

高斯信道下针对 LoRa 调制的信噪比估计改进算法

刘子杨¹ 陈小莉¹ 田茂¹ 谢桂辉²

(1. 武汉大学 电子信息学院 武汉 430072; 2. 中国地质大学(武汉) 自动化学院 武汉 430072)

摘要: 信噪比是 LoRa 自适应网络中实现发射参数准确自适应调节的重要标准,为了增加 LoRa 调制下信噪比估计的准确性和稳定性,在基于谱分析的信噪比估计算法的基础上,根据 LoRa 调制解调的特点,提出了一种针对 LoRa 调制的信噪比估计改进算法。在高斯信道下,利用 LoRa 解调频谱峰值代表接收信号、其他谱线与噪声具有相关性的特点,定义了信噪比估计参数 r ,并通过实验确定了不同 SF 值时信噪比估计参数 r 与信噪比之间的经验公式,从而准确估计信噪比。仿真结果表明,在最好的情况下改进算法能够准确估计的信噪比提高了 -5 dB,以 2 dB 为标准改进算法的均方根误差能够达到时的信噪比提升了 -14 dB,因此与基于谱分析的信噪比估计算法相比,改进算法具有更高的准确性和稳定性。

关键词: 信噪比估计; LoRa 调制; 谱分析

中图分类号: TN911 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.5015

Improved signal-to-noise ratio estimation algorithm for LoRa modulation over Gaussian channel

Liu Ziyang¹ Chen Xiaoli¹ Tian Mao¹ Xie Guihui²

(1. Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Automation, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430072, China)

Abstract: Signal-to-noise ratio is an important standard to realize adaptive adjustment of parameters in adaptive configuration of LoRa networks. In order to increase the accuracy and stability of SNR estimation for LoRa modulation, an improved SNR estimation algorithm for LoRa modulation is proposed in this paper. On the basis of the SNR estimation algorithm based on spectral analysis and the characteristics of LoRa modulation, the SNR estimation parameter r is defined, and the empirical formula between r and SNR at different SF is determined through experiments, so as to accurately estimate the SNR. The simulation results show that in the best case the SNR that can be accurately estimated by the improved algorithm is improved by -5 dB, and when the root-mean-square error of the improved algorithm can reach 2 dB the SNR is improved by -14 dB. Therefore, compared with the SNR estimation algorithm based on spectral analysis, the improved algorithm has higher accuracy and stability.

Keywords: SNR estimation; LoRa modulation; spectrum analysis

0 引言

低功耗广域网 (low power wide area networks, LPWAN) 技术低成本、低功耗、高传播范围的特点^[1]使它成为了物联网应用的首选。LoRa 技术是目前常用的 LPWAN 技术之一,其构建于全球免授权频段,支持舍弃 LoRaWAN 协议采用私有协议灵活自组网,能够根据不同的应用场景灵活部署网关^[2],对不同场景的适用性使得 LoRa 被广泛应用于智能农业^[3]、智能监测^[4]等物联网场景中。为了进一步提高 LoRaWAN 的传输效率和可靠性,

LoRaWAN 利用信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR)、接收信号强度、ACK/NAK 信号、误码率、丢包率等信息对 SF、编码速率等参数进行自适应调节,从而实现自适应网络^[5]。其中,信噪比作为反映信道环境的重要信息能够表征当前传输过程中的链路质量,估计信噪比时较高的准确性和稳定性是参数实现准确自适应调节的重要保障。

目前对信噪比估计算法的研究多数针对于传统的调制方式,文献^[6]针对 PSK 调制介绍了基于最大似然比 (ML)、统计量 (包括二阶四阶矩 M2M4、分割符号矩 SSME)、信号方差比 (SVR) 和平方信噪方差 (SNV) 的信噪

