一种改进的多跳网络802.11 DCF分析模型

王 炫[1] 张文柱[2] 周 慧[1]

(西北电网有限公司 西安 710048)[1] (西安电子科技大学信息科学研究所 西安 710071)[2]

摘 要 提出了一种改进的多跳环境下的IEEE 802.11 DCF分析模型。新模型考虑了多跳网络中,发送和接收节点之间进行分组交换时,即使在RTS/CTS握手成功的情况下,仍然会出现由于邻节点干扰而导致后续帧交换失败的因素,对成功传输条件做了更为严格的约束,从而修正了原模型中的一个重要缺陷。对两个模型所做的仿真验证结果表明,新模型具有比原模型更好的准确性。

关键词 Ad Hoc网络,路由协议,MAC协议

中图法分类号 TN915.04 **文献标识码** A

Enhanced Analytical Model for 802.11 DCF Multi-Hop Ad Hoc Networks

WANG Xuan[1] ZHANG Wen-zhu[2] ZHOU Hui[1]

(Northwest China Grid Company Limited, Xi'an 710048, China)[1]

(Research Institute of Information Science, Xidian University, Xi'an 710071, China)[2]

Abstract An enhanced IEEE 802.11 DCF analytical model for multi-hop networks was proposed. The new analytical model takes some new factors into account, that in multi-hop network environments, an entire packet exchange between sender and receiver may fail because of interferences from their neighbor nodes, even if RTS/CTS frames have been exchanged successfully before. It suggests more rigorous conditions for a successful packet exchange, thus corrects a important defect of the original analytical model. Simulation results prove that the enhanced model has better precision than the original one.

Keywords Mobile Ad Hoc network, Routing protocol, MAC layer protocol

近年来,IEEE 802.11已经成为无线局域网和Ad Hoc网络的一个最主要的国际标准。在该协议中,基本的接入机制是分布式协调功能(DCF),它是一个基于带有冲突避免机制的载波监听(CSMA/CA)随机接入方案。自该标准被提出以来,对它的性能分析成为研究焦点。一些研究[1,2]采用仿真手段进行了性能评估。而更多的研究倾向于使用数学模型的方法进行分析,这有利于对网络和协议更深层次的理解。例如:文献[3-6]通过简化退避规则的模型进行分析,而文献[7-9]使用基于Markov链的模型来描述802.11 DCF所有的指数退避协议细节,并允许计算单跳网络饱和条件下的吞吐量性能。以上的研究集中关注单跳、全连通网络的场景,并且已经取得了重要的进展。

随着Ad Hoc网络技术在军事、商业、传感器网络等方面的应用受到关注,作为主流接入协议之一的802.11 DCF,在多跳网络中的性能研究也显得更加必要。本文在分析相关研究工作[10-15]的进展和局限的基础上,提出了一种改进的IEEE 802.11 DCF多跳网络分析模型,并通过仿真验证了该模型的准确性。

1 多跳网络中的IEEE 802.11 DCF性能分析

在多跳Ad Hoc网络中,由于存在隐藏终端问题及空间复用问题,使得构造分析模型的工作非常困难。在已有一些采用数学分析方法进行的多跳网络性能研究中,或者是在不针对任何具体协议的理想条件下进行网络性能评估[10],或者是以相对简单的Slotted ALOHA或CSMA接入协议为研究目标[14,15]。IEEE 802.11 DCF中由于增加了握手、应答、指数退避等过程和虚载波监听(恢复)机制,使得构造能够准确描述其行为的数学模型更加困难,目前仅在饱和的一跳网络条件下有比较成熟的分析模型,而多跳网络中的分析模型仍然很不完善。

在所有与802.11 DCF相关的研究工作中,文献[7]开创性地使用了基于二维Markov链的模型来描述802.11 DCF,并使用该模型分析和评估了一跳网络中的饱和吞吐量。由于该模型很好地描述了所有的指数退避协议细节,并且通过仿真证明了其具备很好的精确性,使得其后很多关于WLAN网络的研究主要基于该模型,并且产生了多种改进和变形的分析模型[8,9]。

