

6LoWPAN 适配层分片与重组算法性能分析

刘乔寿 张 伟 王汝言 吴大鹏

(重庆邮电大学宽带泛在接入技术研究所 重庆 400065)

摘 要 将 IPv6 协议引入物联网感知层是物联网感知层的重点研究方向。由于 IPv6 协议与 IEEE802.15.4 协议数据载荷长度之间的不匹配,其上层协议数据包无法直接与底层协议进行数据交换,因此采用适配层中的分片与重组算法解决两种协议载荷长度的不兼容问题。为了具体分析算法性能,对 6LoWPAN 分片重组算法、改进算法及另一种带有每跳 ARQ 算法的改进算法进行数学建模及数据仿真,一方面对分片与重组算法的性能进行分析比较,通过仿真实验分析误码率、跳数等主要性能指标对网络能耗、时延性能的影响;另一方面提出一种新的自适应算法框架,使得适配层可以在变化的网络环境下选择不同的分片重组算法,来达到在物联网感知层中进一步优化网络性能、节省网络资源的目的。

关键词 IPv6 适配层, 6LoWPAN, 分片与重组算法

中图分类号 TP393

文献标识码 A

DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.07.036

Performance Analysis for Fragmentation and Assembly Algorithm of 6LoWPAN Adaptation Layer

LIU Qiao-shou ZHANG-Wei WANG Ru-yan WU Da-peng

(Broadband Ubiquitous Network Research Laboratory, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract In the perceptual layer of the Internet of Things, introducing IPv6 protocol is the key research direction. The length of the data load between IPv6 protocol and IEEE802.15.4 protocol does not match that the upper level data packets can't directly exchange data with the underlying protocol. The fragmentation and restructuration algorithm through adaptation layer protocol was used to solve the problem of payload length incompatibilities between the above two kinds of protocols. In order to analyse algorithm performance, fragmentation and assembly algorithm of 6LoWPAN, the improved fragmentation and assembly algorithm of 6LoWPAN and another improved fragmentation and assembly algorithm of 6LoWPAN combining each-hop ARQ algorithm were mathematically modeled and simulated. Firstly, fragmentation and assembly algorithms were simulated and analyzed through the network energy consumption and delay effects of the main performance indexes which contain bit error rate and the number of hop. Secondly, a novel adaptive algorithm framework which aims at optimizing network performance and saving network resources was proposed, so that the adaptation layer can choose different fragmentation and assembly algorithms under the changed network environment.

Keywords IPv6 adaptation layer, 6LoWPAN, Fragmentation and assembly algorithm

“物联网”(Internet of Things)是近年来得到广泛关注并快速发展的技术,被称为继计算机、互联网之后世界信息产业发展的第三次浪潮^[1]。在业界公认的物联网三层(感知层、网络层、应用层)体系架构中,处于底层的感知层主要负责对泛在化末端的数据的采集获取,这是物联网实现全面感知的基础。

感知层的信息传递技术主要包括蓝牙、红外、ZigBee 等短距离无线传输技术。但是由于与上层的通信传输协议间存在着一定的差异,无法直接实现异构网络的数据交换。通常采用的解决方法是通过专有的协议转换设备作为网络层接入设备,完成感知层与网络层的数据交互。这种技术方案增加了物联网系统构架的复杂性,却无法真正实现物联网对普通物

理对象的“互联互通”。而采用 IP 技术则不存在相关类似的问题,因此将 IP 技术引入末端感知网络才是物联网感知层传输技术发展的主要方向。

随着大量日常应用设备逐步引入物联网,传统的 IPv4 地址已经无法满足物联网设备的地址需求,严重制约了物联网规模化应用的发展。基于此,人们将希望寄托于下一代互联网协议 IPv6 向物联网感知层的引入。

IETF 小组(Internet Engineering Task Force)作为全球互联网最权威的技术标准化组织,近年来已经制定了部分 IPv6 与物联网感知网络相结合的相关协议文档。文献[2]给出了 IPv6 技术在低功耗个人域网应用中的基本概述,其主要思想是通过引入适配层将 IPv6 技术与短距离、低功耗的

到稿日期:2013-09-23 返修日期:2013-12-30 本文受国家自然科学基金(61371097),重庆邮电大学青年基金项目(A2012-93)资助。

刘乔寿(1979—),男,讲师,主要研究方向为宽带无线网络、互联网服务质量控制,E-mail:liuqs@cqupt.edu.cn;张伟(1988—),男,硕士,主要研究方向为物联网技术。

