

一种基于链路级功率控制的分簇路由算法

刘新华 李方敏 方艺霖 马小林 旷海兰

(宽带无线通信与传感器网络湖北省重点实验室 武汉 430070)

(武汉理工大学信息工程学院 武汉 430070)

摘 要 针对非均匀网络环境下链路层的能耗控制问题,提出了一种基于链路级功率控制的分簇路由算法(CLPC 算法)。CLPC 算法基于最优连通功率成簇,并利用双信道机制和干扰反制策略在网络层解决链路层的冲突重传及信道访问公平性等问题,以期达到提高网络整体性能的目的。最优连通功率机制可以减少网络中节点间的冲突域,降低节点间的竞争强度;双信道机制则通过控制信道和数据信道分别对数据分组和控制分组进行收发,来降低数据传输的冲突概率,提高信道的空间复用率;干扰反制策略通过对具有高发射功率的干扰节点进行反制,来保障低发射功率的节点在共享信道上的公平性。实验仿真结果表明,CLPC 算法进一步提高了网络的能量有效性和网络有效吞吐量。

关键词 无线传感器网络,功率控制,跨层设计,分簇路由

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Clustering Algorithm Based on Link Power Control for Wireless Sensor Network

LIU Xin-hua LI Fang-min FANG Yi-lin MA Xiao-lin KUANG Hai-lan

(Key Lab. of Broadband Wireless Communication and Sensor Networ, Wuhan 430070, China)

(School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract In order to solve the energy control problem of link layer in a non-uniform deploy network environment, the dissertation proposed a clustering routing algorithm based on link power control (CLPC). Based on optimal connectivity power clustering and using dual-channel mechanism with anti-control interference strategy, CLPC solves the problem of collision re-transmission and channel access fairness in link layer from network layer, so as to improve the whole network performance. Collision and competition intension among nodes can be reduced by optimal connectivity power mechanism, and collision probability during data transmission can be decreased by dual-channel mechanism so as to lead the improvement of channel utilization. Moreover, anti-control interference strategy, by anti-controlling nodes which are high transmit power, can guarantee low transmit power nodes to ensure they can share channel fairly. The simulation results show that CLPC algorithm has a further improvement for energy efficiency and system throughput.

Keywords Wireless sensor networks, Power control, Cross-layer design, Clustering routing

1 引言

在无线传感器网络中,网络层的路由机制对系统的整体性能有着非常重要的影响。网络层需要解决的是通过全局或局部信息来决策和优化路由问题。从网拓扑的结构来分,路由协议大致可以分为两类:平面路由协议和分簇(层次)路由协议。对于平面路由协议来说,网络中所有节点地位平等,不存在等级和层次的差异,它的主要优点是实现简单、扩展性好、易于维护并具有较好的鲁棒性;它的缺点在于网络中无管理节点,缺乏对通信资源的优化管理,自组织协同工作算法复杂,对网络动态变化的反应速度较慢等。而分簇路由协议则在能量有效性、网络拓扑控制、数据融合等方面特别是网络的扩展性上表现出良好的优越性,成为无线传感器网络路由协

议中重点研究的方向^[1-4]。

在无线传感器网络中,如何高效使用节点的有限能量获得网络的最大生命周期成为无线传感器网络设计的首要核心问题。就传感器节点而言,节点能量的消耗主要分为 3 部分:数据采集模块能量消耗(传感器)、数据处理模块能量消耗(MCU)和无线通信模块能量消耗。其中,无线通信模块的能量消耗要明显高于传感器和 MCU 的能量消耗。据估计,传感器节点传输 1 比特信息 100m 距离需要的能量大约相当于执行 3000 条计算指令消耗的能量^[5]。因此,如何减少无线通信模块的能量消耗成为降低能耗的关键问题。功率控制可以通过某种设定的控制策略来动态调整节点的发射功率,从而降低节点发射功率的富余量,以减少节点进行信息发送时的能量消耗。从路由层的角度来看,功率控制主要体现在对节

到稿日期:2011-10-02 返修日期:2012-02-20 本文受国家自然科学基金项目(60902037,60970019),中央高校基本科研业务费专项资金(2010-II-004),湖北省自然科学基金重点项目(2009CDA132)资助。

刘新华(1974—),男,博士,副教授,主要研究方向为计算机网络、多跳无线网络及嵌入式系统,E-mail:liuxinhua@whut.edu.cn;李方敏 教授,博士生导师,主要研究方向为网络服务质量、新型网络体系结构、嵌入式系统。

点的发射功率控制上,即网络中的节点采用何种发射功率级别来影响和优化分簇路由算法。从链路层的角度来看,功率控制主要体现在如何减少节点间的相互干扰和提高信道的空间复用度。

然而,无论路由层和链路层采用何种功率控制,其最终目的均是尽量提高信道的空间复用率、降低信道的竞争强度和维持信道的公平性,从而在能量消耗、吞吐量及传输延时等方面取得更好的性能。链路层的功率控制通常不会对网络拓扑和路由施加实质性的影响。但是反过来,网络的拓扑结构和路由特性却会影响到链路层的功率控制,因此,基于跨层设计方法从网络层的角度来研究链路级的功率控制机制,是提高网络整体性能、满足用户对不同服务目的和网络质量要求的重要手段。

