

DOI: 10.7652/xjtuxb201306011

一种面向分簇无线传感器网络的多信道跨层协议

汪志伟, 曹建福, 郑辑光

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对工业测控对传感器网络抗干扰性及通信实时性的要求,提出了一种面向分簇无线传感器网络的多信道跨层协议。该协议在簇内采用多信道配合时分复用机制,并通过高容忍度信道切换算法实时评估信道质量和自适应切换信道,以减小相邻簇和相邻频段协议的干扰,在簇间引入链路 Q 值评价路径状况,采用基于概率转发的多路径机制平衡网内数据流量,并控制和缓解拥塞,以减小数据流量大或变化快时因拥塞造成的丢包。该协议将簇内多信道和簇间多路径 2 种机制相结合以提升网络性能。仿真结果表明,相比传统的分簇协议,该协议能有效抵抗干扰并控制和缓解簇间拥塞,且可缩短约 22% 的簇间延时。

关键词: 无线传感器网络;分簇式网络;多信道;跨层;可靠性

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)06-0061-07

Multi-Channel Multi-Path Cross-Layer Protocol for Clustered Wireless Sensor Networks

WANG Zhiwei, CAO Jianfu, ZHENG Jiguang

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A multi-channel multi-path cross-layer (MCMP-CL) protocol is proposed to meet the data reliability and real-time demands for industrial monitoring sensor networks. The MCMP-CL protocol achieves distributed network management by clustering. The self-designed high tolerance channel switching (HTCS) algorithm is used to evaluate the channel quality and to adaptively switch channels in real-time, and multi-channel with TDMA mechanism is implemented in intra-cluster communication to reduce packet loss that is caused by the adjacent clusters and adjacent frequency protocols' interference. A link Q value is introduced to evaluate route condition, and the multi-path mechanism based on the probability forwarding method is adopted in inter-cluster communication to balance the network streaming so that the packet loss that is caused by the congestion in a large or quickly changed data streaming is reduced. The protocol improves the network performance by combining the multi-channel mechanism in intra-cluster and the multi-path mechanism in inter-cluster. Simulation results and comparison with traditional clustered protocols show that the MCMP-CL can effectively resist interference, control and ease congestion, and reduce time delay in inter-cluster by about 22%.

Keywords: wireless sensor networks; clustered networks; multi-channel; cross-layer; reliability

基于层次路由结构的分簇式无线传感器网络 (WSN)因能效高、便于本地管理和数据融合等优

收稿日期: 2012-10-17。 作者简介: 汪志伟(1989—),男,硕士生;曹建福(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 陕西省科技攻关计划资助项目(2010K08-13)。

网络出版时间: 2013-03-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130318.1139.004.html>

点,而在工业测控领域受到了广泛关注^[1]。然而,在通信可靠性和实时性方面,现有的传感器网络仍存在一些需要解决的问题:①WSN 通常采用未授权的 ISM 频段通信,在工业测控环境下该频段内各种协议如 IEEE802. 15. 4、IEEE802. 15. 1(蓝牙)、IEEE802. 11 b/g(Wi-Fi)和 WirelessUSB 等之间存在相互干扰^[2],而且对于常见的分簇协议,各簇在簇内采用固定且相同的信道通信,极易造成邻簇之间的互相干扰;②WSN 分簇后簇内和簇间通信时隙分配严格,且相对于平面路由结构簇间转发簇首减少,以至于对实时流量调度要求较高;③WSN 在通信距离较远时,工业测控环境下的低发射功率传感器节点易受到阻挡和干扰等影响造成链路不稳定,导致数据流量较大或变化较快时容易发生拥塞,进而增加了额外的丢包。因此,若要提高工业测控网络的可靠性及实时性,需同时考虑簇内的抗干扰性和簇间的拥塞控制。

