

# 多媒体传感器网络中跨层优化的实时路由协议

王艳妹, 覃少华, 曹健, 叶佳宁

(广西师范大学计算机科学与信息工程学院, 桂林 541004)

**摘要:** 提出一种能量均衡的实时路由算法。通过 MAC 层和路由层协同设计, 在路由转发策略中, 充分考虑节点的剩余能量和可靠性。在拥塞控制机制中, 基于节点的缓存队列长度并结合收发数据速率来检测拥塞。仿真实验显示, 该路由算法有效地保证了数据的实时传输, 降低了通信能量的开销。

**关键词:** 路由协议; 多媒体传感器网络; 实时; 能量均衡

## Real-time Routing Protocol of Cross-layer Optimization in Multimedia Sensor Networks

WANG Yan-mei, QIN Shao-hua, CAO Jian, YE Jia-ning

(School of Computer Science and Information Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004)

**【Abstract】** A cross-layer optimization based routing protocol for Real-Time Energy-Balance(RTEB) is proposed, which achieves application-specified communication delays by collaborative design of MAC and routing. RTEB features an energy-balance forwarding policy and an active congestion control mechanism that are optimized for resource-constrained multimedia sensors. Simulation experiments show that RTEB effectively reduces the number of deadlines missed and energy consumption.

**【Key words】** routing protocol; multimedia sensor networks; real-time; energy-balance

### 1 概述

随着目标监测环境的日趋复杂多变, 由传统无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)所获取的简单数据已不能满足人们对目标环境感知的全面需求, 迫切需要将信息量丰富的多媒体技术引入到以 WSNs 为基础的目标环境监测活动中, 实现细粒度、精准信息的目标对象监测。由此, 无线多媒体传感器网络(Multimedia Sensor Networks, MSNs)<sup>[1]</sup>应运而生, 目前 MSNs 仍存在严重的能量约束问题, 带宽资源以及处理能力还相当有限, 而多媒体数据的传输需要网络具有更强的媒体传输能力, 能否有效解决多媒体数据实时的传输问题, 是 MSNs 实用化的关键。

### 2 问题描述

多媒体传感器节点处理能力、存储能力和通信能力相对较弱, 并使用能量有限的电池供电, 所以在解决 MSNs 实时传输问题时, 除了需要考虑时间约束问题外, 还需要考虑资源约束、链路不可靠等其他特性。针对 WSNs 的实时传输问题, 研究人员已经提出了一些路由协议, 其中比较有代表性的是 SPEED 协议<sup>[2]</sup>。该协议是一个实时路由协议, 能在一定程度上实现端到端的传输速率保证、网络拥塞控制以及负载均衡机制。但是 SPEED 协议没有考虑节点剩余能量及无线网络的链路质量问题, 同时它产生的控制消息开销也比较大。

针对 SPEED 协议的不足, 为了减少网络中节点能量的消耗, 使无线网络生存期最大化, 本文基于跨层优化思想提出了一种能量均衡的实时路由(Real-Time Energy-Balance, RTEB)协议。该协议充分利用了 MAC 层设计的指导作用, 尽量减少控制消息和数据重传的开销。同时在做路由决策时, 综合考虑了信道的链路状态和节点能耗问题。RTEB 具有下

列创新之处:(1)不同于 SPEED, 在做路由决策时, 主动考虑节点的剩余能量和可靠性;(2)不同于 MMSPEED<sup>[3]</sup>, 节点的可靠性不仅考虑了节点的转发成功率, 还考虑了通信节点间的传输成功率;(3)提出了一种不增加额外开销的基于缓存管理和节点收发数据速率的拥塞控制算法;(4)结合邻居表管理, 考虑了出现路由空洞的节点如何发送数据这一问题。

### 3 RTEB 路由算法机制

#### 3.1 网络模型

考虑一个由  $N$  个随机部署的多媒体传感器节点形成的网络。多媒体传感器节点随机部署在监测区域内, 其采集的数据沿着其他多媒体传感器节点逐跳进行传输, 经过多跳路由传送到汇聚节点, 最后通过 Internet 网络或通信卫星到达控制中心。假设:

(1)汇聚节点位于一个方形观测区域的外侧, 节点和汇聚节点部署后均不再移动;

(2)所有节点同构, 每个节点都有一个唯一的标识;

(3)节点已知自己和汇聚节点的地理位置信息。

传感器节点的绝大部分能量消耗在无线通信模块, 为了减少节点的通信能量消耗, RTEB 算法在路由转发策略中除了保证数据的实时传递, 还考虑了节点的可靠性; 在拥塞控制中, 利用不同的确认方式来通告节点当前的工作状态。