针对非均匀网络环境下链路层的能耗控制问题,提出了一种基于链路级功率控制的分簇路由算法(Clustering algorithm based on link power control, CLPC)。CLPC算法基于最优连通功率成簇,并利用双信道机制和干扰反制策略在网络层解决链路层的冲突重传及公平性等问题,以期达到提高网络整体性能的目的。最优连通功率机制可以减少网络中节点间的冲突域,降低节点间的竞争强度;双信道机制则通过控制信道和数据信道分别对数据分组和控制分组进行收发,以降低数据传输的冲突概率,提高信道的空间复用率;干扰反制策略通过对具有高发射功率的干扰节点进行反制来保障低发射功率的节点在共享信道上的公平性。

本文第2节对路由层和链路层的功率控制问题进行了分析和探讨;第3节阐述了CLPC算法中拟采用的功率控制算法;第4节给出了CLPC分簇算法的详细描述;第5节给出CLPC算法仿真实验及分析结果;最后对全文的研究工作进行了总结。

2 路由层和链路层的功率控制问题

2.1 分簇算法的功率控制问题

在无线传感器网络分簇算法中,功率控制主要体现在对节点的发射功率控制上,分簇算法的功率控制主要表现在以下3个方面。

(1) 簇的成员节点数量控制

在节点分布均匀的网络中,若通过簇头选择算法使簇头节点亦均匀分布,则采用统一的发射功率,所有簇的成员节点数将会维持同一水平,这样可使每一轮的簇头能量消耗相对均衡。但是如果考虑簇头到基站的能耗问题,无论是节点均匀分布还是随机分布,要使簇头节点在每一轮能量消耗均衡,则需要通过调整簇头的发射功率来调整簇的成员节点数:

在顶层簇头采用直接与基站通信时,一般越靠近基站的簇,其成员节点数越大,即在成簇时其发射功率也相对越大;

在顶层簇头采用多跳与基站通信时,一般越靠近基站的簇,其成员节点数越小,即在成簇时其发射功率也相对越小。

例如在文献[6]提出的基于非均匀分簇的路由协议中,候选簇头通过使用非均匀的竞争范围来构造大小不等的簇,靠近汇聚点的簇的规模小于远离汇聚点的簇,使得靠近基站的簇头可以为簇间的数据转发预留能量。

(2) 簇头节点功率控制

在分簇算法中,簇头的功率控制非常重要,通常需要采用多级功率控制来完成与成员节点、基站及其它簇头的通信控制。除了在成簇过程中,通过调整簇头的发射功率来获得所需要的成员节点数外,在成簇后,簇头与成员节点的通信可根据距成员节点距离的远近采用多级发射功率来通信;而其与基站的通信要考虑以下情况进行功率控制:

- 顶层簇头采用直接与基站通信时,根据距基站距离的远近调整其发射功率;

- 在顶层簇头采用多跳与基站通信时,簇头节点到其它簇头节点的发射功率的调整相对复杂,这涉及到相关的簇间路由算法,但簇间的连通性是调整发射功率时首先要考虑的问题。

(3) 成员节点功率控制

成员节点的功率控制相对简单得多,通常在节点成为簇的成员节点后,节点所考虑的是与簇头的通信,因此,成员节点到簇头的发射功率与其距簇头的距离有关。在多级分簇算法中,既是簇头又是成员的节点还要考虑其作为成员节点的发射功率控制。

因此,分簇算法中,这种基于发射功率调整的功率控制机制实际上是如何为节点选取合适的发射功率,并最终在无线传感器网络中表现为两种状态:一是全网节点具有统一的发射功率;二是全网节点具有非对称发射功率。

2.2 链路级功率控制问题

链路层主要解决的问题是冲突重传和信道访问公平性。所谓冲突重传是指,在同一信道上,处于相互干扰范围内的两个节点同时发送数据,就会产生冲突,导致数据重传。这种冲突重传使得能量无谓消耗,从而降低信道利用率,特别是在节点分布密集的情况下,更为严重。冲突产生的原因大致可以分为两类:一类由信道争用而产生,这类冲突可以通过对信道进行预约分配来消除;另一类是由隐蔽站和暴露站引起的,通常可以采用RTS/CTS握手机制来进行冲突避免。链路层的信道公平性主要是指节点间如何分享信道资源,以保证网络中每个节点均有机会将数据发送出去。

在无线传感器网络中,利用RTS/CTS握手机制来解决冲突避免问题是链路层所采用的主流方法。大多数的链路级功率控制机制均是通过对RTS/CTS握手机制施加影响来避免冲突。例如,文献[7]提出的BASIC协议使用最大发射功率来发送RTS/CTS,而使用所需要最小发射功率来发送DATA/ACK,这种发射功率的分配方式有利于节省能耗,但会导致在载波侦听环带中的节点侦听不到DATA/ACK的传输,隐蔽站问题比较严重。文献[8]针对BASIC协议的隐蔽站问题提出了PCM协议,协议通过周期性地将发送DATA的发射功率增加到最大,来使载波侦听范围内的节点能够侦听到DATA信号,从而延迟发送,避免冲突。而文献[9]提出的PCDC协议把原始信道划分为控制信道和数据信道,RTS/CTS和HELLO分组通过控制信道来发送。文献[10]则是使用了多个数据信道,在通信时与邻居节点通过协商获得信道的使用。文献[11]提出的PCMA协议采用了双信道机制,一条信道用来发送忙音信号,而另一条信道则以RPTS/APTS/

