

延迟容忍移动传感器网络中 基于最优距离的可靠节能传输策略

张晓娟, 马学彬, 王洪彬

(内蒙古大学计算机学院, 内蒙古呼和浩特 010021)

摘要: 在延迟容忍移动传感器网络(Delay Tolerant Mobile Sensor Networks, DTMSN)的数据传输过程中容易出现数据丢失及节点因能量耗尽而导致网络生存时间减少的问题. 针对上述问题本文提出了基于最优距离的可靠节能传输策略, 该传输策略利用距离与能量的关系解决了 DTMSN 中的三个重要问题: 可靠性、能源效率、网络生存时间. 首先, 在链路质量保证下, 引入了“可靠节能距离”和“可靠能量平衡距离”两个概念. 此外, 通过分析节点间距离、节点运动方向及节点当前剩余能量来确定节点的综合效用值, 最后根据综合效用值的大小来路由消息. 实验结果表明, 该策略显著提高了消息的投递率及可靠性保证下传感器节点的能量利用率, 延长了网络的生存时间.

关键词: 延迟容忍移动传感器网络; 最优距离; 可靠节能传输策略

中图分类号: TN929.5; TP18

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2019)01-0105-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.01.014

Energy-Efficient Reliable Transmission Strategy Based on Optimal Distance in Delay Tolerant Mobile Sensor Networks

ZHANG Xiao-juan, MA Xue-bin, WANG Hong-bin

(College of Computer Science, Inner Mongolia University, Hohhot, Inner Mongolia 010021, China)

Abstract: In the data transmission process of the delay tolerant mobile sensor networks, the data is easy to get lost and the network lifetime decreases due to energy exhaustion. We propose an energy-efficient reliable transmission strategy based on the optimal distance. The transmission strategy addresses three important requirements for DTMSN: reliability, energy-efficiency and network lifetime. First, the notions of "reliable energy-efficient distance" and "reliable energy-balanced distance" are introduced under the link quality assurance. In addition, the comprehensive utility value of the node is determined by analyzing the distance between nodes, the moving direction of the node and the current residual energy of the node. Finally, the messages are forward according to the comprehensive utility value. The simulation results show that the strategy can improve the energy utilization of the sensor nodes and prolong the network lifetime in the guarantee of delivery ratio and the reliability of the messages.

Key words: delay tolerant mobile sensor networks; optimal distance; energy-efficient reliable transmission strategy

1 引言

目前, 延迟容忍移动传感器网络(Delay Tolerant Mobile Sensor Network, DTMSN^[1])中的应用越来越多, 例如车辆、人或动物携带传感器节点移动收集数据等. 在DTMSN中节点间的连接随时可能断开, 数据传输需要依赖节点移动带来的相遇机会而实现, 导致数据传输过程中出现随机性丢包现象, 影响数据传输的可靠性. 另外, 传感器节点通常是由电池供电, 节点很容易因电量不足而失效. 因此如何在保证链路可靠性的条件下,

降低节点的通信能耗、均衡网络能量以延长网络生存时间成为要解决的一个重要问题.

在传感器网络中, 提高网络的能量效率、可靠性和网络生存时间的路由算法有很多, 大致可以分为以下四类:

第一类是考虑链路可靠性的路由算法, 如 De Couto^[2]等人引入期望传输计数的概念, 以寻找对于丢失分组恢复需要较少重传次数的链路. He T, Stankovic J A^[3]等人提出 SPEED 算法, 通过采用邻居反馈策略和反向压力路由变更机制来提高数据传输的可靠性和实时性, 但这些算法都没有考虑节点消耗的能量, 降低了网络生存时间.

第二类是寻找节能可靠路径的路由算法,如文献[4~8].文献[6]在链路和设备不可靠的情况下,通过将功率控制技术集成到节能路由中,研究如何在多跳无线网络中实现可靠节能的路由.但是该算法忽略了节点的剩余能量,导致部分节点过度使用,网络生存时间减少.文献[8]通过研究无线自组织网络的能量效率、可靠性和网络生存时间,提出了可靠的最小能量成本路由算法和可靠的最小能量路由算法,与本文不同的是该算法利用发射功率来表征能量的消耗.

第三类是利用较高电量节点传输数据的节能路由,如文献[9~15].文献[12]将两个节点间的通信能量消耗率和节点剩余能量水平作为链路成本,提出了一种最小成本路径路由算法.文献[14]通过对路由消息时传输功率和接收功率进行建模,定义了与传感器节点剩余能量有关的成本函数.这些算法虽然都延长了网络生存时间,但忽略了网络的能源效率及可靠性.

第四类是基于距离的节能路由算法,文献[16]中通过“最节能距离”和“能量平衡距离”两个概念,提出了无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)中基于最佳距离的传输策略.文献[17]提出了基于节点传输距离的多级最小化和能量平衡传输策略.文献[18]在带状网络模型上提出了一种基于精确距离的能量平衡传输策略.文献[19]提出了一种基于RVN的能量均衡的多跳中继传输方案,该方案利用传感器节点的剩余能量来选择下一跳中继节点.文献[20]提出了一种基于距离的能量感知路由协议DER,它根据传感器节点和汇聚节点之间的距离以及节点的剩余能量来减少传输副本,从而节省能量.但是这些算法仅仅考虑了能量因素,却忽略了消息传输的可靠性.

本文在现有研究的基础上提出了一种DTMSN中基于最优距离的可靠节能传输策略.基本思想是,首先提出“可靠节能距离”和“可靠能量平衡距离”两个概念,并根据传感器节点的通信能耗求出相应的最优距离.其次将节点间的距离、节点的运动方向及剩余能量等因素结合起来计算节点的综合效用值.最后根据节点综合效用值的大小来路由消息.

