

基于链路预测和网络编码的 MAC 机制

尚凤军, 龚文娟, 耿哲

(重庆邮电大学计算机科学与技术学院, 重庆 400065)

摘要: 提出了基于链路预测和网络编码的 MAC 协议, 在 EasiLQE 的基础上给出了基于窗口自适应的改进 EF 滤波器的链路质量预测方法, 采用自适应周期的主动探测, 增加网络环境稳定时的估计准确性, 采用了瞬时主动探测模块, 在保证估计稳定性的前提下提高了突发状况下的反应速度。在改进链路质量估计方法的基础上, 给出了一种新的 MAC 协议。在协议中合理地利用了无线网络中已经存在的广播特性, 在路由算法确定的路由周围增加高阶辅助节点, 从而明显增加了网络编码机会, 同时又不会引发由流量集中带来的诸多问题。最后讨论了 MAC 机制中最优的阶数, 在编码机会和能量效率上寻求到一个较为合适的平衡点。实验证明, 所提 MAC 协议能够在不集中流量的前提下合理利用节点的过度侦听提高编码机会, 增加网络的吞吐量。

关键词: 链路质量估计; 网络编码; 路径优化; 最优阶数

中图分类号: TP393

文献标识码: A

MAC mechanism based on link prediction and network coding

SHANG Feng-jun, GONG Wen-juan, GENG Zhe

(College of Computer Science and Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: A MAC mechanism was proposed based on network coding and link prediction for wireless sensor network. Firstly, an adaptive-window scheme was given based on EasiLQE which uses improved EWMA link quality estimation method and combines the methods of hardware and software, so the accuracy is increased. As a result of the instantaneous active detection, reaction rate became more rapid when unexpected situation was occurring in the network. Secondly, a MAC protocol was improved based on the existing MAC protocol. In the protocol improved, high-level secondary nodes around the path determined is increased by the routing module using the broadcast nature of wireless networks that already exists rationally, so that significantly increased the network coding opportunity, without many problems caused by the concentrating flows. Finally, to seek a more appropriate balance between data diffusion and coding opportunities, the optimal factor was discussed. Experiment results show that this improved MAC protocol can increase network throughput and balance the load of the whole network effectively by using over-heard of nodes rationally, without causing concentrating flows at the same time.

Key words: link quality estimation, network coding, path optimization, optimal factor

1 引言

随着现代通信、微电子芯片和嵌入式技术发展, 无线传感器网络(WSN, wireless sensor network)成为

了一个新兴的研究热点, 引起了众多研究者和研究机构的密切关注^[1]。作为无线传感器网络体系结构中的关键之一, 介质访问控制层(MAC, medium access control)保证了传感器网络内点到点以及点到多点的

收稿日期: 2014-12-21; 修回日期: 2015-11-02

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目(No.cstc2012jjA40038); 重庆市基础与前沿研究计划基金资助项目(No.cstc2013jcyjA40023); 工信部物联网发展专项基金资助项目(工信部科[2012]583); 重庆市青年科技人才培养基金资助项目(No.cstc2014kjrc-qnrc40002)

Foundation Items: The Natural Science Foundation of Chongqing(No.cstc2012jjA40038), Chongqing Basic and Frontier Research Project(cstc2013jcyjA40023), The Ministry of Industry and Information Technology for the Special Funds of Development of the Internet of Things(No.[2012]583), The Special Foundation for Young Scientists of Chongqing(No.cstc2014kjrc-qnrc40002)

连接,极大地影响了网络的性能,与逻辑连接控制层以及物理层共同构成了无线传感器网络的底层基础,是无线传感器网络研究的重点之一^[2]。在 MAC 协议中,最为经典的是 S-MAC^[3],它是在 802.11 基础上提出的第一个 MAC 协议。T-MAC^[4]可以认为是 5 种事件激活的被动变化睡眠周期的改进型 S-MAC 协议。B-MAC^[5]为了实现低功耗侦听引入了前导序列的概念,Wise-MAC^[6]和 X-MAC^[7]都是在前导的基础上做了改进。Sift^[8]协议是针对事件驱动的传感器网络应用,当多个节点同时检测到同一个事件,只保证其中的部分节点发送检测信息,一定程度上降低了网络冲突的概率,但协议基于严格的时钟同步。D-MAC^[9]协议根据网络传输的树状结构,调整休眠调度策略,使下层节点的发送时间与上层节点的接收时间相对应。以后提出的一系列具有影响的 MAC 协议还有 coopMAC^[10]、CD-MAC^[11]、Z-MAC^[12]和 MaxMAC^[13]等。

传感器网络节点采用能量有限的电池供电,无法长时间处于工作状态,而网络编码^[14]是将不同的数据流组合到信道中进行传输,从而能够接近香农公式的上限^[15],为传感器网络的能量问题提供了新的解决方案。理论上讲,网络中能够编码的数据分组越多,那么网络的吞吐量就可以越大。所以网络编码的研究目的之一是设法增大编码率^[16],Katti 等^[17]提出基于网络编码优化的 COPE 方法。随之又出现了集中式流量感知的编码方法^[18],通过调整节点上的数据流而增加编码机会,但容易造成负载不均衡。为了解决流量感知引发负载过于集中的问题,Zhang 等^[19]提出了基于数据分散的主动混合编码 BEND。与流量集中相反,这个方法使网络中的流量趋于分散,所以不会产生由于负载不均衡而导致的各种情况,并在一定程度上均衡整个网络的负载。网络编码可以通过寻找网络中存在的编码机会^[20],以编码的方式减少传输次数,从而在传输相同数据量数据分组的条件下能够减少能量消耗,同时可以增加网络的吞吐量。Cao 等^[21]提出了一种随机的网络编码算法,不仅可以提高网络的吞吐量和顽健性,还可以提高可靠性和安全性^[22]。进一步,如果将网络编码应用在无线网络中还可以增加无线网络的带宽,降低时延,改善能源效率和减少干扰^[23]。

在 WSN 中,实时、可靠、高效的链路质量对于上层协议的正确和高效率的运转至关重要。性能

优越的链路能够让上层的协议以最优化的方式和效率执行,通过事先预测链路质量来确定是否需要强制性将部分流量引入到质量较好的链路上,从而提高 MAC 协议性能,包括网络编码率、吞吐量以及信道利用率。

本文研究了无线传感器网络中的 MAC 协议,给出了一种新的基于路径优化和网络编码的 MAC 机制。本文的主要贡献包括:1) 在 EasiLQE 的基础上给出了基于自适应窗口的改进 EF 滤波器的链路质量估计方法;2) 在改进的链路优化方法上提出了一种新的 MAC 协议,并分析了 MAC 机制中最优的阶数,为在编码机会和能量效率上寻求到一个较为合适的平衡点。

