

时间是不能直接转发的,必须等待候选节点的苏醒(因为 B 节点邻居节点之间除去重叠部分,其占空比之和只有 30%).因此,如果按照 ECC 的值排序, B 的预期能耗小于 A ,从而优先选择 B 进行转发的话仅仅是在当前情况下的最优选择,而在进行到下一跳的转发过程时, B 的选择代价是大于 A 的.因此当转发候选集确定后,具体选择哪个节点进行转发,本文协议考虑了通过转发候选节点的邻居节点占空比之和的判断因素.

在节点的每个周期中,易知其周期性醒来工作的时间为 $T_{wake}=L \times D_u$.假设使用 $T_{wake}^{over}(i, j)$ 表示转发候选集中节点 i 和 j 醒来时间的重叠部分,那么对于该过程的等待代价而言,所有邻居节点除重叠部分的占空比之和越大,该节点进行转发时的等待代价就越低.可以通过公式(10)计算对当前节点 u 的所有邻居节点的有效工作时间占总周期的比例 RoF_u :

$$RoF_u = \frac{\sum_{i \in N(u)} T_{wake} - \sum_{i, j \in N(u)} T_{wake}^{over}(i, j)}{L} \quad (10)$$

在上式的分子表示的时间段内,由于邻居节点中总有节点是处于唤醒状态,因此在该时间段内,当前节点总是能够立刻将数据发送出去.而等待阶段则由于没有任何一个候选节点处于唤醒状态,故当前节点的等待时间所占总周期的比例 RoW_u 为

$$RoW_u = 1 - RoF_u \quad (11)$$

可以看出,转发候选节点的 RoW_u 越小,其等待代价越小,节点发送数据的延迟也就越小.

2.3 EDOR协议原理

2.3.1 协议概述

上一小节中讨论了在异构占空比网络中影响节点能耗和延迟的因素,为了达到平衡能耗和延迟性能的目的,本节提出综合能耗和延迟代价的机会路由协议.

本协议主要分为探测邻居节点、构建转发候选集以及选择转发节点这几个过程.其中,探测邻居节点即为广播探测包获取邻居节点 ECC 值以及 RoW 值的过程,而转发候选集将根据第 2.3.3 节中提出的转发候选集选择策略来构建.接下来,本节将重点讨论选择转发节点的过程.

2.3.2 转发代价 $Cost$

本协议使用 $Cost$ 值作为节点的通信代价来作为转发节点的选择标准.考虑转发代价时,为了实现平衡能耗和延迟的目标,该值将通过各个转发候选节点的 ECC 值以及 RoW_u 来联合确定.

RoW_u 的值显然处于 $[0,1]$ 之间,因此当候选集确定后选择转发节点时,也必须将传输代价的值归一化到 $[0,1]$ 区间内.假设由算法 1 确定的转发候选集中存在 n 个候选节点,其 ECC 值分别为 $C_{v_1}, C_{v_2}, \dots, C_{v_n}$,则对转发候选节点 v_i 而言,通过公式(12)将其进行归一化处理.

$$\overline{C}_{v_i} = \frac{C_{v_i}}{\sum_{i=1}^{Sum_{Fwd}} C_{v_i}} \quad (12)$$

于是,真正衡量转发候选节点通信代价标准的 $Cost$ 值将由公式(13)计算.

$$Cost_{v_i} = a \times \overline{C}_{v_i} + (1-a) \times RoW_{v_i} \quad (13)$$

其中,系数 a 的数值将决定能耗因素和延迟因素的占比,将在评估与实验章节通过仿真实验来具体验证确定.转发候选集中 $Cost$ 值最低的节点,即为应该选择的转发节点.

2.3.3 转发节点退避策略

这一节中,本协议讨论当前发送节点如何将数据单播给通过上一节方法选定的转发候选节点,从而减少网络中无效数据副本的数量.利用无线传感网络的广播特性,当前节点可以很容易将数据包发送给转发候选集中的节点,但这样也会造成潜在的问题:如果一个数据包被很多候选节点收到而没有合适的退避处理策略的话,这些候选节点将都给发送节点回复 ACK ,会大大提升碰撞的可能性,造成不必要的能量消耗;即便合理地使用了退避策略,如果一个候选节点不知道已经有其他候选节点完成了转发而选择继续转发,就会使同一个数据包在

网络中存在很多不必要的副本,造成能量浪费和无效吞吐.针对这些问题,本协议提出基于选择策略度量值 $Cost$ 的退避策略以及 ACK 压制策略.

