

一种多接口多信道 VANET 动态信道分配算法研究^{*}

张 民, 李德敏, 金 康

(东华大学 信息科学与技术学院, 上海 201620)

摘 要: 为了合理地实现多接口多信道车载自组织网络(VANET)车辆节点间通信信道的动态分配,提出了一种基于通信双方车辆节点信道切换队列的动态信道分配算法。定义了车辆节点的射频接口状态,给出了信道的性能因子以及信道切换队列的生成方法,通过综合考虑通信双方车辆节点的射频接口状态和信道切换队列,快速自主地建立通信链路,从而解决了信道公平接入和分配不合理的问题。通过软件仿真比较可以看出,该算法实现了信道的动态分配,减小了平均端到端时延,增加了网络平均吞吐量,显著提高了多接口多信道 VANET 的网络性能。

关键词: 多接口多信道; 车载自组网; 动态信道分配; 信道切换队列

中图分类号: TN929

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2014)05-1516-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.05.056

Research of dynamic channel allocation algorithm for multi-radio multi-channel VANET

ZHANG Min, LI De-min, JIN Kang

(College of Information Science & Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to achieve reasonable dynamic allocation of communication channels between the vehicle nodes in multi-radio multi-channel VANET, this paper proposed a dynamic channel allocation algorithm based on channel switching queue between two communication vehicle nodes. It defined the radio status of vehicle node, proposed the channel performance factor and the generating method of the channel switching queue. By comprehensive considering the radio status and channel switching queue of the both sides of communication vehicle nodes, it established communication links fast independently. It solved the channel fair access and unreasonable allocation. Through software simulation, this algorithm reduces the average end-to-end delay, increases the network average throughput and significantly improves the network performance of multi-radio multi-channel VANET.

Key words: multi-radio multi-channel; VANET; dynamic channel allocation; channel switching queue

车载自组网作为智能交通系统(ITS)的重要基础引起了学术界和工业界的极大兴趣^[1]。然而车载自组织网络拓扑变化频繁,在需要 QoS (quality of service) 保证的环境下,传统单信道多跳接入模式难以满足用户需求。因此多接口多信道 VANET 成为研究的热点。

多接口多信道 VANET 中一个关键问题就是多信道的动态分配。对于车载多信道,美国联邦通信委员会(FCC)将 5.850 ~ 5.925 GHz 之间 75 MHz 的频段用于车载通信,其被分成七个子信道^[2]。通过为车辆节点配备多个射频接口,将同一个通信区域内的不同射频接口调制到不同的信道进行通信,这样一个车辆节点使用不同的射频接口和不同信道可与多个车辆节点同时收发并行传输,其效果^[3]如图 1 所示,从而降低了由于竞争通信资源而产生的冲突,提高了网络吞吐性能。因此,研究多接口多信道 VANET 动态信道分配算法具有重要意义。

1 相关工作

实现动态信道分配的关键问题是决定射频接口何时进行

切换以及该接口切换到哪个信道。目前有以下几种常用的动态信道分配方法。

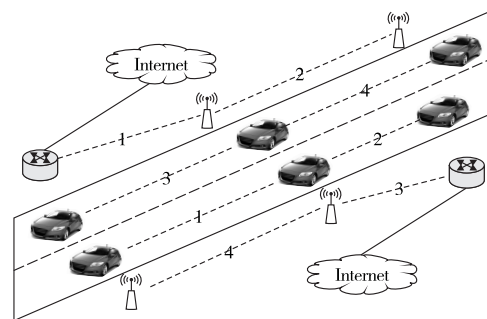


图1 多接口多信道 VANET 效果

文献[4]是一种集中式信道分配方案,认为信道分配问题就是寻求在射频数目受限的前提下最小化网络干扰函数的问题,只适用于静止网络,并且需要综合考虑全局信息来获得最优解,对于动态变化的网络容易造成“牵一发而动全身”的影响,而且车载自组织网络拓扑变化频繁,通信窗口狭窄,因此此方案在车载自组织网中难以实现。