2 基于窗口自适应的链路质量预测方法

窗口平均指数加权移动平均估计(WMEWMA)^[24]是基于软件的质量估计方法,这种方法稳定性较高。2012 年,黄庭培等^[25]提出了一种突发性链路感知的链路估计方法 EasiLQE,综合了基于硬件的估计和基于软件的估计 2 种方法,采用长周期和短周期 2 种主动探测方式以及和 EF 滤波估计相结合的方法,实现了在较为复杂的网络环境中对链路质量的估计。但是 EasiLQE 仍然可以进一步改进,因为当接收信号强度指示 RSSI (received signal strength indication) 低于某一阈值时,网络处于不稳定状态,所以在这个阈值条件下,EasiLQE 使用了短周期的主动探测方法。但是如果 RSSI 较长时间处于较低值时,频繁的主动探测不仅有可能带来预测误差的增大,并且会增加网络负载,消耗网络资源。本文在此基础上,改进了探测窗口,给出了基于窗口自适应的链路质量估计方法,减少在 RSSI 长时间低于某一阈值时主动探测的频率。

2.1 整体架构

如图 1 所示,改进算法的整体架构是由链路质量被动感知、自适应窗口探测和链路质量瞬时探测 3 个模块和改进的指数加权移动平均滤波器 EWMA 链路质量估计模块 4 部分构成。将被动感知和主动探测合二为一并且结合了 RSSI 值和 PRR 值(packet reception ratio) 2 种信息,在对以上 2 种信息进行处理之后,估计未来一段时间内的链路质量。和传统算法一样,本文同样采用 PRR 的估计值来衡量链路的质量。

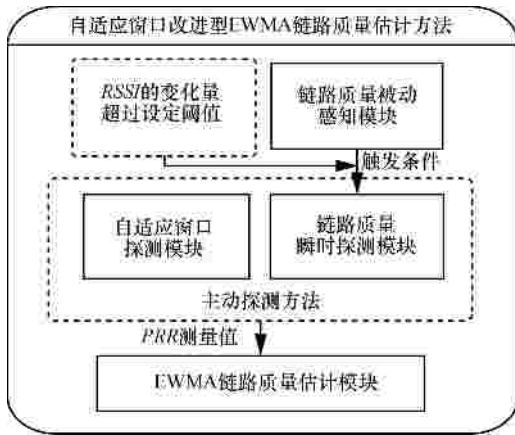


图 1 链路质量估计的整体架构

2.2 被动感知

链路质量被动感知模块被动地侦听接收节点接收到分组的 RSSI 值，并且对接收到的数据分组的 RSSI 的数值进行计算，计算 RSSI 的变化量 $\Delta RSSI$ 。如果要触发链路质量瞬时探测模块则需要符合下述条件

$$\Delta RSSI > \Delta RSSI_T \quad (1)$$

其中， $\Delta RSSI_T$ 为设置的触发瞬时链路质量估计模块的 RSSI 变化量阈值，为了要触发瞬时探测模块，遵循上述条件是必要的。因为瞬时探测模块反应速度是非常快的，同时会引起开销的增加。即在链路状态变化剧烈的时候，认为是有突发性状况出现，才会触发瞬时探测模块。

2.3 主动探测

传统的 WMEWMA 链路质量估计方法中的探测周期是一个定值，因此对于变化幅度和频率不大的网络条件来说适用性很强。但是在变化频率较快的网络条件下，固定的探测周期很可能导致对某些快速变化的链路质量的错误估计。虽然 EasiLQE 在探测模块中引入了长周期和短周期，这相对于传统的单一探测周期灵活了很多。但是如果在此基础上，将探测周期和 RSSI 值相关联，使探测周期由于 RSSI 的变化而进行自适应调整，就可使估计方法的整体性能有所提高。

主动探测包含 2 个模块：瞬时链路质量探测模块和自适应窗口探测模块。瞬时链路质量探测模块是一个快速反应模块，探测周期可以按照不同的网络环境来设置，当网络变化较大时，探测周期可以设置得小一点，这样可以有更加精确的估计值，反之则可以设置得稍微偏大，但由于是快速反应模块，所以这个模块的探测周期设置得较小一点是比

较适当的。自适应窗口探测模块相对来说探测周期较长，设置自适应窗口探测模块的目的是让算法本身根据网络的变化情况来自动调整下一次地探测时间间隔，在网络相对较为稳定的时候适当地使探测周期延长，反之则使探测周期缩短。自适应窗口探测模块的探测周期记为 T_r ，计算如下

$$T_r = T_{ref} t^{RSSI} \quad (2)$$

其中， T_{ref} 为初始化时窗口的设置值，同时也是自适应窗口变化的基准值，可以根据不同的网络环境进行不同的设置， t 为波动系数，RSSI 为确定自适应周期之前获得的 RSSI 被动感知值。

2.4 改进的 EF 滤波器链路质量估计方法

EF 滤波器是黄庭培等 2010 年提出来的对指数加权移动平均滤波器 (EWMA, exponentially-weighted moving average) 一种改进。相对于传统的 EWMA 来说，EF 滤波器能够对链路的突发性变化做出迅速的反应，又能在一定程度上平滑临时的波动，能够在保证估计准确性的前提条件下获得较好的实时性以及稳定性。在此基础上再次做出改进，使主动探测窗口能够随着 RSSI 值而变化。改进方法如下。

EWMA 模型的一般表达式如下

$$E_i = a E_{i-1} + (1-a) M_{current} \quad (3)$$

其中， E_i 表示本次估计即将获得的估计值； E_{i-1} 表示上一次获得的估计值； a 表示平滑系数； $M_{current}$ 表示本次的探测模块获得的 PRR 的测量值。在模型中，平滑系数 a 是一个固定的值。EF 将平滑系数做了改进，使之不是一个固定的数值，而是一个与以往的估计值相关联的自适应值。其公式如下

$$d_i = b d_{i-1} + (1-b) |M_{current} - E_{i-1}| \quad (4)$$

$$d_{i-max} = \max(d_1, d_2, \dots, d_n) \quad (5)$$

$$a = 1 - \frac{d_i}{d_{i-max}} \quad (6)$$

式(3)~式(6)中， d_i 表示即将获得的本次估计误差； d_{i-1} 表示上一次估计的估计误差； b 是误差加权系数； $\max(d_1, d_2, \dots, d_n)$ 表示从估计误差 d_1 到估计误差 d_n 之中的最大值。

联立式(3)~式(6)，获得本方法中利用上一次 PRR 估计值和本次 PRR 实际测量值来估计将来一段时间 PRR 值的方法。具体表示如下

$$E(PRR)_i = a E(PRR)_{i-1} + (1-a) PRR_{current} \quad (7)$$

瞬时探测模块触发之后，将获得的探测值作为下一个周期的估计值，并不按照上述公式计算。

在较为稳定的网络环境下根据链路质量估计方法的均方差和协方差 2 个方面对比分析 EasiLQE 和本文方法的性能，用估计值的均方差来说明估计值准确性，协方差来反映链路质量估计方法的稳定性。经过仿真验证，本文方法的在稳定网络环境下的稳定性提升了 10%，在动态变化的网络环境下准确性提升了 8%。

