

文章编号:1001-9081(2010)01-0134-03

无线多跳网络的延迟性能分析

林颖, 许力

(福建师范大学 数学与计算机科学学院, 福州 350007)

(linyong_98@yahoo.com.cn; xuli@fjnn.edu.cn)

摘要:多跳无线网络技术具有广阔的应用前景。研究如何精确地分析、预知和保证多跳无线通信路线的端到端延迟性能非常重要。通过引入一个延迟违约概率的下限,扩展链路层等效带宽模型,并在不同的信道服务速率和无线信道条件下进行模拟。分析和仿真发现,与信道服务速率相比,最大多普勒频移对多跳延迟性能的影响更大。

关键词:多跳;无线网络;延迟;等效带宽;多普勒频移

中图分类号:TP393 **文献标志码:**A

Delay performance in wireless multi-hop networks

LIN Ying, XU Li

(School of Mathematics and Computer Science, Fujian Normal University, Fuzhou Fujian 350007, China)

Abstract: Wireless multi-hop networks have a wide range of application forecast. It is crucial to develop feasible methodologies and techniques for accurately analyzing, predicting and guaranteeing end-to-end delay performance over multi-hop wireless communication paths. Through extending the link-layer equivalent bandwidth model, a lower bound of delay-bound violation probability was derived. Analytical results were verified by extensive computer simulations under different traffic load and wireless channel conditions. Multi-hop delay performance is proved to be much more sensitive to maximum Doppler rate than channel service rate.

Key words: multi-hop; wireless network; delay; equivalent bandwidth; Doppler rate

0 引言

现有的多跳无线网络包括 mesh 网络、Ad Hoc 网络和传感器网络。在这些网络中,两个节点之间的通信是单跳或者多跳的,每个节点既是终端、接入设备,又是路由器。多跳网络在目标入侵检测、目标跟踪、战场勘察、抢险救灾、生物医疗、生态监测等领域都具有广阔的应用前景^[1]。

在源节点产生的数据包经过单跳或者多跳路径到达目的节点,这依赖于每个节点的传输范围和源节点与目的节点之间的距离,以及每个节点数据包的速率和传输路径上可用的链路带宽。在无线多跳网络中,为了有效地支持延迟敏感的应用,如森林火险、军事领域,精确地分析、预知和保证多跳无线通信路线的端到端延迟性能的技术是至关重要的。

通过映射物理层的关键参数,包括退化分布、多普勒频移以及信噪比,到数据链路层的参数,如延迟性能和延迟违约概率,等效带宽的概念能够简单却精确地刻画了数据链路层的模式^[2]。本文扩展了等效带宽模型,由分析单跳无线连接拓展到分析多跳延迟性能,引入一个延迟违约概率的下限,同时也对比了在不同条件下,多跳延迟性能不同。

1 系统模型

如图1所示,多跳无线网络中的一个路径包含许多节点。每个节点都可以产生新的包,并且转发从邻居节点获得的包。

图2中所示的队列模型用来刻画包在每个单跳无线链路

上的传输。假定链路是一个带高斯白噪声的无线退化信道, w_n 和 r_n 分别为在第 n 个采样时刻的瞬时噪声水平和服务速率。

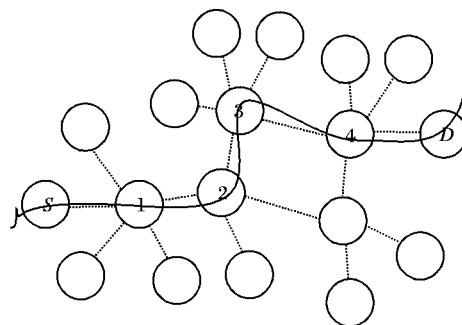


图1 多跳无线网络的示意图

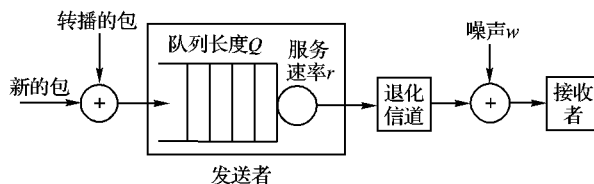


图2 单跳包传输的系统模型

在一个多跳的路径中,每个新的包在节点上接收都是独立的。本文假定包负载是统一分布在多跳无线网络中。记 μ 为新到达包和转发包的联合速率。在数据链路层上,新的和转发的包通常是混合在单队列中,并公平地以FIFO准则被服务。记 Q_n 为第 n 个采样时刻的即时队列长度。

收稿日期:2009-07-08;修回日期:2009-08-30。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60502047);福建省教育厅重点资助项目(JA07030);福建省自然科学基金资助项目(2008J0014;2007F3025)。

