

基于负载量预测的卫星物联网随机接入研究

茆习文, 王海涛, 张更新

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

摘要: 在卫星物联网蓬勃发展的过程中, 随机接入协议因其信令开销较小、传输效率高、灵活性高、实现容易的特点被视为最适宜的通信协议, 但由于负载变化剧烈, 常规随机接入方式只在特定负载范围内具有优势, 动态分配随机接入资源需要获取准确的时隙接入申请量。针对以上问题, 提出一种随机接入自适应方案, 可以根据未来负载量大小自适应选取恰当的随机接入方式, 从而提高系统吞吐量, 其中, 负载量大小可以通过提出的负载量估计及预测方案得到。在传输环境存在窄带干扰时, 引入扩频通信手段, 使得随机接入自适应方案能够成功运行, 并且提出的扩频随机接入自适应方案提升了系统吞吐量。

关键词: 卫星物联网; 随机接入; 负载量预测; 负载量估计; 扩频通信

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2023040

Research on Random Access of Satellite Internet of Things Based on Load Prediction

MAO Xiwen, WANG Haitao, ZHANG Gengxin

School of Communication and Information Engineering,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

Abstract: In the process of the vigorous development of satellite internet of things, random access protocol is regarded as the most suitable communication protocol due to its characteristics of low signaling overhead, high transmission efficiency, high flexibility and easy implementation. However, due to drastic load changes, conventional random access mode only has advantages in the specific load range. Dynamic allocation of random access resources requires the accurate number of time slot access applications. In view of the above problems, a random access adaptive scheme was proposed, which could adaptively selected the appropriate random access mode according to the future load size, so as to improved the system throughput. The load size could be obtained through the proposed load estimation and prediction scheme. When narrowband interference exists in the transmission environment, the spread-spectrum communication means was introduced to made the adaptive scheme of random access run successfully. Moreover, the proposed adaptive scheme also improved the system throughput.

Keywords: satellite internet of things, random access, load prediction, load estimation, spread spectrum communication

0 引言

近年来, 卫星物联网蓬勃发展^[1-3], 与地面物联网相比, 它可以忽略地理环境、恶劣环境和突发灾害等因素的影响^[4], 被视为地面物联网的有效补充。但大量不连续发送短突发^[5]的用户也对卫星物联网的接入技术提出

了新的挑战^[6], 大规模低成本终端在同一时段访问网络^[7]时, 要解决它们之间的冲突与干扰问题, 必须为卫星物联网业务设计合适的连接协议^[8-10]。随机多址接入方式^[11-12]因其信令开销小、传输效率高、灵活性高、实现容易等特点, 被认为是卫星物联网系统最适宜的接入方式。

收稿日期: 2023-06-01; 修回日期: 2023-10-31

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No.62171234); 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点项目 (No.U21A20450)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62171234), Key Project of the Regional Innovation and Development Joint Fund of The National Natural Science Foundation of China (No.U21A20450)

2 负载量估计及预测

2.1 负载量估计及预测的流程

低轨卫星物联网模型的数据处理中心包含负载量预测模块，当一个时隙结束之后，卫星将负载量预测模块所需要的数据转发给地面的信关站，信关站接收后送入负载量预测模块进行如图2所示的负载量估计及预测的具体流程。具体来说，在每一个时隙的随机接入过程结束后，卫星完成数据包的解扩和译码等操作，接着收集所有前导码状态信息，即处于不同状态的前导码数量情况。获取了时隙中所有前导码状态信息之后，利用负载量预测模块中的负载量估计方案实现对当前时隙负载量的估计。通过统计多个时隙的负载量估计值，实现批量时隙负载量估计结果的整合操作。最后，将这些整合的数据按照负载量预测方案设计的要求作为历史数据送入LSTM-ARMA模块，实现负载量预测。

2.2 负载量估计方案

在得到一个时隙的所有前导码状态信息后，可以通过分析该时隙中所有前导码处于不同状态的概率与当前时隙接入申请数的关系来估计当前时隙中负载量情况。用 N_p 表示分配给终端选择的前导码个数， n_a 表示选择前导码的终端个数，假设每个终端随机选到任一前导码的概率相同。前导码的不同状态用 s_i 进行区分，其中， $s_i=0$ 表示没有终端选择该前导码，即 n_a 个终端均未选择该前导码，由选择任一前导码的概率均为 $1/N_p$ 可以得知， $s_i=0$ 的概率为 $(1-1/N_p)^{n_a}$ ； $s_i=1$ 表示有且只有一个终端选中了该前导码，剩余 n_a-1 个终端均未选择该前导码， n_a-1 个终端未选择该前导码的概率为 $(1-1/N_p)^{n_a-1}$ ，则得到 $s_i=1$ 的概率为 $(1-1/N_p)^{n_a-1} \cdot n_a / N_p$ ； $s_i \geq 2$ 表示该前导码被终端选择的次数超过了一次，易知概率为 $1 - (1-1/N_p)^{n_a} - (1-1/N_p)^{n_a-1} \cdot n_a / N_p$ 。综上可知处于空闲状态、成功状态和冲突状

态这3种状态的概率如式(1)所示。

$$P(s_i | N_a = n_a) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{N_p}\right)^{n_a}, & s_i = 0 \\ \left(1 - \frac{1}{N_p}\right)^{n_a-1} \cdot \frac{n_a}{N_p}, & s_i = 1 \\ 1 - \left(1 - \frac{1}{N_p}\right)^{n_a} - \left(1 - \frac{1}{N_p}\right)^{n_a-1} \cdot \frac{n_a}{N_p}, & s_i \geq 2 \end{cases} \quad (1)$$

在卫星物联网的数据包传输过程中，卫星检测出每个时隙中处于3种状态前导码的个数 n_1 、 n_2 和 n_3 ，并将数据通过信关站传输给天地融合中心中的数据处理中心。负载量预测模块根据3种状态前导码数量和式(1)完成对该时隙负载量的估计，负载量估计的步骤如下。

