

延迟容忍传感器网络中基于移动协助的数据传输

李慧杰¹, 彭舰¹, 刘唐^{1,2}

(1. 四川大学 计算机学院, 四川 成都 610065; 2. 四川师范大学 基础教学学院, 四川 成都 610068)

摘要: 提出了基于移动协助的动态数据传输算法(MAD, movement-assisted adaptive data delivery)。在缓冲区域内设置数据缓存节点, 让基站在缓冲区内周期性地移动, 数据动态地复制给更有可能到达缓冲区并且剩余能量较高的节点, 然后基站在移动中将缓存节点中的数据进行收集。MAD 是由数据传输和队列管理 2 部分组成。前者根据节点的运动趋势和剩余能量计算节点的转发概率, 后者通过消息的生存时间和消息的最大复制数确定队列中消息发送的优先级及丢弃方法。仿真结果表明, 与其他策略相比, MAD 在传输成功率和网络寿命方面具有更好的性能。

关键词: 延迟容忍移动传感器网络; 数据收集; 移动协助; 动态数据传输

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)10-0181-11

Movement-assisted data delivery for delay tolerant mobile sensor networks

LI Hui-jie¹, PENG Jian¹, LIU Tang^{1,2}

(1. College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. College of Fundamental Education, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China)

Abstract: A novel data delivery method named movement-assisted adaptive data delivery (MAD) was proposed. The data cache nodes were deployed in the buffer and the base station moves in the buffer regularly. The data was forwarded to the nodes which likely moved to the buffer and had the higher remaining energy, and the base station collects data in the moving process. MAD contains two parts, data forwarding and queue management. The former makes the decision by the movement trend and the residual energy. The latter was based on the size of the survival time and the replication. Simulation results show that MAD had relatively higher delivery ratio and longer network lifetime.

Key words: delay tolerant mobile sensor networks; data gathering; movement-assisted; dynamic data delivery

1 引言

近年来, 将 WSN^[1,2]应用于移动节点进行数据的采集成为热点, 例如收集野生动物的生活习性^[3]、收集水下信息^[4]等。在这些应用中, 节点位置的随机变化导致整个网络的拓扑结构也在不断的改变, 节点之间数据的传输将会产生一定的延时。所以, 节点静止的 WSN 环境下的数据传输算法在这种环境中并不能得到很好的应用。因此, 为了实现这些

应用, 出现了 DTMSN 网络。

针对 DTMSN 的有效数据传输, 一些国内外的学者已经做了一定的研究^[5]。直接传递策略 DT^[6]的主要思想是所有的传感器节点只能将数据直接传输到基站, 节点之间并不进行数据的转发, 因此这种算法存在较大的延迟。泛洪(Flooding)^[7]的基本思想是只要其他节点处于自身的通信范围内, 就进行数据的转发, 因而这种策略会产生巨大的消息副本, 导致节点的能耗特别大, 影响网

收稿日期: 2013-10-28; 修回日期: 2014-02-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61303204, U1333113); 四川省科技支撑计划基金资助项目(2012GZX0088-1, 2011GZ0188); 四川师范大学科研基金资助项目(13KYL06)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61303204,U1333113); Sichuan Province Science and Technology Support Plan(2012GZX0088-1, 2011GZ0188); Scientific Research Fund of Sichuan Normal University(13KYL06)

络的寿命。SRAD^[8]算法与上述算法相比,尽管在许多性能方面有了很大的改善,但是仍然存在一些问题。例如采用静止基站的网络结构,在计算节点的数据传输概率时没有考虑到节点的运动速度以及能量的消耗情况,导致传输成功率的降低以及网络寿命的缩短。文献[9]提出了适用于节点异构环境下的 DTMSN 网络传输算法,该算法的创新之处有 2 点:1) 根据能量消耗和延迟计算节点的转发概率;2) 消息丢弃的依据为延迟容忍度,网络寿命相对较长。

然而上述 DTMSN 的数据收集模式中,基站大部分都是静止的,如果可以使用移动基站作为数据的收集,可以很大程度上减少节点将数据转发到固定基站的跳数,故而减少节点的能量损耗。通过搜集国内外大量相关文献,仅在文献[10]中发现了将移动基站适用于所有节点均移动的传感器网络。在该文献中提出了 SARM 算法,移动基站在区域中随机移动进行数据采集。由于基站的移动性并且在路由算法中充分考虑了节点的状态,因而在数据传输成功率和传输延迟方面都有了很大的改进。但是由于移动基站运动的随机性以及节点运动的随机性,当节点在选择下一跳转发节点时,首先要估计该节点遇到基站的可能性,由于基站的随机移动性,很难确定该节点会运动到基站的通信范围内。在节点静止的 WSN 中,研究学者已经提出了多种利用移动基站来提高网络性能的方案。ERTLD^[11]是一种具有负载均衡的实时路由协议,该策略利用移动 sink 周期性地广播对网络进行分层,基于接收信号强度、节点的剩余能量和分组的一跳延时进行数据的转发。MASP^[12]的基本思想是当路径轨迹固定时利用移动基站以尽可能小的时延进行数据的传输。MEMO^[13]是一种最短移动距离、最小能耗的路径优化模型,传感器节点将数据发送给汇聚点,移动 sink 访问汇聚点进行数据的收集,仿真实验表明该算法能很好地在满足延时要求的同时节约网络的能量。

本文提出一种基于移动协助的数据传输(MAD, movement-assisted adaptive delivery) 算法。该策略一方面为了有效减少数据的转发次数,让基站按照一种简单的固定轨迹移动,并在移动的过程中进行数据收集;另一方面为了有效地选择下一跳传输节点,在计算传输概率时引入了节点的运动趋势和能量等因素。数据传输机制的主

要思想是:当网络中有节点准备发送数据时,节点首先计算自身将消息直接发送到缓冲区中缓存节点的传输概率;再计算邻居节点的转发概率;最后节点将数据转发给所有转发概率大于自身传输概率的所有节点。

