

一种延迟容忍移动传感器网络自适应连接探测机制

杨奎武^{*①②} 郑康锋^① 钮心忻^① 杨义先^① 郭世泽^①

^①(北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室信息安全中心 北京 100876)

^②(解放军信息工程大学电子技术学院 郑州 450004)

摘要: 连接探测效率对延迟容忍移动传感器网络(Delay-Tolerant Mobility Sensor Network, DTMSN)的性能有着重要的影响。该文在对随机路点(Random Way-Point, RWP)移动模型统计特性研究的基础上,提出一种面向RWP的DTMSN自适应连接探测机制(Adaptive Contact-Probing Scheme, ACPS)。其基本思想是节点根据每次移动过程中连接到达率的不同,自适应地调整连接探测次数和探测时间,通过提高探测效率和探测准确性来降低探测能量开销和连接发现延迟。仿真结果表明,与固定周期探测机制(Fixed-cycle Probing Scheme, FPS)相比,ACPS能够以较低的能量开销取得更高的探测成功率和更短的连接发现延迟。

关键词: 延迟容忍移动传感器网络; 连接探测; 随机移动模型

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)06-1282-08

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01119

An Adaptive Contact Probing Scheme of Delay-tolerant Mobility Sensor Network

Yang Kui-wu^{①②} Zheng Kang-feng^① Niu Xin-xin^① Yang Yi-xian^① Guo Shi-ze^①

^①(ISC of State Key Lab of Networking and Switching Technology,

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

^②(Institute of Electronic Technology, Information Engineering University, Zhengzhou 450004, China)

Abstract: The efficiency of contact probing has an important impact on the performance of Delay-Tolerant Mobility Sensor Network (DTMSN). An Adaptive Contact Probing Scheme (ACPS) of DTMSN is proposed, which is based on the study of stochastic properties of Random Way-Point (RWP) mobility model. The main idea of ACPS is to adjust adaptively the time and the number of contact probing according to the arrival rate of contact arrival process. The scheme can effectively deduce the probing energy cost and contact discovery delay by improving the probe efficiency and accuracy. Simulation results show that the proposed ACPS has higher discovery ratio and lower discovery delay than the Fixed-cycle Probing Scheme (FPS).

Key words: Delay-Tolerant Mobility Sensor Network (DTMSN); Contact probing; Random mobility model

1 引言

近年来,延迟容忍移动传感器网络(DTMSN)^[1]由于其广泛的适用性和广阔的应用前景而备受关注。在DTMSN网络中,由于节点的移动性或部署的分散性等原因,使得网络具有间歇连通的特点,即网络中节点之间大多不存在端到端的连通路径,只有当节点移动到彼此通信范围之内时才能完成连接。DTMSN的数据传输正是通过节点间的这种机会性连接来完成的。为了保证这种机会性数据交互能够及时进行,节点通常不得不采用持续、周期性

发送探测(beacon)帧的办法来检测自身是否与其他节点间存在连接,从而消耗大量能量,严重影响网络寿命^[2]。

当前,对DTMSN的研究主要集中在路由技术领域,并取得了较多的研究成果,如文献[3-6],而对DTMSN连接探测机制的研究却很少,如文献[7,8]等已有的一些传感器网络连接探测机制也主要是针对静态或全局连通的网络而设计的。在无线网络中,最常用的连接探测方法是固定周期探测机制(FPS),即节点以固定周期发送 beacon 帧,以此来完成自身连接探测,当其接收到其他节点的探测应答后则表明连接存在,否则连接不存在,该方法在 Bluetooth 和 ZigBee 等短距离无线通信中普遍应用。连接探测机制主要有两类:同步探测机制和异步探测机制。同步探测机制,如文献[9,10]等给出的方法,虽然这

2010-10-18收到,2011-02-28改回

国家自然科学基金(60821001, 61070204),国家重大科技专项(2009ZX03004-003-03)和中央高校基本科研业务费专项(2010PTB-05-03)资助课题

*通信作者: 杨奎武 ykw.ieu@gmail.com

种机制具有探测功耗低、网络寿命长等优点，但是在动态网络中实现全网同步通常比较困难，并且这种机制有着连接发现延时的不足；异步探测机制，如文献[8,11-15]等，这些机制易于实现，但其连接探测能量消耗却往往高于同步机制一个数量级^[16]。为了降低异步连接探测过程的能量消耗，研究人员将休眠机制引入到节点当中，并通过降低节点 duty-cycle 的方法来节省能量开销，但这种方法在网络拓扑结构快速变化的条件下，很难实现较高的连接探测成功率。

本文在对随机路点(RWP)统计特性^[17]分析研究的基础上，提出一种能量有效的自适应连接探测机制(ACPS)，该机制主要是根据 RWP 中节点分布的概率密度对其移动过程中的连接到达率和连接次数进行预测，并以此作为节点连接探测次数和连接探测时间的计算参考，通过节点自适应的改变自身连接探测次数和探测时间达到节约能量开销和降低发现延迟的目的。

2 模型及问题描述

2.1 连接过程模型

文献[12]给出了连接过程模型(如图 1)。设网络中节点按照一定的算法进行 beacon 帧的广播，并在接收到其他节点的 beacon 帧后会通过应答来表明连接存在。当任意两个节点 A, B 移动到彼此通信范围内时(即使未彼此发现)，则认为 A, B 发生一次连接；节点在单位时间内与其他节点平均发生连接的次数称为连接到达率，通常用 λ 表示。节点间连接状态保持的时间 $t_d(i)$ 称为连接持续时间；节点相邻两次连接发生的时间间隔用 $t_c(i)$ 表示；beacon 帧的发送时刻用 I_n 表示，节点发送 beacon 帧的数量称为连接探测次数；从连接发生到节点探测到连接存在的时间间隔 t_d 称为连接发现延迟；两节点处于连接状态，但彼此都没有发送 beacon 帧发现对方，称为连接错失；节点所发现的连接次数与其真正连接发生次数的比值称为连接探测成功率。