首先，通过3种状态前导码数量和式(1)列出可以求出负载量估计值的最大似然函数表达式^[10]

$$P(s_i | N_a) = P(s_i = 0 | N_a)^{n_1} \cdot P(s_i = 1 | N_a)^{n_2} \cdot P(s_i \geq 2 | N_a)^{n_3} \quad (2)$$

然后，根据最大似然估计法则，使得式(2)中 $P(s_i | N_a)$ 取得最大值的 N_a 即为负载量估计值 $\hat{N}_a$ ，又因为原表达式有幂指数，采用取对数的形式，得到负载量估计值 $\hat{N}_a$ 的表达式为

$$\hat{N}_a = \arg \max \sum_i \ln P(s_i | N_a) \quad (3)$$

设置如表1所示的仿真参数，假设数据包的到达过程服从参数中的Beta分布，退避规则使用二进制退避算法，通过使用Matlab软件进行仿真，得到如图3所示的仿真结果。图3由4个仿真结果组成。其中，图3(a)和图3(b)是每个时隙负载量估计值与真实值的对比。图3(a)是第4 000~10 000时隙。图3(b)是第7 800~8 000时隙，

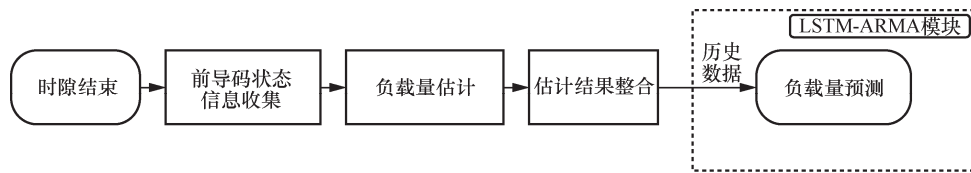


图2 负载量估计及预测的流程

表1 仿真参数

总服务时隙/个	终端数量/个	业务到达模型	概率分布函数	可用前导码个数	退避算法	退避最大窗口值	前导码选择方式
17 000	70 000	服从Beta分布	$(60r^2(T-t)^3)/T^6$	32个	二进制退避	32个时隙	随机选择

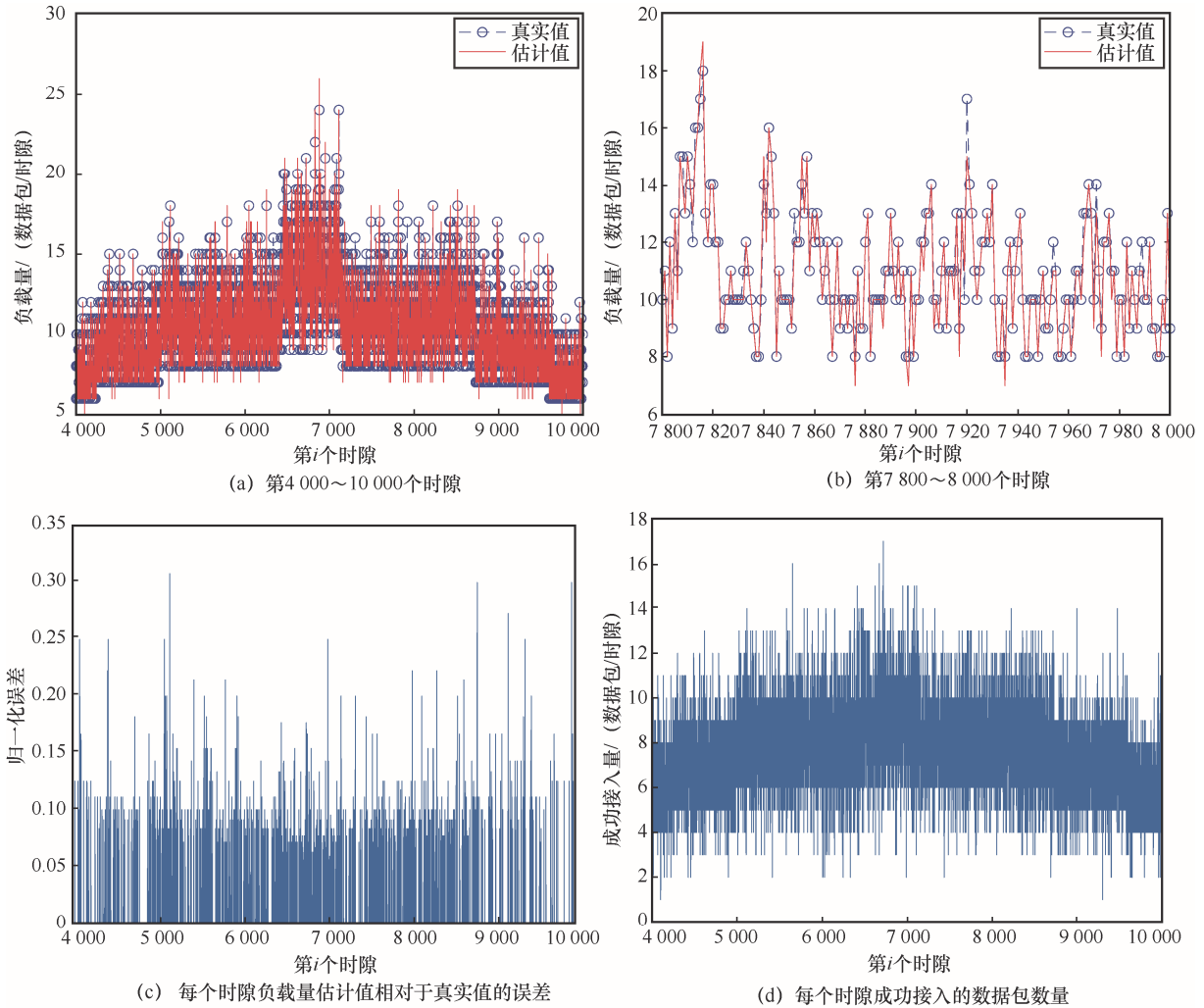


图 3 负载量估计仿真图

也是后文中负载量预测对应的时隙区间。图 3(c) 是每个时隙负载量估计值相对于真实值的误差，利用估计值与真实值差值的绝对值除以真实值得到。图 3(d) 是每个时隙成功接入的数据包数量。