2 系统模型

2.1 网络结构模型

为便于描述,本文给出传感器节点的相关分类如下。

定义 1 (收集节点) 收集节点是负责感知和监测环境的普通传感器节点,其初始能量为 $E_{init}^{Collect}$ 。

定义 2 (缓存节点) 缓存节点是用于数据临时存储的普通传感器节点,其初始能量为 E_{init}^{Buffer} 。

在本文中收集节点为移动节点,随着时间的推移收集节点的位置处于不停的变化中。缓存节点为固定节点,并且具有较强的存储能力。该算法的具体网络结构模型如下。

网络初始阶段,在半径为 R 的圆形区域 Z 内随机部署 N 个收集节点。 M 个缓存节点均匀分布在一个内径为 R_m 、外径为 R_n 的圆环缓冲区内,负责汇集收集节点的数据并将数据转发到基站,且满足: $E_{init}^{Collect} < E_{init}^{Buffer}$, $N > M$, $R_n - d = R_m + d$,其中 d 为所有传感器节点和基站的通信半径。移动基站在缓冲区内周期性移动。网络结构模型如图 1 所示。

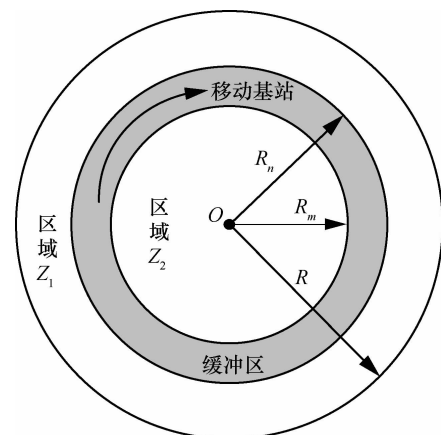


图 1 网络结构示意图

收集节点感知到数据后,首先通过机会路由的方式将自身产生的数据转发到所有转发概率大于自身传输概率的邻居节点,然后邻居节点将数据转发到缓冲区中的缓存节点,缓存节点接收数据并将

数据进行临时存储。一方面延迟容忍网络允许一定的延时，另一方面为了减少缓存节点的能量消耗，因此，当缓存节点接收到数据后并不直接将数据转发给移动基站，而是等待基站的到来。当基站移动到该缓存节点的通信范围内时，才将数据传输给移动基站。

移动基站的运动轨迹半径分析如图 2 所示。

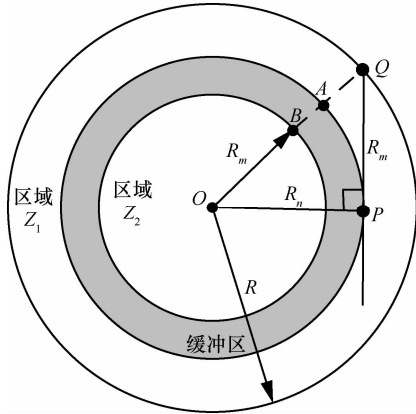


图 2 移动基站的轨迹半径分析

其中，点 O 在区域 Z 的圆心位置，是区域 Z_2 内的所有节点到缓冲区最远的节点位置；点 Q 在区域 Z 的边界位置，是区域 Z_1 内的所有节点到缓冲区最远的节点位置。

可知，点 O 到缓冲区内径边界的任意位置距离相等，且为 R_m 。线段 QA 为点 Q 到缓冲区外径的最短路径，线段 QP 与缓冲区的外径相切，线段 QP 为点 Q 到缓冲区外径的最长路径。

为了均衡区域 Z_1 内的节点和区域 Z_2 内的节点转发至缓冲区内的缓存节点的时延，本文考虑在最坏情况下，使区域 Z_2 内的节点到缓冲区的最大距离等于区域 Z_1 内的节点到缓冲区的最大距离，即 $|OB|=|QP|$ 。从图 2 中可以得到如下方程

$$R_n^2 + R_m^2 = R^2 \tag{1}$$

已知 $R_n - R_m = 2d$ ， d 为节点的通信半径，因此得到

$$R_m = \sqrt{\frac{R^2 - 2d^2}{2}} - d \tag{2}$$

综上所述，移动基站的轨迹半径为

$$r = \sqrt{\frac{R^2 - 2d^2}{2}} \tag{3}$$

网络性质如下。

1) 所有收集节点的运动轨迹遵循 RWP^[14]模型，即节点在运动范围 Z 内随机选取起始点 S 和目的点 D ，并且在 (V_{\min}, V_{\max}) 区间内随机选择此次的运动速度 v ，然后该节点以恒定速度 v 沿直线方向从 S 运动到 D ，随后到 D 时在 (T_{\min}, T_{\max}) 区间内随机选择时间 T_{pause} 静止，从而结束一次运动过程，在下次节点的运动中将 D 作为下次运动的 S 即可，RWP 的运动模型如图 3 所示。

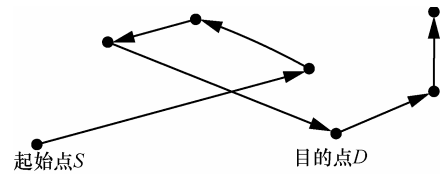


图 3 RWP 运动模型

2) 移动基站以车载的形式出现，因此基站具有足够的能量^[15]。

3) 对于所有收集节点来说，圆形区域的圆心位置 O 已知。

4) 所有收集节点可以利用 GPS 进行定位，获得任意时刻自己所在的位置。

综上所述，该网络模型的特点如下。

1) 移动收集节点并不直接把数据转发给移动基站，而是先转发到缓冲区中的缓存节点。

2) 基站在固定的区域内移动，并在移动中收集数据。

3) 网络模型考虑了数据传输能耗。

2.2 能耗模型

本文采用文献[9,16,17]中运用典型的能量消耗模型。在该模型中，只考虑节点进行接收数据或者转发数据所产生地通信能耗，忽略存储、计算等消耗的能量。当节点将 l bit 信息发送给距离为 d 的另一个节点时，发送端和接收端的能量消耗分别如式(4)、式(5)所示

$$E_{Tx}(l, d) = lE_{elec} + l\epsilon_{fs}d^k \tag{4}$$

$$E_{Rx}(l) = E_{Rx_elec}(l) = lE_{elec} \tag{5}$$

其中， E_{elec} 是传输回路损耗。在该模型中，考虑了自由空间以及多径衰落信道模型。当发送节点与接收节点之间的距离小于 87 m 时， k 的值为 2；否则 k 的值为 4。因此，2 节点之间的距离越短，发送端节点消耗的能量越少。

上述参数的具体设置值将在表 1 中给出。

表 1 模拟实验缺省值

参数名	参数值	参数描述
R	113 m	网络半径
d	1~10 m	传感器节点的通信半径
R_n	82.8 m	缓冲区的外径
R_m	76.8 m	缓冲区的内径
N	300	收集节点数量
$V_{Collect}$	1~5 m/s	收集节点的速度
V_{Sink}	3 m/s	基站的移动速度
$E_{init}^{Collect}$	10 J	收集节点的初始能量
L	200	节点队列长度
l	200 bit	每个消息的大小
E_{elec}	5 nJ/bit	射频能耗系数
ϵ_{is}	10 pJ/bit/m ²	功率放大电路能耗系数($d \leq d_0$)
ϵ_{mp}	0.001 3 pJ/bit/m ⁴	功率放大电路能耗系数($d > d_0$)