2.2 网络模型

如图 2 所示，假定 DTMSN 初始时， N 个传感

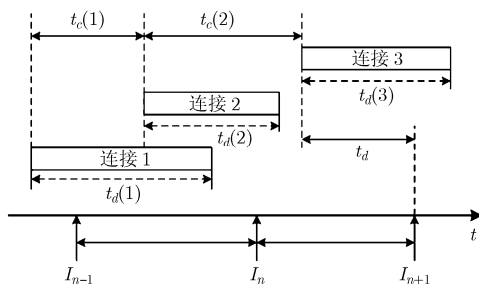


图 1 节点连接过程

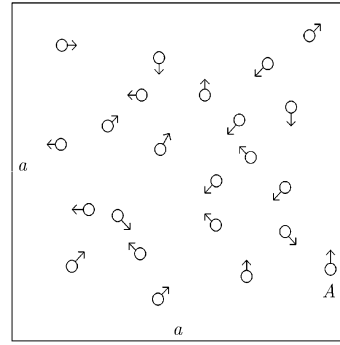


图 2 DTMSN 网络模型

器节点随机部署在一个 $a \times a$ 的正方形监测区域 A 内(箭头代表移动方向)。所有节点的移动规律都符合 RWP 移动模型，其移动规律描述为：节点在区域 A 内随机选取起始点 S 和目的点 D，随机选取 v 属于 (v_{\min}, v_{\max}) 作为此次移动的速度，并沿 S 到 D 的直线匀速移动到点 D，在点 D 随机选取一个等待时间 T_{pause} 属于 (T_{\min}, T_{\max}) 保持静止，这样一次移动过程结束，将本次移动的目的地作为下一次移动的起点，随机选择下一个目的点如此重复移动。网络中所有节点均遵循上述移动规律且相互独立，节点的移动过程如图 3 所示。为简化实验，除所有节点都符合 RWP 移动规律外，本文还假设 DTMSN 网络具有如下性质：

- (1)所有节点具有相同的通信半径 r ，并明确当前自身的运行速度 v 和目的地 D；
- (2)节点已知监测区域 A 的边长 a 及网络中节点的数量 N ，并假设节点等待时间 $T_{\text{pause}} = 0$ ；
- (3)节点内部设有定时器，可以完成计时功能；
- (4)暂不考虑网络环境及信道干扰等因素对通信的影响。

2.3 问题描述

由于在 DTMSN 网络中，数据大多是通过中间节点采用“存储-携带-转发”^[18]的方式进行传递，因此为了能够及时将数据路由至目的地并达到较高的

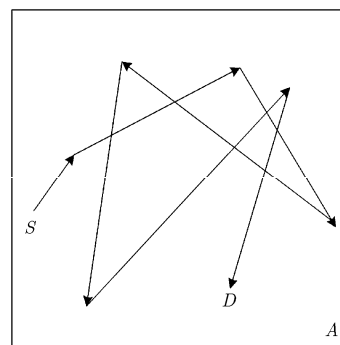


图 3 节点在 RWP 中的移动过程

传输成功率,就需要节点在连接探测过程中尽可能多,并及时地探测到存在的连接,同时尽量降低 beacon 帧的数量和提高探测的准确性,以降低能量开销和发现延迟。设计能量有效的连接探测机制实际上是在能量消耗和探测成功率之间寻找折中点^[19]。通常 DTMSN 连接探测机制需要满足以下 3 个要求:(1)准确预测连接数量,通过预测连接到达数量来适当安排 beacon 帧的发送数量,能够有效降低能量开销;(2)合理设定探测时间,提高探测准确性,有助于提高探测成功率并降低连接发现延迟;(3)探测算法简单,计算开销小,易实现。

3 自适应连接探测机制(ACPS)

3.1 RWP 节点空间分布

图 4(a)是 RWP 初始化时节点在正方形监测区域 A 中的分布情况,图 4(b)是网络运行 1000 s 后节点在 A 中的分布情况。从图中可以看出节点在移动过程中并不服从均匀分布,而是大多数节点都集中在 A 的中心区域。文献[20]给出了 RWP 在多边形区域下节点空间分布的概率密度函数和相关统计特性,其中在边长为 a 的正方形区域且静止时间 $T_{\text{pause}}=0$ 的条件下,节点空间分布概率密度函数如式(1)^[21]所示,从仿真图 4(c)中可以看出,越靠近监测区域中心,节点出现的可能性越大。

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

3.2 连接到达率及探测次数计算

如图 5(a)所示,假设节点在区域 A 中某次运行是以速度 $v \in (v_{\min}, v_{\max})$ 从源点 $S(x_S, y_S)$ 移动到目的点 $D(x_D, y_D)$,其所用的时间为 T ,由节点运行距离 L 和运行速度可得

$$T = L/v = \sqrt{(y_D - y_S)^2 + (x_D - x_S)^2} / v \quad (2)$$

由向量 SD 与 x 轴正向的夹角 θ 以及节点的起始位置,可得节点运行所在直线表达式为

$$y = y_S + \tan \theta \cdot (x - x_S) \quad (3)$$

其中 $\tan \theta = (y_D - y_S)/(x_D - x_S)$ 。设 S_D 为节点运行过程中其通信半径所覆盖的区域,利用式(1)可以计算出该运行区域中节点出现概率为

$$P_D = \iint_{S_D} f_{XY}(x,y)d\sigma \quad (4)$$

当 S_D 与 A 面积相等时, $P_D=1$ 。则在此次运行的 T 时间内节点所能够遇到的平均连接数为

$$E[Z] = (N-1) \times P_D = (N-1) \times \iint_{S_D} f_{XY}(x,y)d\sigma \quad (5)$$

