

DTN 中一种基于接触时间的休眠机制

付凯 夏靖波 尹波

(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

摘要 针对容迟/容断网络(DTN)中能量供应受限的问题,提出一种基于接触时间的休眠机制 SSCT(Sleep Scheme based on Contact Time)。节点依据历史接触时间自适应调整等待时间和休眠时间,从而降低休眠期间错失通信机会的概率。仿真实验表明,添加 SSCT 的 Epidemic 算法能够在保证消息交付率的基础上降低网络开销和能耗。相比 First Contact 算法,SSCT 对多副本路由算法的性能提升更加明显。

关键词 容迟/容断网络,能量消耗,休眠机制,接触时间

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Sleep Scheme Based on Contact Time in DTN

FU Kai XIA Jing-bo YIN Bo

(Institute of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract Considering the problem that energy supplies are limited in DTN, a sleep scheme based on contact time was proposed. Nodes carry out adaptive strategy to adjust wait time and sleep time according to former contact time, and reduce the probability of missing communication opportunities in sleep period. Simulation results indicate that Epidemic algorithm with SSCT can reduce network overhead and energy consumption based on high message delivery ratio, and SSCT has better performance on multi-copy routing algorithms compared with First Contact algorithm.

Keywords Delay/disruption tolerant network, Energy consumption, Sleep scheme, Contact time

1 引言

容迟/容断网络(DTN)^[1]是近年来一个新兴的研究领域,它是由 Fall K 等人首次提出的一种面向消息的覆盖层网络体系结构。DTN 的设计最初是为了解决星际间的通信问题^[2],后来发展延伸至同样具有大时延、断续连接等特征的无线传感器网络^[3]、车辆网络^[4]和战术通信网^[5]等。DTN 具有与传统网络不同的特性,在路由策略^[6]上需要考虑节点移动性、缓存和能量等问题。Epidemic^[7]算法通过一种“传染”的方式复制消息以尽可能地达到较高的交付率和较低的时延,但对网络资源和节点能量的消耗很大。PROPHET^[8]是一种效用与冗余混合的路由算法,节点通过计算转发效用降低了消息的副本数量,有效地节约了缓存和能量。First Contact^[9]只把消息传给首次遇到的节点,并删除自身的副本,是一种典型的单副本路由算法。以上 3 种路由算法由于转发机制的差异造成能量消耗依次降低,但都不具备专门的节能策略。

在一些特殊的 DTN 环境中,节点可能会出于节能需要而保持低占空比操作,或是由于处在战场敌对环境而需要间断地保持无线电静默。文献^[10]提出一种基于最近活动状态的节能机制,即当一段时间未发现其他节点时,转为节能操作模式,其一旦发现其他节点,立即转入正常操作模式,其在一

定程度上达到了节能的目的,但必须一直维持路由发现的过程。文献^[11]提出一种节能的邻居发现机制,对实现最小能耗问题进行了研究。本文提出一种基于接触时间的休眠机制(Sleep Scheme based on Contact Time, SSCT),即依据历史相遇信息进行休眠时间的设置,在尽量减少通信机会错失的情况下达到节能的目的。

2 模型假设

网络中的每个节点都有各自惟一的编号,除了缓存空间、移动速度、传输范围等基本属性外,还具有一些能量属性,包括节点初始能量 E_{init} 、当前剩余能量 E_{res} 、发送消息能耗 E_{send} 、接收消息能耗 E_{rec} 和发现节点所需的扫描能耗 E_{scan} 等。同时,根据节点是否能够补充能量划分为充能节点和非充能节点。此外,在所研究的网络中具有以下假设条件:

(1)网络中的能耗主要来源于 E_{send} 、 E_{rec} 和 E_{scan} ,认为以上均为固定值,并且不考虑节点运动等其他原因造成的能耗。

(2)当节点能量耗尽或处于休眠状态时,不能进行扫描和收发消息,忽略休眠期间的能耗及休眠状态与正常状态之间的转换时间。

(3)充能节点按某一固定时间段进行充能并补充至初始能量,充能所需时间忽略不计。

到稿日期:2012-05-10 返修日期:2012-08-04 本文受全军军事学研究生课题(2011*****523)资助。

付凯(1987—),男,硕士生,主要研究方向为容迟/容断网络等,E-mail: fukaia3@yahoo.com.cn;夏靖波(1963—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为通信网络规划与管理等;尹波(1988—),男,硕士生,主要研究方向为网络流量分析等。

