

一种低功耗的分布式无线网络 MAC 协议设计*

马 静^{1,2}, 郎 杨¹, 沈来信³, 邓文雯⁴

(1. 厦门大学 软件学院, 福建 厦门 361005; 2. 新疆天山职业技术学院 电子通信学院, 乌鲁木齐 830017; 3. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804; 4. 弗吉尼亚理工大学 会计与信息系, 弗吉尼亚州 布莱克斯堡 24061)

摘 要: 为了提高分布式全双工无线网络的能量效率, 提出了一种改进的低功耗全双工媒体访问控制(MAC)协议. 不同于传统的 MAC 协议, 该 MAC 协议通过降低数据包以及确认包的传输功率来实现能量有效性. 提出的 MAC 协议支持双向以及单向两种链路, 并保持对传统半双工节点具有向后兼容性, 实现了较高的吞吐量. 通过基于随机几何的方法对提出的 MAC 协议进行了仿真分析与性能评估, 结果证明了其有效性和准确性, 是全双工无线网络可行的一种解决方案.

关 键 词: 全双工; MAC 协议; 低功耗; 双向链路; 单向链路; 吞吐量; 半双工; 能量有效性
中图分类号: TP 391 文献标志码: A 文章编号: 1000-1646(2017)05-0551-06

Design of an MAC protocol for distributed wireless network with low power consumption

MA Jing^{1,2}, LANG Yang¹, SHEN Lai-xin³, DENG Wen-wen⁴

(1. Software School, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. School of Electronic and Communication, Xinjiang Tianshan Vocational and Technical College, Urumchi 830017, China; 3. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 4. Department of Accounting and Information Systems, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia 24061, USA)

Abstract: In order to improve the energy efficiency of the distributed full duplex wireless network, an improved full duplex medium access control (MAC) protocol with low power consumption was proposed. Unlike the traditional MAC protocol, the proposed MAC protocol could achieve the energy efficiency through reducing the transmission power of data and acknowledgement packets. The proposed MAC protocol supported both bidirectional and unidirectional links, and maintained the backward compatibility to the traditional half duplex nodes, which could achieve a high throughput. The simulation analysis and performance evaluation for the proposed MAC protocol were carried out based on the random geometry method. The results verify the effectiveness and accuracy of the proposed method. The proposed method is a feasible solution scheme for the full duplex wireless network.

Key words: full duplex; MAC protocol; low power consumption; bidirectional link; unidirectional link; throughput; half duplex; energy efficiency

目前对全双工(FD)无线通信的研究主要集中在物理层(PHY)方面^[1],但是在物理层之上也需要新的解决方案和改进协议,以便更好地提高全双工技术的工作效率.对于全双工分布式无线

收稿日期: 2016-08-14.

基金项目: 国家文化部科技创新资助项目(WHBKJCXXM20142554); 国家文化部科技提升资助项目(GJWHKJTSXM20151991); 江苏省高等教育教改课题资助项目(2015jsjg411).

作者简介: 马 静(1979-),女,新疆乌鲁木齐人,讲师,硕士.主要从事计算机科学技术、模式识别与复杂计算等方面的研究.

* 本文已于 2017-03-28 17:09 在中国知网优先数字出版. 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/21.1189.T.20170328.1709.028.html>

网络而言,设计媒体访问控制(MAC)层是非常具有实际意义的研究工作^[2]。

许多文献提出了各种全双工分布式无线网络 MAC 协议.在文献[3]中介绍了专门为双向链路设计的全双工 MAC 协议;文献[4]中介绍了 ContraFlow MAC 协议,该传输协议即使无数据需要传输,ContraFlow 的主要接收器也会发送忙音,因此在降低功率、能量损耗方面效果较差,此外,ContraFlow MAC 协议不能使用单向链路;文献[5]中介绍了用于单向链路的分布式 MAC 协议,该方法需要采用新的比特传输标记识别全双工机,因而该协议无法向后兼容传统半双工(HD)节点;文献[6]介绍了用于单向链路的 MAC 协议,无需使用忙音就能够解决隐藏节点的问题。