收稿日期: 2013-07-03; 修回日期: 2013-08-29 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71171045)

作者简介: 张民(1987-),男,安徽庐江人,硕士,主要研究方向为移动自组网及其通信策略(zmdhu1016@163.com);李德敏(1963-),男,安徽砀山人,教授,博导,主要研究方向为移动计算理论及其应用;金康(1990-),男,浙江嘉善人,硕士研究生,主要研究方向为移动自组网及其路由算法。

文献[5]是一种分布式实现的信道分配方案,提出了 DCA 算法。该算法的核心就是最大化协议提供的信道使用效率,每个节点贪婪地选取干扰代价取值最小的信道,而没有考虑当前网络状态参数,会造成不同信道流量的严重不均。

文献[6]是一种混合式信道分配方案,提出了算法 HCAA,每个节点有一个射频在固定信道上接收数据。由于每个节点的固定信道不同,当一个节点同时与多个邻居节点进行通信时,必须在不同的信道上切换,频繁切换会造成很大的时延,而且固定接口的类型限制了接口的利用率,并进而影响信道使用效率,造成信道选择的不合理。

本文利用车辆节点间的交互,考虑当前网络状态参数,以各信道性能因子为衡量标准,生成信道切换队列,提出了一种综合考虑通信双方车辆节点信道切换队列的动态信道分配算法(channel switching queue-based channel allocation, CSQCA)。这是一种分布式实现的算法,有效解决了上述三种方案运用在车载自组织网中的不足之处,经过仿真分析,性能明显优于上述方案。

2 系统假设

多接口多信道车载自组织网络拓扑结构是动态变化的,可以用无向图 $G(V, E)$ 来表示存在信道竞争的车载自组织网^[7]。其中 $V = \{v_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ 表示网络中车辆节点集合, $E = \{\langle v_i, v_j \rangle | d_{ij} \leq r\}$ 表示网络中可以直接通信的链路集合, r 为通信半径, d_{ij} 表示节点 v_i 和 v_j 间的距离。为了方便算法描述,作如下假设:

- 对于 $\forall v, v \in V$ 可以配置不同数目的射频接口,令 R_i 表示节点 i 的射频数目, C_n 表示可以使用的信道数目,必须保证 $R_i \leq C_n$ 。
- 分配的不同信道之间相互正交,同时用于传输数据时不会产生干扰。
- 车辆节点的射频接口是半双工的,即每个射频接口不能同时用于发送数据和接收数据。
- 对于需要通信的车辆节点,双方必须各自选择一个射频接口,并且使双方的通信射频接口切换到相同的信道上。
- 所有的车辆节点有一个固定的控制信道,用于交互信道信息,以及安全相关的服务、具有高优先级的系统控制与管理。

3 动态信道分配算法设计

车辆与车辆间的拓扑变化很快,通信链路建立时间可能很短,需要车辆节点能够快速选择自己的射频接口,切换到通信双方都可以使用的信道,建立通信链路。因此,车辆节点在选择射频接口与信道时,必须有一个衡量标准作为切换的依据。本文提出的 CSQCA 算法,定义了射频接口状态与信道切换队列,不依赖于整个网络的拓扑结构,是由每个车辆节点自主选择,根据信道性能实时更新信道切换队列,与邻居车辆节点交互,实现合理有效的信道选择及切换。

3.1 射频接口状态

所有车辆节点的射频接口数目具有不确定性,与多个车辆节点进行并行通信时,为每条通信链路选择的射频接口具有随机性,这需要系统来作出决策。因此本文首先为射频接口定义了三种状态:

a) 工作状态。如果该射频接口正在用于实现通信,则把该射频接口状态定义为工作状态。

b) 闲置状态。如果该射频接口没有用于通信业务,则把该射频接口状态定义为闲置状态。

c) 低效状态。如果一个射频接口上有通信业务,但当前工作信道性能值小于设置的信道性能阈值(channel performance threshold, CPT),通信业务效率很低,而此时又没有其他接口处于闲置状态。为了保证通信业务的质量以及提高网络的吞吐量,则把此状态定义为低效状态,当有其他通信业务发起时,可以将其作为闲置状态的射频接口来使用。