Heinzelman 等人率先在 LEACH 协议中提出了分簇的思想^[3],通过分层路由平衡路径负载,但其簇间直接一跳将数据发给基站,不仅要求节点需具备较大的发射功率,而且限制了传感器网络的监测范围。基于非均匀分簇的 UCR 路由协议^[4]采用簇间多跳增大网络监测范围,且通过非均匀分簇缓解热区效应,但是其在簇间路由仅简单地采用能量最小机制,而忽略了网络流量较大或变化较快时,有限的节点缓存能力及簇间通信时间均会导致丢包率上升。文献^[5]通过多路径机制^[6]平衡网内流量,实现对簇间拥塞的控制和缓解,从而提高了通信实时性。在抗干扰性方面,多信道媒体访问控制(MAC)MMSN 协议^[7]和树状多信道 TMCP 协议^[8]均采用簇内多信道^[9]方式提升可靠性,但是 TMCP 协议采用固定信道模式,导致抵抗突发干扰的能力有限,而 MMSN 盲目的切换信道,使得在之前信道上的数据包丢失严重。文献^[10]根据实际信道质量和干扰强度进行动态信道切换,有效提高了工业环境下的吞吐量和抗干扰性能。以上协议均针对传统分层架构的改进方法,若能采用跨层结构设计则会有更好的网络性能^[11]。文献^[12-14]通过跨层思想设计协议,分别在系统的抗干扰能力、通信效率、能耗或者端到端时延等方面得到了提升,但是它们均针对平面型路由结构,没有考虑到分簇式网络的特点,并不能直接应用于工业测控领域中。

针对工业测控环境对传感器网络可靠性和实时性的要求,本文设计了一种面向分簇结构的多信道

跨层(multi-channel multi-path cross-layer, MCMP-CL)协议。该协议为相邻的簇分配不同的簇内信道,通过高容忍度的信道切换算法实时评估信道质量,当质量差到不可容忍时及时切换信道,从而降低邻频协议的干扰。簇间通过多跳将数据发送至基站,引入链路 Q 值评价路径状况,并采用基于概率转发的多路径机制平衡网内流量,以实现在流量较大或变化较快时对拥塞的控制和缓解。

1 分簇传感器网络的跨层协议结构

在传统分层协议中,网络层完成拓扑控制、路由选择及维护,数据链路层通过 MAC 控制访问介质和通信信道,通过逻辑链路(LL)子层控制数据流量,而物理层管理节点能量并完成信号的调制与收发。传统分层协议的物理层到网络层架构如图 1a 所示,这种相互独立的层间关系可能导致同一数据在不同层重复计算和交互获取,从而无谓的耗费时间和资源,另外严格的分层导致各层性能难以同时适应动态变化的网络结构。为同时满足 WSN 对抗干扰性和拥塞控制的需求,本文综合考虑物理层到网络层的信息,设计了一种新的跨层 MCMP-CL 协议。该协议通过簇内多信道和簇间多路径 2 种机制协调工作,其层间架构如图 1b 所示,MAC 层通过簇首的 ID 号为各簇分配初始信道,并利用簇内通信中丢包的数量评估信道质量,采用 TDMA 配合多信道机制提高传递效率并减小邻簇干扰;网络层的簇内通过一跳将数据发送给簇首,簇间采用 CSMA/

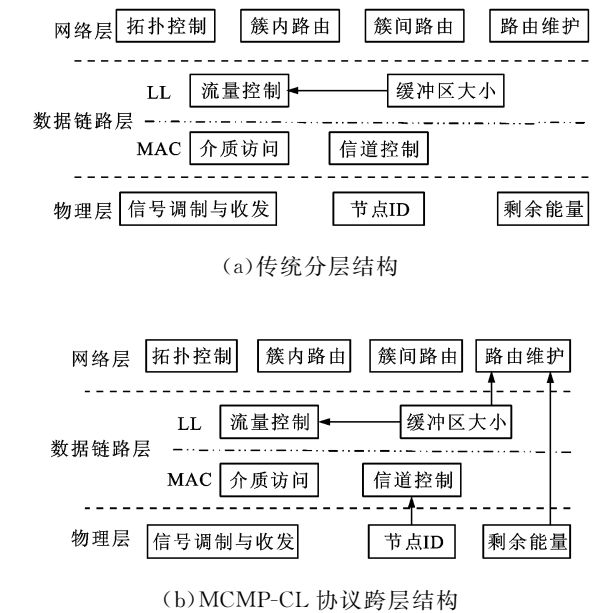


图 1 分簇无线传感器网络物理层到网络层协议结构

CA 共享信道和多跳传输,并利用物理层的节点剩余能量和 LL 层的缓冲区大小维护簇间路由,通过基于概率转发的多路径机制控制和缓解链路拥塞。

MCMP-CL 协议以轮为单位通信,每轮分为网络结构建立和通信 2 个阶段,如图 2 所示,与能量均衡的 LEACH 协议相同,在一定时间的通信后,重新分簇以平衡簇首的负载^[3]。网络建立阶段完成分簇、簇首分层和分布式初始信道分配;通信阶段由簇内通信和簇间通信组成。在时间同步方面,由 2 级同步信标同步节点时钟,基站通过 BS 信标同步各簇首时钟,簇首通过 CH 信标同步簇内节点时钟。