其中 N 为监测区域 A 内节点的数量。文献[21]指出在正方形区域内节点平均运行距离 $E[L] = a/3$,因此当 $r \ll E[L]$ 时,可以忽略运行覆盖区域两端的半圆部分,可以近似认为 T 时间内节点所能遇到的平均连接数为

$$E[Z] = (N-1) \times P_D \approx (N-1) \times \iint_{D'} f_{XY}(x,y)d\sigma = (N-1) \times P_{D'} \quad (6)$$

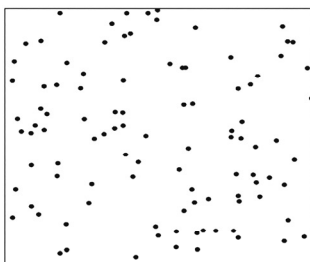
其中 D' 为图 5(a)中长方形的阴影区域, $P_{D'}$ 为节点在 D' 内出现的概率。考虑到传感器节点计算能力有限,可以进一步将 $P_{D'}$ 取近似值为

$$P_{D'} \approx 2r \times |S| \quad (7)$$

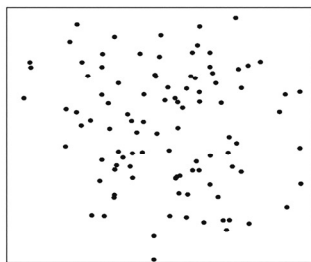
$|S|$ 为平面 xoy , 曲面 $f_{XY}(x,y)$ 以及平面 $y=y_S + \tan \theta \cdot (x - x_S)$ 所围城的截面 S 的面积(如图 5(b)中阴影部分所示),其中 $\min(x_D, x_S) \leq x \leq \max(x_D, x_S)$, $\min(y_D, y_S) \leq y \leq \max(y_D, y_S)$ 。将截面 S 投影到 xoz 平面后,令其投影区域 S' 的面积为 $|S'|$,如图 5(c)所示。将式(3)代入到式(1)中可得投影顶端曲线表达式为

$$z = f(x) = f(x,y) \Big|_{y=y_S + \tan \theta \cdot (x - x_S)} = \frac{36}{a^6}(x^2 - ax) \cdot ((y_S + \tan \theta \cdot (x - x_S))^2 - a(y_S + \tan \theta \cdot (x - x_S))), \quad \min(x_D, x_S) \leq x \leq \max(x_D, x_S) \quad (8)$$

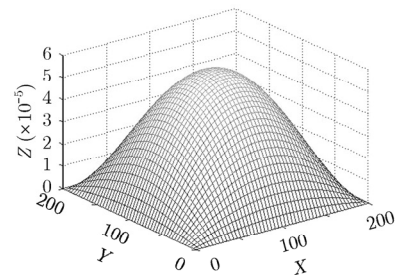
令 $c = \tan \theta, b = y_S - c \cdot x_S$,则由式(8)可得截面 S 在 xoz 平面上投影的面积 $|S'|$ 为