为了减少碰撞带来的能量和时间消耗,本协议利用 $Cost$ 值设计一种退避策略.当发送节点确定了自己的转发候选集并计算出 ECC 值后,该节点发送数据时将转发候选集中最大的 ECC 值 C_{max} 以及转发候选集中所有节点的 ECC 值之和包含在内.收到数据节点通过与自身的 ECC 值进行对比:如果 $C_{v_i} \leq C_{max}$,则该邻居节点将自己选为转发候选节点,并在回复 ACK 之前执行退避过程.该节点的退避时间应该同 $Cost$ 值成正比,假设 B_{max} 是 MAC 层预设的最大的随机退避时间,那么对候选集中的节点 v_i ,其退避时间由公式(14)计算:

$$B_{v_i} = Cost_{v_i} \times B_{max} \quad (14)$$

通过这种退避机制,候选集中代价最小的节点将会退避最短的时间,即其拥有了最高的转发优先级.当其退避时间结束后,将优先广播 ACK 信息.这样,当发送节点接收到第 1 个 ACK 信息时,得知其数据包已经被成功接收.而其他收到该数据包的转发候选节点由于退避时间较长,在其退避时间内如果收到了来自其他节点的数据包 ACK 信息,则该节点将收到的数据包丢弃,不再进行转发和回复.通过这样的退避以及 ACK 压制策略,本协议就实现了发送节点把数据单播给某一选定的转发节点,从而减少了该过程中额外的能量消耗.

2.3.4 网络初始化

在网络第 1 次启动时,整个网络的初始建立过程将从基站(sink)开始到边缘节点,直到每一个节点都完成自身的初始化过程后进入休眠状态为止.每个节点在其初始化阶段保持工作状态不休眠,直到完成该节点的初始化过程后将休眠一整个时间周期 L ,之后,将根据其设定好的占空比开始正常的工作周期.

当网络初始化开始时,基站首先向全网发送广播信息.广播信息中包括其占空比 D 、 ECC 值 C 和其等待代价度量标准 RoW (对基站而言,由于其是组网的第 1 个节点并且不休眠,因此 $D_{sink}=100\%$, $C_{sink}=0$, $RoW_{sink}=0$).因为 sink 是该网络中所有数据包的归宿,因此收到其广播包的节点都将其视为自己的下一跳以及转发唯一的转发候选节点,并据此计算自己相应的 ECC 值.计算完毕后,为了防止碰撞消耗不必要的能量,每个节点随机退避一个时间后,继续将含有自己占空比和 ECC 值信息的包广播出去.节点广播之后,将会监听一段时间(T_1)来确认自己的包是否被至少 1 个节点接收到,如果没有问题,节点将休眠一整个周期.

对于网络中距离汇聚节点两跳及以上的节点 u ,当其接受到其他节点广播包中的信息时,将其 id 号加入到自己的邻居节点集 $N(u)$.当经过一段监听时间(T_2)不再收到广播信息时,利用前文中提出的转发候选集构建方案,将 $N(u)$ 中的节点按 C 值排序后依次尝试加入并最终形成候选集 $Fwd_{corr}(u)$,同时计算出该转发候选集情况下当前节点的预期能耗值 C_u ,并根据当前时间和广播包中的占空比信息计算出节点的 RoW_u ,以便为之后的转发决策服务.通过每个广播包,可以计算该发包节点(即转发候选节点)下次醒来的时间为

$$T_{sender}^{wakeup} = T_{currenttime} + T_1 + L \quad (15)$$

则其工作时间的范围即为

$$[T_{sender}^{wakeup}, T_{sender}^{wakeup} + D_{sender} \times L] \quad (16)$$

通过此计算方法,还可以估算出不同发送节点占空比的重叠部分,从而计算出当前转发候选集情况下节点 u 的 RoW_u 值.之后,当前节点同样随机退避一个时间之后将自己的占空比 D 、 ECC 值 C 及其等待代价度量标准 RoW 值加入包中广播出去,广播完成后,使用同样的机制监听一段时间(T_1)进入休眠.同理,网络中每个节点在网络初始化过程中都执行这样一整套流程后,整个网络初始化过程结束.这时,网络中每个节点的转发候选集以及等待代价度量标准 RoW_u 都得以确定.