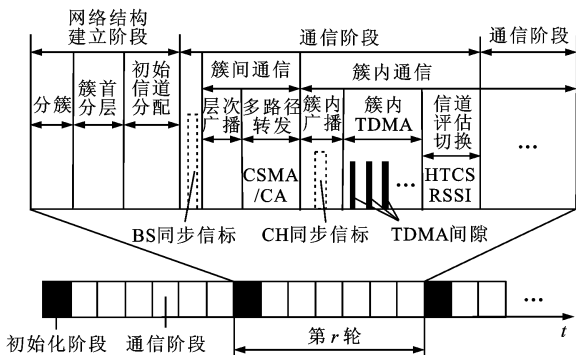


图2 MCMP-CL 通信流程

2 多信道多路径跨层协议

2.1 网络结构建立

2.1.1 分簇和层次结构建立 在簇间多跳方式下,簇首数据转发时需获知其可用下跳簇首信息,且基站集中式信道分配方式需要大量的额外信息收集开销,因此本文采用分布式信道竞争方式分配信道并收集跳簇首信息,以提高网络建立效率并降低控制报文开销。本文采用 UCR 协议的方法对网络进行非均匀分簇,分簇完成后为各个簇划分层次以生成簇间初始路由。网络的层次划分同样采用分布式方式,先由基站全网广播 LAYER_MSG 消息发起,各簇首根据接收到该消息的信号强度估算自身到基站的距离 s_i ,然后计算自身所处层次

$$\omega_i = \lceil \frac{s_i - s_0}{M/k} + 1 \rceil \quad (1)$$

式中: s_0 为基站到监测区域的距离; M 为监测区域长度; k 为期望的层数,基站所处层次为 0。MCMP-CL 的层次结构如图 3 所示。为提高转发效率并防止路由环路,规定各簇首数据仅能转发至离基站更近的更低层次簇首。

分簇和簇首分层完毕后,需要明确各相邻簇的

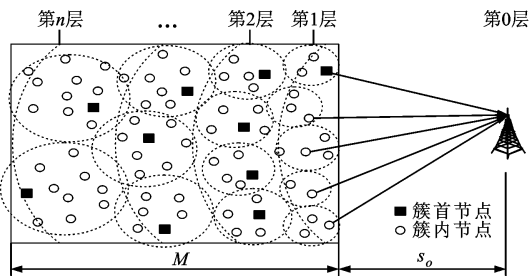


图3 MCMP-CL 层次路由结构

信息,才能分配初始信道。MCMP-CL 协议为每个簇首构建一个邻簇信息列表 B_i ,并采用广度优先搜索算法完善该列表,通过由低到高层次依次广播 NBR_MSG 消息,该消息包含发送簇首的 ID、剩余能量和所处层数,各簇首在接收该消息时保持以下规则:①簇首只转发来自低层簇首的 NBR_MSG 消息,并将其记录为自己的邻居簇首;②若收到来自高层簇首的消息,将其记录为邻居簇首但不转发。

2.1.2 初始信道分配 由于在某些发送功率下,相邻信道的干扰可导致多达 50% 的丢包^[8],在初始信道分配过程中应充分考虑信道的分散性。此外,为使协议更具实用性,初始信道分配应基于有限的信道个数,由于分簇后簇的个数远小于原网络的节点数,因此需通过选择合适的通信半径控制邻簇个数,才能在有限的信道个数下充分保证协议的使用。若将簇首的可用信道定义为除去簇间通信和已经被邻簇选定的信道,MCMP-CL 协议从可用信道中随机选取一个参加竞争,以此增大邻簇信道的分散性,并借鉴文献[10]的方法,通过直接比较一跳邻簇的簇首 ID 决定竞争结果,以简化初始信道的分配过程。信道分配标准如下式所示

$$D_i = \text{random}(\mathbf{v}_i); I_i = \min\{I_j\}, j \in B_i \quad (2)$$

式中: D_i 为簇首 i 分配到的信道序号; $\mathbf{v}_i$ 为簇首 i 的可用信道序列; $\text{random}(\mathbf{v}_i)$ 为从可用信道序列中随机选取的待分配的信道序号; I_i 为簇首 i 的 ID 号,若其为邻簇中最小,则它将信道 $\text{random}(\mathbf{v}_i)$ 作为其簇内初始信道。MCMP-CL 协议由簇首 ID 从小到大的顺序依次各簇分配初始信道,其分配过程如下。

