

一种高效的延迟容忍移动传感器网络异步探测机制

李文霖* 郑康锋 张冬梅 郭世泽

(北京邮电大学信息安全中心 北京 100876)

(北京邮电大学灾备技术国家工程实验室 北京 100876)

摘要: 针对延迟容忍移动传感器网络(Delay Tolerant Mobility Sensor Network, DTMSN)节点间连接探测开销大、错失率高的问题, 该文提出一种高效的DTMSN异步探测机制(Efficient Asynchronous Probing Scheme, EAPS)。该机制面向随机路点(Random Way-Point, RWP)移动模型, 在采用互质周期对的时隙睡眠机制基础上, 通过对节点运动区域的合理划分和周期对的优化选择, 保证了网络连接探测的高成功率和低能耗的特性。仿真结果表明, 与现有的异步探测机制相比, 该机制能够在低能耗下实现更高的探测成功率与更低的探测延迟。

关键词: 延迟容忍移动传感器网络; 异步探测; 随机路点移动模型

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)12-2891-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00730

An Efficient Asynchronous Probing Scheme for Delay-tolerant Mobility Sensor Network

Li Wen-ji Zheng Kang-feng Zhang Dong-mei Guo Shi-ze

(Information Security Center, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

(National Engineering Laboratory for Disaster Backup and Recovery,

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: An Efficient Asynchronous Probing Scheme (EAPS) is proposed to solve issues of the low discovery ratio and high probing energy cost for Delay Tolerant Mobility Sensor Network (DTMSN). By analyzing nodes' contact properties in the Random Way-Point (RWP) mobility model, EAPS gives a reasonable regional plan based on a slotted-wakeup schedule of coprime cycle pairs. Optimal coprime cycle pairs are selected in these different regions to improve the discovery ratio and reduce energy cost. Comparing with past asynchronous probing schemes, simulation results show that EAPS has higher discovery ratio and lower discovery delay with a low energy cost.

Key words: Delay Tolerant Mobility Sensor Network (DTMSN); Asynchronous probing; Random Way-Point (RWP) mobility model

1 引言

延迟容忍移动传感器网络(DTMSN)^[1]由于其广泛的应用前景, 受到了众多研究者关注。与传统无线传感器网络研究^[2-6]比, DTMSN具有节点分布稀疏、传输距离有限及移动等特性, 导致了节点间歇连通及连接时间较短的问题。节点往往需要在没有预先信息情况下探测邻近节点, 以决定如何合理地转发数据。在低能耗下如何有效降低探测延迟、提高探测成功率, 成为DTMSN节点连接探测的关键问题。

目前, 针对DTMSN节点连接探测的研究并不多, 但已有学者对机会网络等应用中节点连接探测

进行了一些分析。Qin等人^[7,8]研究了机会网络中连接探测对数据传输和能耗的影响, 并根据节点相遇率自适应地调整探测频率, 使探测成功率与能耗达到更有效平衡; 文献^[9-11]考虑了多个节点异步连接探测时如何避免探测碰撞问题; 这些探测机制都需要节点进行持续监听, 消耗了大量能量, 并不适用于DTMSN。

ONDS(Optimal Neighbor Discovery Scheme)将节点状态划分为探测、监听以及睡眠3类^[12,13]。其基本思想是每个周期监听时间为 σ , 睡眠时间为 d ; 节点每隔时间 D 发送一次探测信号, 探测时间长度为 $d+2\sigma$, 以保证其它节点在一个周期内至少能够获取时间长度为 σ 的探测信号; 然而, 长时间发送探测信号不仅增加了能耗, 还增大了探测碰撞出现的风险。

Disco机制^[14]较好地解决了不同占空比下节点异步探测的问题, 基本思想是两个节点采用不同的

2012-06-11 收到, 2012-08-22 改回

国家自然科学基金(61070204, 61101108)和国家重大科技专项基金(2011ZX03002-005-01)资助课题

*通信作者: 李文霖 liwenji1986@bupt.edu.cn

素数 p_1, p_2 作为唤醒周期, 在没有任何预先信息情况下, 节点能够在 $p_1 \times p_2$ 个时隙内彼此发现对方。U-Connect^[15]与 AARP(Adaptive and Asynchronous Rendezvous Protocol)^[16]机制均对 Disco 机制进行改进, 但仅仅针对节点采用相同素数时如何降低探测延迟的问题, 而当节点采用不同素数时, 这些机制却还存在较高的探测延迟。实际上, Disco 是通过使用多组素数对来提高探测性能, 相同素数对出现概率较小, 与素数对的数量成反比, 然而由于 DTMSN 中节点连接时间普遍较短, Disco 可选的素数对还非常有限, 影响了探测性能。

