

面向卫星物联网的交织LoRa传输方案

罗进^{1,2}, 夏家宝¹, 白杨², 白宝明^{1,2}

(1. 西安电子科技大学空天地一体化综合业务网全国重点实验室, 陕西 西安 710071;

2. 西安电子科技大学广州研究院, 广东 广州 510555)

摘要: 卫星物联网的传输距离要比地面物联网远得多, 导致其传输链路上存在较大的功率损耗, 接收端的接收功率变得非常低。将性能优异的编码方案与大扩频因子的LoRa调制相结合, 可以实现在极低信噪比下的可靠通信。然而, LoRa调制方案随着扩频因子的增大, 频谱效率急剧降低。鉴于此, 设计一种交织LoRa传输方案, 在降低误比特率的同时确保较高的频谱效率。首先给出LoRa的非相干软解调算法, 并对Turbo和LDPC编码的LoRa系统进行性能仿真。接着提出交织LoRa传输方案的软解调算法。仿真结果表明, 在误比特率为 10^{-5} 时, 提出的Turbo编码交织LoRa传输方案相较于未编码方案性能提高了约4 dB, 等价于在自由空间下的通信距离增加了55%~57%, 与现有的Turbo-LoRa方案相比, 频谱效率提高了约23%。

关键词: 卫星物联网; Turbo码; LoRa; ICS-LoRa; SSK-ICS-LoRa

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2023011

Interleaved-LoRa Transmission Scheme for Satellite IoT

LUO Jin^{1,2}, XIA Jiabao¹, BAI Yang², BAI Baoming^{1,2}

1. State Key Laboratory of ISN, Xidian University, Xi'an 710071, China

2. Guangzhou Institute of Technology, Xidian University, Guangzhou 510555, China

Abstract: The transmission distance of satellite IoT is much further than terrestrial IoT, resulting in a significant power loss on the transmission link. Thus the received signal power at a receiver will be significantly lower. Combining a high-performance FEC coding and LoRa modulation with a significant spreading factor enables reliable communication at very low signal-to-noise ratios. However, LoRa modulation dramatically decrease spectral efficiency as the spreading factor increases. An interleaved LoRa transmission scheme that could achieved high spectral efficiency with a low bit error rate (BER) was proposed. Firstly, a non-coherent soft demodulation algorithm was presented for LoRa and the corresponding performance comparison with the use of Turbo and LDPC codes. Then proposed a soft demodulation algorithm for interleaved-LoRa transmission. Simulation results showed that Turbo coded interleaved-LoRa system outperformed the uncoded system by about 4 dB at a BER= 10^{-5} , which was equivalently to a 55%~57% improvement on communication distance in free space. Furthermore, the spectral efficiency was improved by approximately 23% compared to the existing Turbo-LoRa scheme.

Keywords: satellite IoT, Turbo code, LoRa, ICS-LoRa, SSK-ICS-LoRa

0 引言

近年来, 物联网 (Internet of Things, IoT) 设备的广泛应用, 极大促进了低功耗广域网 (Low Power Wide Area Network, LPWAN) 的发展。LoRa和窄带物联网 (Narrow Band IoT, NB-IoT) 作为主流的LPWAN技术^[1], 都具备

广覆盖、低功耗的优点。然而地面通信受到建造成本和地理因素等方面的制约, 很大程度上限制了其覆盖面积^[2]。在这种情况下, 卫星物联网被用于在全球范围内实现无缝覆盖和全天候通信。2020年, 国家发展和改革委员会明确的新基建“信息基础设施”中就包括以卫星物联网

收稿日期: 2022-10-11; 修回日期: 2023-01-20

通信作者: 白宝明, bmbai@mail.xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62171356); 国家重点研发计划资助项目 (No.2021YFB2900501)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 62171356), National Key Research&Development Program of China (No.2021YFB2900501)

为代表的通信网络基础设施^[3]。

对于卫星物联网通信技术, 需要满足低功耗、远距离的技术指标, 作为一种LPWAN技术, LoRa技术正好满足这一要求^[4-5]。LoRa技术是一种由Semtech公司设计并获得专利的频移啁啾扩频(CSS)调制方案^[6-9], 该公司也生产LoRa通信相关的芯片组^[10]。与其他Sub-GHz技术相比, LoRa技术的接收机灵敏度提高了20 dBm以上, 在空旷地区的覆盖范围可以达到15 km以上^[11]。因此, 基于LoRa技术的卫星物联网应用获得了广泛关注。但是卫星通信还存在大多普勒频移和时延等问题, 参考文献[12]提出了LoRa系统的多普勒频移估计方案。参考文献[13]提出了LoRa系统的同步方案, 使得LoRa技术在面向卫星物联网的应用中更加具有可行性。参考文献[14]研究了LoRa技术在低轨卫星物联网下的性能, 在LoRa调制的扩频因子(Spreading Factor, SF)取12, 路径衰减模型为自由空间损耗模型, 仿照LEO系统(铱星)的仿真系数, 噪声温度取365 K, 发送功率为200 mW, 卫星接收天线增益取24 dBi, 载波频率1 622 MHz, 卫星轨道高度780 km, 仿真得出LoRa系统的吞吐量约为370 bit/s, 在780~2 000 km范围内可以满足低轨卫星物联网的吞吐量和发射功率的要求。

