科技大学,2020:32-33.
- [2] 甘泉.LoRa物联网通信技术[M].北京:清华大学出版

社,2021:65-67.

- [3] 唐铭轩.LoRa技术原理及关键参数研究[J].网络安全技术与应用,2021(11):73-74.
- [4] 杨彬蔚.Lora WAN技术及其在物联网中的应用[J].数字技术与应用,2021(4):43-45.
- [5] 左小普.GPS RTK无线数据链研究与应用[D].武汉:武汉大学,2018:17-18.

[责任编辑:刘 骋]

Parameter Design of LoRa Spread Spectrum Communication System

Zhang Lingli

(School of Electronic Information Engineering, Wuhan Polytechnic, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: In this paper, the application of LoRa communication system is deeply analyzed from three aspects: system composition, frame structure, parameter design and adjustment. Three key parameters which affect the system performance, such as error-correcting coding rate, modulation bandwidth, spread factor, and their relations are discussed in detail. Finally, it summarizes how the three parameters balance the link budget, anti-jamming capability, spectrum occupancy and data rate. It is valuable to optimize the performance of LoRa spread spectrum through reasonable parameter design for specific application scenarios.

Key words: LoRa; spread spectrum communication; spread factor