上述提及的 MAC 协议均基于载波侦听多路访问(CSMA),当前协议很少考虑能量有效性,所有 MAC 协议将传输功率用于控制包和数据包,能耗较高。

在此背景下,本文针对文献[6]进行修改和扩展,以提高能量有效性,并且介绍了双向链路以及单向链路等全双工环境的特性.本文提出的协议主要通过降低数据包以及确认包的传输功率来实现能量有效性,另外,提出的 MAC 协议支持双向链路以及单向链路,并维持对半双工节点的向后兼容性,最终利用全双工实现了较高的吞吐量,同时解决隐藏节点的问题.通过基于随机几何方法对本文提出的协议进行了分析,以便对其性能做出准确评估。

1 系统模型

本文使用由全双工节点以及半双工节点组成的泊松分布式无线网络,在全双工操作方面,采用文献[7]的 PHY 层模型,每个节点均带有单根共用天线以及自干扰(SI)抵消机制.使用两类全双工无线链路如下:

1) 双向链路(Bi-links),首次传输由 A 节点至 B 节点,第二次传输由 B 节点至 A 节点,首次传输和第二次传输可同时进行,这种情况下两个节点均会遭受自干扰,需使用自干扰消除机制。

2) 单向链路(Uni-links),首次传输由 A 节点至 B 节点,第二次传输由 B 节点至 C 节点,在这种情况下只有 B 节点会遭受自干扰^[7-8]。

本文界定的网络底层系统节点的范围如图 1 所示.图 1 中,传输范围为驻留节点能够通过发送器成功破译数据包的距离;载波侦听区域为驻留节

点能够侦听到发送器传输,但无法成功破译传输数据包的距离.故将各自的网络分配向量设置为扩展帧间隔(EIFS),载波侦听区域不包括传输范围。

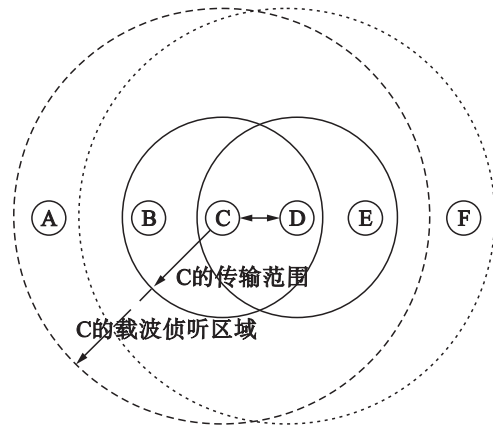


图 1 模型中底层系统的范围

Fig. 1 Scope of underlying system in model

2 提出的全双工 MAC 协议

在底层系统模型中,有 3 类不同的通信:1) 通过 Bi-links 的全双工双向通信;2) 通过 Uni-links 的全双工单向通信;3) 传统的半双工通信.鉴于数据需从 A 节点传输至 B 节点,一旦检测出通道已占用,就会开启随机回退机制.随机回退机制计时器时间一到,如果检测出通道为空,则开始传输.在最大功率(P_{\max})条件下发送向 B 节点的发送请求(RTS)数据包,以便获取通道并让其它节点知道正在进行传输。

2.1 全双工双向通信

如果 A 节点和 B 节点之间进行全双工双向通信, B 节点接收到 A 节点发送的 RTS 数据包之后,会再向 A 节点发送全双工清除发送数据包之前等待短帧间隔(SIFS).全双工-CTS 数据包包括源地址和目标地址以及首次传输和第二次传输的传输时间,需在最大功率条件下传输全双工-CTS 以便获取第二次传输时的通道,同时 B 节点也会计算出 P_{\min} ,即数据传输成功时的最小传输功率,其表达式为

$$P_{\min} = \frac{cR_x P_{\max}}{P_{rx}} \quad (1)$$

式中: P_{rx} 为接收功率; R_x 为最小接收信号强度; c 为文献[8]中提出的常量。

一旦 A 节点接收到全双工-CTS,就会计算出 P_{\min} 并回复另一个全双工-CTS,与 B 节点同步. B 节点接收到 A 节点传送的全双工-CTS 之后,在 P_{\min} 条件下开始传输数据,功率会周期性地从 P_{\min}