ACPS(Adaptive Contact-Probing Scheme)^[17]是一种针对 DTMSN 设计的自适应连接探测机制。该机制通过对随机路点(RWP)^[18]移动模型统计特性研究, 估计节点在每次运动中连接到达率, 自适应地调整探测次数与探测时间, 但该机制没有考虑节点睡眠, 能耗问题未得到解决。

本文在 Disco 和 ACPS 研究基础上, 提出一种高效的 DTMSN 异步探测机制(EAPS)。该机制基于低能耗的传感器网络中小素数周期将不会被选择的原则, 提出了基于互质周期对的时隙睡眠方式, 解决了低延迟条件下 Disco 素数对不足的问题; 并根据远离中心区域的节点相遇概率将低于出现概率的特点, 通过对节点运动区域的合理划分和周期对的优化选择, 更有效地降低了节点能耗。仿真结果表明, 与现有的 ONDS, Disco, U-Connect, AARP 相比, EAPS 能够在低能耗下实现更高的探测成功率与更低的探测延迟。

2 网络模型及问题描述

2.1 网络模型

如图 1 所示, 假设在网络初始状态下, 有 N 个传感器节点随机分布在一个 $a \times a$ 的 2 维正方形区域 A 内, 所有节点的通信半径为 R , 同时假设 DTMSN 还具有如下性质:

(1)所有节点的运动规律都服从 RWP 移动模型: 传感器节点在空间 A 内随机选取目的点 D , 并

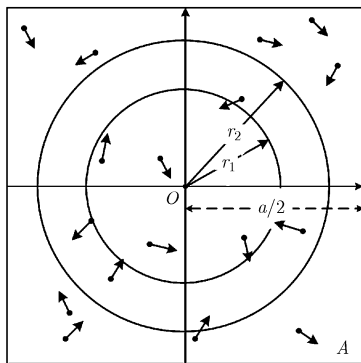


图 1 DTMSN 网络模型

从当前位置 S 以恒定速度 V 运动到目的点 D , 到达后 T 时间段内保持静止, 由此完成一次运动, 如此重复。所有传感器节点运动相互独立, 每次运动 V 从 $(1, V_{\max})$ 中随机选取, T 从 (T_{\min}, T_{\max}) 中随机选取;

(2)节点能够获知与中心点 O 的距离; 在大多数基于预测概率的 DTMSN 路由机制^[19]中, 节点一般都能获取与中心点的相对距离;

(3)初始状态下所有节点非同步, 每个节点内部设有定时器, 能够完成计时功能。

2.2 问题描述

在 RWP 移动模型下, 大量仿真实验表明, 节点间连接时间普遍较短, 并且受节点通信距离 R 和平均速度 \bar{V} 比值的影响很大, 而受其它因素影响却很小, 本文将 R 和 \bar{V} 的比值称为连接时间因子 ε 。

图 2 给出了不同 ε 下节点连接时间的统计概率分布, 可以看出 ε 越小, 曲线达到平稳状态就越快, 平均连接时间也越短。当 ε 分别取 10, 8, 6, 4, 2 时, 统计的平均连接时间分别为 14.98 s, 12.06 s, 8.93 s, 6.1 s, 2.98 s, 如果节点探测延迟较大, 将会严重影响探测性能。因此, DTMSN 连接探测机制设计时, 需要考虑到以下 2 个方面: (1)合理降低探测延迟, 保证节点具有较高的探测成功率; (2)有效的睡眠机制, 降低探测能耗。

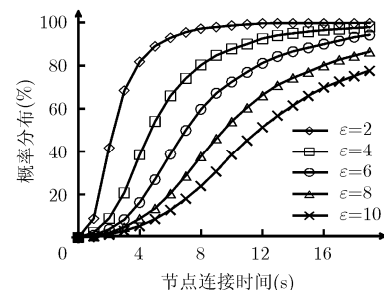


图 2 不同 ε 下节点连接时间概率分布

本文借鉴 Disco, 采用基于中国剩余定理的时隙睡眠机制来实现连接探测。由于 Disco 存在一些不足: (1)由于节点连接时间普遍较短时, 可使用的周期对数量较少, 出现相同周期对的概率较大, 存在较大概率的探测错失; (2)Disco 没有针对 DTMSN 而设计, 缺乏对节点分布及相遇特性的考虑。因此, 在设计 EAPS 时, 主要考虑以下 2 个方面: (1)合理增加周期对数量, 以解决 Disco 素数周期对不足的问题; (2)对网络进行区域合理划分与周期对优化选择, 进一步提高探测性能。