通过仿真图可以看出，该负载量估计的结果非常准确，综合平均误差不到 1%，为后文负载量预测的准确度做好了保障。

2.3 负载量预测方案

LSTM 引入一个名为单元状态的变量，从而可以实现更复杂的非线性运算^[11]。如图 4 所示， f 、 i 和 o 3 个门结构保护和控制单元状态 C ^[12]。所列出的公式中， W_c 、 W_i 、 b_i 和 b_c 均表示 LSTM 单元的参数， X_t 表示当前时刻的输入信号， h_t 和 h_{t-1} 分别表示当前时刻和前一时刻的输出信号， σ 表示 sigmoid 激活函数， $\tanh$ 表示 tanh 激活函数。

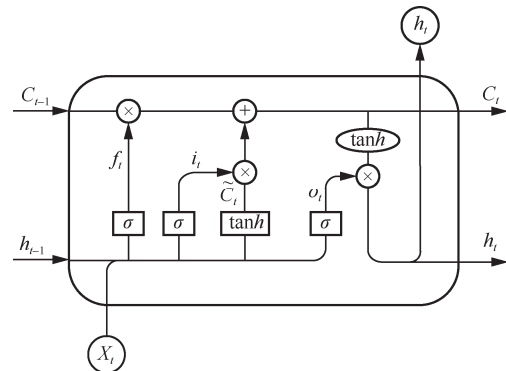


图 4 单个 LSTM 单元存储结构

LSTM 首先要通过遗忘门丢弃单元状态中不需要的信息，它的计算结果可以表示为

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, X_t] + b_f) \quad (4)$$

第二步是考虑在单元状态中加入什么样的新的属性信息,通过一个输入门决定哪些信息需要更新,它的计算结果可以表示为

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, X_t] + b_i) \quad (5)$$

通过隐藏的 $\tanh$ 激活函数,可以得到一个备选的作为更新内容的向量为

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_c \cdot [h_{t-1}, X_t] + b_c) \quad (6)$$

第三步考虑更新单元状态,新的单元状态可以表示为

$$C_t = f_t \cdot C_{t-1} + i_t \cdot \tilde{C}_t \quad (7)$$

第四步需要确定输出值的情况,输出值将会基于单元状态。首先,使用输出门来确定单元状态的哪个部分将被输出,可以表示为

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, X_t] + b_o) \quad (8)$$

接着,让更新后的单元状态通过 $\tanh$ 激活函数的处理,并将 $\tanh$ 激活函数输出的值与输出门层得到的结果进行相乘,得到确定输出的结果为

$$h_t = o_t \cdot \tanh(C_t) \quad (9)$$

本文通过构建神经网络模型来获得未来负载量数据,负载量预测流程如图 5 所示,主要由负载量估计数据预处理、LSTM-ARMA 预测模块和计算输出等构成, $[a, b]$ 表示选取作为历史数据的时隙范围, c 表示预测负载量的时隙个数。具体而言,负载量估计结果先被输入到数据预处理模块,选择作为负载量预测模块历史数据的负载量估计结果,预处理后的数据进一步被送入 LSTM-ARMA 预测模块进行未来时隙负载量的预测。

不同于传统的 LSTM 预测方法,所构建的

LSTM-ARMA 模型在 LSTM 预测后,利用 ARMA 对 LSTM 的预测误差进行修正,并结合反向传播算法^[13]对 LSTM 模型参数进行优化,以提高未来时隙负载量预测准确度。

将本文采用的两层 LSTM 网络的模型参数如表 2 所示进行设置。根据负载量估计方案,可以得到所有历史时隙的负载量估计值,从中选取第 $[5\ 000, 8\ 000]$ 个时隙,用它们的负载量估计值作为机器学习的历史数据,具体负载量预测的流程图如图 5 所示。利用每个时隙及其之前 2 800 个时隙的负载量预测出下一个时隙的负载量,负载量预测的仿真图如图 6 所示。从图 6 (a) 中可以看出,预测负载贴合真实负载的趋势,且归一化的预测误差不到 7%,因为实际使用中不考虑负载量预测值的小数部分,对负载量预测值进行四舍五入得到图 6 (b),归一化预测误差为 6% 左右。

3 随机接入方案

3.1 随机接入自适应方案

在传统随机接入方案中,CRDSA 在低负载量时有着相当不错的性能,吞吐量最大值能够达到 0.55 (数据包/时隙) 左右。随着负载量的提高,CRDSA 会出现雪崩效应,导致吞吐量急剧下降;与 CRDSA 相比,SA 在低负载时吞吐量虽然只能达到 0.368 (数据包/时隙),但是随着负载量的提高,其吞吐量的下降速度明显缓于 CRDSA。综上,选择将两种随机接入方式进行结合,根据负载量预测值大小,自适应在两种方式间切换,在高负载时使用 SA 作为接入方式,在低负载时使用 CRDSA 作为接入方式,具体方案流程如图 7 所示。

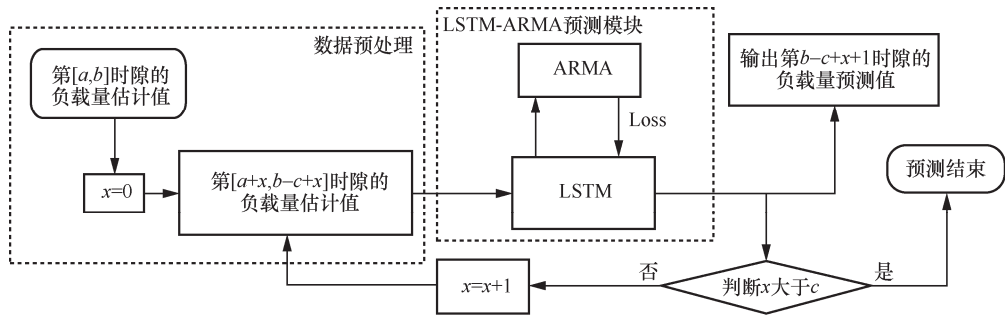


图 5 负载量预测流程

表 2 LSTM 模型参数

第一层神经元个数/个	第二层神经元个数/个	最大迭代次数/次	初始学习率	优化器	损失函数	神经元损失概率
128	64	1 000	0.002	Adam	MSE	0.2