(4)网络中所有节点保持时间同步。

3 休眠机制设计

3.1 基本原理

在能量受限的 DTN 环境中,休眠是一种有效的节能措施,充分利用空闲时间进行休眠有利于节点保存能量进行消息的传输,并延长节点的寿命。然而在休眠期间如果遇到可以通信的其他节点,则会错失传输消息的机会,影响消息的成功交付。因此,如何设置合理的休眠时间,尽可能地降低休眠期间错失通信机会的概率,是休眠机制设计的关键。

本文提出的 SSCT 是一种基于历史相遇信息的休眠机制,在网络结构不发生较大突变时,利用历史信息可以有效预测未来的网络状态。在 SSCT 中,每个节点维护一张接触时间表,用于记录最近 N 次与其他节点的接触时间,定义其集合为 $T^C = \{T_1^C, T_2^C, \dots, T_N^C\} (T_1^C < T_2^C < \dots < T_N^C)$ 。假设系统初始时间为 T_0^C ,则接触时间间隔为 $T_i^I = T_i^C - T_{i-1}^C (i=1, 2, \dots, N)$,其集合为 $T^I = \{T_1^I, T_2^I, \dots, T_N^I\}$ 。接触时间间隔反映了节点之间相遇的频率,根据接触时间间隔的历史信息可以进行休眠时间的设置。如图 1 所示,集合 T^I 内的元素分布在接触时间间隔坐标轴上的 $[T_{\min}, T_{\max}]$ 范围内, T_{ave} 是 T^I 内所有元素的平均值。节点休眠采用“等待-休眠”的分段模式,即在休眠之前有一段等待时间 $WaitTime$,如果在 $WaitTime$ 内没有发现其他节点,则转入休眠状态,休眠持续时间为 $SleepTime$,休眠结束后进入下一轮的等待阶段;如果在 $WaitTime$ 内发现有其他节点,则进行消息的传输。 $StartTime$ 是开始计时时间,即每次消息传输完毕或中止后开始计时进入等待阶段,或每次休眠结束后重新开始计时进入下一轮的等待阶段。

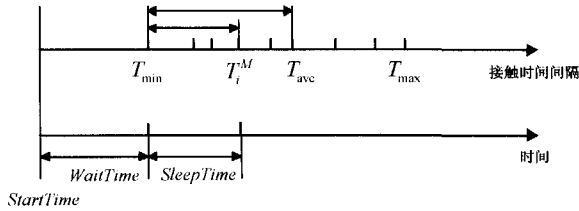


图 1 SSCT 示意图

3.2 初始化过程及休眠条件

休眠的初始化过程就是记录历史相遇信息的过程,即最近的 N 次接触时间。接触时间表采用 FIFO 的队列管理机制,当有一条新记录时就删除最早的一条记录。初始时接触时间表为空,随着与其他节点的相遇,接触时间表不断增加记录,在记录已满后才进行下一步的时间参数设置。在更新记录时不考虑节点编号,即先后两次遇到同一节点也增加两条不同的记录。接触时间表的长度 N 值越大,则记录的历史相遇信息越多,对于休眠时间参数的设置越准确,但会花费更多的计算时间并延长休眠的初始化过程。

当节点能量较高时,可以不考虑节能需求而尽力传输消息,休眠可能会降低消息交付率。节点能量随着时间逐渐减少,合理的休眠机制能够使节点充分利用剩余能量传输消息并通过休眠节约能耗,以实现消息交付率与能量消耗之间的平衡。因此,本文定义休眠门限 $P_{\text{sleep}} (0 < P_{\text{sleep}} < 1)$,当满足 $E_{\text{res}}/E_{\text{init}} < P_{\text{sleep}}$ 时才运行 SSCT,这样能够减小能量状态较好