IEEE802.15.4 底层协议^[3]进行结合,实现 IP 技术在感知网络的应用,并综合分析了该技术的优势;文献[4]提出了在 IEEE802.15.4 协议上传输 IPv6 数据包的具体解决方案(6LoWPAN),主要包括 IPv6 数据包的分片与重组算法和数据包的报头数据压缩策略,解决了 IPv6 数据包与 IEEE802.15.4 协议在数据交换过程中的不匹配问题;文献[5]对文献[4]中的报头数据压缩算法进行了优化修改,使通信数据得到进一步的压缩。

由于 IPv6 数据包长度(1280 字节)远远大于 IEEE802.15.4 协议规定的 PHY 层数据单元长度(127 字节),文献[4]提出了一种分片与重组算法,即由发送端将数据包分片后发送到网络中,经由中间节点传递,最终由接收端接收所有分片后进行重组,恢复原有数据包。虽然该方案解决了 IPv6 与底层协议数据包长度的匹配问题,但也存在着一定缺陷:如果原始数据包的某个分片在网络传递过程中丢失,接收端在规定时间内无法收到所有分片并进行重组,接收端会丢掉已接收到的所有分片并通知发送端进行重传操作。显然这对于低功耗的感知网络来说,并不是一个很有效的数据传输解决方案。基于此,Thubert、Hui 等人于 2010 年提出了一种恢复分片的解决方案^[6],并于 2013 年对其进行进一步的修改^[7],该方案完善并提高了原有协议在多跳传输数据时分片与重组的性能。

本文的目的在于提供 6LoWPAN 原分片与重组算法及其改进算法的性能评估对比,主要包括:分片与重组算法分析、自适应算法设计、分片与重组算法数学模型,以及网络能耗、时延方面的对比和分析。

1 分片与重组算法分析

IETF 工作组提出了在 IPv6 协议与 IEEE 802.15.4 协议之间增加一个新的协议层,用以协调两种协议之间数据交换时存在的差异,使 IPv6 数据包可以在低功耗的底层协议上进行传输,该适配层即为 6LoWPAN 适配层。图 1 为 6LoWPAN 适配层在网络体系中的位置。

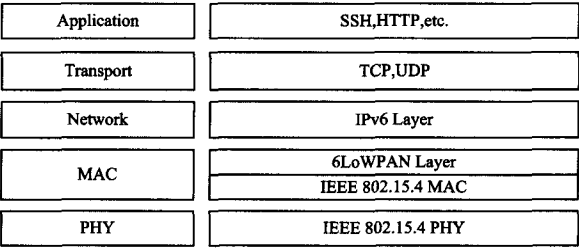


图 1 6LoWPAN 结构

适配层需要实现的功能主要包括:头部压缩、链路层分片与重组、路由协议、地址分配。本文着重分析其中的分片与重组算法性能。

由于 IEEE802.15.4 协议物理层的最大载荷为 127 字节,其中还包括帧头(最大为 25 字节)和加密(最大为 21 字节)字节,可作为 IPv6 净载荷的只有 81 字节,远远小于 IPv6 数据包所需的 1280 字节^[4],因此分片与重组算法是适配层不可或缺的重要内容之一。

1.1 分片与重组算法分析

根据文献[4]所述,如果一个 IPv6 的数据包长度小于 IEEE802.15.4 的净载荷长度,则该数据包在适配层中是不需

要分片的,否则就要进行分片处理。分片的具体过程如图 2 所示,当发送端适配层完成分片后,依次将分片传递至 IEEE802.15.4 底层进行数据发送。

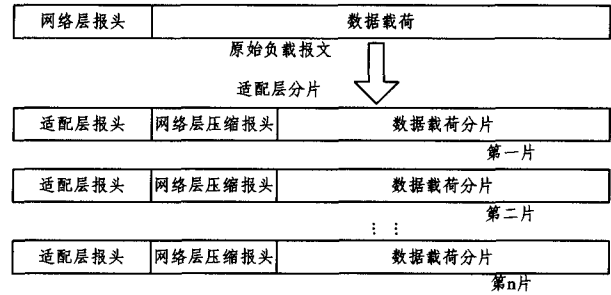


图 2 适配层数据分片过程

当接收端的适配层收到某分片时,首先启动重组定时器,要求在规定时间内接收到该数据包的所有分片(超时则丢掉所有分片并通知发送端进行重传操作)。然后判断该分片属于哪个数据包,如果是第一次收到某负载报文的的分片,适配层会记录该分片的源 MAC 地址和 datagram_tag 字段以供后续分片使用;如果已经收到该数据包的其它分片,则根据当前分片的 fragment_offset 字段进行重组。当成功接收某数据包的所有分片时,将所有分片按 offset 进行重组,并将重组好的原始数据包传递给上层,同时删除记录的源 MAC 地址和 datagram_tag 字段信息,具体过程如图 3 所示。