2 系统模型设计

2.1 网络模型

本文假设在初始状态时, N 个传感器节点随机并均匀地分布在半径为 R 的圆形区域内.传感器节点的通信半径为 r ,环的宽度为 $\omega = r$;将该区域划分为 M 个不相交的同圆心且 $M = R/\omega$;作角度为 θ 的楔形,通过与 M 个同心圆的交点将该楔形划分为 M 个扇区,分别表示为 $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_M$,如图1所示.并且其具有以下性质:

(1)普通传感器节点均具有相同的初始能量 ε_0 和

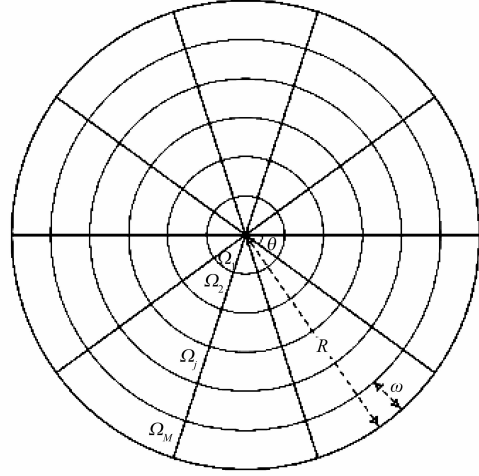


图1 网络模型

相同的通信范围 r ,并配有GPS设备.这些传感器节点的运动规律符合随机路点^[21]运动模型.

(2)在网络中只有一个汇聚节点,有足够的能量,且部署在固定的位置.

(3)由于节点随机分布和移动,所以节点的密度 σ 可以表示为:

$$\sigma = N/S \quad (1)$$

其中 N 为网络中的节点总数, S 为网络面积.

(4)假设节点 i 的坐标为 $i(x_i, y_i)$,节点 j 的坐标为 $j(x_j, y_j)$,则这两个节点间的距离为:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (2)$$

(5)假设节点每秒钟产生的数据为 φ ,对于扇区 Ω_i 内的所有节点自身产生的数据量 ξ_i 为:

$$\xi_i = \varphi \cdot \sigma \cdot \frac{\theta}{2\pi} \{ \pi (i\omega)^2 - \pi [(i-1)\omega]^2 \} \quad (3)$$

(6)对于任意扇区 Ω_i ,需要传输的数据量 Γ_i 为:

$$\Gamma_i = \xi_i + \Phi_i \quad (4)$$

其中, Φ_i 指扇区 Ω_i 内所有节点接收的数据量(即 Ω_i 所在楔形内扇区号大于 i 的扇区 DSS_i 的所有节点产生的数据量),计算方式如下:

$$\Phi_i = \sum_{\Omega_j \in DSS_i} \xi_j \quad (5)$$

2.2 能量模型

本文的能量消耗模型采用自由空间模型^[22].传感器节点将 l [bit]的数据发送给距离为 d 的节点所消耗的能量 $E_{Tx}(l, d)$ 为:

$$E_{Tx}(l, d) = E_{Tx-elec}(l) + E_{Tx-amp}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + l\varepsilon_{amp}d^2, & d < d_0 \\ lE_{elec} + l\varepsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (6)$$

传感器节点接收 l [bit]数据消耗的能量 $E_{Rx}(l)$ 为:

$$E_{Rx}(l) = E_{Rx-elec}(l) = lE_{elec} \quad (7)$$

其中 $d_0 = \sqrt{\varepsilon_{amp}/\varepsilon_{mp}} = 87.7\text{m}$,本文规定 $r < d_0$.

2.3 可靠性模型

由于在 DTMSN 中,无线信道不稳定,容易遭到噪声、信号衰落等干扰,部分数据包在传输过程中容易丢失.为了保证数据包能够被汇聚节点接收,需要对丢失的数据包进行检测,并反馈重发.本文利用逐跳(hop-by-hop, HBH)自动重传机制来保证数据包的可靠性^[14].

假设节点 u 允许传输一个数据包的次数(包括第一次传输)为 Q_u .而对于相同的数据包,可以发送不大于 Q_u 的随机次数的 ACK 包.假设节点 u 需要将 L_d [bit] 的数据包发送至节点 v 的预期的次数(包括第一次传输)为 $E[n_{u,v}(L_d)]$,节点 v 发给节点 u 的长度为 L_h [bit] 的 ACK 包的预期次数为 $E[m_{v,u}(L_h)]$ 且 $L_h = \kappa L_d$.用 $p_{u,v}(x)$ 表示节点 u 通过节点 v 发送长度为 x [bit] 的“数据包接收率(Packet Reception Ratio, PRR)” ,则:

$$E[n_{u,v}(L_d)] = \frac{1 - (1 - p_{u,v}(L_d))p_{v,u}(L_h)^{Q_u}}{p_{u,v}(L_d)p_{v,u}(L_h)} \quad (8)$$

$$E[m_{v,u}(L_h)] = \sum_{i=0}^{Q_u} i \Pr\{m_{v,u}(L_h) = i\} \quad (9)$$

其中 $\Pr\{m_{v,u}(L_h) = i\}$ 表示节点 v 发给节点 u 的长度为 L_h [bit] 的 ACK 包的次数为 i 的概率,如式(10)计算.