3.2 信道性能因子

确定了车辆节点的射频接口状态,在需要通信时,为节点闲置状态的接口分配信道,该如何选择,需要一个衡量的标准。因此,提出了信道性能因子以表征信道的质量作为选择信道的依据。为了计算信道性能因子,建立以下数据结构:

1) 信道忙状态时间(channel busy time, CBT)

IEEE 802.11 中采用基于 NAV 的虚拟介质监听技术,节点在探测到 RTS/CTS 数据包之后利用其中的 duration 域设置自己的 NAV 时间,然后开始计时直到 NAV 时间耗尽。在未结束之前,认为该信道处于忙碌状态^[8]。可以取得各个信道 NAV 的时间值,表示其在考察周期 T 内的信道忙碌状态时间 CBT。

2) 信道已用带宽比(channel used bandwidth percentage, CUBP)^[9]

通过信道 i 的 CBT, 计算出其在周期 T 内消耗的带宽(channel used bandwidth, CUB), 如式(1)所示。

$$CUB(i) = \frac{CBT(i)}{T} \times CB \quad (1)$$

计算所有数据信道的 CUB, 可以计算信道 i 在过去考察的时间 T 内因传输数据而消耗的带宽在所有信道中所占的比例 CUBP, 如式(2)所示。

$$CUBP(i) = \frac{CUB(i)}{\sum_{j=1}^{CN} CUB(j)} \quad (2)$$

其中: CN(channel number) 表示数据信道个数。

3) 信道冲突比(channel conflict percentage, CCP)

所有的车辆节点都具有邻居节点信道列表数据(neighbor channel list, NCL)。节点在交互时会将自己使用的信道列表放在 HELLO 信息中通过控制信道进行广播, 所有邻居车辆接收到这个 HELLO 数据后取出其中的信道使用列表更新自己的 NCL 数据结构, 从而可以得到使用各信道的节点个数, 计算出各信道的冲突比 CCP, 如式(3)所示。

$$CCP(i) = \frac{NCN(i)}{\sum_{j=1}^{CN} NCN(i)} \quad (3)$$

其中: NCN(i) 表示使用信道 i 的邻居节点个数。如果车辆节点使用信道 i 作为通信信道, 则可能会与邻居车辆节点竞争通信接入信道。参数 CCP(i) 用来表征这种竞争与冲突的可能性大小。使用该信道的节点数越多, CCP(i) 的值就越大, 在信道 i 上发生竞争和冲突的可能性也就越大, 反之则可能性越小。

4) 信号干扰比(signal to interference ratio, SIR)

在 VANET 环境下路径损耗占主导地位是因为在频率选择性信道中信道编码和频率交错产生(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 链接的误码更依赖于平均接收功率, 而不是最弱的副载波的功率。虽然实际移动节点能够直接

通过硬件估计接收的功率,但是为了便于仿真,还是要建立一个分析的模型,对于一个通用的接收节点,接收功率 P_r 的计算公式如式(4)^[10]所示。

$$P_r = \frac{P_t}{(4\pi)^2 \left(\frac{d}{\lambda} \right)^\gamma} \left[1 + \alpha^2 + 2\alpha \cos \left(\frac{4\pi h^2}{d\lambda} \right) \right] \quad (4)$$

