

## 低轨卫星星座物联网业务量建模

程一凡\* 曲至诚 张更新  
(南京邮电大学 南京 210003)

**摘要:** 随着物联网(IoT)规模的不断发展,其业务需求呈现出多样化、全球化的趋势。针对地面物联网无法覆盖全球的缺点,卫星物联网尤其是低轨卫星星座(LEOSC)物联网可以有效地为地面物联网提供覆盖性能上的补充和延伸。由于低轨卫星星座物联网系统广覆盖、高动态的特点,其业务量统计特性需要考虑到环境因素造成的影响,这导致其业务量分布与地面物联网存在显著差异。从合理高效利用星上有限资源角度出发,该文研究基于低轨卫星星座的全球物联网业务模型。结合多样化的业务特点以及卫星通信系统特性,采用统计建模理论,得出了全球物联网业务模型框架。并且初步提出了一种基于最高优先级的接入策略,以供设备节点实时选择接入的卫星。仿真结果表明:泊松过程可以用于近似模拟低轨卫星物联网中大量存在的异步流量的叠加过程;由于低轨卫星具有高动态性,其业务源高速变化,导致了卫星业务忙闲不均,峰均比(PAR)较高。

**关键词:** 物联网;低轨卫星物联网;业务量模型;接入策略

中图分类号: TN927.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)04-1050-07

DOI: 10.11999/JEIT200091

## Traffic Modeling for Low Earth Orbit Satellite Constellation Internet of Things

CHENG Yifan QU Zhicheng ZHANG Gengxin

(Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** With the continuous development of the Internet of Things(IoT), its business demands show a trend of diversification and globalization. As the ground Internet of Things can not cover the whole world, the satellite IoT, especially the Low Earth Orbit Satellite Constellation (LEOSC) IoT, can supplement and extend the ground network. Due to the wide coverage and high dynamic characteristics of the LEOSC IoT system, there are significant differences between it and the ground IoT in terms of traffic statistics. In order to make reasonable and efficient use of limited resources on board, the traffic model of global Internet of Things based on LEOSC is studied in this paper. Combined with diversified traffic characteristics and satellite communication system characteristics, the framework of global IoT traffic model is obtained by using statistical modeling theory. What's more, an access strategy based on the highest priority is proposed to enable the device node to select the satellite in real time. The simulation results show that the Poisson process can be used to simulate approximately the superposition process of asynchronous traffic commonly exist in LEOSC IoT, and due to the high dynamic nature of low earth orbit satellite, its traffic source changes at high speed, resulting in high Peak-to-Average Ratio(PAR) of traffic.

**Key words:** Internet of Things(IoT); Low Earth Orbit (LEO) constellation Internet of Things (IoT); Traffic model; Access strategy

### 1 引言

物联网(Internet of Things, IoT)从1999年提出

至今已经形成了完整的概念。物联网是指按照标准的通信协议和一致的网络架构,通过信息传感设备和多种网络接入技术,把世界上所有的物品与各类网络连接起来,进行信息通信、数据交换、互操作和管理,从而实现对物品的智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种能互联互通互操作的基础网络<sup>[1]</sup>。到2020年,物联网设备将占340亿部设备中的240亿部<sup>[2]</sup>。随着当下各种无线网络的大面积覆

收稿日期: 2020-02-11; 改回日期: 2020-09-14; 网络出版: 2020-09-23

\*通信作者: 程一凡 1218012231@njupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(91738201)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(91738201)

盖, 物联网应用逐渐渗透到人类活动的各个领域, 传感器设备可以通过网线、手机网络、远程无线网络等方式实现全天候、全方位的连接。但是, 由于空间环境和地理因素的限制, 地面物联网并不能有效地解决所有问题。在人类无法到达的偏远地区, 布设基站以及建立通信网络非常困难<sup>[3]</sup>。在众多候选者中, 低轨卫星通信系统因其较低传输损耗和时延的特点<sup>[1]</sup>, 且可以通过星座方式对地球实现无缝覆盖的优势, 成为辅助地面网络实现万物互联的可靠选择之一。

