

窄带 Ad hoc 网络端到端拥塞控制机理分析

牛大伟 于卫波 王海 郭晓

(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

摘要 基于窄带半双工信道的军用无线网络限制了 ACK 反馈信息的及时性和有效性,使得单程时延和交付概率等端到端传输指标成为发现网络拥塞的有效途径。利用 M/G/1 模型的排队方法分析和揭示了无线自组织网络中节点拥塞程度、链路层参数以及业务层面的性能参数之间的量化关系,从而为窄带无线自组织网络的拥塞控制协议设计提供了理论依据。

关键词 无线自组织网络,拥塞避免,分组交付率

中图分类号 TN915 **文献标识码** A

Analysis of End to End Congestion Control Mechanism in Narrowband Ad hoc Networks

NIU Da-wei YU Wei-bo WANG Hai GUO Xiao

(Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract Military wireless networks which are based on narrowband and half duplex channel make it is hard to utilize ACK as a indication for congestion. So the one way end to end delay and packet delivery probability become the important parameters to predict the avoidance. This paper analysed and revealed the numerical relationship among the congestion level, link layer parameter and app layer performance through M/G/1 queueing model, thereby, provided theoretical principle for design of congestion control algorithm.

Keywords Ad hoc, Congestion avoidance, Delivery probability

1 引言

无线自组织网络具有移动性强、架设简单、应用便捷等优点,在救灾、传感器网络、军事侦察以及战术通信等方面具有很高的应用价值和市场潜力。

军用战术无线通信网络的使用环境和背景的特殊性使得其与民用无线自组织网络有很大区别,具体表现在其工作于窄带、高误码、强电磁干扰的信道条件下并且多数电台具有较大的收发转换时间和半双工的工作方式。传统 IP 协议族中的 TCP 协议针对链路状态较为稳定的固定网络而设计,能够在传输层保证端到端的面向连接服务,但却并不适用于无线网络,其原因在于 TCP 协议将端到端性能恶化和丢包的原因归结为节点的拥塞,而无线网络中的拓扑变化、随机信道误码以及节点拥塞等几个原因均会造成端到端吞吐量的下降,从而会引发 TCP 协议的误动作,恶化网络性能。

为满足上述面向连接业务的需求,美军开发了 MIL-STD-2045-47001C 标准(下文简称 47001)^[1],该标准定义了一套完整的传输层协议,引入了端到端的确认和分片重组机制以对用户提供面向连接服务。但是该标准没有从根本上解

决拥塞控制、链路带宽估算等问题,存在链路利用率低等弊端。拥塞控制的关键和难点是如何通过测量和计算出的网络运行时性能参数来预测和估算拥塞程度以及链路带宽。目前大部分民用无线自组网拥塞控制算法是基于 TCP 的改进版本,其基本思想是依据收端反馈的 ACK 所揭示的往返时延判断链路状态和吞吐量进而预测网络拥塞程度。这种拥塞控制和带宽估算算法并不适用于具有恶劣电磁环境的军用网络。其原因在于:军用网络多数基于半双工信道,节点具有较大的收发转换时间和跳频扩频同步时间,这造成了收节点反馈 ACK 的延迟到达和累积到达现象,其反馈 ACK 的及时性和有效性较差。通过研究发现:报文的单程端到端时延、报文端到端分组交付率以及信道丢包率之间存在着某种内在的联系,通过把握和分析这种内在规律,可以在不必频繁进行 ACK 交互的基础上预测网络拥塞程度,进而采取拥塞控制机制,保证网络较高的利用率。

本文将重点分析和揭示无线自组织网络中报文单程端到端时延、分组交付率、网络丢包率以及部分链路层协议参数之间的量化关系,从而为窄带无线自组织网络的拥塞控制协议设计提供理论依据。本文第 2 节对目前国内外无线网络传输

到稿日期:2009-08-12 返修日期:2009-12-28 本文受国家自然科学基金(60672080),国家 863 计划(2008AA01Z216)和解放军理工大学预先研究基金资助。