(1)参数初始化。各簇首的初始可用信道为除去簇间通信使用的特定信道后剩下的信道。

(2)判断自身 ID 号是否为邻簇未被分配信道中的最小。若是,执行步骤 3;否则,执行步骤 4。

(3)信道分配。从可用信道中随机选取一个信道作为本簇的簇内信道,然后广播通知其一跳相邻

簇首,并跳转到步骤5。

(4)接收一跳邻簇首的广播,刷新自己的邻簇信息列表 B_i ,并返回步骤2,等待ID号比自己小的邻簇首的信道分配完毕。

(5)退出分配。侦听其余一跳相邻簇首的广播,并刷新自身的邻簇信息列表 B_i 。

2.2 簇内通信

簇内各节点通过一跳将数据发送至簇首,簇内通信分为簇内广播、簇内TDMA和信道评估与切换3个阶段。簇内通信之初,簇首在当前信道广播CH同步信标,以同步簇内时间,为各节点分配TDMA时隙并通知本轮通信所使用的信道。簇内TDMA阶段各节点根据时隙在本轮使用的信道上将数据发送给簇首。

MCMP-CL协议检测到信道质量差到不可容忍时便切换信道,由于信道的切换需要一定延时,因此将影响簇内节点在已经分配的TDMA时隙里的数据传输。本文通过在下一轮通信的广播阶段进行信道切换命令,另外切换的新信道由各簇首以局部方式获取。为避免通信一段时间后出现邻簇采用相同信道而造成的相互干扰,簇首在簇间通信之初相互交换下轮预采用的信道信息,当有多个簇首预切换至同一个信道时,具有最大ID号的簇首获得该信道,其余簇首重新在备用信道列表中选择信道。考虑到频繁切换信道会带来大量的额外开销,且实际的网络中存在瞬时尖峰干扰(如电磁设备启动)造成丢包率的短时上升随即恢复的情况,为避免不必要的信道切换,本文使用了一种高容忍度的信道切换(high tolerance channel switching, HTCS)算法,HTCS算法针对分簇结构特点,充分利用簇首的本地管理能力,由簇首实时统计通信过程中的丢包数量以评估当前信道质量。该算法包括:2个阈值,即表征瞬时尖峰干扰的阈值 N_{pkt} 和给定的对干扰的容忍限度阈值 N_{th} ,在时隙分配较小的情况可考虑增大 N_{pkt} 阈值,而 N_{th} 值越小表示信道越容易被切换;1个计数器 N_{bad} ,它用于记录信道质量差的次数。HTCS算法的具体思想为:连续判断上一次丢包后的 N_{pkt} 个数据包内是否仍有丢包现象,若无则表示瞬时干扰作用于网络,清零信道质量差计数器 N_{bad} ;否则,为非瞬时干扰,信道质量差计数器加1;当 N_{bad} 超过预设的容忍阈值 N_{th} 时,认为当前信道质量差到不可容忍,需要选择新的簇内信道并切换。为避免切换目的信道的盲目性,新信道的选取遵循如下原则:①可用信道为除簇间通信信道、当前被遗弃

的信道和一跳邻簇信道后剩下的信道;②若可用信道不为空集,则从中取任一信道作为本簇的新信道;③若可用信道为空集,则暂时使用预留的簇间通信信道。HTCS算法的具体工作流程如下。

(1)参数初始化。将变量 N_{bad} 、表征当前处理数据包编号的变量 P_{ktID} 和最近被丢弃数据包编号的变量 L_{astPktID} 均置0。

(2)置 $P_{\text{ktID}} = P_{\text{ktID}} + 1$,并判断是否接收到编号为 P_{ktID} 的包,若收到执行步骤4,否则执行步骤3。

(3)置 $N_{\text{bad}} = N_{\text{bad}} + 1$ 表示信道质量差,置 $L_{\text{astPktID}} = P_{\text{ktID}}$ 以刷新最近被丢弃数据包编号。

(4)判断 P_{ktID} 与 L_{astPktID} 的差值是否大于所设定值,若大于则表示瞬时干扰,置干扰次数 $N_{\text{bad}} = 0$;否则,表示非瞬时干扰。