虽然卫星物联网作为地面物联网的补充, 可以实现对地面物联网难以覆盖的区域进行覆盖, 但是由于卫星通信和地面蜂窝通信自身的特点, 其业务需求存在着一定的差异, 主要有以下3点: (1) 由于地面物联网中有大量与人为行为息息相关的业务比如智能家居、智慧交通等等, 因此地面蜂窝物联网的业务需求受人类活动的影响较大, 而卫星物联网作为地面网络的补充, 大多业务分布在无人区, 因此其业务需求受人类活动的影响较小, 但与地理信息密切相关; (2) 由于低轨卫星物联网覆盖区域非常大, 因此对于单颗低轨卫星而言, 其服务的物联网节点数量远超过蜂窝物联网的地面基站。虽然卫星物联网业务分布稀疏, 但汇聚密度大, 即单颗卫星承载量多, 而蜂窝物联网业务可根据业务大小, 合理地规划蜂窝设计, 虽然业务分布密度大, 但是汇聚密度小, 即单个基站承载量少; (3) 由于卫星通信的通信距离和路径损耗远超过地面蜂窝通信, 因此相较于地面蜂窝物联网, 卫星物联网不适用于时敏的控制业务, 其业务需求普遍对时延的要求不高。

通过上述分析可以看出, 物联网终端的部署密度和业务特征与其所处的地理环境强相关。相比于地面物联网基站较为单一的部署环境, 由于单颗卫星的覆盖范围可以达到数万平方公里量级<sup>[4]</sup>, 其覆盖区域将跨越多种地理环境。同时, 由于低轨卫星相对地面高速运动, 其服务范围内的终端特征将快速时变。因此, 全球范围内的卫星物联网业务量分布存在较明显的空时不均匀性<sup>[5]</sup>。综上所述, 研究与地理位置信息相关的物联网模型<sup>[6]</sup>是解决卫星物联网海量节点随机接入业务碰撞的重要基础。由于卫星的高动态、广覆盖特性导致卫星物联网的潜在业务种类、全球部署下的卫星物联网业务特征预计会与地面物联网系统产生较大差异。因此, 针对低轨卫星物联网业务与地面物联网业务之间的差异性, 本文考虑到环境因素对于业务种类及特征的影响, 采用网格分析法统计地理环境, 并基于合理的假设确定了物联网终端的部署情况, 其次分析了低

轨卫星物联网中大量存在的异步流量的叠加特性, 并且通过一系列性能指标的比较, 证明了泊松过程与异步流量叠加过程的近似性。同时, 初步设计了一种基于最高优先级的接入策略。通过此方法得到的业务量曲线可以有效地描述卫星物联网中大量存在的由异步流量集总而成的平稳流量的业务态势, 对高效可靠的资源分配方式的设计有着一定的参考价值。

## 2 低轨卫星物联网业务特征

物联网的业务模式可以粗略地划分为周期性和事件触发的业务模式<sup>[7]</sup>。传统的地面物联网业务以事件驱动的业务模式为主, 例如智能家居。但是在低轨卫星物联网中, 为了简化建模方法, 事件触发的业务模式存在不可预测性, 因此在本文中不予考虑。在文献<sup>[8]</sup>中, 根据业务特点的不同, 把低轨卫星物联网的业务类型分为3类: (1) 数据采集: 参数采集类, 低速、非时敏; 图像/视频采集类, 高速、时敏/非时敏; (2) 数据广播: 低速/高速、时敏/非时敏; (3) 指挥控制/交互: 低速、时敏。传统意义上对某一类物联网业务特征进行分析时需考虑的与通信相关的基本要素主要有6个: 附着特性、触发特性、流量特性、移动性、可靠性和实时性、忙时特性<sup>[9]</sup>。这里选取了布设在海洋浮标、森林草原、边境海岛等地理区域下的传感器监测到的采集类数据为例介绍其业务特征。由于此类数据内容的参数信息固定, 数据量通常在比特级, 因此对传输带宽和速率的需求不高, 且终端容易做到小型化。典型的参数采集类物联网业务的主要模型参数<sup>[8]</sup>如表1所示。

