

基于精细梯度策略的多链路协同数据转发协议*

朱红松^{1,2,3+}, 赵磊^{1,3}, 徐勇军¹, 李晓维¹, 孙利民²

¹(中国科学院 计算技术研究所,北京 100190)

²(中国科学院 软件研究所,北京 100190)

³(中国科学院 研究生院,北京 100049)

Multi-Link Cooperative Data Forwarding Protocol Based on Fine-Grain Gradient Strategy

ZHU Hong-Song^{1,2,3+}, ZHAO Lei^{1,3}, XU Yong-Jun¹, LI Xiao-Wei¹, SUN Li-Min²

¹(Institute of Computing Technology, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

²(Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

³(Graduate University, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

+ Corresponding author: E-mail: zhuhongsong@is.iscas.ac.cn

Zhu HS, Zhao L, Xu YJ, Li XW, Sun LM. Multi-Link cooperative data forwarding protocol based on fine-grain gradient strategy. *Journal of Software*, 2009,20(11):3045–3059. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3535.htm>

Abstract: Tests demonstrated that the wireless link quality of statically deployed sensor networks frequently varied in a short time span. Traditional link estimation methodology works well in the varying case of long time span, but poor in that of short time span. This paper proposes a multi-link cooperative forwarding protocol on fine-grain gradient strategy (MCFS), which can avoid the influence of quality jitters on parts of forwarding links through single-send-multiple-receive plus strategy on the synchronized random contention of ACK. A new channel model was developed on NS2 platform, which could simulate the link quality changing in a short time based on the model of two states non-homogeneous Markov chain. Through this channel model, the following conclusions would be reached: (1) MCFS protocol can adapt and work well with short time varying of link quality; (2) In reasonable configuration, MCFS was quite effective on performances in the network delivery rate and energy efficiency, compared with mono-link optimized protocol by the criteria of HOP/PRR, disjoint and braid multi-path forwarding protocols; (3) The good features of MCFS were independent of both network scale and nodes density of deployment.

Key words: wireless sensor network; energy efficient; multi-link cooperative forwarding strategy; power regulation; short time varying link; non-homogeneity Markov chain

摘要: 实验表明,无线传感网的链路存在短时变异特性.链路估计方法对中长时链路变化具有路由指示能力,而

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60772070, 60673178 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant Nos.2007AA12Z321, 2009AA11Z209 (国家高技术研究发展计划(863))

Received 2008-05-12; Revised 2008-10-06; Accepted 2008-12-03

对短时变化链路表现不佳.在精细梯度模型下提出一种基于 ARQ(automatic repeat-request)的多链路协同转发协议(multi-link cooperative forwarding protocol on fine-grain gradient strategy,简称 MCFS),通过单发多收和基于随机同步竞争窗的自举应答算法来消除链路短时变化的影响.通过基于非齐次马尔可夫链的短时变链路模型上的 NS2 仿真,实验结果表明:MCFS 协议能够有效适应短时链路变化;在可控条件下,具有比基于 HOP/PRR 的单链路优化协议、分离和缠绕多路径更好的网络抵达率和能量效率;这种性能优势与网络规模和部署密度无关.

关键词: 无线传感器网络;能量效率;多链路协同转发策略;功率调节;短时时变链路;非齐次马尔可夫链

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

短距离无线通信的链路特性对协议性能影响巨大,给传感器网络(wireless sensor network,简称 WSN)的协议设计带来挑战.现有文献对无线链路的非对称性、相关性、过渡带随机接收特性等都有较为深入的研究.我们通过大量的链路实验发现,除上述特性外,短距离无线链路还存在着明显的短时时变特性.

我们使用宁波高新区深联科技有限公司提供的Gains3 和Gainsz硬件节点平台^[1]在室内和室外两种环境下分别进行链路实验,图 1 给出了在办公室和草地环境下,gains3 和gainsz两种共 4 个节点平台的数据包成功接收概率(PRR)随时间的变化情况(办公室环境节点发包速率为 5 包/秒,草地为 10 包/秒,PRR的统计时间为 4 秒).图 2 给出了参与实验的 60 个节点(每种 30 个节点)的链路PRR的统计标准差分布情况(通过滑动窗口逐段进行标准统计后进行分布拟合,会议室和草地环境的窗口值分别为 4 000 秒和 1 200 秒).从图中可以看出,链路都存在短时间内均值显著变化的情况;另外,在草地环境中方差分布呈现长尾特征,预示短时时变更为普遍、严重.这种短时时变不同于过渡带内节点收发随机抖动的抖动,后者源于随机噪声的方差,而前者往往是由于环境的瞬变,如人员物品的移动、风吹草动等,引起的路径衰减指数的变化所致.

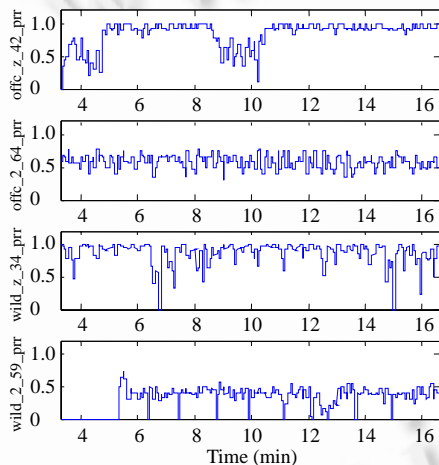


Fig.1 PRR time series in both meeting room and lawn environment

图 1 会议室和草地环境节点 PRR 时间序列

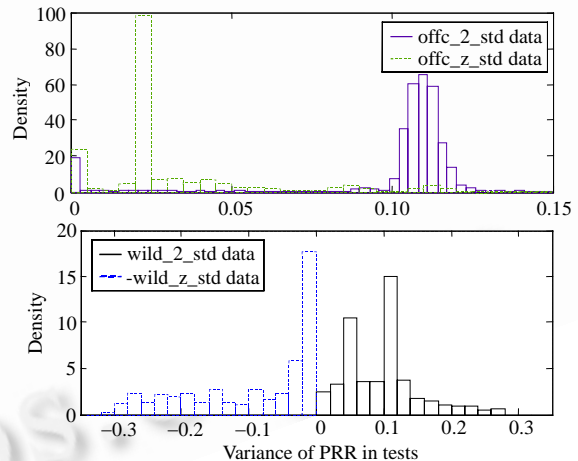


Fig.2 Density of standard error of PRR of tests in both meeting room and lawn environment

图 2 会议室和草地环境链路 PRR 的标准差分布密度

当链路变化频繁时,常规路由算法选择的节点不能及时反映链路的瞬时特性.如果提高链路探测频率,则一方面可能造成路由的抖动,另一方面还会消耗大量的能量.基于单链路的转发协议难以解决这种路由无法有效跟踪链路变化的场景.为此,我们提出在精细梯度模式^[2]下基于 ARQ(automatic repeat-request)的多链路协同数据转发协议——MCFS(multi-link cooperative forwarding on fine-grain gradient strategy):发送者根据精细梯度指定候选转发节点集,而转发节点根据自身梯度选择 ACK(acknowledge)的应答时槽,与发送节点协作完成转发节点的选择.仿真实验结果表明,MCFS 具有如下优异特性:(1) 一次指定多个节点接收的策略可以避免个别链路质量的短时跳变,有效抑制协议性能的下降;(2) 在可控的协议配置下,MCFS 具有比基于 HOP/PRR 指标的单链