2.3.5 网络通信过程

当网络的初始化过程完成后,网络中的节点将陆续醒来进行发送或转发数据包的工作.当一个节点有数据包要发送时,首先广播探测包,然后利用收到回复的节点中根据其 ECC 值参考前文提出的算法选择是否加入转发候选集.由于初始化过程结束后网络中节点的 ECC 值是按照远离汇聚节点逐渐增大而排布的,因此根据算法中加入候选集的节点都是 ECC 值小于当前值这一规则,可以避免将上一跳的节点加入候选集而形成路由环路.当前节点也随着候选集中节点的不断加入而重新计算自己的 C 值,直到不再有可以降低本身 ECC 值的节点出

现时,当前发送节点的转发候选集就确定了.转发候选集的确定会使一部分能耗代价较高的邻居节点被排除,这样可以降低节点之间通信的能耗.之后,转发候选节点通过公式(13)计算出的 $Cost$ 值执行退避,从而完成转发过程.在此过程中,把转发数据的延迟降到最小.如图 5 所示为一个节点通信过程示例.

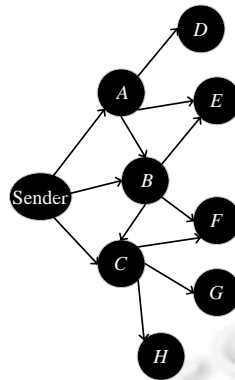


Fig.5 Example of communication process

图 5 通信过程示例

如图 5 所示,Sender 为发送节点,其含有 3 个邻居节点 A,B,C ;同时,节点 A 有 3 个邻居节点 B,D 和 E ,节点 B 有邻居节点 A,C,E 和 F ,节点 C 的邻居节点为 B,F,G,H .Sender 首先广播探测包,假设得到节点 A,B,C 回复的各自的 ECC 值分别为 1,1.5 和 3.假设发送节点同 A,B,C 之间链路的错误率都为 0.5,而发送功率为 1.

- (1) Sender 根据 ECC 值将 A,B,C 节点从小到大排序,首先将节点 A 加入转发候选集,并计算出自己当前的 ECC 值为 3;之后比较节点 B 的 ECC 值小于 3,于是将 B 也加入转发候选集,重新计算自己的 ECC 值为 2.25;此时发现节点 C 的 ECC 值大于当前计算出的 ECC 值,于是不将 C 值加入,转发候选集构建结束,将能耗代价较高的邻居节点 C 被排除,降低节点之间通信的能耗.
- (2) Sender 将转发候选集中节点最大的 ECC 值 1.5 作为阈值和所有 ECC 值之和 2.5 加入数据包进行广播,收到数据包的节点 A,B,C 将自己的 ECC 值与阈值 1.5 进行对比,其中,节点 A,B 发现自己的 ECC 值小于等于该阈值,于是将自己视为转发节点,准备执行退避后转发,节点 C 则丢弃该数据包.
- (3) 节点 A,B 根据退避计算公式计算自己需要退避的时间,如果节点 A 退避时间短,则首先广播 ACK,Sender 节点收到 ACK 后得知转发成功;而节点 B 收到 A 的 ACK 则得知自己的转发优先级较低,于是丢弃收到的数据包,使得转发数据的延迟最短,实现能耗和延迟的平衡.

在该过程中,单个节点的占空比虽然不会发生变化,但是由于网络中链路质量有可能改变,而造成节点的邻居节点集可能发生变化;并且由于时钟累计后出现误差现象的存在,节点的邻居节点工作周期的重叠部分也可能发生变化,这些都可能改变一个节点的 RoW 值,从而影响路由决策.为了解决这个问题,本协议设计了更新节点 RoW 值的策略:初始化阶段时,邻居节点回复发送节点时会捎带自己的占空比等信息;而在网络结束初始化过程开始正常运行时,邻居节点将在回复的信息中添加一项 T_{pass} ,代表其睡醒后经过的时间;而发送节点接收到后,可以根据自身的时钟来修正时钟漂移带来的误差.