3 MAD 策略的设计实现

为便于描述,下面给出与 MAD 算法相关的一些概念。

定义 3 (节点状态因子) 节点状态因子 $P(v, d)$ 表明收集节点的消息从当前状态下发送到缓冲区中缓存节点的可能性。 $P(v, d)$ 的计算与收集节点当前的速度和此次运动的目的点到缓冲区的距离有关,且 $0 \leq P(v, d) \leq 1$ 。

定义 4 (能量消耗因子) 能量消耗因子 $P(E)$ 表示收集节点的当前剩余能量和初始能量的关系,且 $0 \leq P(E) \leq 1$ 。

定义 5 (节点的传输概率) 收集节点 i 的传输概率 P_i 表示收集节点如果用直接传递的方式发送到缓冲区中的缓存节点,数据可以被缓存节点接收的概率大小。 P_i 的值由定义 3 中的节点状态因子 $P(v, d)$ 和定义 4 中的能量消耗因子 $P(E)$ 决定,且 $0 \leq P_i \leq 1$ 。

定义 6 (节点的转发概率) 收集节点 i 的转发概率 $P_{i,z}$ 表示 i 节点首先将数据直接复制给 z 节点, z 节点最终将数据转发到缓存节点的概率大小。 $P_{i,z}$ 的值由定义 3 中的节点状态因子 $P(v, d)$ 和定义 4 中的能量消耗因子 $P(E)$ 决定,且 $0 \leq P_{i,z} \leq 1$ 。

3.1 计算收集节点的数据传输(转发)概率

数据传输(转发)概率表明了数据收集节点和数

据缓存节点之间通信地可能性大小,概率越大,数据收集节点越有可能将数据转发到数据缓存节点。由于收集节点是随机运动的, P_i 和 $P_{i,z}$ 的值也是在不停的变化,它决定于该节点此次运动的目的点到缓冲区的距离、节点的速度和节点的剩余能量等因素。下面本文将按照上述 RWP 运动模式,假设收集节点 i 分别位于缓冲区、 Z_1 区、 Z_2 区来定义此时的数据传输 P_i 或者数据转发概率 $P_{i,z}$ 。

1) 首先,若收集节点 i 位于缓冲区内,说明收集节点 i 可以直接和缓存节点发生通信,因此 $P_i = 1$ 。

2) 若收集节点 i 位于 Z_1 区域,此时根据这次运动的目的点 D 的位置可以分为以下 2 种情形。

① 若目的点 D 是在以点 O 为圆心、 R_n 为半径的圆内,则置 $P_i = 1$ 。因为此种情况表明收集节点 i 正朝着缓冲区运动,且马上就能与缓冲区内的缓存节点发生直接通信。

② 否则,查看收集节点 i 的当前位置 I 和目的点 D 的连线是否与缓冲区相交,此时存在以下 2 种情形。

(a) 若点 I 与点 D 的连线与缓冲区相交,则令 $P_i = 1$ 。因为此种情形说明收集节点 i 不久之后就可以到达缓冲区,并将数据发送给缓冲区域内的缓存节点。

如图 4 所示,如果点 O 到线段 ID 的距离 l 小于缓冲区的外径、线段 OD 与线段 OI 的值大于缓冲区的外径、且以点 D 为顶点、以点 I 为顶点的 2 个夹角都为锐角时,收集节点 i 的当前位置和目的点 D 的连线与缓冲区相交。因此有如下定理。

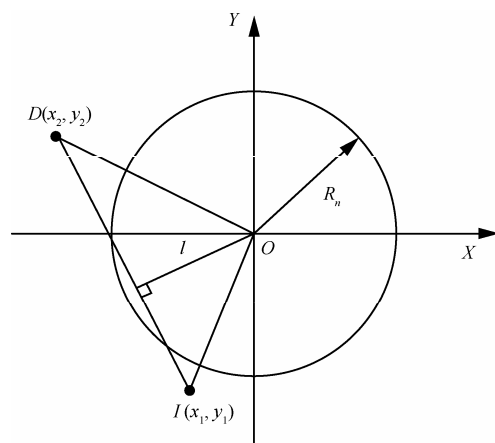


图 4 传输概率的计算示意 1

定理 1 收集节点 i 当前的运动趋势当且仅当同时

满足 $\frac{x_1y_2 - x_2y_1}{\sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (x_2 - x_1)^2}} \leq R_n$, $\arcsin \frac{l}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} < 90^\circ$, $\arcsin \frac{l}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}} < 90^\circ$, $\sqrt{x_1^2 + y_1^2} > R_n$, $\sqrt{x_2^2 + y_2^2} > R_n$ 时, 线段 ID 的连线与缓冲区相交, 否则不相交。

证明 设圆心 O 为原点, 点 I 的当前坐标为 (x_1, y_1) , 目的点 D 的当前坐标为 (x_2, y_2) , 且 $x_1^2 + y_1^2 = d^2$, 如图 4 所示。

则线段 ID 所在的直线方程为

$$(y_1 - y_2)x - (x_1 - x_2)y + x_1y_2 - x_2y_1 = 0 \quad (6)$$

根据点到直线的距离公式

$$l = \frac{x_1y_2 - x_2y_1}{\sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (x_2 - x_1)^2}} \quad (7)$$

根据直角三角形的性质

$$\angle OI D = \arcsin \left(\frac{l}{OI} \right) = \arcsin \frac{l}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} \quad (8)$$

$$\angle ODI = \arcsin \left(\frac{l}{OD} \right) = \arcsin \frac{l}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}} = \arcsin \frac{l}{d} \quad (9)$$

$$OI = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \quad (10)$$

$$OD = \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \quad (11)$$

结论得证。

(b) 若不相交

由定义 6 可知, 收集节点 i 的转发概率 P_{i_z} 表示收集节点 i 首先将数据直接复制给 z 节点, z 节点最终将数据转发到缓冲区中的缓存节点的概率大小, P_{i_z} 由节点状态因子 $P(v, d)_{i_z}$ 和能量消耗因子 $P(E)_i$ 确定

$$P_{i_z} = \alpha P(v, d)_{i_z} + \beta P(E)_i \quad (12)$$

其中, α 、 β 分别为 $P(v, d)_{i_z}$ 、 $P(E)_i$ 的系数, 且满足 $\alpha + \beta = 1$ 。

定义 $P(E)_i$ 为

$$P(E)_i = \frac{E_{\text{cur-}i}}{E_{\text{Init-}i}^{\text{Collect}}} \quad (13)$$