其中: P_t 表示接收功率; λ 是信号传播的波长; d 是发射机与接收机之间的距离; h 是天线的高度; α 是地面的反射系数; γ 是路径损耗因子。

估计了接收功率,就可以计算每个信道的信号干扰比 SIR。假设 k 节点的通信范围内有 n 个邻居节点,则 k 节点在 i 信道上的 SIR 计算公式如式(5)所示。

$$SIR_i = \frac{P_t}{\sum_{j=0}^{n-1} P_{ri}^j} \quad (5)$$

其中: P_t 是 k 节点的发射功率; P_{ri}^j 是 k 节点在信道 i 上来自邻居节点 j 的接收功率。

5) 信道性能因子(channel performance factor, CPF)

将上面三个参数按照一定的比例系数加权,得到计算信道性能的公式如式(6)所示:

$$CPF(i) = \frac{SIR_i}{\theta \times CUBP(i) + (1 - \theta) \times CCP(i)} \quad (6)$$

其中: θ 为加权系数。 θ 的取值决定了 CUBP 和 CCP 在性能因子中所占的比重, θ 取值越大,信道选择越倾向于信道带宽负载的均衡,反之则越倾向于邻居车辆节点的信道使用情况。缺省情况下, $\theta = 0.5$ 。由式(6)可知,CPF(i)综合考虑了三个参数 SIR、CCP(i)和 CUBP(i)的影响,当 SIR 越大时,信号与干扰的比值越大,CPF(i)越大,呈正比例关系。当 CUBP(i)和 CCP(i)越小时,CPF(i)越大,表明当前使用信道 i 作为通信信道的邻居车辆节点较少且其上传输的通信业务较少,则此时信道性能较好。当 CUBP(i)和 CCP(i)越大时,CPF(i)越小,表明当前使用信道 i 作为通信信道的邻居车辆节点较多且其上传输的通信业务较多,则此时信道性能较差。综上所述,CPF(i)值的大小反映了信道性能的好坏,从而为节点的射频接口分配信道提供了依据。

3.3 信道切换队列

每个车辆节点都与一个信道队列相关联,根据信道性能因子计算方法,对所有信道进行实时计算,将性能值大于 CPT 的信道取出,按照性能的优劣来组织一个队列结构,队列中的每个元素含有相应信道的编号与 CPF,结构如图 2 所示。性能最优的信道成为信道切换队列的队头元素,依此类推,性能最差信道成为信道切换队列的队尾元素。当所有信道 CPF 都小于 CPT 时,信道队列为空。

		队头		队尾	
信道编号	性能因子	C4	CPF4	C1	CPF1
					...

图 2 信道切换队列数据结构

当车辆需要进行通信时,节点的射频接口需切换到一个新信道,此时,两个节点交互各自的信道切换队列。通过计算,得到双方通信的最佳信道。

在计算最佳通信信道时,由于各个节点的信道切换队列中信道性能值可能不同,所以不能直接将两个队列中对应信道的性能值相加来比较结果值的大小确定最优信道。需要综合考

虑双方节点的信道性能,得到信道性能值(channel performance, CP),计算公式如式(7)所示。

$$CP(k) = \beta \times CPF_r(k) + (1 - \beta) \times CPF_s(k) \quad (7)$$

式中:CPF_r(k)表示接收节点信道 k 的性能因子值;CPF_s(k)表示发送节点信道 k 的性能因子值; β 是加权系数, $0 < \beta < 1$ 。通过 β 可以控制发送方和接收方性能值所占的比重,一般取 $\beta = 0.5$,此时发送方和接收方的性能比重相等。