(a) RWP 初始化时节点分布图



(b) RWP 运行 1000 s 后节点分布



(c) 节点空间分布概率密度函数

图 4 RWP 节点空间分布及其统计特性

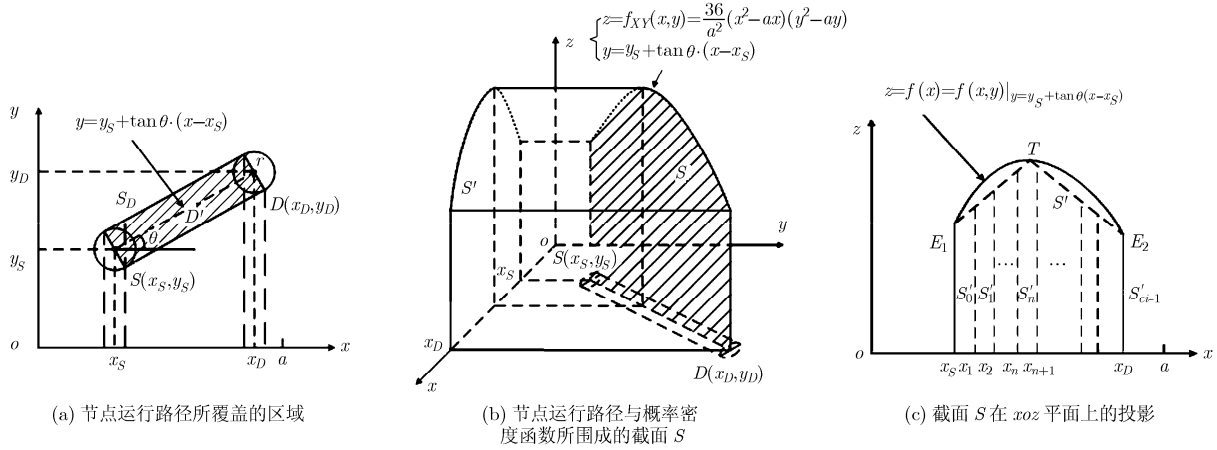


图 5 节点连接到达率及探测时间计算示意图

$$\begin{aligned}
 |S'| &= \left| \int_{x_S}^{x_D} f(x) dx \right| \\
 &= \left| \frac{36}{a^6} \int_{x_S}^{x_D} (x^2 - a \cdot x)[(b + cx)^2 - a \cdot (b + cx)] dx \right| \\
 &= \left| \frac{36}{a^6} \left[\frac{c^2}{5} (x_D^5 - x_S^5) + \frac{(2bc - ac - ac^2)}{4} (x_D^4 - x_S^4) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{(b^2 - ab - 2abc + a^2c)}{3} (x_D^3 - x_S^3) - \frac{(ab^2 - a^2b)}{2} (x_D^2 - x_S^2) \right] \right| \quad (9)
 \end{aligned}$$

由于 S' 为 S 在 xoz 平面上的投影，所以有

$$|S| = |S'| / \cos \theta \quad (10)$$

由式(2)，式(6)，式(7)，式(10)可得节点在 T 时间内的平均连接到达率为

$$\lambda = E[Z] / T = ((N - 1) \times 2r \times |S'|) / (T \cdot \cos \theta) \quad (11)$$

通常情况下为了降低连接错失次数，要求 T 时间内节点 beacon 帧发送次数要大于连接发生次数，则我们设定在 T 时间内节点 beacon 帧发送次数为

$$\begin{aligned}
 C &= \lceil \varepsilon \times E[Z] \rceil = \lceil \varepsilon \lambda T \rceil \\
 &= \lceil \varepsilon \times (N - 1) \times 2r \times |S'| / \cos \theta \rceil \quad (12)
 \end{aligned}$$

其中 C 为式(12)向上取整后的整数， ε 为探测系数，通常取 $\varepsilon \geq 1$ 。在连接到达率一定时，可以通过调整探测系数来调整节点每次移动过程中 beacon 帧的发送数量。

3.3 探测时间计算

在确定连接到达率和连接探测次数后便可以计算 beacon 帧发送的时间，本文给出两种方法：等间隔探测和等概率探测。等间隔探测计算简单，容易实现，非常适用于计算能力受限的传感器节点；而等概率探测虽然计算相对复杂，但却充分考虑了节点在区域内的概率分布，有着更高的准确性。具体如下：

(1) 等间隔探测 (Equal-Interval Probing of ACPS, ACPS-EIP)：即在此次运行时间 T 内，beacon 帧发送的时间间隔相同，具体各探测时刻 I_i 为

$$\left. \begin{aligned}
 I_i &= I_{i-1} + T / C = I_{i-1} + 1 / \lceil \varepsilon \lambda \rceil, \quad C - 1 \geq i \geq 1 \\
 I_0 &= T / 2C = 1 / \lceil 2\varepsilon \lambda \rceil
 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

(2) 等概率探测 (Equal-Probability Probing of ACPS, ACPS-EPP)：即将节点运行覆盖区域依节点出现概率划分成 C 等份，当节点运行到各部分中点时进行连接探测。由式(7)，式(10)可知，将运行区域划分成概率相同的 C 等份也就是将图 5(c)中的投影 S' 划分成面积相同的 C 等份。为了避免利用高阶函数求解方法等分 S' 时带来的计算开销，在图 5(c)中可以将 xoz 上的投影曲线 $z = f(x)$ 的两个端点 E_1, E_2 同曲线的最高点 T 连接，用五边形 $x_S E_1 T E_2 x_D$ 的面积近似代替投影 S' 的面积(当边界点是最高点时为四边形)，并将其划分为面积相等的 $S'_0, S'_1, \dots, S'_{C-1}$ 共 C 个部分。设划分后各部分在 x 轴上对应的边界坐标为 $(x_S, x_1), (x_1, x_2), \dots, (x_n, x_{n+1}), \dots, (x_{C-1}, x_D)$ ，则探测时刻可表示为

$$\left. \begin{aligned}
 I_i &= I_{i-1} + [(x_{i+1} + x_i) - (x_i + x_{i-1})] / (2v \cos \theta), \\
 C - 1 &\geq i \geq 1, \quad x_C = x_D \\
 I_0 &= (x_1 - x_S) / (2v \cos \theta)
 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

3.4 ACPS 自适应连接探测步骤

ACPS 延迟容忍移动传感器网络自适应连接探测机制具体探测步骤如下：

步骤 1 系统初始化，将节点通信半径 r ，监测区域边长 a ，节点数量 N 及常数 ε 存储在节点内；

步骤 2 由于节点明确自身的速度，所以在每次移动速度变化的初始时刻，节点根据当前坐标 $S(x_S, y_S)$ ，目的地坐标 $D(x_D, y_D)$ 以及节点运行速度

v ，利用式(2)计算本次运行的时间 T ，当 $\varepsilon \cdot 2r \cdot Tv < 1/f_{XY}(a/2, a/2)$ (即探测次数小于 1) 时，设置 $C = 1$ ，跳转至步骤 4，否则进入步骤 3；

步骤 3 用式(6)，式(7)，式(9)，式(10)求解本次运行过程中可能遇到的平均连接数量 $E[Z]$ ，并利用式(11)，式(12)分别求解本次运行过程的连接到达率 λ 和探测次数 C ；

步骤 4 当采用 ACPS-EIP 时，利用式(13)确定探测帧的具体发送时刻；采用 ACPS-EPP 时首先利用近似求解的方法计算各等概区域的边界坐标，然后利用式(14)确定 beacon 帧发送时刻；