$$\Pr\{m_{v,u}(L_h) = i\} = \begin{cases} (1-p)^{Q_u}, i=0 \\ p^{Q_u}(1-p)^{Q_u-1}, i=Q_u \\ \sum_{j=1}^{Q_u-1} \binom{j-1}{i-1} p^{i-1} (1-q)^{i-1} (1-p)^{j-i} pq \\ + \binom{Q_u-1}{i-1} p^{i-1} (1-p)^{Q_u-i} (1-q)^{i-1} p \\ + \binom{Q_u-1}{i} p^i (1-p)^{Q_u-1-i} (1-q)^i (1-p), \\ \forall i=1, \dots, Q_u-1 \end{cases} \quad (10)$$

由于整个网络是同构网络,每个节点的 PRR 均相同,设两节点间的传输路径为 $\varphi(n_1, n_{h+1}) = \{n_1, n_2, \dots, n_h, n_{h+1}\}$,则对于 $\forall i$ 有:节点 i 允许的重传次数 $Q_i = Q_u$;预期数据包的传输次数 $E[n_{i,i+1}(L_d)] = n$;预期 ACK 包的传输次数 $E[m_{i+1,i}(L_h)] = m$;链路质量 $p_{n_i, n_{i+1}}(x) = p_{n_{i+1}, n_i}(x)$.

3 基于最优距离的可靠节能传输策略

3.1 可靠节能距离 RMEED (Reliable Most Energy-Efficient Distance)

在多跳传输方式中,文献[23]证明,给定源节点与目的节点的距离 D 以及中继节点的个数 $x-1$,当所有单跳距离 $d = D/x$ 时,消耗的能量最少.在这种情况下:

$$x = D/d \quad (11)$$

在本文利用了 HBH 自动重传机制保证数据包传输

的可靠性情况下,假设传输 L_d [bit] 的数据需要消耗的能量为 $a(L_d)$,接收 L_d [bit] 的数据需要消耗的能量为 $b(L_d)$,将 L_d [bit] 的数据传输至汇聚节点消耗的总能量为 E_{Total} ,计算方式分别如式(12)、(13)、(14).

$$a(L_d) = n(L_d E_{\text{elec}} + L_d \varepsilon_{\text{amp}} d^2) + mL_h E_{\text{elec}} \\ = (n + m\kappa) L_d E_{\text{elec}} + nL_d \varepsilon_{\text{amp}} d^2 \quad (12)$$

$$b(L_d) = nL_d E_{\text{elec}} + m(L_h E_{\text{elec}} + L_h \varepsilon_{\text{amp}} d^2) \\ = (n + m\kappa) L_d E_{\text{elec}} + m\kappa L_d \varepsilon_{\text{amp}} d^2 \quad (13)$$

$$E_{\text{Total}} = (x-1)E_{R_x}(L_d) + xE_{T_x}(L_d) \\ = (x-1)b(L_d) + xa(L_d) \quad (14)$$

结合式(11)(14)可得:

$$E_{\text{Total}} = \frac{2D}{d} E_{\text{elec}}(nL_d + mL_h) + dD\varepsilon_{\text{amp}}(nL_d + mL_h) \\ - nL_d E_{\text{elec}} - mL_h E_{\text{elec}} - mL_h \varepsilon_{\text{amp}} d^2 \quad (15)$$

将式(15)的一阶导数设置为 0,求 d 的值,将使 E_{Total} 取得最小值的 d 的值记为 d_{RMEED} ,即为可靠节能距离.

定理 1 如果在多跳通信中保证链路可靠性的条件下,当所有的节点都按照 d_{RMEED} 距离发送数据,传输路径消耗的能量最少.由于易于理解,此处证明省略.

3.2 可靠能量平衡距离 RMEBD (Reliable Most Energy-Balanced Distance)

假设网络中的每个扇区 Ω_i 内任一节点都消耗近似相同的能量 Θ ,此时整个网络中节点消耗的能量基本均衡,则 Θ 可以表示为:

$$\Theta \approx \frac{b(\Phi_i) + a(\Phi_i + \xi_i)}{Q_i} \\ = \frac{\Phi_i [(n + m\kappa) E_{\text{elec}} + m\kappa \varepsilon_{\text{amp}} d^2]}{Q_i} \\ + \frac{(\Phi_i + \xi_i) [(n + m\kappa) E_{\text{elec}} + n\varepsilon_{\text{amp}} d^2]}{Q_i} \quad (16)$$

根据式(16)可以求出使每个扇区 Ω_i 任一节点都消耗近似相同的能量 Θ 的传输距离 d 的表达式:

$$d \approx \sqrt{\frac{\Theta Q_i - E_{\text{elec}}(2\Phi_i + \xi_i)(n + m\kappa)}{(\Phi_i m\kappa + \Phi_i n + \xi_i n) \varepsilon_{\text{amp}}}} \quad (17)$$

根据网络模型可知最外层扇区 Ω_M 内的传感器节点仅仅是在传输数据时消耗能量,消耗的能量为:

$$\bar{E}_M = \frac{E_{T_x}(l_M, d_M)}{Q_M} = \frac{\xi_M [(n + m\kappa) L_d E_{\text{elec}} + nL_d \varepsilon_{\text{amp}} d^2]}{Q_M} \\ = \frac{\xi_M [(n + m\kappa) E_{\text{elec}} + n\varepsilon_{\text{amp}} d^2]}{Q_M} \quad (18)$$

将这里所求的 d 记为 d_{RMEBD_0} ,即为可靠能量平衡距离.

定理 2 如果在多跳通信中,保证链路可靠性的条件下,当所有的节点都按照 d_{RMEBD_0} 距离发送数据,在整个网

络中可以实现能量平衡. 由于易于理解, 此处证明亦省略.