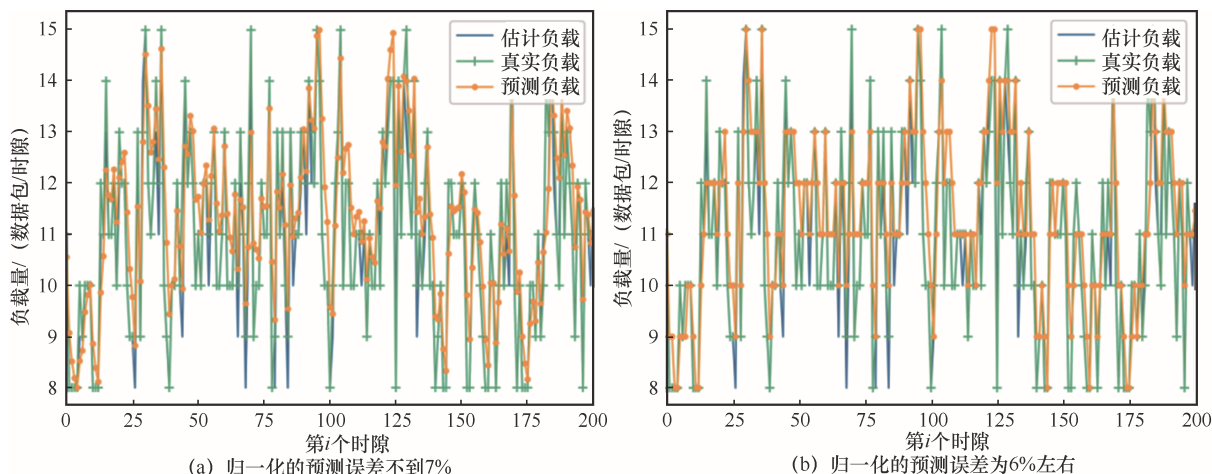


图6 负载量预测仿真图

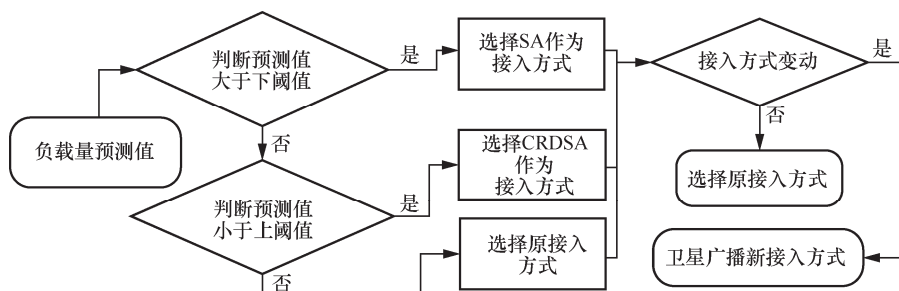


图7 随机接入自适应方案流程

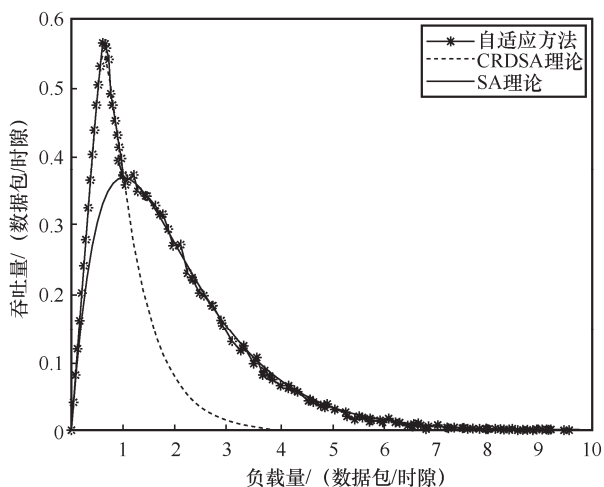


图8 随机接入自适应方法吞吐量仿真图

同时,在上述方案的基础上,为了在不影响系统吞吐量的前提下提高系统的效率,在自适应切换方案中设置免转换区。 X 表示 SA 和 CRDSA 吞吐量相同时的负载大小, e 表示负载量估计及预测的归一化误差大小, $\max_G$ 表示负载的最大取值。对于区间 $(0, (1-e)X)$ 和区间 $((1+e)X, \max_G)$, 假定负载量估计及预测的误差均为 e ,

即使在临界点 $(1-e)X$ 和 $(1+e)X$ 处,也不会因为预测值与真实值的误差而导致选错接入方式,只需要考虑 $((1-e)X, (1+e)X)$ 区间。在 $((1-e)X, (1+e)X)$ 区间内,因为预测值与真实值的误差而导致选错接入方式的概率为 50%,如果缩小区间,选错概率不会降低,但是免转换区的增大使得接入方式变动的次数减少,即提高系统的效率。