3.4 算法实现流程

CSQCA 信道分配算法流程如图 3 所示,其中包括信道选择流程。

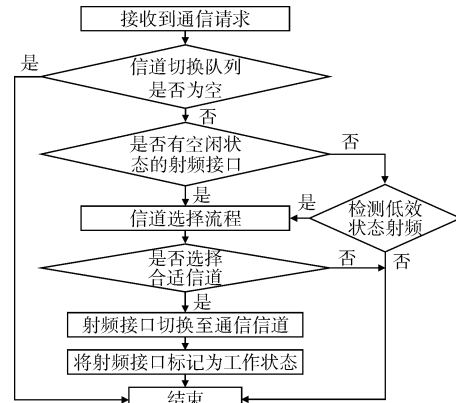


图 3 算法流程

车载自组织网络拓扑变化频繁,信道性能是动态变化的,节点需要实时根据各信道的性能来更新信道切换队列,保证信道切换的公平性与准确性。

当需要建立通信链路时,发送节点会通过控制信道向接收节点发送一个请求通信的数据包,数据包中包含自己的信道切换队列。接收节点在接收到数据包后,首先,检查自己的信道切换队列是否为空,如果非空则再检查自身所有射频接口,看是否有处于闲置状态的射频。如果有,则使用一个闲置的射频接口,再执行信道选择流程;如果没有闲置的射频,则继续检查看是否有处于低效状态的射频,如果有,将此射频接口标记为闲置状态,再执行信道选择流程。通过信道选择流程,可以选择出通信的最佳信道,然后接收节点会回复给发送节点一个应答数据包,其中包含选择的信道编号,双方切换到这个信道,就可以建立一条通信链路。

如果节点信道切换队列为空,或者没有闲置状态的射频接口,同时也没有低效的射频接口,则本节点没有可以用于通信的信道或射频接口,无法建立通信业务,同样以应答信号回复发送节点。

信道选择流程中,接收节点会从队列的队头信道元素开始,遍历队列中的所有信道,利用式(7)计算每个信道作为双方的通信信道的综合性能 CP,从而得到综合性能最优的信道,即选择其作为通信信道,从信道队列中出队。当然,一方信道切换队列中已有的信道,可能在另一方都被占用,或者 CPF 很小,每个信道都过载,导致无法得到可以通信的信道,则选择的信道为空,此时算法流程终止,接收节点以应答信号回复发送节点。

通过整个算法流程可以实现射频接口的动态选择,以及信道的动态分配与切换,可以最大速率地进行业务的收发,最大化网络吞吐量。

3.5 CSQCA复杂度分析

对于具有 k 个射频接口的车辆节点 i ,可使用的信道数目为 m ,为得到其中一个接口的通信信道,通过信道切换队列进行选择最多需要进行 $2m$ 次计算,因此 k 个接口,总共需计算 $k \times 2m$ 次,所以CSQCA的时间复杂度为 $O(k \times 2m)$ 。由于FCC只提供了七个非重叠信道,并且车辆节点接口数目小于可用信道数,所以CSQCA的计算开销比较小,可以实时给出新的信道切换队列,为需要通信的车辆节点的射频接口分配合理的通信信道。

4 仿真与分析

为了验证算法的有效性,本文利用NS-2对算法进行了模拟,并针对VANET网络中分组的平均端到端时延、网络平均吞吐量和其他常用算法进行比较。由于集中式信道分配方案只适用于静态网络,在车载自组织网中难以实现,本算法无须与集中式信道分配方案进行比较,故本文仿真将只与DCA、HCAA进行对比,以验证算法的性能。

4.1 仿真场景

本文的模拟场景是在 $1000\text{ m} \times 1000\text{ m}$ 的矩形区域中随机分布50个节点。节点均配备四个射频接口,其中一个作为控制接口,其余三个作为数据接口。信道数为5,其中一个为控制信道,其余的四个为数据信道。传输模型采用TwoRay-Ground,通信半径 r 是250 m,干扰半径是550 m,移动模型采用random wave point模型,随机生成若干个业务类型为UDP的CBR流,请求带宽是50 K,数据包的大小固定为512 Byte,CPF取值1.5。仿真主要参数如表1所示。

表1 仿真参数

参数名	参数值
MAC层	IEEE 802.11
射频接口和信道	4,5
模拟范围	1000×1000
移动模型	random wave point
传输模型	TwoRayGround
交通数据流	CBR
数据包大小	512 Byte
节点移动速度	0~50 m/s
信道性能阈值 CPF	1.5
仿真时间	100 s