DATA/ACK 的握手机制完成消息的传递。这种基于多信道的功率控制机制能有效解决隐蔽站和暴露站问题,在提高链路性能上起到非常大的作用。另外,文献[12]针对不对称发射功率控制环境提出了一种反应式功率控制 MAC 协议 (SHUSH)。节点在最初的通信过程中,所有的控制分组和数据分组均采用最优发射功率进行传送,以此最大化地降低通信能耗。当节点通信受到干扰时,SHUSH 采用一种“中断恢复”机制中断本次通信,并从干扰节点的 DATA 或 ACK 处获得干扰节点的相关信息。当干扰节点完成通信后,被干扰节点立即接入信道。

而信道访问的公平性通常与信道的接入方式有关:对于竞争类接入方式,例如基于竞争的随机访问协议 ALOHA 和 CSMA 等中,节点在发送数据时需要通过竞争来使用共享信道资源,节点间在使用信道时会发生冲突,这类协议的实现机制主要有退避算法和发送概率两种,即在发送过程和冲突处理中采用退避窗和发送概率调整来适应网络负荷的变化;对于非竞争类接入方式,例如 TDMA 和 CDMA 则是通过分时和编码的方式来分享信道,节点间在信道使用上不存在冲突。本节主要讨论功率控制下采用 RTS/CTS 握手机制在节点间争用信道的公平性问题。

如前所述,采用 RTS/CTS 握手机制是一种避免冲突的主要方法,但如果网络中节点的分布密度不同或者采用不同的发射功率,节点在争用信道时就会出现不公平的现象,主要表现在以下两个方面。

(1) 节点分布密度影响信道争用的公平性

处于分布密度高的节点在争用信道时,相对于处于分布密度低的节点而言,其竞争强度大,受到的干扰多,在通信的过程中发生冲突的概率也更大。这种不公平性主要是节点分布不均匀造成的,如图 1 所示,热点区域的节点竞争非常激烈。因此,如何降低高密度区域节点的冲突域,保持局部竞争的相对公平性是无线传感器网络中解决信道公平性的关键。

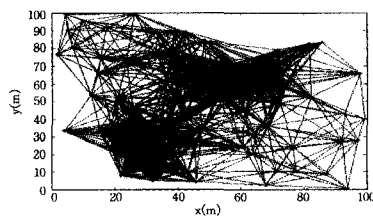


图 1 固定发射功率下的节点间竞争强

当网络中的节点采用不对称发射功率时,暴露站和隐蔽站问题会更加突出。不对称发射功率对信道公平性有影响,除了所采用的退避算法所带来的固有不公平性外^[13],还主要表现在具有较高发射功率的节点在竞争信道上更有优势,其往往会压制邻近低发射功率的节点,如图 2 所示。在节点 A 与节点 B 的通信过程中,若节点 C 有数据要发送到节点 D,则基于 RTS/CTS 握手机制,节点 C 和节点 D 能立刻建立通信,但显然节点 A 与节点 B 的通信则因发生冲突而不得不中断,只有等待节点 C 与节点 D 的通信结束后才能继续争用,这无疑会降低节点 C 的吞吐量和能量的无谓消耗。这种由于采用不对称发射功率造成的不公平性是采用动态功率控制机制时要解决的问题。

(2) 不对称的发射功率影响节点争用信道的公平性

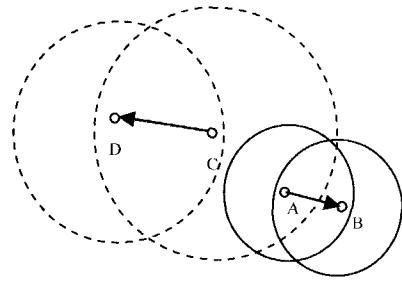


图 2 不对称发射功率

3 CLPC 算法功率控制机制

3.1 最优连通功率控制

最优连通功率控制机制是文献[14]提出的一种基于最优邻居节点数的功率控制机制,主要解决节点非均匀分布情况下网络热点区域的竞争强度及网络连通性问题。这种功率控制机制实际上是一种不对称发射功率机制,这意味着在这种功率控制机制下,网络中节点的最优连通功率可能各不相同。但是这种不对称发射功率控制机制却可以有效地降低热点区域的竞争强度,从而提高网络的空间复用率和吞吐量,如图 3 所示。

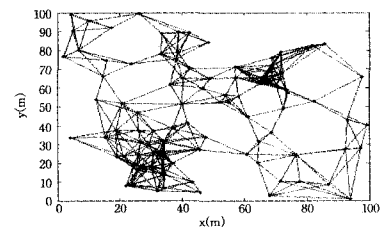


图 3 最优连通功率下的节点间竞争强

相对基于固定发射功率的竞争强度来说,图 3 所表现的竞争强度大大降低了。这是因为根据最优连通功率控制机制,在节点密度越高的区域,节点的最优连通功率就越低,从而使得节点冲突域变小,因此,热点区域节点间的竞争强度就降低了。