**基金项目:** 广西研究生教育创新计划基金资助项目(2008106020812 M257)

**作者简介:** 王艳妹(1984 -), 女, 硕士研究生, 主研方向: 多媒体传感器网络 QoS 路由; 覃少华, 副教授、博士; 曹健、叶佳宁, 硕士研究生

**收稿日期:** 2009-04-30 **E-mail:** wyme@mailbox.gxnu.edu.cn

### 3.2 RTEB 转发策略

首先计算满足实时传输的候选节点集合，然后综合考虑该集合中节点的剩余能量和可靠性来选择最优的下一跳节点，以实现网络的能耗均衡。

#### 3.2.1 可靠性计算

节点成功地路由数据分组  $p$  包含 2 个过程：(1)节点将数据分组转发出去；(2)该数据分组  $p$  成功到达下一跳节点。对于节点  $n$  的任一邻居节点  $i$ ，节点  $i$  的可靠性估计  $R_i$  可由它的转发成功率  $F_i$  和传输成功率  $T_i$  计算得到，表示为

$$R_i = 1 - (1 - F_i) \times (1 - T_i(D_{in}))$$

其中， $D_{in}$  是邻居节点  $i$  到节点  $n$  的距离。

节点的转发成功率是通过统计其发送的数据分组以及接收到的确认消息来近似估算，例如节点  $i$  接收到 ACK 消息  $p_a$ 、BACK 消息  $p_b$  和发送数据分组  $p_s$ ，其转发成功率为

$$F_i = \frac{p_a + 0.8p_b}{p_s}$$

关于 WSNs 中链路传输特性的研究<sup>[4]</sup>指出：在发射功率一定的情况下，存在一个距离范围，在该区域内，节点之间的通信链路质量非常不稳定，应避免使用该区域内的通信链路。文献[4]定义了数据分组传输成功率与通信节点距离之间的关系：

$$T_i(x) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{x}{r}\right)^{2\beta} & x < r \\ \frac{2}{2r-x} \left(\frac{2r-x}{r}\right)^{2\beta} & r < x < 2r \end{cases}$$

其中， $r$  是节点的传输范围； $x$  为节点间的距离； $\beta$  是能耗衰减因子(取值在 2~6 之间)。根据以上关系，很容易计算出节点的传输成功率。

#### 3.2.2 路由决策

MSNs 缺少有效的时钟同步机制，本文采用在数据分组中携带剩余生存期的方法来保证端到端的传输速率。通过节点  $j$  产生数据分组  $p$  及  $p$  的路由过程来详细说明转发策略。

源节点  $j$  根据自身到汇聚节点  $d$  的距离  $D_{jd}$  和数据分组  $p$  的传输速率  $S_{sys}$  来计算  $p$  的生存期  $t_{tl} = \frac{D_{jd}}{S_{sys}} \times \alpha$ 。其中， $0 < \alpha < S_{sys} \cdot \frac{RT}{L}$ ； $R$  为带宽； $T$  为传输距离； $L$  为数据分组长度； $\alpha$  为比例因子，由  $p$  的实时传输需求和当前网络传输能力给定。

当中间节点  $i$  接收到数据分组  $p$  时，首先计算最小传输速率阈值  $S_{req}$ ，从节点  $i$  的邻居节点集中确定满足实时传输的候选节点集合  $FCS(i)$ ；然后根据节点  $i$  邻居表(邻居 ID、位置、转发成功率、剩余能量、拥塞位)保存的信息进行路由选择，确定最优的下一跳，避免了路由选择的盲目性；最后更新  $p$  的生存期  $t_{tl} = t_{tl} - t_s - t_p$ 。节点  $i$  的路由选择方法如下：

$$N = \max \left\{ \frac{E_n \times R_n}{D_{nd}} \right\} (n \in FCS_i(Dest))$$

$E_n$  是  $FCS$  集合中第  $n$  个节点的剩余能量； $D_{id}$  是节点  $i$  到汇聚节点  $d$  的距离； $D_{nd}$  是  $FCS$  集合中第  $n$  个节点到汇聚节点  $d$  的距离； $D_{in}$  是节点  $i$  到第  $n$  个邻居节点间距离； $R_n$  是  $FCS$  集合中第  $n$  个节点的可靠性； $t_s$  是  $p$  在节点  $i$  上的服务时间； $t_p$  是  $p$  到达下一跳的传播时间。伪码如下：

$$S_{req} = D_{id}/t_{tl};$$

```
for(n=0;n<Neighbor.count,n++){
    if(Neighbor[n]->CN==1)continue;
    if(VOID) SetSpeedn=Dnd/(tl-(ts+tp));
    else SetSpeedn=(Did-Dnd)/(ts+tp);
    if(SetSpeedn > Sreq){
        Fn=Neighbor[n]->forward;
        Ri=1-(1-Fi)×(1-Ti(Din));
        value=Neighbor[n]->energy×Rn/Dnd;
        if(value>max Value){
            id=Neighbor[n]->id;
            max Value=value;
        }
    }
}
if(id==1){
    /*将数据转发到 Neighbor[n]->energy×Rn/Dnd 值最大的邻居节点*/
}
```