牛大伟(1979-),男,博士生,助教,主要研究方向为无线自组网协议研究、网络性能分析、光突发交换网络等,E-mail:flyndw@gmail.com;于卫波(1975-),男,博士,讲师,主要研究方向为无线自组网协议研究、网络性能分析、嵌入式计算等;王海(1972-),男,博士,教授,主要研究方向为无线自组网协议研究、mesh 网、网络性能分析、嵌入式计算等;郭晓(1981-),男,博士生,助教,主要研究方向为卫星通信、无线自组织网络、嵌入式系统等。

控制协议的研究现状作综述;第3节对无线网络拥塞产生的原因以及与网络拥塞相关的各网络参数进行量化分析,并提出一个简单的算法;第4节对前述理论的数值仿真结果进行分析;最后总结全文并设想下一步的工作。

2 相关研究

根据国内外相关报导,目前涉及无线网络的传输控制协议研究从协议涉及的网络实体和作用范围的角度看,可以划分为端节点与核心节点共同参与的传输控制机制^[2-6]和对网络核心节点透明的、仅端节点参与的传输控制机制^[7-12]两类。

涉及核心节点参与的传输控制协议需要更改中间节点的软件甚至硬件结构,可操作性不强,大规模应用的成本较大。因此,本文主要讨论基于端节点的传输控制协议,目前国内外对基于端节点的网络状态感知和传输控制机制已经展开了大量的研究。

端到端的传输层算法研究主要集中在如何正确区分拥塞丢包和随机误码丢包并正确感知网络的拥塞状态和拥塞程度,从而有效地利用链路带宽。S. Biaz 在 1999 年提出了利用连续丢包前后的报文到达间隔时间来区分拥塞丢失和链路丢失的方法(后文简称 biaz 算法)^[7],该算法认为,如果收端连续接收到的报文间隔大于或者小于一定的门限,则分别代表排队累积和溢出,表示发生了拥塞。应用于恶劣电磁环境干扰下的无线网络中时,无线信道的有效带宽利用率波动较大,所以该算法的上门限值无法准确测定,使其可实现性极差,不适合军用窄带无线系统。

Tobe 等人提出的 spike 算法^[9]采用基于宏观估算的网络拥塞状态的方法确定发送速率的策略,其评价依据是相对单向时延(ROTT)峰值。观测到的峰值处于门限值之外,则会带来拥塞状态的改变。spike 算法从宏观上判断流拥塞,在多流共存的网络中能够获取较好的公平性。但是其无法判断单个丢包的类别,并且其上下限采用硬编码,不适合状态有阶段性波动的网络。S. Cen 等人 2003 年在 spike 的基础上提出了一种可以动态调整相对单程时延门限的 zigzag 算法^[8]。该算法根据丢包数目和当前 ROTT 相对均值的偏离程度动态判断其丢包原因,并采用相应的拥塞避免策略和重传措施。M. Gerla 等人在文献^[10]中提出了 TCP Westwood 协议,该协议采用等效低通滤波器的方法根据 ACK 采样密度估算当前链路的可用带宽。M. Medidi 等人 2008 年在文献^[11]中提出利用吞吐量与 RTT 的比值 $R = \text{throughput}/\text{RTT}$ 来区分丢包类型的算法。该协议^[12]采用双窗口机制改进 TCP 协议。上述几种算法都需要依靠连续的 ACK 采样来确定往返时间,不适合具有较大收发转换和同步时间的军用窄带无线网络,在我们讨论的环境中 ACK 的延迟到达和突发到达会极大地影响算法的带宽估算。

综上所述,目前尚没有一种能够适应恶劣电磁环境下的军用窄带无线网络传输控制协议。本文拟从无线网络信道拥塞的基本原理出发,寻找端到端单程时延的变化与当前链路丢包率之间的联系和规律,从而在未来设计传输层协议时可依据该规律确定当前网络的拥塞程度。