因此,在 CLPC 算法中,利用最优连通功率控制机制可以为任意节点 k 设定两类功率:一类是节点的最优连通功率 $P_{\alpha}(k)$;另一类是节点到其最优邻居节点的最优发射功率 $\{P_{opt}(i) | i \in T_{opt}(k)\}$,其中 $P_{opt}(i)$ 是节点 k 到其邻居节点 i 的最优发射功率, $T_{opt}(k)$ 是节点 k 的最优邻居节点集合。

3.2 双信道控制

在无线传感器网络中传输的数据主要分为两类:一类是控制信息;一类是数据信息。控制信息一般比较短,具有突发和广播的特性;而数据信息通常比较长,主要是来自采集的数据或需要转发的数据。在 CLPC 算法中,采用双信道方式来分别发送这两类信息。

双信道控制机制要求网络中每个节点配置两个分离的信道,分别用来收发控制分组和数据分组,前者称为控制信道,后者称为数据信道。CLPC 算法结合最优连通功率控制机制,在这两个信道上采用不同的发射功率来保证网络的稳定连通和提高网络的吞吐量,如图 4 所示。

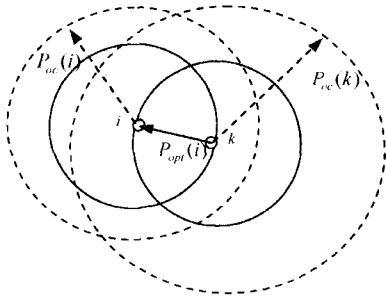


图4 双信道采用不同的发射功率

(1)控制信道。网络中的所有控制分组都通过这个信道来进行收发,这些控制分组包括链路层的 RTS、CTS 分组和网络层的控制分组。节点在发送控制分组时通常采用其最优连通功率,例如节点 k 在发送 RTS 或 CTS 分组时,采用自己的最优连通功率 $P_{oc}(k)$ 来发送。

(2)数据信道。网络中的所有数据分组(包括确认分组)都通过这个信道来进行收发,主要是链路层的 DATA 分组和 ACK 分组。节点在发送数据分组时通常采用其最优发射功率来发送,例如节点 k 在发送 DATA 或 ACK 分组到其最优邻居节点 i 时,采用其至节点 i 的最优发射功率 $P_{opt}(i)$ 来发送。

根据最优连通功率机制可知,对一个节点来说,其最优连通功率均大于或等于它到各最优邻居节点的最优发射功率。CLPC 算法的双信道 RTS/CTS 握手机制如图 5 所示。

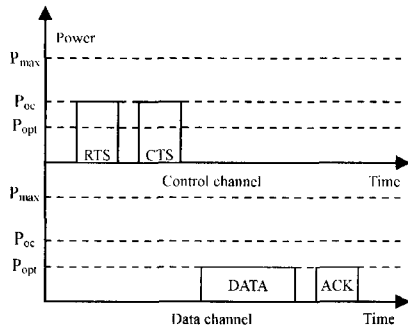


图5 CPLC 中的双信道 RTS/CTS 握手机制

3.3 干扰反制

采用控制信道和数据信道分离的机制来处理 RTS/CTS 握手机制中的控制分组和数据分组,有助于减少数据传输过程的冲突概率,但是在 CLPC 算法中各节点在控制信道上采用自身的最优连通功率来发送控制信息,而节点的最优连通功率因节点所处区域的分布密度不同而不同,因此网络呈现的是一种不对称发射功率状况。据最优连通功率控制机制可知,越是热点区域,最优连通功率越小。这种不对称发射功率会严重影响节点对信道争用的公平性,发射功率越高的节点越更容易竞争到信道的使用权。

在 RTS/CTS 握手机制中,避免隐蔽站节点干扰通常采用的方法是以最大发射功率发射 RTS/CTS 控制分组,并且(或者)周期性地扩大发送 DATA 分组的发射功率来通告周围的节点,这种方法常常会造成网络空间复用率和吞吐量的下降,同时也未考虑信道的公平性问题。例如文献[8,15]在发送 RTS/CTS 控制分组时均采用最大发射功率,并在发送 DATA 分组时周期性地扩大发射功率。这种通告邻居节点

的策略虽然避免了不对称性所造成的隐蔽站问题,但却造成信道空间复用率和网络吞吐量的下降,而且节点争用信道的公平性问题依然没有得到很好解决。

根据文献[12]的反应式功率控制思想,针对不对称发射功率中高发射功率节点会压制低发射功率节点的问题,本文基于双信道提出了一种新的反干扰控制策略(Anti-control interference strategy),用于解决因不对称发射功率而引起的信道争用不公平性问题。本文称这种机制为干扰反制。干扰反制与文献[12]提出的“中断恢复”机制不同,“中断恢复”的基本思想是:当通信中的节点受到高发射功率节点干扰时,被干扰节点中止当前通信,并在干扰节点通信完成后立即占用信道,以到干扰节点的最优发射功率反作用于干扰节点,恢复通信,续传剩余分组。这种方法在一定程度上可以防止高发射功率节点对低发射功率节点的持续压制,保证低发射功率节点对信道争用的公平性。干扰反制的基本思想是:当通信中的节点受到高发射功率节点干扰时,立即以到干扰节点的最优发射功率反作用于干扰节点,迫使干扰节点中止通信,直到节点通信完成。这个到干扰节点的最优发射功率称为反干扰控制功率,用 P_{ac} 表示。干扰反制控制具体描述如下:

(1)干扰检测

根据基于双信道的 RTS/CTS 握手机制的分析,发射 RTS/CTS 的功率(最优连通功率)要比发射 DATA/ACK 的功率(最优发射功率)高,因此,在 CLPC 算法中,干扰检测完全可以通过控制信道来完成,并利用控制信道来避免冲突。当正在通信的双方从控制信道收到 RTS 或 CTS 分组时,表明有一个干扰正在形成,但是否会对当前的通信造成影响,取决于干扰节点在数据信道拟采取的最优发射功率。因此,下面分两种情况来讨论控制信道的干扰检测。

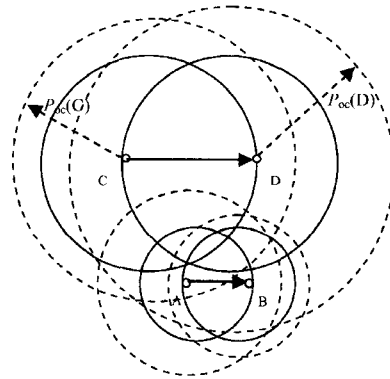


图6 检测到干扰(无冲突)

1)检测到干扰,但对本次通信无影响。例如,如图 6 所示,当节点 A 和节点 B 正在通信时,节点 C 准备发送数据到节点 D,节点 C 发送一个 RTS 分组,节点 A 收到这个节点 C 发来的 RTS 分组,表明节点 C 可能会对节点 A 的通信造成干扰,但由于现在节点 A 处在节点 C 的数据信道目前所采用的最优发射功率之外,节点 A 的数据信道不会受到干扰,因此,节点 A 在控制信道上检测到的这次干扰,实质上是不会对 A 的数据传输造成影响。同理,对节点 B 而言,当它收到 CTS 分组后,是否会对节点 C 的数据信道造成干扰,取决于节点 D 的数据信道所采用的最优发射功率。仅当节点 A 和节点 B 的数据信道均不受到影响时,当前通信才不会有冲突发生。

2)检测到干扰,对本次通信有影响。例如,如图7所示,节点A和节点B分别处在节点C和节点D数据信道的发射范围内,因此,节点A和节点B的通信会与节点C和节点D的通信发生冲突。

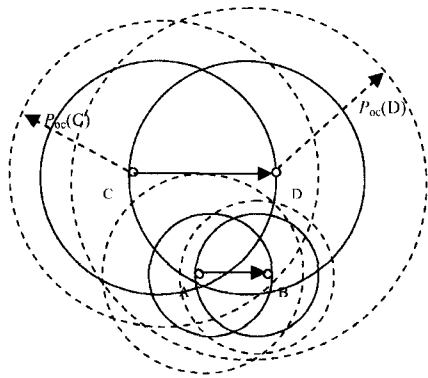


图7 检测到干扰(有冲突)

(2)冲突避免

当正在通信的双方在控制信道检测到干扰会产生冲突时,需要立即进行干扰反制,以避免其进一步对数据信道干扰。干扰反制的策略就是通过向干扰源以发射功率 P_{ac} 发送反干扰帧,反干扰帧仍然采用 RTS/CTS 控制分组,为了与正常的 RTS/CTS 区分,通过在 RTS/CTS 中增加标志位及与干扰控制相关的字段即可(用 RTS'/CTS' 表示)。根据干扰源是发送站还是接收站,分两种情况进行反制:

1)干扰源是发送站。正在通信的双方若接收到 RTS 控制分组,表示干扰源是发送站,任何接收到 RTS 分组的通信方以发射功率 P_{ac} 向干扰源连续发送两个控制分组:发送站连续发送两个反干扰 RTS';接收站连续发送两个反干扰 CTS'。前一个反干扰分组用于干扰干扰源预备接收的 CTS,使得干扰源不能正确接收 CTS 而进入退避状态;后一个反干扰分组则随机退避一段时间发送,用于通告干扰源本次通信持续的时间。干扰源收到一个或多个反干扰分组后,择其大者重置退避时间。

2)干扰源是接收站。正在通信的双方若仅接收到 CTS 控制分组,表示干扰源是接收站,而且干扰源的发送站不会对本次通信造成影响。为了防止干扰源发送的 ACK 分组干扰数据信道,任何接收到 CTS 分组的通信方以发射功率 P_{ac} 向干扰源发送干扰控制分组;发送站随机退避一段时间发送反干扰 RTS' 分组;接收站随机退避一段时间发送反干扰 CTS' 分组。反干扰控制分组同样用于通告干扰源本次通信持续的时间。干扰源收到一个或多个反干扰分组后,停止发送 ACK 分组,择其大者作为退避时间,并向干扰源的发送站发送反干扰 CTS' 分组,干扰源的发送站收到反干扰 CTS' 分组后,暂停数据发送,进入退避状态。

在 CLPC 算法中,这种采用控制信道来立即反作用干扰节点的策略,可以有效阻止干扰节点对数据信道的干扰,以保证低功率节点的数据传输不会中断,从而更好地维持信道争用的公平性。

