

# 一种基于NB-IoT节点的多蜂窝网络最优选择方法

## An Optimal Selection Method of Multi-Cellular Networks Based on NB-IoT Nodes

潘甦/PAN Su

陶帅/TAO Shuai

陈宇青/CHEN Yuqing

(南京邮电大学, 江苏 南京 210003)  
(Nanjing University of Posts and  
Telecommunications, Nanjing 210003,  
China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 01-0025-004

**摘要:** 提出了窄带物联网(NB-IoT)中一种基于全局收益最大的网络选择方法,将各个切换时刻的瞬时收益的和转化为状态空间上瞬时收益的和。因此,在各个切换时刻,节点只需收集当前的网络状态信息就可计算出切换的目标网络,达到全局最优。仿真结果表明,使用本方法在业务持续时间内的全局收益要大于使用传统方法的最大瞬时收益的和。从而保证了物联网节点业务的服务质量(QoS),提高了网络利用率。

**关键词:** 物联网;全局收益;状态空间;切换

**Abstract:** In this paper, we propose a network selection method based on the maximum global revenue for the narrowband Internet of things (NB-IoT). The sum of instantaneous revenue in each handoff decision can be transformed into the sum of instantaneous revenue over state spaces, so that in each handoff decision, only the current network status information should be collected by nodes to calculate the target network which can achieve global optimum optimization. The numerical results show that the global revenue obtained by our proposed method is greater than the sum of the maximum instantaneous revenue using the traditional method. Therefore, the proposed method guarantees the quality of service (QoS) of the IoT and improves the network utilization.

**Key words:** IoT; global revenue; state space; handoff

随着需求的提升和技术标准的成熟,物联网行业进入爆发期。据预测,到2020年,全球物联网设备将接近280亿个,物联网市场将实现超过1.7万亿美元的营收<sup>[1]</sup>。物联网的通信技术有很多种,从传输距离上区分,可以分为两类:一类是短距离通信技术,代表技术有ZigBee、Wi-Fi、Bluetooth、Z-wave<sup>[2]</sup>等,典型的应用场景如智能家居;另一类是广域网通信技术,业界一般定义为低功耗广域网(LPWAN)<sup>[3]</sup>,典型的应用场景如交通、物流、健康医疗、零售、抄表、智慧农业和工业制造等领域。窄带物联网(NB-IoT)<sup>[4]</sup>即是2015年9月在第3代合作伙伴计划(3GPP)标准组织中立项提出的一种新的窄带蜂窝通信LPWAN技术。

NB-IoT构建于蜂窝网络,只消耗大约180 kHz的带宽,可直接部署于全球移动通信系统(GSM)网络、宽带码分多址(WCDMA)网络和长期演进

(LTE)网络中<sup>[5]</sup>,以降低部署成本,实现平滑升级。支持待机时间长,对网络连接要求较高设备的高效连接。NB-IoT具有广覆盖、多连接、低速率、低成本、低功耗、优架构等特点,是一种可在全球范围内广泛应用的新兴技术。

目前,NB-IoT的研究集中在优化部署模式,增强覆盖,减少网络时延和降低功耗等方面。如在文献[6]中,作者着重描述了NB-IoT网络节点的上下行信道划分以及频率资源分配。在文献[7]中,作者分析了NB-IoT不同模式下的节点通信性能、覆

盖范围以及功耗。文献[6-7]都是把NB-IoT部署在LTE网络中进行讨论的,然而实际上NB-IoT往往是部署于GSM网络、WCDMA网络和LTE网络组成的异构网络中。不同制式的网络有着不同的网络容量、带宽和开销,NB-IoT节点传输不同速率的数据时切换到最适合的网络能有效减少系统开销,提高网络效率,这就产生了网络选择的决策问题。节点的业务类型、网络的状况以及系统表现都是影响决策的因素,而进行决策带来的益处是网络负载的均衡和系统开销的降低。这些收益随时间改变因

收稿时间: 2016-11-17

网络出版时间: 2016-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(61271235)