3 基于路径优化和网络编码的 MAC 协议

本文在 BEND^[19]基础上利用高阶辅助节点，提出了一个更加广义的路径优化方案，不仅在由路由算法确定的路由周围更大程度上扩充了实际传输路径，更进一步优化了编码条件并且加入了链路质量估计模块，让数据在扩充的路径中优先选择更好的链路来传输。但是，实际传输路径的扩展程度不是无限的。当阶数到达一定程度以后，单纯地增加阶数已经不能再使编码机会会有明显的增加。恰恰相反，由于阶数的增加而使节点上存储的拓扑链表过于庞大而变得难以使用和维护。所以本文在叙述完本协议的设计细节之后着重讨论了最优的扩展系数。

定义 1 对于某条路径 $path_i$ 上的某个主要节点 $node_i$ 来说，如果经过 k 跳可以到达其相对目标节点 $node_{i+k}$ ，称 k 为相对目标节点的阶数。在网络中存在的所有节点中，最高阶辅助节点的阶数 k 称为网络的扩展阶数，简称为网络的阶数。

定义 2 某条路径 $path_i$ 上的某个主要节点 $node_i$ 的所有不包含于 $path_i$ 上的邻居节点之中，经过一跳可以到达 $node_i$ 的两阶相对目标节点 $node_{i+2}$ 的节点，称为二阶辅助节点。以此类推，经过三跳到达 $node_i$ 的三阶相对目标节点 $node_{i+3}$ ，这个节点称之为三阶辅助节点。

3.1 基本思想

基本思想如图 2 所示，节点 X 要向节点 A 传输数据分组 P_1 ，同时节点 A 要向节点 Y 传输数据分组 P_2 。节点 B_1 和节点 B_2 是 2 个中间节点。由路由算法确定的从节点 A 到节点 Y 的传输路径是 $A \rightarrow N \rightarrow B_2 \rightarrow Y$ 。同样由路由算法确定的从节点 X 到节点 A 的传输路径是 $X \rightarrow B_1 \rightarrow M \rightarrow A$ 。节点 M 、 N 、 B_1 和 B_2 的广播范围互相重合，同样节点 X 、 Y 、 B_1 和 B_2 的广播范围也互相重合。实际上，当节点 B_1 接收到来自节点 X 的数据分组 p_1 时，节

点 B_2 同样接收到来自节点 X 的数据分组 p_1 ；同样的道理，当节点 B_2 接收到来自节点 N 的数据分组 p_2 时，节点 B_1 也同样接收到来自节点 N 的数据分组 p_2 。这样节点 B_1 和节点 B_2 上同时拥有数据分组 p_1 和数据分组 p_2 。如果能够利用 B_1 和 B_2 的相对位置关系，让其中一个节点发送编码后的数据分组 $p_1 \oplus p_2$ ，那么则可以增加编码机会，同时，有可能缓解信道竞争的压力。由上面定义可知，节点 B_1 是节点 B_2 的二阶辅助节点，节点 B_2 也是节点 B_1 的二阶辅助节点。按照这个思想进行拓展，引入更高阶数的辅助节点是有可能的。

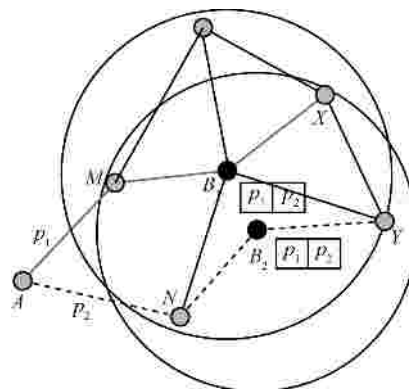


图 2 基本传输模型

由图 3 可以看出，实际上如果一个节点协同它的邻居节点连续广播 2 次的极限情况是它的广播半径变成原来的 2 倍，则 3 次广播的范围变成原来广播半径的 3 倍，更加高次的协同广播半径以此类推。一般关系式是 $r_k = kr$ 。

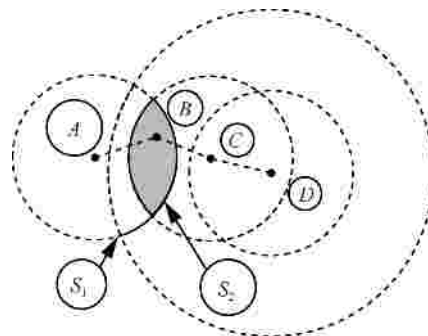


图 3 三阶辅助节点协同广播示意

分析图 3 可以看出，如果随着高阶节点的引入，由于节点的广播范围是一个圆，那么一定存在一个合适的阶数 k ，其广播范围与节点 A 的广播范围重合达到最大。在这种情况下，辅助节点的阶数已经达到极限。

3.2 协议设计

基于流量集中的编码协议强制性地 将流量集中在某些特殊节点上，从而来增加编码机会。对于此类协议，编码总是发生在由路由算法确定的路径交叉节点上，这样做虽然可以增加编码机会，但是节点的负载差异很大。那些数据流被强制通过的节点，尤其是多条路径的交叉节点负载很高，而其邻居节点的负载可能很低。

图 4 采用数据分散方式，合理利用了节点的广播特性，将数据分散在路由确定的路径周围。因为这样做一方面能够有效地进行数据的分散，不会由于所有的节点都进行转发而引起泛洪。本文首先让更多围绕在主节点周围的邻居成为辅助节点，从而将数据分散的程度进一步扩大。然后寻找和编码率以及吞吐量有重要相关关系的那些条件，以及这些条件和辅助节点阶数以及网络性能之间的影响关系，从而来找到一个较为合适的阶数，而不是随意并且漫无目的地使用数据分散。

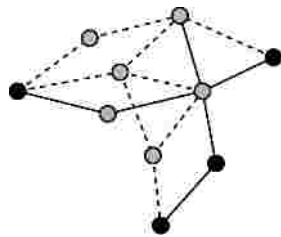


图 4 阶数为 3 时编码节点和传输路径

当节点接收到一个数据，首先判断是否需要解码，如果解码不成功则要求发送节点发送未编码数据，如果解码成功或者不需要解码，节点则判断自己是主节点还是辅助节点，根据不同的情况将数据分组放到相应的队列或者丢弃。然后节点对数据进行编码条件查询，判断编码条件并对可编码数据分组进行编码。在执行这个过程的同时，节点按照类似 EDCF 机制进行信道竞争，如果获得信道的话，按照下文所述的方式产生一个随机数 w ，按照其取值确定发送编码分组或者未编码分组(包含节点作为主节点和辅助节点 2 种)。