时节点休眠对消息交付率的不利影响。

3.3 时间参数设置

SSCT 中最重要的是对 $WaitTime$ 和 $SleepTime$ 两个时间参数的设置,这将直接决定休眠机制的合理性和对消息交付的影响。

$WaitTime$ 是休眠等待时间,如果该值设置过小,则节点会频繁进入休眠状态,对消息的成功交付会造成不利的影晌;如果该值设置过大,则在等待阶段遇到其他节点的可能性较大,于是就很难得到休眠的机会,那么休眠机制的节能作用就会减弱。 $SleepTime$ 是休眠持续时间,该值应设置较大,以达到节能的目的,但这样会导致在休眠期间遇到其他节点的概率增大,因此需要设置合理的值以降低错失通信机会的概率。时间参数设置的具体过程如下:

(1)初始化过程结束后,节点计算接触时间间隔集合 T^I ,将 T^I 中的元素按由小到大的顺序排列得到新集合 T^A ,查找 T^A 中元素的最小值 T_{\min} ,并计算 T^A 中所有元素的平均值 T_{ave} 。

(2)依据历史相遇信息,为使在等待阶段遇到其他节点的概率较小,设置 $WaitTime = T_{\min}$ 。

(3)将 T^A 内处于 $(T_{\min}, T_{\text{ave}}]$ 范围内的所有元素构成集合 T^M , T^M 的元素个数为 M 。如果 $M=0$,则设置 $SleepTime = T_{\text{ave}} - T_{\min}$;否则,对 T^M 中的每个元素 $T_i^M (i=1, 2, \dots, M)$,查找处于 $(T_{\min}, T_i^M]$ 范围内的元素个数 N_i ,计算 $\Delta(i) = (T_i^M - T_{\min}) / (T_{\text{ave}} - T_{\min}) - N_i / M$ 。

(4)找出(3)中计算的 $\Delta(i)$ 的最大值 Δ_{\max} ,其对应的元素为 $T_j^M (T_j^M \in T^M)$ 。若 $\Delta_{\max} > 0$,则 $SleepTime = T_j^M - T_{\min}$;否则, $SleepTime = 0$ 。

在上述过程中, $\Delta(i)$ 是设置 $SleepTime$ 的衡量指标,称为休眠效用。由于 $WaitTime = T_{\min}$,为使休眠阶段遇到的节点数目较少,则需要 $SleepTime \leq T_{\text{ave}} - T_{\min}$ 。为便于计算, $SleepTime$ 在所有的 $T_i^M - T_{\min}$ 中取值。如图 1 所示, $(T_i^M - T_{\min}) / (T_{\text{ave}} - T_{\min})$ 为休眠时间区间与左半时间区间的比值,称为休眠效率; N_i / M 为对应区间包含元素个数的比值,称为通信错失率;当 $\Delta(i) > 0$ 时,节点的休眠效率大于通信错失率,可以进行休眠,并在 $\Delta(i)$ 取最大值时设置 $SleepTime$;当 $\Delta(i) < 0$ 时,节点休眠对于消息交付的不利影响更大,因此不进行休眠 ($SleepTime = 0$),重复等待阶段。

3.4 通信错失率分析

在第 3.3 节中,利用休眠效率与通信错失率的差值 $\Delta(i)$ 作为休眠效用来设置 $SleepTime$,实际上这是一种在消息交付率与能耗之间的折中处理。其中 N_i / M 依据历史接触时间信息得出,是一个便于计算的先验概率值。SSCT 设计的基础是保证消息交付率不因节点休眠而大幅度下降,通信错失率将直接影响 SSCT 的性能,因此本文对通信错失率的理论值进行分析。

首先建立排队模型,即当前节点认为是服务站,与其接触的其他节点认为是顾客。设接触时间序列 T_i^C 是一强度为 λ 的泊松流 ($\lambda > 0$),可以证明,接触时间间隔 T_i^I 是相互独立的随机变量,且服从同一指数分布,其概率密度如式(1)所示:

$$f_{T_i^I}(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t}, & t > 0 \\ 0, & t \leq 0 \end{cases} (i=1, 2, \dots) \quad (1)$$