收稿日期:2020-12-03

• 156 •

比估计算法;进一步深化研究从 PSK 调制方式推广至 QAM 调制,文献[7-8]针对 QAM 调制方式分别基于 ML 和 M2M4 估计了信噪比;文献[9-10]利用最大似然比分别研究了莱斯衰落信道、瑞利衰落信道中针对 FSK 调制方式的信噪比估计算法;谱估计是一种不针对某种特定调制方式的信噪比估计方式,文献[11]利用谱分析对高斯信道中中频通信信号的信噪比进行了估计。在信噪比估计算法中,多数研究关注于 PSK、QAM、FSK 等调制方式,因此研究针对 LoRa 调制的信噪比估计算法具有重要意义。

本文在基于谱分析的信噪比估计算法的基础上,根据 LoRa 调制解调的特点,提出了高斯信道中针对 LoRa 调制方式的信噪比估计改进算法。它以提高信噪比估计的准确性和稳定性为目标,为 LoRa 自适应网络提供更加准确的信道信息,从而提高了 LoRaWAN 的传输效率和可靠性。

1 基于谱分析的信噪比估计算法

1.1 信号模型

对于高斯信道(AWGN)下的通信传输系统,在发射信号 $x(t)$ 的传输过程中,信道引入加性高斯白噪声 $e(t)$,因此接收信号可以表示为:

$$x(t) = s(t) + e(t) \quad (1)$$

式中: $e(t)$ 是均值为 0,方差为 N_0 的高斯白噪声,且与发射信号 $s(t)$ 不相关。信噪比估计就是利用接收信号、先验知识或信道信息等,得到通信带宽内的发射信号平均功率 \hat{S} 和噪声平均功率 \hat{N} ,进一步计算 $SNR = \hat{S}/\hat{N}$ 得到信噪比的过程。

1.2 基于谱分析的信噪比估计算法原理

在高斯信道下,接收信号由高斯白噪声和发射信号组成,高斯白噪声均匀的分布在频带内,而发射信号仅分布在通信系统的带宽内,根据接收信号的这一频率特性产生了基于谱分析的信噪比估计算法^[12]。基于谱分析的信噪比估计算法适用于高斯信道下带限信号的信噪比估计^[13],它是一种简单实用的信噪比估计方式,可以简单地利用接收信号的 FFT,不需要任何先验信息,同时对不同信噪比范围、调制方式的信号都有较好的适应性。

对接收信号进行功率谱估计,由公式(2)可知它的功率谱由噪声功率谱和发射信号功率谱两部分组成。

$$P_x(f) = P_s(f) + P_e(f) \quad (2)$$

式中: $P_x(f)$ 、 $P_s(f)$ 、 $P_e(f)$ 分别为接收信号、发射信号、噪声的功率谱。

对于频带范围为 $[f_L, f_H]$ 的通信系统,由于功率谱关于 y 轴对称,因此我们仅利用 x 轴正半轴的功率谱来进行信噪比的计算。根据频带内外的平均功率之差,利用式(3)计算噪声的功率谱,即:

$$N_0 = \frac{\int_0^{f_s/2} P_x(f)df - \int_{f_L}^{f_H} P_x(f)df}{0.5f_s - (f_H - f_L)} \quad (3)$$

式中: f_s 为接收信号的采样频率。利用式(4)计算通信带宽内噪声的平均功率 \hat{N} ,即在通信带宽内对噪声功率谱进行积分。

$$\hat{N} = \int_{f_L}^{f_H} N_0 df \quad (4)$$

利用式(5)计算通信带宽内发射信号的平均功率 \hat{S} ,其值为通信带宽内的接收信号功率与噪声功率之差,则:

$$\hat{S} = \int_{f_L}^{f_H} P_x(f)df - \int_{f_L}^{f_H} N_0 df \quad (5)$$

根据式(6),发射信号功率 \hat{S} 与噪声功率 \hat{N} 相除得到信噪比,则:

$$SNR = 10\lg\left(\frac{\hat{S}}{\hat{N}}\right) = 10\lg\left(\frac{\int_{f_L}^{f_H} P_x(f)df - \int_{f_L}^{f_H} N_0 df}{\int_{f_L}^{f_H} N_0 df}\right) \quad (6)$$