增加至 P_{max} , 所以侦听区域的节点无法破译传输, 但是能够检测出传输, 且两个连续功率增长间隔时间必须小于 EIFS 时间. 根据 IEEE 802.11 标准^[9], $15 \mu s$ 适合于载波侦听 $2 \mu s$ 能够使功率电平从 10% 增加至 90%, 也能够使其从 90% 减少至 10%. 因此, 认为 $20 \mu s$ 足以使功率电平从 P_{min} 增加至 P_{max} , 也能够使其从 P_{max} 减少至 P_{min} . 根据 IEEE 802.11 标准规定将 EIFS 设置为 $364 \mu s$, 每隔 $340 \mu s$ 提出的 MAC

协议节点会在最大功率条件下进行传输, 持续 $20 \mu s$, 同时累积的传输时间小于 EIFS 时间. 此外, 由于已知首次传输和第二次传输的持续时间, A 节点和 B 节点发送了确认字符 (ACK) 之后, 传输会持续较长的时间. 协议操作本质上能够致使 SIFS 持续时间不同, 协议中双向传输与单向传输示意图如图 2、3 所示 (SIFS 和 DIFS 分别为短时间帧和 802.11 标准规定的 DCF 帧间间隔).

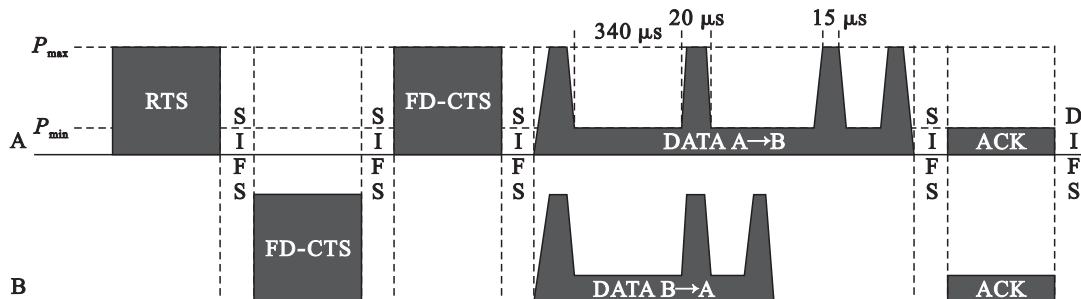


图 2 MAC 协议双向传输示意图

Fig. 2 Example of bidirectional transmission in MAC protocol

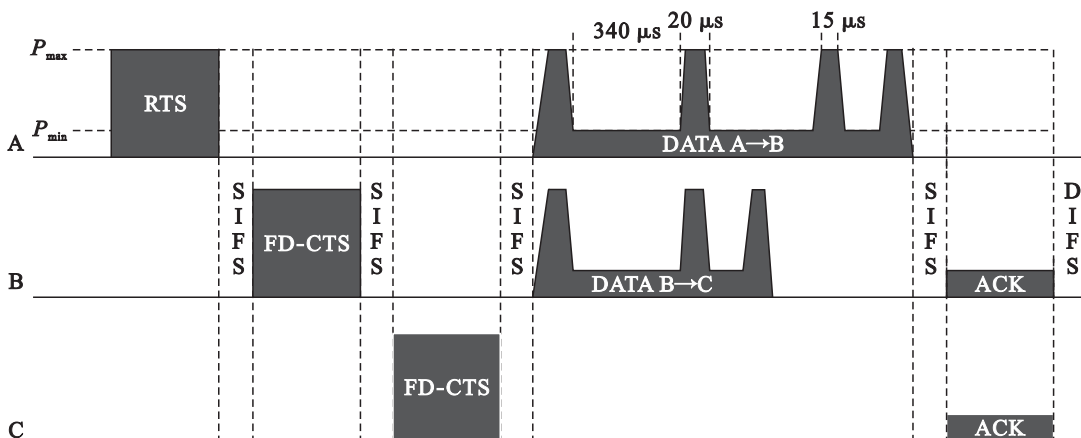


图 3 MAC 协议单向传输示意图

Fig. 3 Example of unidirectional transmission in MAC protocol

2.2 全双工单向通信

如果有数据包需要从 B 节点发送至 C 节点, 则 B 节点需根据从 A 节点得到的接收功率计算出 P_{min} , 之后会等待 SIFS, 然后在最小功率条件下将全双工-CTS 发送至 A 节点和 C 节点. 在数据传输开始前, A 节点先计算出 P_{min} , 然后等待 2SIFS 发送全双工-CTS. 如果 C 节点接收到 B 节点发送的全双工-CTS, 则需在全双工-CTS 发送到 B 节点之前先计算出 P_{min} , 之后 B 节点根据从 C 节点得到的接收功率计算出 P_{min} , 然后将其与之前 (从 A 节点获得) 计算的 P_{min} 进行比较. B 节点会使用较大的 P_{min} , 以便维持首次传输与第二次传输的连接. 在 P_{min} 条件下数据传输会在首次传输或者第二次传输时持续较长时间, 功率会周期性地从 P_{min} 增加至 P_{max} . 数据传输完成之后, C

节点会将 ACK 发送至 B 节点, 然后 B 节点再将 ACK 发送至 A 节点.

