

兰.LoRa网络利用设置不同的扩频因子来实现不同的传输速率.扩频因子表示在传输中代表一个符号的比特数,比特数越多,表示传输时间越长,调制解调越复杂,灵敏度也越高,传输距离也越远,但传输速率也会降低.因为不同扩频因子的信号调制后两两正交,所以网关可以接收6种不同扩频因子的信号,即网络可以实现多种扩频因子的并发且互不干扰.因此,为节点分配不同的扩频因子可以提升网络的吞吐和信道利用率,实现信息的高效传输.

在LoRa网络中,当链路质量差时,我们需要给其分配高扩频因子来满足传输,对于质量较好的链路,则可以分配较低的扩频因子.这样就对网络中的节点进行了层次的划分.而网关不能接收相同扩频因子的信号,当节点密集部署后,必然会存在具有相同扩频因子的节点相互碰撞的问题.高扩频因子的节点由于传输速率慢、传输时间长,更易于发生碰撞,传输成功率相对较低;低扩频因子的节点则相反.这样,网络中不同扩频因子分配相同数目的节点,碰撞的概率就会不同,高扩频因子传输成功率必然更低,这对于高扩频因子是不公平的.节点扩频因子高,表明这个节点到网关的链路质量不够好,如果不考虑障碍或者干扰的情况,直观来说就是节点距离网关比较远.我们采集数据时,一定不能忽视较远距离的宝贵数据,而只关注距离近的节点,这样数据的采集就不具有代表意义.同时,这种不公平性就会导致高扩频因子数据大量重传,也影响了网络的性能——网络的稳定性大为降低,节点的能耗随之上升.所以需要为网络设置一种基于扩频因子的分配机制,实现网络的公平.

传统的公平性研究具有一定的局限性^[6-8],针对扩频因子的研究^[9,10]又不能满足公平的要求,如果可以根据传输成功率与扩频因子的关系为不同的扩频因子分配不同数量的节点,即为碰撞概率高的扩频因子分配较少的节点,则能够实现扩频因子(速率)的公平传输.

因此,本文提出针对扩频因子分配机制(FSA)的研究.该机制首先利用泊松分布建立了传输成功率同扩频因子和扩频因子分配比例的关系模型,然后解出保证传输成功率相同的条件下节点数目的分配比,同时给出了近似计算扩频因子分配比例的算法.

本文第1节给出LoRa网络的研究基础,详细介绍LoRa的整体架构以及LoRa物理层的相关知识.第2节对扩频因子的分配问题进行分析,同时给出详细的推导扩频因子分配比的过程.第3节给出相应计算扩频因子分配比的算法.第4节进行仿真实验,给出实验条件和实验结果.第5节对全文的工作进行总结,同时给出本文可改进的空间.

1 研究基础

LoRa作为一种新兴的无线网络通信技术,近年来受到广泛关注.LoRa具有大范围覆盖、抗干扰、低能耗、双向通信、高网络容量的特点^[11].

LoRa物理层是由Semtech公司开发的一套私有技术,到目前为止,还有很大一部分并没有开源.它主要采用线性扩频调制^[12]方法,即利用随频率线性变化的chirp信号来编码信息.在这里,chirp指的是频率上升或下降的信号.和其他一些数字调制的方法(比如QPSK,BPSK)不同,线性扩频后的信号并不是能量随时间变化的正弦波,而是频率随时间变化的chirp信号.由于chirp脉冲线性的特点,接收机和发射机之间的频率偏移等同于时间偏移,因此这种偏移在解码器中很容易消除.正因为这样,LoRa接收的灵敏度非常高,例如,SX1276的灵敏度最高能达到-148dBm.

作为典型的线性扩频技术之一,LoRa信号中存在两种chirp信号,up-chirp和down-chirp,如图1所示.其中,第1种符号频率从最低频率上升到最高频率,第2种则相反,频率从最高频率下降到最低频率.最高频率与最低频率的差值称为LoRa的带宽,用 BW 表示.另一方面,LoRa将不同信息编码在不同的开始频率上,并使用扩频因子表示每个符号中能够编码的比特的数量.对于扩频因子为 SF 的LoRa节点而言,它的一个符号共有 2^{SF} 种不同的开始频率,因此能够编码 SF 比特信息.并且,因为不同的扩频因子在线性扩频调制中是正交的,因此网关可以同时解调不同扩频因子的信号.扩频因子 SF 的取值范围为 $SF=[7,8,9,10,11,12]$.