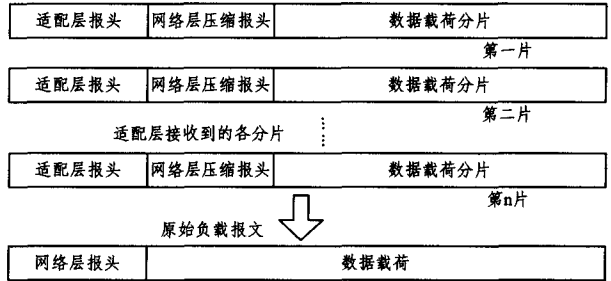


图 3 适配层数据重组过程

重组过程中所用到的重组定时器虽然可以保证数据接收的完整性及多跳网络通信时延要求,但由于丢失任一分片引起的重传操作都会增加感知层通信拥塞程度,因而给通信可靠性低并具有功耗限制的感知层提出了严峻的考验。

1.2 改进的分片算法分析

为了更合理地配置感知网络通信系统资源,Thubert、Hui 等人于 2013 年提出了改进的分片与重组算法方案^[7]。该方案允许接收端可以向发送端发送有选择恢复分片功能的确认帧,从而避免了分片的重复传递。该方案将分片分为 4 种类型:可恢复分片(RFRAG)、带有确认请求的可恢复分片(RFRAG-AR)、确认分片(RFRAG-ACK)、带有拥塞控制的确认分片(RFRAG-AEC)。

端到端确认方案的通信流程如图 4 所示:假设发送端原始数据包可分为 3 个分片,则除最后一个分片为 RFRAG-AR 外,其余为 RFRAG,当接收端收到 RFRAG-AR 时,说明发送端已将所有分片按时间顺序发送完毕,此时接收端会检查是否已接收到所有分片,如果已接收所有分片,则向发送端回复带有全 1 地址映射表的 RFRAG-ACK;如果有分片丢失,则将对地址映射位置 0,然后向发送端回复 RFRAG-ACK 请求,发送端有选择性地重传对应的分片,直到收到所有分片

为止。

相比原有分片与重组算法,该算法在结构上增加了端到端的确认,在确认信息中标记是否已经收到所有数据,并有选择性地恢复通信过程中丢失的分片,从而在一定程度上降低了重复的分片重传,节省了网络资源。

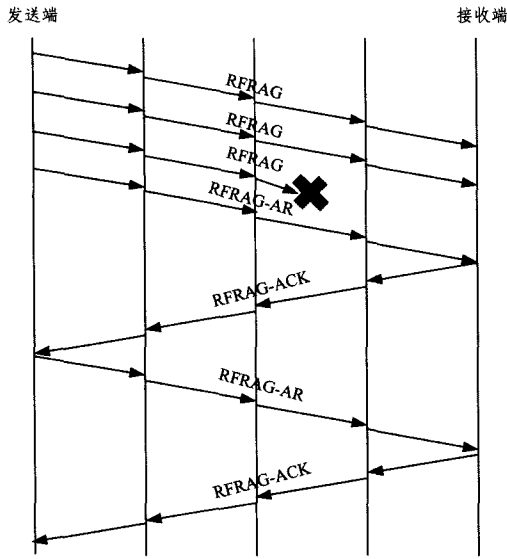


图4 改进方案通信流程

另一种改进方法为在传输过程中增加每跳 ARQ 应答机制。如果在分片重组算法中加入每跳 ARQ 机制,其性能势必会得到一定的提升,但对于低功耗无线多跳网络来说,ARQ 机制的引入会增加发送端与接收端的时延,对于大规模(跳数过多)网络来说,由 ARQ 引起的时延增加可能会产生虚假的系统通信超时。此外,ARQ 确认信息也占用了更多的通信资源,可能会引起不必要的信息碰撞,对系统性能产生了负面的干扰^[8]。带有每跳 ARQ 的分片重组算法通信流程如图 5 所示。