3.3 综合效用值的定义

在消息传输过程中, 当两个节点相遇时, 首先通过询问和应答报文交换彼此所拥有的网络信息. 根据自身和邻居节点的可靠节能距离、可靠能量平衡距离、运动方向和当前剩余能量等有效信息, 节点将通过式(19)计算此刻所具有的综合效用值, 该值越大, 表明节点在网络中进行消息传递的能力越强.

$$U_{ij} = U_x \times U_y \quad (19)$$

本文将综合效用值分为相对效用值 U_x 和绝对效用值 U_y 两部分. 相对效用值用来表明两个节点相比, 哪个节点更有助于消息在网络中的传递, 计算方法如式(20).

$$U_x = \alpha e^{-|d_x - d_{\text{EMBED}}|} + (1 - \alpha) e^{-|d_x - d_{\text{EMBED}}|} \quad (0 \leq \alpha < 1) \quad (20)$$

其中 α 是权重因子.

绝对效用值用来表明节点本身的资源使用情况, 包括节点的运动方向和节点的剩余能量两个因素, 计算方法如式(21). 在该式中, 若当节点的剩余能量为 0 或运动方向与汇聚节点的方向完全相反时, 结果为 0.

$$U_y = \left(1 - \frac{\theta_j}{\pi}\right) * \frac{E_j}{\varepsilon_0} \quad (21)$$

其中 θ_j 表示节点 j 与汇聚节点方向的夹角, E_j 表示节点 j 的当前剩余能量.

3.4 消息传输策略

本文中的消息以单副本进行传输, 并且节点间的消息传输是依据各节点的综合效用值进行.

节点 i 在传输消息前首先通过握手信息分别获取其它各邻居节点的综合效用值, 节点 i 将邻居节点按照综合效用值由大到小进行排列后将消息传输给综合效用值大于自身且综合效用值最高的节点. 这个过程依次进行, 直至将消息成功传输至汇聚节点. 具体传输策略如算法 1 所示.

算法 1 消息传输策略

```

Φ // Φ represents the neighbor nodes set
j = 0 // node index in neighbor nodes set
max Val = 0 // maximum value of node utility value
for n = 1; n ≤ |Φ|; n++ do // |Φ| represents the number of nodes in Φ
    if Φn. Utility Val > max Val then
        max Val = Φn. Utility Val // Φn represents the n-th node in set Φ
        j = n
    end if
end for
if j > 0 then
    for wardmessage(Φj)
end if

```

4 仿真实验

仿真实验主要实现了基于最优距离的可靠节能传输策略 (RBOD)、基于最优距离的节能传输策略 (BOD)、随机选择下一跳节点的传输策略 (RAN) 以及基于距离的能量感知路由协议 (DER), 从以下两个方面进行性能比较:

(1) 对本文提出的 RBOD 与 BOD、RAN 在消息投递率、网络负载率、时延、平均跳数、能量平衡因子 (EBF) 和网络生存时间等方面进行比较. 本文将网络生存时间定义为从网络开始工作到首个死亡节点出现之间的间隔时间; 将能量平衡因子 (Energy-Balanced Factor, EBF) 定义为所有传感器节点当前剩余能量的标准差, 即

$$EBF = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [E_i(t) - E_{\text{avg}}(t)]^2} \quad (22)$$

其中, N 是全网节点数; $E_i(t)$ 是 t 时刻节点 i 的剩余能量值; $E_{\text{avg}}(t)$ 是 t 时刻全网节点剩余能量的平均值.

(2) 分别研究不同的网络节点密度、不同的通信半径、不同的链路质量对 RBOD、BOD 及 RAN 的影响.

在实验中, 将节点的整个运动区域定义为网络半径为 400m 的圆, 汇聚节点位于圆心位置. 其它的网络参数以及相应的默认值如表 1 所示. 本文的实验结果均为 100 次独立实验结果的均值.

表 1 模拟参数设置

参数	值
网络的半径: R	400m
仿真时间	10000 s
环的厚度: ω	50 m
网络中的节点数: N	100
节点的初始能量: ε_0	3 [J]
节点的通信半径: r	50 m
发送(接收)电路耗能的能量系数: E_{elec}	5nJ/bit
自由空间模型下发送电路耗能的放大系数: ε_{amp}	1000pJ/bit/m ²
多径衰落信道模型中功率放大器的能耗参数: ε_{mp}	0.13pJ/bit/m ²
HBH 系统的最大传输次数: Q_u	3
数据包的大小: L_d	4000 [bit]
ACK 数据包的大小: L_h	500 [bit]
节点每秒钟产生的数据: φ	160 [bit]
楔形的角度: θ	$\pi/6$
消息传送成功率 p	0.8
ACK 传送成功率 q	0.8

4.1 网络节点密度对性能的影响

在 DTMSN 中, 网络的拓扑结构与节点密度密切相关. 本组实验主要研究网络的节点密度对传输策略性能的影响. 在默认参数设置下, 将网络节点数量分别设置为 50、100、150、200、250 时, 比较各传输策略性能. 仿

真结果如图 2 所示.

图 2(a) 显示, RBOD 有最优的消息投递率, 特别是在节点数量较少时. 随着节点数量的增多, 虽然 RBOD 的投递率逐渐降低并趋于稳定, 但是其投递率始终高于 BOD、RAN. 而 BOD 的投递率则在节点数量为 200 时达到最高 78.8%, RAN 在节点数量为 100 时, 投递率达到最高 74.2% 后明显下降. 投递率之所以下降是由于节点密度增加, 节点相遇概率增大, 节点间的碰撞增强.