(5)判断干扰次数 N_{bad} 是否到达阈值 N_{th} ,若是即表明信道质量在容忍限度内,不需要切换;否则,表明信道质量超过容忍限度,需从可用信道中选择新信道。

(6)判断通信是否结束,未结束跳转到步骤2,继续下一组通信;否则,结束算法。

2.3 簇间通信

考虑到逐层转发会引起网络漏斗效应,并且工业现场的强噪声或多径效应可能导致式(1)中距离 s_i 值估算不准确而影响分层结果。为减轻这些因素对簇间多跳路由的影响,MCMP-CL协议规定簇首将其所处层次以下 m ($0 < m < k$) 层内的簇首加入自己的可用路径列表 R_i 中,如下式所示

$$R_i = \{j \mid \omega_j < \omega_i < \omega_j + m, E_j > 0\} \quad (3)$$

式中: E_j 表示节点 j 的剩余能量。当上下层簇首完成一次数据交换后,下层簇首在ACK确认包中附上自己的剩余能量和缓冲区大小,以便上层簇首及时刷新路径信息。

WSN由于在分簇后时隙分配严格,且簇间转发的簇首节点相对较少,特别是在工业测控应用中,网内流量会比较大或变化快,此时簇间多跳容易因流量调度效率低而发生拥塞。当拥塞发生时,需要快速调整路径中的流量,以避免节点缓存溢出带来的数据丢失。另外,若某些低能量簇首过早死亡,则不仅降低了网络的生存时间,其原有数据转发任务也会交由其他簇首来承担,势必会加剧网络的拥塞程度,因此网络需要平衡各条簇间路径的负载和节点能量。MCMP-CL协议综合考虑下跳节点的剩余能量和链路拥塞程度,引入了能量与拥塞相关的 Q 值来表征链路状况,根据链路 Q 值进行多路径概率

转发,实现对簇间网络的拥塞控制和缓解。簇首 i 将 j 作为其下一跳路由的概率 $p_{i \rightarrow j}$,计算公式如下

$$p_{i \rightarrow j} = \begin{cases} \frac{Q_{i \rightarrow j}(t)}{\sum_{x \in R_i} Q_{i \rightarrow x}(t)}, & j \in R_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $Q_{i \rightarrow j}(t)$ 表示 t 时刻链路 $i \rightarrow j$ 的 Q 值。为快速准确地反映路径的具体情况,要求拥塞加剧时 Q 值能迅速减小,以提高其余路径的转发概率,而拥塞缓解时 Q 值能够回升,使路径恢复使用。另外,需降低剩余能量相对较低簇首的转发负载,防止其过早死亡而导致的链路质量下降。因此,本文通过式(5)计算簇首 i 到 j 所形成链路 $i \rightarrow j$ 的 Q 值

$$Q_{i \rightarrow j}(t) = \frac{E_j/E_{\text{init}}}{\sigma L_j/L_{\text{max}}}, j \in R_i, j \neq \text{BS}, \sigma > 0 \quad (5)$$

式中: L_j 表示节点 j 在 LL 子层的缓冲队列长度,它表征了链路的拥塞程度; E_{init} 和 L_{max} 分别表示普通节点的初始能量和缓冲区最大长度; σ 为调节节点的缓冲区长度链路 Q 值中的权重参数, $\sigma > 1$ 时表示缓冲区填充程度对链路 Q 值贡献较大,反之则表示节点剩余能量的贡献占主导地位。应用中可在保证最大限度缓解链路拥塞的基础上最小化能耗,即从 $\sigma=1$ 开始调节,若链路较拥塞则增大其值进行缓解,否则适当减小其值降低能耗。

由于基站的能量无穷大,因此对于基站而言 E_j/E_{init} 趋于常量 1。此外,因基站不进行数据转发,则基站的缓冲队列长度 L_{BS} 的变化范围较小。由式(5)可知,此时计算的链路 Q 值会固定在一常量上下波动,而不能真实地反映链路的流量大小和拥塞程度。为改善式(5)的链路 Q 值死区问题,保证到基站的链路 Q 值随其可用下一跳簇首的剩余能量而动态变化,并减小较低剩余能量簇首的转发负载,防止其过早死亡,MCMP-CL 协议用转发节点 i 的可用路径列表 R_i 中除基站外其余簇首剩余能量平均值 $\bar{E}_j$ 代替基站的剩余能量计算 $Q_{i \rightarrow \text{BS}}$,如下式所示

$$Q_{i \rightarrow \text{BS}}(t) = \frac{\bar{E}_j/E_{\text{init}}}{\sigma L_{\text{BS}}/L_{\text{max}}}, j \in R_i, j \neq \text{BS} \quad (6)$$