步骤 5 节点开始运行时，将定时器归零，根据步骤 4 中计算的探测时刻进行探测帧的发送计时；

步骤 6 节点运行到目的地后，跳转到步骤 2，重复执行。

4 仿真实验及性能分析

根据表 1 的实验参数，本文使用 ONE (Opportunistic Networking Environment) 模拟器，在 RWP 移动策略下，通过修改 EpidemicRouter 路由包仿真实现了 FPS、ACPS(ACPS-EIP 和 ACPS-EPP)3 种连接探测机制，并从连接探测成功率、节点平均 beacon 帧发送数量以及连接发现延时 3 方面对以上机制进行了性能比较，同时分析了在不同实验参数下各探测机制的性能变化。

需要指出的是，通常情况下节点的能量开销主要包括通信开销和计算开销两部分。文献[22]指出通常节点每发送 1 bit 数据近似等于 CPU 独立执行 2090 个时钟周期。在 ACPS 探测机制当中，由于节点每次移动过程中只进行一次探测次数以及探测时间的计算，且都采用近似的方法，计算量较小，因此计算开销与通信开销相比可以忽略，所以在连接探测过程中最主要的能量开销就是 beacon 帧的收发。因此仿真中忽略了节点运算所产生的能量消耗，而仅以平均节点发送 beacon 帧的数量作为节点能量开销的评价标准。实验以节点平均实际连接数量达到 100 时为结束时刻，实验数据为 50 次独立运行结果的均值(所有实验均以 ACPS-EIP 为参考，FPS 通过调整探测周期来满足探测成功率和探测次数的要求)。

4.1 3 种探测机制性能比较分析

在表 1 所示默认参数条件下，3 种探测机制的具体性能见表 2。

从表 2 中可以看出，尽管 FPS 在连接发现过程中发送了最多的 beacon 帧，但其探测成功率却是 3 种机制当中最低的，主要原因就在于 FPS 机制发送

表 1 仿真实验参数

监测区域半径 a	200 m
节点通信半径 r	3 m
节点数量 N	100
APCS 常数 ε	16
节点最大速度 v_{\max}	5 m/s
节点静止时间 T_{pause}	0 s
FPS 探测周期	1.5 s

表 2 默认参数下仿真实验结果

	FPS	ACPS-EIP	ACPS-EPP
探测成功率(%)	88.61	92.28	92.67
节点平均发送探测帧数量	1126	1046	1043
连接发现延时(s)	0.484	0.446	0.434

beacon 帧的时间间隔相同，没有考虑节点运行覆盖区域的连接发生概率，所以即便当节点在连接发生概率低的边缘区域移动时，节点仍然频繁地发送 beacon 帧，造成大量的能量浪费，却不能提高探测成功率。而与此相反，ACPS-EIP 和 ACPS-EPP 机制在连接探测过程中充分考虑了节点运行区域连接发生的概率，在连接发生概率高的地方提高探测频率，在连接发生低的地方降低探测频率，因此提高了探测效率，所以能够在探测开销相对较小的情况下却有着更高的探测成功率。由于 ACPS-EPP 机制对探测时间的计算更加精确，因此其效果也要好于 ACPS-EIP 机制，在探测开销基本相同的条件下有着更高的探测成功率。从连接发现延迟的角度来看，3 种机制中 ACPS-EPP 机制的发现延迟最低，FPS 的发现延迟最高，主要是因为连接发生概率较大的区域 ACPS-EPP 和 ACPS-EIP 两种机制提高了探测频率，因此相应地降低了连接发现延迟，同样由于 ACPS-EPP 对于探测时间的计算更为合理，所以发现延迟也更低。虽然 ACPS 的两种机制是通过相对较多的计算来换取性能提高的，但是与节省的探测能量相比，计算的能量开销可以基本忽略不计；同时由于相关计算都是在每次移动起始时刻完成，因此对连接发现延时也不产生影响。

4.2 节点通信半径对性能的影响

当节点通信半径变化时，3 种机制的具体性能如图 6 所示。其中图 6(a)，6(b)中分别给出的是在平均每个节点发送 beacon 帧相同的情况下 3 种机制探测成功率和连接发现延迟的曲线，图 6(c)中给出的是在探测成功率相同的情况下，3 种机制平均每