每个节点的邻居信息表只保存比自己距离目标区域更近的节点信息，通过广播 HELLO 消息来交互信息。由于节点是静止的，因此通过将能量和转发成功率按等级划分，当检测到剩余能量或转发成功率降低一等级，才广播 HELLO 消息以降低控制包的能耗。

#### 3.2.3 路由空洞避免

若节点  $i$  找不到比自己距离目标区域更近的邻居节点，即其邻居信息表为空，说明节点  $i$  出现路由空洞，则主动广播路由空洞消息，邻居节点接收到该消息后，将节点  $i$  从邻居信息表中删除，并将 VOID 置位 1。SPEED 协议没有考虑出现路由空洞的节点如何发送数据，在本文中，节点  $i$  转发数据必将影响实时传输性能，所以不再广播 HELLO 消息，而接收邻居节点的 HELLO 消息，加入到邻居信息表，以便节点  $i$  自身发送数据时，通过邻居节点转发出去。

### 3.3 拥塞控制

拥塞会造成网络传输能力的下降，由此产生的重传又进一步增加网络流量和节点的能耗<sup>[5]</sup>。本文根据节点的收发数据速率，结合缓存管理来检测拥塞。当节点检测到拥塞，采用 RED 丢包策略计算丢包概率，当计算的丢包概率大于系统阈值，则丢弃数据包来及时缓解拥塞。通过节点  $j$  向节点  $i$  发送数据分组  $p$  实例来说明其处理过程。

节点  $i$  采用如图 1 所示的流程检测拥塞，其中， $L_{min}$ 、 $L_{max}$  为缓冲器队列长度的 2 个门限值； $L_{len}$  为缓冲器队列大小； $P_r$ 、 $P_s$  为收集到的收发数据包数量； $CN$  为拥塞位。节点  $i$  收到  $p$  后，采用如图 2 所示的 3 种不同确认方式来通告其工作状态：ACK 表示工作正常，BACK 表示工作忙碌，NACK 表示拒绝服务。

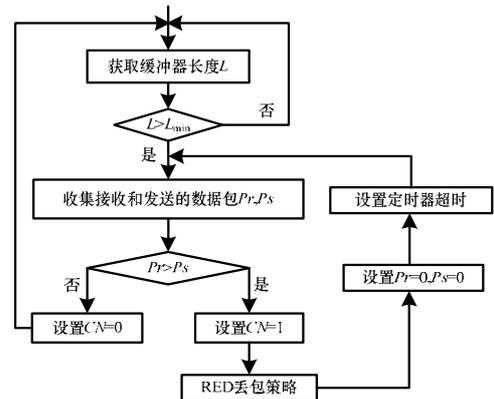


图 1 拥塞检测流程

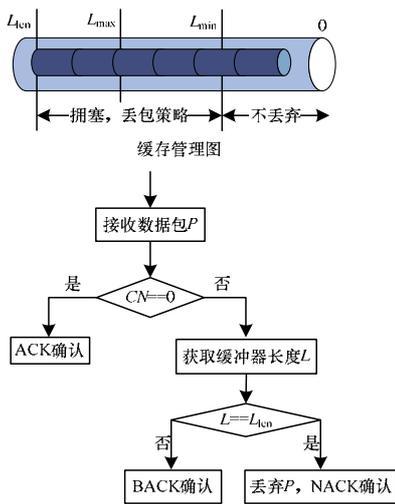


图2 确认消息流程

节点  $j$  发送  $p$  后进入等待确认状态，在超时之前收到确认消息，等待确认超时后，重传分组  $p$ ，若达到最大重传次数，则丢弃分组  $p$  并将节点  $i$  从邻居信息表中删除。其处理伪码如下：

```

switch(ACK_TYPE){
case ACK: break;
case BACK:
    Neighbor[i]->CN=1; /*置位节点 i 的拥塞位*/
    set a timer T, if( T timeout) then
    Neighbor[i]->CN=0; /*超时后，解除拥塞*/
    for(n=0 ;n< Neighbor. count, n++)
        if(Neighbor[n]->CN ==0) break;
        if(n ==Neighbor. count) CN=1;
    break;
case NACK:
    reroute packet p;
    if (find a relaying node){
        send packet p ;}
    else{ drop packet p ;}
    break;
}