从图 2(b) 和 2(c) 可以看出, 三种传输策略的网络负载率和平均跳数对节点密度的变化尤为敏感, 均随着节点密度的增大而急剧升高. 但 RBOD 的网络负载率和平均跳数远低于 BOD 和 RAN, 关键原因是 RBOD 能够较准确地选择下一跳节点, 数据包发生碰撞的概率较低, 消息传输的跳数较少. 但是, 对于平均时延来说, 如图 2(d) 可见, 随着节点密度的增加, 平均时延急

剧下降, 关键因素是当节点密度较高时, 网络连通性增强, 节点之间相遇变得容易. RBOD 的时延较高, 但相比于消息的生存时间 (Time To Live, TTL) 300min, 最高时延 890s 仅仅是消息 TTL 的 5%. 而 RAN 是随机选择下一跳节点, 因此其时延最低.

从图 2(e) 可以看出网络密度相同时, RBOD、BOD、RAN 的网络生存时间依次减少, 且随着节点密度的增大, 网络生存时间都逐渐减少, 这是由于节点数量增多, 网络中的数据包数量增多, 传感器节点消耗的能量增加.

图 2(f) 展示了在网络生存时间内, 节点的 EBF 均值. 从整体来看, 随着节点数量的增多, EBF 值逐渐减小, 网络中各节点的能耗平衡性能较好. 当节点数量小于 150 时, RBOD 的 EBF 值低于 BOD、RAN. 而当节点数量为 200、250 时, RAN 的 EBF 均值最小, 这是因为随着节点数量的增多, RAN 的投递率急剧下降, 节点消耗的能量趋于平衡.

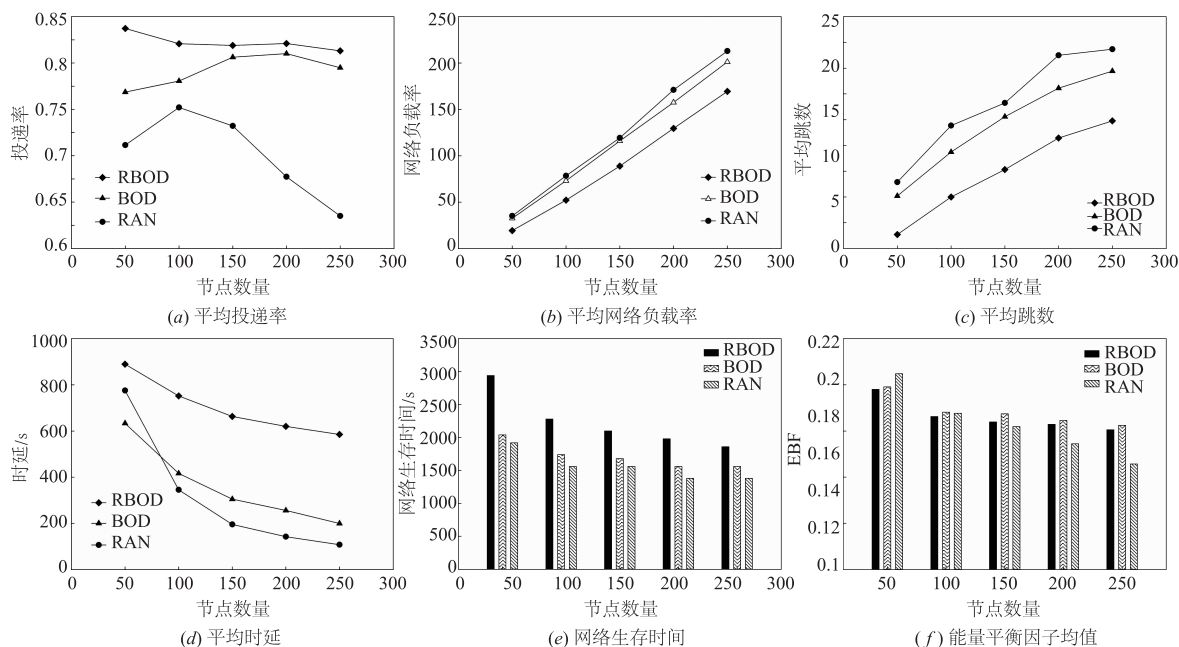


图 2 网络节点密度的影响

4.2 节点通信半径对性能的影响

本组实验主要研究在默认网络参数设置下, 不同节点通信半径对各传输策略性能的影响. 仿真结果如图 3 所示.

对于投递率, 图 3(a) 显示随着通信半径的增大, RBOD 在通信半径为 70m 时达到最高 83.6% 后降低, BOD 在通信半径为 70m 时达到最大 81.6% 后趋于稳定, 而 RAN 则在通信半径为 60m 时达到最大 77.1% 后逐渐减小. 整体来看, 当通信半径超过 30m 时, RBOD 的投递率均大于 BOD、RAN. 这是由于通信半径较小时, 网络的连通性较差, 消息投递率较低. 随着通信半径的增加, 节点间相遇频繁, 消息投递率随之升高. 而当通

信半径增大到一定程度后, 虽然网络的连通性增强提高了消息传输的可能性, 同时也增大了数据传输的碰撞范围, 使数据包之间发生碰撞的概率增大, 反而使消息的投递率降低.