文献[10]则使用一个高度抽象的模型分析了多跳网络的性能界限。该模型的一个重要缺陷是它缺少参数化的网络特性描述,并且引入了一些在现实环境中无法实现的假设条件(如:理想的时间安排调度方案,不考虑碰撞问题等)。其研究方法和研究结果无法直接应用于现实的网络设计和性能分析

到稿日期:2008-09-19

王 炫(1973-),男,博士,主要研究领域为无线Ad Hoc网络和个人通信系统,E-mail:wangx@nw.sgcc.com.cn;张文柱(1970-),男,博士,副教授,主要研究领域为无线Ad Hoc网络的协议设计和移动通信网;周 慧(1968-),女,高工,主要研究领域为电力系统应急通信技术。

中。

文献[11]中,给出了 IEEE 802.11 多跳无线网络中的信道容量分析。该方法提出两个新的概念"deferral set"和"equivalent competitor",将多跳环境等效为单跳 WLAN 网络来分析网络性能。其缺陷是:模型可扩展性差,无法反映出路由协议(策略)对接入性能的影响;另外,这种等效方法本身无助于对 Ad Hoc 网络的空间特性以及不同系统参数之间关系的更深层认识。

文献[12]使用了类似文献[7]中的二维马尔可夫链模型来描述网络节点的退避特性和 IEEE 802.11 DCF 的完整接入过程。同时考虑了多跳环境下节点的空间分布、隐藏终端、空间复用等因素对分组传输成功概率的影响。尽管该分析模型在逻辑上仍有一些漏洞,但其具有较好的结构和扩展余地,本文选择在其基础上进行改进。为方便描述,下面将该分析模型称为原模型。

2 原模型的基本原理和存在的缺陷

按照文献[7]的思路,一个节点的行为完全可以用节点的发送状态转移图和节点所检测到的信道状态来描述。由于该过程反映的是节点内部退避计数器的变化规律,仅仅与节点对信道状态的感知有关,因此,节点无论处于单跳或多跳环境下,该退避模型都是适用的。文献[12]借鉴了文献[7]的思路,将节点的发送状态以及 802.11 DCF 的退避机制使用马尔可夫链的方法来描述。在此前提下,如果能够求出在多跳网络环境中,节点发送分组时的失败概率 p、信道检测忙概率 P_r 以及节点检测到信道空闲的平均时间间隔 $\bar{\sigma}$ 等参数之间的关系,就可以完成在多跳环境下分析模型的构建工作。

与单跳网络不同的是,在多跳网络中发送和接收节点通常不会覆盖同样的区域,因此各个节点监听到的信道状态是不同的,对基于载波监听的 MAC 协议来说,这会造成接入过程中的碰撞概率增加。图 1 所示的是一个多跳网络的拓扑示例,节点 S,D 分别为发送和接收接点。为了方便描述,本文沿用文献[12]中定义的几个术语和符号。

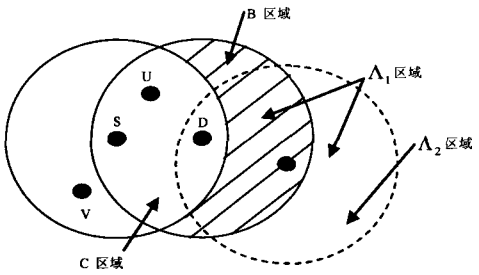

图 1 网络节点位置关系示意图

1)把接收节点的干扰区域中没有暴露给发送节点的部分称为"接收节点独占区"(图中阴影区域,简称 B 区域),而把发送节点和接收节点的干扰区的相交部分称为 C 区域。

2)Tv:易受攻击时间段。它指的是一次通信过程中,容易受到干扰的时间段的长度,如果在这段时间内没有干扰发生,分组传输就会成功。

3)MSG1:指发送节点发起通信时发送的第一个消息。

4)MSG2:指接收节点回答发送节点的 MSG1 时所发送的消息。

例如在 802.11 DCF 的 RTS/CTS 模式下,MSG1,MSG2 分别指的是 RTS 和 CTS 消息。而在基本模式下,则分别指的是 DATA 分组和 ACK 消息。