3 EAPS 连接探测机制

3.1 基于中国剩余定理的时隙睡眠机制

EAPS 借鉴 Disco, 采用基于中国剩余定理的时

隙睡眠机制。简化的中国剩余定理可以描述为：设有正整数 TN_1, TN_2, C_1, C_2 ，并且 C_1, C_2 互质，则一次同余方程组： $X \equiv TN_1 \pmod{C_1}$ ， $X \equiv TN_2 \pmod{C_2}$ ，有整数解，并在 $C_1 \times C_2$ 内唯一；

假设所有节点采用相同时隙时长，并能记录自身时隙号 tn 。每个节点选择一个整数 c 作为唤醒周期(简称周期)，即当前时隙号 tn 能够被 c 整除时，节点被唤醒。当两个节点相遇，节点 A 采用周期 c_1 ， tn_1 为其当前时隙序号，节点 B 采用周期 c_2 ， tn_2 为其当前时隙序号。根据中国剩余定理，如果 c_1 与 c_2 互质，在 $c_1 \times c_2$ 个时隙内，两节点能够某一时隙同时被唤醒，完成互相探测。

3.2 互质周期对选取

EAPS 采用互质周期对的时隙睡眠方式，不仅保证了节点成功探测，还能提供更多周期对。为了进行更清晰的描述，这里给出一些常用名词：

- (1)主周期：周期对中较小的周期；
- (2)辅周期：周期对中较大的周期；
- (3)互质周期对：主、辅周期互质的周期对；
- (4)周期对互质：两周期对的 4 个周期进行自由组合后，产生新的 4 组周期中至少存在一组周期互质。

例如，在周期对(14,53)中，主、辅周期分别为 14, 53，由于 14, 53 彼此互质，所以称该周期对为互质周期对；对于两个周期对(13,71), (14,53)，至少存在 13 与 14 互质，所以称这两个周期对彼此互质。

根据中国剩余定理，在足够时间内节点间能够成功探测，就必须保证两节点周期对互质；此外，如果出现两周期对的主周期不互质，将会有较长的探测延迟。因此，选取多组互质周期对应具备以下两个简单条件：(1)所有周期对的主周期彼此互质；(2)所有周期对均为互质周期对。

由于在 DTMSN 中，传感器节点不会选择能耗过高的素数周期，但可以引入由小素数组合形成的非素数周期，因为这些非素数必然与其他素数互质。如何合理引入这些非素数周期对，是 EAPS 选择互质周期对的关键问题。

根据 Disco 对周期对的分析，主周期是影响性能的关键因素，而辅周期只是为了保证两周期对互质，对性能影响较小，因此 EAPS 只在主周期中引入非素数。为了满足条件(1)，EAPS 在指定占空比下选择主周期时，需要保证所有非素数主周期彼此互质；为了满足成功探测条件(2)，辅周期则选择指定占空比下主周期对应的最小素数。

上述规则虽然保证了节点在足够时间下能够完

成探测，但并没有优化探测性能。例如在占空比 7.7%情况下，非素数主周期存在多种组合，典型的组合如： $\{14,15\}$ ， $\{16,21\}$ ， $\{21,22\}$ ，分别代表主周期较小、适中和较大情况。通过仿真分析，采用较小主周期时，节点探测成功率最低，而适中的最高。这是由于主周期选择 14 时，对应辅周期为 167，过大的辅周期将导致节点相遇时出现较大的探测延迟；而使用较大主周期的组合虽然避免了以上情况，但较大主周期增加了平均探测时延，也会降低探测性能。

根据上述分析，本文给出 EAPS 在指定占空比下互质周期对选择原则，图 3 显示了不同占空比下采用该原则的周期对数量，具体原则如下：

- (1)所有主周期彼此互质，辅周期选择不超过指定占空比下的最小素数辅周期；
- (2)选择主周期时，尽量避免出现较大辅周期；
- (3)避免大量采用较大的非素数主周期；
- (4)每个非素数主周期尽量由较少的素数组合而成，以增加非素数主周期数量。

3.3 网络区域划分

RWP 运动模型下不同区域节点出现的概率并不是均匀分布，在边长为 a 的正方形区域下，节点空间近似分布概率密度函数^[20]如式(1)所示：

$$f_{XY}(x, y) \approx \frac{36}{a^6}(x^2 - ax)(y^2 - ay), 0 \leq x, y \leq a \quad (1)$$