尽管LoRa技术有以上优点, 但是其传输数据速率和频谱效率(Spectral Efficiency, SE)随着SF的增大急剧降低^[15-17]。LoRa调制的数据速率由带宽和扩频因子决定, 当LoRa调制的SF取最小值7, 系统带宽取500 kHz时, 其最高数据传输速率为27.3 kbit/s, 这对许多的物联网应用来说是相当有限的。因此, 为了提高LoRa系统的数据速率, 参考文献[18]提出了一种交织啁啾扩频-LoRa(ICS-LoRa)方案, 使用交织的LoRa信号来扩展信号集, 以牺牲0.8 dB的性能为代价在一个符号周期内多传输1 bit。该方案可以利用更多的交织方式来进行进一步增加频谱效率, 然而会带来更大的性能损失。参考文献[19]提出的斜移键控-交织啁啾扩频-LoRa(SSK-ICS-LoRa)调制, 使用上行啁啾、下行啁啾、交织上行啁啾和交织下行啁啾进一步扩展信号集, 因此每个传输符号可以额外携带2 bit。对于相同的扩频因子和带宽消耗, 参考文献[19]提出的调制方案能够将传统LoRa调制的数据速率提高28.6%, 但是会牺牲一定的误码性能。在LoRa物理层协议中, 编码方案采用的是简单的汉明(Hamming)码^[20]。考虑到功率受限的卫星物联网通信, 汉明码的纠错能力和编码增益是远远不够的。因此, 需要考虑将现代高增益编码方式与LoRa调制相结合。参考文献[21]提出了一种Turbo编码的LoRa索引调制方案来提高Turbo编码的LoRa系统的频谱效率, 该方案实质上就是一种斜移键控方案, 但是引入了性能优异的Turbo码作为编码方案, 并给出了对应

的软解调算法。尽管该方案在误比特率(BER)等于 10^{-5} 的情况下获得了2~3 dB的性能提升, 但是该方案一个符号周期内只能多传输1 bit, 对于频谱效率的提升相当有限。

2020年, Semtech公司发布了LoRa物理层的扩展技术, 称为LoRa跳频扩频(LoRa Frequency Hopping Spread Spectrum, LoRa-FHSS)技术, 其核心是采用卷积码(软判决译码)和跳频技术来支持越来越大、越来越密集的网络部署, 包括规模化的卫星LoRaWAN^[22]。面向卫星物联网的极低信噪比环境, 本文提出了Turbo编码的ICS-LoRa和SSK-ICS-LoRa传输方案。对于ICS-LoRa调制, 使用不同的交织模式在一个符号周期内传输额外的 $x \geq 1$ 个比特, 频谱效率增加到 $(SF+x)/2^{SF}$ 。由于所提出的解调算法的通用性, 该算法也可以应用于SSK-ICS-LoRa传输方案。仿真结果表明, 与未编码方案相比, 所提出的方案可以在误码性能和通信距离方面取得明显提升。

1 LoRa、ICS-LoRa和SSK-ICS-LoRa调制解调的基本原理

1.1 LoRa调制和解调

LoRa技术是一种基于啁啾扩频的调制方案, 图1给出了LoRa调制解调的系统框图。

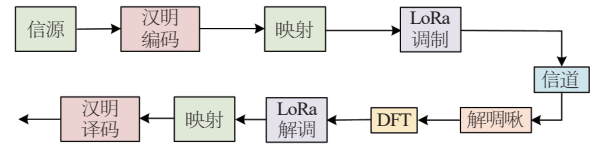


图1 LoRa调制解调系统框图

CSS是一种线性调频技术, CSS信号的频率在符号持续时间 T_s 内线性增加。LoRa信号是CSS信号循环移位产生的, 第 l 个啁啾对应的LoRa调制信号可以表示为^[7]

$$s_m(l) = \frac{1}{\sqrt{M}} \exp \left(j2\pi \left[\left(\frac{l}{2} + m \right) \bmod 2^{SF} \right] \frac{l}{M} \right) \quad (1)$$

其中, $m = \sum_{i=0}^{SF-1} b_i 2^i$ 表示传输的数据符号, $M = 2^{SF}$ 是一个符号周期内的正交啁啾数, mod表示取模运算。

将式(1)进行分段表示, 由于 $\exp(-j2\pi l) = 1$, 进一步简化可得

$$s_m(l) = \frac{1}{\sqrt{M}} \exp \left[j2\pi \left(\frac{l^2}{2M} + \frac{lm}{M} \right) \right] \quad (2)$$

假设信道为加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)信道, 则接收信号 $r_m(l)$ 可以表

示为

$$r_m(l) = s_m(l) + n(l) \quad (3)$$

其中, $n(l)$ 是均值为0、方差为 σ^2 的复高斯随机变量。

LoRa信号的非相干解调分两步进行：解啁啾和离散傅里叶变换（Discrete Fourier Transform, DFT）。首先对接收信号 $r_m(l)$ 通过解啁啾操作得到相应的解啁啾信号 $r'_m(l)$

$$\begin{aligned} r'_m(l) &= r_m(l) \cdot s_0^*(l) \\ &= r_m(l) \cdot \frac{1}{\sqrt{M}} \exp(-j2\pi l^2 / (2M)) \\ &= \frac{1}{M} \cdot \exp(j2\pi l \cdot m/M) + n'(l) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $n'(l) = n(l) \cdot \exp(-j2\pi l^2 / (2M))$ 是均值为0、方差为 σ^2 的复高斯随机变量, $s_0^*(l)$ 是LoRa信号 $s_0(l)$ 的复共轭。

对 $r'_m(l)$ 做DFT操作和取模值操作, 可得

$$\bar{R}(q) = \begin{cases} |1 + N(q)|, & q = m \\ |N(q)|, & q \neq m \end{cases} \quad (5)$$

其中, $N(q) = \left[\sum_{l=0}^{M-1} n'(l) \cdot e^{j2\pi q l / M} \right] / M$ 为噪声项 $n'(l)$ 的DFT结果, LoRa信号的解调选择 $\bar{R}(q)$ 最大值的索引作为输出, 即

$$\hat{m} = \arg \max_{q \in [0, M-1]} \{ |\delta(q-m) + N(q)| \} \quad (6)$$

此时 $\hat{m}$ 即为传输数据符号 m 的解调值。

1.2 ICS-LoRa调制和解调

参考文献[18]所提出的ICS-LoRa调制通过引入交织器来为每个符号携带一个额外的比特来提高LoRa系统的传输速率和频谱效率。ICS-LoRa使用交织器将调制后的LoRa信号 $s_m(l)$ 在时域均匀分为多个子区间, 然后交换某些子区间的顺序^[19], 达到扩展信号集的目的。图2给出了SF为13时具有4个子区间的ICS-LoRa信号的交织过程。