在路由转发策略上,MCMP-CL 协议规定第一层簇首直接将数据发送给基站,其余簇首由式(4)~式(6)计算可用路径列表中各路径的转发概率,通过概率转发确定下一跳路由,以平衡各路径流量,控制和缓解拥塞进而减少丢包。簇间路由按如下步骤实现。

(1)簇首 i 收集其前 m 层内的簇首信息,刷新可

用路径列表 R_i ,设定累积概率变量 T_{emp} 初值为 0,并令 $n = \text{head}\{R_i\}$ 将可用路径 n 指向列表 R_i 的第一个表项。

(2)若簇首 i 所处层次 ω_i 为 1,则其下一跳为基站,转向步骤 5;否则,根据式(5)、式(6)计算 i 到所有可用路径的链路 Q 值,然后随机生成一个区间 $(0,1)$ 内的随机数 v 。

(3)根据式(4)计算链路 $i \rightarrow n$ 的转发概率 $p_{i \rightarrow n}$,并判断随机数 v 是否小于当前累积概率 $T_{\text{emp}} + p_{i \rightarrow n}$,若小于则表示随机数 v 落入链路 $i \rightarrow n$ 的概率区间,设定其下一跳为簇首 n ,跳转到步骤 5;否则,顺序执行步骤 4,继续寻找下一跳节点。

(4)令 $T_{\text{emp}} = T_{\text{emp}} + p_{i \rightarrow n}$ 刷新累积概率变量, $n = \text{next}\{R_i\}$ 以指向列表 R_i 的下一个表项,即簇首 i 的下一个可用路径,然后跳转到步骤 3 继续执行。

(5)传送分组给下一跳节点,完成该次数据转发。

3 仿真实验及分析

通过 NS-2 网络模拟器完成本文协议仿真分析,并将本文协议与 LEACH 和 UCR 分簇协议^[3-4]进行比较。

3.1 场景及参数

仿真场景设置在 $400 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 的平面区域内,随机散布 600 个初始能量为 1 J 且位置固定的无线节点,基站置于监测区域外 100 m 处。仿真中选用 CBR 类型的数据流,数据包大小为 10~90 B,无线传播模型采用双径路面反射模型,选择 PriQueue 类型的缓冲队列,并设置默认队列长度为 50 个包,全向型天线工作于 2.4 GHz 频段。采用 LEACH 协议的能量模型计算能耗,如式(7)~式(10)所示。

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

$$E_{\text{Tx}}(l,d) = E_{\text{radio}}(l) + E_{\text{Tx-amp}}(l,d) \quad (8)$$

$$E_{\text{Tx-amp}}(l,d) = \begin{cases} l\epsilon_{\text{fs}}d^2, & d < d_0 \\ l\epsilon_{\text{mp}}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (9)$$

$$E_{\text{DataFusion}}(l) = lE_{\text{DA}} \quad (10)$$

式中:节点接收 l bit 数据的能耗为在射频电路上的损耗 $E_{\text{radio}}(l)$; E_{elec} 为单位比特数据的电路损耗;节点发送 l bit 数据的能耗由射频损耗和功放损耗 $E_{\text{Tx-amp}}(l,d)$ 组成; d_0 为表征信道模型的阈值,当通信双方的距离小于 d_0 时采用自由空间模型计算功放损耗,否则采用多径衰减模型; ϵ_{fs} 和 ϵ_{mp} 分别为 2 种模型下放大电路在单位面积内传播单位比特的能耗; E_{DA} 为融合单位比特数据消耗的能量。仿真中

能量相关参数取值与文献[4]相同。MCMP-CL 协议共设 16 个无线信道,HTCS 的参数 $N_{\text{pkt}}=5$, $N_{\text{th}}=15$,期望的簇间层数 $k=5$,簇首在其以下 $m=3$ 层内的簇首集合中搜索下一跳节点,链路 Q 值的调节权值 $\sigma=0.9$ 。

