

基于无线自组网络分时发送协议的路由汇聚容量

李跃新 朱 明

(湖北大学计算机与信息工程学院 武汉 430064)

摘 要 对于无线自组网而言,由于网络拓扑与路由选择的随机性,容量的分析显得尤为复杂。研究了能量约束对无线自组网容量性能的影响。该网络具有路由汇聚功能,且节点的发送过程基于分时竞争发送协议。在假设能量缓存中的能量值足够大时,节点就能发送数据的前提下,提出了一种基于闭环排队网络的容量分析模型。该模型同时考虑了数据细节、能量缓存以及随机接入协议。然后研究了能量约束对随机接入协议设计参数的影响,以优化网络性能。最后分析了能量约束对最大稳定容量、稳定域以及分组丢弃率的影响。仿真结果验证了所提分析模型的准确性。

关键词 无线自组网,路由汇聚,能量约束,分时发送协议

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.8.022

Study on Capacity of Route Aggregate Networks Based on Slotted Transmission Protocol

LI Yue-xin ZHU Ming

(School of Computer Science and Information Engineering, Hubei University, Wuhan 430064, China)

Abstract As the stochastic network topology and route selection in wireless ad hoc networks, it is complicated to analyze the capacity. The effects of energy constraints on the capacity of wireless ad hoc networks were studied. The network is capable of route aggregating, and the node transmission process is based on slotted contention protocol. Under the assumption that node transmission is triggered when the energy is big enough, a capacity analysis model was proposed based on the closed queueing network. The proposed model considers the details of data, energy buffers and random access protocol, simultaneously. Then the impacts of energy constraints on the random access protocol design parameters were analyzed to optimize the network performance. Finally, the effects of energy constraints on maximum stable throughput, stability region and packet drop rate were evaluated. Simulation results validate the accuracy of the proposed analytical model.

Keywords Wireless ad hoc network, Route aggregate, Energy constraint, Slotted transmission

近年来,无线通信领域快速发展。在这个过程中,人们建立了许多类型的无线网络,如无线传感网络、无线网状网络、车联自组网络等^[1],并制造了大量无线设备^[2]。除此之外,绿色通信也是研究者们热点关注的问题之一。在绿色通信研究方面,研究者关注的是如何利用有效的方法更好地利用能量。具体来说,绿色通信关注的是能利用清洁能源而不是化石化学能源的机制^[3]。因此在无线通信系统设计中,能源问题也需要重点考虑,例如在车联自组网中,环境参数传感器需要配置太阳能单元或能源搜寻电路,以在自然能量源中寻找能源^[4]。由于节点携带的能量有限,因此需要一个汇聚节点为这些发送和交换数据的节点补充能源。这个过程可在路由汇聚节点完成。

在无线传感网络中,可以通过节点调度使得节点传输数据通过数据汇聚点完成,这样节点间就不会产生竞争,在自动重传请求过程中节点通过相互合作满足能量约束^[5]。也有文献研究在衰落信道下,路由汇聚节点处的性能^[6],该文献假设

能量缓存是有限的,节点发送速率等于信道速率,且信道衰落电平随着时间变化。另外,不同量的能量在随机时间点到达路由汇聚节点。在基于分时协议的网路中,可以提出一种单个汇聚路由的模型,并考虑两种缓存,即数据和能量缓存^[7]。在发送速率给定的情况下,根据节点剩余能量来判断是否发送数据,若剩余能量足够大,则节点发送数据,否则节点不发送数据。通过将静寂阶段(由于缺少能量而无法发送分组的阶段)建模为 M/G/1 队列中的空闲,可以发现以最小平均时延得到最大吞吐量的参数。在具有数据融合中心的网络环境下,帧结构由融合中心确定^[8],网络发送采用动态帧分时协议,且节点饱和和对称的情况下,可假设节点数量足够大,使得在一个时隙中竞争的挤压节点可近似为泊松分布。针对能量汇聚路由,可以设计最优参数以使吞吐量达到最大且平均时延最小^[9]。

