

自适应三维概率 CSMA 控制策略研究

周圣杰, 丁洪伟, 杨志军, 柳虔林

(云南大学信息学院, 云南昆明 653000)

摘 要: 对于无线传感器网络, 节点业务负载量是随着时间和环境不断变化的; 而且传统的 CSMA (Carrier Sense Multi-channel Access) 协议对于信道访问机制在自适应方面也存在不足. 针对这些特点, 本文分析了传统的载波监听多路访问 (CSMA) 协议的不足, 为解决概率型 CSMA 协议中概率难以选择的问题, 提出一种基于自适应机制的自适应三维概率 CSMA (ATDP-CSMA) 协议, 采用平均周期的方法对 ATDP-CSMA (Adaptive Three-Dimension Probability-CSMA) 协议进行建模分析, 得到了系统吞吐率的精确表达式. 仿真结果表明, 该协议不仅能够较好地适应节点业务负载量的变化, 而且在高负载时也能保持一个较稳定的吞吐率.

关键词: 自适应; 三维概率; 载波监听多路访问; 吞吐率

中图分类号: TN929. 5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)02-0440-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.02.024

Study on Adaptive Three-Dimensional Probability CSMA Control Policy

ZHOU Sheng-jie, DING Hong-wei, YANG Zhi-jun, LIU Qian-lin

(School of Information, Yunnan University, Kunming, Yunnan 653000, China)

Abstract: For wireless sensor networks, traffic load of each node is changing with time and environment; adaptive inadequate also exists in traditional Carrier Sense Multi-channel Access (CSMA) protocol for channel access mechanisms. For these characteristics, under analyzes the shortcomings of the traditional CSMA protocols, to solve the problem of difficult to select the probabilities in the probabilistic CSMA protocol, the paper proposed the adaptive three-dimension probability CSMA (ATDP-CSMA) protocol based on adaptive mechanism, using the average cycle analysis method in the analysis of ATDP-CSMA protocol model, getting the precision expression of system throughput. Simulation results show that proposed protocol not only can be well adapted to the changes of the node traffic load but also can be maintained a relatively stable throughput even at a high load.

Key words: adaption; three-dimensional probability; carrier sense multi-channel access; throughput

1 引言

由于人类对信息通信的大量探索和使用, 使得我们的通信系统不断地向着更深更广的领域发展. 无线局域网凭借其可靠的性能、较高的灵活性等独特的优势得到广泛应用. 但相对于有线局域网来说, 无线局域网的信道处于开放状态, 链路状况不稳定, 在性能和服务质量方面还有很大差距. 因此如何更好地使用其有限的资源变得越来越重要.

MAC 层的作用主要是用来提供公平、可靠、有效的调度机制来分配无线信道资源, 因此 MAC 协议性能的

好坏直接关系到无线信道的利用率和整个网络的性能. 而它也一直是国内外学者研究的重点和难点^[1].

在无线传感器网络中有很多节点, 而信道资源有限. 如果节点都毫无规律地发送信息, 那么信息分组发生碰撞的概率就会大大增加. 这时如果我们采用载波监听多路访问 (CSMA) 协议: 节点先对信道进行侦听, 然后再决定是否发送消息, 这样一来碰撞的概率就会大幅度降低.

2 三维概率 CSMA 协议模型

传统的 CSMA 协议有: 非坚持型 CSMA 协议、1-坚

收稿日期: 2015-09-06; 修回日期: 2016-02-26; 责任编辑: 马兰英

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61461053, No. 61461054, No. 61072079); 云南省自然科学基金 (No. 2010CD023); 云南大学基金 (No. XT412004)

持型 CSMA 协议、P-坚持型 CSMA 协议^[2]。但是三者都存在优缺点。

(1)非坚持型采用的是随机的重发延迟时间,这可以减少冲突发生的可能性。但是它的缺点是:如果有几个站点都有数据要发送,而大家都在延迟等待的过程中,那么信道仍可能处于空闲状态,降低信道利用率。

(2)1-坚持型只要信道状态空闲,站点立即发送信息分组,有效地避免了信道利用率的浪费;缺点是:假若有两个或两个以上的站点有数据要发送,那么冲突就会不可避免^[3]。因此,在站点的负载较大时,系统的吞吐率会有明显的下降。