```

其他邻居节点监听到 BACK 确认消息，也将节点  $i$  的拥塞位  $CN=1$ ，并设置定时器  $T$ ，超时后重置  $CN=0$ 。

#### 4 仿真结果

仿真工具采用基于 OMNET++ 的 Mobility Framework 框架。仿真平台在 Linux 下搭建，实验在  $200 \times 200$  的区域内随机分布了 100 个节点，节点的通信范围为 87 m，采用 IEEE 802.11 MAC 层协议。在相同的节点分布条件下，对 RTEB 和 SPEED 进行对比分析实验。为了模拟拥塞情况，每个源节点数据包产生的速率为 120 p/s，仿真时间为 100 s。

主要从 3 个方面评估 RTEB 算法的性能：

- (1) 端到端的平均传输延迟；
- (2) 数据分组传输的成功到达率；
- (3) 通信能量的开销。

仿真结果如图 3~图 5 所示。和 SPEED 比较，RTEB 算法随着网络流量的增大，传输延迟平滑增加，主动拥塞控制机制使之不容易造成热区，即使发生了严重的拥塞，数据分组的成功到达率仍然可达 85%。另外，RTEB 算法大大减少了控制包的开销，并在路由决策时考虑节点的可靠性，减少数据重传次数，降低了网络的通信能耗。

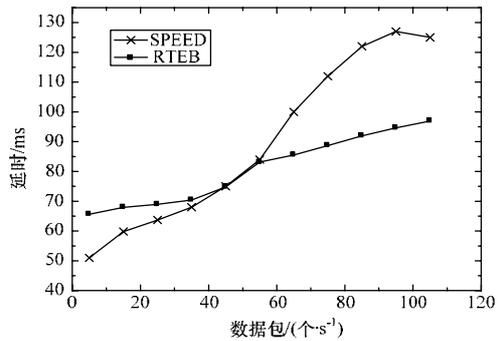


图3 传输延迟比较

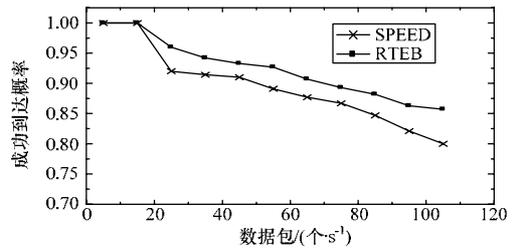


图4 成功到达率

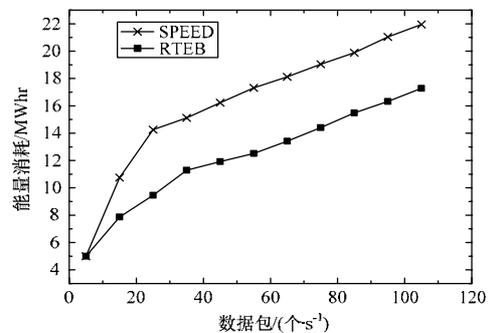


图5 通信能量开销

#### 5 结束语

本文基于跨层优化的思想提出一种新的基于能量均衡的实时路由协议 RTEB。其核心思想是做路由决策时，在保证端到端的传输速率基础上，充分考虑节点的剩余能量和可靠性选择最优下一跳来均衡网络的能量消耗和减少数据重传次数。同时采用主动拥塞检测机制，利用 MAC 层的 BACK 确认消息来通告拥塞，减少控制消息的开销。仿真实验表明，该路由算法在实时服务和能量消耗方面表现出很好的性能。

#### 参考文献

- [1] Akyildiz I F, Melodia T, Chowdhury K. Wireless Multimedia Sensor Networks: A Survey[J]. IEEE Wireless Communications, 2007, 14(6): 32-39.
- [2] He Tian, Stankovic J A, Lu Chenyang, et al. A Spatiotemporal Communication Protocol for Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2005, 16(10): 995-1006.
- [3] Felemban E, Lee C G, Ekici E. MMSPEED: Multipath Multi-speed Protocol for QoS Guarantee of Reliability and Timeliness in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2006, 5(6): 738-754.
- [4] 孙佩刚, 赵海, 罗玎玎, 等. 无线传感器网络链路通信质量测量研究[J]. 通信学报, 2007, 28(10): 14-22.
- [5] 罗娟, 唐文胜, 王威. 一种自适应的无线传感器网络拥塞缓解机制[J]. 计算机工程, 2008, 34(5): 92-94.

编辑 顾逸斐