对于一个扩频因子为 SF 的节点来说,LoRa的符号速率为

$$R_s = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (1)$$

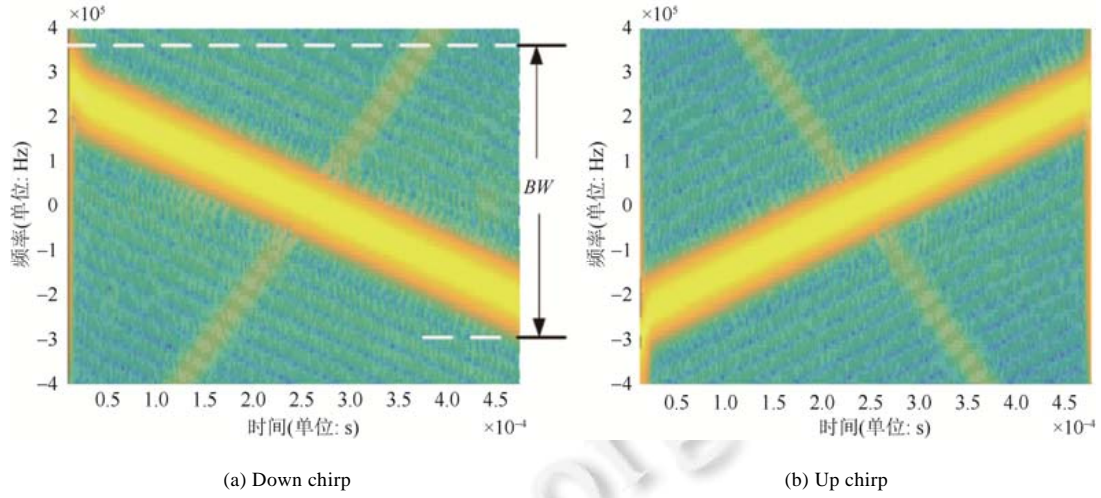


Fig.1 LoRa's chirp signal time-frequency diagram

图 1 LoRa 的 chirp 信号时频图

其中, BW 为信号的带宽,且 $BW=[125,250,500]$ (单位:kHz),因为 SF 表示一个符号中有 SF 比特信息,因此比特率为

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

其中, CR 表示码率,它满足:

$$4/(4+n), \quad n \in \{1,2,3,4\} \quad (3)$$

由公式(2)可得,当带宽和码率确定时,节点的传输速率(比特率)随着扩频因子的升高而降低.但与此同时,扩频因子的值越大,一个符号编码的比特数越多,调制解调方法越复杂,因此容错率越高,所能支持的传输距离越长.

一个 LoRa 报文主要由 3 部分组成:前导码(Preamble),可选的 Header, Payload 和可选的 CRC 组成,如图 2 所示.前导码由 up chirp 和 2.25 个 down chirp 组成.在最后的两个 up chirp 中,编码 sync 信息,当接收端发现 sync 的信息和自身不匹配时,则停止接收数据.前导码的范围为 10.25 个~65539.25 个符号.Header 是一个可选的部分,一般会以 4/8 的码率进行传输,并且携带 payload 部分是否使用 CRC 校验的标志位.而 Payload 部分由 1~255 个字节组成.符号的数量 n_s 为

$$n_s = 8 + \max\left(\left\lceil \frac{8PL - 4SF + 8 + CRC + H}{4 \times (SF - DE)} \right\rceil \times \frac{4}{CR}, 0\right) \quad (4)$$

其中, PL 代表 Payload 的个数(1~255), SF 代表扩频因子(6~12), H 代表是否有 header(0 或者 1), DE 表示是否开启低速率优化(0 或者 1), CR 表示码率,而 CRC 表示是否使用的校验和(16 或者 0).

因此符号的传输时间 $T_{out,s}$ 可表示为

$$T_{out,s} = (n_{preamble} + 4.25 + n_s) \cdot R_s \quad (5)$$

其中, $n_{preamble}$ 表示前导码的长度,默认为 8, n_s 为符号数量, R_s 为符号传输速率.