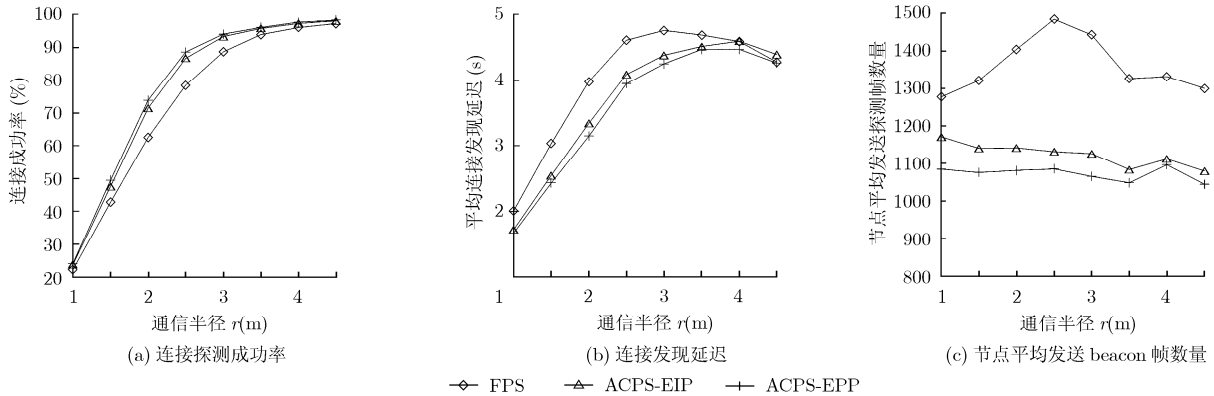


图 6 节点通信半径变化对网络性能的影响

个节点发送 beacon 帧的数量。从图 6(a), 6(b)中可以看出, 通信半径的加大, 使得节点间连接持续的时间也相应的变长, 因此节点连接探测成功率也随之加大。当通信半径较小时, 由于连接持续时间短, 因此连接发现延迟也很短, 随着通信半径的增加, 连接发现的延迟也有所增加, 但是当通信半径大到一定值时, 由于 beacon 帧的数量增加、探测时间间隔的降低, 连接发现延迟又逐渐降低。从图 6(c)中可以看出在探测成功率相同的条件下, 随着通信半径的变化, ACPS 两种机制的平均探测次数变化不大, 主要是因为通信半径加大时, 节点间连接次数也相应的增加, 此时节点探测的频率也相应地提高, 因此反映在 beacon 帧数量上变化并不明显; 但对 FPS 机制而言, 当通信半径较小时, 为了能够达到 ACPS 机制的探测成功率, 必须加大 beacon 帧的发送数量, 而随着通信半径的加大, 节点间连接持续时间的增长, 节点在适当降低探测次数情况下仍然能够保证较高的探测成功率。综上, 在通信半径变化的情况下, ACPS 两种机制有着较好的性能, 而 FPS 机制性能最差。

4.3 节点速度对性能的影响

在节点最大速度变化时, 3 种机制具体性能如图 7 所示。其中图 7(a), 7(b)中分别给出的是平均每个节点发送 beacon 帧相同的情况下各机制探测成功率和连接发现延迟的曲线, 而图 7(c)给出的是在探测成功率相同的情况下, 3 种机制平均每个节点发送 beacon 帧的数量。从图 7(a), 7(b)中可以看出, 节点速度的提高, 导致节点间连接持续时间迅速降低, 对于 ACPS 两种机制而言, 速度的增加也会使得探测频率提高, 因此节点探测成功率基本没有变化; 但对于 FPS 而言, 虽然探测次数也在提高, 但由于性能不如 ACPS, 因此直接导致节点连接探测成功率迅速降低。同样, 由于节点间连接持续时间的降低使得 3 种机制的连接发现延迟也相应降低。从图 7(c)中可以看出在探测成功率相同的条件下,

由于节点速度增加, 使得节点连接到达率迅速增加, 对于 ACPS-EPP 和 ACPS-EIP 探测机制而言, 虽然节点发送探测帧的数量也相应增加, 但由于仿真运行的时间变短, 所以总体上 beacon 帧的数量有所降低; 而 FPS 探测机制为能够保持与 ACPS-EIP 同样的探测成功率, 不得不大幅度提高 beacon 帧的数量, 在一些情况下, ACPS 能够节省近 50% 的探测功耗。

4.4 节点密度对性能的影响

当区域 A 内节点数量改变时, 3 种机制的性能如图 8 所示。其中图 8(a), 8(b)给出的是平均每个节点发送 beacon 帧相同的情况下各机制探测成功率和连接发现延迟的曲线, 而图 8(c)中给出的是在探测成功率相同的情况下, 各机制平均每个节点发送 beacon 帧的数量。从图 8(a), 8(b)中可以看出, 节点密度的增加, 使得连接到达率相应地增加, 同时探测次数也增加, 因此探测成功率逐渐提高, 并且连接发现延迟逐渐降低。从图 8(c)中可以看出在探测成功率相同的条件下, 随着节点密度的提高, 对于 ACPS-EPP 和 ACPS-EIP 机制而言, 探测时间间隔相应降低, 因此导致 beacon 帧数量基本服从线性增长, 而 FPS 机制为了能够达到与 ACPS-EIP 相同的探测成功率, 需要更大程度上提高 beacon 帧的发送数量。

4.5 探测系数 ε 对 ACPS 性能的影响

图 9 给出的是当探测系数 ε 变化时, ACPS 机制性能变化曲线。由图 9(a)可见, 随着探测系数 ε 的增加, 节点探测频率随之提高, 连接探测成功率也相应提高, 但提高速度会逐渐降低。同时由于探测频率的提高也会使得连接发现延迟随之降低, 如图 9(b)所示, 连接发现延迟降低速度接近线性。由式 (12)可知节点探测次数与 ε 成正比, 图 9(c)也正体现了这一点。因此, 根据实际网络情况(节点通信半径、节点速度、节点密度等), 可以通过调节探测系数 ε 值来达到探测能量与探测成功率间的折中。