本文考虑具有有限个节点的无线自组网络,且每个节点都处于其他节点的覆盖范围之内。介质接入控制协议采用分

到稿日期:2014-07-01 返修日期:2014-09-24 本文受湖北省科技支撑项目:基于嵌入式大型数据库的网络安全关键技术研究(2014 BAA089)资助。

李跃新(1958—),男,博士,教授,主要研究方向为人工智能与知识工程、智能控制系统、嵌入式技术;朱 明(1978—),男,硕士,讲师,主要研究方向为计算机应用技术,E-mail:ufozm2003@aliyun.com(通信作者)。

时协议,这样每个无线节点在发送前都会等待随机数量的时隙。因此碰撞概率是阻碍吞吐量增加的主要因素。在这种网络环境下,节点不必对称,因此通常到达速率和竞争窗大小可以不同。每个节点都有一个容量有限的能量缓存。基于闭环排队网络理论,建立一个新的分析模型以评估竞争窗大小以及能量到达速率对不同网络性能(如最大稳定速率、稳定域和分组丢弃率等)的影响。在该模型中,随机等待、队列缓存状态和其他节点碰撞的影响可以映射到排队网络的参数上。然后,通过求解不同节点的排队网络的传输方程,可以得到理想的性能指标。最后,分析了能量限制如何影响网络的稳定域和其他性能指标,另外也发现了为了最大化稳定速率需要选组的协议的参数。仿真实验结果验证了所提模型的正确性和有效性。

1 网络模型

考虑一个由 n 个节点组成的无线自组网络,每个节点的能量有限,且都处在其他节点的覆盖范围之内。这些节点互相发送数据,或者发送到网络的汇聚路由。假设各个节点的能量缓存有限,另外,为了分析的简便,节点的数据缓存无限。本文考虑的网络模型如图 1 所示。数据分组大小固定且到达过程服从泊松分布。同时假设不同节点的能量随机到达路由汇聚节点,且每次到达的大小相同,与分组到达的泊松分布情形类似。另外,发送功率与发送速率都是恒定的,每个分组发送过程需要消耗一个单位的能量,不考虑由于衰落造成的信道波动。

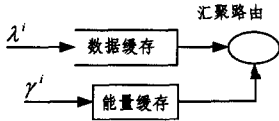


图 1 典型能量汇聚路由场景

介质接入协议采用分时 ALOHA 协议,这样在发送分组前需要等待随机数量个时隙,这个随机数在 $[1, m]$ 间均匀分布,其中 m 为竞争窗大小。超出等待时间后,只要能量缓存中还有能量单元,数据分组就可立即发送。时隙长度是固定的,其值等于一个分组以及对应该分组的 ACK 确认字符。若在分组发送时隙开始时能量缓存是空的,则该分组在时隙结束能量单元到达能量缓存时进行发送。若在分组发送时,其他节点也有数据发送的情况,则发生碰撞,该能量单元就浪费了。

2 基于排队论的分析模型

在本文考虑的网络拓扑中,路由汇聚节点可建模为一个闭环排队网络,如图 2 所示。排队网络的节点表示数据缓存中对头分组的发送状态以及能量缓存中能量单元的个数。发送状态包括空闲(数据缓存中没有分组)、MAC 机制带来的随机等待、缺少能量的等待以及通信链路上发送。另外,排队网络中仅有一个客户按照不同的转移概率在不同状态间转换。每个节点都标记为 (j, X) ,其中 $j(j=0, 1, \dots, N)$ 为能量缓存中的能量单元数; X 表示队列节点的类型,可以为 I, T 或 W_k ($k=$

$1, 2, \dots, m$),分别表示空闲(数据缓存为空)、发送(路由汇聚节点发送数据)和第 k 个等待时隙(分组发送前等待的第 k 个时隙)。节点 EW 表示能量到达的等待阶段。下一部分将表述客户如何在这些状态间转换,并计算转移概率以及服务时间。