对于网络负载率和平均跳数, 如图 3(b) 和图 3(c) 所示, RAN 随着通信半径的增大逐渐增大后趋于平稳; RBOD 在通信半径为 70m 时达到最小后增大; BOD 则在通信半径为 40m 时达到最大后急速下降. 图 3(e) 显示随着通信半径的增大, RBOD 的网络生存时间逐渐增大直至通信半径为 70m. 而 BOD、RAN 的网络生存时间逐渐减小后基本保持不变. 这充分验证了 RBOD 可以节省节点能量, 延长了网络生存时间. 对于 EBF 如图 3

(f)所示,虽然在通信半径较小时, RBOD 中的 EBF 值较大,但是随着通信半径的增大, EBF 值始终保持比 BOD、RAN 都小. 当通信半径增至 70m 时, RAN 中的 EBF 均值最小,这是由于此时投递率下降,传输消耗的能量减少,节点能耗趋于平衡. 另外,通过图 3(d)可以看出三种传输策略的时延均随着通信半径的增大而减小,这是由于通信半径增大,节点间相遇的可能性增

加,从而使数据包能够更快地在节点之间进行转发.

综合各个性能, RBOD 性能最优,且在通信半径为 70m 时性能最好,而 BOD 较 RAN 性能较好,但在通信半径为 40m 时花销较大.

4.3 网络链路质量对性能的影响

本文中用 PRR 来衡量 WSN 的链路质量,如图 4 所示,网络的链路质量对网络性能影响相当大.