由于低轨卫星存在高动态、广覆盖特性<sup>[8]</sup>, 在绕地球飞行时, 低轨卫星覆盖区域所处地形呈现多样趋势。本文中仅大致统计11种典型的地理环境, 统计结果如表2所示, 基于合理的分析和假设给出了卫星物联网的潜在业务种类、业务强度以及设备部署密度。国际电信联盟给出了一些地面物联网业务的数据采集周期<sup>[10]</sup>, 如智能家居、物流跟踪、车

表1 典型参数采集类物联网业务的主要模型参数

参数指标	参数值			
	激活频率或事件触发	静止参数特性	位置或移动特性	视频应用特性
单次数据量(Byte)	10~50	10~50	流	
平均带宽需求(bit/s)	600	600	128	
移动速度(km/h)	无	0~20	无	
位置精度	无	m级	无	
QoS	中	高	高	
通信连续性	否	否	是	
忙时段(h)	0~24	0~24	0~24	

辆跟踪及交通控制分别是0.5次/h、2次/h、6次/h及10次/h<sup>[11]</sup>。表2中所示的设备部署密度由业务种类以及所处的地理环境共同决定。在环境稳定性较强的地理环境中，例如海洋中的水文监测业务<sup>[12]</sup>，并不需要部署大量的传感器节点。在环境稳定性较差的地理环境中，例如裂谷中的地裂运动监测业务，需要部署大量的传感器节点来收集数据。

### 3 全球业务到达模型

本文研究重点主要聚焦于地域差异化分布的海量非同步物联网节点，产生周期性业务流量，叠加形成集总业务流量。为了精确地捕获这种集总业务流量特性和预测业务态势，必须要采用一种数学模型来尽可能地描述与模拟全球业务流量的批量到达情况。虽然低轨卫星物联网与地面物联网的业务种类及特性具有显著差异，但是二者中业务批量到达形成集总业务流量的过程是类似的，因此分析卫星物联网的业务到达模型时，可以借鉴文献<sup>[12]</sup>中对地面物联网集总业务量模型的分析思路。

#### 3.1 业务量叠加

由Palm-Kinchinte定理可知，大量业务流量的叠加可以由一个泊松过程近似表示。Palm-Kinchinte定理的具体内容如下：

考虑 $n$ 个到达强度为 $\lambda_i$ 、到达时间间隔 $X_i$ 的独立同分布且相互独立的更新过程，每个过程的期望

到达时间间隔是 $E[X_i] = 1/\lambda_i$ ，只要满足以下的假设：(1)叠加过程的业务强度 $\lambda$ 是一个有限值，即 $\sum_{j=1}^n \lambda_j = \lambda < \infty, n \rightarrow \infty$ ；(2)没有一个过程在叠加过程中占据主导地位，即对于任意的 $i$ ， $\lambda_i$ 不会远大于 $\lambda/n$ ，则叠加后的过程可以近似为一个 $T_i$ 泊松过程。对于一个泊松过程，其到达时间 $X$ 服从一个强度为 $\lambda$ ，概率分布函数为 $F_X(t)$ ，概率密度函数为 $f_X(t)$ 的指数型分布

$$X \sim \text{Exp}(\lambda) : F_X(t) = 1 - e^{-\lambda t}, f_X(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (1)$$

对于低轨卫星物联网系统，由泊松过程定义及前文分析可知，到达时间间隔反映了物联网节点的采样周期，所以类似于文献<sup>[12]</sup>中对集总业务流量特性的分析，低轨卫星物联网集总业务流量的特性可以通过到达时间间隔来体现和描述。

#### 3.2 异步同周期业务流量

如前文所述，在本文中重点研究物联网节点周期性的发送消息，这里定义周期性流量满足如式(2)的形式

$$\tau_{i,k} = t_i + kT_i, k \in N \quad (2)$$

其中， $\tau_{i,k}$ 表示第 $k$ 次消息的到达时间， $t_i$ 表示第1次消息的到达时间， $1/T_i$ 表示周期性业务的到达强度。节点第1次发送消息的时间为 $t_i = \tau_{i,0}$ 。异步同周期业务流量满足如下的定义：在低轨卫星物联网系统中，部署了 $n$ 个消息采样周期为 $T$ 的物联网节点，它们的工作模式是异步的，即他们的到达时间服从一个均匀分布 $t_i \sim U(0, T)$ 。它们叠加后的实际业务到达情况如图1所示。