(3)P-坚持型是一种既拥有非坚持型协议减少冲突的优点,也拥有 1-坚持型协议减少信道空闲时间的优势。但是,它的缺点在于概率 P 值的选择,因为它不仅要考虑到避免重负载下系统的不稳定性,还要考虑到轻负载时系统信道的利用率。如果选择 P 过大,那么可能造成多个站点同时发送信息分组,产生冲突。当然 P 值选得过小,则信道的利用率又会大大降低^[4]。

如果人为地固定设置一个 P 值,那么很显然它并不能很好地适应站点负载量及环境不断变化。因此,如果采用自适应的方法,让 P 值随着站点负载量的变化而变化,那么该协议就能达到相应负载的最大吞吐率。

为了更好的让 P 值适应不同的负载,需要对站点的各个状态进行一个较为有效的控制。在此基础上,有专家提出二维概率 CSMA 协议。该协议与传统的 CSMA 协议的区别在于当信道空闲时,以概率 P_1 发送数据;当检测信道忙时不是继续一直侦听或放弃侦听,而是以概率 P_2 继续坚持侦听^[5]。由于实际网络中延迟往往都是小于最大传输延迟 a ,即很多时候在 a 时间内有一段时间信道是处于空闲状态,因而在传输期 $1 + a$ (1 为分组发送时间)内到达的分组统一使用同一接入概率会造成一定的信道资源浪费;为了进一步提高信道利用率,提出了完全分段控制的思想,即站点的每一个不同状态都用不同的概率来接入信道^[6]。

本文在参考文献[6]中多概率联合控制随机多址协议模型的基础上,针对概率难以选择的问题,提出了自适应三维概率 CSMA 协议。该协议较前两者的优势在于:不仅能够对系统起到一个全面的概率控制,而且系统吞吐率在高负载时不会趋于 0,而是能够保持一个稳定值,这是前两者协议都达不到的效果;最后,新协议中不用针对负载变化而每时每刻都去重新设置概率的取值。

在三维概率 CSMA 协议中,将系统的时间轴按时隙进行划分,时隙长度设置为网络最大覆盖的归一化时延 a ,发送一个信息分组的时长为单位长度 1 且为 a 的整数倍,设置传输期 TP 长度为 $1 + a$ 。在信道空闲期内到达的信息分组采用概率为 P_1 的 P-坚持型策略接入

信道;而对于在信道忙期间的传输时间“1”和“ a ”内到达的信息分组则分别采用概率为 P_2 和 P_3 的 P-检测型策略接入信道^[7]。

在该协议模型中,将出现三个随机事件,分别为:

(1)信息分组成功传送(U 事件,成功事件)。

(2)信息分组发生碰撞(C 事件,碰撞事件)。

(3)没有信息分组发送,即信道空闲(I 事件,空闲事件)。

三个随机事件中,U 事件和 C 事件合并成 B 事件(忙事件)^[8]。

图 1 中,在空闲期的某个时隙内,若站点有信息分组需要发送,则该站点将在下一个时隙的起始时刻以概率 P_1 发送该信息分组,以概率 $(1 - P_1)$ 放弃发送;若放弃发送则进入休眠,在休眠随机时长后唤醒,然后再次侦听信道,直到发送成功。站点在发送信息分组的期间,若有新的信息分组到达,则在将当前信息分组发送完成后,尝试发送新的信息分组。而在忙事件的任意传输期的时间“1”内,站点有信息分组需要发送的,以概率 P_2 持续侦听信道,以概率 $(1 - P_2)$ 放弃侦听信道。在传输期的时间“ a ”内,有分组需要发送的站点,以概率 P_3 持续侦听信道,以概率 $(1 - P_3)$ 放弃侦听信道;站点在侦听到信道空闲后立即在下一个时隙的起始时刻发送该信息分组^[9]。若站点放弃侦听信道,同样进入休眠,并在随机时长后唤醒,尝试再次发送。