作者简介:林颖(1984-),女,福建福州人,硕士研究生,主要研究方向:网络优化、网络安全; 许力(1970-),男,福建南平人,教授,博士,主要研究方向:网络优化、网络安全。

2 多跳延迟分析

记随机变量 D_i 是第 i 跳稳定状态队列的延迟时间。对于单跳无线链路来说, D_1 超过一个延迟限制 D_{\max} 的概率可以用等效带宽来表示^[2]:

$$\Pr\{D_1 \geq D_{\max}\} \approx \gamma(r) e^{-\theta(r) D_{\max}} \quad (1)$$

其中 $\gamma(r)$ 和 $\theta(r)$ 是等效带宽中恒定信道服务速率 r 的函数。等效带宽的概念表明对于恒定信道吞吐量必须至少为 r , 其中 r 是 $\varepsilon = \gamma(r) e^{-\theta(r) D_{\max}}$ 的解。根据文献[4], $\{\gamma(r), \theta(r)\}$ 不仅仅是数学公式的结果, 这个模式有直接的物理意义。 $\gamma(r)$ 与边缘卷积分布函数相似, $\theta(r)$ 则与多普勒频移有关系。

从式(1)中可以得到等效带宽模型的累计分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF) $F_{D_1}(x)$ 和概率密度函数(Probability Density Function, PDF) $f_{D_1}(x)$:

$$F_{D_1}(x) = \text{prob}\{D_1 \leq x\} = 1 - \gamma(r) e^{-\theta(r)x}; x \geq 0 \quad (2)$$

$$f_{D_1}(x) = \frac{d}{dx} F_{D_1}(x) = \gamma(r) \theta(r) e^{-\theta(r)x} + (1 - \gamma(r)) \delta(x) \quad (3)$$

其中, $\delta(x)$ 是单位冲击函数。

对于 h 跳的普通路径, 源节点和目的节点之间的流量与新产生的和其他转发的流量在路由的中间节点混合在一起。仿照文献[5]的推导过程, 可以推出一个多跳无线网络的延迟下限的累计分布函数(CDF)。

$$F_h(x) = \text{prob}\left\{\sum_{i=1}^h D_i \leq x\right\} = \sum_{j=1}^h C_{h-j}^{h-1} \times (1 - \gamma(r))^{h-j} \times \gamma(r)^{j-1} \times \left[1 - e^{-\theta(r)x} \times \left(\sum_{i=1}^{j-1} \frac{(\theta(r)x)^{i-1}}{(i-1)!} + \frac{\gamma(r)(x\theta(r))^{j-1}}{(j-1)!}\right)\right] \quad (4)$$

延迟违约概率的下限是:

$$F_h(x) = \text{prob}\left\{\sum_{i=1}^h D_i > x\right\} = 1 - \sum_{j=1}^h C_{h-j}^{h-1} \times (1 - \gamma(r))^{h-j} \times \gamma(r)^{j-1} \times \left[1 - e^{-\theta(r)x} \times \left(\sum_{i=1}^{j-1} \frac{(\theta(r)x)^{i-1}}{(i-1)!} + \frac{\gamma(r)(x\theta(r))^{j-1}}{(j-1)!}\right)\right] \quad (5)$$

这个延迟违约概率的下限模型将在后文进行仿真比较。

3 仿真与对比

3.1 仿真参数

记 S_n 为在第 n 个采样时间间隔里, 队列中是否有包在传输, $S_n = 1$ 表示有包在传输, $S_n = 0$ 表示没有包在传输。如果有包在传输, 则记 T_n 为正在传输的包的剩余传输时间。 $\gamma(r)$ 和 $\theta(r)$ 这两个重要的参数可以用 N 采样的方法^[4] 精确计算:

$$\gamma(r) \approx \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N S_n \quad (6)$$

$$\theta(r) \approx \frac{\gamma(r) \times \mu \times N}{\sum_{n=1}^N (\mu \times T_n + Q_n)} \quad (7)$$

在仿真中, 可以使用式(6)、(7)来获得多跳延迟性能的

分析结果。本文中, 发送端可以知道每个时间采样时的瞬时信道增益 g_n 。设置 g_n 为瑞利随机变量, 加性高斯白噪声 w_n 的均值为 0 和方差为 1。相应的瑞利退化信道的服务速率 r_n 可以近似为瑞利退化信道的吞吐量^[4]:

$$r_n \approx \frac{r_{\text{avg}} \ln(1 + |g_n|^2)}{\ln(1 + \text{SNR}_{\text{avg}})} \quad (8)$$

其中, SNR_{avg} 是平均 SNR, 即 $\text{SNR}_{\text{avg}} = E[|g_n|^2]$, r_{avg} 是带相同 SNR_{avg} 值的等价高斯白噪声的吞吐量。