2 针对 LoRa 调制的信噪比估计改进算法

为了在 LoRa 应用中精确地估计信噪比,提高 LoRaWAN 的性能,本文在基于谱分析的信噪比估计算法的基础上,提出了一种高斯信道下针对 LoRa 调制方式的信噪比估计改进算法。

2.1 LoRa 调制解调原理

LoRa 调制是基于线性调频扩频(chirp spread spectrum,CSS)技术的调制方式^[14],在 CSS 调制的基础上进一步增加了频谱利用率,其本质是以基线 Chirp 信号的循环频移来表示 LoRa 符号。

设信道带宽为 B ,Chirp 信号起始频率为 f_c ,符号间隔时间为 $T_s = 2^{SF}/B$,其中 SF 为扩频因子。对于 t 时刻($t \in [0, T_s]$),基线 Chirp 信号的瞬时频率可以表示为:

$$f_0(t) = f_c + \frac{B}{T_s}t \quad (7)$$

通过扩频因子将带宽分为 2^{SF} 个部分,任意符号 $k \in \{0, 1, \dots, 2^{SF} - 1\}$ 的 LoRa 调制信号频率 $f(t)$ 就是将基线信号频率 $f_0(t)$ 在时间轴上向左频移 $B \frac{k}{2^{SF}}$ 得来^[15],则:

$$f(t) = \begin{cases} f_c + B\left(\frac{t}{T_s} - \frac{k}{2^{SF}}\right), & 0 \leq t \leq T_s - \frac{k}{B} \\ f_c + B\left(\frac{t}{T_s} - \frac{k}{2^{SF}} - 1\right), & T_s - \frac{k}{B} \leq t \leq T_s \end{cases} \quad (8)$$

因此 LoRa 调制信号的时域波形可以表示为:

$$s(t) = a \cdot \exp[j2\pi \cdot f(t)] \quad (9)$$

式中: a 为时域波形的幅度系数。

在非相干 LoRa 解调^[16]中,首先利用式(10)将接收信号与基线 Chirp 信号共轭相乘。

$$\gamma(t) = s(t)s_0 \cdot (t) = \begin{cases} \exp(j \cdot 2\pi \frac{k}{T_s} t), & 0 \leq t \leq T_s - \frac{k}{B} \\ \exp[j \cdot 2\pi(\frac{k}{T_s} t - Bt)], & T_s - \frac{k}{B} \leq t \leq T_s \end{cases} \quad (10)$$

再以采样率 B 下采样得到离散信号 $\gamma(n)$, 离散傅里叶变换后得到 $\Upsilon(k)$, 频谱如图 1 所示。

$$\Upsilon(k) = DFT[\gamma(n)] = \sum_{n=0}^{2^{SF}-1} e^{j \frac{2\pi n(K-k)}{N}} = \begin{cases} 2^{SF}, & k = K \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

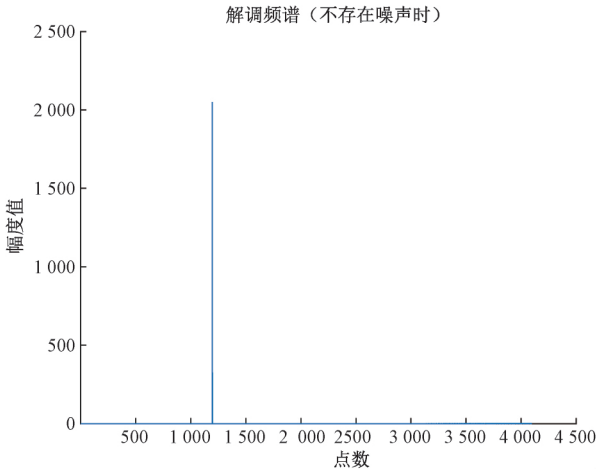


图 1 不存在噪声时 LoRa 接收信号的解调频谱

在图 1 频谱中, $k = K$ 处存在频谱峰值, 在其他点处频谱为零, 以位置 k 解调得到符号信息。

2.2 高斯信道下接收信号与基线 Chirp 信号的相关性分析

在引入加性高斯白噪声 $e(t)$ 时, 接收的信号为 $x(t) = s(t) + e(t)$, 下采样后得到 $x(n)$, 根据式(12)分析 $x(n)$ 与基线 Chirp 信号 $s_0(n)$ 的相关性。