(3)反制优先

接收到反干扰 RTS' 和 CTS' 分组的节点退避结束后立即优先占用信道;可以通过缩短 SIFS 或 DIFS 来优先占用信道,发送 RTS(针对(2)冲突避免的第一种情况)或续传数据

(针对(2)冲突避免的第二种情况)。这种反制优先可以在一定程度上保证高发射功率节点能在被反制的情况下,将数据尽快发出去,从而从整体上保证网络信道的公平性。

4 CLPC 算法描述

CLPC 算法是在文献[13]提出的 SCOC 算法的基础上,利用双信道控制机制和干扰反制策略进行改进得到的。主要改进内容如下:

(1)算法采用控制信道和数据信道双信道机制。在控制信道中,根据控制消息不同采用不同的发射功率,在数据信道发送数据时采用 RTS/CTS 握手机制。最优邻居节点选择算法中的 HELLO-1/ACK-1、HELLO-2/ACK-2 分组并采用最大发射功率;最优连通功率成簇算法中的 HELLO-CH 分组采用最优连通功率;在成员节点与簇头节点的数据传输中,发送控制分组 RTS 和 CTS 时采用最优连通功率,发送 DATA 数据分组和 ACK 分组时采用最优发射功率,在干扰反制发送反干扰分组 RTS' 和 CTS' 时采用反干扰控制功率。CLPC 算法中各分组的发射功率如图8所示。

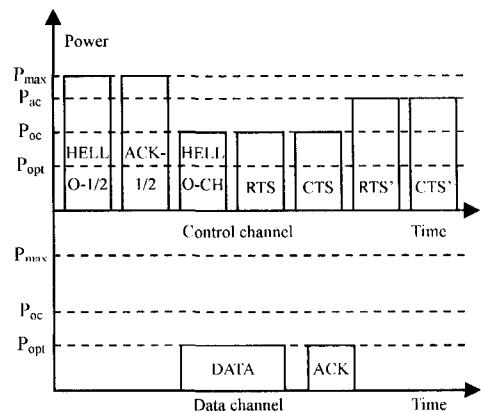


图8 CLPC 算法中各分组的发射功率

(2)在最优邻居节点选择过程中,通过节点间的信息交换,在每个节点 k 中建立两个邻居节点调度表:最大邻居节点调度表 $T_{max}(k)$ 和最优邻居节点调度表 $T_{opt}(k)$ 。在邻居节点调度表中包括邻居节点 ID、到节点 k 的距离、最优发射功率等相关字段。还为每个节点 k 确定其最优连通功率 $P_{oc}(k)$ 。这个过程主要是为每个节点在成簇阶段和数据传输阶段提供发送各种类型分组所需要的发送功率级别。

(3)在最优连通功率成簇过程中,任一簇头 k 发送的 HELLO-CH 消息均以其最优连通功率 $P_{oc}(k)$ 广播。成员节点与簇头节点、簇头节点与网关节点之间的数据传输均采用节点间的最优发射功率。

(4)在数据传输阶段,通过在 RTS 分组和 CTS 分组增加标志、最优发射功率或范围等字段,来区分正常的 RTS/CTS 分组和反干扰分组 RTS'/CTS'。数据传输过程采用 RTS/CTS/DATA/ACK 机制,RTS/CTS 采用最优连通功率在控制信道发送;DATA/ACK 采用最优发射功率在数据信道发送。当在控制信道内检测到即将有冲突发生时,采用干扰反制控制策略进行处理。

5 仿真及结果分析

5.1 仿真场景

在仿真过程中,为了能更接近实际应用分布场景,采用文

献[13]中所采用的 Pareto 分布模型对无线传感器网络节点进行实际部署。这种部署模型使得网络中节点分布密度的差异性较为明显,以便构造一种非均匀网络实验环境。对 CLPC 算法的性能评价主要从网络的能量有效性和网吞吐量两个方面来进行分析。在实验中采用 NS2 作为仿真实验平台,网络仿真主要参数如表 1 所列。

表 1 仿真参数表

参数	值
场景的区域大小	1000m * 1000m
节点总数	150~350 个
节点最大传输半径	250m
CBR 数据流	3 个
测试路由协议	AODV
MAC 协议	IEEE 802.11

5.2 网络能量有效性

在无线传感器网络中,能量是其首要解决的关键问题。CLPC 算法通过最优连通功率成簇可有效降低网络通信的竞争强度,从而提高空间复用率和系统吞吐量。本小节主要对 AODV-fixed (250m)、AODV-fixed (160m)、AODV-scoc 和 AODV-clpc 算法的能量有效性进行分析,仿真实验得到其网络平均能耗的比较图,如图 9 所示。

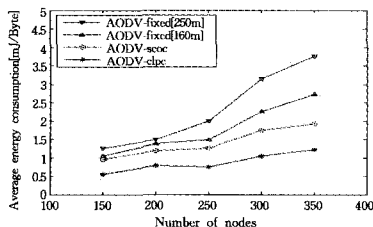


图 9 网络平均消耗能量

从图 9 中可以看出,随着节点数量的增加,网络平均消耗能量均增加。AODV-fixed 算法的网络能量有效性较差,尤其是采用较大发射功率的网络随着节点规模的增大,网络能量消耗急剧增加。AODV-scoc 和 AODV-clpc 算法在能量有效性方面均有较明显的改善,并且网络能耗受节点规模变化的影响较小,随着网络规模的增大,相对于平面协议增长平缓。相对于 AODV-scoc 算法,AODV 算法在能量有效性上表现更好,这表明实施链路级功率控制策略后,网络的通信能耗得到了有效控制,这对提高网络的生命周期有着非常重要的作用。