路优化转发协议、分离(disjoint)和缠绕(braid)多路径转发协议更好的能量效率和抵达率特性;(3) MCFS的优异特性与网络规模和节点部署密度无关。(4) MCFS协议允许节点根据局部特征灵活调整候选转发节点数目、ARQ重传门限、是否使用ACK功率调节机制等参数,以提高协议在不同网络负载下的性能。

随着无线网络应用形态由有线网络末梢转变为完成特定功能的主体网络,链路特征对协议性能的影响开始备受关注.2002年UCLA(University of California, Los Angeles)大学CENS实验室Estrin教授领导的实验小组撰写了一份技术报告,指出无线链路的不规则特性对WSN网络的洪泛(flooding)协议有很大影响^[3].2003年,Zhao等人针对短距离无线通信网络做了更详细的实验^[4].通过对实验数据的时空分析,他们发现网络节点的PRR在空间分布上有灰色区域(也称过渡带)存在.Zuniga等人根据Shadow信道模型找到了短距离无线通信在空间上存在灰色过渡区的理论依据^[5].Zhou^[6],Srinivasan^[7],Son^[8]等人也通过实验细致地研究了短距离无线通信链路的特征,以及不同射频模块和载波通信方式的链路特征差异。

为了适应无线链路的时空特征,研究者开始设计算法和协议以提高WSN在真实无线环境下的传输可靠性和能量效率.一种是以链路动态估计为特征的数据转发协议,另一种是从链路总体特征模型出发设计的数据转发协议.基于链路动态估计的协议以Woo等人发表的文献[9]为典型代表.该协议包含一个链路估计器和路径转发代价评估算法.链路估计器通过周期性探测信道状态以评估数据转发链路的质量,然后根据质量评估单跳转发代价和路径转发代价,并据此选择转发节点.在链路动态估计方面,另外两个有代表性的算法是Xu等人提出^[10]的通过链路空间相关性、统计回归和状态空间分离技术实现的链路估计算法和Wang提出^[11]的机器学习的链路预测方法。

当环境的动态性较弱时,采用链路实时监测方法能量消耗较大,故研究者直接根据无线链路的静态特征设计协议,以提高数据转发的可靠性和能量效率.Ye等人提出一种基于梯度的健壮广播协议GRAB^[12].该协议是一种基于路径开销(cost)的先应式定向洪范协议.当路径开销定义为节点传送数据包开销(1/PRR)时,GRAB也是一种基于链路质量的数据转发协议,只是没有动态链路估计.Seada等人^[13]以无线信道的对数正态阴影模型为基础,研究了基于地理信息的高效通信协议.协议中节点以 $PRR(d)$ 作为评判指标选择转发节点.理论分析和实验表明,在非理想信道条件下,其能量效率和数据抵达率远好于完全依赖跳数判据选择转发节点的贪婪算法.Busse等人提出一种基于路径能量效率的数据转发协议^[14].该协议使用 $E_{eff}=E_r/E_e$ 作为选择转发节点的尺度. E_r 为端到端的数据包抵达率, E_e 是该数据包在传递过程中消耗的能量.Busse等人在分析模型中也讨论了单链路和多链路两种链路层转发策略,并与如MT指标、HOPs/PRR指标、Blacklist机制等协议进行了性能比较.Busse等人的协议需要维护端到端的抵达率,统计滞后大,开销大,且因为作者没有给出多链路协议的实施过程及仿真结果,故无法表现协议的时变链路性能和高负载条件下的效率.Zhu等人^[2,15]利用密集型网络特征建立精细梯度,并利用邻居梯度和随机选择算法进行数据转发.随机选择算法在选择高效节点的同时,兼顾了能量的均衡消耗.这些静态协议通过定期的全局刷新来适应链路质量的变化。

本文第1节介绍MCFS多链路转发协议的过程和主要设计机制.第2节介绍短时变链路模型、仿真配置环境、能量效率的统计方法和对照协议的基本过程.第3节给出实验结果和分析.第4节讨论下一步的研究方向和结论。

1 MCFS 协同多链路转发协议

1.1 MCFS的基本协议流程

MCFS协议建立在精细梯度基础上.网络形成精细梯度的方法如下:由汇聚节点发起一次洪泛,每个节点记录各自到达汇聚节点的跳数;洪泛结束后,邻居节点之间交换彼此的跳数;最后,节点将邻居节点的跳数平均作为自己到达汇聚节点的精细梯度.精细梯度模型在数据转发中的优势和有效性可参考文献[2].

MCFS协议的多链路思想如图3所示:发送节点 S 一次指定 k 个候选节点 $\{F_k\}$ 接收数据;而正确接收的候选节点通过自举算法推举一个节点 n_j 负责转发.设每个候选节点瞬时接收成功概率为 $\{p_1(t)\dots p_k(t)\}$,则在多链路模式下,一次转发数据包成功概率为 $p(t)=1-\prod_{i=1,\dots,k}(1-p_{ki}(t))$.由此可见,单条链路质量的下降尽管在一定程度上影

响一次发送成功率,但由于多节点同时参与,极大地降低了这种影响.多点接收单点转发是MCFS协议的核心思想.Zhu在文献[16]中用理论模型证明了多链路模式在可控条件下优于单链路模式,但在现实中的冗余重传问题会影响协议效率.

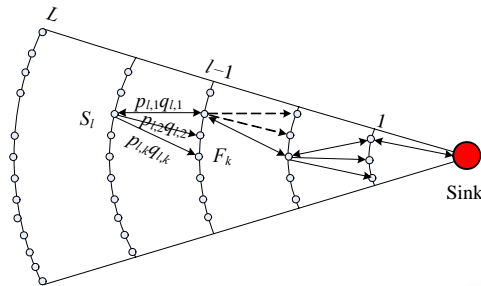


Fig.3 Illustration of MCFS multi-link strategy

图3 MCFS多链路策略示意图

算法1给出了MCFS的协议处理流程.发送节点首先根据设定的候选节点个数 k 计算候选区的梯度范围(记为 $[g_{\min}, g_{\max}]$),并将梯度范围写入MAC层包头后广播该数据包.候选节点如果正确接收到数据包,将成为转发竞争节点.转发竞争节点首先通过时槽竞争算法Slot得到其回应ACK的时槽号,设定定时器,并监视信道直到定时器超时或信道变忙.若定时器超时信道仍然处于空闲,转发竞争节点认为竞争成功,回应ACK给发送节点.如果发送节点接收到ACK则完成数据转发,否则回退并重发数据包.尽管ACK时槽竞争需要节点间同步,但这种同步只需要转发竞争节点以数据包接收结束为基准在几十毫秒内保持精准同步即可,如此短暂的时间片段无需时钟补偿算法.

算法1. MCFS算法中发送节点和候选转发节点的算法.

ALGORITHM: *Packet_Send*.

Sender i :

/* Maintain the fine-grain gradient of each neighbor $j \in N(i)$, we denote $g(j)$ as the gradient of node j , k as the number of candidate forwarders in each transmission, and sort nodes in $N(i)$ by $g(\bullet)$ as an array of G_i */

$g_{\min} = g(G_i(k));$

$g_{\max} = g(G_i(1));$

Broadcast packet $\{[g_{\min}, g_{\max}] || DATA\};$

Wait until receiving a ACK from a node, which gradient is within $[g_{\min}, g_{\max}]$ or sending timer being out.

if sending timer out, then

backoff and retransmit this packet;

end

ALGORITHM: *Packet_Recv*.

Receiver j :

Receive header of a packet.