用 $s_m^{(l)}(l)$ 表示交织后的LoRa信号, 则 $s_m^{(l)}(l)$ 可表示为

$$s_m^{(l)}(l) = \begin{cases} s_m(l), & 0 \leq l < 2^{\text{SF}-2} \\ s_m(l + 2^{\text{SF}-2}), & 2^{\text{SF}-2} \leq l < 2^{\text{SF}-1} \\ s_m(l - 2^{\text{SF}-2}), & 2^{\text{SF}-1} \leq l < 3 \times 2^{\text{SF}-2} \\ s_m(l), & 3 \times 2^{\text{SF}-2} \leq l < 2^{\text{SF}} \end{cases} \quad (7)$$

不同交织模式的信号之间的互相关峰越小, 互相关程度就越低, 接收端就可以更好地区分发送信号从而降低误比特率。通过将一个符号周期内的LoRa信号分成更多的子区间, 然后进行交织, 可以有效地降低不同交织模式的信号之间的互相关峰。当分成4个子区间时, 不同交织模式的ICS-LoRa信号之间的最小互相关峰为0.5; 当分成8个子区间时, 不同交织模式的ICS-LoRa信号之间的最小互相关峰为0.25^[23]。图3给出了SF等于13时LoRa信号和ICS-LoRa信号功率谱。随着交织数目的增加, 频率跳变的次数也随之增多, 导致带外发射增大, 这在未经授权的ISM频段是不希望出现的。因此不宜将LoRa信号分成太多的子区间, 建议最多将一个符号周期内的LoRa信号分成8个子区间然后进行交织。

在发送端, $b_0, b_1, \dots, b_{\text{SF}-1}$ 组成传输数据符号 m , 索引符号 b_{SF} 决定交织方式。若 $b_{\text{SF}} = 0$, 则发送端发送 $s_m(l)$, 否则发送 $s_m^{(l)}(l)$ 。

ICS-LoRa的解调过程如图4所示。在接收端, 接收信号记为 $r_m(l)$, 先对其进行解交织, 再分别进行解啁啾、DFT运算, 得到 $\bar{R}_0(q)$ 以及 $\bar{R}_1(q)$, 令 $P_0 = \max_{q \in [0, M-1]} (\bar{R}_0(q))$, $P_1 = \max_{q \in [0, M-1]} (\bar{R}_1(q))$, 峰值 P_0 、 P_1 的索引分别记为 h_0 、 h_1 , 若 $P_0 > P_1$, 则 $\hat{b}_{\text{SF}} = 0$, $\hat{m} = h_0$; 否则, $\hat{b}_{\text{SF}} = 1$, $\hat{m} = h_1$ 。

1.3 SSK-ICS-LoRa调制和解调

SSK-ICS-LoRa调制方案是在ICS-LoRa调制的基础上, 通过引入下啁啾信号来扩展信号集合的, 达到一个

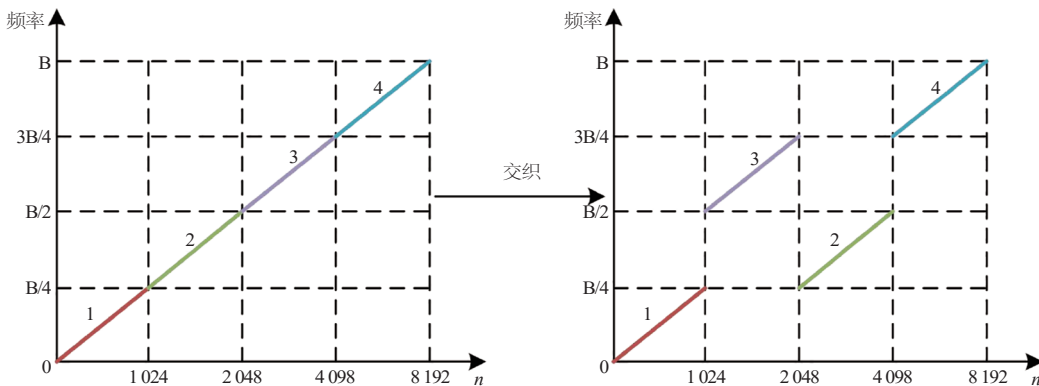
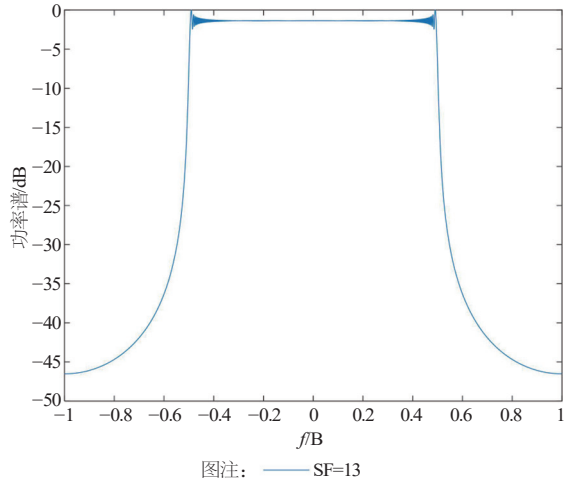
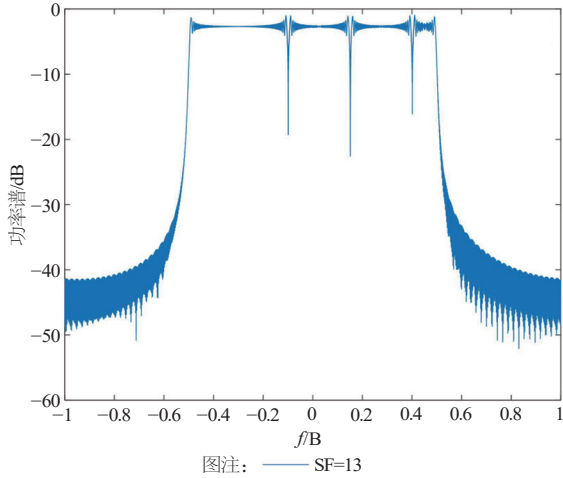