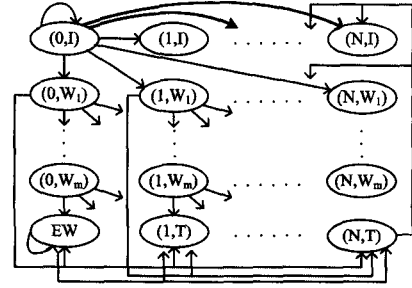


图 2 路由汇聚节点的排队网络模型

2.1 服务时间及转移概率

假设数据缓存中没有数据,这样客户就位于如图 2 所示的网络中的第一排节点中。考虑到 MAC 协议的分时特性,且分组发送和等待阶段在时隙开始时初始化,空闲状态的服务时间为一个时隙。这样,在服务时间结束时,如果上一时隙没有分组到达路由汇聚节点,则客户从空闲状态 (j, I) 离开,并转移到排队网络中的某个空闲状态。在这种情况下,目的空闲状态是根据发送时隙内到达能量单元数确定的。如果没有能量到达,客户就转移到原先的空闲状态,否则目的空闲状态与第一个等待时隙(W_1)对应,且根据到达的能量单元数,确定客户是否为目的空闲状态。因此服务时间和空闲状态 (j, I) 的转移概率可表示为:

$$Pr_{(j, I) \rightarrow (l, I)}^i = p_0(\sigma\lambda^i) p_{l-j}(\sigma\gamma^i) \quad (1)$$

$$l=j, \dots, N-1; j=0, \dots, N-1$$

$$Pr_{(j, I) \rightarrow (N, I)}^i = p_0(\sigma\lambda^i) (1 - \sum_{i=0}^{N-j-1} p_i(\gamma^i\sigma)), \quad (2)$$

$$j=0, \dots, N$$

$$Pr_{(j, I) \rightarrow (l, W_1)}^i = (1 - p_0(\sigma\lambda^i)) p_{l-j}(\sigma\gamma^i) \quad (3)$$

$$l=j, \dots, N-1; j=0, \dots, N-1$$

$$Pr_{(j, I) \rightarrow (N, W_1)}^i = (1 - p_0(\sigma\lambda^i)) (1 - \sum_{i=0}^{N-j-1} p_i(\gamma^i\sigma)), \quad (4)$$

$$j=0, \dots, N$$

$$T_{(j, I)}^i = \sigma, j=0, \dots, N \quad (5)$$

其中, $p_k(x) = \frac{x^k e^{-x}}{k!}$, σ 为时隙长度, γ^i 和 λ^i 分别为能量单元和数据分组到达速率。另外, $Pr_{Y \rightarrow Z}^i$ 和 T_Y^i 分别表示从状态 Y 到状态 Z 的转移概率和状态 Y 的服务时间。在式(1)中,右边的第一个因子表示一个时隙内没有数据分组到达的概率,第二个因子为一个时隙内到达 $l-j$ 个能量单元的概率。因此客户从状态 (j, I) 转移到 (l, I) 。方程(2)表明如果一个时隙内有 $N-j$ 个能量单元到达,由于能量缓存有限,客户转移到 (N, I) ,该式也说明如果没有数据分组到达,不管到达能量单元数为多少,客户都会从状态 (N, I) 转移到 (N, I) 。在式(3)和式(4)中,第一个乘数因子表示至少一个数据分组在时隙内到达的概率。

对于每个随机等待状态,即状态 (j, W_k) ($j=0, \dots, N; k=$

1, ..., m), 服务时间等于一个时隙的长度。在客户离开某个随机等待状态后, 如果随机等待时间还没结束, 该客户就转移到下一个随机等待状态, 即从 (j, W_k) 转移到 (l, W_{k+1}); 否则, 就转移到发送状态。显然, 最后的等待状态 (第 m 个等待状态) 如果有足够的能量, 就可以直接转移到发送状态。如果当客户离开等待状态时, 能量缓存中没有能量单元 (即状态 (0, W_k)), 同时在这个状态的服务时间内也没有能量单元到达, 则该分组转移到状态等待, 直到一个能量单元到达。因此, 从等待状态到其他状态的转移概率可表述如下:

$$Pr_{(j, W_k) \rightarrow (l, W_{k+1})}^{i,j} = \frac{m-k}{m-k+1} p_{l-j}(\gamma^i \sigma) \quad (6)$$

$$l=j, \dots, N-1; j=0, \dots, N-1; k=1, \dots, m-1$$

$$Pr_{(j, W_k) \rightarrow (N, W_{k+1})}^{i,j} = \frac{m-k}{m-k+1} (1 - \sum_{l=0}^{N-j-1} p_{l-j}(\gamma^i \sigma)) \quad (7)$$

$$l=j, \dots, N-1; k=1, \dots, m-1$$

在上两式中, 第一项乘数因子是在第 k 个等待时隙结束后等待时间仍未结束且至少持续一个时隙的概率。客户从等待状态转移到 EW 状态和发送状态的概率为:

$$Pr_{(0, W_k) \rightarrow (EW)}^{i,0} = \frac{1}{m-k+1} p_0(\gamma^i \sigma), k=1, \dots, m \quad (8)$$

$$Pr_{(j, W_k) \rightarrow (l, T)}^{i,j} = \frac{1}{m-k+1} p_{l-j}(\gamma^i \sigma) \quad (9)$$

$$j=0, \dots, N-1; l=j, \dots, N-1; k=1, \dots, m$$

$$Pr_{(j, W_k) \rightarrow (N, T)}^{i,j} = \frac{1}{m-k+1} (1 - \sum_{l=0}^{N-j-1} p_l(\gamma^i \sigma)) \quad (10)$$

$$j=0, \dots, N; k=1, \dots, m$$

综上所述, EW 状态表征了由于缺少能量而导致的等待时间, 且其服务时间为时隙长度。当客户离开这个状态后, 如果没有能量存储, 该客户仍然会回到 EW 状态; 否则, 该客户就转移到发送状态。因此, 处在 EW 状态的客户的转移概率如下所示:

$$Pr_{EW \rightarrow EW}^{i,EW} = p_0(\gamma^i \sigma) \quad (11)$$

$$Pr_{EW \rightarrow (l, T)}^{i,EW} = p_l(\gamma^i \sigma), l=1, \dots, N-1 \quad (12)$$

$$Pr_{EW \rightarrow (N, T)}^{i,EW} = 1 - \sum_{l=0}^{N-1} p_l(\gamma^i \sigma) \quad (13)$$

如果客户处在状态 (j, T) (j=1, ..., N), 在时隙开始时就有 j 个单元能量存储, 发送数据需要消耗其中一个能量单元。在发送结束后, 如果分组发生碰撞, 客户就会转移到第一个随机等待时隙以启动随机等待过程。同样, 当分组发送成功且数据缓存中至少有一个数据分组时, 客户就转移到第一个随机等待时隙以启动新分组处理过程。如果分组发送成功时数据缓存是空的, 客户就会根据能量单元数转移到空闲状态。由于假设数据到达服从泊松分布且数据是逐个发送的, 因此路由汇聚节点可看作一个 M/G/1 队列, 根据排队理论, 当客户离开发送状态后, 其观察到队列非空的概率为 ρ^i , 其中 ρ^i 为节点的业务强度。基于此, 可将客户从发送状态转移的概率写为:

$$Pr_{(j, T) \rightarrow (l, W_1)}^{i,j} = (P_{ol}^i + \rho^i (1 - P_{ol}^i)) p_{l-j+1}(\sigma \gamma^i) \quad (14)$$

$$l=j-1, \dots, N-1; j=1, \dots, N$$

$$Pr_{(j, T) \rightarrow (N, W_1)}^{i,j} = (P_{ol}^i + \rho^i (1 - P_{ol}^i)) (1 - \sum_{l=0}^{N-j} p_l(\sigma \gamma^i)) \quad (15)$$

$$j=1, \dots, N$$

$$Pr_{(j, T) \rightarrow (l, T)}^{i,j} = (1 - \rho^i) (1 - P_{ol}^i) p_{l-j+1}(\sigma \gamma^i) \quad (16)$$