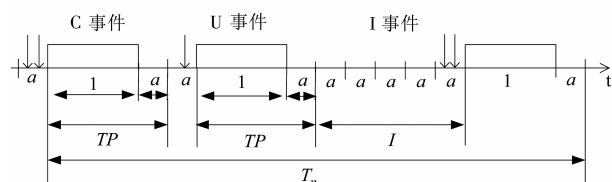


图1 基于三维概率CSMA协议的通道模型

我们都知道,概率型 CSMA 协议都可以对系统的吞吐率起到一个控制的作用。

在传统的 P-坚持型 CSMA 协议中,采用的是一个概率来对上述三个事件进行独立的控制,这样的设计会使得系统在忙时和闲时的吞吐率不能同时达到最大值。

而二维概率型 CSMA 协议中,虽然对空闲时的“ a ”和忙时“ $1 + a$ ”的两个事件进行控制,但是仍然没有将忙时的“1”和“ a ”区别对待,这样的设计也会使得系统的吞吐率得不到最全面的控制,相当于放弃了忙时“ a ”时间段对系统吞吐率有效的调节。

但是三维概率 CSMA 协议却可以对整个传输模型中的三个事件及任意时间段进行一个有效、全面的调节,从而调节系统的吞吐率能够更好的符合我们的需求。

3 系统吞吐率的分析

在开始分析前,先做如下假设:

(1)信道为理想状态,没有噪声干扰.

(2)信息分组的到达为独立泊松分布.

(3)碰撞或放弃发送的信息分组将在后面某时刻进行重传,重传的分组对信道的到达过程没有影响^[10].

根据泊松分布的规律,当信道中有 n 个信息分组到达,其概率为:

$$P(n) = \frac{(aG)^n e^{-aG}}{n!} \quad (1)$$

I 事件中,如果信道在空闲状态,站点没有信息分组发送,其概率为:

$$q_1^0 = e^{-ap_1G} \quad (2)$$

而站点只有一个信息分组发送,其概率为:

$$q_1^1 = ap_1G e^{-ap_1G} \quad (3)$$

对于 B 事件,在传输期 $(1+a)$ 内,信道在忙状态,站点没有信息分组发送,那么其概率为:

$$q_2^0 = e^{-(ap_3+p_2)G} \quad (4)$$

站点只有一个信息分组发送,其概率为:

$$q_2^1 = (ap_3+p_2)G e^{-(ap_3+p_2)G} \quad (5)$$

在一个周期 T_n 内,连续发生 i 个 I 事件的概率为:

$$P(N_I = i) = (e^{-ap_1G})^{i-1} e^{-(ap_3+p_2)G} \quad (6)$$

在一个周期 T_n 内,连续发生 j 个 B 事件的概率为:

$$P(N_B = j) = (1 - e^{-ap_1G})(1 - e^{-(ap_3+p_2)G})^{j-1} \quad (7)$$

在一个周期 T_n 内,连续发生 i 个 I 事件和 j 个 B 事件的联合概率为:

$$P(N_I = i, N_B = j) = (e^{-ap_1G})^{i-1} (1 - e^{-ap_1G}) (1 - e^{-(ap_3+p_2)G})^{j-1} e^{-(ap_3+p_2)G} \quad (8)$$

在一个周期 T_n 内, I 事件发生的平均分组数为:

$$\begin{aligned} E(N_I) &= \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} iP(N_I = i, N_B = j) \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} i(e^{-ap_1G})^{i-1} (1 - e^{-ap_1G}) (1 - e^{-(ap_3+p_2)G})^{j-1} e^{-(ap_3+p_2)G} \\ &= \frac{1}{1 - e^{-ap_1G}} \end{aligned} \quad (9)$$

在一个周期 T_n 内, B 事件发生的平均分组数为:

$$\begin{aligned} E(N_B) &= \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} jP(N_I = i, N_B = j) \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} j(e^{-ap_1G})^{i-1} (1 - e^{-ap_1G}) (1 - e^{-(ap_3+p_2)G})^{j-1} e^{-(ap_3+p_2)G} \\ &= \frac{1}{e^{-(ap_3+p_2)G}} \end{aligned} \quad (10)$$

对于离散三维概率 CSMA 协议,成功发送信息分组的情况可以分为两种.