通过增加CBR数据包的发送速率来增加网络负载,其中数据包发送速率分别为5、10、15、20、25、30、40、50、60、70、80、90、100 packet/s。每次仿真随机选择10对源-目的节点传输数据,模拟时间为100 s。相同的场景模拟五次取实验数据的平均值。对于仿真结果,比较平均端到端时延和网络平均吞吐量这两个性能指标。

4.2 性能比较与结果分析

1) 平均端到端时延

平均端到端时延的仿真结果如图4所示。可以看出,CSQCA的时延整体上要小于HCAA和DCA。由于HCAA固定一个射频在固定信道上接收数据,使得固定信道成为网络瓶颈,在网络发包速率比较低的时候,其时延较低,当速率增加时,节点要不断地切换到邻居的固定信道上,使得在固定信道上的端到端时延急剧增加,是三种算法中最差的。DCA贪婪

地选取干扰代价取值最小的信道,在低速率的时候,信道干扰小,所以其时延很低,是三种算法中最优的,但是当发包速率增加后,会造成信道流量的不均,从而导致整体的端到端时延增加,使得整个网络的平均端到端时延高于CSQCA。

2) 网络平均吞吐量

网络平均吞吐量的仿真结果如图5所示。可以看出,CSQCA的网络平均吞吐量高于HCAA和DCA。当源节点发包速率比较小时,由于网络竞争不激烈,三种算法的网络平均吞吐量差不多,但是当源节点发包速率变大时,网络竞争比较激烈,DCA没有考虑当前网络状态参数,会造成不同信道流量的严重不均,信道分配没有CSQCA合理,造成平均吞吐量比CSQCA低。而HCAA没有考虑到历史流量对带宽的消耗,并且射频需要不停在固定接收信道间切换,且不能实现并行通信,所以其网络平均吞吐量是三者中最差的。

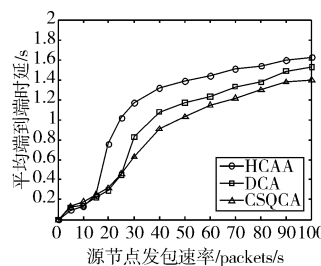


图4 平均端到端时延仿真结果

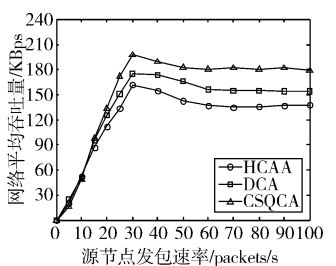


图5 网络平均吞吐量仿真结果

3) θ 取值的影响分析

θ 为CPF中的加权系数。 θ 的取值决定了CUBP和CCP在性能因子中所占的比重, θ 取值越大,信道选择越倾向于信道带宽负载的均衡;反之则越倾向于邻居车辆节点的信道使用情况。不同 θ 取值下CSQCA算法平均端到端时延和网络平均吞吐量如图6和7所示。可以看出,综合考虑信道带宽负载均衡和邻居节点的信道使用情况,才能使信道分配更合理,网络性能更好。