#### 3.3 性能标准

由文献<sup>[13]</sup>可知，一个业务到达过程的特性可以由到达时间、到达时间间隔及到达次数等性能标准清晰地表述。因此，考量泊松过程是否能够近似地模拟异步同周期业务流量的批量到达，关键在于分析两种过程的性能标准之间的误差大小以及在何种条件下能够减小误差。在本部分中，按照如上的分析，介绍了几种度量指标及其理想结果，用以量化两种过程之间的误差。

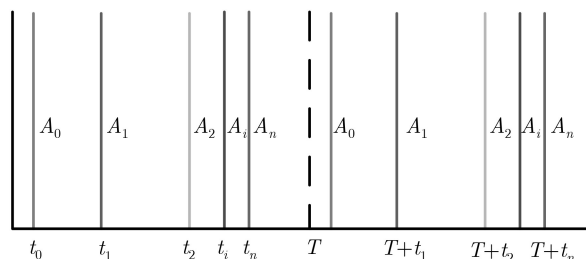


图1 异步同周期业务量的叠加过程

表2 低轨卫星星座物联网的潜在应用及其特性

地理环境	潜在业务种类	业务强度	设备部署密度
海	水文监测	低	非常低
	周边水文监测	较低	较低
岛	岛上环境监测	较低	较低
	山体滑坡灾害监测	较高	中等
高原	地下水监测	中	高
	地震灾害医疗物资运转	中	高
平原	战场感应	低	非常低
	高效运转的物资体系	低	非常低
盆地	应急指挥	中	中等
沙漠	植被监测系统	低	较低
	沙漠环境监测	较低	较低
冰盖	边缘区域浮冰自动提取	低	低
	关键区域航空探测	低	低
丘陵	土壤墒情监测	较低	较低
	水资源监测	较低	较低
草原	畜禽的生产及管理过程	较高	高
	输电管理系统	中	高
裂谷	地裂运动监测	高	低

首先定义同类异步周期性业务流量叠加后的泊松近似过程：到达率为 $\lambda^* = n/T$ ，到达时间间隔服从强度为 $\lambda^*$ 的指数分布，即 $A^* \sim \text{Exp}(\lambda^*)$ ，其中 $n$ 表示异步同周期节点的个数， $T$ 表示采样时间。接下来介绍度量指标及其期望值：

(1) 到达时间间隔的相对误差。由泊松近似过程的定义可知，泊松近似过程的到达时间间隔 $E[A^*] = 1/\lambda^* = T/n$ 。而对于异步同周期业务流量的集总过程来说，所有预期到达时间间隔 $A_i, i \in 1, 2, \dots, n$ 的平均值 $E[A_i]$ 必须等于泊松的预期到达时间间隔，才能保证两种过程的到达率相同。文献[14]中证明了异步周期性业务流量叠加后的平均到达时间间隔服从一个beta分布，因此

$$\left. \begin{aligned} E[A_i] &= \frac{T}{n+1}, i \in 1, 2, \dots, n-1 \\ E[A_n] &= E[A_0] + E[T_n] = 2\frac{T}{n+1} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

设 $X$ 为一个均匀分布在 $(0, T)$ 内的随机变量，在 $(0, T)$ 内两个随机点 $X_1$ 和 $X_2$ 的距离为 $Y = |X_1 - X_2|$ ，也是一个随机变量。由于 $X_1$ 和 $X_2$ 是相互独立的，所以它们的联合概率密度函数为

$$\begin{aligned} P(X_1 = x_1, X_2 = x_2) \\ = P(X_1 = x_1)P(X_2 = x_2) = \frac{1}{T^2} \end{aligned} \quad (4)$$

因此，两个异步周期性业务流量的叠加过程的平均时间间隔可以表示为

$$E[Y] = \int_0^T \int_0^T |x_1 - x_2| \frac{1}{T^2} dx_1 dx_2 = \frac{T}{3} \quad (5)$$