3.2.1 节点上拓扑链表

当一个节点成功接收数据之后，首先判断是将数据分组丢弃或者转发，而节点做这个判断所需要用的信息如图 5 所示。协议中如果要想让节点有能力判定本身为三阶辅助节点，那么要求节点本身的拓扑信息链表至少需要保存两级邻居节点地址信

息，这个条件是比较容易实现的。

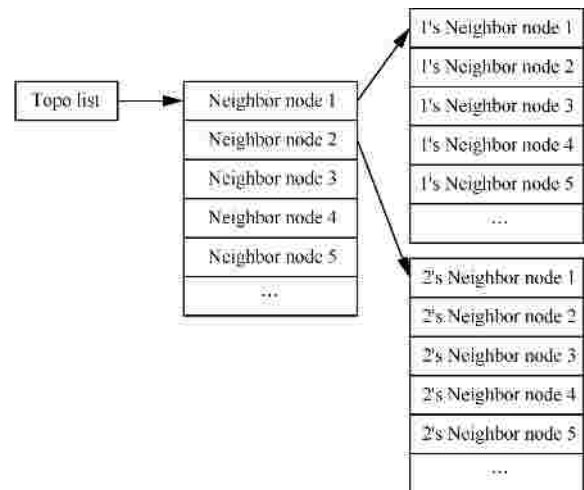


图 5 节点上的拓扑数据链表

节点具体的判断过程是：当节点接收到数据，节点会从帧头寻找接收节点地址 RA (receiver address)、2nd next-hop 和 3rd next-hop 信息。如果节点是 RA ，则此节点是这个数据的主节点，节点会将数据存储到本身的主数据队列中；如果节点本身不是 RA ，则节点会按照图 6 的数据结构来判断自己的邻居节点中是否存在 2nd next-hop，或者更进一步判断邻居的邻居节点中是否包含 3rd next-hop，若是，这个节点将数据存入辅助数据队列，如果上述 3 个条件均不满足，则节点丢弃此数据分组。这就保证了在增加辅助节点的同时并不会引起泛洪。

在辅助节点的阶数为 3 时，节点上的邻居信息链表是较为简单的，所以，上述的做法不会引发复杂的查找操作，但是当随着辅助节点的阶数越来越大，节点上的数据结构越来越复杂，就会使查找操作变得难以执行。不仅如此，随着阶数的增加，冗余的数据量也会越来越多，由此引发的近似于泛洪的广播变得难以控制，所以寻找合适的阶数范围是非常必要的工作之一。

Frame control	Duration	RA	TA	2nd next hop	3rd next hop
---------------	----------	----	----	--------------	--------------

(a) 未编码

Frame control	Duration	Multi Packet Number	RA[]	TA	Packet_ID[]
---------------	----------	---------------------	------	----	-------------

(b) 已编码

Frame control	Duration	RA	Packet_ID
---------------	----------	----	-----------

(c) ACK

图 6 帧头结构

3.2.2 数据分组的编码条件以及约简形式

如图 7 所示, 如果中间节点接收到数据分组 p_1 和数据分组 p_2 , 假设前者是自左向右传输, 后者是自右向左传输。实际上当中间节点 O 接收到数据分组 p_1 时, 如果数据分组来自于节点 A , 那么节点 B 、 C 和 D 同样也已经接收到了这个数据分组, 所以, 对于此次数据分组传输, 称节点 B 、 C 和 D 是节点 O 的同级节点, 节点 A 为节点 O 的前级节点, 对于数据分组 p_2 也是相同的。那么, 设置编码条件^[8]为:

- 1) 数据分组 p_1 的下一跳节点必须是数据分组 p_2 的上一跳节点或者其邻居节点, 这样保证了在编码数据分组 $p_1 \oplus p_2$ 到达 p_1 的后续节点时, 后续节点已经接收到数据分组 p_2 , 以便后续节点可以对数据分组进行解码并得到数据分组 p_1 ;
- 2) 数据分组 p_2 的下一跳节点必须是数据分组 p_1 的上一跳节点或者其邻居节点, 保证了在编码数据分组 $p_1 \oplus p_2$ 到达 p_2 的后续节点时, 后续节点已经接收到数据分组 p_1 的, 以便后续节点可以对数据分组进行解码并得到数据分组 p_2 。

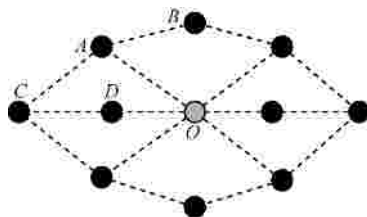


图 7 节点级数示意

由于实际设置的条件比理论分析时所需要的条件范围要更加小一点, 所以, 设置的条件相对于理论所需是比较严格的。这样的后果是, 编码条件的严格化会保证编码数据解码失败的几率保持在一个较低水平, 但是也会对编码率有消极的影响。

3.2.3 帧头的数据结构

帧头结构如图 6 所示, RA 表示接收节点地址(receiver address); TA 表示发送节点地址(transmitter address); $RA[]$ 表示接收节点地址列表(receiver address list), 其中包含了被编码的数据分组中不同的原数据分组相应的接收地址; $Packet_ID[]$ 表示数据分组 ID 列表; $Multi_Packet_Number$ 表示被编码的数据分组个数。

对已编码的数据分组, 在节点接收到以后会进行解码, 所以实际上在任何一个节点上, 转发判断和编码条件判断都是当作未编码分组来处理的。

在帧头结构中, RA 和 2nd next-hop 以及 3rd

next-hop 3 个信息构成了节点判断自己是主节点、辅助节点或两者都不是所依靠的数据信息。即节点依据 RA 、2nd next-hop 以及 3rd next-hop 来判断自己是否需要接收的这个数据分组进行转发。而节点编码操作所需要进行的编码条件则利用 TA 和 2nd next-hop 这 2 个信息来判断, 因为对于接收到数据的节点来说, TA 是数据分组的上一跳节点, 而 2nd next-hop 则是下一跳节点。

3.2.4 数据分组传输优先级以及信道竞争

任何一个数据分组在任何一个节点上都会排队, 改进的主要目标之一就是增加数据分组的编码机会, 让信道的传输效率更高, 最大化信道的容量。基于这个原因, 给予编码数据分组更高的传输优先级。

首先在节点发送数据分组之前, 产生一个随机数 w , 根据其不同的取值范围来确定传输的数据分组类型。 w 的取值可以调整, 同时它也会对编码率有较为明显的影响。本文的具体设置是: 当 $w > 0.3$ 时, 节点从编码数据分组队列中提取数据分组、编码并且发送; 当 $0.1 < w \leq 0.3$ 时, 节点作为主节点调度节点本身需要传输的数据分组; 当 $w \leq 0.1$ 时, 节点调度过度侦听的数据分组。而在具有竞争关系的一组节点之间, 利用一种类似于增强分布式协调功能(EDCF)的机制来解决优先级分配问题。