3 实验设计与分析

为了验证所提出的路由协议的有效性,本文利用 Omnet++ 仿真平台在 MAC 层使用 CSMA 的基础上对 EDOR 协议进行了多组实验.由于能量收集型节点的能量收集过程对上层来说是隐藏的,并且该过程也不是本协议研究的范畴,因此本文使用占空比较高的节点模拟代替能量收集型节点,并研究所提出的 EDOR 协议的能耗和延迟性能.

本文对不同数量、不同占空比类型的节点组成的网络环境都进行了测试.由于本协议适用于拥有相对较高

占比的能量收集型节点,因此将使用 4 种不同占比类型的节点,分别是占比为 40%,30%,20%以及低于 10%的节点.实验中使用 N - X %- Y %- Z % 分别表示节点的总个数为 N 、占比为 40%的节点占比为 X %、30%的占比为 Y %、20%的占比为 Z %、其余为占比低于 10%的节点.所有节点的总周期长度 L 一致,其他一些网络设置的关键参数见表 1.

Table 1 Settings of network parameter

表 1 网络参数设置

网络运行参数	取值
网络中的节点个数(N)	50~300
节点的总周期长度(L)	1s
数据包产生间隔	100ms
发送队列长度	10
网络的最大跳数	3~6
最大退避时间 B_{\max}	10ms

3.1 系数确定实验

为了确定转发候选节点选择标准 $Cost$ 值计算公式中的系数 a ,本实验将系数 a 在 $[0,1]$ 的区间内每次变化 0.1,从而产生 11 组对比数据;同时,利用 OMNeT++ 平台的拓扑产生器随机产生 6 组不同规模和节点类型的拓扑,见表 2.

Table 2 Example of test networking

表 2 测试网络示例

对应测试 ID	网络拓扑描述
T_1	50-20%-15%-15%
T_2	100-20%-15%-15%
T_3	200-20%-15%-15%
T_4	300-20%-15%-15%
T_5	300-25%-20%-20%
T_6	300-30%-25%-25%

本文首先对端到端延迟进行了仿真实验,得到了如图 6 所示的结果.从图中可以看出,随着 $Cost$ 值计算公式中系数 a 取值的不断增大,不同的网络拓扑均表现出延迟上升的总体趋势.这时,因为随着系数 a 取值的增大, RoW 值在 $Cost$ 中的占比就越来越小,因此在对转发候选集中的节点进行选择时,候选节点的邻居节点占比之和对决策的影响就越小,发送节点更倾向于选择能耗较小而不是延迟较低的节点进行转发,因而端到端延迟随之变大.同时可以看出,随着节点个数的增多,每个节点邻居节点数目的增多,网络中平均延迟的数值是在减小的.对于具有相同节点数目的网络 T_4, T_5, T_6 ,则随着网络中高占比节点数目的增加使得通信节点之间工作周期相遇的概率提升,从而延迟减少.

对于节点的能量消耗问题,本实验使用发包的数量来模拟衡量.本文使 6 组网络分别仿真相同的时间,在同样的时间跨度内,发包次数越多,代表节点处于工作状态的时间越长,进行的通信过程越多,从而能耗越大.结果如图 7 所示.

从图 7 中可以看出,随着系数 a 值的不断增大, $Cost$ 值计算中关于 ECC 值的占比不断上升,即发送节点在从转发候选集中选择转发节点时,会更倾向于能耗较少而不是延迟较低的节点进行转发.因此,节点平均发包数量整体在减少.同时还发现,在 T_1 和 T_2 的网络情况下,发包数量的下降并不明显.这是因为在网络中节点数量较少时,每个发送节点的邻居节点以及选定的转发候选集中的节点数量都不会很多,在转发候选集选择过程中已经将能耗较大的节点排除在外的情况下,节点发包数量的变化并不明显.而随着网络规模的扩大,能耗下降的趋势就逐渐显现出来.从图中可以看出,随着网络中节点个数的增加,节点的平均能耗也会增加.这是由于随着邻居节点个数的增多,节点的通信频率增加造成的. T_5, T_6 相比于 T_4 则是随着网络中高占比节点数量的增加,能耗相应增加.