3 无线网络拥塞机理与分析

3.1 网络拥塞与报文端到端时延

网络中瓶颈节点的缓存溢出是造成网络拥塞丢包的直接原因。在有线网络中体现在核心节点所有端口的流量之和大于当前各出口线路速率之和。如图 1(a)所示,当拥塞发生时或者即将发生时,节点队列长度非空,则在忽略节点存储和处理时间的情况下(目前的硬件存储和包头处理时间相对于信道的发送时间而言极小),单个报文的端到端时延如式(1)所示。其中 m_i 为报文在第 i 跳节点中排队时其前面的报文个数; T_i 为报文末跳传输时延,该时延大小一般由可用信道带宽所决定; N 为端到端跳数; T_e 为报文的端到端时延。在有线网络中, T_i 基本为确定值,所以端到端时延的分布由报文所经历的排队队首长度(即节点中所有排在本报文前面的报文个数 m_i)之和所确定,在跳数固定的情况下,该长度符合均匀分布。特别地,在一跳情况下即取 N 为 1。

$$T_e = \sum_{i=1}^N m_i * T_i \quad (1)$$

在无线自组织网络中,缓存溢出现象可能由多种原因造成。例如:无线信道是时变信道,尤其是存在恶劣电磁干扰和环境噪声干扰的军用无线信道,随着信道容量的时间相关性波动,会出现报文的排队累积,从而可能带来溢出;另外,在单信道模式下(多数军用战术网络采用这一信道模式),信道对所有节点而言都是共享的,那么不同的媒体接入算法会导致不同的网络带宽分配。算法的公平性可能会导致节点的接收/发送带宽分配比值较大,从而限制了发送速率,造成缓存溢出;另外,上述无线信道的不稳定性、高误码率等特性决定了大多数无线网络信道接入控制协议采用重传以及冲突回退等算法,当信道误包率和冲突概率上升后会带来单个报文传输时间的大幅攀升,从而增加排队长度。

如图 1(b)所示,无线网络节点报文的端到端时延也符合式(1)的约定,但是由于存在较大的碰撞、误包和重传概率, T_i 不再是确定性分布,而是服从与重传次数和误包率相关的随机分布。研究端到端时延与误包率的量化关系,将有助于端节点依据端到端时延预测和推算当前信道的误包率,而在一定输入流量的前提下,误包率直接决定了网络拥塞程度,从而可以预测及调整发送速率,达到避免拥塞的目的。

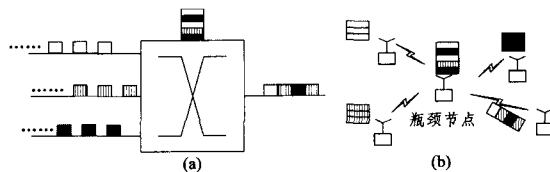


图 1 网络拥塞示意图

3.2 无线网络端到端时延量化分析

设事件 A 为所研究的报文最终能够成功交付;事件 $A(k)$ 为报文经过 k 次重传后成功交付。设报文末次传输成功的概率为 p ,则由误码、冲突等引起的单次传输报文失败的概率为 $1-p$,则当前报文经过 k 次重传后成功交付的概率为:

$$P(A(k)) = P(A(k), A) = (1-p)^k p \quad (2)$$

设信道接入控制协议允许最大重传 N 次,则下列关系式成立:

$$P(A(k)/A) = P(A(k), A)/P(A) = p(1-p)^k / P(A) \quad (3)$$

$$\sum_{k=0}^N P(A(k), A) / P(A) = \sum_{k=0}^N p(1-p)^k / P(A) = 1 \quad (4)$$

$$\sum_{k=0}^N P(A(k), A) = \sum_{k=0}^N p(1-p)^k = P(A) \quad (5)$$

由上述分析可知,只要知道报文成功交付概率 $P(A)$ 和最大重传次数 N ,即可计算出报文单次传输成功概率 p 。另外,主流的信道接入控制协议在报文发送失败后会执行一定的退避算法后再重传,退避时间一般采用指数回退、线性回退或者随机回退等方式,为便于分析,本文仅讨论线性回退方式,应用于其他退避算法的情况可以依据相同的原理计算。线性回退方式下, M 次重传之后所耗费的总的传输时间为 $(M+1) * T_0$,其中 T_0 为一次回退时间与节点发送时间之和,则报文的传输时间 T 与重传次数 M 成正比,由此, T 的均值 $E(T)$ 以及二阶矩 $E(T^2)$ 分别如式(6)和式(7)所示。