当节点准备发送数据分组时, 首先按照随机生成的 w 来确定发送数据分组类型, 然后根据确定的数据分组类型来生成窗口 CW , 节点会等待 CW 时间, 然后竞争信道, 如果信道可用, 则节点发送数据。如果信道不可用, 则节点再等待 CW 时间, 然后继续竞争信道, 以此类推直到获得信道或者循环次数超过设定值。

3.3 模型分析

3.3.1 吞吐量模型分析

为了分析模型, 对网络传输模型作以下假设。

- 1) 无线网络节点是完全按照随机分布的, 也就是基于均匀分布的模型。
- 2) 节点密度 r 为单位面积内存在的节点个数, 且每个节点的广播半径为 r 。
- 3) 在每一条的节点上会发生信道竞争的节点个数为 n 。
- 4) 节点上的数据分组的个数为 N_{total} , 其中编码度数是 d 的数据分组个数为 N_{coded_d} 。
- 5) 每个节点存在的数据分组类型和个数服从均匀分布, 即近似认为处于同一组竞争关系的节点

上的数据分组基本相似。

6) 每个节点优先传输编码度数是 d 的数据分组的概率为 x_i ，节点获得信道的概率为 p 。

7) 每个数据分组的长度为 l bit，带宽为 C 。

假设某个节点成功发送一个数据帧的概率是 P ，在有信道竞争关系的 N 个节点中，假设每个节点的负载都是均匀的(这一点可在数据帧的发送路径扩展后较容易贴近)，每个节点竞争信道的概率为 p ，则

$$P = np(1-p)^{n-1} \quad (8)$$

若 n 个节点对信道的竞争机会是均等的，则

$$p = \frac{1}{n} \quad (9)$$

所以，此时

$$P = \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{n-1} \quad (10)$$

如果以某个时间段 T 作为一个研究周期，则在这个周期内，数据传输的期望时间为

$$t = PT = T \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{n-1} \quad (11)$$

由于每个节点上的数据分组是相类似的，则在信道中发送的数据分组度数的期望值是

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^n x_i i \quad (12)$$

则在一个 T 内，传输的编码度为 d_i 数据分组的个数 num 是

$$num = \frac{Ct}{l} = \frac{CT}{l} \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{n-1} \quad (13)$$

联立式(8)~式(13)，得

$$throughout = \frac{num \bar{d}}{T} = (1-n)^{n-1} \frac{C}{l} \sum_{i=1}^n x_i i \quad (14)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (1-n)^{n-1} = \frac{1}{e} \quad (15)$$

因为竞争的节点数和节点获得信道的概率成反比，所以，当节点数增加，信道的吞吐量会降低，最小吞吐量是

$$throughout_{\min} = \frac{num \bar{d}}{T} = \frac{C}{le} \sum_{i=1}^n x_i i \quad (16)$$

3.3.2 最大阶数分析

阶数的增加可能会使网络的性能有所提升，但并不是阶数越高网络的性能就越好，当阶数超过某

个值后，性能就会达到极限，甚至由于冗余数据的增加而出现有效吞吐量降低的情况，原因是随着阶数的增加，能够纳入传输路径的新节点越来越少；同时，由于节点位置的变化，新纳入的节点上编码概率的增加量也会减小，此时编码率已经较为接近极限，那随之而来的一个问题就是如何在冗余和编码率之间找到平衡。

如图 8 所示，假设网络中的节点均匀分布，并且一跳节点距离源节点的距离较为接近广播半径。该假设中，前者是为了简化分析过程，后者是为了避免出现数据分组经过两跳以后还仍然处在源节点的广播范围之内，显然这种情况是不切合实际的。如果节点 A 和节点 C 之间存在节点 B 的二阶辅助节点，那么辅助节点必须遵循一个条件，就是这个辅助节点必须在以节点 A 和节点 C 为圆心的，以广播半径 r 为半径的 2 个圆的重合面积 S_2 中，只有这样才能符合文中的二阶辅助节点的定义。同样，如果节点 A 和节点 D 之间存在三阶辅助节点，那么三阶辅助节点一定存在阴影区域 S_1 中。所以，如果 r 为网络的节点分布密度，则网络中任何一个节点理论上独自占有的面积是 $\frac{1}{r}$ 。

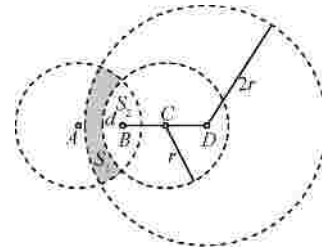


图 8 $k=3$ 示意

那么，如果存在高阶辅助节点，则一定有

$$S_1 > \frac{1}{r} \quad (17)$$

利用解析几何的知识，近似得到

$$S_1 \approx \frac{2 \left(\frac{p}{2} - \arcsin \frac{d}{r} \right)}{2p} p[(2r-d)^2 - r^2] > \frac{1}{r} \quad (18)$$

如图 9 所示，将均匀分布的节点抽象为蜂窝形态，在这种近似中，节点密度 r 和节点距离 d 的关系为

$$\frac{\sqrt{3}}{2} d^2 = \frac{1}{r} \quad (19)$$

联立以上方程，可得

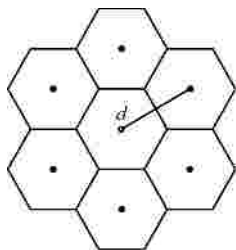


图 9 均匀节点分布模型

$$\frac{2\left(\frac{p}{2} - \arcsin \frac{d}{r}\right)}{2p} p[(2r-d)^2 - r^2] > \frac{\sqrt{3}}{2} d^2 \quad (20)$$

整理式(20), 得

$$\left(\frac{p}{2} - \arcsin \frac{d}{r}\right)(3r^2 + d^2 - 4rd) - \frac{\sqrt{3}}{2} d^2 > 0 \quad (21)$$

方程两边同时除以 r^2 , 得

$$\left(\frac{p}{2} - \arcsin \frac{d}{r}\right)\left(3 + \frac{d^2}{r^2} - \frac{4d}{r}\right) - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{d^2}{r^2} > 0 \quad (22)$$

令

$$\frac{d}{r} = x \quad (23)$$

将式(23)化简为

$$\left(\frac{p}{2} - \arcsin x\right)(x^2 - 4x + 3) - \frac{\sqrt{3}}{2} x^2 > 0 \quad (24)$$