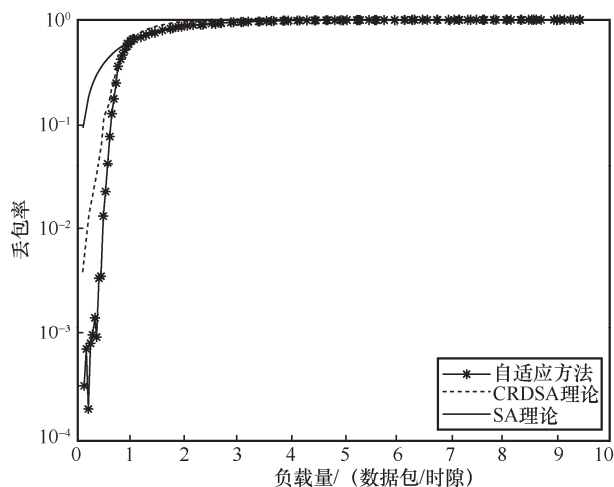


图9 随机接入自适应方法丢包率仿真图

将 e 设置为负载量估计及预测的误差 6%，上下阈值分别取值为 $1.06X$ 和 $0.94X$ ，则免转换区设置为 $(0.94X, 1.06X)$ ，即 $(0.96, 1.08)$ 。接着，对仿真参数进行设置，将归一化负载的范围设置为 $[0, 10]$ ，通过 10 000 次蒙特卡洛仿真得到如图 8 和图 9 所示的两张仿真结果图，仿真中对比方法为单一的 CRDSA 或 SA。仿真结果表明，相较于单一的 CRDSA 或 SA 随机接入方法，吞吐量略有提高，丢包率也有所下降。

3.2 扩频通信抗窄带干扰分析

“处理增益”的概念常被用来衡量扩频通信性能的目标^[9]。在接收机处，将传输信号的输出信噪比表示为 $(S/N)_{\text{out}}$ ，同理，输入信噪比表示为 $(S/N)_{\text{in}}$ ，则可以得到处理增益 G_p 的表达式为

$$G_p = \frac{\text{输出信号噪声功率比}}{\text{输入信号噪声功率比}} = \frac{(S/N)_{\text{out}}}{(S/N)_{\text{in}}} \quad (10)$$

用 N_0 表示均匀分布的干扰和噪声的功率谱密度，则干扰和噪声的输入功率可以表示为 $N_{\text{in}} = N_0 B_{\text{ss}}$ ，其中， B_{ss} 为接收机的带宽。用 P 表示输入信号功率，则输入信噪比为 $(S/N)_{\text{in}} = P/N_0 B_{\text{ss}}$ 。接收机对收到的复合信号进行解扩操作，扩频信号因为扩频码的自相关性将带宽由 B_{ss} 无损缩窄为 B_0 ；相反，干扰和噪声经过解扩操作之后，虽然带宽也缩窄为 B_0 ，但在带宽 B_0 以外的干扰和噪声的能量均被带宽为 B_0 的滤波器滤除，剩余功率表示为 $N_{\text{out}} = N_0 B_0$ 。这样，经过接收机一系列操作之后，处理增益 G_p 进一步表示为

$$G_p = \frac{(S/N)_{\text{out}}}{(S/N)_{\text{in}}} = \frac{(P/N_0 B_0)}{(P/N_0 B_{\text{ss}})} = \frac{B_{\text{ss}}}{B_0} \quad (11)$$