2.3 半双工通信

维持对传统半双工节点的向后兼容性十分重要. 如果 B 节点是半双工节点或者无数据包需要发送, 就会等待 SIFS, 然后将正常 CTS 发送至 A 节点. 根据标准 802.11 DCF 协议^[9-11] 继续进行半双工通信.

2.4 隐藏节点问题的解决

当 C 节点和 D 节点在半双工模式下组成发送器-接收器时 (参见图 1), F 节点存在于 D 节点的载波侦听范围, 并非 C 节点, 充当了隐藏节点. 在双向传输中, 两个节点会同时进行传输及接收; 而在单向传输中, 隐藏节点会对第二次传输的接收器产生影响, 也是本文提出全双工 MAC 协议

采用 RTS-CTS 机制的原因. 通过在最大功率条件下发送全双工-CTS, 提出的全双工 MAC 协议确保第二次传输时载波侦听范围内的节点能够意识到有数据进行传输.

3 协议性能分析

3.1 空间吞吐量分析

根据齐次泊松点方程 Φ 以及强度参数 λ , 假设节点分布在欧几里得平面 R^2 内, 若接收到的信号噪声比 γ 高于阈值 β , 即

$$\gamma(A) = \frac{P_{rx}}{N_0 + I_x} > \beta \quad (2)$$

式中: N_0 为噪声功率; I_x 为 A 节点竞争区域内其他所有传输节点的累积干扰. 则 A 节点能够准确接收并破译从 B 节点传输的数据包. 本文采用了 MAC 层竞争的改进 Matérn 模型, 在该模型中, Φ 中每个点 x 均标有独立标记 t_x , 且均匀分布在 $[0, 1]$ 范围内. 如果节点未检测出其他标记较小节点的活动, 则进行传输. x 邻近节点的传输过程可表示为

$$N(x) = \{x \in \Phi; t_x < t_y, \forall y: P_{rx} > \beta\} \quad (3)$$

接收功率可表示为

$$P_{rx} = PL(x, y) F(x, y) \quad (4)$$

式中: P 为传输功率; $L(x, y)$ 为路径损耗分量; $F(x, y)$ 为导致衰落的随机变量. 根据文献 [9] 中的概念, 平均空间吞吐量可表示为

$$\tau_{FD} = \int_0^\infty \int_0^\infty (\alpha p_{Bi} + (1 - \alpha) p_{Uni}) f_D(r, n) dr dn \quad (5)$$

式中: α 为 Bi-links 的占比; r 为发送节点与接收节点之间的距离; n 为邻近节点传输距离; p_{Bi} 和 p_{Uni} 分别为双向传输和单向传输成功的概率; $f_D(r, n)$ 为竞争区域内接收节点与邻近节点间距离的概率密度函数.

根据文献 [11] 中随机网络分析可知, 成功传输的概率为

$$P = \left(\frac{\Delta_{I_1}^{n-2}}{1 + B \left(1 - \frac{2}{\zeta_1} \right) \left(1 + \frac{2}{\zeta_1} \right) \beta^{\frac{2}{\zeta_1}} + \Gamma(\beta x, x)} \right) \cdot \left(\frac{\Delta_{I_2}^{n-2}}{1 + B \left(1 - \frac{2}{\zeta_2} \right) \left(1 + \frac{2}{\zeta_2} \right) \beta^{\frac{2}{\zeta_2}} + \Gamma(\beta y, y)} \right) \quad (6)$$

式中: Δ_{I_1} 和 Δ_{I_2} 分别为首次传输与第二次传输时, 接收器邻近干扰节点的拉普拉斯变换; ζ_1 和 ζ_2 分别为首次传输与第二次传输时节点对之间的路径损耗分量; B 为贝塔函数; Γ 函数可表示为

$$\Gamma(s) = \frac{\Theta \left(1, 1, 1 - \frac{2}{\zeta}, \frac{sx^{-\zeta}}{1 + sx^{-\zeta}} \right)}{1 + sx^{-\zeta}} - B \left(1 - \frac{2}{\zeta}, 1 + \frac{2}{\zeta} \right) s^{\frac{2}{\zeta}} x^{-2} - 1 \quad (7)$$

式中, Θ 为高斯超几何函数. 需注意, 在 Bi-links 以及 Uni-links 情况下式 (6) 均有效.