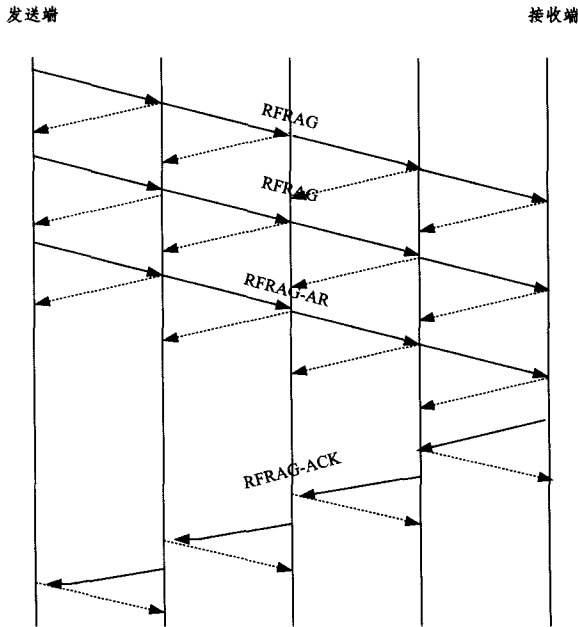


图5 带有 ARQ 的分片重组算法通信流程

1.3 自适应算法设计

上述两种改进算法都可以在一定程度上提高原始分片与重组算法的性能。由定性分析可知:其中端到端确认的改进

算法更适合应用于无线通信较好的环境中,而每跳 ARQ 的改进算法更适合应用于网络通信较差的环境中。基于此,如果可以将外部环境的变化作为判别依据,在不同的环境中采用不同的算法,可将无线通信网络性能提高到最优水平。

其算法选择的状态转移过程如图 6 所示。

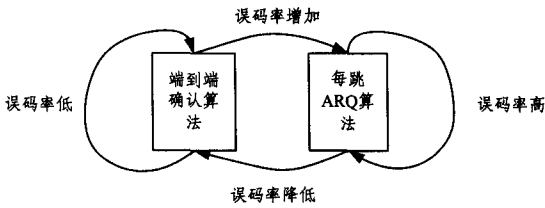


图6 自适应算法状态转移图

该自适应选择状态机主要由 2 个状态组成:端到端确认算法和带有每跳 ARQ 的算法。

状态转移的判别依据主要为外部环境的变化,具体为无线通信误码率的变化。

节点判断误码率增加的方法:发送端节点连续收到带有分片接收信息的确认帧,通过连续记录该确认帧的分片丢失情况作为判断网络中误码率增加的依据。

具体的门限值同误码率、数据分片数、分片长度等参数有关,即:

门限值=(1-误码率)^{分片长度}×分片数

若发送端连续记录到确认帧中分片丢失情况超过判别条件,则切换至每跳 ARQ 通信方式,以避免在通信环境较差的情况下进行端到端的分片补发。

节点判断误码率降低的方法:当网络中采用带有每跳 ARQ 的算法进行通信时,说明当前网络误码率相对较高,此时在确认帧中可增加两个字段,增加字段部分如图 7 所示。其中第一部分表示分片当前的跳数,第二部分表示当前的重传映射表,其中相应的位代表每一跳是否产生重传操作,初始化为 0,如果在第 n 跳产生重传,则将相应的位置 1。

跳数字段	重传映射表
------	-------

图7 确认帧中的添加字段

通过连续记录该新增字段,并进行数据分析,将结果作为对当前网络中误码率下降变化的判断依据。数据分析方法为:如果发现新增字段中的映射表为全 0 字段,说明该数据帧在传递过程中并没有发生重传,若连续收到的都是全 0 字段,即可将算法调整回端到端确认算法,以节省网络开销。

2 数学模型

本节主要对分片与重组算法建立数据模型,用以评估网络能耗、通信时延以及其它算法的参数修改对通信性能产生的影响。主要以原始的分片重组算法来具体说明。数学模型中的参数定义如表 1 所列。

表1 参数定义

变量	定义
B	网络通信中的误码率
h	发送端到接收端的跳数
c	纠错码可纠错位数(默认为 0)
r	链路层最大重传次数
D	链路层数据帧长度
A	链路层确认帧长度

2.1 单跳模型

对于相邻节点间的通信模型主要有以下两种情况:

- 失败:分片在单跳通信过程中丢失。
- 成功:分片在单跳通信过程中成功。

通信过程如图 8 所示。



图 8 单跳模型通信情况

该模型假设系统通信的误码率为 B , 且为相互独立的随机误差。

一帧分片发送失败的概率为:

$$P_{fail} = 1 - \sum_{i=0}^c \binom{D}{i} B^i (1-B)^{D-i} \quad (1)$$

式中, D 为一帧分片数据的总位数(bits); c 为分片帧中的可纠错位数, 主要根据纠错算法而定; $\binom{D}{i}$ 为 D 位数据中选择任意 i 位数据, 即有 i 位数据出错。

同理, 一帧分片发送成功的概率为:

$$P_{succ} = 1 - P_{fail} = \sum_{i=0}^c \binom{D}{i} B^i (1-B)^{D-i} \quad (2)$$

发送分片失败时, 发送端发出的位数与信息位数相同, 估计发送的位数(bits):

$$H_f = D \quad (3)$$

发送分片成功时, 估计发送的位数(bits)可通过发送分片的概率及相应情况下发送的位数计算得出:

$$H_s = \frac{1}{1-F} (P_{succ} \cdot D + P_{fail} \cdot 0) = D \quad (4)$$

2.2 多跳模型

在该模型中, 我们假设每一跳的链路传输都是独立的過程, 其在通信过程中第 i 跳的误码率为 $B_i = B$, 分片在第 i 跳传输失败的概率为 $F_i = F$ 。通信过程如图 9 所示。

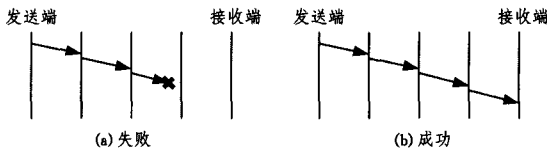


图 9 多跳网络通信过程

基于此, 一帧分片在 h 跳后被接收端成功接收的概率为:

$$Q_h = \prod_{i=1}^h (1 - F_i) = (1 - F)^h \quad (5)$$

与单跳模型的分析过程类似, 一帧分片在多跳模型中进行端到端传输成功时, 估计发送的位数(bits)为:

$$E_s = \sum_{i=1}^h H_{s_i} \quad (6)$$

一帧分片端到端传输失败时, 估计发送的位数(bits)为:

$$E_f = \frac{1}{1 - Q_h} \left(\sum_{k=1}^h \left(\sum_{i=0}^{k-1} H_{s_i} + H_{f_k} \right) \prod_{j=1}^{k-1} (1 - F_j) F_k \right) \quad (7)$$

2.3 完整通信模型

一个数据包(多个分片)在多跳网络中进行端到端传输成功的概率为:

$$P_s = Q^n \quad (8)$$

一个数据包(多个分片)在多跳网络中进行端到端传输成功时, 估计发送的位数(bits)为:

$$S_s = E_s \times m \quad (9)$$

一个数据包(多个分片)在多跳网络中进行端到端传输失败时, 估计发送的位数(bits)为:

$$S_f = \frac{1}{1 - P_s} \left[\left(\sum_{k=1}^m \binom{m}{k} (k E_f + (m - k) E_s) (1 - Q_s)^k (Q_s)^{m-k} \right) (1 - Q_s^m) \right] \quad (10)$$

通过上述公式, 可以得到整个网络中所有节点发送的数据位数(bits)。假设发送端会持续发送数据直到接收端完全接收并重组数据包, 则一个数据包在多跳网络中成功通信时, 估计发送的字节数为:

$$S = S_f \left(\frac{1}{P_s} - 1 \right) + S_s \quad (11)$$

端到端确认算法模型及带有每跳 ARQ 的分片重组算法模型与原始算法模型的设计思路相同, 在原始算法模型的基础上进行修改。

2.4 能耗模型

假设 n 为每个节点的平均邻居数, 即当发送端发出一帧分片后, 有 n 个相邻节点可以收到该分片。所以, 发送一帧分片时消耗的能量为:

$$E = (\text{发射能量} + n \times \text{接收能量}) \times \text{帧长度}$$

为了使该模型更准确地模拟实际应用场景, 表 2 为支持 6LoWPAN 的硬件平台(如 TI 公司的 CC2530 芯片, 工作于 2.4GHz 频段, 支持 IEEE802.15.4 协议, 集成 RF 收发器、增强型 8051 内核)进行数据收发时消耗的能量。根据其技术手册可知, 当芯片工作在 3V, 传输速度为 250kbit/s 时, 发送和接收数据的电流分别为 30mA、17.7mA。