第 1 种,信息分组在信道处于 I 状态中成功发送,其平均分组数为:

$$E(N_{U_1}) = \frac{q_1^1}{1 - q_1^0} = \frac{ap_1G e^{-ap_1G}}{1 - e^{-ap_1G}} \quad (11)$$

在该情况下,成功发送的平均分组长度为:

$$E(U_1) = E(N_{U_1}) \times 1 = \frac{ap_1G e^{-ap_1G}}{1 - e^{-ap_1G}} \quad (12)$$

第 2 种,在传输期,连续成功发送 K 个信息分组,其平均分组长度为:

$$\begin{aligned} E(U_2) &= \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{i-1} KP(N_I = i, N_B = j) \times 1 \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{i-1} K(e^{-ap_1G})^{i-1} (1 - e^{-ap_1G}) (1 - e^{-(ap_3+p_2)G})^{j-1} e^{-(ap_3+p_2)G} \\ &= (ap_3 + p_2)G \end{aligned} \quad (13)$$

因此,在一个周期 T_n 内,成功发送的信息分组长度为:

$$\begin{aligned} E(U) &= E(U_1) + E(U_2) \\ &= \frac{ap_1G e^{-ap_1G}}{1 - e^{-ap_1G}} + (ap_3 + p_2)G \end{aligned} \quad (14)$$

忙事件的平均长度为:

$$E(B) = E(N_B) \times (1 + a) = \frac{1 + a}{e^{-(ap_3+p_2)G}} \quad (15)$$

空闲事件的平均长度为:

$$E(I) = E(N_I) \times a = \frac{a}{1 - e^{-ap_1G}} \quad (16)$$

系统的吞吐率为:

$$\begin{aligned} S &= \frac{E(U)}{E(B) + E(I)} \\ &= \frac{ap_1G e^{-ap_1G}}{1 - e^{-ap_1G}} + (ap_3 + p_2)G \\ &= \frac{1 + a}{e^{-(ap_3+p_2)G} + \frac{a}{1 - e^{-ap_1G}}} \end{aligned} \quad (17)$$

4 P 值的选择

在得到系统吞吐率表达式的前提下,要得到能适应不同负载量的 P 值,可以采用求偏导的方法.即让系统的吞吐率分别对 P_1 、 P_2 和 P_3 求偏导并令其分别等于 0,联立可得到以下方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial P_1} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial P_2} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial P_3} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

由于该方程组为非线性方程组,因此无法得到精确的解析解.因而采用 Newton 型方法求解该非线性方

程组,然后得到一系列的近似解^[11].

在轻度负载的情况下,当 $G \in (0, 0.75)$ 时,概率的最优组合为 $(P_1 = 1, P_2 = 1, P_3 = 1)$; 当 $G \in [0.75, 3.75)$ 时, P_1 保持为 1, 而 P_2 和 P_3 则逐渐减小; 当 $G \geq 3.75$ 时, P_1 逐渐减小, 而 P_2 和 P_3 则分别保持为 0.16 和 0.22. 基于以上的分析,采用区间划分的思想,可求得吞吐率在取得极大值的情况下, P_1 、 P_2 和 P_3 的近似解析解^[12].

当 $G \geq 3.75$ 时, P_1 随 G 的增大而减小,不妨设 P_1 和 G 之间的关系描述如下:

$$P_1 |_{\text{MAX}(S)} = \frac{1}{\beta_1 \times G} \quad (19)$$

可以得出此时 P_1 和 G 组合情况下 β_1 取值,从而有:

$$P_1 |_{\text{MAX}(S)} \begin{cases} 1, & G < 3.75 \\ \frac{1}{0.27401G}, & G \geq 3.75 \end{cases} \quad (20)$$

同理,当 $0.75 \leq G < 2$, $2 \leq G < 3.75$ 时,设 P_2 和 G 之间的关系描述如下:

$$P_2 |_{\text{MAX}(S)} = \frac{1}{\beta_2 \times G} \quad (21)$$

同样再上式可以得出此时 P_2 和 G 组合情况下的 β_2 取值. 当 $0.75 \leq G < 2$, $2 \leq G < 3.75$ 时, β_2 随着 G 的增大而减小. 此时,用 β_2 的平均值作为 β_2 的近似值可得:

$$P_2 |_{\text{MAX}(S)} \begin{cases} 1, & G < 0.75 \\ \frac{1}{2.0192G}, & 0.75 \leq G < 2 \\ \frac{1}{1.2421G}, & 2 \leq G < 3.75 \\ 0.16, & G \geq 3.75 \end{cases} \quad (22)$$