其中, $E_{\text{cur-}i}$ 为收集节点 i 的剩余能量, $E_{\text{Init-}i}^{\text{Collect}}$ 为收集节点 i 的初始能量。

定义收集节点 i 的状态因子 $P(v, d)_{i_z}$ 为

$$P(v, d)_{i_z} = \eta P_{vi} + (1 - \eta) P_{di} \quad (14)$$

其中, P_{vi} 由收集节点 i 此次运动的运动趋势 V 确定, P_{di} 由目的点 D 到圆心 O 的距离 d 确定, η 为调整 P_{vi} 和 P_{di} 这 2 个因素的系数。

由图 5 可知, 收集节点 i 的目的点 D 距离圆心 O 越近, 越有可能到达缓冲区, 则有公式

$$P_{di} = \frac{1}{R_n - R} (d - R), d \in (R_n, R) \quad (15)$$

此时固定距离 d , 研究收集节点的运动速度对传输概率的影响。

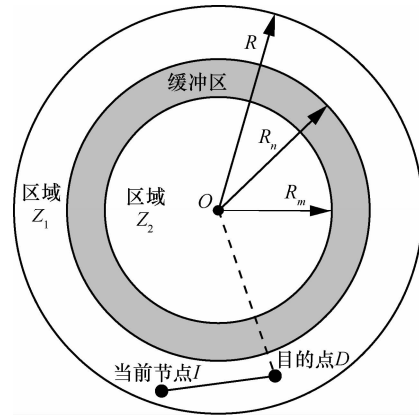


图 5 传输概率的计算示意 2

如图 6 所示, 考虑收集节点 i 此时具有 2 个目的点, 分别为 D_1 、 D_2 , 且 $|OD_1| = |OD_2|$ 。目的点 D 的通信角度即目的点 D 与以缓冲区外径为半径的圆的两切线夹角。可知, 2 个目的点与缓冲区通信的可能性相等。那么此时表明收集节点 i 到达 2 个目的点时的效果是一样的, 当收集节点的速度 V 越大时, 收集节点越快的到达目的点, 然后进行下一跳的转发, 进而减少数据转发的时延。

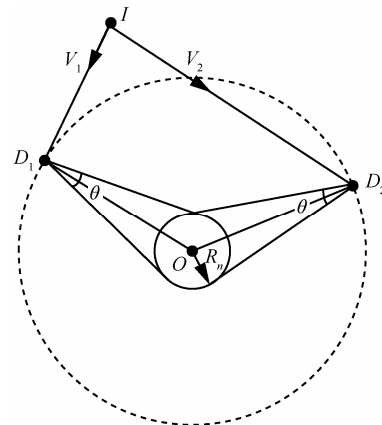


图 6 传输概率的计算示意 3

$$P_{vi} = \frac{V}{V_{\max}}, V_{\min} \leq V \leq V_{\max} \quad (16)$$

可以认为，当此次运动的目的地越靠近缓冲区时，则 P_{di} 在节点状态因子 $P(v,d)_{i,z}$ 中的比重越大；当此次运动的目的地离缓冲区越远时， P_{vi} 在节点状态因子 $P(v,d)_{i,z}$ 中的比重越大。因此

$$\eta = \frac{1}{R - R_n} (d - R_n), d \in (R_n, R) \quad (17)$$

3) 若收集节点 i 发现自己位于 Z_2 区域，此时根据这次运动的目的地 D 的位置可以分为以下 2 种情形。

① 若目的地 D 的位置不在以 O 为圆心、 R_m 为半径的圆内，则置 $P_i=1$ 。因为此种情况表明收集节点 i 正朝着缓冲区运动，且马上就能和缓冲区内的缓存节点发生直接通信。

② 否则，同样定义式(12)，此种情况下，仅有 P_{di} 和 η 2 个参数存在变化

$$P_{di} = \frac{d}{R_m}, d \in (0, R_m) \quad (18)$$

$$\eta = \frac{1}{R_m} (R_m - d), d \in (0, R_m) \quad (19)$$

3.2 缓存节点的数量 M 和初始能量 $E_{\text{init}}^{\text{Buffer}}$ 的取值

3.1 节在计算 MAD 算法的转发概率时，为了避免缓存节点对其性能产生地影响，假定收集节点只要到达缓冲区时，就可以将数据转发给缓存节点，并且缓存节点具有一定的能量，该能量恰好可以满足缓存节点接收收集节点的数据并将数据转发到移动基站所消耗的能量。一方面为了尽量减少缓存节点的数量，另一方面为了充分利用缓存节点的能量，下面本节将对缓存节点的数量和初始能量进行准确的计算。

1) 缓存节点数量 M 的取值

缓存节点的数量分析如图 7 所示，由覆盖率的定义可得覆盖比率 η 为

$$\eta = \frac{MS_0 - (\sum_{i=1}^{M-1} S_{i,i+1} + S_{1,M})}{S} \quad (20)$$

其中， S_0 表示一个缓存节点可以覆盖的面积大小， $S_{i,j}$ 表示缓存节点 i 的通信范围与缓存节点 j 的通信范围相交的面积大小， S 表示以 R_n 为外径、 R_m 为内径的圆环即缓冲区域的面积。

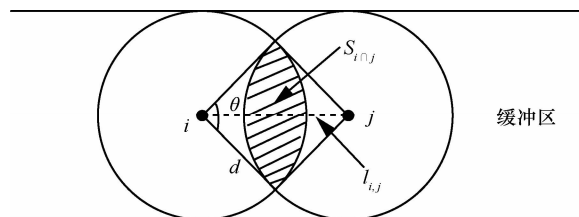


图 7 计算缓存节点数量分析

由圆的面积计算公式，有

$$S_0 = \pi d^2 \quad (21)$$

$$S = \pi(R_n^2 - R_m^2) \quad (22)$$

根据文献[18]可知，缓存节点 i 的通信范围与缓存节点 j 的通信范围相交的面积 $S_{i \cap j}$ 为

$$S_{i \cap j} = \theta d^2 - \sin \theta \times d^2 \quad (23)$$

其中， $\theta = 2 \arcsin \left[\frac{1}{d} \sqrt{d^2 - \left(\frac{l_{i,j}}{2} \right)^2} \right]$ ， $l_{i,j}$ 表示缓存