而是瞬时收益,业务持续时间内各决策时刻瞬时收益的和称为全局收益。全局收益最大则网络选择的决策最优。文献[8-10]中分别使用了博弈论、决策树和层次分析的方法解决异构网络中的网络选择决策问题,但这些方法都着眼于决策时刻的瞬时收益而非全局收益,会出现各个决策时刻瞬时收益最大但是全局收益并非最大的情况。对于这类情况,文章中我们提出了一种基于全局收益最大的网络选择方法,将各个切换时刻的瞬时收益的和转化为状态空间上瞬时收益的和,使得NB-IoT中的物联网节点业务通信全局收益最大,从而保证了节点的业务质量,提高了网络效率。

## 1 基于全局收益最大的网络选择方法

NB-IoT基站侧可以直接使用现网的LTE站点和设备,带内部署模式可以利用LTE载波中任意频段的资源块传输数据,无需使用单独的频带。文章中,我们提出的全局收益最大的网络选择方法正是基于NB-IoT节点可以通过2G/3G/4G网络的频带来传送业务信息这一特点,实现节点根据不同速率业务来切换不同的传输网络,从而达到降低系统开销的目的。接下来我们对基于全局收益最大的网络选择方法进行讨论分析。

### 1.1 瞬时收益和全局收益

我们讨论的是由GSM网络、WCDMA网络、LTE网络构成的异构网络中,物联网节点两类基本的通信业务:极低速率业务(如上传天气测量数据等)和中等速率业务(如软件更新等)的收益情况。使用网络提供速率和网络的剩余带宽作为瞬时收益,可以较好地反映节点业务质量和网络负载均衡。显然,瞬时收益依赖于当前状态。

给定当前状态为 $s_i$ ,它可以反映出网络的实时信息, $i=1,2$ 分别表示

极低速率业务和中等速率业务。若切换的目标网络为 $a$ ,则瞬时收益函数可以定义为:

$$r(s_i, a) = \begin{cases} R_a^i / \left( \frac{W_a - B^{(s_i, a)}}{W_a} \right) & \text{if } B^{(s_i, a)} \geq \partial_a^i \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $R_a^i$ 表示 $i$ 类业务切换的目标网络 $a$ 的速率收益; $W_a$ 表示目标网络的系统带宽; $B^{(s_i, a)}$ 表示当前状态 $s_i$ 下目标网络 $a$ 的剩余带宽; $\partial_a^i$ 表示目标网络中 $i$ 类业务所占的带宽<sup>[11]</sup>, $a=1,2,3$ 分别表示GSM网络、WCDMA网络、LTE网络。

速率收益 $R_a^i$ 的计算公式如式(2):

$$R_a^i = \begin{cases} 1 & i=1 \\ \ln(c_a + 1) & 0 \leq c_a < C_i, i=2 \\ \ln(C_i + 1) & c_a \geq C_i, i=2 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $c_a$ 是目标网络 $a$ 所提供的速率; $C_i$ 是 $i$ 类业务所要求的速率。

剩余带宽 $B^{(s_i, a)}$ 就等于网络的系统带宽 $W_a$ 减去节点网络中已经存在的业务所占用的带宽,因此剩余带宽的计算公式如式(3):

$$B^{(s_i, a)} = W_a - \sum_i N_a^i \cdot \partial_a^i \quad (3)$$

$N_a^i$ 表示目标网络 $a$ 中存在的 $i$ 类业务的数目。

式(1)所定义的瞬时收益函数,综合了目标网络提供速率的收益以及剩余带宽的收益。当网络提供速率低于业务要求速率时,瞬时收益随网络提供速率以指数形式增长,当网络提供速率高于业务要求速率时,瞬时收益不变。而剩余带宽越高,瞬时收益越高。