5.3 网络吞吐量

网络吞吐量是衡量网络性能的一个重要度量指标。在本小节中,主要分析 AODV-fixed(250m)、AODV-fixed(160m)、AODV-scoc 和 AODV-clpc 算法的网络有效吞吐量。仿真实验得到网络有效吞吐量的比较,如图 10 所示。

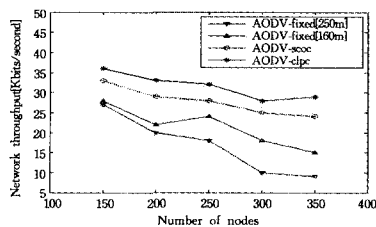


图 10 网络有效吞吐量

从图 10 中可以看出,随着网络节点规模增大,节点间的通信竞争更加激烈,网络有效吞吐量也受到影响,Sink 节点接收到的有效数据随之降低。同样,AODV-fixed 算法使用较短的节点发射距离比使用较长的节点发射距离,可获得更大的网络有效吞吐量。而 AODV-scoc 算法和 AODV-clpc 算法可获得更优的网络有效吞吐量,并且随着网络规模的增大,算法的有效吞吐量下降相对平缓。与 AODV-scoc 算法相比,AODV-clpc 算法采用了链路级的控制策略,因此具有更好的网络有效吞吐量性能。

结束语 针对非均匀网络环境下链路层的能耗控制问题,本文提出了一种基于链路级功率控制的分簇路由算法 (CLPC 算法)。CLPC 算法基于最优连通功率成簇,并利用双信道机制和干扰反制策略在网络层解决链路层的冲突重传及公平性等问题,以期达到提高网络整体性能的目的。最优连通功率机制可以减少网络中节点间的冲突域,降低节点间的竞争强度;双信道机制则通过控制信道和数据信道分别对数据分组和控制分组进行收发,以降低数据传输的冲突概率,提高信道的空间复用率;干扰反制策略通过对具有高发射功率的干扰节点进行反制来保障低发射功率的节点在共享信道上的公平性。仿真实验结果表明,CLPC 算法在提高能量有效性和系统吞吐量等方面均有良好表现。

参考文献

- [1] Abbasi A A, Younis M. A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2007, 30(14/15):2826-2841
- [2] Deosarkar B P, Yadav N S, Yadav R P. Clusterhead Selection in Clustering Algorithms for Wireless Sensor Networks; A Survey [C]// Iccn: 2008 International Conference on Computing, Communication and Networking. 2008:163-170
- [3] Kumarawadu P, Dechene D J, Luccini M, et al. Algorithms for Node Clustering in Wireless Sensor Networks; A Survey [C]// 2008 4th International Conference on Information and Automation for Sustainability (Icials). 2008:464-469
- [4] 沈波,张世永,钟亦平. 无线传感器网络分簇路由协议[J]. Journal of Software, 2006, 17(7):1588-1600
- [5] 孙利民, 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社, 2005
- [6] 李成法,陈贵海,叶懋,等. 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议[J]. 计算机学报, 2007, 30(001):27-36
- [7] Gomez J, Campbell A T, Naghshineh M, et al. Conserving transmission power in wireless ad hoc networks [C]// ICNP '01 Proceedings of the Ninth International Conference on Network Protocols. 2001:24-34
- [8] Jung E S, Vaidya N H. A power control MAC protocol for ad hoc networks [J]. Wireless Networks, 2005, 11(1/2):55-66
- [9] Muqattash A, Krunz M. Power controlled dual channel (PCDC) medium access protocol for wireless ad hoc networks [C]// IEEE Infocom 2003: The Conference on Computer Communications. Vols 1-3, 2003:470-480
- [10] Wu S L, Tseng Y C, Lin C Y, et al. A multi-channel MAC protocol with power control for multi-hop mobile ad hoc networks [J]. Computer Journal, 2002, 45(1):101-110

- [11] Monks J P, Bharghavan V, Hwu W M W. A power controlled multiple access protocol for wireless packet networks[C]//Ieee Infocom 2001: The Conference on Computer Communications. Vols 1-3, 2001; 219-228
- [12] Sheth A, Han R. SHUSH: Reactive transmit power control for wireless MAC protocols[C]//First International Conference on Wireless Internet. 2005; 18-25
- [13] Koksall C, Kassab H, Balakrishnan H. An analysis of short-term fairness in wireless media access protocols[C]//Proc. of ACM SIGMETRICS'00. ACM, 2000; 118-119
- [14] 李方敏, 刘新华, 旷海兰. 基于最优连通功率的无线传感器网络稳定成簇算法[J]. 通信学报, 2008, 30(3): 75-83
- [15] Zawodniok M, Jagannathan S. A distributed power control MAC protocol for wireless ad hoc networks[C]//2004 Ieee Wireless Communications and Networking Conference. Vols 1-4, 2004; 1915-1920