3.2 能量分析

由于存在自干扰, 需考虑全双工节点的全双工效率^[6], 即有效接收包净负载与发送包净负载的比率, 可表示为

$$\zeta = \frac{\int_0^\infty \log_2(1 + \kappa\gamma) f(\gamma) d\gamma}{\int_0^\infty \log_2(1 + \gamma) f(\gamma) d\gamma} \quad (8)$$

式中: $f(\gamma)$ 为通道的概率密度函数; $\kappa \in [0, 1]$ 为自干扰消除系数. 当 $\kappa \rightarrow 0$ 时, 自干扰会对全双工传输造成较大干扰; 当 $\kappa \rightarrow 1$ 时, 自干扰不会造成干扰. 在双向传输中, 需考虑两个节点的全双工效率. 原因在于两个节点在全双工模式下运行; 但是在单向传输中, 通常仅考虑首次传输接收节点的效率. 故有效数据包净负载 δ_{FD} 可表示为

$$\delta_{FD} = \begin{cases} \delta_{Bi} = \zeta(\delta_{FT} + \delta_{ST}) \\ \delta_{Uni} = \zeta\delta_{FT} + \delta_{ST} \end{cases} \quad (9)$$

式中: δ_{Bi} 和 δ_{Uni} 分别为 Bi-links 和 Uni-links 的有效数据包净负载; δ_{FT} 和 δ_{ST} 分别为首次传输和第二次传输时的数据包净负载; ζ 为全双工效率. 为了比较, 本文将半双工链路的有效数据包净负载表示为

$$\delta_{HD} = \frac{\delta_{FT} + \delta_{ST}}{2} \quad (10)$$

设 $E_{Bi} = E_A^{Bi} + E_B^{Bi}$ 为全双工双向成功传输期间平均消耗的能量, 其中, E_A^{Bi} 和 E_B^{Bi} 分别表示 A 节点和 B 节点消耗的能量, 其表达式为

$$E_A^{Bi} = P_{\min}(T_{\delta_{FT}} - T_{IFT} + T_{ACK}) + P_{on} T_{FDCTS} + P_{\max}(T_{RTS} + T_{FDCTS} + T_{IFT}) \quad (11)$$

$$E_B^{Bi} = P_{\min}(T_{\delta_{ST}} - T_{IST} + T_{ACK}) + P_{on}(T_{FDCTS} + T_{RTS}) + P_{\max}(T_{FDCTS} + T_{IST}) \quad (12)$$

式中: T_{RTS} 、 T_{FDCTS} 和 T_{ACK} 分别为 RTS、全双工-CTS 和 ACK 帧的持续时间; $T_{\delta_{FT}}$ 和 $T_{\delta_{ST}}$ 分别为首次传输和第二次传输有效净负载的持续时间; P_{on} 为接收模式下消耗的功率; T_{IFT} 和 T_{IST} 分别为首次传输和第二次传输时功率增至 P_{\max} 的时间.

同样地, $E_{Uni} = E_A^{Uni} + E_B^{Uni} + E_C^{Uni}$ 表示全双工单向成功传输期间内平均消耗的能量, 其分量可表示为

$$E_A^{Uni} = P_{\min}(T_{\delta_{FT}} - T_{IFT}) + P_{on}(2T_{FDCTS} + T_{ACK}) + P_{\max}(T_{\delta_{FT}} - T_{IFT}) \quad (13)$$

$$E_B^{Uni} = P_{min} (T_{\delta_{ST}} - T_{IST} + T_{ACK}) + P_{on} (T_{FDCTS} + T_{RTS}) + P_{max} (T_{FDCTS} + T_{IST}) \quad (14)$$

$$E_C^{Uni} = P_{min} T_{ACK} + P_{on} (T_{FDCTS} + T_{RTS} + T_{\delta_{ST}}) + P_{max} T_{FDCTS} \quad (15)$$

因此,总能量消耗可表示为 $E = \alpha E_{Bi} + (1 - \alpha) E_{Uni}$.