$$l=j-1, \dots, N-1; j=1, \dots, N$$

$$Pr_{(j, T) \rightarrow (N, T)}^{i,j} = (1 - \rho^i) (1 - P_{ol}^i) (1 - \sum_{l=0}^{N-j} p_l(\sigma \gamma^i)) \quad (17)$$

$$j=1, \dots, N$$

其中, P_{ol}^i 为当分组发送时发生碰撞的概率。

2.2 碰撞概率及业务强度

根据式 (14)~式 (17), 需要得到与 ρ^i 与 P_{ol}^i 相关联的方程。从这个角度来说, 排队节点的业务强度的定义是节点到达速率与服务速率的比值。对于单服务器排队节点, 该值也是服务器非空的概率。另外, 在如图 2 所示的闭合排队网络中, 由于客户只有一个, 各个状态的业务强度之和是 1, 因此有

$$\sum_{l=0}^N (\rho_{(l, T)}^i + \sum_{k=1}^m \rho_{(l, W_k)}^i) + \sum_{l=1}^N \rho_{(l, T)}^i + \rho_{EW}^i = 1 \quad (18)$$

其中, $\rho_{(l, T)}^i$ 表示排队网络中状态 Y 的业务强度。从式 (18) 中可以看出图 2 所示的闭合排队网络是对路由汇聚节点状态的建模。因此除空闲状态外, 排队网络其他状态的概率之和是路由汇聚节点非空的概率, 即路由汇聚节点的业务强度。这样分组到达路由汇聚节点时如果节点空闲, 则该分组需要等到下一个时隙。这一等待时间需要计入分组的服务时间, 否则就会出现队列中有分组但队列空闲的情况。因此式 (19) 中的 $\rho_{(l, T)}^i$ 表示由于等待下一时隙的时隙造成的路由汇聚节点占用概率。根据泊松到达过程的知识, 平均驻留时间为 0.5σ。同样, 由于所有到达空闲路由汇聚节点的分组都会导致驻留, 这样 $\rho_{(l, T)}^i$ 可由排队网络中的空闲状态的到达速率计算。因此 $\rho_{(l, T)}^i$ 就等于 $(0.5\sigma) \sum_{l=1}^N (1 - \rho^i) (1 - P_{ol}^i) a_{(l, T)}^i$, 其中 $a_{(l, T)}^i$ 表示客户离开状态 (l, T) 的概率, 客户从状态 (l, T) 转移到排队网络中某一空闲状态的概率是 $(1 - \rho^i) (1 - P_{ol}^i)$ 。

$$\rho^i = \sum_{l=0}^N \sum_{k=1}^m \rho_{(l, W_k)}^i + \sum_{l=1}^N \rho_{(l, T)}^i + \rho_{EW}^i + \rho_{(l, T)}^i \quad (19)$$

客户停留在发送状态的概率实际上是路由汇聚节点稳定状态下, 发送时间所占的比例。由于排队网络所有状态的平均服务时间都是时隙长度, 这个比例就是路由汇聚节点稳定后在时隙开始时发送的概率。因此路由汇聚节点发送概率 P_{tx}^i 可表示为

$$P_{tx}^i = \sum_{l=1}^N \rho_{(l, T)}^i \quad (20)$$

碰撞概率可表示为

$$P_{ol}^i = 1 - \prod_{l=1, l \neq i}^n (1 - P_{tx}^i) \quad (21)$$

3 性能指标分析

3.1 最大稳定吞吐量

最大稳定吞吐量可定义为保持所有节点稳定的路由汇聚节点处的最大到达速率, 用 Λ_{st} 表示, 则有

$$\Lambda_{st} = \max \lambda \text{ s. t. } \forall i: 1 \leq i \leq n, \rho^i < 1 \quad (22)$$