通过将中心坐标移至模型中心，并进行 2 维极坐标变换，获得半径为 r 的圆内节点的出现概率为

$$P = \int_0^{2\pi} \int_0^r \frac{9}{a^2} \left[\frac{1}{4} - \left(\frac{\rho}{a} \right)^2 + \left(\frac{\rho}{a} \right)^4 \times (\sin 4\theta)^2 \right] \rho d\rho d\theta, \quad r \in [0, a/2] \quad (2)$$

从式(2)中可以看出，当半径坐标 ρ 较小时，角坐标 θ 对节点概率分布的影响基本可以忽略。本文近似认为节点概率分布只与半径坐标有关，而忽略角坐标产生的影响。图 4 给出了使用表 1 默认参数时，不同半径区域下节点概率分布与节点相遇概率分布统计情况。可以看出，理论获得的节点概率分布与统计值基本吻合，在半径小于 $0.3a$ 区域内，节点概率分布的斜率小于节点相遇概率分布，说明节点出现概率还小于节点相遇概率；半径大于 $0.3a$ 后，节点出现概率开始高于相遇概率；而在半径大于 $0.4a$ 后，节点概率分布的斜率已经明显大于相遇概率斜率。为此，本文根据节点出现概率与相遇概率比值大小，将整个模型分为以下 3 个区域：

- (1)高相遇率区域：选择半径 $r_1 = 0.325a$ 的圆内区域。该区域内节点相遇概率为 72.8%，远大于 56.3%的出现概率，适合采用高占空比的周期对保

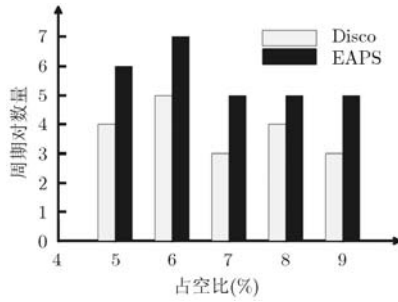


图3 不同占比下周期对数量对比

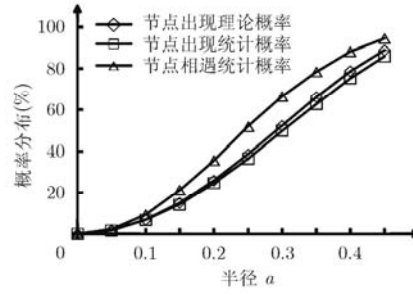


图4 不同半径下节点概率分布

证高探测成功率。

(2)平稳相遇区域：选择半径 $r_1=0.325a$ 与半径 $r_2=0.400a$ 的环形区域。该区域内节点相遇概率为15.5%，略小于19.1%的节点出现概率，使用恰当占比的周期对能获得合适的探测成功率和能耗。

(3)低相遇率区域：选择半径 $r_2=0.400a$ 的圆外区域，该区域节点相遇概率为11.7%，远小于26.6%的节点出现概率，适用于采用低占比的周期对节省不必要的能耗，而对探测成功率的影响较小。

4 仿真实验及性能分析

本文基于 Netlogo 平台仿真实现了 ONDS, Disco, U-Connect, AARP 及 EAPS 机制，并从以下4个方面进行了性能分析：

- (1)对各种机制的探测性能进行理论性分析；
- (2)对该网络模型下的仿真数据进行分析，比较5种机制的探测性能；
- (3)研究不同实验参数对5种机制产生的性能影响；
- (4)研究EAPS特有参数对该机制产生的性能影响。

考虑到传感器节点时间抖动因素，借鉴 Disco, 5种机制时隙时长 σ 均选用 10 ms；能量模型借鉴 ONDS 的能耗参数，即探测功率为 60 mW，监听功率为 45 mW，但不考虑节点睡眠、运算产生的能耗；平均能耗均为 10000 s 仿真时间下的节点平均能耗；不考虑探测碰撞对5种探测机制的性能影响。其它网络默认参数见表1，所有仿真结果均为50次独立仿真下的均值。

4.1 5种探测机制的理论性能分析

表2给出了5种探测机制的理论性能，可以看出在相同占比下，假定 AARP 取素数 p ，最大探测延迟为 $p\lfloor p/2 \rfloor$ ；U-Connect 的素数则约为 $3p/4$ ，较 AARP 更小，最大延迟约为 $9p^2/16$ ；Disco, EAPS 的主周期理论上可以取 $sp/2$ ，其中 $s \in (1,2)$ ，节点使用相同周期对时，最大延迟将达到 $s^2p^2/4(s-1)$ ，其中 $s \in (1,2)$ ，如果 s 趋近于1，最大时延将会很大，