If $g(j) \in [g_{\min}, g_{\max}]$, then

$ack_slot = Slot(g_{\min}, g_{\max}, g(j), sent_before);$

Set timer for ack slot.

Sense channel and wait until whole packet received and ack timer out

If channel busy then

Suppose others already reply ACK, so give up the packet

Else

```

Regulate transmission power for ACK
Send ACK{j||g'(j)} to sender
// g'(j) is an updated gradient of i.
End
Else
Sleep until transmission end.
End

```

1.2 ARQ应答机制面临的冗余重传问题

MCFS 协议使用基于 ARQ 的转发自举方式.基于 ARQ 机制的协议都存在冗余重传问题,而冗余重传是浪费能量的主要因素之一.在多链路协议中,冗余重传问题表现得更为多样,也更为严重.

基于 ARQ 机制的多链路协议存在两种冗余重传形式:发送者冗余重传和接收者冗余重传.图 4 给出了这两种形式冗余重传的产生过程.其中,上面 3 个子图为发送者冗余重传过程:两个候选接收者一个收到,一个未收到,同时,接收者的 ACK 也没有正确传送到发送者;此时,发送者认为发送失败,进而再次发送数据包,而重传的数据包又被另一个候选转发节点准确接收,从而造成网络中有同一个数据包的两份拷贝.图 4 中下面 3 个子图描述接收者冗余重传过程:两个节点都正常接收到数据,但它们发送的 ACK 彼此都没有感知到(因为两节点同时在发送 ACK),由此两个接收者将独立发送数据拷贝.接收者冗余重传往往伴随发送者冗余重传,因为两个候选者同时发送的 ACK 彼此冲突,使发送者接收 ACK 帧过程失败,进而导致发送者重传.MCFS 协议设计了多项机制抑制两种冗余重传,以提高协议性能.

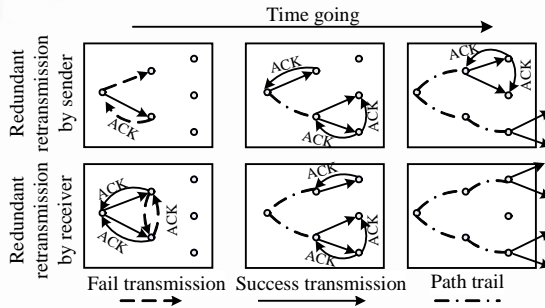


Fig.4 Redundant retransmission problem

图 4 冗余重传问题

1.3 基于ACK的同步竞争窗机制和时槽竞争算法

MCFS 使用 ACK 同步竞争窗机制来实现转发任务的自举,自举过程如图 5 所示.候选节点在接收完数据包后,设定同步起始点 O ,并将 $[0, T]$ 的竞争时段划分为 CW 个时槽, $CW=2k$,其中, k 为候选转发节点个数.使用系数 2 是为了在信道竞争中减少冲突概率; $T=2k\tau$,其中, τ 是信道检测时间.因为接收者在自身竞争到的时槽内发送 ACK 之前一直要检测信道状态,故每个时槽的宽度不小于信道空闲检测时间.注意,竞争时槽宽度远小于 ACK 帧的发送时间,所以检测到信道忙的候选节点无法通过解码判定空间传输的数据包是否是对数据包的确认帧.MCFS 为此采取的策略是,只要候选节点发现信道忙,就放弃当前的转发任务.

竞争窗内定义 3 个特殊时槽:第 1 个时槽留空,供给发送者作收发功能切换;接下来的 2 个时槽作为快速通道,留给已经转发过该数据的节点使用.快速通道时槽是减小发送者冗余重传的机制之一.当已经转发某数据的节点 j 发现又有节点 $i(g(i)>g(j))$ 发送由 j 节点转发过的数据包时,节点 j 将使用快速通道通知节点 i 和其他候选节点该数据已转发过,从而终止无用数据拷贝在网络中传播.为避免多个节点同时使用快速通道应答而导致冲突,协议设置了两个快速通道时槽.

对常规时槽的竞争,分槽ALOHA协议^[17]是一种最简单的窗口竞争算法,但该算法无法实现优先级竞争.为了减少网络的能耗,我们总希望梯度小的节点拥有较高的转发优先权,这使得分槽ALOHA无法直接使用.一种实现优先级的方法是竞争节点使用从自身梯度和目标梯度范围到时槽编号的线性映射来确定应答时槽,即通过公式 $Slot(j)=3+CW(g(j)-g_{min})/(g_{max}-g_{min})$ 计算.但有两个因素会影响该方法的效率:(1) 由于节点的随机部署,发送节点确定了目标转发区域后,并不知道候选节点的分布状况.如果候选节点使用线性映射确定时槽,则很可能两个梯度相近的节点选择同一个时槽,进而导致ACK应答冲突和接收者冗余重传.(2) 在发送节点邻居中处于不同梯度的节点数不同,靠近发送节点的候选节点多,因而映射到同一个时槽的概率大.

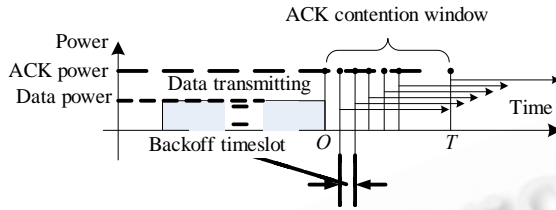


Fig.5 Illustration of contention window mechanism in ACK response
图5 ACK回应的竞争窗口机制说明

MCFS 协议使用式(1)所示的算法计算竞争时槽:

$$Slot(j) = 3 + \left\lfloor \frac{CW}{n} \left[\frac{g(j)^\alpha - g_{min}^\alpha}{g_{max}^\alpha - g_{min}^\alpha} \cdot (n-1) + \frac{CW}{n} \cdot rand() \right] \right\rfloor \quad (1)$$

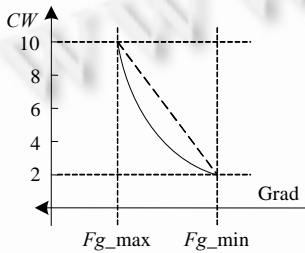


Fig.6 Mapping curve between gradient and ACK time slot
图6 梯度与ACK时槽映射曲线

首先将 CW 个时槽划分为 n 段,每段包含 $\lfloor CW/n \rfloor$ 个时隙.候选接收节点根据自身梯度计算ACK竞争时槽所在段;段内时槽的确定通过分槽ALOHA方法随机确定.通过梯度映射与分槽ALOHA方法的结合,大大降低了时槽的竞争冲突概率.

另外,针对候选节点对梯度的不均匀分布问题,算法采用了非线性映射方法,即式(1)右侧第2项的后半部分.通过引入指数 α ,使靠近发送节点的候选节点映射到竞争窗口区域时更分散.考虑通信域内不同梯度的候选节点数的分布特性,协议取 $\alpha=2$.图6中的实线描绘了相应的映射曲线.

1.4 ACK发送功率调节机制

接收者冗余重传源于候选节点之间不能彼此感知ACK帧.这种情况在统一发送功率条件下的多链路协议中是确定存在的.图7给出了候选节点区域和ACK通信区域.从图中可以看出,节点E,G为候选转发节点,节点G的ACK通信范围无法覆盖到E点,故E也会转发A节点的数据包,从而形成冗余重传.MCFS协议使用高于数据传输的发送功率发送ACK数据包,使ACK传输信号能够有效覆盖整个转发区域.