节点 i 与缓存节点 j 的距离，可以通过 2 节点之间的接收信号强度获得。

缓存节点数量的具体取值将在 4.1 节中给出具体的分析。

2) 缓存节点初始能量 $E_{\text{init}}^{\text{Buffer}}$ 的取值

为了延长网络的寿命且减少缓存节点的初始能量，本文认为当有百分之十的收集节点能量耗尽即网络死亡时，缓存节点的能量也恰好充分用完。

缓冲区接收数据总量

$$L = \frac{T_{\text{nl}}}{\Delta t} \times M_{\text{size}} \times N \times \mu_{\text{suc}} \quad (24)$$

其中， T_{nl} 是网络寿命， Δt 是消息产生率， M_{size} 是每个消息的大小， N 是收集节点的数量， μ_{suc} 是传输成功率。

根据式(5)可知缓存节点消耗的总能量

$$E_{\text{total}} = \frac{L}{l} \times E_{\text{Rx}}(l) \quad (25)$$

因此，每个缓存节点的初始能量

$$E_{\text{init}}^{\text{Buffer}} = \frac{E_{\text{total}}}{M} \quad (26)$$

3.3 队列管理机制

队列管理机制是提高整个网络性能的重要组成部分。队列管理的目的是将队列中的消息按照某种原则安排在特定的位置，以确定节点遇到另一个节点时，每个消息发送的优先顺序以及当存储队列满时消息应该如何进行丢弃。下面本文将对队列管

理部分进行阐述。

1) 消息丢弃方法

① 当存在某个消息的生存时间大于网络的延迟容忍值，就丢弃该消息。生存时间越大表明此消息从产生到现在已经经历了很长时间，经过不断的转发，数据很有可能已经转发到了缓冲区。

② 由于存储队列是根据生存时间进行排列的，因此在下面这种情况中依然根据这个原则：节点接收到其他节点转发过来的数据后，发现自己的队列已经是满的，就将接收到的数据的生存时间与队列最后一条消息进行比较，生存时间越小的数据就排在队列中，另一条消息就丢弃。

2) 队列管理的实现

如图 8 所示，存储队列中的消息来自 3 个方面：

- ① 节点自己从周围环境中采集的数据；
- ② 节点在将数据转发给其他节点之前，对自己产生那部分数据的备份；
- ③ 其他节点转发给自己的数据。

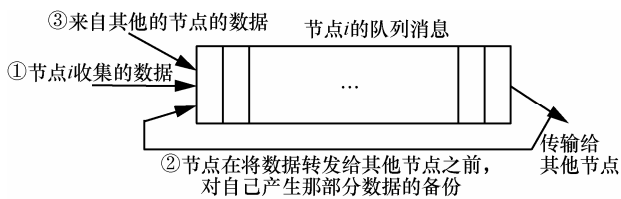


图 8 队列消息的来源

消息的生存时间与消息的平均副本数紧密相关，生存时间越大，平均副本的数量也越多。因此，应该尽量避免生存时间较大的消息继续在网络中不停的被转发，如果存在上述消息丢弃方法中的任一情况时则进行消息地丢弃，而且在存储队列中，生存时间越小应该具有优先转发权。

4 仿真实验与性能分析

本文通过 MATLAB 仿真软件模拟实现了 MAD、SRAD、SARM 和 Flooding 算法，主要从以下 3 个方面进行算法的性能比较。

1) 将本文提出的MAD策略所能达到地网络寿命、数据传输成功率、平均副本和传输平均延迟与上述其他 3 种策略进行比较。

2) 研究当节点的通信半径不断地改变时对这 4 种算法产生的影响。

3) 研究当节点的运动速度不断地改变时对这 4 种算法产生的影响。

在仿真实验中，网络区域为以半径 R 为 113 m 的圆形区域，将基站和缓冲区按照图 1 中的网络结构模型进行部署。根据上文中移动基站的轨迹分析，本文将缓冲区圆环的外径及内径分别设为 82.8 m 和 76.8 m。数据收集节点的数量为 300，其初始能量为 10 J。数据缓存节点的数量将在 4.1 节中给出，其具体的初始能量可根据 3.2 节计算得到。假定所有收集节点的消息到来服从时间间隔为 100 s 的泊松过程。模拟实验中的其他缺省值如表 1 所示。

4.1 缓存节点数量的取值

本节考虑不同缓存节点数量对覆盖率的影响。

从图 9 中可以看出，随着缓存节点个数的增加，覆盖率的值呈现明显上升的趋势。当缓存节点的数量达到一定的取值时，覆盖率的值并不是快速增长，而是缓慢增加。出现这种现象的原因是因为缓存节点个数的增加使得相邻缓存节点之间的通信范围叠加。综合考虑网络成本以及缓存节点数量与覆盖率的关系曲线，缓存节点的取值为 60 个。