表 2 能量参数定义

参数	值
发射能量	0.36μJ/bit
接收能量	0.21μJ/bit

2.5 时延模型

通过对网络中收发信息量建立数学模型, 还可以计算该网络进行端到端通信时的时延。传统的计算时延方法大多采用马尔科夫链^[9]、Petri 图^[10]等数学模型对无线传感器网络或 IEEE802.15.4 网络进行建模, 其相关参考文献大部分采用数据收发时间、空中传输时间、误码率引起的时延作为主要影响因素, 而忽略了无线感知网络的部分特性。

由于无线感知网络具有低功耗、低速率、小范围等特性, 并且大多数采用半双工通信方式, 因此在计算中还应引入收发切换时延, 同时侧重个人域的小范围通信基本可以忽略空中传输时间。

无线传感器网络通信的时延分析过程如图 10 所示。

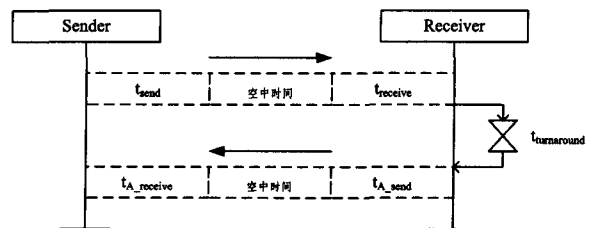


图 10 时延过程分析

表 3 为支持 6LoWPAN 的硬件平台 (CC2530) 正常工作时的收发切换时间和数据收发时间。

表 3 时间参数定义

参数	值
数据发送时间 (tsend)	4 μ s/bit
数据接收时间 (treceive)	4 μ s/bit
收发切换时间 (tturnaround)	192 μ s

3 仿真结果

3.1 仿真环境设置

本数学模型是在 MATLAB 仿真平台下验证的,此环境下的仿真参数设置如表 4 所列。

表 4 默认参数值定义

参数	值
h	5
r	3
C	0
链路层确认帧长度	40bits
链路层数据帧头部长度	120bits
IP 头部长度	160bits
TCP 头部长度	160bits
分片数量	8
测试数据长度	51.2Kbytes

仿真共分为 2 部分,第一部分为对网络能耗的仿真,主要包括网络环境(误码率)、网络规模(跳数)的变化对能耗产生的影响;第二部分为对网络时延的仿真,主要包括误码率、跳数的变化对网络时延的影响。

3.2 能耗仿真

3.2.1 网络环境变化对系统能耗的影响

图 11 为不同误码率条件下的网络能耗对比,由仿真结果可知,端到端确认算法与带有每跳 ARQ 的算法的能耗要远远低于原始算法;而对于这两种优化算法来说,在网络条件比较好的情况下(即误码率低),端到端确认算法的能耗要低于带有每跳 ARQ 的算法,这是由于误码率低时网络传输性能较好,分片数据出错率低,而 ARQ 算法采用的每跳确认回复产生了部分能量消耗;反之当网络条件较差时(即误码率高),端到端确认算法的能耗要高于带有每跳 ARQ 的算法,这是由于每跳 ARQ 算法可以在网络传输性能很差的环境下最大限度地保证每跳链路数据的正确传递。当误码率门限值为 10^{-4} 以及其它参数设为实验参数时,自适应算法结合了端到端确认和每跳 ARQ 算法,将网络能耗控制在最低。

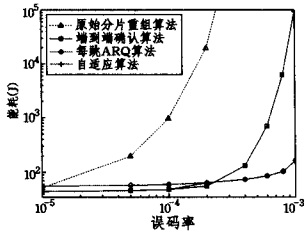


图 11 几种算法不同误码率的能耗对比

3.2.2 网络规模变化对网络能耗的影响

图 12 为不同跳数对网络能耗的对比,由仿真结果可知,随着网络规模(即跳数)的增大,3 种算法进行端到端通信时能耗会进一步增加。

由仿真曲线的上升趋势可知,原始算法的能耗随着网络

规模的增大而急剧增加,对通信过程具有一定控制保护措施

的端到端确认算法和每跳 ARQ 算法能耗增幅较小,其中后者由于对每跳通信都进行信息确认,因此能耗增幅最低。

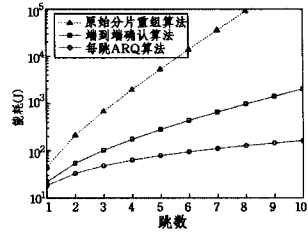


图 12 几种算法不同跳数的能耗对比 (BER=5 $\times 10^{-4}$)