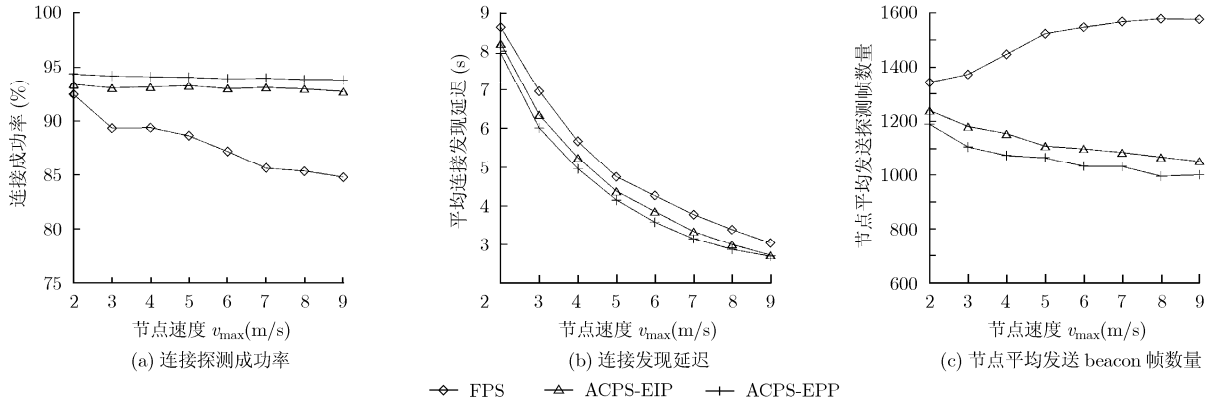


图 7 节点速度变化对网络性能的影响

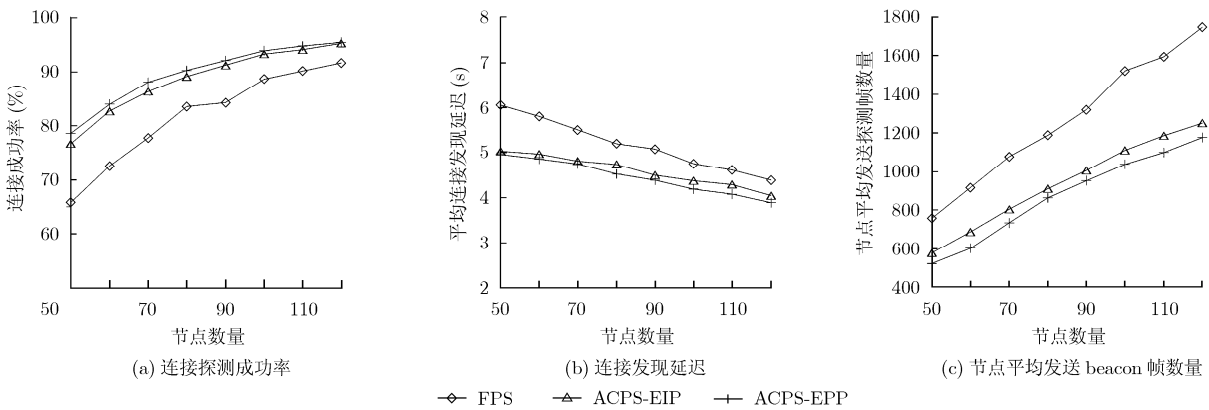


图 8 节点密度变化对网络性能的影响

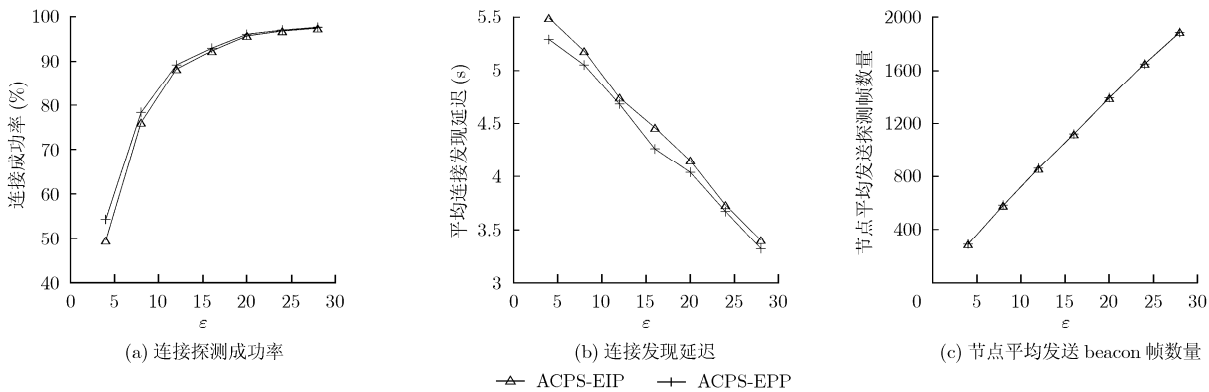


图 9 ϵ 对 ACPS 性能的影响

5 结束语

DTMSN 与传统的 WSN 有着很大的不同, 其中最突出的特点就是节点间的机会连通和延迟容忍特性, 这些特性也使得以往 WSN 研究中的很多连接探测机制在 DTMSN 中的表现并不好。本文提出的基于节点连接到达率和连接次数的自适应连接探测机制(ACPS), 能够较好地完成 DTMSN 的连接探测功能。本文主要贡献有:

(1) 针对 RWP 移动模型, 以节点分布概率为基

础, 准确预测节点运行过程中的连接达到率和可能发生的连接次数, 并在此基础上自动调整 beacon 帧的发送数量。有效控制了探测能量开销, 提高了探测效率和探测成功率。

(2) 在确定 beacon 帧发送间隔时, 提出 ACPS-EIP 和 ACPS-EPP 两种机制。ACPS-EIP 具有计算简单, 实现容易的特点, 而 ACPS-EPP 则有着计算准确的优势。这两种机制能够有效降低节点连接发现延时和提高探测成功率。