$$\sum_{n=0}^{N-1} x(n)s_0 \cdot (n) = \begin{cases} \sqrt{E_s} + \Phi, & n = k \\ \Phi, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中: E_s 为发射信号能量; Φ 代表高斯白噪声。 Φ 的幅值 $|\Phi|$ 服从瑞利分布, 概率密度函数^[17]为:

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (13)$$

式中: $\sigma^2 = \frac{N_0}{2}$ 。

2.3 针对 LoRa 调制的信噪比估计改进算法原理和实现步骤

根据 LoRa 调制解调过程能够得到接收信号的解调频谱, 如图 2 所示。式(12)的相关性计算表明了, 在图 2 频谱中的峰值对应于发送信号频谱与噪声频谱之和, 其他谱线对应于噪声频谱。

结合谱估计原理, 根据式(5)~(6), 本文定义了一个与

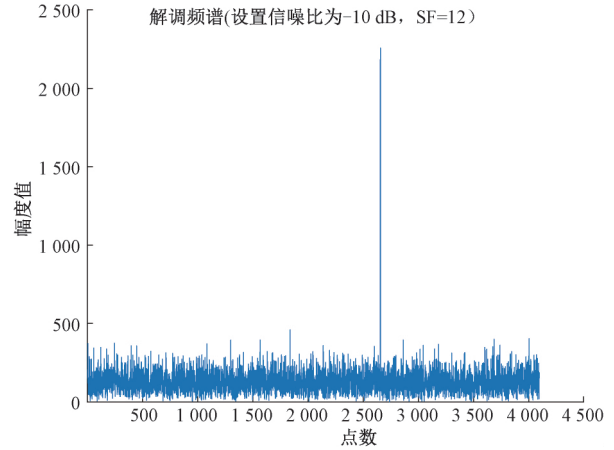


图 2 高斯信道下 LoRa 接收信号的解调频谱

信噪比有关的估计参数 r , 即:

$$r = (S - N) / N \quad (14)$$

式中: S 、 N 分别为解调频谱中峰值谱线的幅度和噪声谱线的平均幅度。根据式(11)中 Φ 的幅值 $|\Phi|$ 服从瑞利分布, 对解调频谱中的噪声谱线进行瑞利分布拟合, 如图 3 所示, 得到了噪声谱线的平均幅度 N 。

对信噪比估计参数 $r=10$ 的对数之后, 如图 4 所示, 可以看到其与设置信噪比之间有一定的线性关系, 该线性关系为:

$$\lg(r) = a \cdot SNR + b \quad (15)$$

式中: a 、 b 为线性系数; SNR 为设置信噪比。根据式(15), 用接收信号的信噪比估计参数 r 计算得到估计信噪比 SNR_{LoRa} 。

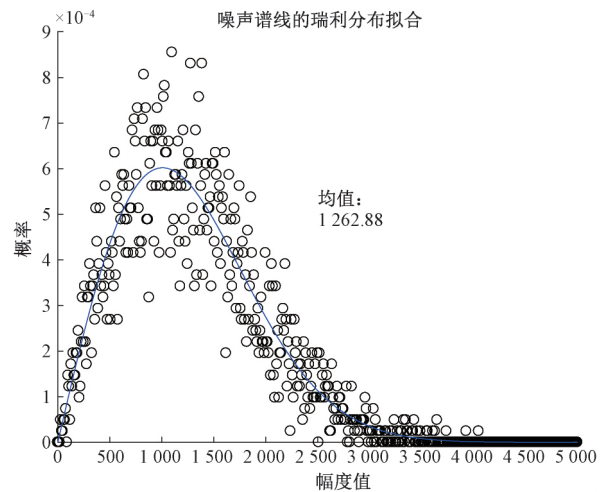


图 3 噪声谱线的瑞利分布拟合

基于以上的原理, 改进算法的具体实现步骤如下:

- 1) 将接收信号进行解调, 得到解调频谱。
- 2) 信噪比估计参数 r 与信噪比映射关系的确定: 确定式(15)中的参数 a 、 b , 过程如图 5 所示。

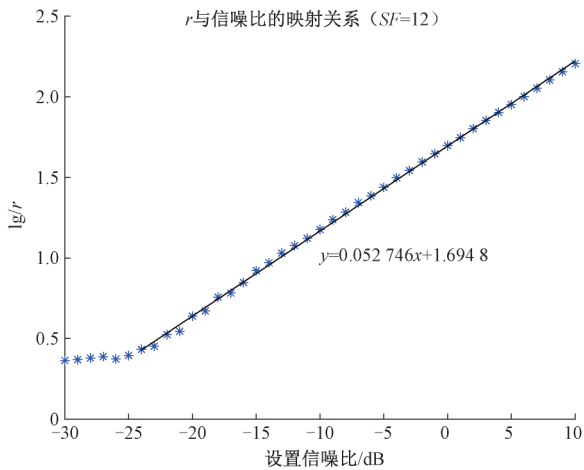


图 4 信噪比估计参数 r 与信噪比的映射关系

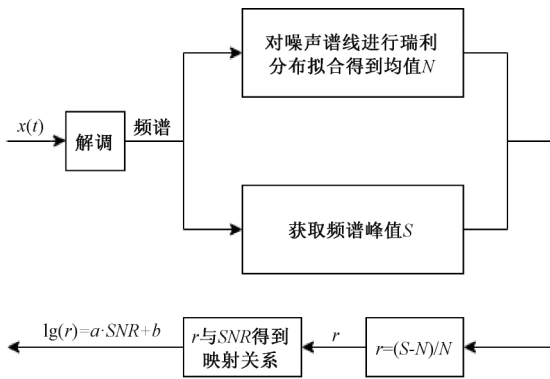


图 5 参数 r 与信噪比映射关系的确定过程

不同 SF 值,得到的映射关系不同即 a 、 b 值不同,通过 20 次重复实验确定了 a 、 b 的值,如表 1 所示。

表 1 不同 SF 的参数 a 、 b 值

SF	$a(10^{-2})$	b
7	5.5015	0.8960
8	5.3768	1.0661
9	5.4154	1.2241
10	5.3776	1.3812
11	5.2969	1.5401
12	5.2992	1.6953

3)估计信噪比:计算接收信号的信噪比估计参数 r ,根据 SF 选择相应的参数 a 、 b ,按照式(15)计算得到估计信噪比 SNR_{LoRa} 。

3 仿真结果与分析

仿真实验主要针对 LoRa 调制方式,在高斯信道条件下,从估计结果的准确性和稳定性两方面将基于谱分析的信噪比估计算法和改进算法进行对比。

3.1 结果评估指标

仿真结果的评估指标有估计结果的准确性和稳定性。根据式(16),信噪比的估计结果以多次仿真结果的均值表示。通过比较估计均值与设置信噪比之间差值大小得到估计结果的准确性。

$$S\bar{N}R = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N S\hat{N}R_i \quad (16)$$

式中: N 为仿真次数; $S\hat{N}R_i$ 为每次仿真得到的信噪比估计值。

估计结果的稳定性定义为估计结果与设置信噪比之间的平均偏离程度,利用式(17)计算的均方根误差表示。

$$\rho = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S\hat{N}R_i - SNR_0)^2} \quad (17)$$