而对于一个长度为 L 比特的数据包而言,可以得到其该数据包的传输时间 $T_{out,b}$ 为

$$T_{out,b} = \frac{L}{R_b} \quad (6)$$

其中, R_b 表示比特率,由公式(3)可得.因此,由公式(5)或公式(6)均可以求得 LoRa 数据包的传输时间.本文中,均使

用公式(6)计算传输时间.

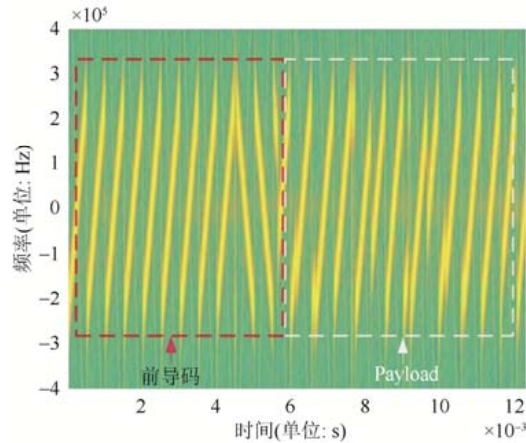


Fig.2 LoRa time-frequency diagram

图 2 LoRa 时频图

2 基于扩频因子分配的公平机制研究

传输不公平会导致低速率(即高扩频因子)因为更高的碰撞概率而造成大量丢包,影响网络稳定性的同时还增加了节点因为反复重传带来的节点功耗的增加,因此对扩频因子的公平分配机制研究非常有意义.同时,如何正确建立模型,表示出这种不公平是本文的一个难点.

我们从上文可以知道,造成这种不公平的原因如下:根据 LoRa 的特性可以知道,当带宽和码率固定时,LoRa 的传输速率由扩频因子决定,且网关可以接收不同扩频因子的数据.但是,因为不同的扩频因子之间速率相差较为悬殊,传输相同长度的数据时,信道占用时间也相差较大.如果任意为每种扩频因子分配随机数目的节点,就会产生不同速率碰撞概率不同而造成的不公平现象.所以可以从扩频因子同公平性的关系这一角度出发解决问题.

2.1 问题描述

2.1.1 前提描述

1. 每个节点发送包长一致.
2. 网络中节点在最高速率(即最高扩频因子和最高灵敏度)下均可达.
3. 网络中每个节点的带宽(BW)与码率(CR)均一致.
4. 每个节点的发射功率均相同.
5. 每个节点发送的信道相同.

2.1.2 场景描述

本章研究的场景为 N 个节点,一个网关的 LoRa 网络,节点随机部署在监测区域,并使用星形拓扑与网关相连,如图 3 所示.节点发送的数据包长为 L (单位:Bit),节点平均发送的时间间隔为 T_{avg} (单位:s),节点发送的时间在整个时间间隔 T_{avg} 上呈均匀分布.因此,本章研究 LoRa 网络符合随机接入网络(random access network)特性.

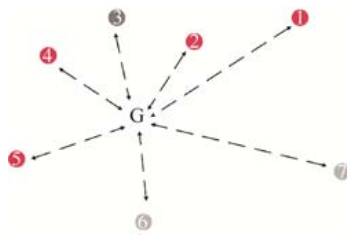


Fig.3 Deployment scenario diagram

图3 部署场景图

2.1.3 问题分析与描述

在这一节中,将通过仿真实验对不同扩频因子传输成功率性进行分析,并给出本章研究的问题的描述.为了验证不同扩频因子对网络传输的影响,本小节使用 Python 仿真模拟相同数量的节点以不同扩频因子传输时的传输成功率.其中,扩频因子 $SF \in \{7,9,12\}$,发包周期 d 为 5 分钟,每组总时长 T 为 12 小时,payload 为 20 字节,且每个数据包的接收功率大于接收灵敏度,即数据均可达.每组共进行 100 组实验,对结果取平均值后,传输成功率随节点数目的变化如图 4 所示.