文献[12]分析认为,如果节点 S 在某个时隙发送 MSG1 来发起一次通信过程,则当且仅当以下条件都满足时,这个传输是成功的:1)在接收节点独占区域内,没有节点处于正在进行通信的工作状态,否则接收节点将会检测到信道忙;2)在 C 区域中,没有节点在同一时隙中发送 MSG1 消息;3)在 C 区域中,没有节点在同一时隙中发送 MSG2 消息;4)在整个 Tv 时间段内,在接收节点独占区域中没有节点发起 MSG1 消息;5)在整个 Tv 时间段内,在接收节点独占区域中没有节点发起 MSG2 消息。我们将上述的事件称为 event1 到 event5。

在以上分析的基础上推导出的 802.11 DCF 多跳网络分析模型,可以通过包含 12 个参数的方程组来表达。其中求发送失败概率 p 的表达式如下:

$$p=1-\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(1-\tau_i)}{n}\right)^{(1-\Gamma)n}\cdot\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(1-\tau_i)}{n}\right)^{n_r\frac{Tv}{\bar{\sigma}}}\cdot\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(1-\tau_i+\tau_i p_i)^{\Gamma_i}}{n}\right)^{(n\Gamma-n_r)\frac{Tv}{\bar{\sigma}}}\cdot\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}p_{msi}}{n}\right)^{n_r} \quad (1)$$

由于篇幅限制,对详细的推导过程和完整的模型不再描述。

3 原模型中存在的缺陷

原模型中提出了确保传输成功的 5 个条件(event1－event5),并认为只要这些条件同时得到满足,传输就能取得成功。然而这种假设与实际不符合,会导致对于网络性能的估计过高。

经过分析可看出:在这 5 个条件中,event1 保证了在节点 S 发起传输的时刻,接收节点 D 正处于空闲状态并且检测到的信道状态也是空闲的;其余的 4 个条件(event2－event5)则保证了,在 S 节点发送 RTS 信号期间,接收节点 D 周围的邻节点不会产生任何新的发送事件。可以看到,当以上 5 个条件同时满足时,能够保证节点 D 正确接收 RTS 信号,并发送 CTS 帧回应发送节点。即,这 5 个条件是保证 RTS/CTS 握手成功的充要条件。

在一些对单跳 802.11 DCF 网络进行分析的文献中,通常认为分组的碰撞仅仅会发生在 RTS/CTS 交换期间。一旦 RTS/CTS 握手成功,就建立起了信道的预约。由于虚载波监听机制的作用,网络中的其它邻节点会在随后的 DATA 帧和 ACK 帧传输期间保持静默状态,不可能再发起新的传输而与当前正在进行中的传输发生碰撞。因而,RTS/CTS 握手成功就意味着一次完整的传输过程必然成功。

而在多跳网络中,由于存在虚载监听机制失效的问题,上述的分析就不再成立了。在 802.11 DCF 的虚载波监听机制下,网络节点通过监听信道,分析监听帧中的信道预约时长(NAV)信息来获取信道忙闲状态。显然,只有能够正确监听信道上传送的帧,虚载波监听机制才能发挥作用。以图 1 中节点 S 向节点 D 发送数据的过程为例,如果节点 S,D 的某些邻节点不能正确接收到 RTS 或 CTS 帧,则它们不能获取当前正在进行中的 S-D 传输事件的信息,因而对信道状态产生错误判断。本文中这些节点称为发送节点或接收节点的莽撞邻节点,这些节点有可能在任何时刻发起自己的传输(或作为接收节点响应其他节点发起的传输),并与当前正在进行中

的 S-D 传输发生碰撞。由此可见，在多跳网络中，即使发送节点和接收节点之间 RTS/CTS 消息交换成功，也不能保证整个传输过程最终会成功。

多跳网络的一个特点是允许信道进行空间复用，即在某一时刻，网络中不同区域中可能进行着多个传输。如图 2 中所示，当传输节点 S，D 之间进行 RTS/CTS 握手时，邻节点 X 可能处于其他正在进行通信的节点（例如：节点 S' 和 D'）的干扰范围内。若发生冲突，X 节点无法正确接收到节点 D 发出的 CTS 消息，则应使它成为 D 节点的莽撞邻节点。