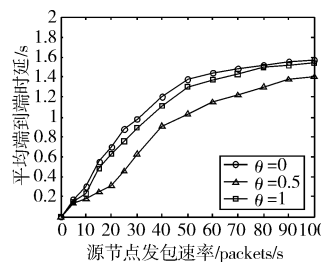


图6 不同 θ 取值下算法平均端到端时延仿真比较

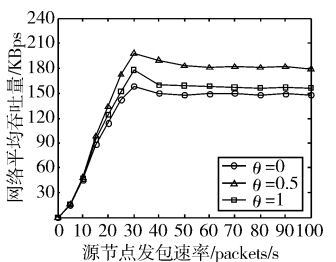


图7 不同 θ 取值下算法网络平均吞吐量仿真比较

5 结束语

本文提出了一种综合考虑通信双方车辆节点信道切换队列的动态信道分配算法CSQCA。首先定义了射频接口状态,介绍了信道性能因子CPF的计算方法;然后分析了信道切换队列的生成方法与用途,以及信道选择流程;最后对CSQCA算法进行了仿真和分析。通过仿真结果表明:CSQCA算法实现了多接口多信道VANET信道的动态分配,在保证网络连通性的前提下,合理地解决了信道公平接入和分配不合理的情况,很好地适用于多接口多信道VANET的网络环境,显著地增加了网络的性能。

0.6 左右。

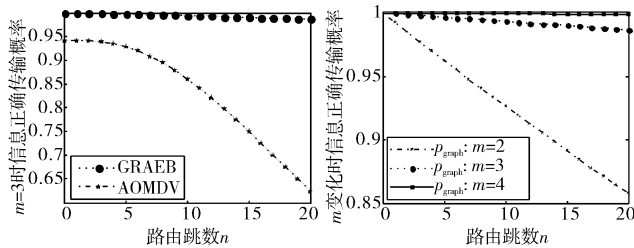


图7 $m=3$ 时 GRAEB 图路由和 AOMDV 路由可靠性比较

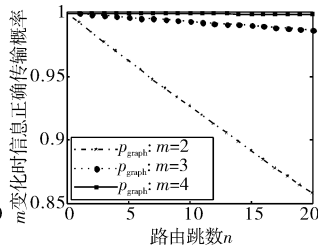


图8 m 变化时 GRAEB 图路由可靠性比较

图8描述的是不同的邻居节点数目条件下丢包率的情况。从图中可以看出,随着邻居节点 m 数量增大,通信的可靠性进一步提升,尤其是当 $m=4$ 时几乎可以实现无失真传输。这个实验解决了一个实际的工业问题,即当路径的丢包率较大、网络通信质量较低劣时,增加拓扑结构中的邻居节点数量可以实现数据的高可靠传输。可是, m 的增大就会带来路由开销以及鲁棒系数计算的复杂度,同时也会导致能量耗散更快。有关 m 取值以及能量最优性之间的平衡需要在实际项目中视情况而定,更优秀的算法也有待进一步研究。

4 结束语

针对 WirelessHART 工业组网的应用需求,本文提出了一种能量均衡的图路由算法 GRAEB。首先,网络根据图算法生成最短路径拓扑结构,接着节点根据鲁棒系数矩阵来进行路由选择和拓扑更新。同时,算法还限制了每个节点邻居个数,周期性地剔除性能较差的邻居,保证了传输可靠性。GRAEB 算法解决了 WirelessHART 实际应用中能量均衡和高可靠性同时兼顾的难题,充分保障了网络的负载均衡,延长了网络寿命,同时提高了通信的可靠性。

参考文献:

- [1] FOUNDATION H C. HCF SPEC 290 revision 1.0, Wireless devices specification[S]. 2007.
- [2] REAVES B, MORRIS T. Analysis and mitigation of vulnerabilities in short-range wireless communications for industrial control systems[J]. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2012, 5(3): 154-174.