从图中可以看出,相同节点数量下,使用不同扩频因子传输时传输成功率相差悬殊,这一现象表明不同扩频因子间非常明显的 unfairness,这里的不公平性指的是传输时碰撞概率不同,即碰撞的数据包数量与传输数据包总数的比值不同.例如在节点数目为 500 时,选择扩频因子为 7 进行传输时将近 90% 的数据可以成功达网关,而在扩频因子为 12 的情况下,传输成功率几乎趋近于 0.当节点数目分配不合理,造成数据大量丢包,因此大量的节点会因为收不到 ACK 而重发,从而增加不必要的能耗,严重降低了节点电池的使用寿命.对于网关而言,这一现象更会导致大量低速率传输的监控数据丢失,增加系统的不稳定性.

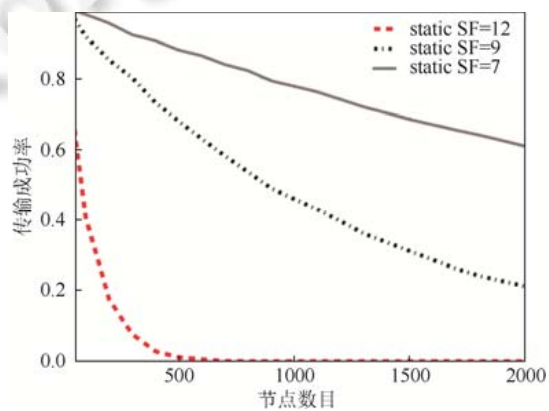


Fig.4 Transmission success rate changes with the number of nodes

图4 传输成功率随节点数目变化情况

综上,我们需要寻求一种合理配置节点数目的方法,使得各种扩频因子传输成功率相同,系统尽可能达到公平.

2.2 扩频因子分配方法

我们希望通过建立传输成功率同扩频因子和扩频因子分配比例的关系模型,解出保证传输成功率相同的条件下节点数目的分配比.以下是思路的具体实现:

设网络中每个扩频因子的分配比例(即节点数量所占总节点数量的比值)为 R .因为本章研究的是随机接入网络,因此在负载 λ 下节点产生的数据可以看做是泊松分布.

先考虑网络中只有一种扩频因子 i 进行传输的情况.当 $[-T_i, T_i]$ 期间没有数据进行传输时,则数据可以成功到达网关.根据泊松分布,则该扩频因子下的传输成功率 $P_{s,i}$ 为

$$P_{s,i} = P(X > 2T_i) = e^{-2\lambda T_i} \tag{7}$$

其中, λ 表示负载, T_i 表示发送长度为 L 所需要的时间.

负载 λ 可表示为

$$\lambda = \frac{NL}{T_{avg}} \tag{8}$$

其中, T_{avg} 表示平均时间间隔, L 表示数据包长度, N 表示节点数量.

根据公式(6), 易得发送长度为 L 所需要的时间 T_i 可表示为

$$T_i = \frac{L}{R_b} = \frac{2^{SF} \times L}{CR \times BW \times SF} \quad (9)$$

其中, CR 表示编码率, BW 表示带宽, SF 表示扩频因子.

联立公式(7), 公式(8)和公式(9), 对于数据包长度为 L , 带宽和码率确定的网络, P_s 为

$$P_s = e^{-\left[\frac{L^2}{T_{avg} \times CR \times BW} \frac{2^{SF+1} \times N}{SF} \right]} \quad (10)$$

因为 $\frac{L^2}{T_{avg} \times CR \times BW}$ 已知, 因此传输成功率只与 $\frac{2^{SF+1} \times N}{SF}$ 有关. 当 SF 增大时, $\frac{2^{SF+1}}{SF}$ 值变大, P_s 下降速率变快.

换言之, 当网络中仅采用一种较大值的扩频因子进行部署时, 传输成功率低于使用较小的扩频因子进行传输. 且随着节点数目增加, 传输成功率下降速率更快. 这也进一步验证了不同扩频因子传输成功率不公平的现象.