则通信损失率 P_{miss} 如式(2)所示:

$$P_{miss} = P(T_{min} < T_i^M < T_i^M) = \int_{T_{min}}^{T_i^M} \lambda e^{-\lambda t} dt = e^{-\lambda T_{min}} - e^{-\lambda T_i^M} \quad (2)$$

由于 $\frac{dP_{miss}}{dT_i^M} = \lambda e^{-\lambda T_i^M} > 0$, $T_{min} < T_i^M \leq T_{ave}$, 因此当 $T_i^M = T_{ave}$

时, P_{miss} 取最大值, 如式(3)所示:

$$P_{max} = e^{-\lambda T_{min}} - e^{-\lambda T_{ave}} \quad (3)$$

P_{max} 是理论上通信损失率的最大值, 反映了 SSCT 对消息交付的最坏影响, 是衡量 SSCT 性能的重要指标。

4 仿真实验

本文采用 DTN 路由仿真软件 ONE^[12], 实验中共设置 4 组不同的节点, 每组节点数目分别为 15、15、15 和 5, 初始能量分别为 15000J、20000J、25000J 和 20000J, 并且只有最后一组为充能节点, 充能间隔为 60s。节点均采用 Random Waypoint 移动模型^[13], 其他默认仿真参数如表 1 所列。

表 1 默认仿真参数

参数	默认值
仿真场景	200m×200m
仿真时间	12h
节点移动速度	0.5~1.5m/s
停等时间	0~120s
节点缓存	50M
消息产生间隔	55~65s
消息大小	0.5M
消息 TTL	300s
链路带宽	250kbps
传输范围	10m
发送能耗	12J
接收能耗	10J
扫描能耗	8J

4.1 休眠门限的设置

休眠门限 P_{sleep} 是 SSCT 的重要参数, 决定节点是否满足休眠的条件。由第 3.2 节可知, P_{sleep} 能够调节消息交付率与能耗之间的平衡, 因此本文通过仿真实验研究 P_{sleep} 对 SSCT 性能的影响, 并设置最优参数。实验中选取了典型的 Epidemic 算法并添加了 SSCT, 仿真结果如图 2 所示。

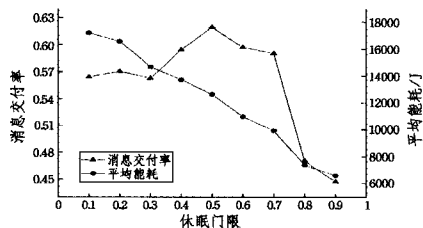


图 2 休眠门限的设置

当休眠门限较低时, 节点能够运行 SSCT 的机会很小, 因此平均能耗很大。随着休眠门限的提高, SSCT 对算法性能的影响逐渐增强, 使得平均能耗不断下降。同时, 合理的休眠也减轻了对节点缓存资源的消耗, 在 0.3~0.5 之间消息交付率也有所提升。当休眠门限很高时, 节点进行休眠的概率较大, 经常性的休眠虽然使平均能耗较小, 但对消息的成功交付造成了不利的影响, 尤其在 0.7~0.9 之间, 消息交付率急剧下降。为在保证消息交付率的情况下尽量减小能耗, 选择休眠门限 $P_{sleep} = 0.7$ 比较合理。

4.2 最大通信损失率

为验证 SSCT 对消息交付的影响, 本文对最大通信损失率 P_{max} 进行了仿真研究。实验中选取添加 SSCT 的 Epidemic 算法, 经 10 次仿真实验得到 T_{min} 和 T_{ave} 的值。依据式(3), P_{max} 取 10 次实验的平均值, 在 λ 取不同值时的仿真结果如图 3 所示。可以看出, P_{max} 的值较小, 并且随着 λ 的不断增大逐渐减小。因此, 在默认仿真参数下, SSCT 对 Epidemic 算法消息交付的不利影响较小, 可以取得较好的性能。