表1 网络默认参数

网络参数	默认值
网络区域大小 ($m \times m$)	1000 × 1000
节点通信半径 $R(m)$	20
节点运动速度 $V(m/s)$	1-5
节点静止时间 $T(s)$	0
EAPS 中 $r_1(m)$, $r_2(m)$	325, 400
EAPS 中3个区域中占比(%)	9, 8, 5
其他4类机制的占比(%)	8
仿真时间(s)	10000

如果 s 趋近于 2，最大延迟将为 p^2 ，所以采用相同周期对时，这两种机制的最大探测延迟都将高于前两种；但采取不同周期对时，最大探测延迟将为 $s_i s_j p^2 / 4$ ，其中 $s_i, s_j \in (1,2)$ ，经过合理的选择 s_i, s_j ，最大探测延迟将会低于 U-Connect 及 AARP。

大多数机制的延迟分布并没有一个有效的计算方式，为了能够深入分析各探测机制的平均延迟，以下在占比8%及不考虑探测错失的情况下，对各种探测机制的平均延迟进行定性分析。ONDS 最大探测间隔为 5.18 s，由于服从均匀分布，其平均探测延迟为 2.59 s；Disco 可采用的周期对有 $\{(13,307), (17,47), (19,37), (23,29)\}$ ，若采用相同素数对(23,29)将产生最大延迟 6.67 s，仿真获得的平均延迟为 2.06 s，而采用不同素数对(17,47), (19,37)时，最大延迟虽然还有 3.23 s，但平均时延却只有 1.12 s；U-Connect 可选素数为 19，最大探测延迟为 3.61 s，平均延迟为 1.72 s；AARP 的素数取 23，最大探测延迟为 2.53 s，仿真获得的平均探测延迟为 1.33 s。

虽然 Disco 采用相同周期对时存在较大延迟，但不同周期对却能够产生更小的探测延迟，随着周期对数量增加，出现不同周期对的概率将越大，然而 Disco 可用周期对数量还较少，其探测性能还不理想。EAPS 则在 Disco 周期对的基础上去除了周期对(13,307)，并添加周期对(15,71)与(16,59)，有效地降低了探测延迟。

表 2 5 种机制探测性能理论值比较

机制	参数	占空比	最大延迟	平均延迟
ONDS	$k = E_p / E_i$	$(1 + 1/\sqrt{k})\sqrt{\sigma/D} - \sigma/D$	D	$D/2$
U-Connect	p	$(3p + 1)/2p^2$	p^2	无具体格式
AARP	$p, L = p \lfloor p/2 \rfloor$	$(p - 1)/p \lfloor p/2 \rfloor$	$p \lfloor p/2 \rfloor$	无具体格式
Disco, EAPS 相同周期对	$(sp, sp/(s - 1)), s \in (1, 2)$	$1/p$	$s^2 p^2 / (s - 1)$	无具体格式
Disco, EAPS 不同周期对	$(s_i p, s_i p / (s_i - 1)), (s_j p, s_j p / (s_j - 1))$	$1/p$	$s_i s_j p^2$	无具体格式

注：Disco, EAPS 中的参数 $sp, sp/(s-1)$ 只是一种近似表示，实际上需要从素数或新添非素数中选择合适整数。

值得指出的是，U-Connect, AARP 还存在着一定缺陷，由于素数的离散性，很难找到合适的素数来匹配指定占空比；此外，U-Connect, AARP 中节点如果采用不同素数，将丧失由降低时隙循环周期带来的性能优势，所以 U-Connect, AARP 不能很好适用于节点采用不同占空比的情况，而 EAPS 避免了上述问题。

4.2 5 种探测机制的仿真性能比较

在网络模型下各种机制的仿真实验结果如表 3 所示，可以看出 ONDS 探测成功率最低、时延最大，因为该机制采用单周期探测明显劣于其它几种机制，并且 ONDS 用于探测的占空比几乎为唤醒状态占空比的一半，而其它 4 种机制仅为 1/5，因此其能耗最高；Disco 相对 ONDS 有着较大的性能提高，但由于周期对数量还较少，导致了节点有较大概率采用相同周期对，所以还存在较高的探测错误率；U-Connect 由于不能像 Disco 一样获取到较小的主周期，其平均探测延迟较大，达到 1.69 s，但该机制避免了 Disco 中出现较大探测延迟的情况，其探测成功率超过了 Disco。AARP 通过减少时隙循环周期，较大地提高了探测性能，其探测成功率和延迟已接近 EAPS，但能耗却明显较大，这是由于素数有限，在占空比 8%附近 AARP 仅能获得占空比为 8.7%的素数 23。与以上几种探测机制相比，EAPS 则更容易在指定占空比下选择合适的周期对，并获取更高的探测成功率和更低的探测延迟。