3.2.3 重传次数对网络能耗的影响

由图 13 可知,当 ARQ 次数大于等于 3 时,ARQ 对通信产生的优化作用基本保持不变,这也是在带有每跳 ARQ 的算法中最大尝试次数 r 默认值为 3 的选取原因。

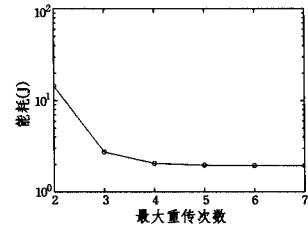


图 13 重传次数对网络能耗的影响 (BER=5 $\times 10^{-4}$)

3.3 时延仿真

3.3.1 网络环境变化对系统能耗的影响

由图 14 的仿真结果可知,在网络条件比较好的情况下,端到端确认算法的时延要低于带有每跳 ARQ 的算法,这是由于在每跳 ARQ 算法通信时,确认回复过程中产生了数据收发时延及切换时延,导致时延过高;而当网络条件比较差时,端到端确认算法的时延要高于带有每跳 ARQ 的算法,这是由于每跳 ARQ 算法可以保证每跳数据的正确传递而避免了端到端重传引起的不必要的时延。在误码率为 10^{-4} 时,自适应算法进行切换,该算法结合了两种算法在不同通信环境下的优点,将系统时延控制在最优水平。

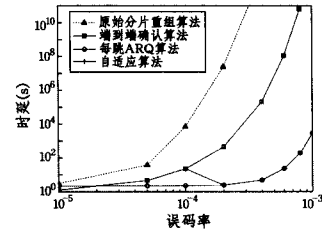


图 14 几种算法的时延对比

3.3.2 网络规模变化对网络时延的影响

该部分仿真主要针对端到端确认算法和每跳 ARQ 算法进行对比,从而得出不同误码率及不同跳数对网络时延的影响,也验证了如果可以采用自适应算法设计,可将系统性能发挥到最优。

由图 15 可知,随着网络规模的增大,两种改进算法在进行端到端通信时所产生的时延也会相应地增加。在该过程中,还应结合误码率因素综合考虑。仿真结果表明:当误码率为 5×10^{-5} 时(见图 15(a)),两种算法的时延时间比较接近,随着跳数的增加,端到端确认算法的时延略高于带有每跳

(下转第 215 页)

参考文献

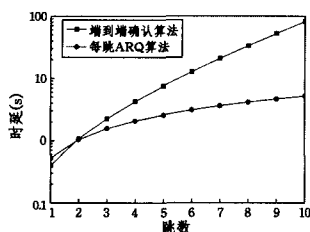
- [1] Worldwide Infrastructure Security Report [OL]. <http://www.arbornetworks.com/research/infrastructure-security-report>, 2013
- [2] Bellocin S, Clark D, Perrig A, et al. A Clean-Slate Design for the Next-Generation Secure Internet[C]//National Science Foundation Workshop on Next-Generation Secure Internet, CMU, GENI Design Document, 2005
- [3] Anderson T, Roscoe T, Wetherall D. Preventing Internet Denial-of-Service with Capabilities [J]. Computer Communication Review, 2004, 34(1), 39-44
- [4] Yaar A, Perrig A, Song D. SIFF: A Stateless Internet Flow Filter to Mitigate DDoS Flooding Attacks [C] // Proceedings of IEEE Symposium on Security and Privacy. May 2004
- [5] Yang X, Wetherall D, Anderson T. A DoS limiting Architecture [C]//Proceedings of ACM SIGCOMM, 2005:241-252
- [6] Argyraki K, Cheriton D. Network Capabilities: The Good, the Bad and the Ugly[C]//Proceedings of ACM HotNets IV. Col-