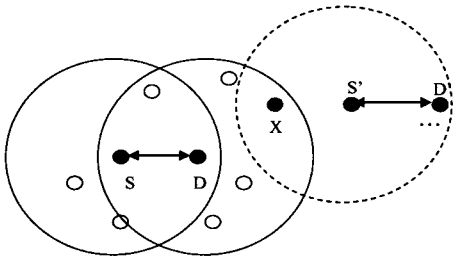

图 2　虚载波监听机制失效示意

以图 3 所示的 802.11 DCF 的帧交换过程为例，假设节点 X 没有正确收到节点 D 发送的 CTS 消息帧，则它在 EIFS 延时之后，会认为信道空闲，如果此时节点内有分组准备发送，它将在延时后开始自己的发送过程。如果忽略 EIFS 时延造成的影响，则可以认为当节点 D 发送完 CTS 帧后，其莽撞邻节点 X 在整个 DATA 帧传输期间随时都有可能进行新的传输尝试，这将造成节点 D 接收（节点 S 发送的）DATA 帧失败。由于 DATA 帧的长度通常远远大于控制帧，这种事件发生的概率不可忽视。

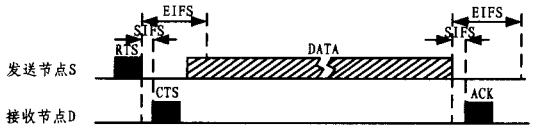

图 3　帧交换过程示意图

基于以上分析，我们认为原模型中的 5 个条件不能保证传输成功。在考虑了莽撞邻节点的干扰因素后，应该在其基础再增加两个条件：evevt6：在 DATA 帧的传输时间段内，接收节点独占区域内没有莽撞邻节点会发起新的 RTS 控制帧的传输；event7：在 DATA 帧的传输时间段内，接收节点独占区域内没有莽撞邻节点会发起 CTS 控制帧的传输。

4　模型的改进

由于保证传输成功的约束条件新增加两个，原模型中计算分组传输失败概率的公式不再适用。前文的分析中看到，如果 event1 － event5 这 5 个条件不能同时满足，则会导致 RTS/CTS 握手失败，我们将这个失败事件的发生概率用 P_{C1} 来表示，以便与最终的分组传输失败概率 p 相区别。

在 RTS/CTS 握手成功后，还必须保证 event6，event7 同时成立才能保证传输成功。这个概率我们用 $P(E6 \cap E7)$ 来表示。

$$P(E6 \cap E7)=P(E6) \cdot P(E7|E6) \tag{2}$$

$P(E6)$：如果用 T_{data} 表示 Data 帧发送的时间长度，则某个莽撞邻节点 i 在 T_{data} 时间长度内不会发起传输的概率为 $(1-\tau_i)^{T_{data}/\bar{\sigma}}$。设 n_m 为接收节点独占区域中莽撞邻节点的平均数量，则这些节点在 T_{data} 时间长度内都不发起传输的概率为 $(1-\tau_i)^{n_m \cdot T_{data}/\bar{\sigma}}$。

$P(E7|E6)$ 表示在 event6 事件已经发生的条件下 event7 事件发生的条件概率。发生 event6 事件，意味着在接收独占区域中没有节点能够发起 RTS 传输，在此条件下，如果某个莽撞邻节点 i 还能发送 CTS，则必定是满足以下两个条件：1）在网络中有某个发送节点曾经向 i 节点发起过 RTS 传输，i 节点接收正确且能够进行 CTS 帧的响应；2）该发送节点必定处于接收独占区域之外。

由此可以推导出，在 event6 事件发生的条件下，莽撞邻节点 i 在一个广义时隙长度 $\bar{\sigma}$ 内发起 CTS 传输的概率为 $(\Gamma \cdot \tau_i(1-P_{C1}))$；因而在长度为 T_{data} 的时间段内，n_m 个莽撞邻节点都不发送 CTS 的概率为：

$$P(E7|E6)=(1-\Gamma \cdot \tau_i(1-P_{C1}))^{n_m \cdot T_{data}/\bar{\sigma}} \tag{3}$$