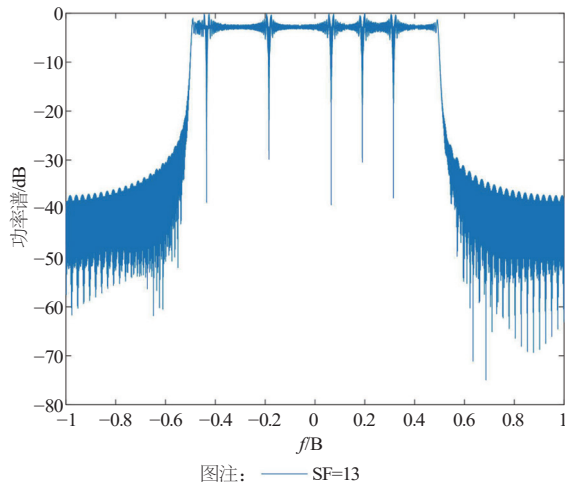
图2 ICS-LoRa信号的交织过程



(a) LoRa信号功率谱



(b) 4个子区间的ICS-LoRa信号功率谱



(c) 8个子区间的ICS-LoRa信号功率谱

图3 LoRa信号和ICS-LoRa信号功率谱

符号周期内传输更多比特的目的。由于SSK-ICS-LoRa调制的信号集有4个基本信号, 因此一个符号周期多传输的比特数为 $\log_2 4 = 2$ 。图5给出了SSK-ICS-LoRa的信号集^[19]。图5中的下啁啾信号可表示为

$$x_m(l) = \frac{1}{\sqrt{M}} \exp \left[j2\pi \left(-\frac{l^2}{2M} + \frac{lm}{M} \right) \right] \quad (8)$$

SSK-ICS-LoRa接收端系统框图如图6所示。在发送端, 假设数据信号为 $b_0, \dots, b_{SF+1}$, 则其发送信号 $y_m(l)$ 可以表示为

$$y_m(l) = \begin{cases} s_m(l), & b_{SF} b_{SF+1} = G_0 \\ x_m(l), & b_{SF} b_{SF+1} = G_1 \\ s_m^{(l)}(l), & b_{SF} b_{SF+1} = G_2 \\ x_m^{(l)}(l), & b_{SF} b_{SF+1} = G_3 \end{cases} \quad (9)$$

其中, $G_0 = [0 \ 0]$, $G_1 = [0 \ 1]$, $G_2 = [1 \ 0]$, $G_3 = [1 \ 1]$ 。

在接收端, 假设接收信号为 $r_m(l)$, 先对其进行两路的解交织, 再分别进行4路的解啁啾、DFT操作, 得到 $\bar{R}_0(q), \dots, \bar{R}_3(q)$, 令 $P_i = \max_{q \in [0, M-1]} (\bar{R}_i(q))$, $i = 0, 1, 2, 3$ 。峰值 P_i 的索引分别记为 h_i 。若 $P_i = \max_{j \in [0, 3]} (P_j)$, 则 $\hat{b}_{SF} b_{SF+1} = G_i$, $\hat{m} = h_i$ 。

2 ICS-LoRa和SSK-ICS-LoRa软解调传输方案

2.1 LoRa软解调算法

为了更好地描述本文提出的ICS-LoRa和SSK-ICS-LoRa的软解调算法, 下面先给出LoRa信号基于DFT的非相干软解调算法: 在AWGN信道下传输数据符号为 m 时所对应的接收信号的对数似然概率可以表示为^[24]

$$p(r_m|q=m) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^M} \exp \left[-\left(1 + |r_m|^2\right)/2\sigma^2 \right] \cdot I_0 \left(\frac{|R(q=m)|}{\sigma^2} \right) \quad (10)$$

其中, $r_m = \{r_m(l), l = 0, 1, \dots, M-1\}$ 为接收信号序列, $I_0(\cdot)$ 为第一类零阶修正贝塞尔 (Bessel) 函数。

为了方便表示, 用 $i = 0, 1, \dots, SF-1$ 表示组成传输数据符号的二进制比特流 $b_0, b_1, \dots, b_{SF-1}$ 中 b_i 的索引, 再用 $\Omega_{0,i} \in \{0, 1, \dots, 2^{SF}-1\}$ 和 $\Omega_{1,i} \in \{0, 1, \dots, 2^{SF}-1\}$ 分别表示按照自然映射的十进制数 $0, 1, \dots, 2^{SF}-1$ 所对应的二进制比特表示中第 i 个位置为0的索引集合和第 i 个位置为1的索引集合。

基于式(10), 可得传输数据符号 m 中第 i 个比特 b_i 的解调对数似然比 (Log-Likelihood Ratio, LLR), 即

$$\text{LLR}(b_i) = \ln \left[\frac{p(b_i=1)}{p(b_i=0)} \right] = \ln \left(\frac{\sum_{q \in \Omega_{1,i}} I_0[\bar{R}(q=m)/\sigma^2]}{\sum_{q \in \Omega_{0,i}} I_0[\bar{R}(q=m)/\sigma^2]} \right) \quad (11)$$