4.3 占空比对 5 种探测机制的性能影响

图 5 中不难看出，随着占空比逐渐增大，各种

表 3 默认参数下仿真结果

性能	ONDS	Disco	U-Connect	AARP	EAPS
平均探测成功率(%)	91.2	93.5	96.2	96.9	97.2
平均探测延迟(s)	2.47	1.39	1.69	1.28	1.26
平均能耗(J)	43.1	37.7	37.3	41.8	37.1

机制的探测成功率出现了稳步上升，探测延迟逐渐降低，但也产生了更多的能耗。不同占空比下，ONDS 始终具有最低的探测成功率、最长探测延迟及最大能耗，Disco 比 ONDS 有更好的探测性能，但由于周期对数量较少，依然存在较高的探测错误率。U-Connect 的平均延迟处于较高水平，该机制避免了 Disco, EAPS 中出现较大探测延迟的情况，占空比足够大时，其探测成功率将超过 Disco。AARP 有着更好的探测性能，随着占空比增加，其成功率、探测延迟将接近 EAPS，并在占空比足够大时，成功率将能够超过 EAPS，但该机制在占空比 8%和 9%下都只能采用素数 23，与占空比理论能耗之间有着较大抖动。EAPS 通过对 Disco 进行改进，明显优于 Disco，在低占空比下，EAPS 比其它机制有着明显的性能优势，在较高占空比下，EAPS 依然存在略高的性能优势，然而占空比足够大时，成功率将会略低于 U-Connect, AARP，但此时成功率超过 97%，略微的性能差异已经并不重要，因此 EAPS 比其他机制拥有更好的探测性能。

4.4 ϵ 对 5 种机制产生的性能影响

从图 6 中可以看出，随着 ϵ 增大，节点连接探测成功率逐步上升，但也出现了更长的探测延迟。ONDS 具有最低的探测成功率及最长的探测延迟，并受 ϵ 影响最大。当 $\epsilon = 2$ 时，U-Connect 的探测成功率还低于 Disco，AARP 则已经超越 Disco，但两者的探测延迟还较高，EAPS 有着较明显的性能优势，这是由于 EAPS 增加了周期对数量，降低了节点使用相同周期对的概率，不同周期对能够产生更小的探测延迟，而相同周期产生的较大探测延迟由于探测错失而被忽略；随着 ϵ 增大，U-Connect, AARP 的探测成功率有明显提升，在 $\epsilon = 8$ 时已基本与 EAPS 相同，因为这两种机制避免出现较大探测延迟的情况，而 EAPS 只是降低了这类情况的出现概率；可以看到 $\epsilon = 10$ 时 U-Connect, AARP 成功率已经超越 EAPS，但其性能也基本达到饱和，成功率已达到 98%以上，略微的性能差异已不再重要。