解式(24)得

$$x < 0.73 \quad (25)$$

也就是说, 如果节点 A 和节点 D 之间存在更高阶辅助节点, 那么节点之间的距离 d 近似遵循条件 $d < 0.73r$ 。

如图 9 所示, 当距离 d 遵循上述条件的情况下, 阶数 k 与 d 和 r 的关系如下

$$k = \text{ceil}\left(\frac{2d}{r-d} + 2\right) \quad (26)$$

从这个函数中可以看出, 阶数 k 的上界是距离为 d 的单调不减函数, $\text{ceil}()$ 函数表示向上取整。可得

$$d = 0.73r \quad (27)$$

$$k = 8 \quad (28)$$

上面分析了阶数 k 与 d 和 r 的关系, 其中, d 不能太小。因为节点之间的距离均值是与节点分布密度成反比, 也就是说, 只有当节点十分密集的时候, 距离才会越来越小。但是如果节点的广播范围不变, 距离的缩小意味着不同的节点广播半径重合的越多, 这种情况下, 数据的扩散导致冗余数据分组

以极快的速率增加, 并且由于节点广播范围的大面积重合导致想要纳入新的节点作为辅助节点而增加编码率是几乎不可实现的。

从上述分析中本文倾向于认为, 对于不同参数的网络, 包括不同的节点分布、不同的路由算法以及不同的广播半径和不同的数据流分布, 这些参数对编码率和吞吐量的影响都非常明显, 不同的网络参数下会出现不同的最优阶数。

3.4 仿真结果和性能分析

本文实验是在 64 bit Windows 操作系统, 内存 4 GB, CPU 频率为 3.0 GHz 的电脑上运行 MATLAB7.0 仿真软件进行实验结果仿真, 其仿真参数设置和说明如下。

- 1) 节点个数为 50 个 随机分布在 100 m×100 m 的范围内。
- 2) 广播半径 $r=30$ m。
- 3) 任何实验都分为数据流较稀疏和数据流较密集 2 种情况分析。稀疏场景下考虑不同方向, 相互距离较远的 4 对左右节点进行通信, 产生数据流; 密集场景下考虑不同方向, 相互距离较远的至少 10 对节点间通信, 产生数据流。

4) 数据流的设定对改进方法的影响是比较明显的, 文中设置数据流的方式是在节点中较为均匀的随机选择相互距离较远的几组节点作为源节点和目的节点, 并且按照类似最短路径算法设定数据流路径。

5) 每种情况下分别对 $k=2, 3, 4, 5$ 进行仿真。

6) 每个数据分组的长度为 2 000 bit 带宽为 1 Mbit/s。

图 10 和图 11 分别是在不同的流量情况下, 阶数 $k=2, 3, 4, 5$ 的编码率随时间变化的对比。图 10 为数据较为密集的情况下编码率对比曲线, 从图中可以看出, 阶数越大, 扩散速率较大, 就能

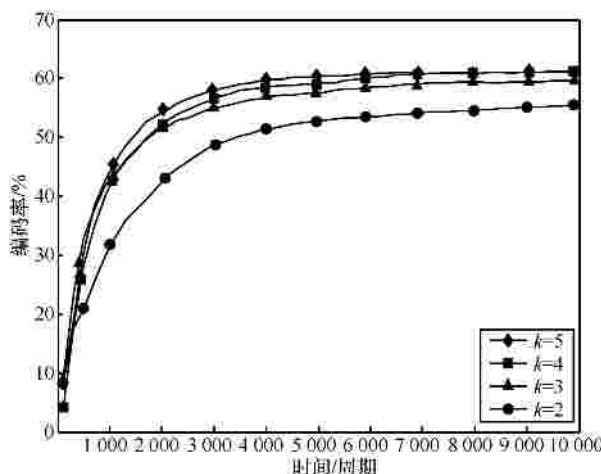


图 10 数据流较密集时不同阶数的编码率对比

在较短的时间内达到平衡状态。随着阶数的增加，编码率在阶数从 2 到 5 的实验中基本上呈现上升后稳定趋势，但是在某些情况下，阶数过高时也可能出现编码率降低，因为过高的阶数将不可避免地引发过高的冗余，并抵消了编码增益。相对于 $k=2$ 的情况，编码率提高最大可以达到 7%。

图 11 为数据较为稀疏的情况下编码率对比曲线，同图 10 一样，扩散的速率基本上和阶数成正比。随着阶数的增加，编码率的总体趋势与图 12 基本类似。相对于 $k=2$ 的情况，编码率提高最大可以达到 8%。分析原因可知，当数据流较为稀疏时，数据本身存在的编码可能性较小，两图中最高编码率的差异同样可以验证这一点。所以，在数据本身编码可能性较小的时候，即使是阶数很高，扩散的数据仍然只有较小的编码可能性。甚至由于阶数太高而引发的冗余数据增多而使网络的无效负载增大。但是当数据流较为密集时，则数据流本身的编码可能性较大，同时这种情况下的最优阶数也要比数据流稀疏时要高。