另外,从基本多链路的算法设计可以看出,多链路机制只能提高数据正向传递的一次成功率,而对于反向的ACK帧的成功率则没有改善,这使得ACK帧的成功接收概率成为效率的瓶颈.通过提高ACK帧的发送功率,MCFS还可以提高ACK帧的成功接收概率,进一步降低发送者冗余重传概率.

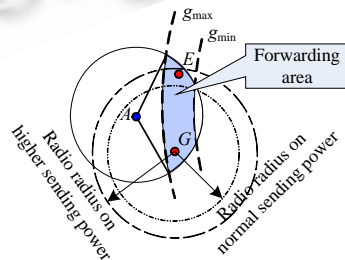


Fig.7 Effects of ACK power regulation
图7 ACK发送功率调节的效果

2 链路模型、性能评价方法和仿真配置

2.1 短时时变链路模型

为了测试 MCFS 协议在短时时变链路的特性,我们在 NS2 上设计了短时时变特性的链路模型.NS2 的 2.30 版本中支持 3 种信道模型:Friis,towRay 和 Shadowing.在短距离通信中,Shadowing 模型(即对数正态衰落模型)可以很好地反映静态链路的对数正态随机特性,但对短时时变特性的模拟则无能为力.链路的短时时变特性往往由瞬间的环境变化,如人员走动等,导致信道在短时间内的均值变化(非方差引起的抖动).根据通信理论,这种链路质量的变化直接来源于衰减指数的变化.因此,我们以对数阴影模型为基础,通过给衰减指数加上一个随机变量 $\pi(t)$ 建立链路的短时时变模型,如式(2)所示:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10(n + \pi(t)) \log_{10}(d / d_0) \chi \sigma \quad (2)$$

$\pi(t)$ 是一个取值为 0 和 Δ 的两状态随机变量,取值通过图 8 所示的两状态非齐次马尔可夫过程进行随机采样获得.

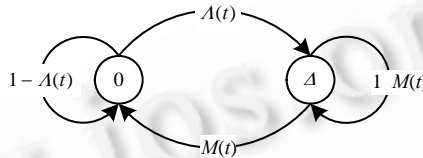


Fig.8 Two states non-homogeneous Markov chains model of short-time varying wireless link

图 8 短时时变无线链路的两状态非齐次马尔可夫模型

令 $\lambda(t)$ 和 $\mu(t)$ 为均值为 $1/\lambda$ 和 $1/\mu$ 的指数分布随机变量,图 8 中的 $\lambda(t)$ 和 $\mu(t)$ 分别为信道处于状态 0 和 Δ 的时间 t 内, $\lambda(t)$ 和 $\mu(t)$ 两个变量的累积分布,即有 $\lambda(t) = 1 - e^{-\lambda t}$, $\mu(t) = 1 - e^{-\mu t}$.通过调节指数函数的参数 λ 和 μ 达到调节状态持续时间的目的.该模型通过蒙特卡洛采样过程实现,具体算法见算法 2.

算法 2. 基于蒙特卡罗采样的短时时变链路非齐次马氏链实现算法.

// define *to_last_update_time* as the time span from last state updating to now

ALGORITHM: *updatePathlossExp*.

obtain *to_last_update_time*

If *state* == Δ , then

Set *jump_prob* to be $1 - e^{-\lambda \times to_last_update_time}$;

Else

Set *jump_prob* to be $1 - e^{-\mu \times to_last_update_time}$;

End

Get a random from uniform distribution within (0,1);

If *random* < *jump_prob*, then

Swap the state between 0 and Δ ;

End

set *to_last_update_time* to 0;

$\pi = State \times \Delta$;

End

从算法 2 可以看出,系统在一个状态中停留时间越长,跳转到另一个状态的概率 *jump_prob* 越大,从而采样的随机数才会有更大的概率小于 *jump_prob*,实现状态跳转.根据蒙特卡洛理论很容易证明这种算法在每个状态停留的时间分别为两个指数分布的均值.

我们在 NS2 的 shadowing.cc 中实现了该模型,并通过两个节点的收发仿真验证了本模型的有效性.图 9 展示了未使用和使用短时时变模型下,链路 PRR 随时间的变化特征.其中,信道衰落指数基数 $n=4$;衰减指数跳变增量 $\Delta=2$;信道对数正态随机方差为 7; $\lambda=0.01$; $\mu=0.1$.无线模块的速率、频率等参数与 gains3 平台实验的配置一致.

实验中,在状态 0 停留的平均时间为 $100s(1/\lambda)$,在状态 Δ 停留的时间为 $10s(1/\mu)$.

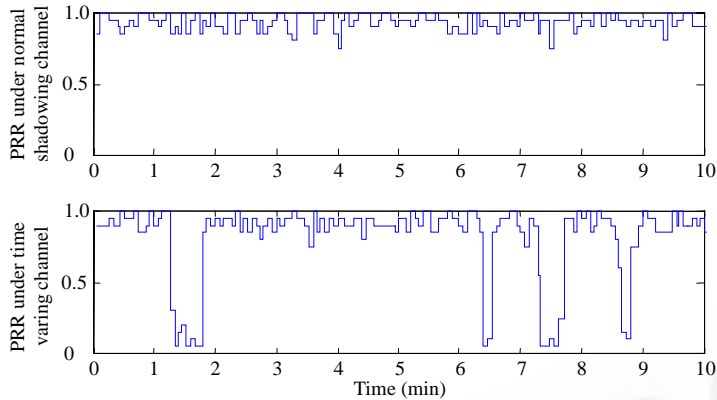


Fig.9 Simulation of short-time varying link model

图 9 短时时变链路模型下的链路 PRR 仿真

2.2 能量效率和抵达率统计方法

根据文献[16]中的定义,网络的能量效率表示为单位能量传送的比特数.因为涉及到功率调整以及收发功率差异等情况,在仿真中采用分别统计的方法.发送一个数据包消耗的能量记为 e_{ds} ,并以此为基数 1,将接收数据包能耗、接收数据包头能耗、发送和接收ACK帧能耗系数分别记为 $\beta_{dr},\beta_{ht},\beta_{as},\beta_{ar}$.另外,假设网络中发送数据包总数为 n_{ds} ,接收完整数据包总数为 n_{dr} ,接收包头总数为 n_{hr} ,发送ACK帧总数为 n_{as} ,接收ACK帧总数为 n_{ar} ,汇聚节点接收的有效数据包数为 n_{rev} ,则网络的能量效率为

$$Eff = \frac{n_{rev}}{e_{ds} \cdot (n_{ds} + \beta_{dr}n_{dr} + \beta_{hr}n_{hr} + \beta_{as}n_{as} + \beta_{ar}n_{ar})} \tag{3}$$

Eff 越高,表示网络的能量利用率越高.网络抵达率直接通过计算 sink 节点接收到的有效数据包数量与网络产生的源数据包数量之间的比值得到.

2.3 NS2仿真配置

为了验证 MCFS 协议的有效性,我们在 NS2 环境下进行了深入、完整的实验.实验中采用 Gains3 节点的参数配置仿真环境和实验条件:收发数据包及 ACK 帧的节点功率,以及数据包及包头长度见表 1.

根据各个过程的功率以及数据包长度,可以计算在能量效率统计中定义的单位数据包接收、包头接收、ACK 收发过程的能耗与单位数据包发送能耗的比例系数见表 2.