综合上面的分析，可以求出新的传输失败概率 p 表达式：

$$\begin{aligned} p &= 1-(1-P_{C1}) \cdot P(E6 \cap E7) \\ &= 1-\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(1-\tau_i)}{n}\right)^{(1-\Gamma)n} \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(1-\tau_i)}{n}\right)^{n_r \frac{T_V}{\bar{\sigma}}} \cdot \\ &\quad \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(1-\tau_i+\tau_i p_{C1i})^{\Gamma_i}}{n}\right)^{(n\Gamma-n_r)\frac{T_V}{\bar{\sigma}}} \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} p_{msi}}{n}\right)^{n_r} \cdot \\ &\quad \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(1-\tau_i)}{n}\right)^{n_m} \cdot T_{data}/\bar{\sigma} \cdot \\ &\quad \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(1-\Gamma\tau_i(1-P_{C1i}))}{n}\right)^{n_m \cdot T_{data}/\bar{\sigma}} \end{aligned} \tag{4}$$

5　模型的仿真验证

为了评估改进后的 802.11 DCF 多跳分析模型的准确性，我们使用 NS-2 仿真工具进行了仿真。

仿真场景如下：

- 在 1000 * 1000 平方米区域中随机均匀地放置 100 个节点；
- MAC 层接入协议使用 IEEE 802.11 DCF，与 MAC 层和物理层相关的主要仿真参数如表 1 所列。

表 1　主要 MAC 层的参数设置

参数名称	参数值
信道速率	1Mbps
物理时隙长度 σ	20μs
SIFS 帧间隙	10μs
DIFS 帧间隙	50μs
物理层 PHY 头大小	192 比特
MAC 头大小	144 比特
数据帧净负荷大小	8192 比特
RTS 帧大小	352 比特
CTS 帧大小	304 比特
ACK 帧大小	304 比特
分组最大重传次数	7 次
最大退避级数	5 次

- 网络处于饱和条件下，每个节点在任何时候都有等待发送的分组；
- 业务均匀，每个节点等概率地向其它所有节点发送，且业务量相同；
- 所有节点拥有相同的传输半径 R；

·物理层模型不考虑捕获问题，在接收节点的传输覆盖范围内，如果有两个以上的发送节点同时发送，则导致接收节点处发生碰撞和传输失败；

·网络节点使用相同的路由协议，不考虑多种路由策略混合使用的问题。

仿真中我们将节点的通信半径依次设置为 150 米、175 米、200 米、225 米、250 米和 300 米。网络中节点使用的路由策略是 MFR 和 NFP[14,15]，在 MFR 策略下，节点在转发分组的时候，倾向于选择距离自己较远的邻节点作为自己的下一跳转发节点；在 NFP 策略下则相反。

统计的指标为节点平均一跳吞吐量，即单位时间内每个节点能够接入信道并成功进行传输的时间片段所占比例的平均值。仿真结果如图 4 和图 5 所示。

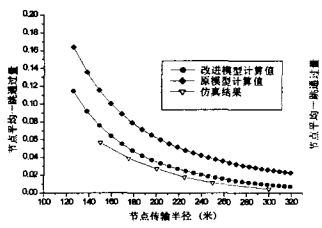

图 4 MFR 路由策略下节点一跳吞吐量

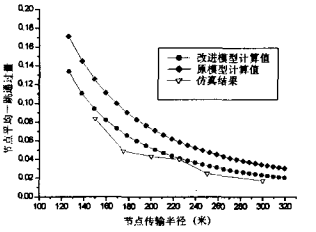

图 5 NFP 路由策略下节点一跳吞吐量

从图中看到，在网络饱和的条件下，原分析模型计算出的节点平均吞吐量明显高于实际的仿真结果。这是因为原模型中的对于传输成功条件的分析过于宽松，它认为只要 RTS/CTS 握手成功，就能成功地预约信道，并保证后续的 DATA/ACK 帧交换成功。实际上，在多跳网络中，如果虚拟载波监听机制失效，接收节点独占区域中的节点是有可能造成 DATA 帧碰撞而导致传输失败的，因此该分析模型高估了 802.11 DCF 在多跳网络中的性能。

在我们的新模型中修改了这一缺陷。从仿真结果可以看出，在两种路由策略条件下，使用新模型分析得到的结果与仿真结果更加接近，准确性有了明显提高。

结束语 本文提出了一种改进的多跳环境下的 IEEE 802.11 DCF 分析模型，它是在原模型基础上，对传输成功条件进行了更为严格的约束后推导得到的。仿真验证结果表明，新模型具有更好的精确性，因而使用该模型所做的研究对实际 Ad Hoc 网络的分析、设计和优化工作具有很好的指导意义。