由此可以说明带宽扩展倍数的增加，即扩频位数的增大，可以提高扩频接收机的处理增益。

将共同参数如表 3 进行设置，得到如图 10 所示的 4 幅

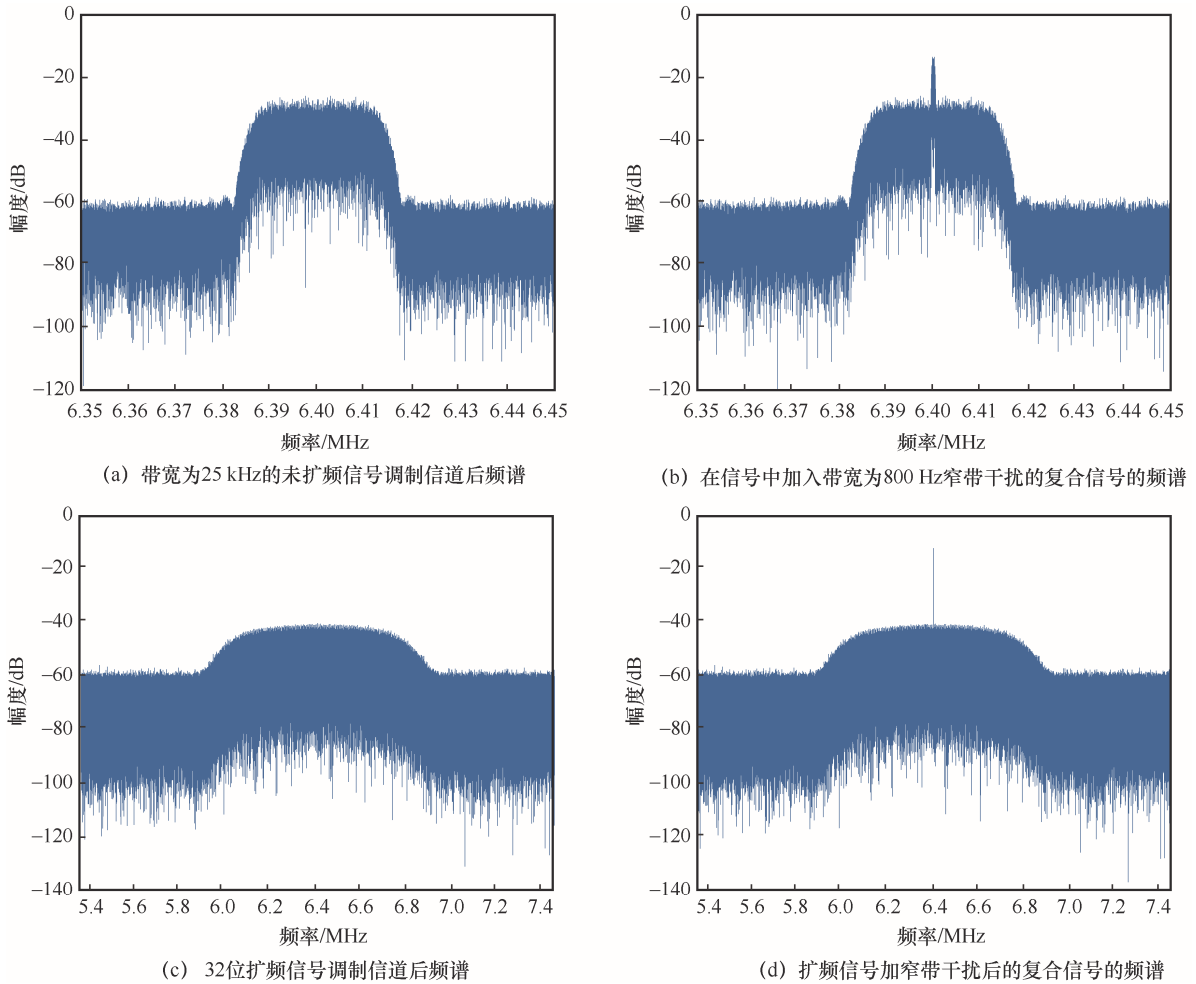


图 10 信号及窄带干扰频谱图

仿真图。图 10 (a) 为带宽为 25 kHz 的未扩频信号调制信道后频谱。图 10 (b) 为在该信号中加入带宽为 800 Hz 窄带干扰的复合信号的频谱。同理, 图 10 (c) 为图 10 (a) 信号扩频后的频谱。图 10 (d) 为扩频信号加窄带干扰后的复合信号的频谱。

表 3 仿真参数

采样频率/MHz	信噪比/dB	成型滤波器	滚降系数
6.4	8	根升余弦滤波器	0.35

保持发射功率和噪声功率均不变, 窄带干扰信号一致, 只改变扩频的位数, 用误码率衡量抗窄带干扰性能的优劣, 以此验证扩频通信手段抗窄带干扰性能。将仿真参数如表 4 所示进行设置, 得到的仿真结果图 11 表明, 在窄带干扰不变的情况下, 随着扩频位数的增加, 误码率下降显著, 所以在低轨卫星物联网随机接入系统中引入扩频通信手段, 确实能够提高系统的抗窄带干扰能力, 以保证传输系统的正常运行。

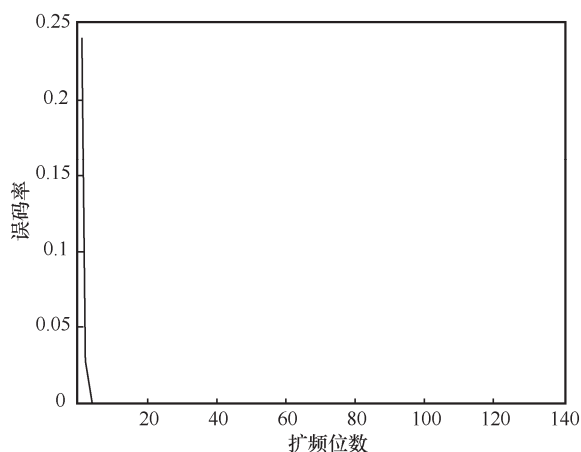


图 11 复合信号采样结果误码率线性曲线

3.3 扩频随机接入自适应方案

在系统中存在窄带干扰时, 本文引入了扩频通信手段。由于采用的 Walsh 码有着良好的正交性, 使得在同一时隙中选择相同前导码的用户, 如果选择了不同的扩频码, 依然可以采用解扩手段完成同前导码用户间的解包操作, 从而提升系统吞吐量。综上所述, 该方案即在随机接入自适应方案的基础上加入了扩频通信手段, 具体方案流程如图 12 所示。

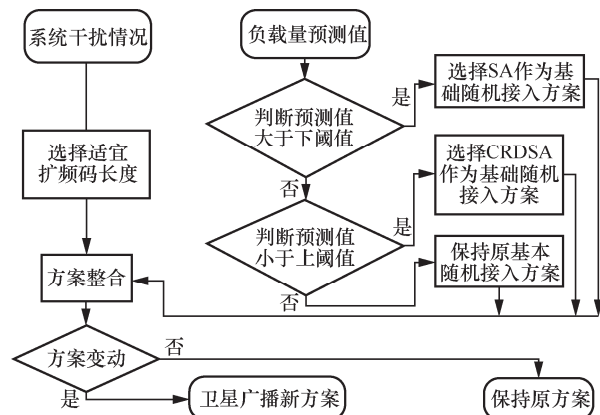


图 12 扩频随机接入自适应方案流程

图 13 为扩频随机接入自适应方法仿真图, 采用的是 32 位 Walsh 码的扩频通信手段, 从图中可以看出, 扩频通信手段的应用, 使得系统的吞吐量得到了提升。图 14 为扩频随机接入自适应方法丢包率仿真图, 从图中可以看出, 扩频通信手段的应用, 降低了系统的丢包率。图 15 是扩频随机接入自适应方法归一化吞吐量仿真图, 由图 13 吞吐量仿真结果对扩频位数进行归一化得到。从图 15 中可以清晰得知, 在低负载时, 由于扩频通信手段的引入, 占用频带展宽, 因此归一化吞吐量相较于单一的 CRDSA 或者 SA 随机接入方法降低了很多; 在高负载时, 归一化吞吐量相较于单一的 CRDSA 或者 SA 随机接入方法却提高了很多。这是因为在高负载区域扩频通信手段降低了数据包之间的碰撞概率, 使得丢包率下降, 进而提升了归一化吞吐量。

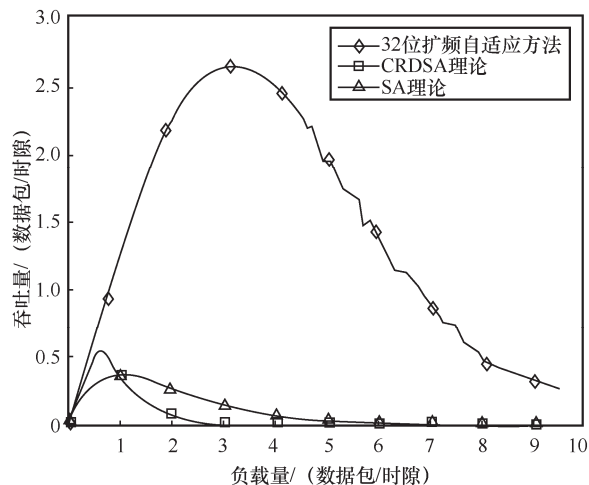


图 13 32 位扩频随机接入自适应方法吞吐量仿真图

表 4 仿真参数

码元长度	信噪比/dB	噪声类型	调制方式	扩频码类型	扩频位数
10 000	8	高斯白噪声	BPSK	Walsh 码	[1,2,4,8,16,32,64,128]