Table 1 Power of processes in test, length of packet and segments

表 1 实验中不同过程功耗及各种数据包长度和字段长

Power of each process	Value (mw)	Segment length in packets	Value (Bytes)
Sending (P_{ds})	15.6	header (l_h)	28
Receiving (P_{dr})	7.9	PDU (l_d)	120
ACK with high power (P_{as})	24.0	ACK unit (l_a)	24

Table 2 Calculating method and value of power efficiency in tests

表 2 实验中功耗系数的计算方法和取值

Power coefficients in different processes	Value
$\beta_{dr}=P_{dr}/P_{ds}$	0.51
$\beta_{as}=P_{as} \times l_a / P_{ds}(l_h+l_d)$	0.25
$\beta_{ar}=P_{dr} \times l_d / P_{ds}(l_h+l_d)$	0.08
$\beta_{hr}=P_{dr} \times l_h / P_{ds}(l_h+l_d)$	0.10

除了网络规模和密度实验以外,仿真实验的网络为 200 个节点随机部署在半径为 100 米的圆域内;无线传

输速率为 38.4kbps.除了针对不同数据产生速率的仿真实验以外,其他实验均在网络负载相对较轻的条件下完成(网络总体数据产生速率约为 2packet/s).这样配置主要是考虑事件报警型的 WSN 应用通常不需要很高的网络吞吐量.另外,针对每种配置重复 4 次实验,统计图中给出相关性能参数的均值以及最大、最小值.

2.4 对比协议简述

为了表现 MCFS 的协议性能,我们同时实现了另外 3 种协议:基于 HOP/PRR 的单链路优化协议(UP)、分离多路径(MP)协议和缠绕多路径(BMP)协议.第 1 种协议以优化网络能量效率为目标,后两者以提高数据传输的可靠性为目标.

UP 协议通过初始探测过程获得邻居节点的包接收率.当发送节点有数据发送时,计算所有邻居节点的跳数(hop)与 PRR 的比值,取比值最大的节点作为转发节点.在实现中我们使用梯度 $g(i)$ 替代跳数,即将 $g(i)/PRR$ 作为转发节点的选择指标.实验结果表明,这种指标比基于跳数的指标效率要好.

MP 协议希望通过在空间上不相交的多个汇聚路径上发送相同数据包的多份拷贝,以避免由于局部的坏链路导致数据抵达率的下降.BMP 协议的思想与 GRAB^[12]以及 ReInForM^[18]算法类似,所有接收到数据的候选转发节点均转发且只转发 1 次.本文实现了基于精细梯度的 BMP 协议,通过指定转发节点个数来控制数据转发的扩散范围.MP 在每条路径上使用 ARQ 机制,而 BMP 是通过多节点接收来提高传输的可靠性,不使用 ARQ 机制.

在协议性能对比图中,MCFS,UP,MP 和 BMP 分别使用 MCFS[-ap]-arq-\$r\$-fn-\$fn\$[-sr-\$sr\$],UP-arq-\$r\$[-sr-\$sr\$],MP[-fn-\$fn\$][-sr-\$sr\$]和 BMP[-fn-\$fn\$][-sr-\$sr\$]进行区分.其中,ap 标识是否在 ACK 时使用功率调节机制;arq 及 \$r\$ 标识 ARQ 重传次数门限;fn 及 \$fn\$ 标识多链路协议中候选转发节点的个数或多路径协议中路径的条数;sr 及 \$sr\$ 标识单节点的数据产生速率,仿真中,节点使用泊松分布概率为节点产生源数据,[]表示可以省略,缺省 sr 参数代表 0.01packet/s/node.

3 MCFS 协议性能仿真

3.1 链路短时时变对MCFS协议性能的影响

为了验证 MCFS 对短时时变特征信道的适应性,我们在表 3 所示的信道参数下对 MCFS 协议和单链路优化协议进行仿真测试.4 项实验配置保证在状态 0 和状态 1 的时间比为 10:1.实验 1 不使用短时时变调节算法,用于与其他实验对比.由图 10 给出的仿真结果可以看出:链路短时时变特性对 MCFS 协议的网络抵达率、能量效率影响不大,表现为与对比实验几乎没有差别,但对单链路优化协议有较大影响,表现为抵达率和能量效率都有一个向下的跳变.

Table 3 Parameters configuration of tests under different short-time varying link quality

表 3 短时时变链路实验参数配置

Index	1	2	3	4	5
λ	*	0.01	0.02	0.03	0.04
μ	*	0.1	0.2	0.3	0.4
Δ	0	2	2	2	2

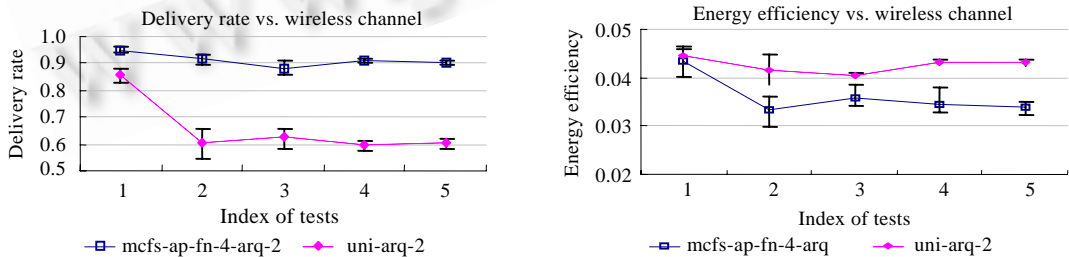


Fig.10 Performance of MCFS and mono-link protocol under different channel parameters

图 10 MCFS 协议与单链路协议在不同信道参数条件下的性能

3.2 候选转发节点数目对MCFS协议性能的影响

作为 MCFS 协议的重要参数之一,候选转发节点数目直接关系到传输的可靠性和网络能量效率.实验选择 1~10 个候选节点测试 MCFS 性能.当候选节点不够时选择尽量多的节点.

图 11 给出了实验结果,注意,单链路协议仅在候选转发节点数为 1 时有数据.从图中可以看出:(1) 当 $fn>2$ 时,MCFS在抵达率上始终优于相同ARQ重传门限的UP协议;当 $fn<4$ 时,其能量效率也优于相同ARQ重传门限下的UP协议.(2) BMP协议的抵达率始终低于MCFS协议,这主要是因为BMP没有ACK确认机制,每跳都不能保证有节点能够收到.由于没有引入MMSPEED^[19]中使用的RTS/CTS机制,故在缠绕转发的过程中隐藏终端引起冲突没有很好地解决,导致其抵达率在扩展缠绕范围时性能没有改善;另外,尽管BMP的抵达率不低,其能量效率相对于其他协议来说也差很多,且随缠绕范围扩大而越低.(3) 当路径数上升时,MP协议抵达率有很大提升,且超过了BMP协议,这是因为在分离多路径中路径之间的相关性较小,隐藏终端引起的冲突概率也较小,故在路径数较大时,抵达率会好于BMP,但总体上比MCFS协议要低一些.在能量效率方面,MP协议比MCFS和UP协议都要差,因为无论其他路径是否成功传送,冗余路径都要进行传送,在一定程度上增加了能量消耗.

另外,从实验结果可以看出,当候选节点门限为 3 和 4 时,MCFS 在抵达率和能量效率方面表现最好,故在后续实验中主要使用这两种参数.