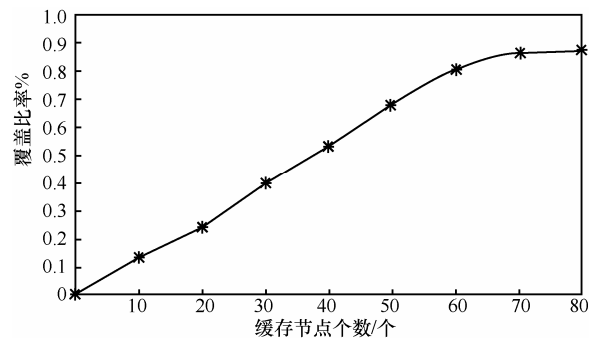


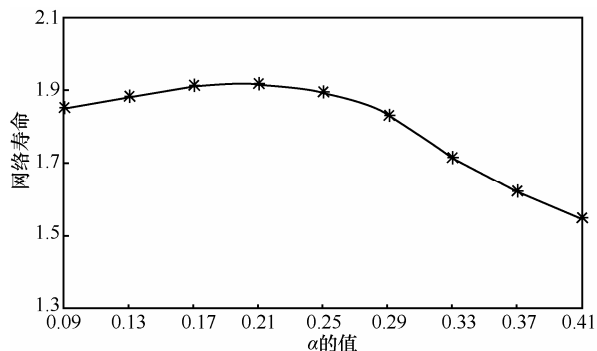
图 9 缓存节点数量对覆盖率的影响

4.2 α 、 β 的取值

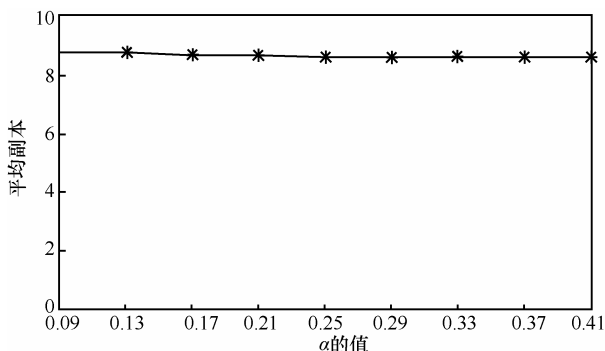
在本文中， α 、 β 分别为在计算收集节点传输(转发)概率时调节节点状态因子和能量消耗因子的权重系数，满足 $\alpha+\beta=1$ 。改变 α 、 β 的取值，观察算法的性能。仿真结果如图 10 所示。

图 10(a)的仿真结果描绘了改变 α 的取值对网络寿命的影响。可以看出，在一定范围内 α 较小即更多地考虑能量消耗时，网络的寿命较长。当 α 在 0.21 附近时，网络有最长的寿命。图 10(b)给出了采用不同的系数大小对于平均副本可能造成的影响。图中的曲线波动不明显，可知随着 α 变化，网络中消息的平均副本数比较稳定。图 10(c)是研究不同系数的大小对数据传输成功率可能造成的影响。从图 10(c)可以看出，当 α 取值在 0.26 附近时，网络有较高的传输成功率。图 10(d)仿真结果描绘了改变 α 取值对传输延

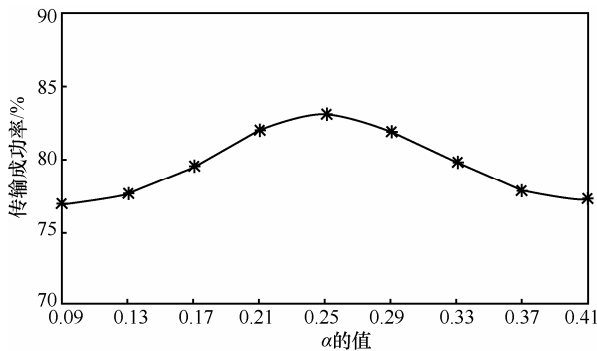
迟的影响。可以看出延迟的变化是从快速减少到平稳。这是由于当节点的状态因子所占的比重越来越大时，节点会选择延迟更小的节点作为下一跳节点。



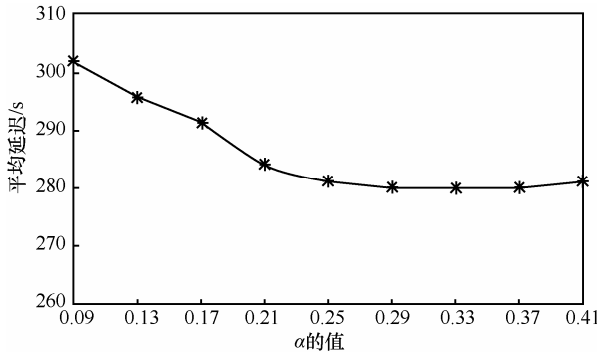
(a) α 、 β 的取值对网络寿命的影响



(b) α 、 β 的取值对平均副本数的影响



(c) α 、 β 的取值对传输成功率的影响



(d) α 、 β 的取值对传输延迟的影响

图 10 α 、 β 的取值对算法性能的影响

对图 10 进行综合考虑， α 、 β 的取值统一为 0.25 和 0.75。

4.3 算法的对比实验

表 2 是默认参数 4 种算法的仿真实验结果。从该表中可以看出，MAD 算法在网络寿命、数据传输成功率方面具有更好的性能。

表 2 默认参数下仿真实验结果

网络性能	MAD	SRAD	SARM	Flooding
网络寿命/天	1.893	1.537	1.712	0.479
传输成功率/%	83.1	68.3	74.8	55.4
平均副本	8.57	9.07	8.71	11.83
平均延时/s	281.2	198.7	176.2	780.8

Flooding 在这 4 种算法中的网络寿命最短，网络能量资源最先耗尽。出现这种结果是由于该策略中的节点不断地将数据转发给自己的邻居节点，网络中存在非常多的副本，这些副本不停地继续转发，因而消耗了很多的能量。SRAD 的传输成功率高于 Flooding 算法，是因为在该策略中较准确地得到了节点将数据转发给基站的可能性，而不是盲目的传输。但是 SRAD 算法在传输概率的计算时仅考虑到目的点与基站通信的可能性，忽略了能量消耗，而且数据需要经过过多次数的转发，因此影响了网络的寿命。SARM 的传输延迟最低，网络寿命和传输成功率优于 SRAD 算法，是因为在 SRAD 中，静止基站位于网络的中心位置，节点需要将数据不断的转发，才可以将数据直接传递到基站；而在 SARM 中，基站随机的移动，减少了节点将数据转发到基站的时延和转发次数。然而，SARM 的网络寿命和传输成功率又低于 MAD 算法，这是由于在 SARM 算法中，基站和节点都是随机移动的，当节点在选择下一跳转发节点时，首先要估计该节点遇到基站的可能性，由于基站的随机移动性，很难确定该节点是否能够与基站相遇；而在 MAD 算法中，当节点在选择下一跳转发节点时，可以不用考虑基站的移动问题，只要计算该节点是否可以到达或者经过缓冲区就可以进行计算了，因为节点只要将数据转发到缓冲区内的缓存节点，移动基站就可以将其进行收集，并且在 MAD 算法中缓冲区域的设置也增加了节点将数据转发到基站的可能性。

MAD 算法的网络寿命达到 1.893 天，数据传输

成功率达到 83.1%，优于其他 3 种算法。一方面是由于在网络模型中设置了缓冲区，减少了数据传输到基站的跳数；另一方面该算法在计算节点的传输概率时考虑到了节点目前的状态和能量消耗，从而使该算法具有良好的性能。