4 实验结果与分析

假设泊松分布式节点的面积为 1 500 m², 并且节点密度会发生改变,此外,RTS 数据包、全双工-CTS 数据包、CTS 数据包、ACK 数据包、PHY 头帧数据包、MAC 标头数据包以及负载数据包的帧尺寸分别设置为 277、528、240、240、128、272 以及 8 184 bit. SIFS、DIFS 以及 EIFS 的帧间间隔时间分别设置为 28、128 以及 364 μs,时间间隙设置为 50 μs,设置 $\alpha = 0.5$. 之后将其性能与标准 IEEE 802.11(半双工) DCF 协议^[9]和文献 [6]中的 RTS FCTS 协议进行了比较.

图 4 为不同协议的能量消耗比较结果,可以观察到能量消耗随着网络密度的增加而减少,原因在于传输链路较短,总传输功率减少.此外,与文献 [6]中 MAC 协议相比,提出改进 MAC 协议的平均能量消耗降低了约 44.8%,提出的改进 MAC 协议功耗明显低于传统 MAC 协议.由于各种信息的传输时间以及帧间间隔时间减少,能量消耗随着带宽的增加而增加,因此,在数据传输期间,功率会不断增加.

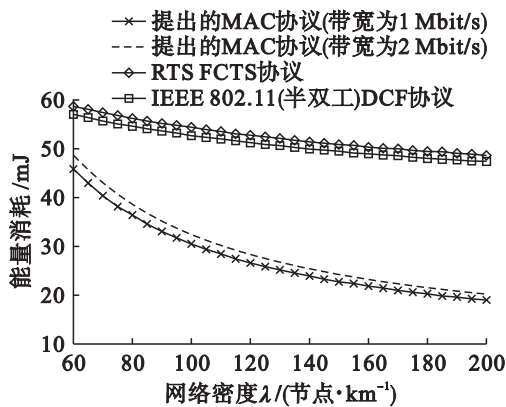


图 4 不同协议的能量消耗结果

Fig. 4 Energy consumption of different protocol

图 5 为不同协议的平均空间吞吐量性能对比结果,可以观察到提出的 MAC 协议吞吐量性能与文献 [6]在最大功率条件下传输时的性能相似.网络密度较低时,吞吐量最初呈增加趋势,此时冲突影响不显著;达到最大值之后,由于网络饱和的原因,吞吐量增加趋势开始下降.

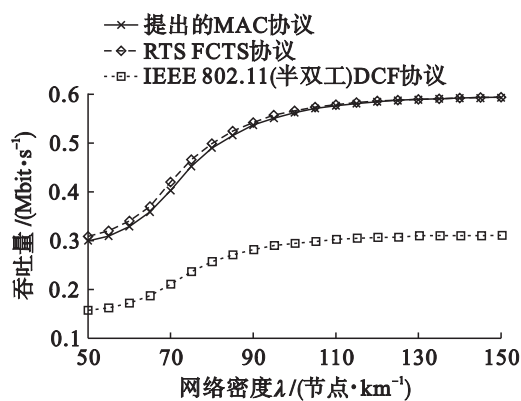


图 5 不同协议的平均空间吞吐量结果

Fig. 5 Average spatial throughput of different protocol

在全双工网络中,吞吐量变化也取决于全双工效率.不同协议下平均空间吞吐量随全双工效率变化曲线如图 6 所示.平均空间吞吐量随着全双工效率的增加而增加,当全双工效率下降到 0.75 以下时,平均空间吞吐量降至半双工系统水平.