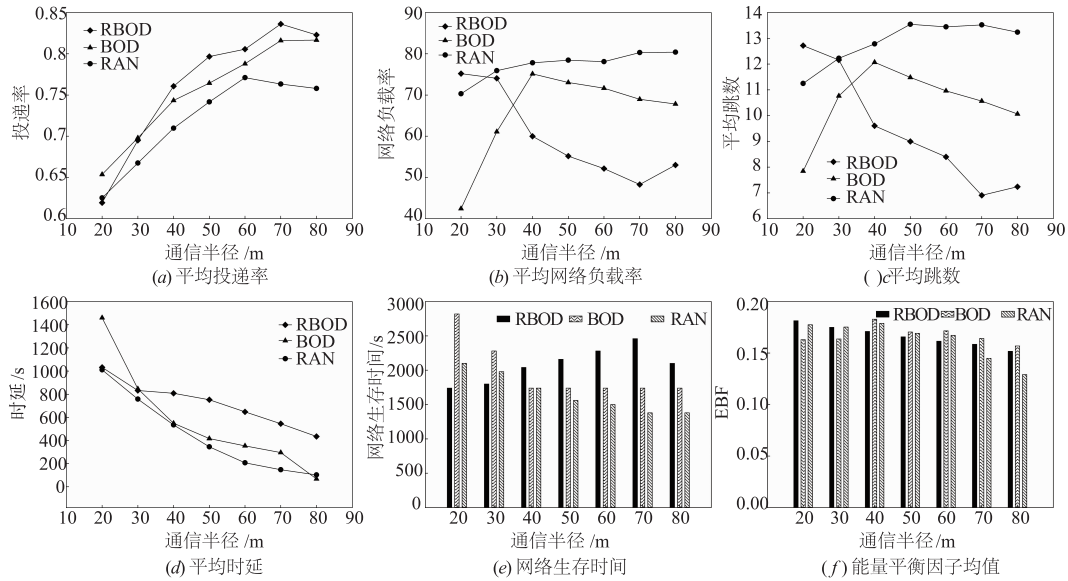


图3 通信半径大小的影响

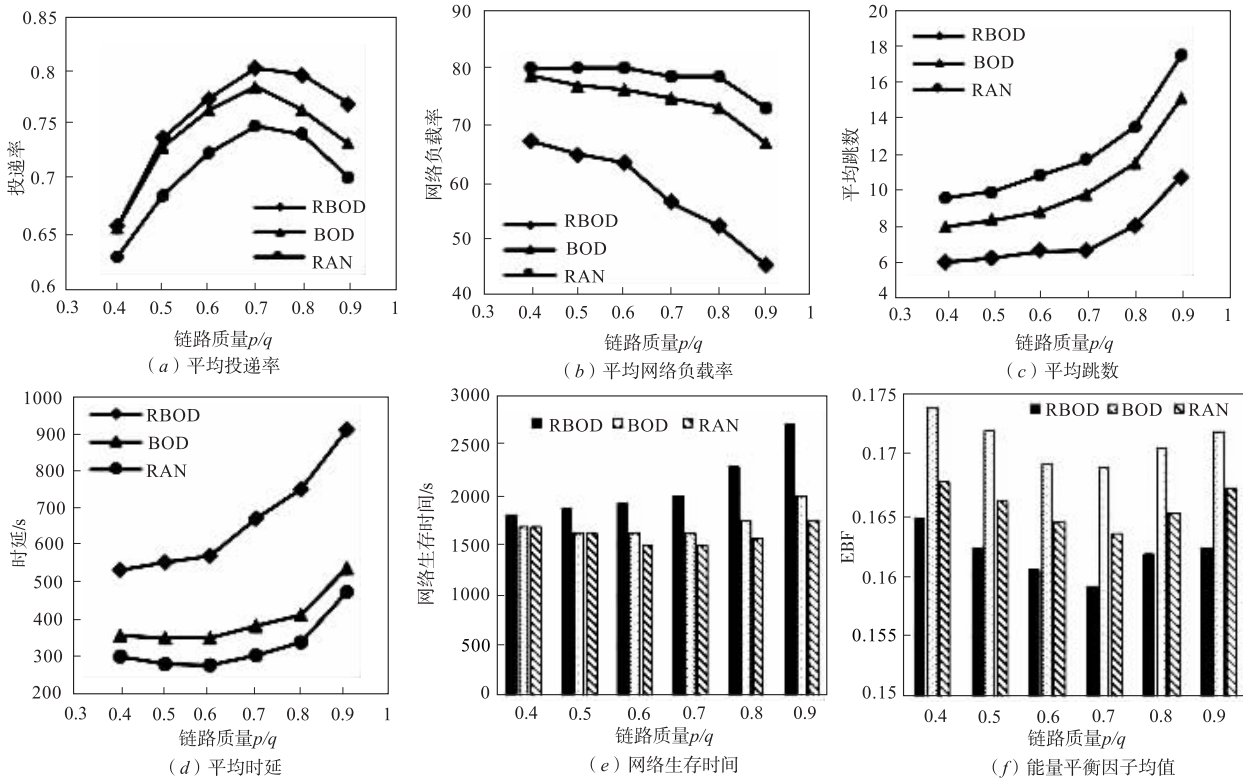


图4 链路质量的影响

从图 4(a)中可以看出,随着链路质量的提高, RBOD、BOD 及 RAN 的投递率均在 $PRR = 0.7$ 时最高,分别为 80.2%、78.6%、75.0%。随着链路质量的提高,数据包在传输过程中被丢弃的概率降低,消息投递率升高。而当链路质量提高到一定程度后,虽然数据包被丢弃的概率降低,但是网络中消息的数量显著增加,数据包之间发生碰撞的概率增加,从而使投递率降低。图 4(b)显示随着链路质量的提高,消息投递需要传输的次数显著减少,网络负载率降低,而 RBOD 几乎呈线性下降趋势。

从图 4(c)和 4(d)中可以看出随着链路质量的提高, RBOD、BOD 及 RAN 的平均跳数和时延不断增加,且在 $PRR > 0.7$ 时呈线性上升趋势。由于链路质量提高,网络中数据包被丢弃概率降低,数据包数量聚集,排队等待传输的时间延长,传输数据包到目的节点的跳数增加。

图 4(e)显示 RBOD 的网络生存时间随着链路质量的提高也在提高,而 BOD 及 RAN 的网络生存时间则趋于稳定。图 4(f)显示对于网络的 EBF 值,当 $PRR = 0.7$ 时达到最优,且 RBOD 的 EBF 值最小,网络中的能量平衡性能最好。因为 $PRR = 0.7$ 时,网络中的各个节点的

能量都得到了充分利用,EBF 均值最低。

整体来看, RBOD 在 $PRR = 0.7$ 时表现出最优的传输性能。

4.4 RBOD 与 DER 传输策略的比较

为了进一步证明本文提出的传输策略的有效性,本组实验主要研究在默认参数设置下,不同网络节点密度对 RBOD 与 DER^[20]所能达到的投递率、时延以及 EBF 均值的影响。仿真结果如图 5 所示。

从图 5(a)中可以看出相比于 DER, RBOD 有较优的消息投递率,因为它使用了确认重传机制,保证了消息传输的可靠性。随着节点密度的增加,消息投递率趋于稳定并有下降趋势,这是网络中节点数量增多,节点相遇概率增大,节点间的碰撞增强导致的。对于平均时延来说,如图 5(b)可见,随着节点密度的增加,平均时延下降。由于节点密度高,网络连通性强,节点容易相遇。但是 DER 在选择中继节点时花费的时间较少,因此其时延比 RBOD 低。图 5(c)显示当节点密度相同时, RBOD 的 EBF 值远远低于 DER,说明 RBOD 在网络能量平衡性能方面表现更优。

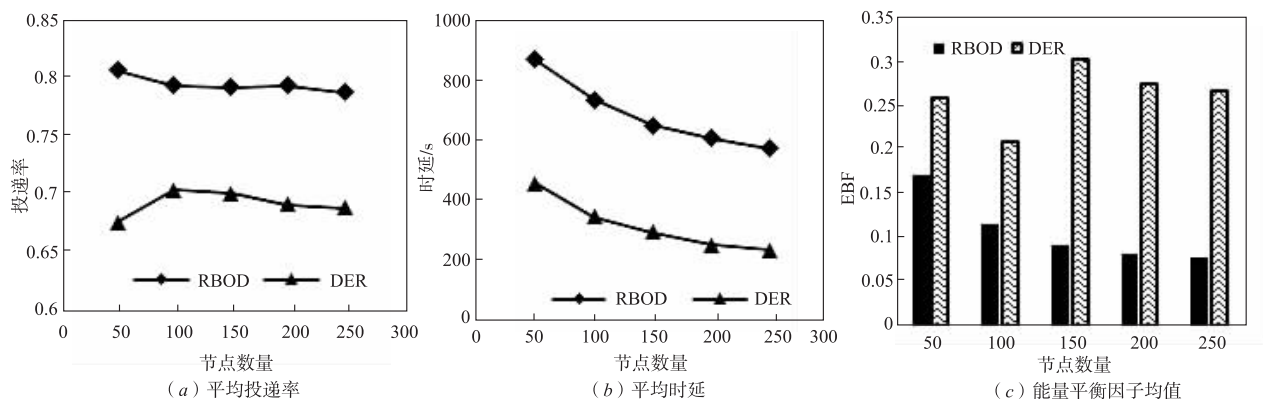


图 5 RBOD与DER传输策略的比较

5 结束语

本文针对 DTMSN 中的能量有限性及链路质量不可靠的特点,提出基于最优距离的可靠节能传输策略。在该传输策略中,消息的转发根据节点的综合效用值确定,使节点能够以尽可能高的投递率且尽可能小的能量消耗将消息发送至汇聚节点,其中综合效用值由可靠节能距离和可靠能量平衡距离、节点的移动方向以及节点的剩余能量等因素计算。实验结果表明,该传输策略虽然平均时延有所增加,但是提高了投递率,降低了网络负载率、平均跳数,节省并均衡了节点能量消耗,延长了网络生存时间,而且在单副本传输情况下保证了消息传输的可靠性,是一种高效的传输策略。