式中: N 为仿真次数; $S\hat{N}R_i$ 为每次仿真得到的信噪比估计值; SNR_0 为设置信噪比。

3.2 仿真结果及分析

仿真参数设置:采样率为 1 000 kHz,扩频带宽为 $BW=125$ kHz,Chirp 信号起始频率为 $f_c=125$ kHz,信噪比范围为 $-30 \sim 10$ dB。为了保证仿真的可靠性,两种算法分别进行 1 000 次重复实验。

在不同 SF 时,得到两种算法的信噪比估计结果如图 6 所示,并对比估计结果的准确性。

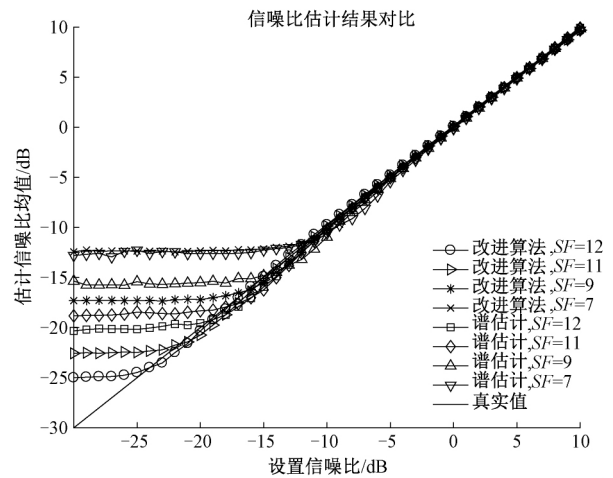
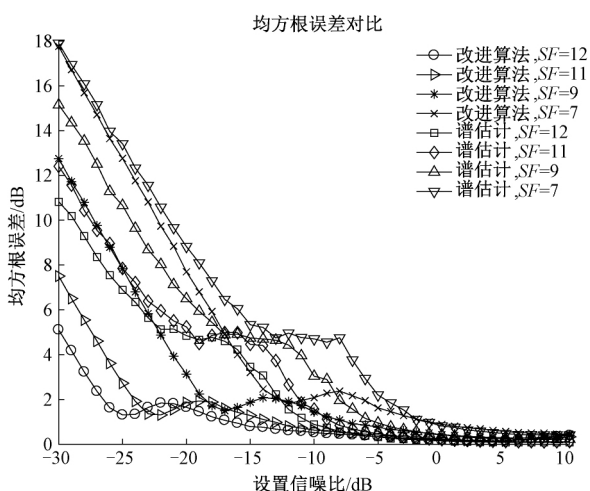


图 6 不同 SF 下信噪比估计结果对比

在图 6 中,随着信道质量的提升,谱估计和改进算法的准确性均逐渐提高。在信噪比较低时,改进算法的准确性更高,例如在 $SF=12$ 时,谱估计算法能够准确估计 -20 dB 的信噪比,而改进算法能够准确估计的信噪比降低到了 -25 dB。因此与谱估计相比,改进算法的准确性更高。

在不同 SF 时,得到两种算法估计结果的均方根误差如图 7 所示,并对比结果的稳定性。

在图 7 中,两种算法的均方根误差均随着设置信噪比的增大而降低。但在低信噪比处,改进算法的均方根误差

图 7 不同 SF 下估计结果均方根误差对比

更小稳定性更高,例如在 $SF=12$ 时,以 2 dB 为标准,谱估计算法的均方根误差在信噪比为 -12 dB 时能够达到,而改进算法的均方根误差在信噪比为 -26 dB 时就能达到。因此与谱估计相比,改进算法的稳定性更高。

综上,改进算法能够准确估计的信噪比范围更大,最大提升了 -5 dB,同时它的均方根误差在低信噪比时更低。因此,与基于谱分析的信噪比估计算法相比,改进算法的准确性和稳定性更高。