同理,当 $0.75 \leq G < 2$, $2 \leq G < 3.75$ 时,设 P_3 和 G 之间的关系描述如下:

$$P_3 |_{\text{MAX}(S)} = \frac{1}{\beta_3 \times G} \quad (23)$$

同样再上式可以得出此时 P_3 和 G 组合情况下的 β_3 取值. 当 $0.75 \leq G < 2$, $2 \leq G < 3.75$ 时, β_3 随着 G 的增大而减小,同样用 β_3 的平均值作为 β_3 的近似值可得:

$$P_3 |_{\text{MAX}(S)} \begin{cases} 1, & G < 0.75 \\ \frac{1}{20.3521G}, & 0.75 \leq G < 2 \\ \frac{1}{10.1042G}, & 2 \leq G < 3.75 \\ 0.22, & G \geq 3.75 \end{cases} \quad (24)$$

5 计算机仿真实验与结果分析

基于以上的分析,采用 Matlab R2010a 仿真软件对 ATDP-CSMA 协议下的通信系统进行仿真. 整个仿真过程中,时延为 $a = 0.01$,分组长度为 1.

图 2 中,可以看出三维概率 CSMA 协议中 P_1 、 P_2 和 P_3 的改变对系统吞吐率的影响.

随着 P_1 的不断增大,站点在信道空闲的状态下发送信息分组成功的概率也不断变大,信道的利用率得到提高,使得系统的吞吐率也会增加. 但是随着信息分组到达率 G 的快速增大,系统的吞吐率也会迅速下降,最后趋于 0.

与 P_1 对系统吞吐率的影响恰好相反,随着 P_2 的不断增大,站点在信道忙的状态下发送信息分组的概率不断变大,此时就会造成更为严重的信息分组冲突,信道的利用率大大降低,此时系统的吞吐率也随之变小. 而且随着信息分组到达率 G 的不断增大,系统的吞吐率也会迅速下降,最后也趋于 0.

与 P_2 对系统吞吐率的影响相同,随着 P_3 的不断增大,站点在信道忙的状态下发送信息分组的概率不断变大,信息分组冲突的概率也增大,从而也会导致吞吐率下降.

该仿真效果验证,通过 P_1 来调节系统的吞吐率是可行的,而且在负载均衡的情况下,系统的吞吐率随着 P_1 的增加而增加; 而通过 P_2 来调节系统的吞吐率也是可行的,而且在负载均衡的情况下,系统的吞吐率随着 P_2 的增加而变小; 最后,通过 P_3 来调节系统的吞吐率也是可行的,而且在负载均衡的情况下,系统的吞吐率随着 P_2 的增加而变小. 同时,我们发现, P_3 对系统吞吐量的影响程度相较于 P_1 和 P_2 的程度要小一些.

通过图 2 还可以看出,可以通过 P_1 、 P_2 和 P_3 调节系统的吞吐率,三者的联合控制可以使得系统的性能不断提升,而且如果找到临界点,会使得系统的吞吐率达到最大值. 但是,不论如何调整三者的值,系统的吞吐率都会随着信息分组到达率 G 的迅速增加而快速下降,最后趋于 0.

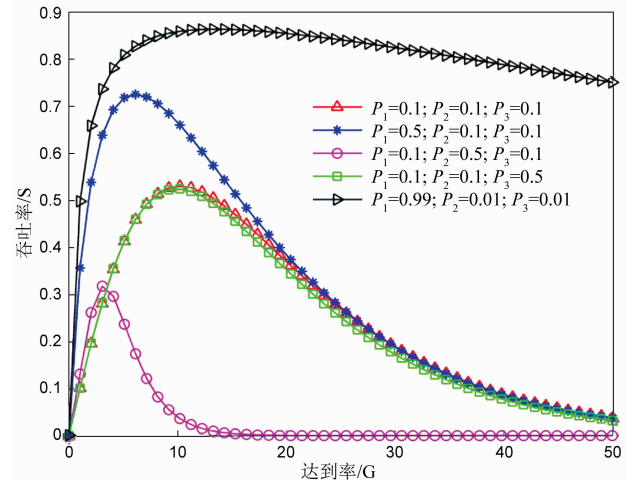


图2 三维概率CSMA协议下不同概率取值时的系统吞吐率对比图

在对 ADTP-CSMA 协议仿真时,通过式(20)、式(22)和式(24)中三个概率的取值范围预先设定,如果负载发生变化,那么三个概率的值也会按照其相对应的公式进行调整。