4.4 通信半径对性能的影响

本节考虑不同的通信半径对上述 4 种算法的性能产生的影响。仿真结果如图 11 所示。

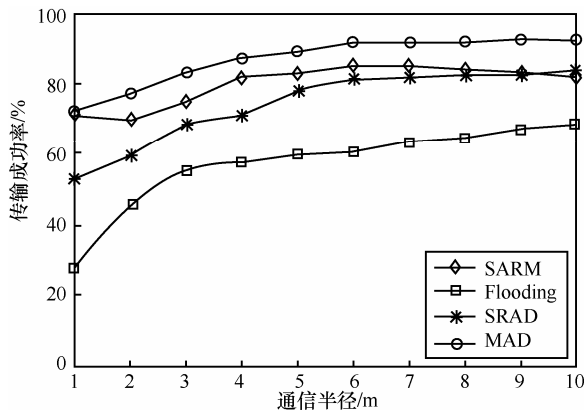
从图 11(a)中可知，MAD 算法具有最高的数据传输成功率。因为 MAD 算法更好地考虑了节点的当前状态，传输到基站的可能性更高。从该图中可以看出随着通信半径的不断增大，各算法的传输成功率均保持增长。这是因为通信半径的增大使自己的邻居节点数量显著增多，可以从中选择更有可能到达缓冲区的节点。从图 11(b)中可以看出，随着通信半径的增大，各算法的平均传输延迟均逐渐减少。由于 MAD 算法的网络模型，当有消息转发到缓冲区时，缓存节点需要等待基

站移动到该节点的周围。因此，MAD 算法相比于 SRAD 和 SARM 算法的数据传输延迟略高。从图 11(c)中可以看出，4 种算法的消息副本也处于不断上升的趋势，导致这种现象出现的原因是节点自身的邻居数增大，选择的转发节点个数就很有可能增多。

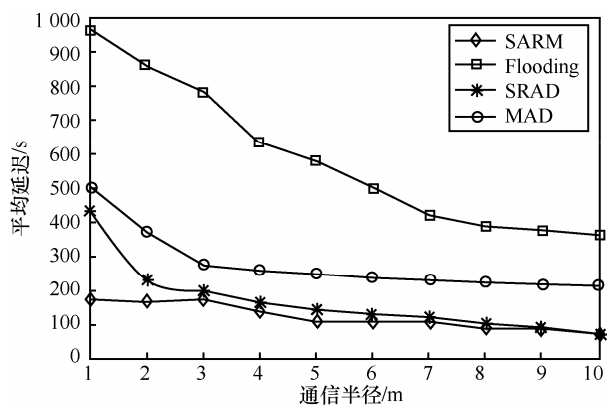
4.5 运动速度对性能的影响

本节考察不同的收集节点运动速度对上述 4 种算法产生的影响。仿真结果如图 12 所示。

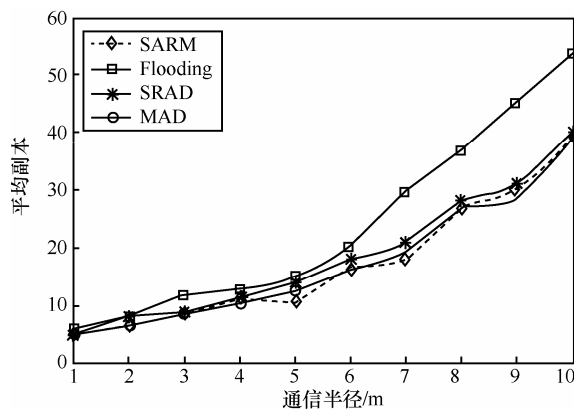
图 12(a)描述了收集节点的运动速度对数据传输成功率的影响。可知，数据传输成功率随着速度的提高而不断的增大。此种现象是由于当节点速度提高时，节点可以在一定时间内遇到更多的其他节点，增大了消息的副本，因此数据传输成功率增大了，同时如图 12(c)所示，网络的副本数也增加了。因为存在更多的节点转发同一个消息，因此数据被转发到基站的时间也相应的减少，如图 12(b)所示。MAD 算法总是在传输成功率和



(a) 平均传输成功率



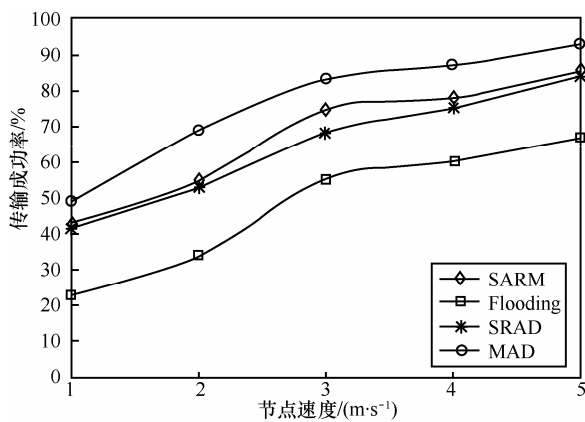
(b) 平均传输延迟



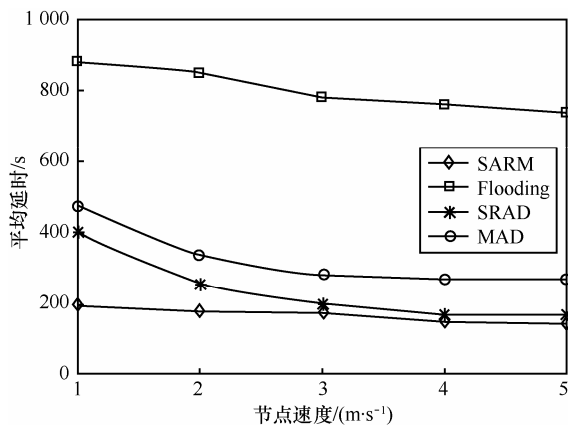
(c) 平均副本

图 11 通信半径的影响

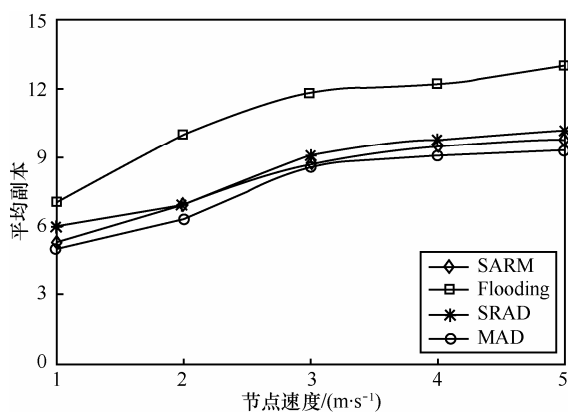
平均副本方面获得很好的性能，也是由于该算法所设计的网络结构模型以及所采用的数据传输方法所决定的。