仿真实验表明, 与 FPS 相比, ACPS 可以以较

低的发现延迟和探测开销达到较高的连接探测成功率, 并可以根据网络特点调整探测系数 ε 来达到最佳的性能功耗比, 非常适用于 DTMSN 网络。由于 ACPS 机制要求节点始终处于“监听-探测”状态, 没有充分利用节点的休眠来更进一步降低能量开销, 因此将休眠机制引入到 ACPS 当中将是下一步研究的重点。

参考文献

- [1] Falik. A delay-tolerant network architecture for challenged internets[C]. SIGCOMM 03, Karlsruhe, Germany, Aug. 25-29, 2003: 27-34.
 - [2] Su Jing, Chin A, and Popivanova A, *et al.*. User mobility for opportunistic Ad-Hoc networking[C]. 6th IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA2004), English Lake District, UK, Dec. 2004: 41-50.
 - [3] Wu H Y, Wang Y, Dang H, and Lin F. Analytic, simulation, and empirical evaluation of delay/fault-tolerant mobile sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(9): 3287-3296.
 - [4] Wang Y and Wu H Y. Replication-based efficient data delivery scheme (RED) for delay/fault-tolerant mobile sensor network (DFT-MSN)[C]. 4th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW'06), Washington, USA, 2006: 485-489.
 - [5] Xu Fu-long, Liu Ming, and Cao Jian-nong, *et al.*. A motion tendency-based adaptive data delivery scheme for delay tolerant mobile sensor networks[C]. The 51st Annual IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'09), Hawaii, USA, 2009: 1-6.
 - [6] 张可, 曾家智, 刘伟. 延迟容忍移动传感器网络中基于概率复制的数据传输策略及其性能研究[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(3): 677-681.
Zhang Ke, Zeng Jia-zhi, and Liu Wei. Data delivery scheme of DTMSN based on probability replication and its performance research[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(3): 677-681.
 - [7] Angelosante D, Biglieri E, and Lops M. A simple algorithm for neighbor discovery in wireless networks [C]. ICASSP 2007, Honolulu, HI, 2007, Vol. 3: 169-172.
 - [8] Yang Dong-min, Shin Jong-min, and Kim Jeonggyu, *et al.*. An energy-optimal algorithm for neighbor discovery in wireless sensor networks[C]. 6th IEEE Conference on Consumer Communications and Networking Conference (CCNC2009), Las Vegas, Nevada, USA, 2009: 951-952.
 - [9] Kohvakka M, Suhonen J, and Kuorilehto M, *et al.*. Energy-efficient neighbor discovery protocol for mobile wireless sensor networks[J]. *Ad hoc networks*, 2009, 7(1): 24-41.
 - [10] Zhang Z. Performance of neighbor discovery algorithms in mobile Ad hoc self-configuring networks with directional antennas[C]. IEEE MILCOM2005, Atlantic City, NJ, October 2005: 17-20.
 - [11] Yang Dong-min, Shin Jong-min, and Kim Jeonggyu, *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, 2009: 1-4.
 - [12] Wang W, Srinivasan V, and Motani M. Adaptive contact probing mechanisms for delay tolerant applications[C]. ACM MobiCom07, Montreal, Quebec, Canada, 2007: 230-241.
 - [13] Cornejo A, Lynch N, and Viqar S, *et al.*. Neighbor discovery in mobile ad hoc networks using an abstract MAC layer[C]. 47th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton), Monticello, Illinois, USA, September 2009: 1460-1467.
 - [14] Angelosante D, Biglieri E, and Lops M. Neighbor discovery in wireless networks: a multiuser-detection approach[C]. Information Theory and Applications Workshop(ITA2007), La Jolla, CA, 2007: 46-53.
 - [15] Kandhalu A, Lakshmanan K, and Rajkumar R. U-Connect: a low-latency energy-efficient asynchronous neighbor discovery protocol[C]. 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks, Stockholm, Sweden, April 2010: 350-361.
 - [16] Kohvakka M, Hannikainen M, and Hamalainen T D. Energy optimized beacon transmission rate in a wireless sensor network[C]. 16th Annual IEEE International Symposium Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC05), Berlin, Germany, 2005: 1269-1273.
 - [17] Hyytiä E, Lassila P, Nieminen L, and Virtamo J. Spatial node distribution of the random waypoint mobility model with applications[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2006, 5(6): 680-694.
 - [18] Jain S, Demmer M, and Patra R, *et al.*. Using redundancy to cope with failures in a delay tolerant network[C]. ACM SIGCOMM Computer and Communication Review, Philadelphia, PA, USA, 2005: 109-120.
 - [19] Wang Wei, Motani M, and Srinivasan V. Opportunistic energy-efficient contact probing in delay-tolerant applications [J]. *IEEE/ACM Transactions on Network*, 2009, 17(5): 1592-1605.
 - [20] Hyytiä E, Lassila P, and Virtamo J. Spatial node distribution of the random waypoint mobility model with applications [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2006, 5(6): 680-694.
 - [21] Bettstetter C, Hartenstein H, and Prez-Costa X. Stochastic properties of random waypoint mobility model [J]. *Wireless Networks*, 2004, 10(5): 555-567.
 - [22] Wander A S, Gura N, and Eberle H, *et al.*. Energy analysis of public-key cryptography for wireless sensor networks[C]. Proceedings of the Third IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications'05, Washington, DC, USA, 2005: 324-328.
- 杨奎武: 男, 1978年生, 讲师, 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, 研究方向为网络与信息安全。
 钮心忻: 女, 1963年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为数字版权技术。
 杨义先: 男, 1961年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为密码学与信息安全。
 郭世泽: 男, 1969年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为网络安全技术。