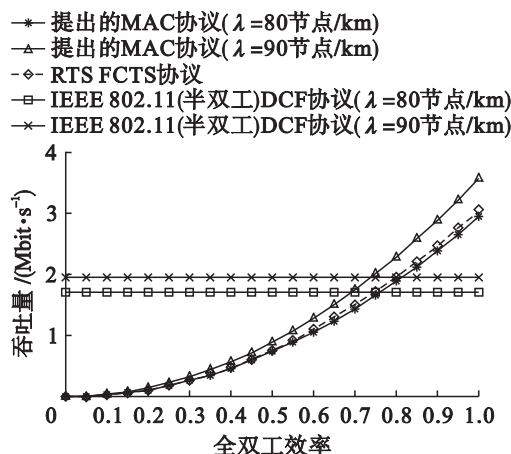


图 6 全双工效率变化时不同协议的平均空间吞吐量结果

Fig. 6 Average spatial throughput of different protocol with change of full duplex efficiency

5 结 论

本文对原有的全双工无线网络 MAC 协议进行了改进,提出了一种适用于分布式无线网络的低功耗 MAC 协议.提出的 MAC 协议支持双向链路以及单向链路,并维持对半双工节点的向后兼容性,最终利用全双工实现了较高的吞吐量,同时解决隐藏节点问题.在未减少总有效吞吐量的情况下,提出的 MAC 协议获得了较高的能量效率,性能评估结果证明了提出 MAC 协议的优越性能.

参考文献 (References):

[1] 李佳迅,张少杰,赵海涛,等.基于 USRP2 的无线网络 MAC 协议半实物仿真系统设计与实现 [J].计

- 算机应用 2015 35(8):2124-2128.
(LI Jia-xun, ZHANG Shao-jie, ZHAO Hai-tao, et al. Design and implementation of semi physical simulation system for wireless network MAC protocol based on USRP2 [J]. Computer Applications 2015 35(8): 2124-2128.)
- [2] 陈思洋,朱西平,文红.基于NCTUns的IEEE 802.11p MAC协议性能仿真[J].计算机应用 2014 34(4): 945-949.
(CHEN Si-yang, ZHU Xi-ping, WEN Hong. Performance simulation of NCTUns IEEE 802.11p MAC protocol [J]. Computer Applications 2014 34(4): 945-949.)
- [3] Tong Z, Haenggi M. Throughput analysis for full-duplex wireless networks with imperfect self-interference cancellation [J]. IEEE Transactions on Communications 2015 63(11): 4490-4500.
- [4] Ghosh A, Thomas T A, Cudak M C, et al. Millimeter-wave enhanced local area systems: a high-data-rate approach for future wireless networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 2014 32(6): 1152-1163.
- [5] Sabharwal A, Schniter P, Guo D, et al. In-band full-duplex wireless: challenges and opportunities [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 2014 32(9): 1637-1652.
- [6] Thilina K M, Tabassum H, Hossain E, et al. Medium access control design for full duplex wireless systems: challenges and approaches [J]. Communications Magazine IEEE 2015 53(5): 112-120.
- [7] 何鹏, 阎保平, 李志, 等. CM-MAC: 一种基于分簇的多信道车载网 MAC 协议 [J]. 计算机研究与发展, 2014 51(3): 502-510.
(HE Peng, YAN Bao-ping, LI Zhi, et al. A CM-MAC: based cluster based multi-channel MAC protocol for vehicular networks [J]. Computer Research and Development 2014 51(3): 502-510.)
- [8] 张轩, 刘昊, 李智群, 等. 一种超低功耗无线传感器网络 MAC 协议 [J]. 传感技术学报, 2014(11): 1527-1533.
(ZHANG Xuan, LIU Hao, LI Zhi-qun, et al. An ultra low power consumption wireless sensor network MAC protocol [J]. Journal of Sensing Technology 2014(11): 1527-1533.)
- [9] Lee Y. Throughput analysis model for IEEE 802.11e EDCA with multiple access categories [J]. Journal of Applied Research & Technology 2013 11(4): 612-621.
- [10] 肖雷蕾, 张衡阳, 毛玉泉, 等. 一种抖动窗口自适应的航空通信 MAC 协议 QoS 机制 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版) 2016 28(1): 45-52.
(XIAO Lei-lei, ZHANG Heng-yang, MAO Yu-quan, et al. A media access control protocol QoS mechanism based on adaptive jitter window in aeronautical networks [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2016 28(1): 45-52.)
- [11] 李智敏, 陈祥光. 基于异步 MAC 协议的 WSN 节点通信能耗模型的研究及应用 [J]. 北京理工大学学报 2015 35(2): 171-175.
(LI Zhi-min, CHEN Xiang-guang. Research and application of energy consumption model for WSN node communication based on asynchronous MAC protocol [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2015 35(2): 171-175.)
(责任编辑: 景 勇 英文审校: 尹淑英)