3.2 性能分析

图 4 为通信过程中不同发包速率下随机抽取 5 个簇的数据,统计的各协议簇内接包率和吞吐量。可以看出:①引入干扰后,MCMP-CL 协议在接包率和吞吐量方面均比 UCR 协议高,这是因为 MCMP-CL 协议不仅可通过信道互异减小邻簇干扰,而且各簇在 MAC 层采用 HTCS 算法实时评估信道质量,在质量较差时及时切换信道,减小了邻频协议的影响,进而增强了网络的抗干扰性能;②同样采用 TDMA 机制,簇内多信道较单信道有很大的性能提升,因为随着发包率提高,单信道的信道负载很快超过额定容量而导致较大的丢包,而多信道机制能将这些负载平衡到其他信道上;③同样采用多信道,TDMA 机制较 CSMA/CA 机制具有更好的性能,因为它采用局部集中式控制,只要分配好时隙,节点之间的数据传输会比 CSMA/CA 机制产生更少的碰撞,从而获得更好的数据投递效率。因此,采用多信道 TDMA 传输的 MCMP-CL 协议在 MAC 层能获

得较好的性能。

在通信开始时随机选取 20 个簇,比较 MCMP-CL、UCR 和 LEACH 协议在不同缓冲队列长度下簇间通信的前 1 000 个数据包的分组转发情况,如图 5 所示。从图 5 可以看出,由于 LEACH 协议的簇首直接将数据发送给基站,因此其簇间丢包率和时延均较好。对比同为簇间多跳的 MCMP-CL 和 UCR 协议,可以看到 MCMP-CL 的簇间丢弃率明显低于 UCR,其原因主要有以下 2 个方面:①MCMP-CL 协议在选择下一跳簇首时考虑了链路拥塞程度,并通过基于概率转发的多路径机制平衡网内数据流量,控制了局部链路拥塞,保证在拥塞能及时进行调整,避免了在原路径上持续无效的重试;②链路 Q 值的设计不仅确保簇首适时地将分组转发给基站,而且使得拥塞缓解后原有质量较高路径能恢复使用。

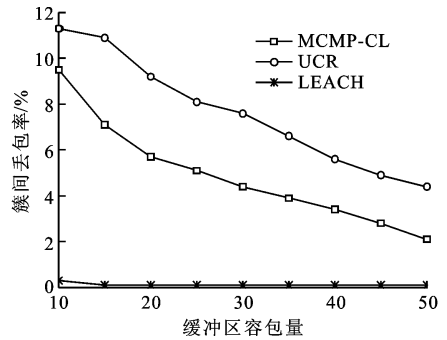


图 5 缓冲区容量与簇间丢弃率的关系

图 6 给出了同一仿真条件下 MCMP-CL、UCR 和 LEACH 等协议在簇间延时方面性能的比较。LEACH 协议的簇首直接将数据发送给基站,因而簇间延时较小。相比之下,虽然 MCMP-CL 和 UCR 协议簇间均采用多跳转发,但随着发包速率的增大,前者的多路径概率转发机制能较好地控制和缓解拥塞而提高数据可靠性,继而减小了重发带来的延时,图中 MCMP-CL 协议在簇间延时方面至少