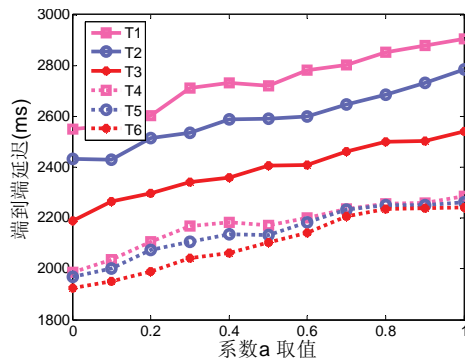


Fig.6 Average delay of end-to-end

图6 端到端延迟平均值

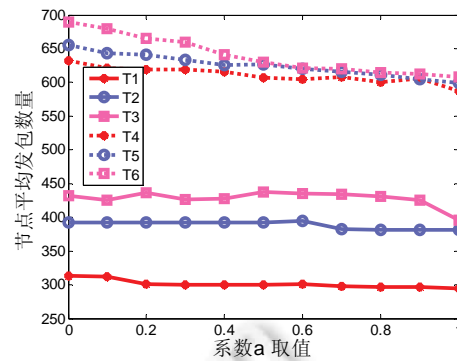


Fig.7 Average number of packets

图7 发包数量平均值

从两个图中可知,随着系数 a 的增大,节点的延迟和能耗的整体变化趋势是相反的,这符合前文的分析和设定.由于转发候选集的确定已经使得一部分能耗代价较高的邻居节点被排除,因此在从转发候选集中选择转发节点时,本协议更倾向于考虑降低延迟.从图中可以看出, a 值处于 $[0,0.4]$ 范围时,延迟相对处在较低水平,能耗则在 a 值取得 0.2 开始, T_4, T_5, T_6 均出现较明显的能耗下降,因此本协议选择 a 值为 0.2.

3.2 单一转发节点验证实验

为了减少网络中无效的数据副本数量,本文协议设定了从转发候选集中选择单一节点进行转发的退避过程.对 6 种随机网络拓扑,分别测试了每个数据包被转发的次数,以此来验证该退避过程对于确定单一转发节点的有效性.仿真结果如图 8 所示.

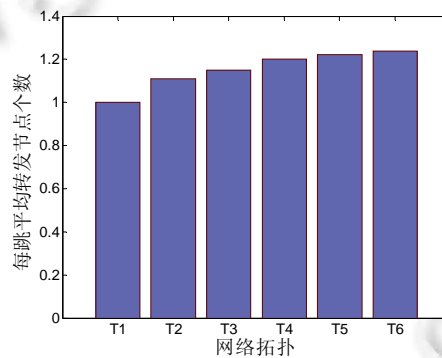


Fig.8 Average number of forwarding nodes per hop

图8 每跳平均转发节点个数

从上图中可以看出,随着网络拓扑规模的增大,真正转发数据包的节点有所增加,但总体基本接近于一个.这时,由于虽然本文协议使用基于 $Cost$ 值的退避来选择唯一转发节点,并且利用 $Cost$ 值较小的节点,使用 ACK 压制了其他转发候选节点,但是因隐藏终端问题的存在,有可能被选中的转发节点发送的 ACK 无法被所有转发候选节点收到,而误以为自己是选中的转发节点.这种情况出现的次数随着网络规模的扩大、邻居节点数目的增多而增加,因此使得有些数据包可能会被两个节点转发.然而,因为在转发候选集的构建过程中已经排除了一部分邻居节点,剩余的加入转发候选集的节点彼此之间不在通信范围内的概率很低,所以出现两个转发节点的概率很低,两个以上的情况几乎没有.因此,本文协议基本实现了数据包单一转发的功能,从而有效减少了网络中的无用副本.