其中, λ 为路由汇聚节点的到达速率。在稳定状态下, 离开和到达排队网络的速率是相同的, 根据前一部分关于转移概率的结论, 排队网络的业务方程可写为

$$a^i = R^i a^i \quad (23)$$

其中, R^i 为转移概率矩阵, a^i 为排队网络中各个状态的到达速率。由于排队网络是闭合的, 因此可用求解式所示的非线性业务方程。另外, 通过迭代求解业务方程, 式(19)所示的到达速率对至少一个状态而言等于 1 (即不稳定边界)。

3.2 稳定域

稳定域记为 SR, 其定义为

$$SR = \{(\lambda^1, \lambda^2, \dots, \lambda^n) | \forall i: 1 \leq i \leq n; \rho_i < 1\} \quad (24)$$

其中, λ^i 为数据到达速率, n 为路由汇聚节点个数。在实际场景下, 各个汇聚路由节点的到达速率是不同的, 因此稳定域比最大稳定吞吐量更重要。

3.3 分组丢弃率

若分组在随机等待时间结束后进入队列时能量缓存为空, 则该分组丢弃。此时状态 EW 可以从排队网络中去掉, 且在客户离开某一个状态 $(0, W_k)$ 后, 客户不再转移到状态 EW , 而是以概率 ρ^i 转移到 $(0, W_1)$ 并重新开始随机等待, 以概率 $1 - \rho^i$ 转移到状态 $(0, I)$ 。这样, 分组丢弃率可写为

$$r_d = \sum_{k=1}^m a_{(0, W_k)}^i \frac{1}{m-k+1} p_0(\gamma^i \sigma) \quad (25)$$

其中, r_d 表示分组丢弃率。式中右边第一个乘数因子为状态 $(0, W_k)$ 的到达速率, 由于排队网络稳定, 其值等于该状态下的离开速率; 第二个乘数因子为随机等待时间在第 k 个等待时隙后结束的概率; 第三个乘数因子表示在状态 $(0, W_k)$ 的服务时间内没有能量单元到达的概率。

4 仿真结果及分析

本节通过仿真来分析能量约束对网络性能指标的影响, 同时将本文分析结果与蒙特卡罗仿真结果进行比较, 以说明本文所提模型的正确性。仿真假设时隙长度为 $\sigma = 1s$, 能量缓存大小为 50。

图 3 显示了在两种竞争窗下, 不同能量到达速率时的最大稳定吞吐量。在给定竞争窗下, 随着能量到达速率增加, 最大稳定吞吐量也增加, 这是因为有更多的能量单元可支持分组发送。然而, 分组发送速率过高会使碰撞增多, 因此增大能量速率并不能使最大稳定吞吐量无限增加。在低能量到达率下, 分组更有可能因为缺少能量而等待。此时最大稳定吞吐量并不受竞争窗大小的影响。另一方面, 在高能量到达率下, 大多数分组都可以获得能量单元, 分组时延是因为发生碰撞, 而不是因为缺少能量。此时竞争窗越大, 造成的平均服务时间也越长, 从而最大稳定吞吐量也下降。同时仿真结果表明本文的分析结果具有准确性。

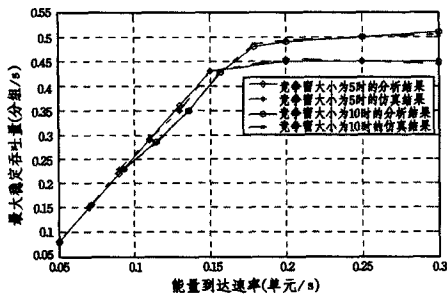


图3 最大稳定吞吐量与能量速率的关系

考虑一个由两个路由汇聚节点组成的网络, 在不同能量到达速率下, 稳定域随着不同分组到达速率的变化情况如图 4 所示。从图中可以看出, 如果某一个路由汇聚节点的分组到达速率增加, 另一个节点的最大到达速率将降低, 以保持网络的稳定。这是因为在高数据速率下碰撞更多, 从而导致服务时间与业务强度也增加, 另外, 纯粹的分时协议由于没有能量约束而具有更大的稳定域。在能量受限网络中, 由于能量到达速率降低, 更多的分组缺少能量, 稳定域也会缩减。