下一步将考虑如何在可靠性以及投递率、网络负

载率等性能的保证下,减小时延。另外,DTMSN 使用无线通信的方式传输消息,使得传输的内容很容易被截获,因此如何保证 DTMSN 中数据传输的安全也是接下来的研究重点。

参考文献

- [1] WANG Yu, LIN Fang, WU Hong-yi. Efficient data transmission in delay fault tolerant mobile sensor networks (DFT-MSN)[A]. IEEE International Conference on Network Protocols[C]. IEEE, 2005. 1021 - 1034.
- [2] COUTO DSJD, AGUAYO D, BICKET J, et al. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing[J]. Wireless Network, 2005, 11(4): 419 - 434.
- [3] HE T, STANKOVIC J A, LU C, et al. SPEED: A stateless

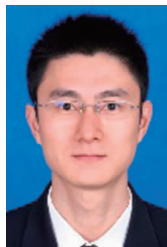
- protocol for real-time communication in sensor networks [A]. International Conference on Distributed Computing Systems [C]. IEEE Computer Society, 2003. 46.
- [4] BANERJEE S, MISRA A. Minimum energy paths for reliable communication in multi-hop wireless networks [A]. Proceedings of the 3rd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing [C]. ACM, 2002. 146 – 156.
- [5] DONG Q, BANERJEE S, ADLER M, et al. Minimum energy reliable paths using unreliable wireless links [J]. ACM Mobihoc, 2005: 449 – 459.
- [6] LI X Y, WANG Y, CHEN H, et al. Reliable and energy-efficient routing for static wireless ad hoc networks with unreliable links [J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2009, 20(10): 1408 – 1421.
- [7] LI X Y, CHEN H, SHU Y, et al. Energy efficient routing with unreliable links in wireless networks [A]. IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems [C]. IEEE, 2006. 160 – 169.
- [8] VAZIFEHDAN J, PRASAD R V, NIEMEGEREERS I. Energy-efficient reliable routing considering residual energy in wireless ad hoc networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 13(2): 434 – 447.
- [9] SINGH S. Power-aware routing in mobile ad hoc networks [A]. Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking [C]. ACM, 1998. 181 – 190.
- [10] TOH C K. Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad hoc networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2001, 39(6): 138 – 147.
- [11] KIM D, GARCIA-LUNA-ACEVES J J, OBRACZKA K, et al. Routing mechanisms for mobile ad hoc networks based on the energy drain rate [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2003, 2(2): 161 – 173.
- [12] CHANG J H, TASSIULAS L. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(4): 609 – 619.
- [13] NAGY A S, EL-KADI A A, MIKHAIL M N. Swarm congestion & power aware routing protocol for MANETs [A]. Proceedings of the Communication Networks and Services Research Conference [C]. IEEE Computer Society, 2008. 517 – 525.
- [14] VERGADOS D J, PANTAZIS N A, VERGADOS D D. Energy-efficient route selection strategies for wireless sensor networks [M]. New York: Springer-Verlag, 2008.
- [15] MHATRE V, ROSENBERG C. Design guidelines for wireless sensor networks: communication, clustering and aggregation [J]. Ad Hoc Networks, 2004, 2(1): 45 – 63.
- [16] LIU X. An optimal-distance-based transmission strategy for lifetime maximization of wireless sensor networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(6): 3484 – 3491.
- [17] LIU X. A novel transmission range adjustment strategy for energy hole avoiding in wireless sensor networks [M]. Academic Press, 2016.
- [18] XIN H, LIU X. Energy-balanced transmission with accurate distances for strip-based wireless sensor networks [J]. IEEE Access, 2017: 16193 – 16204.
- [19] ZHANG Y, WANG K, SHU L, et al. An energy-balanced multi-hop relay transmission scheme based on RVNS in DTMSN [A]. Proceedings of the IEEE Global Communications Conference [C]. IEEE, 2015. 1 – 5.
- [20] MOTTAGHINIA Z, DABAGHIPOOR S, GHAFARI A. Distance and energy aware routing protocol for delay tolerant mobile sensor networks [J]. World Applied Sciences Journal, 2012, 19(1): 38 – 46.
- [21] CAMP T, BOLENG J, DAVIES V. A survey of mobility models for ad hoc network research [J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2010, 2(5): 483 – 502.
- [22] DOSHI S, BHANDARE S, BROWN T X. An on-demand minimum energy routing protocol for a wireless ad hoc network [J]. ACM Sigmobile Mobile Computing & Communications Review, 2002, 6(3): 50 – 66.
- [23] BHARDWAJ M, GARNETT T, CHANDRAKASAN A P. Upper bounds on the lifetime of sensor networks [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications [C]. IEEE, 2001. 785 – 790.

作者简介



张晓娟 女, 1990 年 7 月出生, 山西省霍州人. 本科毕业于山西师范大学, 现就读于内蒙古大学计算机学院, 主要研究方向为延迟容忍网络、移动网络.

E-mail: myandsunshine@hotmail.com



马学彬 男, 1981 年 4 月出生, 内蒙古赤峰人. 内蒙古大学副教授, 主要研究方向为无线网络、移动 IP、延迟容忍网络、信息安全.

E-mail: csmaxuebin@imu.edu.cn