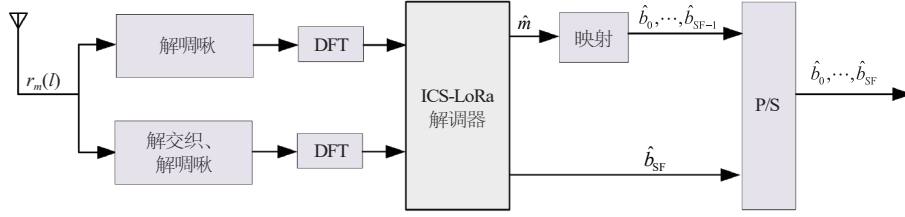


图4 ICS-LoRa的解调过程

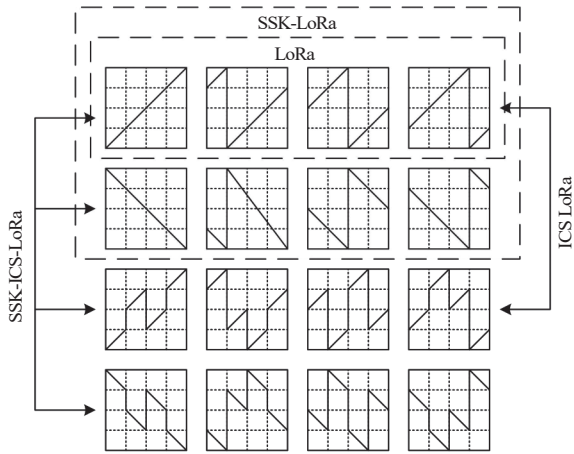


图5 SSK-ICS-LoRa信号集

对式(11)中的Bessel函数 $I_0(\alpha)$ 在 $\alpha=0$ 处进行一阶泰勒展开，并做进一步简化可得

$$\text{LLR}(b_i) \approx \max_{q \in \Omega_{1,i}} \left\{ \ln \left[\bar{R}(q=m)^2 \right] \right\} - \max_{q \in \Omega_{0,i}} \left\{ \ln \left[\bar{R}(q=m)^2 \right] \right\} \quad (12)$$

式(12)即为LoRa信号的软判决信息，虽然存在一定的量化损失，但是可以应用到基于软判决译码的编码方案中。

2.2 ICS-LoRa和SSK-ICS-LoRa软解调算法

本文提出的ICS-LoRa软解调传输方案，利用 W ($W=2^x$)种不同的交织模式在一个符号周期内多传输任意 $x \geq 1$ 个比特。图7给出了ICS-LoRa传输方案的系统框图。为了更好地描述本文提出的软解调算法，下面给出一些标记。

用 $j=0,1,\dots,x-1$ 表示组成索引符号的二进制比特流 $b_{\text{SF}}, b_{\text{SF}+1}, \dots, b_{\text{SF}+x-1}$ 中 $b_{\text{SF}+j}$ 的索引，再用 $\Gamma_{0,j} \in \{0,1,\dots,2^x-1\}$ 和 $\Gamma_{1,j} \in \{0,1,\dots,2^x-1\}$ 分别表示按照自然映射的十进制数 $0,1,\dots,2^x-1$ 所对应的二进制比特表示中第 j 个位置为0的索引集合和第 j 个位置为1的索引集合。

本文提出的ICS-LoRa传输方案解调算法中，数据比特 $b_0, b_1, \dots, b_{\text{SF}-1}$ 的解调软信息由式(12)简化而来，完整

的解调算法描述如下。

将接收信号 $r_m(l)$ 经过解交织、解啁啾和DFT操作，得到的 W 个DFT结果记为 $\bar{R}_0(q), \dots, \bar{R}_{W-1}(q)$ ，对应的最大值记为 $F_h = \max_{q \in [0, M-1]} (\bar{R}_h(q))$ ， $h=0, \dots, W-1$ 。

索引比特 $b_{\text{SF}}, \dots, b_{\text{SF}+x-1}$ 的解调软信息由式(13)给出

$$A(b_{\text{SF}+j}) = \max_{h \in \Gamma_{1,j}} (F_h) - \max_{h \in \Gamma_{0,j}} (F_h), j=0,1,\dots,x-1 \quad (13)$$

若 $F_h = \max_{k \in [0, W-1]} (F_k)$ ，则 $R(q) = \bar{R}_h(q)$ 。根据式(12)，将对数运算省略，得到数据比特 $b_0, b_1, \dots, b_{\text{SF}-1}$ 的解调软信息

$$A(b_i) = \max_{q \in \Omega_{1,i}} R(q)^2 - \max_{q \in \Omega_{0,i}} R(q)^2, i=0, \dots, \text{SF}-1 \quad (14)$$

然后将解调软信息 $A(b_0), \dots, A(b_{\text{SF}+x-1})$ 送入译码器，即可得到译码比特流。当 $x=2$ 时，上述解调算法即为SSK-ICS-LoRa传输方案的解调算法，只是对接收信号的处理略有不同，在上一节中已经进行了详细介绍，这里不再赘述。

图8给出了不同编码方案下级联LoRa系统的性能，从图8可以看出，在码率约为0.5的编码方案中，Turbo码和LDPC码级联LoRa调制系统的性能均是最优的，相较于其他编码方案有着0.7 dB以上的性能提升。图9给出了 $\text{SF}=7$ 时，LDPC码和Turbo码级联ICS-LoRa系统的误码性能。从图9中可以看出，考虑误比特率为 10^{-5} ，Turbo码的性能优于LDPC码约0.8 dB，因此在下面的仿真中，本文采用Turbo码进行编码，以获得更高的编码增益。

2.3 Turbo码

Turbo码于1993年被提出，是一种接近AWGN信道容量的编码方案^[25]。Turbo码采用交织法构造随机长码，并且采用最大似然比迭代解码，充分利用接收信号的信息。此外，Turbo码还具有很强的抗衰落和抗干扰能力^[21]。