从图3中可以看出,加入自适应机制后,系统的吞吐率在信息分组到达率达到3.75左右时就趋于稳定,而后随着负载量的不断增加,系统的吞吐率都维持一个定值,此时系统进入一个稳态.这是因为在自适应系统中,概率 P_1 、 P_2 和 P_3 在整个工作过程中可以实时根据网络负载的情况,动态调整到令吞吐率达到较优的概率组合,保证系统吞吐率能够在网络较重负载的情况下仍能保持较大的吞吐率,可见系统具有较强的稳健性。

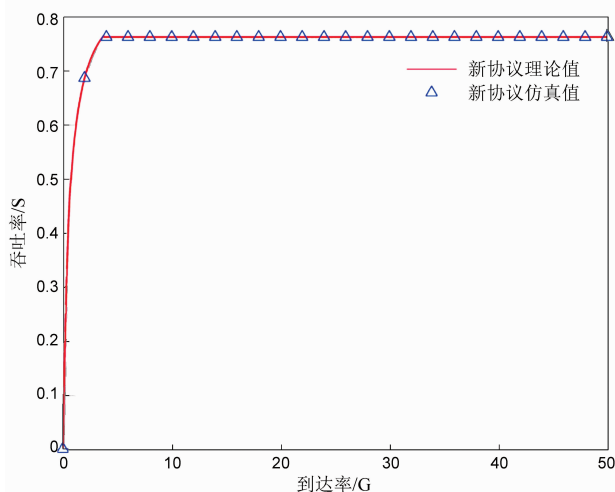


图3 ADTP-CSMA协议下的系统吞吐率

在图4中,对非坚持-CSMA、1坚持-CSMA、 p 坚持-CSMA、二维概率CSMA、三维概率CSMA和自适应三维概率CSMA(ATDP-CSMA)六种协议的吞吐率进行对比.从对比图中可以看出,自适应三维概率CSMA协议比三维概率CSMA和1坚持-CSMA协议的吞吐率要更有优势.而对于非坚持-CSMA协议,虽然在轻负载的情况下(信息分组到达速率小于45左右),非坚持型CSMA协议会稍稍比自适应三维概率CSMA协议的吞吐率要大一些,这是因为新协议中概率自适应的范围是提前设定,因此在该阶段的概率对于负载的变化未能及时更新,然而这也是为了使系统更加稳定而设定的概率值:系统在信息分组到达率达到3.75以后就会进入一个稳态,此时吞吐量保持一个稳定值.如果我们一味追求系统高的吞吐率,那么系统进入稳态的时间会来的更迟,因此我们将进入稳态调整到最早的时间.但是在信息分组到达速率增大时非坚持型CSMA协议的吞吐率也会随之减小,当信息分组到达速率大于45后,该协议下的系统吞吐率就会比自适应三维概率CSMA

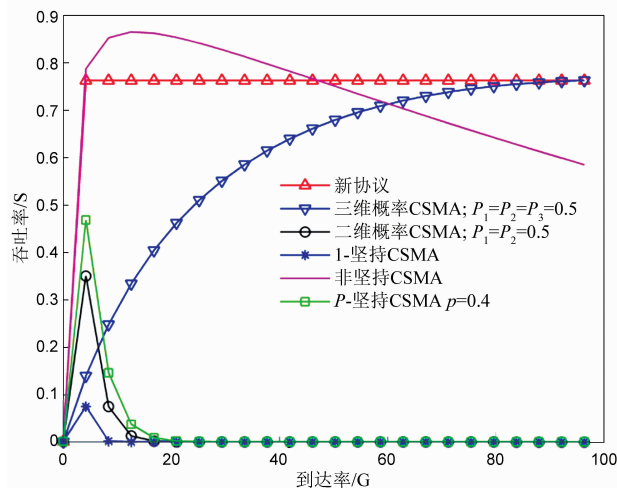


图4 四种不同协议吞吐率对比图

的系统吞吐率要小,最终非坚持型CSMA协议和三维概率CSMA协议也会像其他没有加入自适应机制的协议一样,系统吞吐率都会趋于0.因此,新协议对于网络在重负载时更有优势。