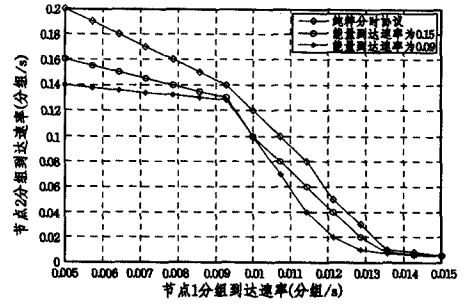


图4 两路由汇聚节点网络的稳定域

图 5 示出了为使分组丢弃率保持较低水平所需的最小能量到达速率。其中汇聚节点个数为 5, 竞争窗口为 10。分组到达速率增加时, 为了使分组丢弃率保持不变, 所需的最小能量到达速率就会增加。实际上, 除了外部到达的分组, 发生碰撞的分组也会丢弃, 这使得保持相同分组丢弃率所需的能量增加。

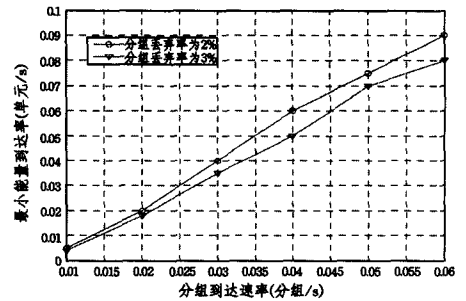


图5 保持分组丢弃率所需的最小能量到达速率

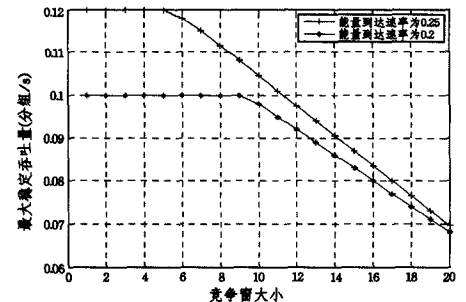


图6 最大稳定吞吐量随竞争窗的变化情况

从图 6 中可以看到不同能量到达速率下, 最大稳定吞吐量随着竞争窗大小的变化情况。仿真中路由汇聚节点的数量为 4。当竞争窗增加时, 分组发送需要等待更长的时间, 从而使碰撞减少, 但是最大稳定吞吐量降低了。另一方面, 随机等待过程中更有可能存储能量, 节点由于缺少能量而无法发送的情况更少。这两者之间的矛盾使得当竞争窗低于某一个特

定值时,最大稳定吞吐量变化缓慢。当超过这个值后,由于竞争窗口足够大,在等待时间内到达足够多的能量单元,此时最大稳定吞吐量由于竞争窗口的增大而减少。另外,从图6中也可看出,当能量到达速率较大时,能量约束的影响较小,因此在较小竞争窗口时最大稳定吞吐量也较大。

结束语 无线自组网中节点的能量约束是研究者尽可能大地利用绿色能源的主要动力。本文提出了一种用于分析网络吞吐量的分析模型。该模型中网络基于分时协议,且具有路由汇聚节点。本文所提模型可用来对不同数据分组、不同能量到达速率和不同数量非饱和节点场景进行建模。本文将网络路由汇聚节点建模为闭环排队网络,该排队网络可表征数据发送过程以及能量缓存的状态。网络性能指标注入最大稳定吞吐量、稳定域和分组丢弃率可用本模型进行分析。仿真研究了能量约束如何影响这些性能指标,且验证了所提分析模型的准确性。