若 $i$ 类业务的初始状态为 $s_i^0$ ,各决策时刻的状态为 $s_i^t$ ,各决策时刻所选择的目标网络为 $a_i^t$ ,呼叫持续时间为 $T_i$ ,切换算法为 $\pi$ 时,则呼叫的全局收益函数<sup>[12]</sup>为:

$$v^\pi(s_i^0) = E_{T_i} \left\{ \sum_{t=1}^{T_i} r(s_i^t, a_i^t) \right\} \quad (4)$$

其中, $\pi$ 表示一种节点业务持续时间内的网络选择方法,也就是在各个决策时刻根据当前状态指导物联网节点进行切换的方法; $E_{T_i}$ 表示求关于节点业务持续时间期望。式(4)中的 $r(s_i^t, a_i^t)$ 用式(1)中定义的瞬时收益函数来计算。

### 1.2 决策模型的建立

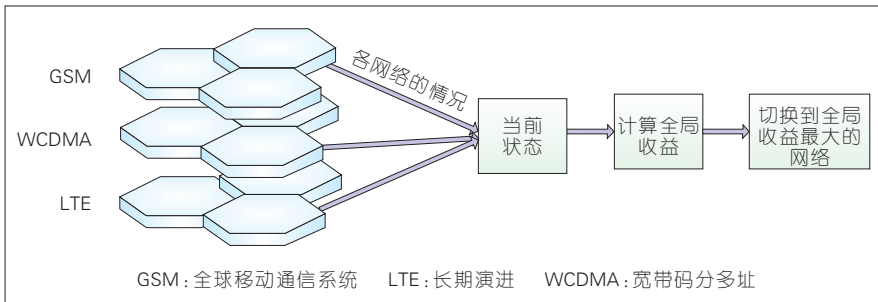
为了解决物联网节点业务在其持续时间内收益最大的问题,我们建立如下决策模型:每个业务在其持续时间内,都要经历多次切换,业务在各个决策时刻根据当前的状态计算全局收益,若全局收益最大的网络与节点当前所处的网络不同,则发生切换,否则留在原有网络,其过程如图1所示。

根据式(4)可知,为了计算业务在其持续时间内的全局收益,需要将各个决策时刻的瞬时收益累加。那么,为了确定各个决策时刻,我们将 $i$ 类业务的节点的持续时间离散成 $T_i$ 个等间隔的时间段,间隔为 $\tau$ 。如图2所示,在每个时间段的开始时刻,我们可以进行切换判断,即切换的触发时刻为每个时间段的开始时刻。因此,决策时刻序列可表示为 $\phi = \{1, 2, \dots, T_i\}$ 。

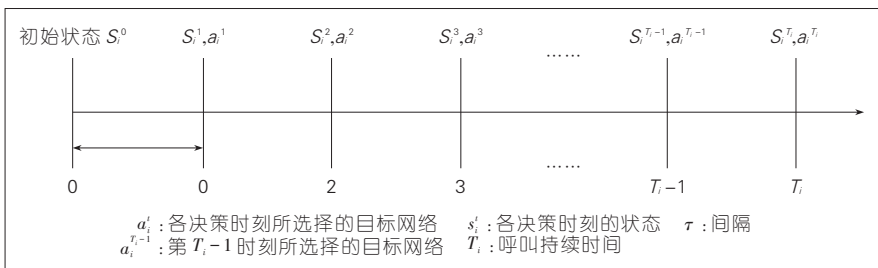
若假设 $i$ 类业务的离散的呼叫时间段数目 $T_i$ 服从均值为 $1/(1-\varphi_i)$ 的几何分布,则式(4)可化为:

$$v^\pi(s_i^0) = E_{T_i} \left\{ \sum_{t=1}^{T_i} r(s_i^t, a_i^t) \right\} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{l=1}^n r(s_i^l, a_i^l) \varphi_i^{n-l} (1-\varphi_i) = \sum_{l=1}^{\infty} \varphi_i^{l-1} r(s_i^l, a_i^l) \quad (5)$$