仿真中, 忽略包的传输时间, 因此, 1 跳无线网络的延迟性能可以近似为队列延迟, 如, $D_1 \approx Q_n/r_n$ 。

表 1 总结了一些重要的仿真参数。

表 1 仿真参数

参数	数值
信道增益 g_n	瑞利分布
加性高斯白噪声 w_n	均值为 0, 方差为 1
平均信道吞吐量 r_{avg}	150 Kbps, 250 Kbps
最大多普勒频移 f_m	10 Hz, 20 Hz
新包和转播包的联合速率 μ	70 Kbps
采样时间间隔 T_s	$1/\mu$
路由跳数 h	4

3.2 仿真结果与分析结果

图 3~6 显示了延迟违约概率在不同的最大多普勒频移 f_m 和信道吞吐量 r_{avg} 作用下的趋势图。其中, 分析结果是式(5)的计算结果。

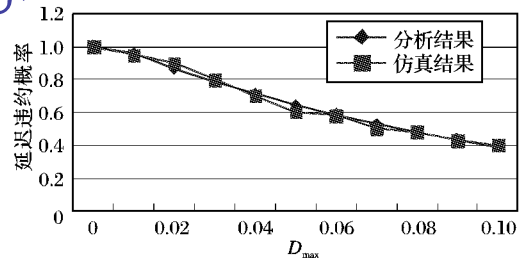


图 3 $f_m = 10$, $r_{\text{avg}} = 250$ Kbps 时, 延迟违约概率随 D_{\max} 变化

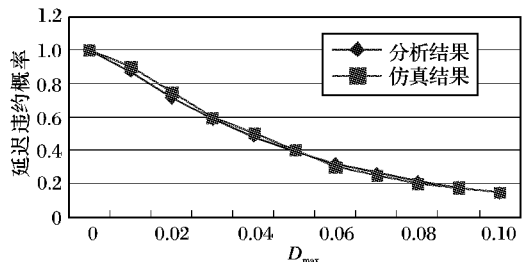


图 4 $f_m = 20$, $r_{\text{avg}} = 250$ Kbps 时, 延迟违约概率随 D_{\max} 变化

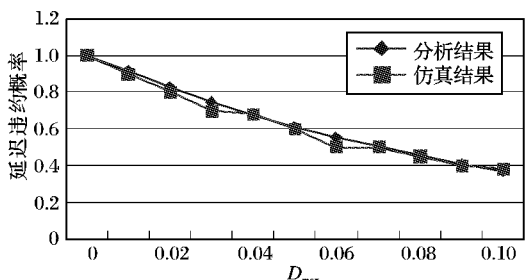


图 5 $f_m = 10$, $r_{\text{avg}} = 150$ Kbps 时, 延迟违约概率随 D_{\max} 变化

从图中可以看出仿真结果与分析结果很好地相互符合, 说明文中的模型能够较好地刻画多跳网络中的延迟性能。

3.2.1 最大多普勒频移 f_m

从图3~6中可以看出,在服务速率 r_n 相同的情况下,延迟违约概率 $\text{prob}\{\sum_{i=1}^h D_i > x\}$ 随着延迟界限 D_{\max} 的增大而急剧减小,特别是当最大多普勒频移较大时,延迟违约概率减小得更快。当 $D_{\max} = 0.02$, r_{avgn} 分别为 150 Kbps 和 250 Kbps 时,最大多普勒频移 f_m 从 10 Hz 变化到 20 Hz,延迟违约概率 $\text{prob}\{\sum_{i=1}^h D_i > x\}$ 从下降了 17.9% 增大到下降了 18.1%。

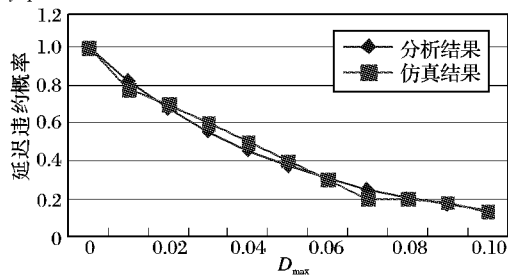


图6 $f_m = 20$, $r_{\text{avgn}} = 150$ Kbps 时,延迟违约概率随 D_{\max} 变化

3.2.2 服务速率 r_n

从图3~6中可以看出,在最大多普勒频移 f_m 相同的情况下,延迟违约概率 $\text{prob}\{\sum_{i=1}^h D_i > x\}$ 随着延迟界限 D_{\max} 的增大而减小,当服务速率 r_n 减小时,延迟违约概率缓慢减小。当 $D_{\max} = 0.02$,最大多普勒频移 f_m 分别为 10 Hz 和 20 Hz 时, r_{avgn} 从 150 Kbps 变化到 250 Kbps,延迟违约概率 $\text{prob}\{\sum_{i=1}^h D_i > x\}$ 从下降了 4.8% 变化到下降了 5.1%。