- [3] INTANAGONWIWAT C, GOVINDAN R, ESTRIN D, *et al.* Directed diffusion for wireless sensor networking [J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2003, 11(1): 2-16.
- [4] LINDSEY S, RAGHAVENDRA C S. PEGASIS: power-efficient gather-ring in sensor information systems [C]//Proc of IEEE Aerospace Conference. 2002: 1125-1130.
- [5] CHATZIMILILOUDIS G, CUZZOCREA A, GUNOPOULOS D, *et al.* A novel distributed framework for optimizing query routing trees in wireless sensor networks via optimal operator placement [J]. *Journal of Computer and System Sciences*, 2012, 79(3): 349-368.
- [6] HUANG S C, JAN Rong-hong. Energy aware, load balanced routing schemes for sensor networks [C]//Proc of the 10th International Conference on Parallel and Distributed Systems. 2004: 419-425.
- [7] ZHAO Jin-dong, LIANG Zhen-jun, ZHAO Yao-pei. ELHFR: a graph routing in industrial wireless mesh network [C]//Proc of International Conference on Information and Automation. [S. l.]: IEEE Press, 2009: 106-110.
- [8] DANG Kui, SHEN Ji-zhong, DONG Li-da, *et al.* A graph route-based super frame scheduling scheme in WirelessHART mesh networks for high robustness [J]. *Wireless Personal Communications*, 2012, 12(3): 1-14.
- [9] DAI Ya-wen, WANG Quan, LI Xiao-qiang. MEBRS: energy balancing route scheduling in centralized wireless sensor networks [C]//Proc of the 1st Asia Symposium on Quality Electronic Design. [S. l.]: IEEE Press, 2009: 270-275.
- [10] FERRARI P, FLAMMINI A, RINALDI S, *et al.* Performance assessment of a WirelessHART network in a real-world testbed [C]//Proc of Instrumentation and Measurement Technology Conference. 2012: 953-957.
- [11] CAI Jing, LIU Kun. An improved AOMDV routing protocol based on prediction of link stability [C]//Proc of the 4th International Conference on Machine Vision. 2011: 1-6.
- [12] IBRAHIM A, HAN Zhu, LIU K J R. Distributed energy-efficient cooperative routing in wireless networks [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2008, 7(10): 3930-3941.
- [13] ZHU Xiu-ming, LIN T, HAN Song, *et al.* Measuring WirelessHART against wired fieldbus for control [C]//Proc of the 10th IEEE International Conference on Industrial Informatics. [S. l.]: IEEE Press, 2012: 270-275.

(上接第 1519 页)

参考文献:

- [1] 罗涛,王昊. 车载无线通信网络及其应用 [J]. *中兴通讯技术*, 2011, 17(3): 1-7.
- [2] KAKARLA J, SATHYA S S. A survey and qualitative analysis of multi-channel MAC protocols for VANET [J]. *International Journal of Computer Applications*, 2012, 38(6): 38-42.
- [3] 王东,彭鑫,李仁发,等. 车载自组网动态频谱分配技术研究进展 [J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(4): 9-12.
- [4] SUBRAMANIAN A P, GUPTA H, DAS S. Minimum interference channel assignment in multi-radio wireless mesh networks [EB/OL]. (2008-06-18) [2013-06-12]. <http://www.cs.sunysb.edu/~hgupta/ps/channel.pdf>.
- [5] KO B, MISRA V, PADHYE J, *et al.* Distributed channel assignment in multi-radio 802.11 mesh networks [EB/OL]. (2007-12-06) [2013-06-12]. <http://research.microsoft.com/~padhye/publications/wenc2007.pdf>.

- [6] KYASANUR P, VAIDYA N H. Routing and link-layer protocols for multi-channel multi-interface Ad hoc wireless networks [J]. *ACM Sigmobile Mobile Computing and Communications Review*, 2006, 10(1): 31-43.
- [7] 彭鑫,李仁发,刘操骄. 多信道车载网络带宽调制算法 [J]. *通信学报*, 2010, 31(11): 123-129.
- [8] 李磊,易平. 两次更新 NAV 防止信道抢占攻击的研究 [J]. *技术研究*, 2011(12): 31-35.
- [9] 陆阳,谢凯,官骏鸣,等. 一种基于信道性能的 MR-MC Ad hoc 网络信道分配算法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2010, 24(5): 430-436.
- [10] FAZIO P, RANGO F D, SOTTILE C. A new channel assignment scheme for interference-aware routing in vehicular networks [C]//Proc of Vehicular Technology Conference. [S. l.]: IEEE Press, 2011: 1-5.