$$E(T) = (E(M) + 1) * T_0 \quad (6)$$

$$E(T^2) = (E(M^2) * T_0^2 + (2 * E(M) + 1) * T_0) \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可知,报文传输时间的均值和二阶矩由报文重传次数 M 的均值和二阶矩唯一确定。根据式(2), M 的均值和二阶矩如式(8)和式(9)所示,其中 $q=1-p$ 为报文单次传输失败概率。由式(8)和式(9)可知,重传次数的期望和二阶矩仅由 p 所决定,而 p 则可根据式(5)计算得到(前提是报文成功交付概率 $P(A)$ 先验可知)。

$$E(M) = \sum_{k=0}^N P(A(k)) * k = \frac{q(1 - (N+1) * q^N + N * q^{(N+1)})}{p} \quad (8)$$

$$E(M^2) = \frac{2 - 3p + p^2 - q^{(N+1)} * (2 + p * (N * (2 + N * p) - 1))}{p^2} \quad (9)$$

报文的端到端时延由报文传输时延和在网络节点中的排队时延两部分组成。设网络中的流量符合泊松分布,报文的传输时间 T 符合与特定信道接入控制算法相关的分布。为方便起见,暂时只考虑一跳情况,多跳情况的结果可以按照类似的规律递推取得,则此时的排队模型应为 $M/G/1$ 服务,其中报文传输时间 T 即为服务员服务时间。根据排队论相关原理^[13],报文平均端到端时延如式(10)所示。其中的 $E(T)$ 和 $E(T^2)$ 由式(6)~式(9)计算得到。

$$W_s = E(T) + \frac{\lambda[E^2(T) + D(T)]}{2[1 - \lambda E(T)]} = E(T) + \frac{\lambda E(T^2)}{2[1 - \lambda E(T)]} \quad (10)$$

综上所述,报文平均端到端时延仅与节点单次发送成功的概率 p 有关。根据式(8)、式(9)和式(10)的表述,网络的拥塞与 W_s 有着密切关系, W_s 越大则排队时延或者 $E(T)$ 越大;排队时延或 $E(T)$ 的增大暗含了重传次数 M 的增大; M 增大预示着单次传输成功概率 p 的降低,而 p 的降低直接带来了网络的拥塞。无线网络中具体的传输控制协议可以根据上述 W_s 和 p 的关系及其变化趋势来预测网络拥塞的发生,从而采用一些拥塞避免策略调整发送速率。

3.3 一种简单的拥塞避免算法

本文的重点在于揭示无线网络中端到端时延和网络拥塞之间的量化关系,不讨论具体的传输控制协议或者算法的实现。在此仅给出一个简化了的算法流程以证明利用端到端时延的变化趋势实现拥塞检测和避免拥塞的可行性,对于算法的性能和实现细节,不作过多的讨论。

源节点:

(1) 发送报文时携带本连接到当前时刻为止一共发送的报文总数 num 和时间戳信息 τ ;

(2) 根据目的节点反馈的 $P(A)$,利用式(5)计算 p ,并利

用 p 和式(6)~式(10)计算理论端到端时延 W_s ;

(3) 将步骤(2)中计算得到的 W_s 与目的节点反馈的实际平均端到端时延 W_s' 相比较,若 $W_s - W_s' \leq -\delta$ 则代表拥塞即将发生,调用拥塞避免过程;若 $W_s - W_s' \geq \delta$ 则代表网络容量增大并未发生拥塞,则源节点增大发送速率;若 $|W_s - W_s'| < \delta$,则发送速率不变,其中 δ 为调整边界,为大于 0 的某个时间值。

目的节点:

(1) 目的节点收到源节点发送的报文后,根据 num 和 τ 计算 $P(A)$ 以及 W_s' ;