(上接第129页)

表2 数据预测误差对照表

时段 编号	实际 值/℃	SVR		RBF	
		预测值	相对误差/%	预测值	相对误差/%
1	15	14.78	1.48	14.30	4.89
2	15	14.80	1.35	14.50	3.44
3	16	16.30	1.84	15.67	2.10
4	17	17.60	3.40	17.31	1.79
5	18	18.40	2.17	17.40	3.44
6	18	18.60	3.22	18.80	4.25
7	20	19.40	3.09	19.40	3.09
8	22	21.50	2.32	23.20	5.17
9	23	22.48	2.31	24.00	4.17
10	26	25.20	3.17	28.00	7.14

可以看出,SVR 的平均相对误差为 2.435%,而 RBF 的平均相对误差为 3.948%。整体反映出 SVR 预测效果好于 RBF。

4 结语

本文创新性地将 SVR 算法用于无线传感器网络节点数据预测中,通过节点前期时段获得的数据,建立相应的样本空间,根据样本间数据变化关系,建立 SVR 模型,用于对未知数据进行预测。通过对不同参数取值的情况下,算法的平均预测相对误差的比较分析,实验结果显示算法的参数选择非常关键,不同的参数值将导致不同的预测误差。随着核参数 σ 的增大,平均预测相对误差在减小,当 σ 增加到一定值时,平均预测相对误差趋于平稳,在 2% 左右;在不同的参数 C 下,平均预测相对误差在 2% 到 3% 之间波动;在 m 值接近 9 时,得到的平均预测相对误差最小。通过在同样的样本空间的数

4 结语

本文在无线多跳网络中引入了一个延迟违约概率的下界,并且考虑一个带加性高斯白噪声的瑞利信道和最大多普勒频移的流动包模型。在不同的服务速率和无线信道条件下综合对比了分析结果和仿真结果,本文揭示了多跳延迟性能同最大多普勒频移和服务速率之间的关系。仿真结果发现,与信道服务速率相比,最大多普勒频移对多跳延迟性能的影响更大。

参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, SU W L, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. A survey on sensor networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114.
- [2] CHANG C S, THOMAS J A. Effective bandwidth in high-speed digital networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1995, 13(6): 1091-1100.
- [3] MARK B L, RAMAMURTHY G. Real-time estimation and dynamic renegotiation of UPC parameters for arbitrary traffic sources in ATM networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1998, 6(6): 811-827.
- [4] WU DAPENG, NEGI R. Effective capacity: A wireless link model for support of quality of service [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2003, 2(4): 630-643.
- [5] CHEN YU, CHEN JIA, YANG YANG. Multi-hop delay performance in wireless mesh networks [J]. Mobile Networks and Applications, 2007, 3(4): 378-387.

据预测,分别采用 SVR 和 RBF 作比较,结果显示算法 SVR 的平均预测相对误差要低于 RBF。

本文从理论分析和实验都证明了 SVR 算法在无线传感器网络节点数据预测上应用的可行性和有效性,可以解决传统统计方法无法解决的问题,对单个节点的数据预测不依赖于邻居节点,所以可以有效地解决无线传感器网络区域性的节点失效问题。

参考文献:

- [1] DEMPSTER A, LAIRD N, RUBIN D. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm [J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1977, 39(1): 1-38.
- [2] ALLISON P. Multiple imputation for missing data: A cautionary tale [J]. Sociological Methods and Research, 2000, 28(3): 301-309.
- [3] SHAFER J. Model-based imputations of census short-form items [C]// Proceedings of the Annual Research Conference. Washington, DC: Bureau of the Census, 1995: 267-299.
- [4] WILKINSON L. Statistical methods in psychology journals: Guidelines and explanations [J]. American Psychologist, 1999, 54(8): 594-604.
- [5] RAMAKRISHNAN S. Sensing the World [J]. Jasubhai Digital Media, 2003: 26-28.
- [6] HALATCHEV M, GRUENWALD L. Estimating missing values in related data streams [EB/OL]. [2009-02-20]. <http://comad2005.persistent.co.in/COMAD2005Proc/pages083-094.pdf>.
- [7] GRUENWALD L, CHOK H, ABOUKHAMIS M. Using data mining to estimate missing sensor data [C]// Proceedings of 7th IEEE International Conference on Data Mining. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 207-212.
- [8] VAPNIK V. The nature of statistical learning theory [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1995.