本文提出的传输方案采用Turbo码进行纠错编码，可以有效降低误比特率并且提高传输距离。根据参考文献[24]，当码率为0.5时，非相干LoRa系统的系统容量最大，因此本文选择码率为0.5的Turbo码。随着迭代次数和交织长度的增加编码增益的增长会变得缓慢，译码复杂度却线性增加。因此在实际的应用中，编码长度和迭

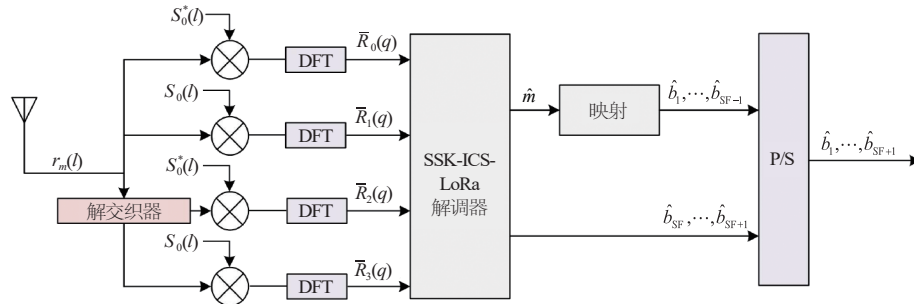


图6 SSK-ICS-LoRa接收端系统框图

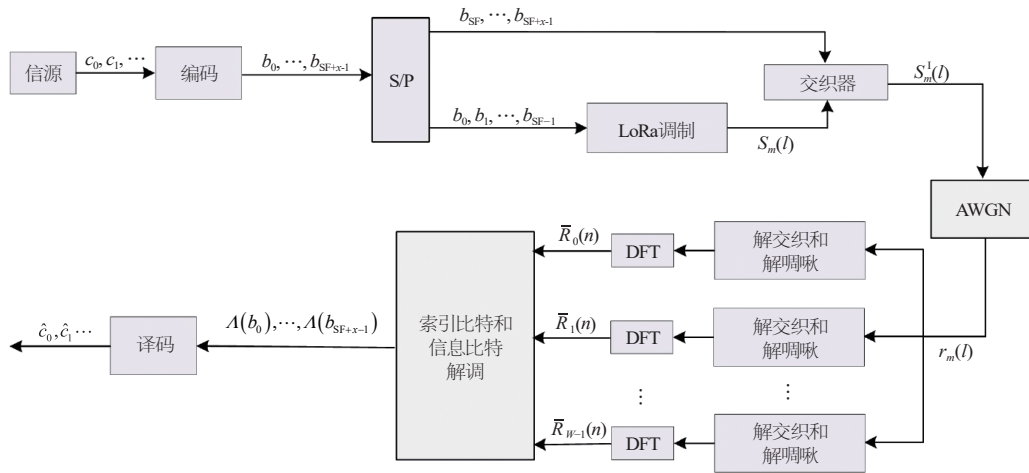
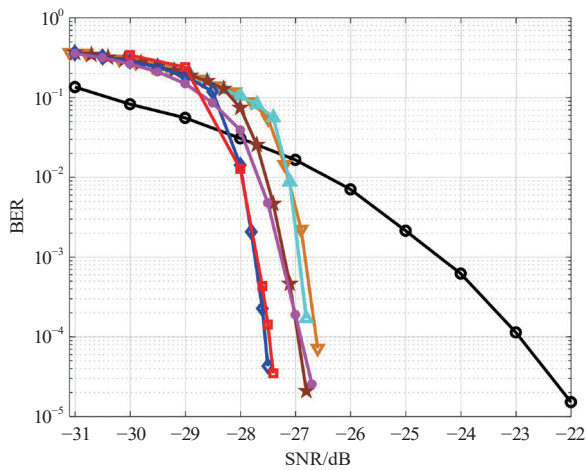
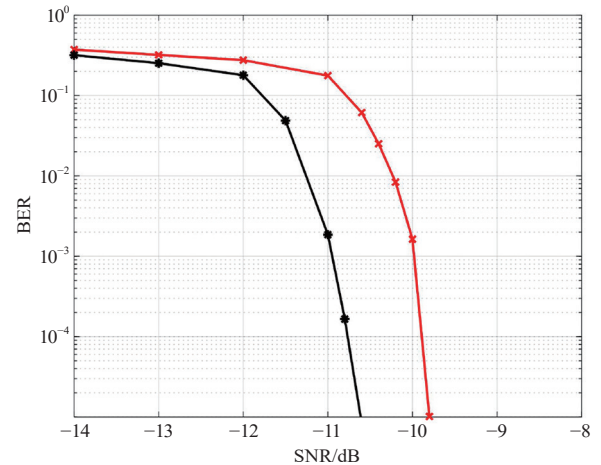


图7 ICS-LoRa传输方案的系统框图



图注: (7, 4) 汉明-LoRa (SF=13)
 (511, 250) BCH-LoRa (SF=13)
 (1023, 513) BCH-LoRa (SF=13)
 (127, 64) RS-LoRa (SF=13)
 (768, 384) Turbo-LoRa (SF=13)
 (800, 400) LDGM-LoRa (SF=13)
 (768, 384) LDPC-LoRa (SF=13)

图8 不同编码方案下级联LoRa系统的性能



图注: LDPC-ICS-LoRa Turbo-ICS-LoRa

图9 不同编码方案下级联ICS-LoRa系统的误码性能

代次数的选取不会过大。综合考虑系统复杂度、译码时延和性能的关系,最终选定了码长1538以及迭代次数8次。在此条件下,计算复杂度在可接受的范围内,且LoRa系统级联Turbo码造成的时延为毫秒级别。考虑到