同样地，可以进一步推导出当 $n > 2$ 时，异步周期性业务流量的叠加过程的平均时间间隔 $E[A_i]$ 趋向于 $T/(n+1)$ ，详细证明过程见文献[14]。因此，当 $n \rightarrow \infty$ 时，两种过程的平均到达时间间隔的相对误差为0。

(2) 平均期望到达时间间隔的相对误差。泊松近似过程的平均期望到达时间间隔为 $E[A_i] = T/n$ [15]。结合式(3)，对于异步周期性业务流量的叠加过程，其平均期望到达时间间隔表示为式(6)

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E[A_i] = \frac{1}{n} \left( \frac{(n-1)T}{n+1} + \frac{2T}{n+1} \right) = \frac{T}{n} \quad (6)$$

因此两个过程的平均期望到达时间间隔的相对误差为[15]

$$r_A = \left| 1 - \frac{\bar{A}}{E[A^*]} \right| = 0 \quad (7)$$

(3) 到达时间的偏移。泊松过程的到达时间服从泊松分布，而集总异步同周期业务流量的到达时

间如图1所示，由于两种过程的到达模型存在差异，会在每个到达时间处产生一个偏移量 $\delta_i$ ，如图2所示。两种过程的第 $i$ 次到达时间的偏移量可以表示为

$$\delta_i = t_i^* - t_i = i \cdot \left( \frac{T}{n} - \frac{T}{n+1} \right) \quad (8)$$

在 $(0, T)$ 内，预期的到达时间偏移量为

$$E[S] = \sum_{i=1}^n \delta_i = \frac{T}{2} \quad (9)$$

因此对于 $n$ 个节点，其到达时间偏移量为 $E[S]/n = T/2n$ 。可以看出，当节点数足够大时，到达时间偏移量是很小的，几乎可以忽略不计。

根据以上性能标准的分析结果，并结合低轨卫星物联网百万量级的物联网节点部署情况，可以得出如下结论：在低轨卫星物联网中，存在的大量同类异步周期性业务流量的叠加可以用一个泊松过程(到达率为 $n/T$ )来近似表示，具体流程如图3所示，首先可以将这些采样周期相同的异步节点看成一个群组，这样每个地理栅格中的节点被划分成了许多群组；其次，一个群组的业务批量到达可以由一个泊松过程来近似模拟，这样多个群组内部的集总业务到达被近似为多个泊松过程；最后根据泊松过程的可加性，将多个泊松过程叠加为一个泊松过程。

### 4 接入策略

接入策略指的是物联网设备节点选择卫星的规则。相比于地面物联网中的基站，因为低轨卫星本身的高动态性，导致了不同时刻地面设备节点看到的卫星是不一样的，因此必须在这种高动态的场景下，为设备节点的接入设置统一的接入策略，让节点自身能够通过接入策略判断此时刻接入的卫星。

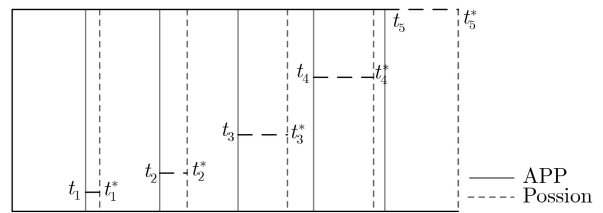


图2 两种业务到达模型对比

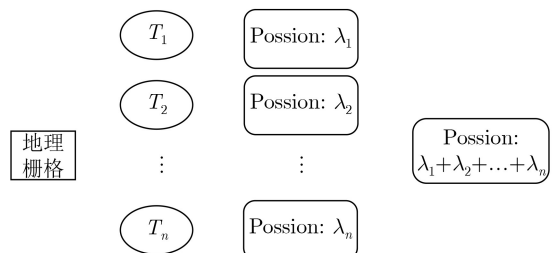


图3 地理栅格的业务到达模型

由于星地之间的距离远超地面物联网节点和基站之间的距离,综合考虑物理层数据传输性能以及地面物联网节点功耗,初步提出了一种基于最高优先级的接入策略即处在同一个地理栅格中的所有物联网设备节点实时选择优先级最高的卫星接入。