3.3 对比实验

3.3.1 延迟比较

为了验证本协议(EDOR-Cost)的有效性,实验中对比了同样是机会路由的比较经典的 ORW 协议(ORW-ETC)以及对其进行改进的 EoR 协议(EoR-ETC),从平均延迟和平均能耗两方面,同样使用了 6 种随机网络拓扑进行了对比实验.

本文对 6 种网络拓扑下 3 种方法的端到端延迟和单跳延迟进行了实验,结果如图 9 和图 10 所示.

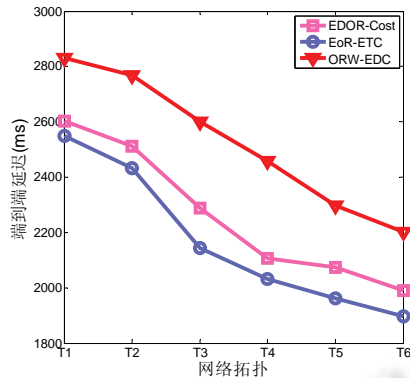


Fig.9 Comparison of the average end-to-end delay

图 9 平均端到端延迟比较

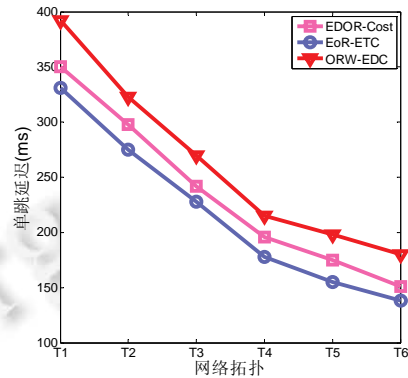


Fig.10 Comparison of average one-hop delay

图 10 平均单跳延迟比较

从两图中可以看出,无论是端到端延迟还是单跳延迟,本文提出协议的延迟都在 ORW 和 EoR 方法之间,并且更靠近延迟较低的 EoR 方法.因为 ORW 只是根据候选节点的下一跳邻居节点的个数来进行选择,相当于忽略了等待过程产生的代价,其选择的转发节点并不是下一跳转发时延迟较小的节点.而 EoR 方法则充分考虑了节点自身和其转发候选节点占空比的情况,在进行选择时相比 ORW 方法提升了延迟性能.本文的方法 EDOR 综合考虑了节点的能耗和延迟两方面因素,在平衡两者的同时,在延迟方面取得了接近 EoR 方法的良好效果.

3.3.2 能耗比较

本文随机选取了网络拓扑 T₃ 来比较 3 个协议的节点能耗.为了使得能耗的数值更贴切于数据收集网络的实际情况,选取基站收集到同样数量的数据包时,节点产生的平均能耗,即当基站收集到相同数量的数据包时,节点平均能耗更低的协议可以使得网络能够更好地完成收集任务.能量收集型节点的能量级别很低,节点一次发送或接收过程产生的能耗在 10⁻¹mA 甚至微安级别,本实验根据文献[33]中提供的参考,将节点进行一次发送和传输的能量消耗分别设定为 0.56mW 和 0.67mW 进行仿真实验,得到的结果如图 11 所示.

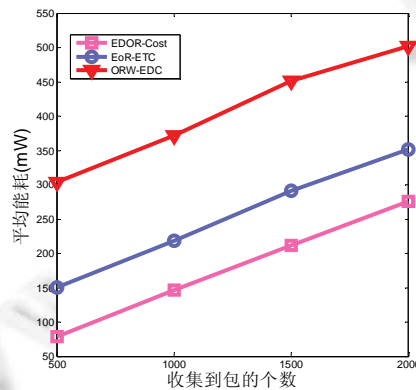


Fig.11 Comparison of average energy consumption

图 11 平均能耗比较

由上图可以看出,随着基站收集到的包的数量的增加,节点的能耗基本呈线性增加的趋势(前提是该节点拥有足够的能量)。其中,EoR 方法由于减少了节点的平均等待时间,使得不用频繁地发送探测包或者监听信道,从而能耗情况也优于 ORW 协议。而本协议由于能量模型的存在,转发候选集中选择的节点都向后转发时预计能量消耗较少的节点,因此取得了最优的能耗特性。