参 考 文 献

[1] Crow B P. Performance Evaluation of the IEEE 802.11 Wireless Local Area Network Protocol[D]. Tucson: Univ. Arizona, 1996

[2] Weinmiller J, Schlager M, Festag A, et al. Performance Study of Access Control in Wireless LANs IEEE 802.11 DFWMAC and ETSI RES 10 HIPERLAN[J]. Mobile Networks and Application, 1997, 2(2): 55-67

[3] Chhaya H S, Gupta S. Performance Modeling of Asynchronous Data Transfer Methods of IEEE 802.11 MAC Protocol[J]. Wireless Networks, 1997, 3(3): 217-234

[4] Ho T S, Chen K C. Performance Evaluation and Enhancement of the CSMA/CA MAC Protocol for 802.11 Wireless LAN's[A]//Proc. of IEEE PIMRC[C]. Taipei: IEEE Press, 1996: 392-396

[5] Cali F, Conti MGregori E. IEEE 802.11 wireless LAN: Capacity analysis and protocol enhancement[A]//Proc. of INFOCOM'98[C]. San Francisco: IEEE Press, 1998

[6] Bianchi G, Fratta L, Oliveri M. Performance Analysis of IEEE 802.11 CSMA /CA Medium Access Control Protocol[A]//Proc. of IEEE PIMRC[C]. Taipei: IEEE Press, 1996: 407-411

[7] Bianchi G. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function[J]. IEEE Journal on Selected Area in Comm., 2000, 18(3): 103-112

[8] Bianchi G. IEEE 802.11 Saturation Throughput Analysis[J]. IEEE Comm. Letters, 1998, 2(12): 13-15

[9] Wu Haitao, Peng Yong, Long Keping, et al. Performance of Reliable Transport Protocol over IEEE 802.11 Wireless LAN: Analysis and Enhancement[A]//Proc. of INFOCOM 2002[C]. IEEE Press, 2002: 599-607

[10] Gupta P, Kumar P R. The capacity of wireless networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(2): 388-404

[11] Fang Y, McDonald A B. Theoretical Channel Capacity in Multihop Ad Hoc Networks. Local and Metropolitan Area Networks[A]//Proc. of LANMAN 2004[C]. IEEE Workshop. 2004: 181-186

[12] Farshid A S, Suresh S. Analytical Models for Single - Hop and Multi-Hop Ad Hoc Networks[A]//Proceedings of the First International Conference on Broadband Networks (BROADNETS'04)[C]. IEEE Press, 2004: 412-417

[13] 刘凯，李建东，章欣. 多跳移动分组无线网络的吞吐率分析[J]. 西安电子科技大学学报，2000，27(1)：70-75

[14] Kleinrock L, Silvester J A. Optimum Transmission Radii for Packet Radio Networks or Why Six Is a Magic Number[A]//Proc. of Telecommunications Conf[C]. IEEE, 1978: 431-435

[15] Hou Ting-Chao, Victor L. Transmission Range Control in Multihop Packet Radio Networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 1986, 34(1): 38-44

(上接第 104 页)

[5] Wallner D, Harder E, Agee R. Key Management for Multicast: Issues and Architecture [EB/OL]. [2008-4-20]. http://www.faqs.org/rfcs/rfc2627.html

[6] McGrew D A, Sherman A T. Key Establishement in Large Dynamic Groups using One-way Function Trees. IEEE Transactions on Software Engineering, 2003, 29(5): 444-458

[7] Kwak D, Lee S, Kim J, et al. An Efficient LKH Tree Balancing Algorithm for Group Key Management. IEEE Communications Letters, 2006, 10(3): 222-224

[8] Ng W H D, Howarth M, Sun Z I, et al. Dynamic Balanced Key Tree Management for Secure Multicast Communications. IEEE Transactions on Computers, 2007, 56(5): 590-605

[9] Eltoweissy M, Heydari H, Morales L, et al. Combinatorial optimization of group key management. Journal of Network and Systems Management, 2004, 12(1): 33-50