(2) 回送 ACK(窄带强干扰信道下,该 ACK 将累计发送而不是每一个报文回送一个 ACK)时携带 $P(A)$ 和 W_s' 。

4 数值仿真分析

本节将对 3.2 节的量化分析结果进行数值仿真,以直观形象地说明网络发送成功概率、分组交付率以及端到端时延之间的关系,并对与具体实现相关的一些问题作简要说明。

图 2 所示为端到端交付概率 $P(A)$ 以及平均端到端时延 W_s 与单次发送成功概率 p 之间的数值关系曲线,本图采用的负载 $\lambda=0.1$ 。如图所示,3 条单调递增曲线为端到端交付概率 $P(A)$,由下至上的 3 条曲线分别为最大重传次数 N 取 1,3,5 情况,其 Y 轴数值在左侧,可见 $P(A)$ 随 p 的增加,分别以不同斜率趋向于 1,且最大重传次数越大,其上升速率越大,符合一般规律。图中另外 3 条曲线为平均端到端时延曲线,其 Y 轴数值在右侧,可见在单次发送成功概率 p 较大时,分组所经历的重传次数较小,则端到端时延较小;在 p 较小时,由于大部分报文均超过最大重传次数而被丢弃,仅小部分报文会传输成功,故其单次发送时间 T 的方差较小,因此 $E(T^2)$ 较小,根据式(10)的约定,可知此时的平均端到端时延较小;随着 p 的增加, T 的方差逐渐增大,使得端到端时延快速递增,达到峰值之后回落。根据图 2 所示的规律可知,拥塞控制算法不能仅以端到端时延的大小来判断拥塞是否发生,应该综合当前交付概率 $P(A)$ 和端到端时延两个物理量,通过迭代估算出当前的发送成功概率 p ,从而依据 p 值来确定当前是否拥塞。

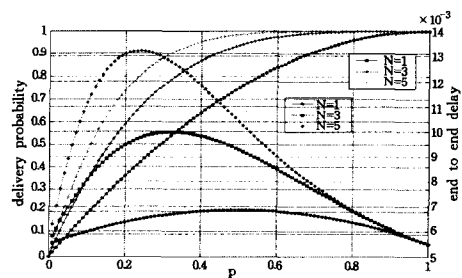


图 2 端到端时延、交付概率 vs 传输成功概率

图 3 所示为不同负载条件下端到端时延与单次发送成功概率 p 之间的关系,几条曲线对应于不同的负载条件。随着负载的增加,端到端时延的绝对值逐渐增加。这里主要体现在排队时延的增加,实际上随着负载的增加,碰撞会使得 p 减小,会进一步影响端到端时延。

图 4 所示为端到端时延与负载的关系,由图中可以看到,随着 p 增加到 0.3 与 0.4 之间时,端到端时延达到最大,这与图 2 和图 3 相吻合,当 p 继续增大后,曲线回落。当 p 固定

时,随着负载的增大,端到端时延近似线性增大。由此图可知,在拥塞控制算法的设计中,当根据 $P(A)$ 和 W_s 迭代的 p 结果达到稳定时,可以依据端到端时延 W_s 的增加来探测负载的大小,从而决定是否启动拥塞避免过程。

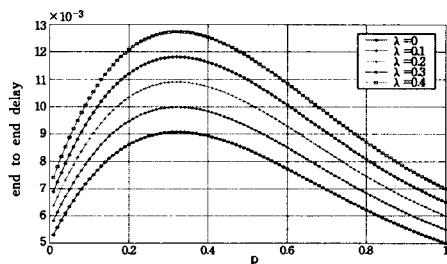


图3 端到端时延 vs 传输成功率

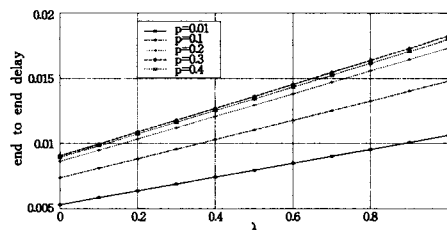


图4 端到端时延 vs 到达速率

结束语 本文从对无线网络拥塞的原理分析出发,针对无线网络信道接入控制特点对网络拥塞与端到端时延、分组交付率以及最大重传次数的关系等方面进行了量化分析,并提出依据这些量化关系进行拥塞控制算法设计的途径、方法和原则。本文所采用的排队模型是理想的无队长限制的 $M/G/1$ 模型,这种模型在节点缓存较大的情况下可适用,但在缓存数量有限的情况下则与实际有较大出入。鉴于此,本文下一步的工作重点将对排队模型作进一步的优化,以构建一种更符合节点实际的数学模型。另外,本文中 p 和 λ 作为独立变量处理,下一步将讨论 p 与 λ 的内在联系和量化关系。