4 总结与展望

针对于无源感知网络,本文提出了基于综合能耗和延迟代价的机会路由协议,利用节点的预期能耗模型以及单一转发节点选择策略,平衡了节点的能耗和延迟。通过仿真实验,证明了本文提出的协议取得了良好的能耗和延迟效果,并且成功降低了网络中的无效数据副本数目。在实验方面,将研制自己的无源感知节点,考虑在 HitchHike 的基础上做进一步的改进,参考 WISP5 上的 energy harvesting 部分的电路,使用能量收集技术,结合无线能量获取与太阳能,为系统构建专门的软件,通过指令集优化系统,节约能耗,对实验加以扩展。

References:

- [1] Albarakati AJ. An overview of wireless sensor networks (WSN's). *Int'l Journal of Computer Applications*, 2015,118(5):30–33.
- [2] Gu A, Yan X, Xia W, *et al.* Design of WSN Node for the Mountain Torrent Disaster Warning System. In: *Proc. of the 2011 Int'l Conf. on Internet Technology and Applications (iTAP)*. IEEE, 2011. 1–5.
- [3] Qian X, Wang D, Zhu XX. Signal processing and design of nodes in WSN agricultural monitoring system. *Advanced Materials Research*, 2013,756:636–640.
- [4] Kosunalp S. MAC protocols for energy harvesting wireless sensor networks: Survey. *ETRI Journal*, 2015,37(4):804–812.
- [5] Weinstein R. RFID: A technical overview and its application to the enterprise. *IT Professional*, 2005,7(3):27–33.
- [6] Sample A, Yeager D, Powledge P, Smith JR. Design of a passively-powered, programmable sensing platform for UHF RFID systems. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on RFID*. 2007. 149–156.
- [7] Sample A, Yeager D, Powledge P, Mamishev A, Smith J. Design of an RFID-based battery-free programmable sensing platform. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 2008,57(11):2608–2615.
- [8] Vyas R, Lakafosis V, Tentzeris M, Nishimoto H, Kawahara Y. A battery-less wireless mote for scavenging wireless power at UHF (470–570 MHz) frequencies. In: *Proc. of the IEEE Int'l Symp. on Antennas and Propagation*. 2011. 1069–1072.
- [9] Parks AN, Sample AP, Zhao Y, Smith JR. A wireless sensing platform utilizing ambient RF energy. In: *Proc. of the IEEE Topical Meeting on Wireless Sensors and Sensor Networks (WiSNet 2013)*. 2013. 154–156.
- [10] Liu V, Parks A, Talla V, *et al.* Ambient backscatter: Wireless communication out of thin air. In: *Proc. of the ACM SIGCOMM*. 2013. 39–50.
- [11] Chakchouk N. A survey on opportunistic routing in wireless communication networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015,17(4):2214–2241.
- [12] Nassr MS, Jun J, Eidenbenz SJ, *et al.* Scalable and reliable sensor network routing: Performance study from field deployment. In: *Proc. of the 26th INFOCOM IEEE Int'l Conf. on Computer Communications*. IEEE, 2007. 670–678.
- [13] Rosário D, Zhao Z, Braun T, *et al.* Assessment of a robust opportunistic routing for video transmission in dynamic topologies. In: *Proc. of the 2013 IFIP Wireless Days (WD)*. IEEE, 2013. 1–6.
- [14] Zhao Z, Rosário D, Braun T, *et al.* Context-aware opportunistic routing in mobile ad-hoc networks incorporating node mobility. In: *Proc. of the 2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC)*. 2014. 2138–2143.
- [15] Chachulski S, *et al.* Trading structure for randomness in wireless opportunistic routing. In: *Proc. of the ACM SIGCOMM*. 2007. 169–180.
- [16] Koutsonikolas D, Wang CC, Hu YC. Efficient network-coding-based opportunistic routing through cumulative coded acknowledgments. *IEEE/ACM Trans. on Networking (TON)*, 2011,19(5):1368–1381.
- [17] Lu M, Wu J. Opportunistic routing algebra and its applications. In: *Proc. of the 2009 INFOCOM*. IEEE, 2009. 2374–2382.
- [18] Liu C, Wu J. On multicopy opportunistic forwarding protocols in nondeterministic delay tolerant networks. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2012,23(6):1121–1128.
- [19] Fang X, Yang D, Xue G. MAP: Multiconstrained anypath routing in wireless mesh networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2013,12(10):1893–1906.