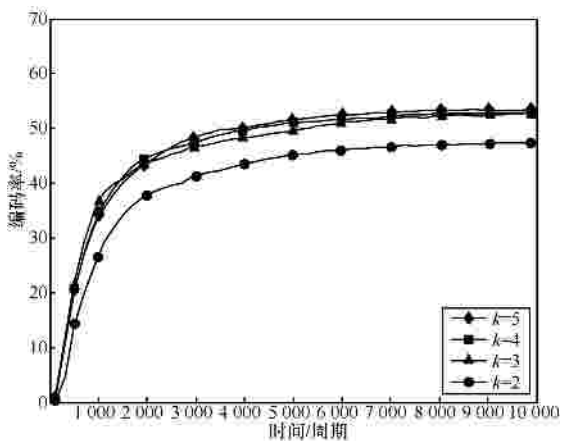


图 11 数据流较稀疏时不同阶数的编码率对比

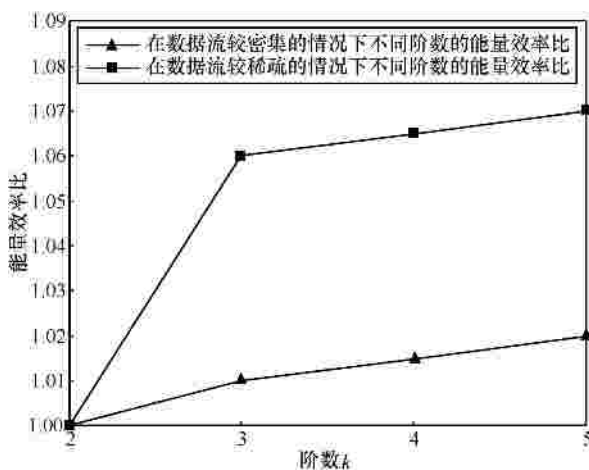


图 12 2 种情况下不同阶数的能量效率比

图 13 是编码率在 2 种不同情况下，到达平衡状态时不同阶数的编码率对比。

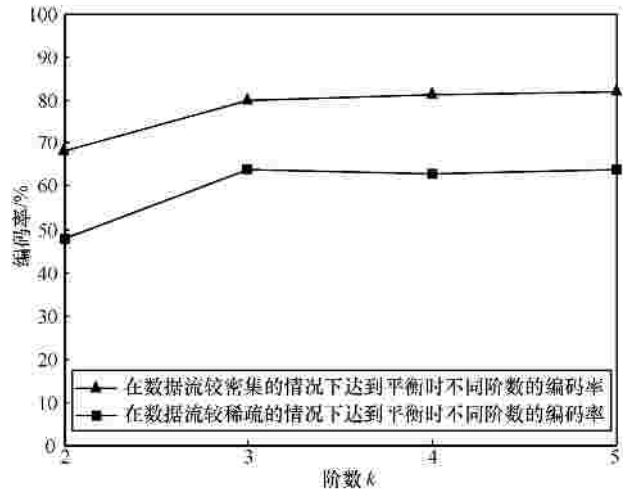


图 13 在数据流较密集和稀疏情况下，达到平衡时不同阶数的编码率对比

图 14 是 2 种情况下，不同阶数的吞吐量对比，从图中可以看出吞吐量随着阶数变化关系基本上和编码率随着阶数的变化规律相一致。从 2 组图中可以看出，当数据流比较稀疏和比较密集的情况下，编码率的提高程度和网络性能达到平衡态时的阶数都是不一样的。在数据流较为稀疏时，阶数从 2 增加到 3 时编码率和吞吐量增加比数据流密集情况下的增加程度要多。同时，由于数据流稀疏时网络对数据流的编码机会本来就小，所以在 $k=3$ 时基本上已经接近编码率上限。但是在数据流密集的情况下，由于网络对数据流编码率的极限较高，所以，阶数在从 3 提升到 4 时，编码率仍有提升，阶数为 4 时，编码率接近上限。值得一提的是，阶数过高时，有效吞吐量可能降低。

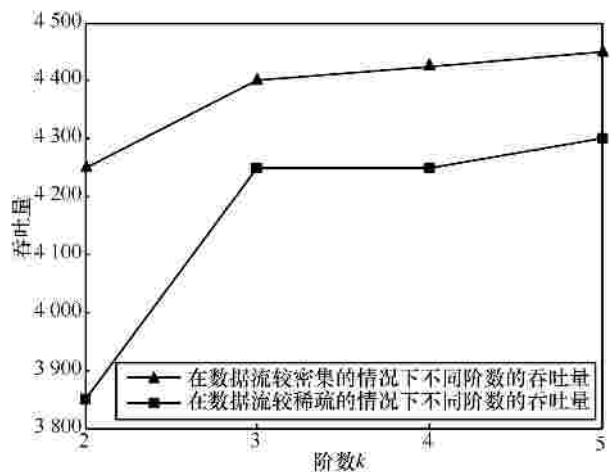


图 14 2 种情况下不同阶数的吞吐量对比

能量效率比是指定义某种情况下的能量效率为标准,在此基础上,其他情况下的能量效率和标准情况求比值,这个比值称为能量效率比,能量效率比量化传感器节点能耗情况,比值越大,则传感器节点能量消耗越多,其计算公式如下

$$h = \frac{E_k}{E_{standard}} \approx \frac{num_{send} + num_{rec}}{num_{send_stan} + num_{rec_stan}} \quad (29)$$

其中, $E_{standard}$ 表示标准情况下的能量效率, E_k 表示阶数为 k 时的能量效率。从式(29)很容易看出,能量效率比越大,说明这种情况下的能量效率越低。由于编码分组和未编码分组的长度接近,所以近似用数据分组的发送次数和接收次数的和来代表能量的使用情况。

图 12 是 2 种情况下的 4 种不同阶数的能量效率对比。从图中容易看出,在数据流较为稀疏的情况下,当阶数较低时,确实有一部分节点处于闲置状态,随着阶数的增加,越来越多的节点开始进行数据转发,所以能量效率降低,当阶数上升到 3 时,几乎所有节点都已经开始参与数据流转发,所以网络的能量消耗进入一种平衡态。但是当数据流比较均匀且较为密集的时候,只要阶数为 2 时,基本上大多数的节点就已经开始参与数据流的转发,所以可以看出,阶数上升到 4 或者 5 时,能耗增加不大。由图 11 和图 13 得到的结论是:随着阶数的增加,能量效率的总体趋势是下降的,但是下降幅度不是很大。

图 15 和图 16 是在 4 层节点拓扑下的编码率和吞吐量仿真曲线。仿真有 2 个方向的数据流,向左向右各 2 个。由于 BEND 算法只考虑将邻居节点作为辅助节点来扩展路径,而本文提出的方法则可以将更多的节点纳入路径中,从而进一步扩展传输路径,当阶数不超过最优阶数之前,编码率和吞吐量都有提升,所以本文只考虑阶数为 3 时与 BEND 算法的比较。当采用 BEND 方法时,从图中可以看出,由于在第一种情况下,所有的数据流都被强制通过同一个节点,所以编码率能达到 96%。但是当同一层的节点数增加时,编码率降低明显。而由于增加同一层的节点数打破了所有数据流被强制通过同一个节点这种瓶颈,虽然编码率降低了,但是吞吐量却有十分明显的上升趋势。虽然再继续增加同一层上的节点个数时,编码率逐渐降低,但是吞吐量却略有下降。当 $k=3$ 时,本文方法的编码率的变化趋势和 $k=2$ 时基本一致,但是略有提高。这是由于扩展系数的增加时数据分组扩散的更加明显,使编

码机会有所提升。吞吐量的趋势也基本保持不变,但是,节点的个数越多,两者的差距越为明显。在每层的节点数都为 4 的时候,编码率和吞吐量与 BEND^[19]方法相比分别提升 8%和 4%,说明扩展系数的增加能给本文方法带来良好的效果。

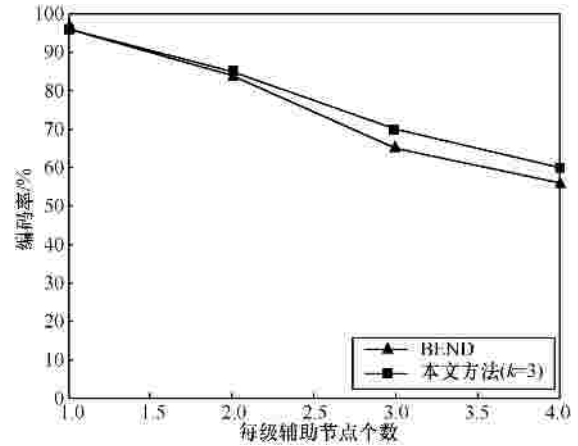


图 15 4 层节点拓扑下的编码率

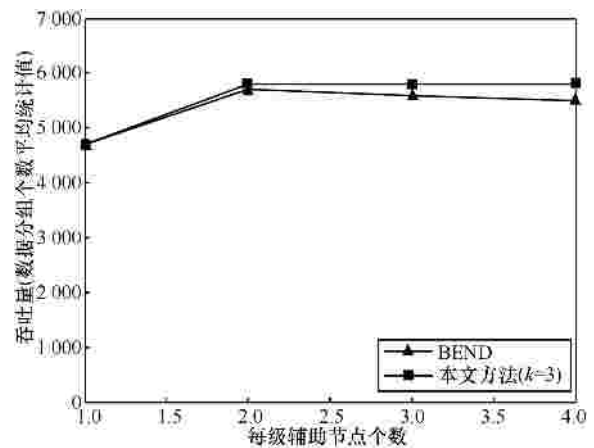


图 16 吞吐量

4 结束语

无线传感器网络的 MAC 协议作为整个网络体系结构的重要基础之一,对无线网络的性能有十分重大的影响。本文研究了基于路径优化和网络编码的无线传感器网络 MAC 协议,并且明确分析阶数,对以后的工作有指导性意义。