LoRa技术主要面向低速率物联网服务,例如收集环境信息的农业物联网。它通常以秒为单位定期收集和上传,因此毫秒级时延不会对LoRa的应用产生太大影响^[21]。

3 仿真结果

3.1 仿真参数

由于卫星链路上的通信双方处在极低信噪比的环境下,这就要求选择大扩频因子的LoRa调制,一般来说, SF大于12。具体的仿真参数由表1给出。

表1 仿真参数

参数	值
带宽/kHz	125
信道	AWGN
编码方案	Turbo码
扩频因子	13
正交调频数/个	8 192
目标信噪比 (@BER=10 ⁻⁵)	-26 dB

3.2 性能分析

LoRa、ICS-LoRa、SSK-ICS-LoRa调制方案和Turbo编码的ICS-LoRa和SSK-ICS-LoRa传输方案的BER性能如图10所示,图10中ICS-LoRa- x bit表示在一个符号周期内多传输 x 个比特。从图10可以看出,本文提出的Turbo编码的传输方案在误比特率为10⁻⁵时相较于未编码方案均获得了约4 dB的性能增益。在给定的目标信噪比下,本文提出的软解调方案低于目标信噪比约1 dB。

根据参考文献[26], LoRa接收机的灵敏度由式(15)给出

$$P_{Rx} = SNR_{limit} + 10\log_{10} W + NF - 174 \quad (15)$$

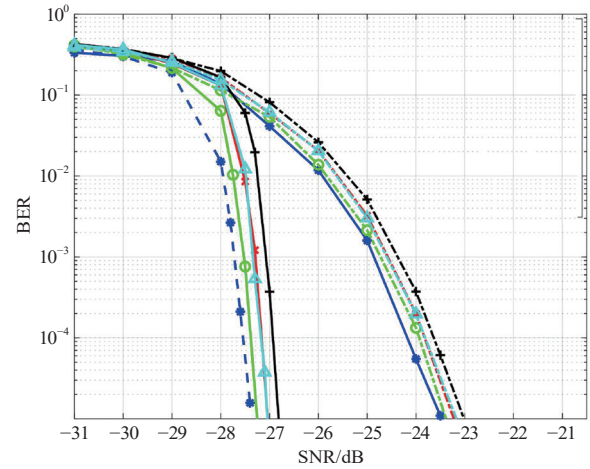
其中, P_{Rx} 为接收机的灵敏度, W 为系统带宽, 其取值为125 kHz、250 kHz或者500 kHz。对于给定的硬件实现, 系统噪声系数 (Noise Figure, NF) 是固定的, 对于LoRa端节点收发器芯片SX1272和SX1276, NF为6 dB。

SNR_{limit} 为BER等于10⁻⁵时的解调信噪比门限。

LoRa主要在全球免费频段运行, 包括433 MHz、868 MHz、915 MHz等。假设LoRa通信载波频率为433 MHz, 发射功率为LoRa收发芯片规定的最大发射功率17 dBm, 根据自由空间传输损耗和传输距离的换算公式

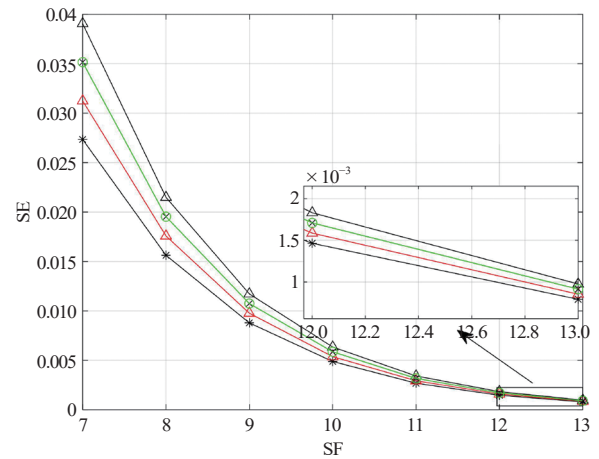
$$L_{os} = 32.44 + 20\log_{10} d + 20\log_{10} f \quad (16)$$

其中, L_{os} 为自由空间传输损耗, d 为传输距离, f 为载波频率。



图注: LoRa Turbo-LoRa ICS-LoRa-1 bit^[17]
Turbo-ICS-LoRa-1 bit ICS-LoRa-2 bit^[22]
Turbo-ICS-LoRa-2 bit ICS-LoRa-3 bit^[22]
Turbo-ICS-LoRa-3 bit SSK-ICS-LoRa^[18]
Turbo-SSK-ICS-LoRa

图10 提出的传输方案的BER性能



图注: Turbo-LoRa Turbo-ICS-LoRa-2 bit
Turbo-ICS-LoRa-1 bit Turbo-ICS-LoRa-3 bit
Turbo-SSK-ICS-LoRa

图11 不同调制方式下的频谱效率

根据式(16)可以计算出自由空间下的传输距离。表2给出了带宽为125 kHz时本文提到的所有调制方式的接收机灵敏度以及传输距离。不同调制方式下的频谱效率如图11所示。从表2和图11可知, 当SF取值为13时, 本文提出的传输方案相较于未编码方案在自由空间下的通信距离增加了55%~57%, 相较于现有的Turbo-LoRa方案, 在扩频因子为13的情况下, 频谱效率提高了约23%。

4 结束语

本文提出了一种面向卫星物联网的Turbo编码的ICS-

表2 SF=13时不同调制方式下的传输距离

调制方式	P_{RX}/dBm	$\text{SNR}_{\text{limit}}/\text{dB}$	传输距离/km
LoRa	-140.5	-23.5	4 135
ICS-LoRa ($x=1$ bit)	-140.4	-23.4	4 088
ICS-LoRa ($x=2$ bit)	-140.2	-23.2	3 995
ICS-LoRa ($x=3$ bit)	-140	-23	3 904
SSK-ICS-LoRa	-140.2	-23.2	3 995
ICS-LoRa ($x=1$ bit, Turbo编码)	-144.3	-27.3	6 405
ICS-LoRa ($x=2$ bit, Turbo编码)	-144.1	-27.1	6 259
ICS-LoRa ($x=3$ bit, Turbo编码)	-143.8	-26.8	6 047
SSK-ICS-LoRa ($x=2$ bit, Turbo编码)	-144.1	-27.1	6 259