- [20] Tehrani P, Zhao Q, Javidi T. Opportunistic routing under unknown stochastic models. In: Proc. of the 2013 IEEE 5th Int'l Workshop on Computational Advances in Multi-sensor Adaptive Processing (CAMSAP). IEEE, 2013. 145–148.
- [21] Mao X, Tang S, Xu X, *et al.* Energy-efficient opportunistic routing in wireless sensor networks. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2011,22(11):1934–1942.
- [22] Hu W, Xie J, Zhang Z. Practical opportunistic routing in high-speed multi-rate wireless Mesh networks. In: Proc. of the 14th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. ACM Press, 2013. 127–136.
- [23] Naghshvar M, Javidi T. Opportunistic routing with congestion diversity in wireless multi-hop networks. In: Proc. of the INFOCOM. IEEE, 2010. 1–5.
- [24] Ghadimi E, Landsiedel O, Soldati P, *et al.* Opportunistic routing in low duty-cycle wireless sensor networks. ACM Trans. on Sensor Networks (TOSN), 2014,10(4):1–39.
- [25] Naghshvar M, Javidi T. Opportunistic routing with congestion diversity in wireless multi-hop networks. In: Proc. of the INFOCOM. IEEE, 2010. 1–5.
- [26] Zhao Z, Braun T. Real-world evaluation of sensor context-aware adaptive duty-cycled opportunistic routing. In: Proc. of the 2014 IEEE 39th Conf. on Local Computer Networks (LCN). IEEE, 2014. 124–132.
- [27] Lu T, Liu G, Chang S. Energy-efficient data sensing and routing in unreliable energy-harvesting wireless sensor network. In: Proc. of the Wireless Networks. 2016. 1–15.
- [28] Dinh T, Gu T. A novel metric for opportunistic routing in heterogenous duty-cycled wireless sensor networks. In: Proc. of the 2015 IEEE 23rd Int'l Conf. on Network Protocols (ICNP). IEEE, 2015. 224–234.
- [29] Han G, Dong Y, Guo H, *et al.* Cross-layer optimized routing in wireless sensor networks with duty cycle and energy harvesting. Wireless Communications and Mobile Computing, 2015,15(16):1957–1981.
- [30] Beheshtiha SS, Tan H, Sabaei M. Opportunistic routing with adaptive harvesting-aware duty cycling in energy harvesting WSN. In: Proc. of the Int'l Symp. on Wireless Personal Multimedia Communications. 2012. 90–94.
- [31] Bouachir O, Mnaouer AB, Touati F, *et al.* Opportunistic routing and data dissemination protocol for energy harvesting wireless sensor networks. In: Proc. of the 2016 8th IFIP Int'l Conf. on New Technologies, Mobility and Security (NTMS). IEEE, 2016. 1–5.
- [32] Tie X, Venkataramani A, Balasubramanian A. R3: Robust replication routing in wireless networks with diverse connectivity characteristics. In: Proc. of the ACM MOBICOM. 2011. 181–192.
- [33] Naghshvar M, Javidi T. Opportunistic routing with congestion diversity in wireless multi-hop networks. In: Proc. of the INFOCOM. IEEE, 2010. 1–5.



高宏超(1992—),男,黑龙江密山人,硕士,主要研究领域为无线传感网络.



陈晓江(1973—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为物联网,无源感知,移动计算.



徐丹(1988—),女,硕士生,CCF 学生会会员,主要研究领域为物联网数据传输.



彭瑶(1984—),女,博士,讲师,CCF 专业会员,主要研究领域为无源感知网络,数模混合电路设计,SoC 设计.



汤战勇(1979—),男,博士,副教授,CCF 专业会员,主要研究领域为物联网,网络信息安全,软件保护.



房鼎益(1959—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为网络与信息安全,数字内容与计算机软件安全保护,无线传感器网络及其应用,移动计算,分布计算系统.