首先研究了基于 EWMA 的链路质量估计方法中探测窗口特性,改进了主动探测模块的探测周期,并通过结合软件估计方法和硬件估计方法,使用了带有触发条件的瞬时主动探测模块,在较为稳定性的网络条件下提高了突发状况下的反应速度和估计准确性,同时减小了网络开销。

然后研究了网络编码和路径优化在 MAC 中的应用，合理地利用无线网络的广播特性，通过在节点周围增加辅助节点的方式，将数据分散应用在 MAC 中，并且在此基础上加入了网络编码机制，从而增加了网络中的编码率和网络的吞吐量，同时又不会引发由流量集中带来的诸多问题，并提高了传感器节点的能量效率。最后分析了过多地增加辅助节点对网络造成的不利影响。

参考文献：

- [1] AKYILDIZ I F, SU W L, SANKARASUBRAMANIAM Y, CAYIRCI E. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114.
- [2] 李延晓, 张月玲, 管桦, 等. 一种无线传感器网络 MAC 层能量有效算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2012, (1): 168-171.
LI Y X, ZHANG Y L, GUAN H, et al. Novel low energy consumption MAC protocol for the wireless sensor networks[J]. Journal of Xidian University, 2012, (1): 168-171.
- [3] YE W, HEIDEMANN J, ESTRIN D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]//INFOCOM 2002, Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. c2002: 1567-1576.
- [4] VAN D T, LANGENDOEN K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]//The 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. ACM, c2003: 171-180.
- [5] POLASTRE J, HILL J, CULLER D. Versatile low power media access for wireless sensor networks[C]//The 2nd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Baltimore, USA, c2004: 95-107.
- [6] EL-HOIYDI A, DECOTIGNIE J D. WiseMAC: an ultralow power MAC protocol for the downlink of infrastructure wireless sensor networks[C]//ISCC 2004, Ninth International Symposium. IEEE, c2004: 244-251.
- [7] BUETTNER M, YEE G V, ANDERSON E, et al. X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks[C]//The 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. ACM, c2006: 307-320.
- [8] JAMIESON K, BALAKRISHNAN H, TAY Y C. Sift: A MAC protocol for event-driven wireless sensor networks[C]//Wireless Sensor Networks. Springer Berlin Heidelberg, c2006: 260-275.
- [9] LU G, KRISHNAMACHARI B, RAGHAVENDRA C S. An adaptive energy-efficient and low-latency MAC for data gathering in wireless sensor networks[C]//Parallel and Distributed Processing Symposium. IEEE, c2004: 224.
- [10] LIU P, TAO Z, NARAYANAN S, et al. CoopMAC: a cooperative MAC for wireless LANs[J]. Selected Areas in Communications, 2007, 25(2): 340-354.
- [11] MOH S, YU C, PARK S M, et al. CD-MAC: cooperative diversity MAC for robust communication in wireless ad hoc networks[C]//ICC'07, IEEE International Conference. IEEE, c2007: 3636-3641.
- [12] RHEE I, WARRIER A, AIA M, et al. Z-MAC: a hybrid MAC for wireless sensor networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), 2008, 16(3): 511-524.
- [13] HURNI P, BRAUN T. MaxMAC: a maximally traffic-adaptive MAC protocol for wireless sensor networks[C]//Wireless Sensor Networks. Springer Berlin Heidelberg, c2010: 289-305.
- [14] AHLWEDE R, CAI N, LI S Y R, et al. Network information flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216.
- [15] FRAGOULI C, LE BOUDEC J Y, WIDMER J. Network coding: an instant primer[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2006, 36(1): 63-68.
- [16] POLYANSKIY Y, POOR H V, VERDÚ S. Channel coding rate in the finite blocklength regime[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(5): 2307-2359.
- [17] KATTI S, RAHUL H, HU W, et al. XORs in the air: practical wireless network coding[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2006, 36(4): 243-254.
- [18] NI B, SANTHAPURI N, ZHONG Z, et al. Routing with opportunistically coded exchanges in wireless mesh networks[C]//Wireless Mesh Networks, WiMesh 2006, 2nd IEEE Workshop on IEEE. c2006: 157-159.
- [19] ZHANG J, CHEN Y P, MARSIC I. MAC-layer proactive mixing for network coding in multi-hop wireless networks[J]. Computer Networks, 2010, 54(2): 196-207.
- [20] LE J, LUI J C S, CHIU D M. DCAR: distributed coding-aware routing in wireless networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(4): 596-608.
- [21] CAO C, GONG P, CHOU L. Random network coding based the effective wireless MAC protocol[C]//2013 IEEE 4th International Conference on Software Engineering and Service Science. Beijing, China, c2013: 393-396.
- [22] YI T M, YANG C C, CHEN J Y. Performance evaluation of cross-layer QoS framework for WiMAX Mesh networks[J]. JCIT, c2012, 7(1): 180-187.
- [23] LING Y T, YI B S, WU J B. A novel access selection scheme in heterogeneous wireless environments[J]. IJACT, 2012, 4(1): 24-32.
- [24] WOO A, CULLER D. Evaluation of Efficient Link Reliability Estimators for Low-power Wireless Networks[R]. Technical Report UCB/CSD-03-1270, EECS Department, University of California, Berkeley, 2003.
- [25] 黄庭培, 李栋, 张招亮, 等. 突发性链路感知的自适应链路质量估计方法[J]. 通信学报, 2012, 33(6): 30-39.
HUANG T P, LI D, ZHANG Z L, et al. Bursty-link-aware adaptive link quality estimation method[J]. Journal on Communications, 2012, 33(6): 30-39.

作者简介：



尚凤军 (1972-), 男, 内蒙古宁城人, 博士, 重庆邮电大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为物联网、云计算和新一代互联网。

龚文娟 (1990-), 女, 四川遂宁人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为新一代互联网、软件定义网络。

耿哲 (1987-), 男, 河北石家庄人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络。