LoRa和SSK-ICS-LoRa传输方案,相较于未编码方案,明显提升了系统的BER性能和通信距离。相较于现有的Turbo-LoRa方案,在扩频因子为13的情况下,牺牲了0.5 dB的误码性能换取了23%的频谱效率提升。总的来说,该方案在频谱效率和误码性能之间取得了不错的折衷。

参考文献:

- [1] 刘锋,夏琼.低功耗广域网(LPWAN)技术分析[J].电子测试, 2021(21): 92-93, 104.
- [2] LIU F, XIA Q. Low power wide area network (LPWAN) technology analysis[J]. Electronic Test, 2021(21): 92-93, 104.
- [3] KAPOVITS A, CORICI M I, GHEORGHE-POP I D, et al. Satellite communications integration with terrestrial networks[J]. China Communications, 2018, 15(8): 22-38.
- [4] 刘艳红,黄雪涛,石博涵.中国“新基建”:概念、现状与问题[J].北京工业大学学报(社会科学版), 2020, 20(6): 1-12.
- [5] LIU Y H, HUANG X T, SHI B H. China's new infrastructure construction: concepts, current situations and problems[J]. Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition), 2020, 20(6): 1-12.
- [6] CENTENARO M, VANGELISTA L, ZANELLA A, et al. Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(5): 60-67.
- [7] SHERAZI H H R, PIRO G, GRIECO L A, et al. When renewable energy meets LoRa: a feasibility analysis on cable-less deployments[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(6): 5097-5108.
- [8] LoRaWAN What is it? A Technical Overview of LoRa and LoRaWAN[Z]. 2015.
- [9] VANGELISTA L. Frequency shift chirp modulation: the LoRa modulation[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2017, 24(12): 1818-1821.
- [10] AUGUSTIN A, YI J Z, CLAUSEN T, et al. A study of LoRa: long range & low power networks for the Internet of Things[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2016, 16(9): 1466.
- [11] ZHOU Q H, ZHENG K, HOU L, et al. Design and implementation of open LoRa for IoT[J]. IEEE Access, 2019, 7: 100649-100657.
- [12] BERNI A, GREGG W. On the utility of chirp modulation for digital signaling[J]. IEEE Transactions on Communications, 1973, 21(6): 748-751.
- [13] LoRa Alliance. A technical overview of LoRa and LoRa WAN [EB]. 2017.
- [14] COLAVOLPE G, FOGGI T, RICCIULLI M, et al. Reception of LoRa signals from LEO satellites[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(6): 3587-3602.
- [15] XHONNEUX M, BOL D, LOUVEAUX J. A low-complexity synchronization scheme for LoRa end nodes[J]. 2019.
- [16] 吴庭薇,谢继东,张更新. LoRa调制在低轨卫星物联网下适应性研究[J].电视技术, 2018, 42(9): 21-25, 36.
- [17] WU T W, XIE J D, ZHANG G X. Adaptability of LoRa modulation in LEO satellite Internet of Things[J]. Video Engineering, 2018, 42(9): 21-25, 36.
- [18] HANIF M, NGUYEN H H. Slope-shift keying LoRa-based modulation[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(1): 211-221.
- [19] BOMFIN R, CHAFII M, FETTWEIS G. A novel modulation for IoT: PSK-LoRa[C]//Proceedings of 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [20] HANIF M, NGUYEN H H. Frequency-shift chirp spread spectrum communications with index modulation[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(24): 17611-17621.
- [21] ELSHABRAWY T, ROBERT J. Interleaved chirp spreading LoRa-based modulation[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 3855-3863.
- [22] MONDAL A, HANIF M, NGUYEN H H. SSK-ICS LoRa: a LoRa-based modulation scheme with constant envelope and enhanced data rate[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(5): 1185-1189.
- [23] LoRaWAN Specification. LoRa Alliance, Beaverton, OR, USA[EB]. 2016.
- [24] AN S X, LU Z P, WANG H, et al. A turbo coded LoRa-index modulation scheme for IoT communication[C]//Proceedings of 2021 IEEE 21st International Conference on Communication

Technology (ICCT). Piscataway: IEEE Press, 2022: 736-740.

- [22] BOQUET G, TUSET-PEIRÓ P, ADELANTADO F, et al. LR-FHSS: overview and performance analysis[J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(3): 30-36.
- [23] EDWARD P, TAREK E, EL-AASSER M, et al. Further LoRa capacity enhancement through interleaved chirp spreading LoRa expansion[C]//Proceedings of 2019 International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [24] FABREGAS A G, GRANT A J. Capacity approaching codes for non-coherent orthogonal modulation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(11): 4004-4013.
- [25] BERROU C, GLAVIEUX A, THITIMAJSHIMA P. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: turbo-codes. 1[C]//Proceedings of ICC '93 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2002: 1064-1070.
- [26] 徐浪, 陈小莉, 田茂, 等. 基于Turbo码和ODPD判决法的LoRa改进方法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(7): 142-147.
- XU L, CHEN X L, TIAN M, et al. Improving method of LoRa based on Turbo code and ODPD[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(7): 142-147.

[作者简介]



罗进 (1999-), 男, 西安电子科技大学广州研究院硕士生, 主要研究方向为卫星物联网传输技术。



夏家宝 (1998-), 男, 西安电子科技大学通信工程学院硕士生, 主要研究方向为编码调制技术、物联网传输技术等。



白杨 (1999-), 女, 西安电子科技大学广州研究院硕士生, 主要研究方向为物联网传输技术等。



白宝明 (1966-), 男, 西安电子科技大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为信息与编码理论、编码调制技术和无线通信。