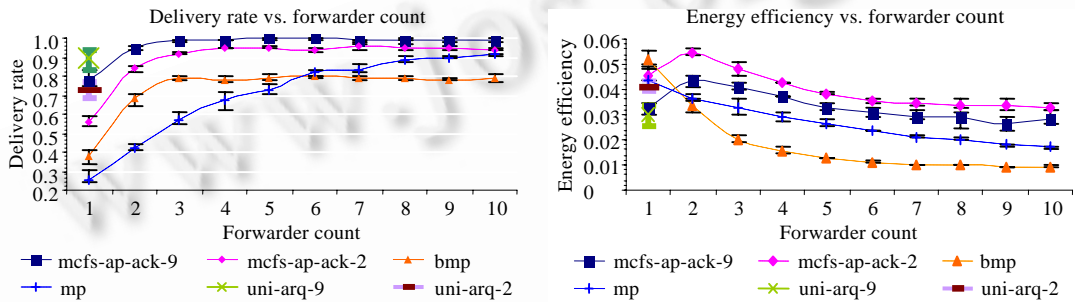


Fig.11 Performance of MCFS and other protocols under different count of candidate forwarders

图 11 MCFS 协议在不同候选节点数目下与其他协议的性能

3.3 ACK重传门限对MCFS协议性能的影响

重传门限直接影响协议的抵达率和能量效率,尽管作为多链路策略,在中等质量以下链路中,MCFS 的一次传输成功率得到较大提高.图 12 给出了重传门限分别取 0~9 时,MCFS 协议与 UP 协议的性能比较.从图中可以看出:(1) MCFS 协议的网络数据抵达率始终优于 UP 协议.事实上,由于 MCFS 的单跳抵达率高于单链路,基本不会达到转发门限.(2) 能量效率以候选节点数目为 3 的 MCFS 为最好,这是因为随着候选节点数目的增加,冗余接收耗费更多能量.

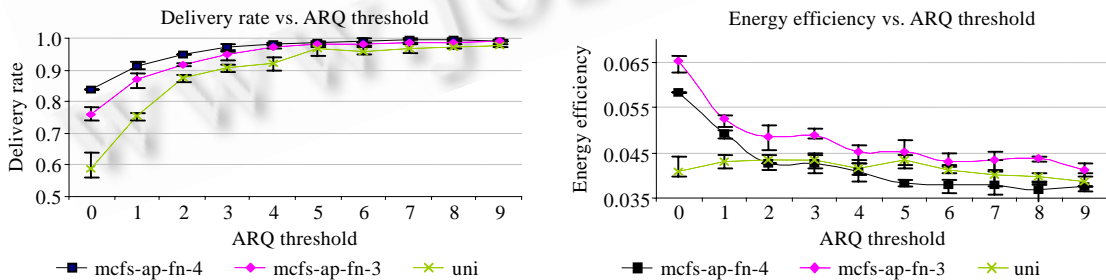


Fig.12 Performance of MCFS and other comparison protocols under different ARQ thresholds

图 12 MCFS 协议与其他对比协议在不同 ARQ 重传门限下的性能

3.4 功率调节策略的效果

为了验证功率调节的有效性,分别在使用和不使用 ACK 功率调节功能两种情况下测试 MCFS 协议性能.从图 13 给出的仿真结果可以看出,加载功率调节机制不仅可以提高数据抵达率,而且使数据转发的能量效率提高近 1 倍(在 ARQ 门限大于 3 时).图 14 绘制了两种实验中发送、接收数据包,接收数据报头,发送、接收 ACK 帧这 5 个过程的能耗情况.从图中可以清晰地看出,对 ACK 实施功率调节几乎同比例减少了各个过程的能耗.

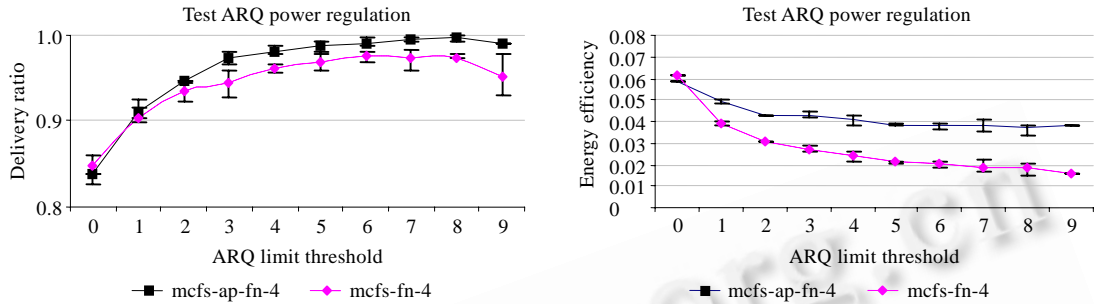


Fig.13 Performance of MCFS under power regulation and no power regulation

图 13 在使用和不使用 ACK 功率调节机制下 MCFS 的性能

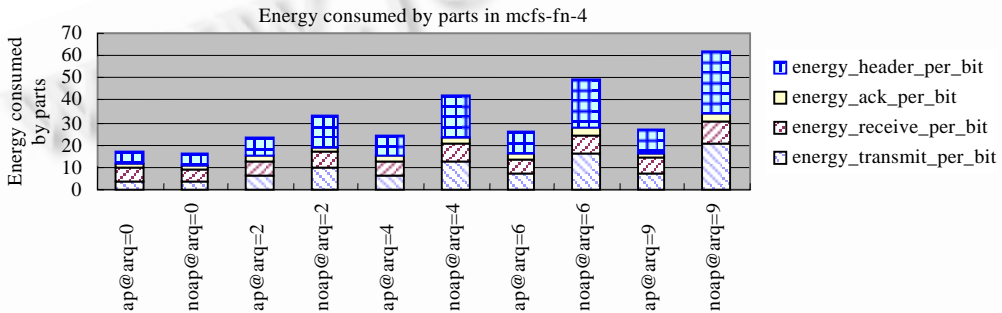


Fig.14 Energy consumption in each process of MCFS protocol with and without ACK power regulation

图 14 使用与不使用 ACK 功率调节机制条件下 MCFS 各协议过程的能量消耗

3.5 网络密度对MCFS协议性能的影响

通过在半径为 100 米的圆形区域中分别部署 100、200、300、400 和 500 个节点,即通信半径内的节点密度从 9 到 45,来测试 MCFS 在不同网络部署密度下的协议性能.在每个实验中,通过调节单节点的数据产生速率,以保证在 Sink 节点有相近的负载量(2 包/秒).以此排除高密度网络中由于高负载而使实验缺乏可比性.从图 15 所示的仿真结果可以看出:(1) 在不同密度下,各协议抵达率差别不大,且 MCFS 的抵达率明显优于其他协议;(2) 所有协议的能量效率都随密度的增加而下降,这是因为随着密度的增加,包头监听的能耗大为增加;同时,MCFS 的能量效率也优于其他各协议.