参考文献

[1] Department of Defense. MIL-STD-2045-47001C[S]. 2002

[2] Das S, Lin Chuang, Ren Fengyuan. Alleviating Congestion Using Traffic-Aware Dynamic Routing in Wireless Sensor Networks [C]// IEEE Communication Society. Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks2008. San Francisco: IEEE Communication Society, June 2008; 233-241

[3] Kang J, Zhang Y, Nath B, Tara. Topology-aware resource adaptation to alleviate congestion in sensor networks [J]. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2007, 18(7): 919-

[4] Feng K-T, Hsu Y-P. Cross-layer routing for congestion control in wireless sensor networks[C]// IEEE Communication Society. Radio and Wireless Symposium2008. Orlando, FL; Jan: IEEE Communication Society, 2008; 783-786

[5] Sundaresan K, Anantharaman V, Hsieh Hung-yun, et al. ATP: A Reliable Transport Protocol for Ad Hoc Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2005, 4(6): 588-603

[6] Wang Neng-chung, Huang Yung-fa, Liu Wei-lun. A Fuzzy-Based Transport Protocol for Mobile Ad Hoc Networks[C]// IEEE Computer Society. Sensor Networks, Ubiquitous and Trustworthy Computing2008. Taiwan: IEEE Computer Society, 2008; 320-325

[7] Biaz S, Vaidya N. Discriminating congestion losses from wireless losses using interarrival times at the receiver[C]// IEEE Computer Society. Application-Specific Systems and Software Engineering and Technology. Texas: IEEE Computer Society, Mar. 1999; 10-17

[8] Cen S, Cosman P C, Voelker G M. End-to-end Differentiation of Congestion and Wireless Losses[J]. IEEE Trans. on Networking, 2003(10): 703-717

[9] Tobe Y, Tamura Y, Molano A, et al. Achieving moderate fairness for UDP flows by path-status classification[C]// IEEE Communication Society. Proc. 25th Annu. IEEE Conf. Local Computer Networks (LCN 2000). Tampa, FL: IEEE Communication Society, Nov. 2000; 252-261

[10] Gerla M, Sanadidi M Y, Wang R, et al. TCP Westwood: Congestion Window Control using Bandwidth Estimation[C]// IEEE Communication Society. GLOBECOM 2001. San Antonio Texas: IEEE Communication Society, 2001; 1698-1702

[11] Medidi M, Wang Jiong, Garudapuram G, et al. An Analytical Model and Performance Evaluation of Transport Protocols for Wireless Ad Hoc Networks[C]// IEEE. ANSS 2008. Ottawa Canada: IEEE, April 2008; 131-138

[12] Hu Wenbin, Zhang Deingyi, Lin Fu. An improved TCP congestion control mechanism based on double-windows for wireless network[C]// IEEE. ISWPC 2008. Santorini Greece: IEEE, 2008; 504-507

[13] Dai J-W, Chiang L-F. Hierarchical wireless mobile MPLS mechanism using foreign tracking agent based on $M/G/1$ with capacity c queueing model[J]. Communications, IET, 2007, 1(5): 903-908

(上接第 48 页)

[8] 张文涛, 卿斯汉, 吴文玲. 对一个基于细胞自动机的分组密码分析的分析[J]. 软件学报, 2004, 15(5): 767-771

[9] 张传武, 沈野樵, 彭启宗. 细胞自动机反向迭代加密技术研究[J]. 计算机学报, 2004, 27(1): 125-129

[10] Gutowitz H, Victor J D, Knight B W. Local structure for cellular

automata[J]. Physica D, 1987, 28; 18-48

[11] Kari J. Reversibility of 2 D cellular automata is undecidable [J]. Physica D, 1990, 45(1-3): 379-385

[12] Kari J. Reversibility and surjectivity problems of cellular automata[J]. Journal of Computer Systems Sciences, 1994, 48(1): 149-182