以某一个时刻为例,某一颗卫星 $j$ 相对于地理网格的优先级按照如下的步骤进行计算:

步骤1 取出卫星星下点所处的经纬度坐标 $(Lon_j, Lat_j)$ ,确定其处于地理网格的网格索引为 $(x_j, y_j)$

$$\left. \begin{aligned} x_j &= \left\lceil \frac{|Lat_j - Lat_0|}{\Delta Lat} \right\rceil \\ y_j &= \left\lceil \frac{|Lon_j - Lon_0|}{\Delta Lon} \right\rceil \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中,  $\Delta Lat$ 和 $\Delta Lon$ 分别为网格划分的精度,  $Lat_0$ 和 $Lon_0$ 分别为目标区域的左上方经度和纬度。

步骤2 将卫星星下点所处的网格 $(x_j, y_j)$ 的优先级设置为1,为其周围网格设置相应的优先级,距离此网格越近,表示与卫星的距离越小,则优先级越高,网格索引为 $(x, y)$ 的网格的优先级为

$$P_j(x, y) = \max(|x_j - x|, |y_j - y|) + 1 \quad (11)$$

步骤3 网格取出相对于自身优先级最高的卫星编号进行接入,即某一时刻下,对于索引为 $(x, y)$ 的网格,其对应的最高优先级卫星编号 $k$

$$k = \left\{ \min_{k \in \{1, 2, \dots, n\}} P_k(x, y) \mid P_k(x, y) \neq 0 \right\} \quad (12)$$