对于节点可以选择任一扩频因子进行传输网络而言, 如果某一扩频因子 i 的比例用 R_i 表示, 因为每个节点只能选择一种扩频因子, 因此所有扩频因子的比例和为 1, 即

$$\sum_{i=7}^{12} R_i = 1 \quad (11)$$

则扩频因子 i 下的负载可表示为

$$\lambda_i = R_i \lambda, \quad i \in \{7, 8, 9, 10, 11, 12\} \quad (12)$$

代入公式(10), 可以计算出在当前比例下, 扩频因子 i 的节点的传输成功率 $P_{s,i}$ 为

$$P_{s,i} = e^{-\frac{-\lambda L}{CR \times BW} \frac{2^{SF+1} R_i}{SF}} \quad (13)$$

因为 $\frac{-\lambda L}{CR \times BW}$ 值固定, 因此决定 $P_{s,i}$ 是否均衡就决定于 $\frac{2^{SF+1} R_i}{SF}$ 是否固定. 当网络中不同的扩频因子的节点数目相同时, 则有:

$$P_{s,i} > P_{s,j}, \quad i, j \in SF, \quad i < j, \quad SF = \{7, 8, 9, 10, 11, 12\} \quad (14)$$

因此, 当 $P_{s,i}$ 与扩频因子无关时, 不同扩频因子的碰撞概率可以达到公平, 即高扩频因子与低扩频因子的碰撞概率相同.

因此, 当比例集 R 满足以下条件时, 系统可以达到完全公平.

$$R_{fair} = \left\{ R_{fair} \mid R_{fair,i} = \left(\frac{i}{2^i} \right) / \sum_{k=7}^{12} \left(\frac{k}{2^k} \right), i \in SF \right\} \quad (15)$$

证明: 联立公式(13)和公式(15), 可得:

$$P_{s,i} = e^{-\frac{-2\lambda L}{CR \times BW}} \quad (16)$$

即 $P_{s,i}$ 不因扩频因子的变化而变化, 因此上述比例集 R_{fair} 满足要求. \square

3 算法实现

以下给出了分配节点扩频因子的算法, 首先通过多层 for 循环嵌套改变节点分配比, 计算得到每种分配比的情况下节点传输成功率之间的方差, 使得方差最小的分配比就是我们所求的分配比.

算法 1. 节点分配算法.

Require: 总节点数 N , 数据包长 L , 发包间隔 T_{avg} , 编码率 CR , 带宽 BW ;

Ensure: 不同分配比下节点传输成功率的方差 f_c 最小;

1: **for** $i = 0.1$; $i \leq 0.9$; $i = i + 0.1$ **do**

2: **for** $j = 0.1$; $j \leq 0.9$; $j = j + 0.1$ **do**


```

4:   for  $m = 0.1 ; m \leq 0.9 ; m = m + 0.1$  do
5:     for  $n = 0.1 ; n \leq 0.9 ; n = n + 0.1$  do
6:       for  $b = 0.1 ; b \leq 0.9 ; b = b + 0.1$  do
7:         if  $i + j + k + m + n + b == 1$  then
8:           计算  $fc$ ;
9:         end if
10:        if  $fc = \min(fc)$  then
11:          得到合适的扩频因子比例集
12:        end if
13:      end for
14:    end for
15:  end for
16: end for
17: end for
18: end for

```

本算法的算法复杂度是 $O(x^6)$, 以上给出的程序得到的是一组近似解, 可以用于验证公式(15)得到解的正确性. 在不方便计算时, 给出一种近似的最优解.

4 扩频因子仿真实验

4.1 实验条件

在本节中, 本文主要通过 LoRaSim 对整个传输过程进行模拟, 并对仿真结果进行了详尽的分析. 对比实验有两个, 分别是文献[9]的方法 $\min \text{airtime}$ 和文献[10]的方法 $\min \text{distance}$. 文献[9]中, 每个节点自主选择扩频因子, 主要分为两个步骤. 首先, 每个节点在传输时根据自己的包长, 依次计算每个扩频因子和带宽下的传输时间, 然后先选择传输时间最短的配置. 之后, 在满足当前扩频因子和带宽下, 选择能够支持接收端接收的最小发送功率. 文献[10]中, 将这一工作交给网关, 每个网关根据接收的 RSSI 值的大小范围进行扩频因子的选择, 即低 RSSI 值对应着高扩频因子.

实验共部署 130 个节点, 节点部署面积为 $200\text{m} \times 200\text{m}$, 如图 5 所示. 采取随机部署的方案, 在图中用圆点表示; 网关位于中心, 在图中以三角形表示.