我们也可以发现,系统进入稳态时的信息分组到达率临界值是可以设定的,而该系统现在是设定在进入稳态的最小值。

6 结论

本文在离散时间三维概率CSMA协议的基础上,提出了自适应三维概率CSMA协议.采用该协议后,系统能够根据信道负载的轻重,自适应地实时动态调整发送概率 P_1 、检测概率 P_2 和 P_3 ,使其能够达到较优的概率组合,从而保证了系统吞吐率在重负载的情况下仍能保持较高的系统吞吐率,大大地改善了无线通信系统的性能.同时,仿真实验结果表明理论分析和仿真实验的一致性与合理性.通过比较不同协议的系统吞吐率,说明离散时间自适应三维概率随机多址协议系统较其它三种协议在重负载的情况下更具有优势。

参考文献

- [1] Li Tao, et al. The discrete time non-persist csma protocol based on binary tree conflict resolution with functions of monitoring in IOT [A]. 2014 International Conference on Transportation Systems and Intelligent Control [C]. Bangkok: WIT PRESS. 2014. 93 - 100.
- [2] Zhou Sheng-jie, et al. Research on the discrete time three-dimensional probability CSMA protocol in ad-hoc network [J]. International Journal of Recent Scientific Research. 2015, 6(5): 4257 - 4262.
- [3] Zhou S J, et al. The discrete time non-persistent csma protocol with functions of monitoring and multichannel mecha-

- nism based on binary tree conflict resolution in wsn [A]. International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications [C]. Bangkok: ATLANTIS PRESS, 2015. 118 - 121.
- [4] 梁华,陈振. 非坚持型 CSMA 与坚持型 CSMA 退避算法的性能分析与比较[J]. 计算技术与自动化:自然科学版,2006,3(25):51-53.
Hua Liang, Zhen Chen. Function analysis and comparison between no persistent CSMA and persistent CSMA [J]. Computing Technology and Automation: Natural Sciences, 2006,3(25):51-53. (in Chinese)
- [5] 余明辉,林琳,赵东风. 自适应多通道二维概率型时隙式随机多址无线通信网络协议分析[J]. 云南大学学报:自然科学版,2009,31(3):232-237.
She Ming-hui, Lin Lin, Zhao Dong-feng. Analysis of adaptive two-dimensional probability multi-channel and slotted random multiple-access protocol for wireless communication network [J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences, 2009,31(3):232-237. (in Chinese)
- [6] 黄炜皓. 多概率联合控制随机多址接入无线传感器网络 MAC 协议分析[D]. 云南大学,2010.
Huang Wei-hao. Analysis of multi-probability joint control multi-channel random-access MAC protocol for wireless sensor networks [D]. Yunnan University, 2010. (in Chinese)
- [7] 杨志军,丁洪伟,陈传龙. 完全服务和门限服务两级轮询系统 $E(x)$ 特性分析[J]. 电子学报,2014,42(4):774-778.
Yang Zhi-jun, Ding Hong-wei, Chen Chuan-long. Research on $E(x)$ characteristics of two-class polling system of exhaustive-gated service [J]. Acta Electronica Sinica, 2014,42(4):774-778. (in Chinese)
- [8] 毛秀伟,吴铁军. 自适应 p 持续 CSMA/CD 介质访问控制策略[J]. 通信学报,2003,24(8):161-167.
Mao Xiu-wei, Wu Tie-jun. An adaptive algorithm for p-persistent CSMA/CD policy [J]. Journal on Communications, 2003,24(8):161-167. (in Chinese)
- [9] Guo Ying-ying, et al. Research on the multi-channel p-persistent CSMA protocol with monitoring function [J]. International Journal of Future Generation Communication and Networking, 2015,8(5):115-124.
- [10] Ding Hong-wei, et al. The multichannel PD-CSMA with 3-way handshake based on conflict resolution algorithm in WSN [J]. International Journal of Recent Scientific Research, 2015,4(6):3714-3718.
- [11] Yi Shang, et al. Flexible energy efficient density control on wireless sensor networks [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2007,3(1):101-120.
- [12] Ding Hong-wei, et al. Research on the multi-channel probability detection CSMA protocol with monitoring function [J]. Sensor Lett, 2015,13(2):143-146.

作者简介



周圣杰 男,1988年2月出生,广西玉林人.2011年在云南大学信息学院获得工学学士学位.现为云南大学信息学院在读硕士,主要研究方向为随机多址系统.

E-mail:814627093@qq.com



丁洪伟 (通信作者) 男,1964年6月出生,江西于都人.现为云南大学信息学院教授,硕士生导师.主要研究方向为随机多址系统和轮询多址系统.

E-mail:dhw1964@163.com