lege Park, Maryland, 2005

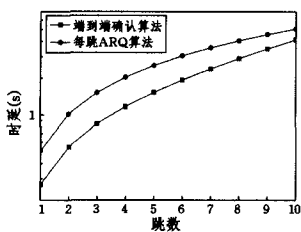
- [7] Walfish M, Vutukuru M, Balakrishnan H, et al. DDoS defense by offense[J]. Proceedings of ACM SIGCOMM, 2006, 36(4): 303-314
- [8] Parno B, Wendlandt D, Shi E, et al. Portcullis: Protecting Connection Setup from Denial-of-Capability Attacks [J]. Proceedings of ACM SIGCOMM, 2007, 37(4): 289-300
- [9] Liu X, Yang X, Lu Y. To Filter or to Authorize: Network-Layer DoS Defense Against Multimillion-node Botnets[J]. Proceedings of ACM SIGCOMM, 2008, 38(4): 195-206
- [10] Liu X, Yang X, Xia Y. NetFence: Preventing internet denial of service from inside out [C] // Proceedings of the ACM SIGCOMM, 2010: 255-266
- [11] Van Jacobson. Congestion avoidance and control [C]// Proceedings of ACM SIGCOMM'88, 1988
- [12] CAIDA[OL]. <http://www.caida.org/home/>
- [13] The Network Simulator NS2[OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

(上接第 180 页)

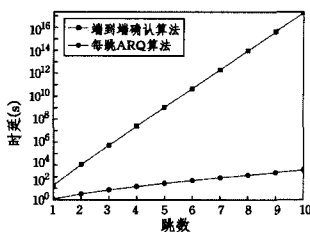
ARQ 的分片重组算法;当误码率较低(见图 15(b))时,端到端确认算法的时延要小于带有每跳 ARQ 的算法;当误码率较高(见图 15(c))时,端到端确认算法的时延要高于带有每跳 ARQ 的算法。由以上分析可知,如果适当地选取自适应算法框架及算法门限值,可以在动态的通信环境中提高网络通信效率和性能。



(a) $BER=5 \times 10^{-5}$



(b) $BER=10^{-5}$



(c) $BER=5 \times 10^{-4}$

图 15 跳数对时延产生的影响

结束语 对 6LoWPAN 的 IPv6 适配层分片与重组算法的分析研究有助于了解 IPv6 协议在低功耗物联网感知层网络中的传输效率和性能,可为后续的上层协议向物联网感知层网络移植提供能耗、时延等方面的量化预测分析,因此对分片与重组算法进行数学建模及数据仿真是十分必要的。根据对分片与重组算法及其端到端确认算法、带有每跳 ARQ 的算法的数据仿真,提出了将网络通信环境即误码率的高低作为判别条件的自适应分片与重组算法,它可以使通信节点在网络环境发生变化时自动调整分片与重组算法,以达到网络的最优性能。

参考文献

- [1] Amardeo C, Sarma J G. Identities in the Future Internet of Things [J]. Wireless Pers Commun, 2009, 49: 353-363
- [2] Kushalnagar N, Montenegro G, Schumacher C. IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks(6LoWPANs)[C]//Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals. RFC 4919, IETF, 2007
- [3] IEEE Computer Society. IEEE Standard for Information technology—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 15. 4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks(WPANs)[S]. IEEE Std 802. 15. 4-2006, October 2006: 1-320
- [4] Montenegro G, Kushalnagar N, Hui J, et al. Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802. 15. 4 Networks[S]. RFC 4944, IETF, September 2007: 6-13
- [5] Hui J, Corporation A R, Thubert P, et al. Compression Format for IPv6 Datagrams over IEEE 802. 15. 4-Based Networks[S]. RFC6282, IETF, September 2011: 5-20
- [6] Thubert P, Cisco E, Hui C J, et al. LoWPAN fragment Forwarding and Recovery, Internet Draft draft-thubert-6lowpan-simple-fragment-recovery-07[S]. IETF draft, Dec 2010: 1-17
- [7] Thubert P, Hui J. LLN Fragment Forwarding and Recovery, Internet Draft draft-thubert-roll-forwarding-frags-01 [S]. IETF draft, February 25, 2013: 1-16
- [8] Ayadi A, Maille P, Ros D, et al. Energy-Efficient Fragment Recovery Techniques for Low-Power and Lossy Networks[C]//Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2011, 7th International, IEEE. July 2011: 601-606
- [9] 黄仁, 邵辉, 任军华. 非时隙 CSMA/CA 性能分析与研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(7): 108-110, 118
- [10] Shuaib A H, Mahmoodi T, Aghvami A H. A Timed Petri Net Model For The IEEE 802. 15. 4 CSMA-CA Process[C]//PIM-RC. Sept. 2009: 1204-1210