(上接第 63 页)

3.5 模块度对比

表 1 对不同社区挖掘算法的模块度进行了对比, 从中可以看出, 与其他经典社区挖掘算法相比, 分角色的挖掘取得了最高的模块度。特别对于悲惨世界数据集, RA-CDA 的模块度是 G-N 的 5 倍, 是 Polish 算法的 4 倍。此外, RA-CDA 根据自由节点与社区特征向量的邻接相似性进行判断和规划, 社区中每一个节点的对内连接都多于对外连接, 因此, 最终得到的都是强连通社区。

表 1 社区挖掘结果的模块度对比

Name	Karate Club	Dolphins	Les Miserables
GN	0.395	0.381	0.082
Fast G-N	0.360	0.379	0.074
Polish	0.358	0.226	0.107
RACDA	0.401	0.383	0.486

结束语 基于角色划分的动态社区挖掘算法受到社会分化和“特殊人物法则”的启发, 根据网络中节点度数分布进行角色划分, 分析精英个体在社会网络形成中的领导作用, 进而模拟社会网络的形成演化过程, 动态地实现节点的规划, 以便人们深入理解复杂社会网络的内在机理和演化机制。

参 考 文 献

- [1] Newman M E J. Finding community structure in networks using the eigenvectors of matrices[J]. Physical Rerview E, 2006, 74(3): 1-22
- [2] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, et al. Complex networks: Structure and dynamics[J]. Physics Reports, 2006(424): 175-308
- [3] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of ‘small- world’ networks[J]. Nature, 1998, 393(6638): 440-442
- [4] 段晓东, 王存瑞, 刘向东, 等. 基于粒子群算法的社区发现[J]. 计算机科学, 2008, 35(3): 18-22
- [5] Albert R, Jeong H, Barabasi AL. The internet’s Achilles heel: error and attack tolerance of complex networks[J]. Nature, 2000, 406(2115): 378-382
- [6] Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512
- [7] Guimera R, Amaral L A N. Functional Cartography of Complex Metabolic Networks[J]. Nature, 2005, 433(7028): 895-900
- [8] Krapivsky P L, Redner S, Leyvraz F. Connectivity of Growing Random Networks[R]. Physical Review Letters, 2000, 85: 4629-4632
- [9] He Dong-xiao, Zhou Xu, Wang Zuo, et al. Community Mining in Complex Networks—Cluster Genetic Algorithm[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(8): 1160-1170
- [10] 郭崇慧, 张娜. 基于共邻矩阵的复杂网络社区结构划分方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(6): 1077-1084
- [11] 何晓东, 周栩, 王佐. 复杂网络社区挖掘—基于聚类融合的遗传算法[J]. 自动化学报, 2010, 36(8): 1160-1170
- [12] Girvan M, Newman M E J. Community structure in social and biological networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2002, 99(12): 7821-7826
- [13] Raghavan U N, Albert R, Kumara S. Near linear time algorithm to detect community structures in large-scale networks[J]. Physical Review E, 2007, 76(3): 036106
- [14] Barber M J, Clark J W. Detecting network communities by propagating labels under constraints[J]. Physical Review E, 2009, 80(2): 026129
- [15] Leung I X Y, Hui P, Lio P, et al. Towards real-time community detection in large networks[J]. Physical Review E, 2009, 79(6): 066107
- [16] Zhang Y Z, Wang J Y, Wang Y, et al. Parallel community detection on large networks with propinquity dynamics[C]// Proceedings of the 15th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Paris, France: ACM, 2009: 997-1006
- [17] Newman M E J. Fast algorithm for detecting community structure in networks[J]. Physical Review E, 2004, 69(6): 066133
- [18] Kernighan B W, Lin S. An efficient heuristic procedure for partitioning graphs[J]. The Dell System Technical Journal, 1970, 49(1): 291-307
- [19] Liu X, Li D Y, Wang S L, et al. Effective algorithm for detecting community structure in complex networks based on GA and clustering[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Computational Science. Beijing, China: Springer, 2007: 657-664
- [20] Gog A, Dumitrescu D, Hirsbrunner B. Community detection in complex networks using collaborative evolutionary algorithms [C]//Proceedings of the 9th European Conference on Artificial Life. Lisbon, Portugal: Springer, 2007: 886-894
- [21] 高琪, 张永平. PageRank 算法中主题漂移的研究[J]. 网络与通信, 2010, 3(3): 117-119
- [22] 胡健, 董跃华, 杨炳儒. 大型复杂网络中社区结构发现算法[J]. 计算机工程, 2008, 34(19): 92-93
- [23] 王娟, 谢弛, 荣雪, 范雯. SNS 网站运营的现状和未来趋势研究 [N/OL]. [http://media. people. com. cn/GB/22114/119489/140165/8454258. html](http://media.people.com.cn/GB/22114/119489/140165/8454258.html), 2008-12-03
- [24] Zachary W W. An information flow model for conflict and fission in small groups [J]. Journal of Anthropological Research, 1977, 33(4): 452-473
- [25] Knuth D E. The Stanford Graphbase: “A Platform for Combinatorial Computing[M]. Addison-Wesley, 1993