其中 $\{1, 2, \dots, n\}$ 表示覆盖目标区域的卫星集合。

## 5 数值仿真及分析

本文中对低轨卫星物联网系统进行业务量建模步骤如图4所示。

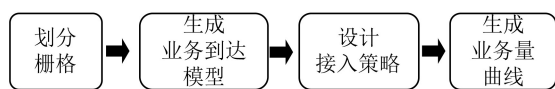


图4 业务量建模流程图

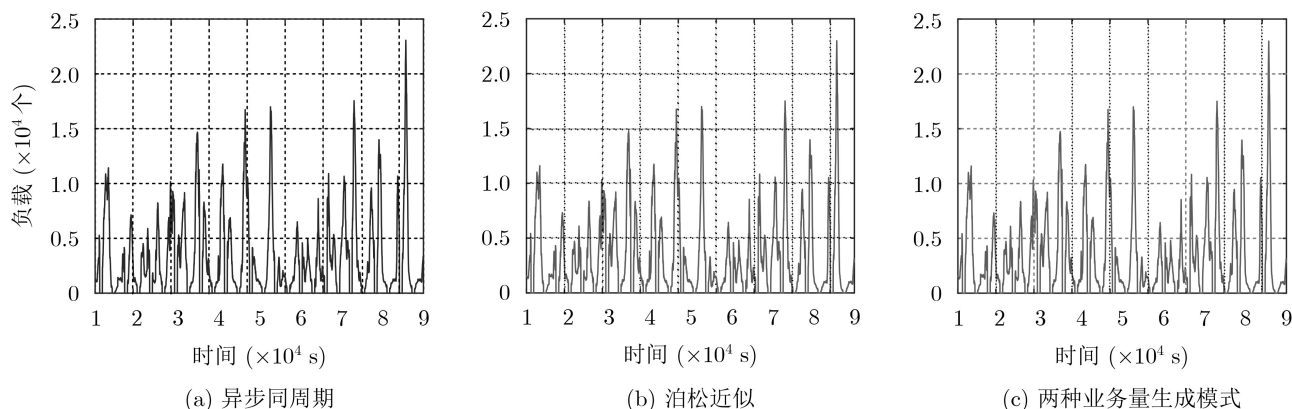


图5 7号卫星业务量曲线

### 5.1 仿真参数

本文中低轨卫星物联网系统业务建模的具体仿真参数列于表3中,文中仿真验证是基于STK和MATLAB环境下进行的。

### 5.2 仿真结果及分析

图5(a)和图5(b)分别表示采用异步同周期和泊松近似的7号卫星业务量(APP表示异步同周期过程)。可以看出,有些时间内星上业务负载为0,这是因为该卫星正在经过两极地区,而两极地区并不包括在划分的地表区域中。并且随着时间的变化,业务量变化是非常明显的,这是由于以下两点原因:(1)低轨卫星的高动态性导致地面业务源的高速变化。(2)低轨卫星物联网业务在全球的分布不均,存在地域化差异。图5(c)将两种业务量生成模式的7号卫星业务量曲线进行了比较。可以直观地看出,两种业务量生成模式的大致业务流量变化态势基本一致,接下来表4给出单星(图5(c))业务量的统计量。

这些统计数据可以用来比较两种业务量生成模式的近似程度。对于两种业务量生成模式下的单星及单轨道面业务量,最大值与最小值都有小幅度的

表3 仿真参数

仿真参数	取值
卫星星座	walker星座
卫星总数	56
卫星轨道面数	9
轨道高度	1000 km
轨道倾角	90°
采样时间间隔	30 s
采样时间长度	24 h
地球平均半径	6371 km
地球表面区域	经度-180°~180°, 纬度-70°~70°
栅格划分精度	经度2°, 纬度2.5°

表4 单星业务量的统计量(负载数量(个))

	最大值	最小值	平均值	标准方差
异步同周期业务量的叠加	230600	0	31750	37600
泊松近似	229800	0	31760	37660

出入。平均值和标准方差可以比较准确地来描述业务模型, 平均值体现了业务到达情况, 而标准方差则体现了业务到达情况随时间变化的剧烈程度。显然, 由表4可以看出, 两种业务量生成模式下业务量的平均值和标准方差的误差非常小, 数量级仅仅为 $10^{-4}$ 甚至更小。因此分析初步仿真结果可得, 利用泊松过程模拟的业务量生成模式是有效的, 可以用来描述大量异步同周期业务流量的批量到达过程。

## 6 结束语

本文对低轨卫星物联网的集总业务模型进行了初步研究, 采用了网格分析法对目标区域进行网格划分并统计地理环境, 并基于合理的假设确定了物联网终端的部署情况, 其次分析了低轨卫星物联网中大量存在的异步流量的叠加特性, 并且从统计理论和仿真验证两个方面证明了采用泊松过程模拟异步流量叠加过程的可行性。同时, 考虑节点功耗问题, 初步提出了一种基于最高优先级的接入策略, 以供设备节点可以实时地选择卫星接入。通过本文的业务模型和最短距离接入策略得到的仿真结果可以看出, 卫星业务的峰均比很高, 说明不同卫星由于覆盖地区地理环境的差异导致卫星的忙闲不均, 未来低轨卫星星座的建设方向是密集组网的方向, 因此优化接入选星策略来降低业务的峰均比是未来需要研究的方向。