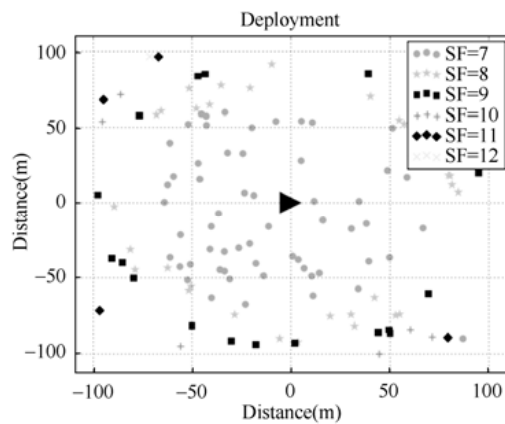


Fig.5 130 node deployment diagrams and spreading factor distribution graphs

图 5 130 个节点部署图和扩频因子分布图

具体的参数设定见表 1.

Table 1 Three method settings**表 1** 3 种方法的设置

	本方法(FSA)	Min airtime	Min distance
发送功率(dBm)	14	根据扩频因子&带宽决定	14
带宽	125KHz	125KHz,250KHz,500KHz	-
工作频率	902MHz-918MHz	-	-
扩频因子	7,8,9,10,11,12	-	-
码率	4/5	-	-

4.2 实验结果

3 种方法下的碰撞概率和不同扩频因子之间的碰撞概率的公平性如图 6 所示.图中横坐标代表节点数目,纵坐标代表平均碰撞概率,图中红色柱形代表 FSA,可以清晰看出 FSA 的平均碰撞概率均小于其他两种方法.柱形上的灰色实线代表传输成功率的方差,方差越小,公平性越好.从图中可以看到 FSA 的碰撞对于每种扩频因子更加公平.FSA 针对高扩频因子传输时间长,更易碰撞这一特点,为不同扩频因子分配相应数目的节点,使得各种扩频因子的传输成功率相同(即碰撞概率相同),达到平衡各种扩频因子碰撞概率的目的.而 min airtime 中大部分节点均选择最快的传输速率的设置(即带宽为 125kHz,扩频因子为 7),因此碰撞概率很大,同时扩频因子碰撞概率之间的方差也是三者最大的.

为了更加详细地表示不同扩频因子之间的碰撞概率,图 7 表示当节点数 $N=2500$ 时,不同扩频因子下的碰撞概率.由图中可以看出,相对于其他两个方法,FSA 可以保证不同扩频因子下的碰撞概率基本持平,表现了良好的公平性.而其他两种方法,由于节点同网关距离较近,均选择高速率的低扩频因子传输数据,所以不能实现扩频因子间的公平.

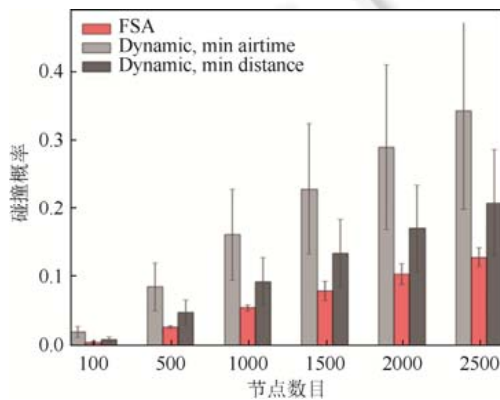


Fig.6 A graph of the number of nodes, the average collision probability, and the collision fairness

图 6 节点数量和平均碰撞概率与碰撞公平性关系图

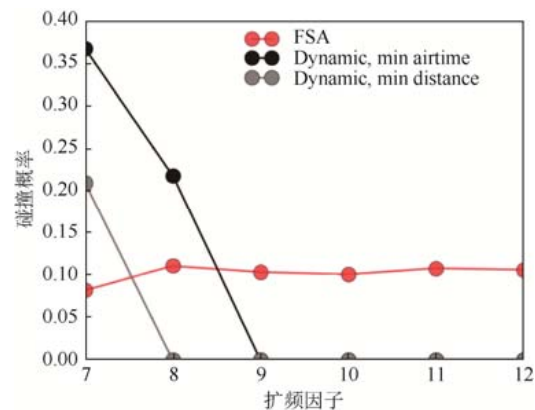


Fig.7 Probability of collision under different spreading factors (number of nodes: 2 500)

图 7 不同扩频因子下的碰撞概率(节点数:2 500)