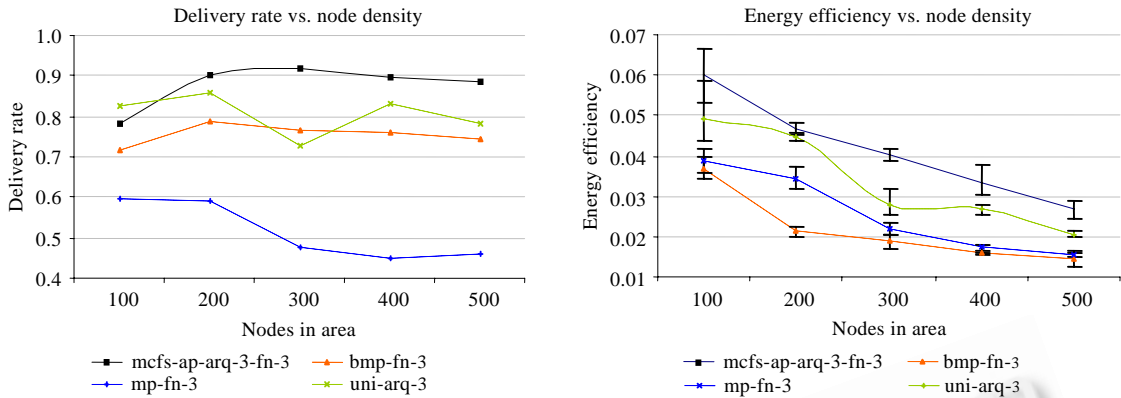


Fig.15 Performance of MCFS and other comparison protocols under different nodes density of network, where workload of network in each density is 2 packet/s

图 15 MCFS 及对比协议在不同节点密度下的协议性能,每种密度下网络数据总发生速率为 2 包/秒

3.6 网络规模对MCFS协议性能的影响

在相同部署密度(平均通信域中 18 个节点)条件下,实验当部署区域半径在 100 和 300 之间变化时 MCFS 的性能,从图 16 给出的仿真结果可以看出:(1) 除 BMP 外,其他协议的数据抵达率在 network 超过一定规模后呈下降趋势.随着网络规模的增大,平均数据转发次数增多,从而使端到端的数据抵达率下降.BMP 协议的数据抵达率随网络规模变化不大,最好情况接近 MCFS 协议,但 BMP 的能量效率比 MCFS 差很多.(2) 所有协议的能量效率都会随着网络规模的增大而减小,原因在于随着平均转发次数的增加,单位数据传送到汇聚节点需要更多的能量;另一方面,抵达率的降低也使更多的能量被浪费.

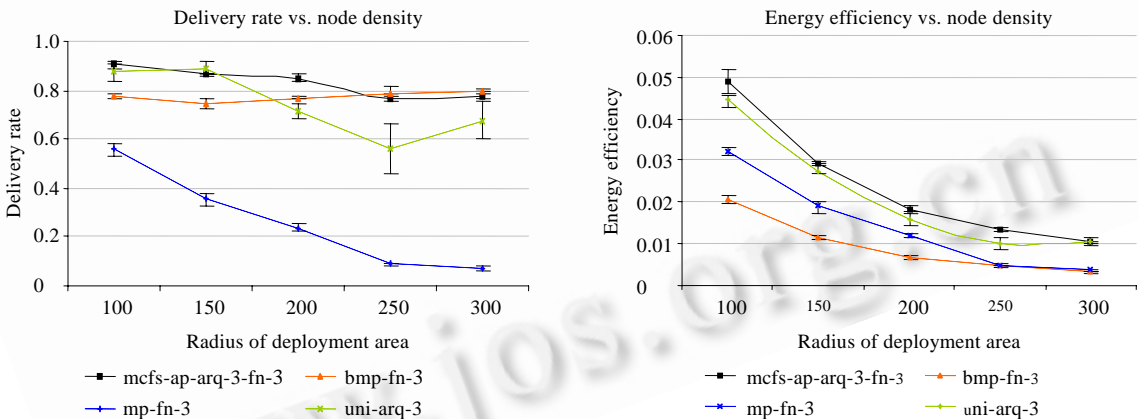


Fig.16 Performance of MCFS and other comparison protocols under different network scale, where workload of network in each test is 2 packet/s

图 16 MCFS 及对比协议在不同网络规模下的协议性能,每个实验中网络数据总发生速率为 2 包/秒

3.7 网络数据发生速率对MCFS协议性能的影响

前面的实验都是在网络负载较轻的情况下进行的,为了能够更好地了解 MCFS 协议特性,下面设计不同负载条件的仿真实验.首先,将节点数据产生速率设置为 0.01 包/秒、0.02 包/秒、0.03 包/秒、0.05 包/秒、0.07 包/秒和 0.1 包/秒,从图 17 给出了的仿真结果可以看出:(1) 当负载较轻时,MCFS 协议(ARQ 门限为 2)的抵达率

和能量效率都较高,但随着负载的上升,MCFS 性能下降速度较快,而 UP 协议(相同 ARQ 门限)表现出更好的抵达率.这种结果最主要的原因是 MCFS 中存在的冗余传输加重了网络负载.尽管 MCFS 协议中通过功率调节抑制了冗余传输,但高功率同时也造成了更多的冲突和重传.冲突和冗余重传的正反馈效应极大地影响了 MCFS 协议在大负载情况下的性能.(2) 在能量效率方面,MCFS 有类似的变化规律.

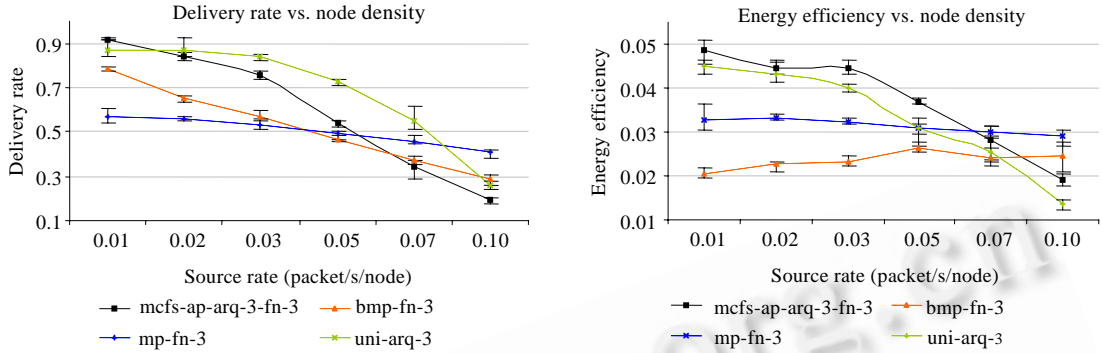


Fig.17 Performance of MCFS and other comparison protocols under different source data rate

图 17 MCFS 及对比协议在不同源数据速率条件下的协议性能

如上所述,冗余重传是造成 MCFS 随负载上升性能下降的根本原因.而在 MCFS 中,除了协议机制能够控制冗余重传外,还有两个参数对冗余重传有影响:ARQ 门限和候选转发节点数目.当发送节点发送次数超过 ARQ 门限时将自动停止转发,从而降低发送者冗余重传概率;当候选转发节点较少时,接收者冗余重传的概率也相对较小.为此,我们针对这两个参数进行另外一组仿真实验:针对 ARQ 门限为 0 和 2,候选转发节点为 2、3 和 4,测试 MCFS 性能,并与单链路优化协议进行对比.图 18 分别给出抵达率和能量效率变化趋势,从图中可以看出,在网络负载较大时,较小的 ARQ 门限和候选转发节点数目可以提高网络的数据抵达率和能量效率.总之,通过选择 MCFS 的协议参数,可以提高 MCFS 在高负载情况下的表现.