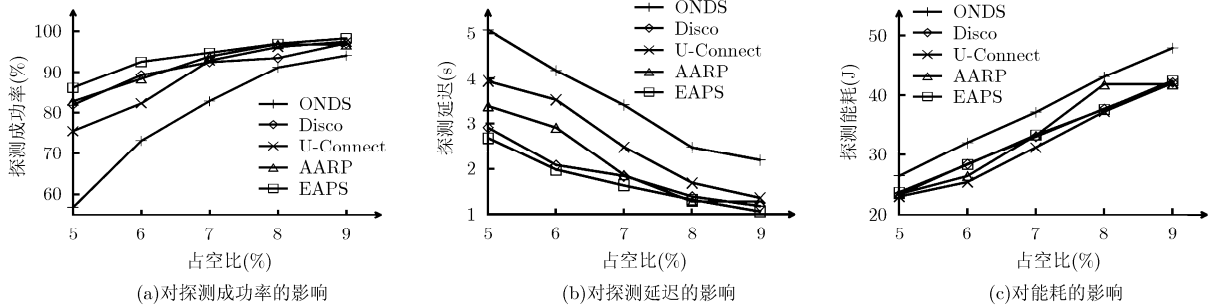


图 5 占空比对 5 种机制性能影响

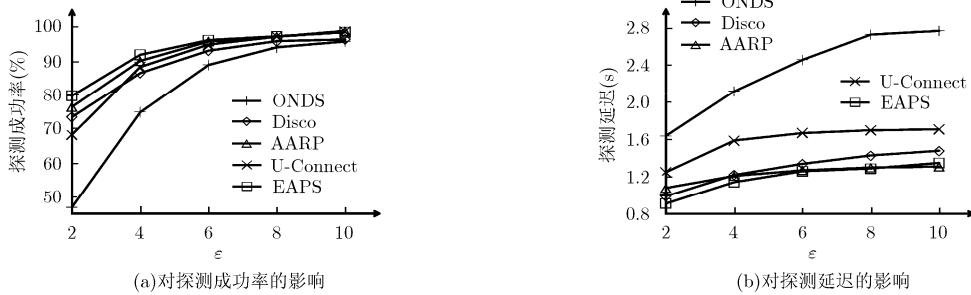


图 6 不同 ϵ 对 5 种机制性能影响

需要指出的是, 由于 ϵ 对能耗没有影响, 因此本组实验不对能耗进行分析。

4.5 低相遇率区域占空比对 EAPS 的性能影响

本组仿真主要研究低相遇率区域内, 不同占空比对 EAPS 产生的性能影响。从图 7 中可以看出, 随着占空比不断增大, 探测成功率有所提升, 探测延迟逐渐下降, 但探测能耗不断上升。其中, 在占空比 5%基础上, 每提高 1%, 总能耗将增加相当于默认参数下总能耗的 3%, 而相应条件下探测成率并没有明显提升, 维持在 97%到 98.3%之间, 探测延迟也维持在 1.12 s-1.26 s 之间。所以在低相遇率区域内采用较小的占空比, 能够对其他性能影响较小的情况下, 有效地降低能耗。当然, 占空比也不能无限制减小, 从图中可以看出, 当占空比逐渐减小时, 对成功率与探测延迟的影响越来越明显, 因此占空比也需要合理选择。

5 结束语

DTMSN 与传统 WSN 有着很大不同, 由于节点移动性、通信距离短以及分布稀疏特性, 导致节点连接时间往往较短, 以往的探测机制性能并不理想。本文提出了一种 DTMSN 节点异步探测机制 EAPS, 在已有研究的基础上, 主要的贡献如下:

(1) 针对 Disco 的不足, 提出了互质周期对的时隙睡眠方式, 给出了相应的周期对选择规则, 增加了周期对数量, 规避了出现辅周期较大的情况, 提高了探测性能。

(2) 针对 RWP 模型下节点概率分布以及相遇概率分布, 提出以不同半径将整个移动模型分成高相遇率、平稳相遇和低相遇率 3 个区域的方法。通过在高相遇率区域采用高占空比的周期对, 来提高探测成功率、降低探测延迟, 同时在低相遇率区域采用低占空比的周期对, 降低能耗, 进一步提高了网络性能。