5 小结

5.1 工作总结

近年来,因为传统传感器网络电池寿命短,传输距离受限等问题,以超长传输距离和极低功耗的低功耗广域网受到了广泛的关注与应用.作为最为成熟的广域网技术之一,LoRa 已经广泛部署在欧洲等地,应用于诸如目标追踪、水位监测、智慧城市等场景.在节点的大量部署、发生碰撞的情况下,LoRa 网络中不同扩频因子传输成功率不同,造成网络的不公平.为了解决这一问题,本文对现有的 LoRa 网络中的传输问题给出了理论分析,验证算法.首先给出了前提条件,接着利用泊松分布建立了传输成功率模型,最后数学推导解出了扩频因子分配比

的表达式,同时给出了近似求解扩频因子比例集的算法.这一扩频因子公平机制的提出,有效地解决了网络的不公平问题,使得高扩频因子节点的数据可以有效地到达接收端,不会出现信息的遗漏,同时,也极大地降低了高扩频因子节点重传的概率,减少了节点的能耗,降低了系统的不稳定性,系统的性能得到提升.

5.2 展望未来

本文对现有的 LoRa 传输进行了一定的改进,但仍然存在可改进的空间.

1. 在对速率公平性的研究中,未来可以综合考虑带宽和扩频因子的影响,并利用一定的机制降低能耗.
2. 本文仅仅针对网络中各扩频因子的公平性进行研究,却没有重视网络的最高传输成功率,此后的扩频因子分配可以寻求最高的传输成功率.
3. 本文的前提是最理想化的条件,也就是节点不会出现丢包的情况.以后的扩频因子分配可以加入丢包率来计算最优的分配比.

References:

- [1] Sinha RS, Wei Y, Hwang SH. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. *ICT Express*, 2017,3(1):14–21.
- [2] 王阳,温向明,路兆铭,程刚,潘奇.新兴物联网技术——LoRa. *中国学术期刊文摘*,2017,11(1):55–59,72.
- [3] 陈卓逸.LoRa 在物联网中应用浅析. *山东工业技术*,2018,(3):128–129.
- [4] 万芬.浅谈 LoRa 物联网技术及应用. *通讯世界*,2017,(2):91–92.
- [5] Pasolini G, Buratti C, Feltrin L, Zabini F, De Castro C, Verdone R, Andrisano O. Smart city pilot projects using LoRa and IEEE 802.15.4 technologies. *Sensors (Basel)*, 2018,18(4):1–17.
- [6] Floyd S, Jacobson V. Random early detection gateways for congestion avoidance. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 1993,1(4):397–413.
- [7] Jalali A, Padovani R, Pankaj R. Data throughput of CDMA-HDR a high efficiency-high data rate personal communication wireless system. *Proc. of IEEE VTC2000-Spring*, 2000,(3):1854–1858.
- [8] Georgiadis L, Neely MJ, Tassiulas L. Resource allocation and cross-layer control in wireless networks. *Foundations and Trends in Networking*, 2006,30,1(1):1–144.
- [9] Bor MC, Roedig U, Voigt T, Alonso JM. Do LoRa low-power wide-area networks scale? In: *Proc. of the 19th ACM Int'l Conf. on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. Malta, 2016. 59–67.
- [10] Cuomo F, Campo M, Caponi A, Bianchi G, Rossini G, Pisani P. EXPLoRa: Extending the performance of LoRa by suitable spreading factor allocations. In: *Proc. of the Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*. 2017. 1–8.
- [11] 赵静,苏光添.LoRa 无线网络技术分析. *移动通信*,2016,40(21):50–57.
- [12] Vangelista L. Frequency shift chirp modulation: The LoRa modulation. *IEEE Signal Processing Letters*, 2017,24(12):1818–1821.



刘如月(1997—),女,陕西澄城人,硕士生,CCF 学生会员,主要研究领域为无线通信.



刘宝英(1966—),女,博士,主要研究领域为文化遗产管理,文物保护.



张晶(1996—),女,硕士生,主要研究领域为无线通信,低功耗远距离广域网.



陈峰(1978—),男,博士,教授,主要研究领域为无线网定位.



赵菁菁(1993—),女,硕士,主要研究领域为无线网络.



张涛(1980—),男,博士,讲师,主要研究领域为电子工程,油气田地质与开发.