最优化的问题就是全局收益最大的问题,若方法 $\pi^*$ 表示最优网络选择方法,则对于任意选择方法 $\pi$ ,都有 $v^\pi(s_i^0) \geq v^{\pi^*}(s_i^0)$ ,且在任意切换时刻 $l$ ,方法 $\pi(l) = \pi^*$ 。我们的目的就是求出一个最优网络选择方法 $\pi^*$ ,



▲图1 业务在决策时刻进行切换判断的过程



▲图2 决策的时间轴

可使得式(5)的值最大。

### 1.3 最优网络选择方法的求解

#### 1.3.1 状态空间的定义

网络的系统带宽和网络中各类业务的等效带宽都是确定的,只有网络中各类业务的数目是实时的。因此,我们将当前状态定义为当前各个网络中各类业务的数目组成的集合。而当前的状态是状态空间中其中一个,那么,我们定义状态空间为各个网络中各类业务的数目的所有可能情况,表示为式(6)。

$$\begin{aligned}
 S &= \{1,2,3\} \times m_{i,j} \\
 s.t. (i,j) &\in \{(1,1),(1,2),(2,2),(1,3),(2,3)\} \\
 m_{11} &\in \left[0, 1, 2, \dots, \frac{W_1}{d_1^1}\right] \\
 m_{12} &\in \left[0, 1, 2, \dots, \frac{W_2}{d_2^1}\right], m_{22} \in \left[0, 1, 2, \dots, \frac{W_2}{d_2^2}\right] \cap m_{12} \cdot d_1^1 + m_{22} \cdot d_2^2 \leq W_2 \\
 m_{13} &\in \left[0, 1, 2, \dots, \frac{W_3}{d_3^1}\right], m_{23} \in \left[0, 1, 2, \dots, \frac{W_3}{d_3^2}\right] \cap m_{13} \cdot d_1^1 + m_{23} \cdot d_3^2 \leq W_3
 \end{aligned} \tag{6}$$

其中, {1,2,3} 表示业务当前所处的网络,分别为 GSM 网、WCDMA 网和 LTE 网;  $m(i,j)$  表示网络  $j$  中已存在的  $i$  类业务的数目;  $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$  分别表示 GSM 网、WCDMA 网和 LTE 网的系统带宽;  $d_j^i$  表示网络  $j$  中  $i$  类业务所

占的带宽,  $i$ 、 $j$  的含义与  $m(i,j)$  中的相同。

我们认为 GSM 网只能承载极低速率业务,而 WCDMA 和 LTE 网均可承载极低速率业务和中等速率业务,因此,  $i$ 、 $j$  的取值组合限定在式(6)的  $(i,j) \in \{(1,1),(1,2),(2,2),(1,3),(2,3)\}$  条件中。对于可以承载多种业务的 WCDMA 网和 LTE 网,  $i$  类业务的呼叫数除了被  $W_j/d_j^i$  限定外,还要保证系统资源足以承载各类业务的呼叫,即各类业务的数目所占用的资源小于等于系统资源。

因此,根据上述理论,我们可以将剩余带宽的计算式(3)细化为:

$$B^{(s,j)} = W_j - \sum_i m_{i,j} \cdot d_j^i \tag{7}$$

其中,  $m(i,j)$  表示的是  $j$  网络中存在的  $i$  类业务的数目,可以从当前状态中获得。

#### 1.3.2 状态转移概率的计算

给定当前状态,根据式(1)可以计算出业务的瞬时收益,根据式(5)可以计算出业务的全局收益,而式(5)中时间的最大取值为无穷,因此无法直接计算其全局收益的值。为

了计算全局收益,将式(5)中时间上的瞬时收益的和转化为状态空间上的瞬时收益的和进行求解。

在求解状态空间上的瞬时收益的和之前,需要知道处于各个状态的概率。若已知当前状态,则下一时刻的状态与当前状态有关,我们可以利用状态转移概率来计算各个状态的概率。

假设物联网节点业务的到达和离去都是服从泊松分布的,根据泊松分布的特性,该节点每次只能处理一个业务请求,只能有一个业务进入节点或者离开节点或者发生切换。业务的到达率和离去率分别为:  $\lambda_i (i=1,2)$  和  $\mu_i (i=1,2)$ 。