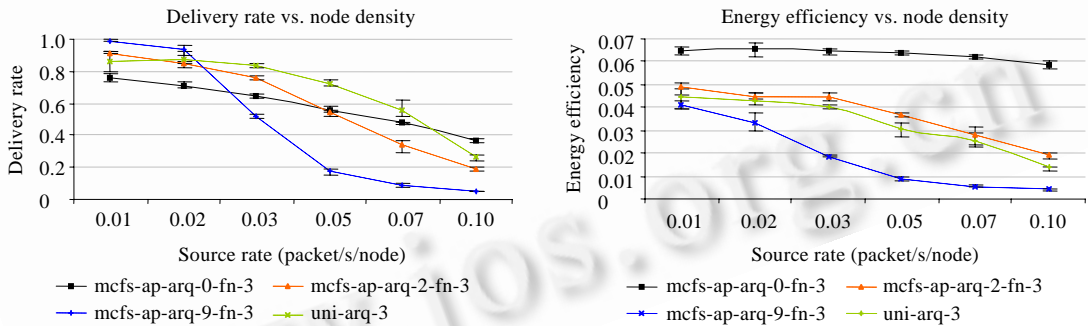


Fig.18 Performance of MCFS under different ARQ threshold, candidate forwarders and source data rate

图 18 在不同 ARQ 门限和候选节点数目以及源数据速率条件下 MCFS 协议的协议性能

4 结论及未来的工作

精细梯度下的多链路转发协议 MCFS 是以精细化梯度模型和多链路模型为基础的传感器网络数据传输协议.通过仿真分析,我们发现该协议不仅能够适应短时时变链路的数据传输,而且在轻负载条件下比现有的单链路优化协议、多路径协议具有更好的数据抵达率和能量效率;另外,MCFS 在轻负载下的性能优势与网络部署的密度和网络规模无关.

在针对网络负载的仿真实验中,我们发现多链路协议在负载较大时表现不如单链路优化协议.造成重负载

下性能降低的首要原因是最后两跳内的所谓漏斗效应^[20].漏斗效应主要源于普遍存在于CSMA协议中的隐藏终端问题.如何为多链路协议设计克服隐藏终端的机制,降低冲突和冗余重传,是未来的研究内容之一.另外,尽管传感器网络的平均数据产生速率不高,突发事件也可能造成局部区域内的浪涌效应.为多链路协议设计拥塞检测和拥塞避免机制也是下一步的研究内容.最后,在MCFS协议基础上,转发节点将梯度与自身剩余能量、前向转发链路状态等信息结合,以确定自身的转发意愿(计算时槽),进而改善能量的局部效率和均衡消耗性能也是未来要开展的工作.

References:

- [1] ShenLian Science and Technology Corp. 2006 (in Chinese). <http://www.wsn.org.cn>
- [2] Zhu HS, Sun LM, Xu YJ, Li XW. Mechanism and analysis on fine-grain gradient sinking model in wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2007,18(5):1138–1151 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1138.htm>
- [3] Ganesan D, Krishnamachari B, Woo A, Culler D, Estrin D, Wicker S. Complex behavior at scale: An experimental study of low-power wireless sensor networks. Technical Report, 02-0013, Los Angeles: Department of Computer Science, University of California, Los Angeles, 2002.
- [4] Zhao J, Govindan R. Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks. In: Akyildiz I, Estain D, eds. *Proc. of the 1st Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems*. Los Angeles: ACM, 2003. 1–13.
- [5] Zuniga M, Krishnamachari B. Analyzing the transitional region in low power wireless links. In: Clara S, ed. *Proc. of 2004 1st Annual IEEE Communications Society Conf. on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, IEEE SECON 2004*. IEEE, 2004. 517–526.
- [6] Zhou G, He, T, Krishnamurthy S, Stankovic JA. Models and solutions for radio irregularity in wireless sensor networks. *ACM Trans. on Sensor Networks*, 2006,2(2):221–262.
- [7] Srinivasan K, Dutta P, Tavakoli A, Levis P. Understanding the causes of packet delivery success and failure in dense wireless sensor networks. In: Campbell A, ed. *Proc. of the 4th Int'l Conf. on Embedded networked sensor systems*. Boulder: ACM, 2006. 419–420.
- [8] Son DJ, Krishnamachari B, Heidemann J. Experimental study of concurrent transmission in wireless sensor networks. In: Campbell A, ed. *Proc. of the 4th Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems*. Boulder: ACM, 2006. 237–250.
- [9] Woo A, Tong T, Culler D. Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks. In: Campbell A, ed. *Proc. of the 1st Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems*. Los Angeles: ACM, 2003. 14–27.
- [10] Xu YQ, Lee WC. Exploring spatial correlation for link quality estimation in wireless sensor networks. In: Gregori E, Hurson A, eds. *Proc. of the 4th Annual IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2006. 200–211.
- [11] Wang Y, Martonosi M, Peh LS. Predicting link quality using supervised learning in wireless sensor networks. *ACM SIGMOBILE—Mobile Computing and Communications Review*, 2007,11(3):71–83.
- [12] Ye F, Zhong G, Lu SW, Zhang LX. GRAdient broadcast: A robust data delivery protocol for large scale sensor networks. *Wireless Networks*, 2005,11(3):285–298.
- [13] Seada K, Zuniga M, Helmy A, Krishnamachari B. Energy-Efficient forwarding strategies for geographic routing in lossy wireless sensor networks. In: Campbell A, ed. *Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems*. Baltimore: ACM, 2004. 108–121.
- [14] Busse M, Haenselmann T, Effelsberg W. Energy-Efficient forwarding schemes for wireless sensor networks. In: *Proc. of the 2006 Int'l Symp. on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*. Buffalo-Niagara Falls: IEEE Computer Society, 2006. 125–133.
- [15] Sun LM, Zhu HS, Duan B, Li XW, Sun Y. Analysis of forwarding mechanisms on fine-grain gradient sinking model in WSN. *Journal of Signal Processing Systems*, 2008,51(2):145–159.
- [16] Zhu HS, Xu YJ, Li XW, Sun LM. Model analysis for ARQ based multi-link forwarding strategy in WSN. *Journal of Computer Research and Development*, 2009,46(7):1074–1085 (in Chinese with English abstract).

- [17] Roberts LG. ALOHA packet system with and without slots and capture. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1975,5(2):28–42.
- [18] Deb B, Bhatnagar S, Nath B. ReInForM: Reliable information forwarding using multiple paths in sensor networks. In: Titsworth F, ed. Proc. of the 28th Annual IEEE Int'l Conf. on Local Computer Networks, LCN 2003. Quincy: IEEE, 2003. 406–415.
- [19] Felemban E, Lee CC, Ekici E. MMSPEED: Multipath multi-SPEED protocol for QoS guarantee of reliability and timeliness in wireless sensor networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2006,5(6):738–754.
- [20] Ahn GS, Miluzzo E, Campbell AT, Hong SG, Cuomo F. Funneling-MAC: A localized, sink-oriented MAC for boosting fidelity in sensor networks. In: Campbell A, ed. Proc. of the 4th Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. Boulder: ACM, 2006. 293–306.

附中文参考文献:

- [1] 宁波高新区深联科技有限公司.2006. <http://www.wsn.org.cn>
- [2] 朱红松,孙利民,徐勇军,李晓维.基于精细化梯度的无线传感网汇聚机制及分析,软件学报,2007,18(5):1138–1151. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1138.htm>
- [16] 朱红松,徐勇军,李晓维,孙利民.传感器网络中基于 ARQ 的多链路转发模型分析.计算机研究与发展,2009,46(7):1074–1085.



朱红松(1973—),男,黑龙江黑河人,博士,高级工程师,CCF 学生会员,主要研究领域为分布式系统与网络,无线传感器网络.



李晓维(1964—),男,博士,研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为 IC 测试,VLSI/SoC 测试与验证,嵌入式系统.



赵磊(1978—),男,博士,主要研究领域为无线传感器网络,可靠通信协议.



孙利民(1966—),男,博士,研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域无线通信与自组织网络,无线传感器网络.



徐勇军(1979—),男,博士,副研究员,CCF 高级会员,主要研究领域为低功耗设计,VLSI/SoC 测试与验证,无线传感器网络.