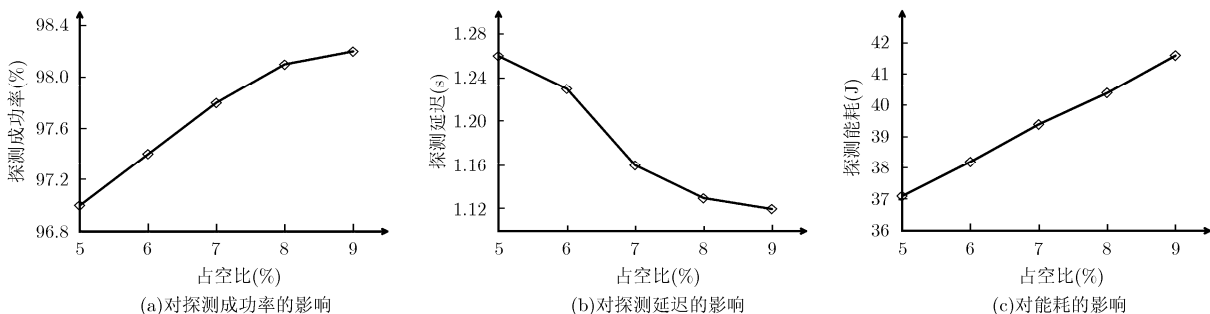


图 7 低相遇率区域占空比对 EAPS 性能影响

参 考 文 献

- [1] Fall K. A delay-tolerant network architecture for challenged internets[C]. SIGCOMM 03, Karlsruhe, Germany, Aug. 25–29, 2003: 27–34.
- [2] Akyildiz I, Su W, Sankarasubramania Y, *et al.* A survey on sensor networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8): 102–114.
- [3] Huang P, Chen H, Xing G, *et al.* SGF: a state-free gradient-based forwarding protocol for wireless sensor networks[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2009, 5(2): 1–25.
- [4] Chen H, Martins M H T, Huang P, *et al.* Cooperative node localization for mobile sensor networks[C]. Proceedings of 2008 International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC 2008), Shanghai, China, Dec. 17–20, 2008: 302–308.
- [5] Martins M H T, Huang H, and Sezaki K. OTMCL: orientation tracking-based monte carlo localization for mobile sensor networks[C]. Proceedings of the Six International Conference on Networked Sensing Systems (INSS'09), USA, June 17–19, 2009: 151–158.
- [6] Chen H, Deng P, Xu Y, *et al.* A novel localization scheme based on RSS data for wireless sensor networks[C]. Proceedings of Advanced Web and Network Technologies, and Applications, Harbin, China, 2006: 315–320.
- [7] Qin S, Feng G, and Zhang Y D. How contact probing affects the transmission capacity and energy consumption in DTNs[C]. 2011 IEEE International Conference on Communications, Kyoto, Japan, June 5–9, 2011: 3030–3035.
- [8] Qin S, Feng G, and Zhang Y D. How the contact-probing mechanism affects the transmission capacity of delay-tolerant networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(4): 1825–1834.
- [9] You L Z, Yuan Z M, Yang P L, *et al.* ALOHA-like neighbor discovery in low-duty-cycle wireless sensor networks[C]. 2011 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Cancun, Quintana Roo, March 28–31, 2011: 749–754.
- [10] Vasudevan S, Adler M, Goechel D, *et al.* Efficient algorithms for neighbor discovery in wireless networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 10.1109/TNET. 2012.2189892.
- [11] Yuan Z M, You L Z, Li W, *et al.* History-aware adaptive backoff for neighbor discovery in wireless networks[C]. Seventh International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN), Beijing, China, Dec. 16–18, 2011: 174–181.
- [12] Yang D M, Shin J M, Kim J, *et al.* An energy-optimal scheme for neighbor discovery in opportunistic networking[C]. 6th IEEE Conference on Consumer Communications and Networking Conference (CCNC2009), Las Vegas, Nevada, USA, Jan. 10–13, 2009: 951–952.
- [13] Yang D M, Shin J M, Kim J, *et al.* Asynchronous probing scheme for the optimal energy-efficient neighbor discovery in opportunistic networking[C]. 7th Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2009), Galveston, Tx, USA, March 9–13, 2009: 1–4.
- [14] Dutta P and Culler D. Practical asynchronous neighbor discovery and rendezvous for mobile sensing applications[C]. Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems, New York, USA, Nov. 5–7, 2008: 71–84.
- [15] Arvind K, Karthik L, and Ragunathan R. U-connect: a low-latency energy-efficient asynchronous neighbor discovery protocol[C]. Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks, New York, NY, USA, April 12–16, 2010: 350–361.
- [16] Ko H, Oh S, and Kim C. Adaptive, asynchronous rendezvous protocol for opportunistic networks[J]. *Electronic Letters*, 2012, 48(8): 462–464.
- [17] 杨奎武, 郑康锋, 钮心忻, 等. 一种延迟容忍移动传感器网络自适应连接探测机制[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(6): 1282–1289.
- Yang K W, Zheng K F, Niu X X, *et al.* An adaptive contact probing scheme of delay-tolerant mobility sensor network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(6): 1282–1289.
- [18] Hyytiä E, Lassila P, Nieminen L, *et al.* Spatial node distribution of the random waypoint mobility model with applications[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2006, 5(6): 680–694.
- [19] 杨奎武, 郑康锋, 杨义先, 等. 基于运动状态的延迟容忍移动传感器网络数据传输策略[J]. *通信学报*, 2011, 31(11): 138–146.
- Yang K W, Zheng K F, Yang Y X, *et al.* Motion state-based data delivery scheme of delay tolerant mobile sensor networks[J]. *Journal on Communications*, 2011, 31(11): 138–146.
- [20] Bettstetter C, Hartenstein H, and Prez-Costa X. Stochastic properties of random waypoint mobility model[J]. *Wireless Networks*, 2004, 10(5): 555–567.
- 李文霖：男，1986 年生，博士生，研究方向为延迟容忍传感器网络及其安全技术。
- 郑康锋：男，1975 年生，副教授，硕士生导师，研究方向为网络与信息安全。
- 张冬梅：女，1972 年生，副教授，硕士生导师，研究方向为传感器网络安全。