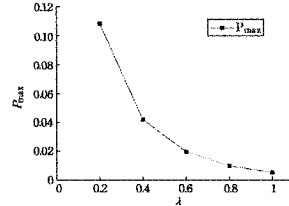


图 3 最大通信损失率的仿真结果

4.3 仿真时间对算法性能的影响

本组实验选取了 Epidemic 算法和添加了 SSCT 的 Epidemic 算法 (Epidemic-S 算法), 研究了仿真时间对两种算法性能 (消息交付率、开销、平均时延和平均能耗) 的影响。实验中休眠门限 P_{sleep} 取 0.7, 接触时间表长度 N 取 20。

如图 4 所示, 随着仿真时间的增加, Epidemic 算法的消息交付率下降较快, 这是由于大量复制消息对节点能量和缓存资源造成了巨大的消耗, 在仿真后期会出现大量缓存或能量耗尽的节点, 以致无法完成消息的传输。对于 Epidemic-S 算法, 其由于采取了 SSCT, 可以有效节约能量, 减轻缓存负荷, 在仿真时间内消息交付率仅下降了 0.1。在仿真初期, Epidemic 算法的交付率略高一些, 是由于这期间能量和缓存比较充足, SSCT 的效果并不明显, 少数节点的休眠对消息的成功交付造成了不利的影响。

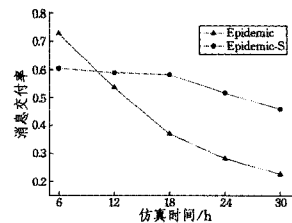


图 4 仿真时间对消息交付率的影响

由图 5 可以看出, Epidemic 算法由于消息洪泛策略使其开销一直保持较高水平。随着仿真时间的增加, SSCT 的作用不断增强, 节点因休眠而减少了消息的中继次数, 从而 Epidemic-S 算法的开销逐渐下降, 并在 50 附近趋于稳定。因此, 在添加 SSCT 之后, Epidemic 算法的开销明显降低。

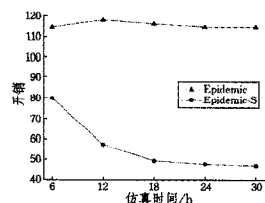


图 5 仿真时间对开销的影响

由图 6 可以看出, Epidemic-S 算法的平均时延相对 Epidemic 算法较大, 而且随着仿真时间而不断增大, 这主要是由

于网络中休眠的节点逐渐增多,减少了消息传输的机会,消息在缓存中的滞留时间增加,因而平均时延增大。

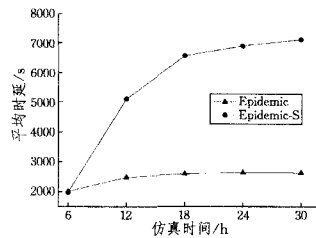


图6 仿真时间对平均时延的影响

如图7所示,在仿真初期,Epidemic算法的平均能耗迅速增大,在12h以后,由于网络中非充电节点的能量几乎耗尽而趋于稳定状态。Epidemic-S算法由于采取了SSCT休眠机制,平均能耗虽然随着仿真时间逐渐增加,但明显小于Epidemic算法,取得了较好的节能效果。

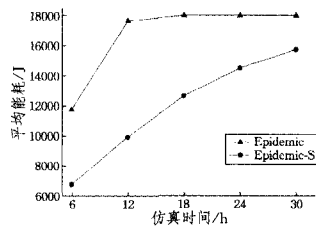


图7 仿真时间对平均能耗的影响

4.4 SSCT对不同算法性能的影响

在第4.3节中,添加SSCT的Epidemic算法除平均时延外在性能上有了一定提升,反映了SSCT可以取得较好的性能。由于Epidemic为洪泛路由算法,不具有一般性,因此本组实验又选取了典型的单副本路由算法First Contact和效用冗余混合算法PROPHET,研究了SSCT对不同类型路由算法性能的影响,仿真结果如表2所列。其中,网络寿命^[14]是指网络中出现第一个能量耗尽节点的时间。