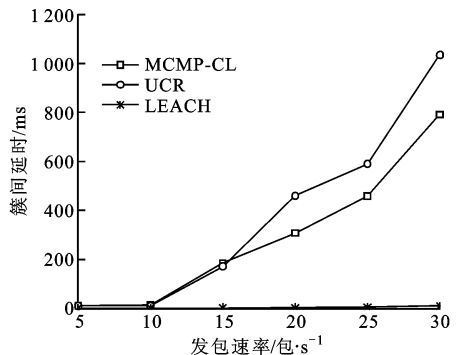


图 6 不同发包速率下的簇间延时

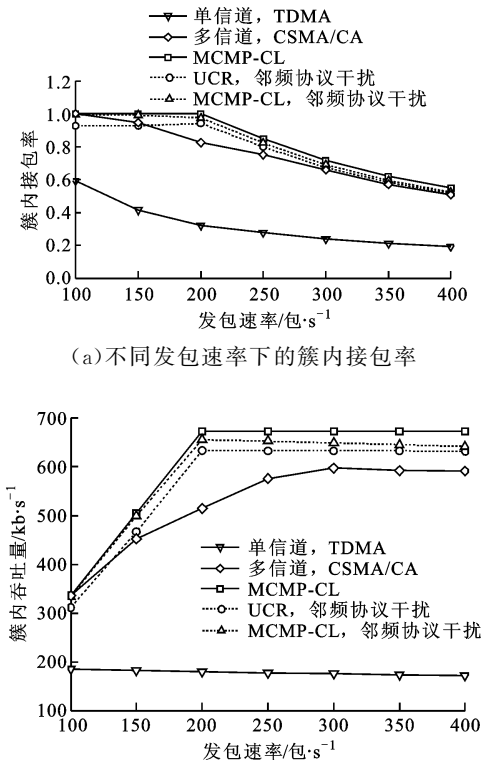


图 4 不同机制下 MAC 层性能比较

较 UCR 协议下降了 22%。

4 结 论

在分簇无线传感器网络中需要最小化相邻簇、相邻频段协议等的干扰,同时由于低发射功率节点在簇间多跳过程中容易受到阻挡等影响,而使得当网络流量大或变化快时簇间通信容易发生拥塞甚至导致丢包。针对这种情况,本文提出了一种面向分簇无线传感器网络的多信道跨层协议——MCMP-CL。该协议在簇内采用多信道机制,并通过 HTCS 算法实时评估并自适应切换信道,以提升抗干扰性能;簇间引入链路 Q 值评价路径状况,并采用概率转发的多路径机制平衡网内数据流量,实现网络流量较大或变化较快时对拥塞的控制和缓解。仿真结果表明,相比传统的分簇协议,本文协议的多信道和多路径机制能分别在 MAC 层和路由层协调工作,达到了提高网络可靠性和实时性的目的。

参考文献:

- [1] VEHI C G, GERHARD P H. Industrial wireless sensor networks: challenges, design principles, and technical approaches [J]. IEEE Transactions on Electronics, 2009, 56(10): 4258-4265.
- [2] WOODINGS W R, GERRIOR M. Avoiding interference in the 2.4-GHz ISM band. [EB/OL]. (2005-02-16) [2012-03-28]. <http://www.mwee.com/printableArticle/?articleID=163700631>.
- [3] HEIZEIMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]//Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 1-10.
- [4] CHEN Guihai, LI Chengfa, YE Mao, et al. An unequal cluster-based routing protocol in wireless sensor networks [J]. Wireless Networks, 2009, (15): 193-207.
- [5] 孙东旭, 曹建福, 郑辑光. 面向工业测控的无线传感器网络分簇路由算法 [J]. 信息与控制, 2012, 41(6): 779-785.
SUN Dongxu, CAO Jianfu, ZHENG Jiguang. A clustering routing algorithm of WSN for industrial measurement and control [J]. Information and Control, 2012, 41(6): 779-785.
- [6] MOHAMMED T, KEMAL E T, SASAN A, et al.

Survey of multipath routing protocols for mobile ad hoc networks [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2009, (32): 1125-1143.

- [7] ZHOU Gang, HUANG Chengdu, YAN Ting, et al. MMSN: multi-frequency media access control for wireless sensor networks [C]//The 25th IEEE International Conference on Computer Communication Proceedings. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 1-13.
- [8] WU Yafeng, STANKOVIC J A, HE Tian, et al. Realistic and efficient multi-channel communications in wireless sensor networks [C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2008. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1193-1201.
- [9] OZLEN D I. A survey on multi-channel communication in wireless sensor networks [J]. Computer Networks, 2011, (55): 3081-3099.
- [10] 金枫, 郑辑光, 曹建福, 等. 一种高吞吐量的无线传感器网络多信道 MAC 协议 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 40(12): 32-37.
JIN Feng, ZHENG Jiguang, CAO Jianfu, et al. A high throughput multi-channel MAC protocol for wireless sensor networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 40(12): 32-37.
- [11] GAJJAR S H, PRADHAN S N, DASGUPTA K S. Cross layer architectural approaches for wireless sensor networks [C]//Proceedings of 2011 IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 557-562.
- [12] MEHMET C V, IAN F A. XLP: A Cross-layer protocol for efficient communication in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010: 1-14.
- [13] KWON H, KIM T H, CHOI S, et al. Lifetime maximization under reliability constraint via cross-layer strategy in wireless sensor networks [C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 1891-1896.
- [14] 王辛果, 张信明, 陈国良. 时延受限且能量高效的无线传感网络跨层路由 [J]. 软件学报, 2011, 22(7): 1626-1640.
WANG Xinguo, ZHANG Xinming, CHEN Guoliang. Delay-constrained and energy-efficient cross-layer routing in wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2011, 22(7): 1626-1640.

(编辑 刘杨)