由于业务的到达和离去均服从泊松分布,则当前有  $n$  个业务,下一时刻有  $n+1$  个业务和  $n-1$  个业务的概率分别为:  $P_{n+1,n} = \lambda_i e^{-\lambda_i}$  和  $P_{n-1,n} = \mu_i e^{-\mu_i}$ ,业务数保持不变的概率为  $P_{n,n} = 1 - \lambda_i e^{-\lambda_i} - \mu_i e^{-\mu_i}$ 。给定当前状态  $s_i = \{j, m_{11}, m_{12}, m_{22}, m_{13}, m_{23}\}$  和切换的目标网络  $a$ ,极低速率业务转移到状态  $s_i$  的转移概率如下:

$$P[s_i, s_i, a] = \begin{cases} \lambda_1 e^{-\lambda_1} P_1^2 P_2^2 & \text{if } a=j, \text{ 且只有一个极低速率业务到达} \\ \lambda_2 e^{-\lambda_2} P_1^3 P_2^1 & \text{if } a=j, \text{ 且只有一个中等速率业务到达} \\ \mu_1 e^{-\mu_1} P_1^2 P_2^2 & \text{if } a=j, \text{ 且只有一个极低速率业务离去} \\ \mu_2 e^{-\mu_2} P_1^3 P_2^1 & \text{if } a=j, \text{ 且只有一个中等速率业务离去} \\ P_1^3 P_2^2 & \text{if } a=j, \text{ 且各类业务数目不变} \\ P_1^1 P_2^2 & \text{if } a \neq j, \text{ 且只有一个极低速率业务切换} \end{cases}$$

其中  $P_1 = 1 - \lambda_1 e^{-\lambda_1} - \mu_1 e^{-\mu_1}$ ,  $P_2 = 1 - \lambda_2 e^{-\lambda_2} - \mu_2 e^{-\mu_2}$ ,同理可算出中等速率业务的转移概率。

#### 1.3.3 最优化函数和数值迭代算法

对于  $i$  类业务,给定初始状态  $s_i^0$ ,令  $v(s_i^0)$  表示全局收益的最大值,则有:

$$v(s_i^0) = \max_{\pi \in \Pi} v^\pi(s_i^0) \tag{8}$$

将时间上的瞬时收益的和转化为状态空间上的瞬时收益的和,即可表示为节点当前时刻所处状态的瞬时收益与下一时刻所有可能状态的



全局收益的和。

$$v(s_i^0) = \max_{a_i \in A} \left\{ r(s_i^0, a_i^0) + \sum_{s \in S} \lambda P[s|s_i^0, a_i^0] v(s) \right\} \quad (9)$$

式(9)的解就是全局收益的最大值。

求解该最优化问题的方法有很多,例如:数值迭代算法、线性规划、算法迭代等等。由于数值迭代算法是应用最广泛,最容易理解,容易编程实现的算法,所以我们采用数值迭代算法求解式(9),具体操作如下:

(1)对于状态空间中的任意状态  $s$  令  $v^0(s) = 0$ , 指定  $\varepsilon > 0, k = 0$ ;

(2)对于各个状态  $s$ , 计算  $v^{k+1}(s) = \max_{a \in A} \left\{ r(s, a) + \sum_{s' \in S} \lambda P[s'|s, a] v^k(s') \right\}$ ;

(3)如果  $\|v^{k+1} - v^k\| < \varepsilon(1 - \lambda)/(2\lambda)$ , 进行下一步, 否则令  $k$  加 1 然后返回第 2 步;

(4)对于状态空间中的任意状态  $s$ , 挑选目标网络  $a$ , 使得  $r(s, a) + \sum_{s' \in S} \lambda P[s'|s, a] v^{k+1}(s')$  最大, 记为:  $\delta(s) = \arg \max_{a \in A} \left\{ r(s, a) + \sum_{s' \in S} \lambda P[s'|s, a] v^{k+1}(s') \right\}$ ;