表2 不同算法性能对比

	Epidemic	Epidemic-S	PROPHET	PROPHET-S	First Contact	First Contact-S
消息交付率	0.53	0.59	0.66	0.59	0.67	0.46
开销	118	57	89	46	28	26.8
平均时延/s	2475	5106	2865	5066	5963	6025
平均能耗/J	17640	9934	17302	8943	9464	6694
网络寿命/h	6.5	10.2	7.0	20.9	16.3	25.3

由表2可以看出,SSCT对Epidemic,PROPHET和First Contact算法在消息交付率方面的不利影响依次增强,这是由于网络中的消息副本数越少,则节点休眠造成消息无法成功交付的概率越大。在开销上,Epidemic-S和PROPHET-S能够降低约50%,而First Contact-S的开销没有明显的变化,因此SSCT能够显著降低多副本路由算法的开销。由于SSCT会造成消息存储时间的增加,因此各算法的平均时延都有所增大,而First Contact由于只存在一个消息副本,平均时延本来就比较小,因此SSCT对其影响较小。另外,SSCT可以显著降低3种算法的平均能耗,并延长网络寿命。

结束语 针对DTN中能量供应受限的问题,本文提出一种基于接触时间的休眠机制。节点通过记录历史接触时间自适应调整休眠时间参数,实现消息交付率与能量消耗之间的平衡。仿真结果表明,添加SSCT的Epidemic算法能够在保证消息交付率的基础上降低网络开销和能耗,但平均时延较大。另外,SSCT对多副本路由算法的性能提升更加明显。在未来的工作中,将对休眠效用函数的选取和降低平均时延等问题作进一步的研究。

参考文献

- [1] Fall K. A delay-tolerant network architecture for challenged Internets[C]// Proceedings of the 2003 ACM Special Interest Group on Data Communication. Karlsruhe: ACM Press, 2003: 27-34
- [2] Burleigh S, Hooke A, Torgerson L, et al. Delay-Tolerant networking: an approach to interplanetary Internet[J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(6): 128-136
- [3] 刘唐, 彭舰, 王建忠, 等. 延迟容忍移动传感器网络中基于节点优先级的数据转发策略[J]. 计算机科学, 2011, 38(3): 140-143
- [4] Li Xu, Shu Wei, Li Ming-lu, et al. DTN routing in vehicular sensor networks[C]// Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference. New Orleans, USA: IEEE, 2008: 1-5
- [5] Krishnan R, Basu P, Mikkelsen J M, et al. The SPINDLE disruption-tolerant networking system[C]// Proceedings of the Military Communications Conference 2007. Orlando: IEEE Computer Society, 2007: 1-7
- [6] 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
- [7] Vahdat A, Becker D. Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks[R]. CS-2000-06. North Carolina: Duke University, 2000
- [8] Lindgren A, Doria A, Schelen O. Probabilistic routing in intermittently connected networks[J]. Mobile Computing and Communications Review, 2003, 7(3): 19-20
- [9] Jain S, Fall K, Patra R. Routing in a delay tolerant network[C]// Proceedings of the 2004 ACM Special Interest Group on Data Communication. Portland: ACM Press, 2004: 145-158
- [10] Drula C, Amza C, Rousseau F, et al. Adaptive energy conserving algorithms for neighbor discovery in opportunistic bluetooth networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(1): 96-107
- [11] Yang D, Shin J, Kim J, et al. An energy-optimal scheme for neighbor discovery in opportunistic networking[C]// Proceedings of 2009 6th IEEE Consumer Communications and Networking Conference. Las Vegas, USA: IEEE, 2009: 1-2
- [12] Keränen A, Ott J, Kärkkäinen T. The ONE simulator for DTN protocol evaluation[C]// Proceedings of the Second International Conference on Simulation Tools and Techniques. Rome, Italy: ACM Press, 2009: 1-10
- [13] Camp T, Boleng J, Davies V. A survey of mobility models for ad hoc network research[J]. Wireless Communication & Mobile Computing, 2002, 2(5): 483-502
- [14] 朱金奇, 刘明, 龚海刚, 等. 延迟容忍传感器网络中面向发布/订阅系统的事件传输[J]. 软件学报, 2010, 21(8): 1954-1967