4 结 论

LoRa 技术成本低、功耗低、传播范围广,同时它构建于全球免授权频段能够灵活自组网,这些特点使得它被广泛应用于物联网行业中。LoRaWAN 能够利用信噪比对 SF 、编码速率等发射参数进行自适应调节,以增强 LoRaWAN 的传输效率和可靠性,因此信噪比估计结果的高准确性和稳定性有益于发射参数实现准确的自适应调节。在基于谱分析的信噪比估计算法的基础上,结合 LoRa 调制解调的特点,本文提出了一种高斯信道下针对 LoRa 调制的信噪比估计改进算法。对接收信号进行解调得到解调频谱,根据解调频谱峰值谱线和其他谱线分别与接收信号、噪声具有相关性的特点,本文定义了信噪比估计参数 r ,在不同 SF 时通过实验确定了该参数与信噪比的经验公式。最后根据 SF 选择经验公式,利用接收信号的信噪比估计参数 r 估计信噪比。对比谱估计算法,改进算法具有更高的准确性和稳定性,尤其是在信噪比较低时改进算法在准确性和稳定性上表现得更加优异。

参考文献

- [1] NAIK N. LPWAN technologies for IoT systems; Choice between ultra narrow band and spread spectrum[C]. 2018 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE), 2018; 1-8.
- [2] 袁向兵. 主流 LPWAN 技术分析 with 选择决策方法[J].

信息系统工程, 2020(8): 134-135.

- [3] 杨祯, 李达, 张丽, 等. 基于 LoRa 的农业大棚无线温湿度监测系统设计与实现[J]. 电子测量技术, 2018, 41(11): 73-78.
- [4] 赵全, 徐光, 郝龙, 等. 基于 LoRa 的无线多参数环境监测系统设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(6): 120-124.
- [5] LIAO W S, ZHAO O, ISHIZU K, et al. Adaptive parameter adjustment for uplink transmission for multi-gateway LoRa systems [C]. 2019 22nd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2019: 1-5.
- [6] 张金成, 彭华, 赵国庆. 信噪比估计算法研究[J]. 信息工程大学学报, 2011, 12(5): 535-543.
- [7] ISHTIAQ N, SHEIKH S A. Maximum likelihood estimator of SNR for QAM signals in AWGN channel[C]. International Conference on Information Technology & Electrical Engineering, 2015: 525-529.
- [8] KHALID S S, ABRAR S. A non-data-aided SNR estimation method for square-QAM system [C]. International Conference on Frontiers of Information Technology, 2013: 146-149.
- [9] JAVED U, HASSAN S A. SNR estimation for non-coherent M-FSK receivers in rice fading environment[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(9): 1786-1789.
- [10] ARSHAD A, HASSAN S A. Maximum likelihood SNR estimation for non-coherent FSK-based cooperative networks over correlated Rayleigh fading channels[C]. Wireless Communications & Networking Conference, 2015: 636-641.
- [11] 彭耿, 黄知涛, 陆凤波, 等. 中频通信信号信噪比的快速盲估计[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(1): 102-106.
- [12] 易辉, 侯孝民, 马宏, 等. 一种基于谱分析的非带限卫星信号信噪比估计算法[J]. 四川兵工学报, 2016, 37(5): 104-107, 114.
- [13] 胡冰舟, 张蓉, 雷维嘉, 等. 一种基于平均周期图的频域信噪比估计算法[J]. 电讯技术, 2014, 54(10): 1385-1390.
- [14] VANGELISTA L. Frequency shift chirp modulation: The LoRa modulation [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2017, 24(12): 1818-1821.
- [15] CHIARI M, ELZANATY A. On the LoRa modulation for IoT: Waveform properties and spectral analysis[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 8463-8470.
- [16] MARQUET A, MONTAVONT N, PAPADOPOULOS G Z. Investigating theoretical performance and demodulation techniques for LoRa[C]. 2019 IEEE 20th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks", 2019: 1-6.
- [17] 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: 16-19.

作者简介

刘子杨, 硕士研究生, 主要研究方向为物联网, 无线通信等。

E-mail: 619340763@qq.com