## 参考文献

- [1] 席博, 洪涛, 张更新. 卫星物联网场景下基于节点选择的协作波束成形技术研究[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(12): 2882–2890. doi: [10.11999/JEIT190707](https://doi.org/10.11999/JEIT190707).  
XI Bo, HONG Tao, and ZHANG Gengxin. Research on the collaborative beamforming technique based on the node selection for satellite internet of things[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(12): 2882–2890. doi: [10.11999/JEIT190707](https://doi.org/10.11999/JEIT190707).
- [2] 钱志鸿, 王义君. 面向物联网的无线传感器网络综述[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(1): 215–227. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.00876](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.00876).  
QIAN Zhihong and WANG Yijun. Internet of things-oriented wireless sensor networks review[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(1): 215–227. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.00876](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.00876).
- [3] 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 Gengxin, JIE Xiao, and QU Zhicheng. Development status and challenges of LEO IoT[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2017, 1(3): 6–9.
- [4] SANCTIS M D, CIANCA E, ARANITI G, et al. Satellite communications supporting internet of remote things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, 3(1): 113–123. doi: [10.1109/JIOT.2015.2487046](https://doi.org/10.1109/JIOT.2015.2487046).
- [5] QU Zhicheng, ZHANG Gengxin, HONG Tao, et al. Architecture and network model of time-space uninterrupted space information network[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 27677–27688. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2902134](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2902134).
- [6] 芮兰兰, 孟洛明, 邱雪松. 终端业务上下文的定义方法及业务模型[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(3): 660–665. doi: [10.3724/SP.J.1146.2009.00181](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2009.00181).  
RUI Lanlan, MENG Luoming, and QIU Xuesong. Terminal service context definition method and service model[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(3): 660–665. doi: [10.3724/SP.J.1146.2009.00181](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2009.00181).
- [7] METZGER F, HOFELD T, BAUER A, et al. Modeling of aggregated IoT traffic and its application to an IoT cloud[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2019, 107(4): 679–694. doi: [10.1109/JPROC.2019.2901578](https://doi.org/10.1109/JPROC.2019.2901578).
- [8] 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): 2019089.  
SHEN Jun, GAO Weibin, and ZHANG Gengxin. Developing background, service characteristics and challenges of LEO IoT[J]. *Telecommunications Science*, 2019, 35(5): 2019089.
- [9] 王海陶, 宋小明, 卢纪宇. 物联网业务特征及业务模型研究[J]. 广西通信技术, 2012(3): 43–49. doi: [10.3969/j.issn.1008-3545.2012.03.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-3545.2012.03.011).  
WANG Haitao, SONG Xiaoming, and LU Jiyu. The research on characteristics and service model of internet of things[J]. *Guangxi Communication Technology*, 2012(3): 43–49. doi: [10.3969/j.issn.1008-3545.2012.03.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-3545.2012.03.011).
- [10] MARTINEZ B, MONTÓN M, VILAJOSANA I, et al. The power of models: Modeling power consumption for IoT devices[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(10): 5777–5789. doi: [10.1109/JSEN.2015.2445094](https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2445094).
- [11] BACCO M, BOERO L, CASSARA P, et al. IoT applications and services in space information networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(2): 31–37. doi: [10.1109/MWC.2019.1800297](https://doi.org/10.1109/MWC.2019.1800297).
- [12] 张颖, 高灵君. 基于格拉布斯准则和改进粒子滤波算法的水下传感网目标跟踪[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(10): 2294–2301. doi: [10.11999/JEIT190079](https://doi.org/10.11999/JEIT190079).  
ZHANG Ying and GAO Lingjun. Target tracking with underwater sensor networks based on Grubbs criterion and

- improved particle filter algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(10): 2294–2301. doi: [10.11999/JEIT190079](https://doi.org/10.11999/JEIT190079).
- [13] 付娜. 广义泊松过程及其叠加过程研究[D]. [硕士学位论文], 重庆师范大学, 2012.
- FU Na. Study of generalized Poisson process and its sum[D]. [Master dissertation], Chongqing Normal University, 2012.
- [14] KEMP F. An introduction to geometrical probability: Distributional aspects with applications by A. M. Mathai[J]. *Journal of the Royal Statistical Society Series D (The Statistician)*, 2001, 50(2): 225–226.
- [15] 王艳红, 李蕊, 张文娟. 任务到达时间服从泊松分布的随机排序[J]. *西安工业大学学报*, 2016, 36(1): 5–7. doi: [10.16185/j.jxatu.edu.cn.2016.01.002](https://doi.org/10.16185/j.jxatu.edu.cn.2016.01.002).
- WANG Yanhong, LI Rui, and ZHANG Wenjuan. Stochastic scheduling problems of releases times obeying Poisson distribution[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2016, 36(1): 5–7. doi: [10.16185/j.jxatu.edu.cn.2016.01.002](https://doi.org/10.16185/j.jxatu.edu.cn.2016.01.002).
- 程一凡: 男, 1996年生, 博士生, 研究方向为卫星物联网方向.
- 曲至诚: 男, 1992年生, 博士, 研究方向为卫星物联网及卫星通信等.
- 张更新: 男, 1967年生, 教授、博士生导师, 研究方向为卫星通信、深空通信、空间信息网络等.
- 责任编辑: 余 蓉