(a) 平均传输成功率



(b) 平均传输延迟



(c) 平均副本

图 12 运动速度的影响

5 结束语

针对所有节点均移动的 DTMSN 网络，本文提出 MAD 算法的主要贡献如下：

1) 在缓冲区内设置缓存节点并采用移动基站进行数据的采集，从而降低了节点将数据转发到静止基站的跳数，节约了传感器的能量，延长了网络的寿命；

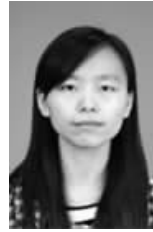
2) 提出了一种有效计算传输概率的方法，在计算传输概率时，为了提高数据的传输成功率和延长网络的寿命，综合考虑了节点的运动趋势和剩余能量。

参考文献：

- [1] YICK J, MUKHERJEE B, GHOSAL D. Wireless sensor network survey[J]. *Computer Networks*, 2008, 52(12): 2292-2330.
- [2] HAN S W, JEONG I S, KANG S H. Low latency and energy efficient routing tree for wireless sensor networks with multiple mobile sinks[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2013, 36(1):156-166.
- [3] JUANG P, OKI H, WANG Y, *et al.* Energy-efficient computing for wildlife tracking: design tradeoffs and early experiences with zebra-net[J]. *ACM Operating System Review*, 2002, 36(5): 96-107.
- [4] GUO Z, WANG B, CUI J H. Generic prediction assisted single-copy routing in underwater delay tolerant sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2013, 11(3), 1136-1149.
- [5] WANG Y, DANG H, WU HY. A survey on analytic studies of delay-tolerant mobile sensor networks[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2007, 7(10): 1191-1208.
- [6] WANG Y, WU H. Delay/fault-tolerant mobile sensor network (DFT-MSN): a new paradigm for pervasive information gathering[J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2006, 6(9): 1021-1034.
- [7] VAHDAT A, BECKER D. Epidemic Routing for Partially Connected Ad Hoc Networks[R]. Technical Report, Vol.CS-200006, Durham, Duke University, 2000.
- [8] 朱金奇, 刘明, 龚海刚等. 延迟容忍移动传感器网络中基于选择复制的数据传输 [J]. *软件学报*, 2009, 20(8): 2227-2240.
ZHU J Q, LIU M, GONG H G, *et al.* Selective replication-based data delivery for delay tolerant mobile sensor networks[J]. *Journal of Software*, 2009, 20(8): 2227-2240.
- [9] 刘唐, 彭舰, 杨进. 异构延迟容忍移动传感器网络中基于转发概率的数据传输 [J]. *软件学报*, 2013, 24(2): 215-229.
LIU T, PENG J, YANG J. Data delivery for heterogeneous delay tolerant mobile sensor networks based on forwarding probability[J]. *Journal of Software*, 2013, 24(2): 215-229.
- [10] 吴亚辉, 邓苏, 黄宏斌. 延迟容忍网络状态感知的路由策略研究[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(3): 575-579.
WU Y H, DENG S, HUANG H B. Research of situation-aware routing method in delay tolerant networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(3): 575-579.

- [11] AHMED A A. An enhanced real-time routing protocol with load distribution for mobile wireless sensor networks[J]. *Computer Networks*, 2013, 57(6): 1459-1473.
- [12] GAO S, ZHANG H K, DAS S K. Efficient data collection in wireless sensor networks with path-constrained mobile sinks[J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2011, 10(4): 592-608.
- [13] 张希伟, 沈琳, 蒋益峰. 移动协助传感器网络中 sink 的路径优化策略[J]. *通信学报*, 2013, 34(2): 85-93.
ZHANG X W, SHEN L, JIANG Y F. Optimizing path selection of mobile sink nodes in mobility-assistant WSN[J]. *Journal on Communications*, 2013, 34(2): 85-93.
- [14] BETTSTETTER C, HARTENSTEIN H, PEREZ-COSTA X. Stochastic properties of the random waypoint mobility model[J]. *Wireless Networks*, 2004, 10(5): 555-567.
- [15] BEHDANI B, YUN Y S, SMITH J C, *et al.* Decomposition algorithms for maximizing the lifetime of wireless sensor networks with mobile sinks[J]. *Computers & Operations Research*, 2012, 39(5): 1054-1061.
- [16] LIU A F, REN J, LI Y. Design principles and improvement of cost function based energy aware routing algorithms for wireless sensor networks[J]. *Computer Networks*, 2012, 56(7): 1951-1967.
- [17] TAO Y L, ZHANG Y B, JI Y S. Flow-balanced routing for multi-hop clustered wireless sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2013, 11(1): 541-554.
- [18] LIU T, PENG J, WANG X F, *et al.* Research on the energy hole problem based on non-uniform node distribution for wireless sensor networks[J]. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 2012, 6(9): 2017-2036.

作者简介:



李慧杰 (1989-), 女, 新疆乌苏人, 四川大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络。



彭舰 [通信作者] (1970-), 男, 四川成都人, 四川大学教授, 主要研究方向为无线传感器网络、分布式计算、人类动力学。E-mail: jianpeng@scu.edu.cn。



刘唐 (1980-), 男, 四川乐山人, 博士, 四川师范大学副教授, 主要研究方向为无线传感器网络。

(上接第 180 页)

- [12] ZHU X M, QIN X, QIU M K. QoS-aware fault-tolerant scheduling for real-time tasks on heterogeneous clusters[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2011, 60(6): 800-812.
- [13] OH Y, SON S H. Scheduling real-time tasks for dependability[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1997, 48(6): 629-639.
- [14] ZHENG Q, VEERAVALLI B, THAM C K. On the design of fault-tolerant scheduling strategies using primary-backup approach for computational grids with low replication costs[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2009, 58(3): 380-393.
- [15] NANDA S, CHIUEH T, BROOK S. A Survey on Virtualization Technologies[R]. USA: RPE, 2005.
- [16] BALASANGAMESHWARA J, RAJU N. Performance-driven load balancing with primary-backup approach for computational grids with low communication cost and replication cost[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2013, 62(5): 990-1003.

作者简介:



王吉 (1990-), 男, 江苏常州人, 国防科学技术大学硕士生, 主要研究方向为云计算、容错调度、实时系统等。

包卫东 (1971-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 国防科学技术大学教授, 主要研究方向为信息系统工程、组织分析与设计、云计算等。

朱晓敏 (1979-), 男, 辽宁盘锦人, 国防科学技术大学副教授, 主要研究方向为云资源调度与优化、集群计算、多卫星调度等。