参 考 文 献

- [1] Wang zhi-ming, Guo Wei-chun, Wang zhi-gang, et al. The Applications of Networking of Consumption Data Acquisition System by Combining Broadband Powerline Communication and Wireless Communication [C]//2012 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia). Tianjin, China, May 2012; 1-4
- [2] 苏金树, 胡乔林, 赵宝康, 等. 容延容断网络路由技术[J]. 软件学报, 2010, 21(1): 119-132
Su Jin-shu, Hu Qiao-lin, Zhao Bao-kang, et al. Routing Techniques on Delay/Disruption Tolerant Networks[J]. Journal of Software, 2010, 21(1): 119-132
- [3] Suarez L, Nuaymi L, Person C, et al. Electromagnetic Radiation Compliance under the Use of Green Cell Breathing and Hybrid Network Approaches in LTE[C]//2013 IEEE 24th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC Workshops). London, UK, Sept. 2012; 31-35
- [4] 张立, 郑过莘, 贾东立, 等. 认知无线网络中控制信道预约的 MAC 协议[J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(4): 79-92
Zhang Li, Zheng Guo-xin, Jia Dong-li, et al. A control channel reserving based MAC protocol for cognitive radio networks[J]. Journal of Beijing university of posts and telecommunications, 2010, 33(4): 79-92
- [5] Cammarano A, Petrioli C, Spenza D. Pro-Energy: A novel energy prediction model for solar and wind energy-harvesting wireless sensor networks[C]//2012 IEEE 9th International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS). Las Vegas, USA, Oct. 2012; 75-83
- [6] El-Anzeery H, El-Bagouri M, Guindi R. Novel Radio Frequency Energy Harvesting Model[C]//2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference (PEDCO). Melaka, Malaysia, 2013; 209-213
- [7] Prabhakar T V, Iyer M, Prkruthi K. Throughput Schemes for Energy Harvesting Sensor Network[C]//2012 Fourth International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS). Bangalore, India, Jan. 2012; 1-7
- [8] 罗涛, 赵明, 李静叶, 等. 认知无线电资助网络 MAC 协议[J]. 计算机学报, 2013, 36(2): 1-13
Luo Tao, Zhao Ming, Li Jing-ye, et al. MAC Protocols in Cognitive Radio Ad Hoc Networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(2): 1-13
- [9] 王辛果, 张信明, 陈国良. 时延受限且能量高效的无线传感器网络跨层路由[J]. 软件学报, 2011, 22(7): 1626-1640
Wang Xin-guo, Zhang Xin-ming, Chen Guo-liang. Delay-constrained and Energy-Efficient cross-layer routing in wsn[J]. Journal of software, 2011, 22(7): 1626-1640
- (上接第 69 页)
- [7] Lee S, Choe H, Park B, et al. LUCA: an energy efficient unequal clustering algorithm using location information for wireless sensor networks[J]. Wireless Personal Communications, 2011, 56: 715-731
- [8] Olascuaga-Cabrera J G, López-Mellado E, Mendez-Vazquez A, et al. A self-organization algorithm for robust networking of wireless devices[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(3): 771-780
- [9] 李成法, 陈贵海, 叶懋, 等. 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议[J]. 计算机学报, 2007, 30(1): 27-36
Li Cheng-fa, Chen Gui-hai, Ye Mao, et al. Routing protocol for wireless sensor networks based on non-uniform clustering [J]. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(1): 27-36
- [10] 邹瑜, 彭舰, 黎红友, 等. 基于协同路由算法的无线传感器网络能量空洞避免[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2012, 49(6): 1253-1258
Zou Yu, Peng Jian, Li Hong-you, et al. Energy-hole avoidance for wireless sensor network based on collaborative routing algorithm [J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2012, 49(6): 1253-1258
- [11] Chaturvedi A, Kumar P. An Energy Efficient Algorithm to avoid Hot Spot effects in Wireless Sensor Networks[J]. International Conference on Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, 2013, 2(7): 117-121
- [12] Jindal S. Hybrid multi-hop energy efficient routing mechanism in WSN[J]. International Journal of Management, IT and Engineering, 2014, 4(2): 230-242
- [13] Jain A, Reddy B V R. Optimal degree centrality based algorithm for cluster head selection in wireless sensor networks[C]//2014 Recent Advances in Engineering and Computational Sciences (RAECS). IEEE, 2014: 1-6
- [14] Handy M J, Haase M, Timmermann D. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection[C]//Proceedings of 4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network, 2002; 368-372