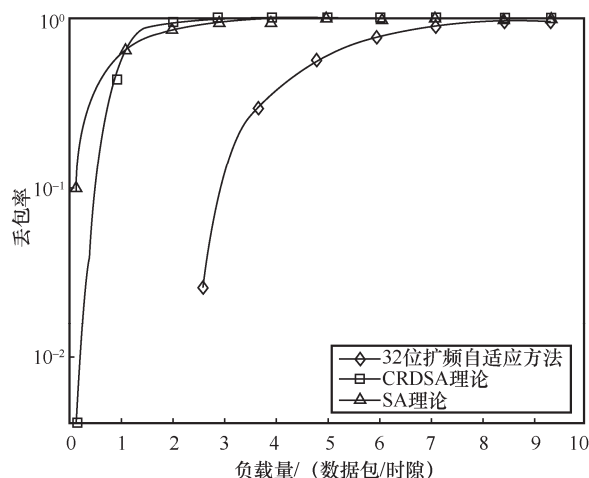


图14 32位扩频随机接入自适应方法丢包率仿真图

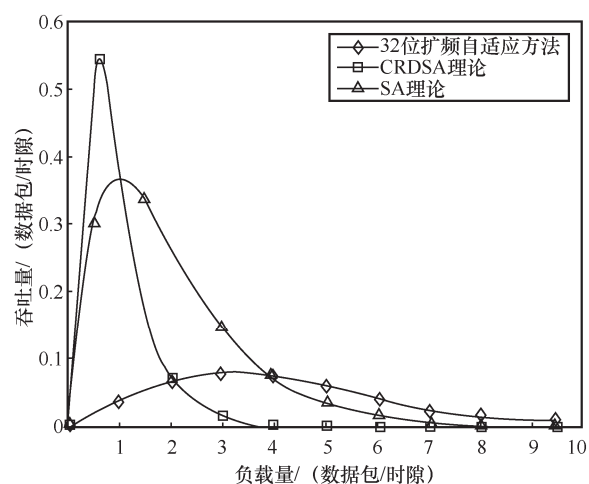


图15 32位扩频随机接入自适应方法归一化吞吐量仿真图

4 结束语

本文在负载量估计及预测中,借助前导码状态与当前时隙负载量之间的关系,利用卫星检测的前导码状态信息完成负载量估计,将一定时隙的负载量估计值作为历史数据送入 LSTM-ARMA 模块,通过机器学习手段实现负载量预测。利用时隙 ALOHA 和基于争用解决的分集时隙 ALOHA 复合形成一种新的随机接入自适应方案,在高负载和低负载时分别继承了时隙 ALOHA 和基于争用解决的分集时隙 ALOHA 的优势,使得系统的吞吐量得到提升。在信道中存在窄带干扰时,引入扩频通信手段,确保通信过程的顺利进行,并且也能够提升系统的吞吐量。除此之外,在自适应方案中还设置了免转换区,在不降低系统吞吐量的前提下提升系统的效率。综上表明,该方案中负载量估计及预测准确度高,随机接入自适应方案的效果能够

得到保证,进而能够提升系统的吞吐量,采用的扩频通信手段使得随机接入自适应方案在信道中存在窄带干扰的情况下,也能保证通信的顺利进行,并提升系统的吞吐量,但归一化吞吐量在低负载时有所降低。

参考文献:

- [1] 沈俊,高卫斌,张更新. 低轨卫星物联网的发展背景、业务特点和技术挑战[J]. 电信科学, 2019, 35(5): 113-119
SHEN J, GAO W B, ZHANG G X. Developing background, service characteristics and challenges of LEO IoT[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(5): 113-119.
- [2] 靳聪,和欣,谢继东,等. 低轨卫星物联网体系架构分析[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(14): 98-104.
JIN C, HE X, XIE J D, et al. Analysis of LEO satellite Internet of things architecture[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(14): 98-104.
- [3] 魏肖,成俊峰,王静贤,等. 基于 5G 技术的低轨卫星物联网技术[J]. 移动通信, 2020, 44(3): 14-21.
WEI X, CHENG J F, WANG J X, et al. Research on low-orbit satellite IoT based on 5G technology[J]. Mobile Communications, 2020, 44(3): 14-21.
- [4] 程一凡,曲至诚,张更新. 低轨卫星星座物联网业务量建模[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(4): 1050-1056.
CHENG Y F, QU Z C, ZHANG G X. Traffic modeling for low earth orbit satellite constellation Internet of Things[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(4): 1050-1056.
- [5] 丁晓进,洪涛,刘锐,等. 低轨卫星物联网体系架构及关键技术研究[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(4): 10-18.
DING X J, HONG T, LIU R, et al. Research on architecture of LEO satellite Internet of things and key technologies[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(4): 10-18.
- [6] 张更新,揭晓,曲至诚. 低轨卫星物联网的发展现状及面临的挑战[J]. 物联网学报, 2017, 1(3): 6-9.
ZHANG G X, JIE X, QU Z C. Development status and challenges of LEO IoT[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2017, 1(3): 6-9.
- [7] QU Z C, ZHANG G X, CAO H T, et al. LEO satellite constellation for Internet of things[J]. IEEE Access, 2017, 5: 18391-18401.
- [8] 邱琳,陈舒怡,孟维晓. 低轨卫星物联网随机码分多址技术[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(5): 549-556.
QIU L, CHEN S Y, MENG W X. Random code channel access