对于物联网节点, 根据网络所提供的状态空间的信息, 对于状态空间中的各个状态, 利用上述数值迭代算法, 可以计算该状态所对应的切换目标网络, 这就是我们求得的最优网络选择方法, 目标结果和时间无关, 只和状态相关。

## 2 仿真与结果分析

对于瞬时收益最大值的和, 我们定义为:

$$v(s) = \sum_{i=1}^N \max r(X_i, Y_i) \quad (10)$$

其中,  $X_i$  为  $t$  时刻节点所处的网络,  $Y_i$  为  $t$  时刻业务切换的目标网络。

由假设可知, 业务的到达和离去都是服从泊松分布, 其到达率和离去率分别为  $\lambda_i (i=1, 2)$  和  $\mu_i (i=1, 2)$ , 令  $\lambda_1 = \lambda_2 = 3.4, \mu_1 = \mu_2 = 0.1, i$  类业务的持续时长  $T_i$  是服从均值为  $1/(1 - \varphi_i)$

的几何分布的随机数, 令  $\varphi_1 = \varphi_2 \in [0.9, 0.95, 0.97, 0.98, 0.985]$ 。假设, 极低速率业务的初始状态为  $[1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ , 中等速率业务的初始状态为  $[2 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$ 。根据式(9)和式(10)分别计算全局收益的最大值、最大瞬时收益的和, 结果如图3、图4所示。

由图3、图4可知, 对于极低速率业务和中等速率业务来说, 无论  $\varphi_i (i=1, 2)$  取何值, 该类业务的全局收益的最大值均大于最大瞬时收益的和, 也就是说文中提出的基于全局收益最大的网络选择方法与节点的业务持续时长无关, 无论节点的业务时长是多少, 本方法都优于原有的网络选择方案, 达到了保障物联网节点业务质量的效果, 提高了网络效率。

图中的曲线之所以变化幅度比较大, 是因为节点的业务时长  $T_i$  是随机变化的, 时间越长, 节点的最大全局收益、最大瞬时收益的和越大。

## 3 结束语

文中我们讨论了 NB-IoT 的物联网节点在异构网络中的网络选择问题, 提出了一种基于全局收益最大的网络选择方法, 将各个切换时刻的瞬时收益的和转化为状态空间上瞬时收益的和。因此, 在各个切换时刻, 节点只需收集当前的网络状态信息就可计算出切换的目标网络, 达到全局最优, 保证了物联网节点的业务质量, 提高了网络利用率。随着 NB-IoT

➔ 下转第 46 页

图3  
极低速率业务的全局收益的最大值、最大瞬时收益的和的比较

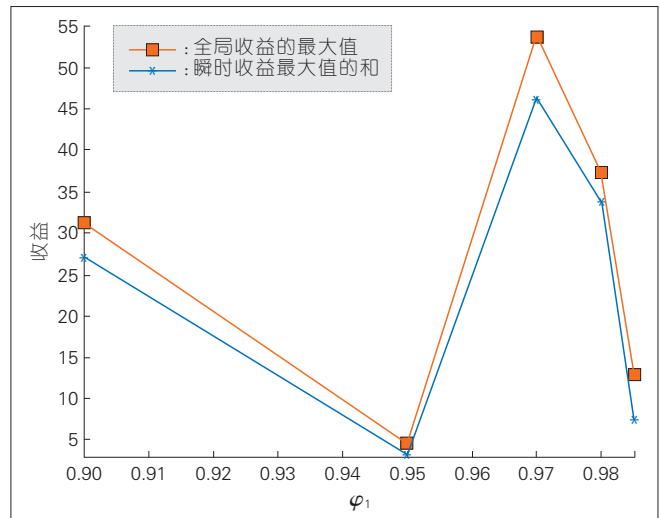


图4  
中等速率业务的全局收益的最大值、最大瞬时收益的和的比较