- technology for low-orbit satellite IoT[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(5): 549-556.
- [9] 韦芬芬, 刘晓旭, 谢继东, 等. 低轨卫星物联网多址接入方式研究[J]. 计算机技术与发展, 2019, 29(5): 116-120.
WEI F F, LIU X X, XIE J D, et al. Research on multiple access methods for LEO satellite IoT[J]. Computer Technology and Development, 2019, 29(5): 116-120.
- [10] 高倩, 张更新. 低轨卫星物联网多址接入协议研究[J]. 通信技术, 2018, 51(3): 588-592.
GAO Q, ZHANG G X. Research on multiple access protocol applied to LEO satellite constellation for IoTs[J]. Communications Technology, 2018, 51(3): 588-592.
- [11] 朱骏, 廖晓谈, 张秀梅. 关于低轨卫星物联网多址接入应用研究[J]. 无线互联科技, 2019, 16(3): 14-15.
ZHU J, LIAO X T, ZHANG X M. Research on the application of low-orbit satellite IoT multiple access[J]. Wireless Internet Technology, 2019, 16(3): 14-15.
- [12] 惠明明, 翟盛华, 王伟. 卫星物联网中随机接入技术研究进展与展望[J]. 空间电子技术, 2022, 19(5): 13-28.
HUI M M, ZHAI S H, WANG W. Research progress and prospect of random access technology in satellite Internet of things[J]. Space Electronic Technology, 2022, 19(5): 13-28.
- [13] ABRAMSON N. THE ALOHA SYSTEM: another alternative for computer communications[C]//Proceedings of the November 17-19, 1970, fall joint computer conference. New York: ACM, 1970: 281-285.
- [14] 王申涛, 杨浩, 周熙. 几种随机接入协议的仿真性能比较分析[J]. 计算机与现代化, 2006(10): 101-104.
WANG S T, YANG H, ZHOU X. Comparison and analysis of a few of random access protocols' simulation performance[J]. Computer and Modernization, 2006(10): 101-104.
- [15] ROBERTSL G. ALOHA packet system with and without slots and capture[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1975, 5(2): 28-42.
- [16] CHOUDHURY G, RAPPAPORT S. Diversity ALOHA - a random access scheme for satellite communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 1983, 31(3): 450-457.
- [17] 周朝荣, 李乐民, 张翼德, 等. 采用串行干扰消除的 DS-CDMA 系统中速率分配与译码顺序调整的联合优化[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(6): 1400-1404.
ZHOU Z R, LI L M, ZHANG Y D, et al. Joint optimization of rate allocation and decoding order adjustment in DS-CDMA systems with successive interference cancellation[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(6): 1400-1404.
- [18] CASINI E, DE GAUDENZI R, DELRIO HERRERO O. Contention resolution diversity slotted ALOHA (CRDSA): an enhanced random access scheme for satellite access packet networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(4): 1408-1419.
- [19] 付晓玲, 关馨, 苏雁泳. 卫星物联网接入协议性能分析[J]. 无线电通信技术, 2019, 45(6): 622-626.
FU X L, GUAN X, SU Y Y. Performance analysis of satellite IoT random access protocol[J]. Radio Communications Technology, 2019, 45(6): 622-626.
- [20] 田日才, 迟永钢. 扩频通信[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2014.
TIAN R C, CHI Y G. Spread spectrum communication[M]. Version 2. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.
- [21] 朱振宇, 朱晓荣, 蔡艳, 等. 基于时隙 ALOHA 与自适应接入类禁止混合的大规模终端接入算法[J]. 物联网学报, 2021, 5(1): 90-98.
ZHU Z Y, ZHU X R, CAI Y, et al. Large-scale terminal access algorithm based on slot ALOHA and adaptive access class barring[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2021, 5(1): 90-98.
- [22] 郭习文, 王海涛, 张更新. 卫星物联网负载量估计及预测[J/OL]. 光通信研究, 2023.
MAO X W, WANG H T, ZHANG G X. Load estimation and prediction of satellite internet of things[J/OL]. Optical Communication Research, 2023.
- [23] 梁昌勇, 马银超, 陈荣, 等. 基于 SVR-ARMA 组合模型的日旅游需求预测[J]. 管理工程学报, 2015, 29(1): 122-127.
LIANG C Y, MA Y C, CHEN R, et al. The daily forecasting tourism demand based on SVR-ARMA combination model[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2015, 29(1): 122-127.
- [24] 杨高飞, 徐睿, 秦鸣, 等. 基于 ARMA 和卡尔曼滤波的短时交通预测[J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(2): 36-40.
YANG G F, XU R, QIN M, et al. Short-term traffic volume forecasting based on ARMA and Kalman filter[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2017, 38(2): 36-40.
- [25] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory[J]. Neural Computation, 1997, 9(8): 1735-1780.
- [26] 魏迪, 曾海彬, 洪锋, 等. 基于 LSTM 网络和特征融合的通信干

扰识别[J]. 电讯技术, 2022, 62(4): 450-456.

WEI D, ZENG H B, HONG F, et al. Communication jamming signals recognition based on LSTM network and feature fusion[J].

Telecommunication Engineering, 2022, 62(4): 450-456.

- [27] GONG M G, LIU J, QIN A K, et al. Evolving deep neural networks via cooperative coevolution with backpropagation[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021, 32(1): 420-434.

- [28] 茆习文, 王海涛, 张更新. 一种卫星物联网随机接入自适应方法、装置及存储介质: CN114867128A[P]. 2022-08-05.

MAO X W, WANG H T, ZHANG G X. Satellite Internet of things random access adaptive method and device, and storage medium: CN114867128A[P]. 2022-08-05.

作者简介:



茆习文(1998–), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为卫星物联网。

王海涛(1980–), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院副研究员, 主要研究方向为卫星通信和频谱共享。

张更新(1967–), 男, 博士, 南京邮电大学教授、博士生导师, 卫星通信研究所所长, 主要从事卫星通信、空间信息网络方面的教学和科研工作。