

部分信道交叠多跳无线网络容量渐近估计

陈永辉^{1,2} 朱光喜¹ 杨永立¹ 王德胜¹

(华中科技大学电信系武汉国家光电实验室(筹) 武汉 430074)¹

(湖北工业大学计算机学院 武汉 430068)²

摘要 无线多跳网络的基本问题是信道交叠情形下系统容量上限的估计以及最大容量的获取。建立有实效参数的容量渐近估计模型,不仅可以准确、深入描述部分交叠信道的竞争性与互助性对系统容量的影响,而且可以为系统容量优化提供重要理论参考依据。该模型揭示,无论是单播还是广播业务,网络容量峰值的达到是可用中继节点数与发送概率的匹配,更具体地说是归一化节点密度与节点数的乘积同节点发送概率的匹配。

关键词 部分信道交叠,协同与竞争,系统容量,多跳,无线网络

中图分类号 TP393.0 **文献标识码** A

Asymptotic Capacity of Partially Overlapped Channels Multi-hop Wireless Networks

CHEN Yong-hui^{1,2} ZHU Guang-xi¹ YANG Yong-li¹ WANG De-sheng¹

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)¹

(Department of Computer Science, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)²

Abstract The essential problems of wireless multi-hop networks are the evaluation of maximum capacity of partially overlapped channels communication system and how to achieve the capacity in the communication system. To establish an asymptotic capacity model with efficient and applied parameters not only could depict the competitive and coordinated features of the partially overlapped channels, but also could optimize the designation and capacity evaluation of the networks. The model in this paper shows that the maximum capacity relies on the coordination relationship of the sending probability and the numbers of available relay nodes of the source nodes. It relies on the source nodes could get the very number of relay nodes, which the mathematic expectation is ratio to the product of the normalized node density and the number of nodes in the multi-hop wireless networks, accordingly to the sending probability to achieve the maximum capacity.

Keywords Partially overlapped channels, Competitive and coordinated features, Capacity, Multi-hop, Wireless networks

无线网络向下一代演进的过程中,多跳通信以其更大的时、频、空联合自由度,成为无线通信重要发展方向之一。各种形态多跳网络(传感器网络、无线 Mesh 网络以及 adhoc 网络)的研究十分活跃。由于存在更强的资源协同调度可能,无线多跳网络除了具有传统的数据通信服务能力外,还能很强烈地提供 VoIP、流媒体等实时业务传输的潜力。由于存在动态自组织性及自愈特性,无线多跳网络可以获得比传统无线网络更大的工程优势:部署成本低、易维护、鲁棒性好、可靠性覆盖。但是,无线多跳通信为保证有 QoS 保证服务,不仅需要克服无线信道的衰落及时变特性,还需要克服拓扑时变性及信道交叠性带来的协议设计难题,容量估计与优化问题因此变得十分复杂、敏感。目前,多跳通信容量估计主要是关于节点吞吐量均值的定性结论:任意单播节点最大容量是 O

$(1/\sqrt{n})$ [1-3], 广播或 Internet 回传条件下则是 $O(1/n)$ [4,5], 而且,无线信道部分交叠性给多跳通信带来的协同与竞争特性在讨论中也没有得以充分体现。

1 信道交叠的相关特性

信道交叠引起的隐蔽站与暴露站问题,在一跳通信情况下,通过 RTS/CTS 机制基本可以避免。但在多跳通信情况下,系统容量就需要更多关注冲突避免概率了 [6]。部分信道交叠引起的冲突及范围与节点传输半径、网络半径、负载流量特性及节点移动性等直接相关。

1.1 传输半径与跳数

如图 1 所示,以最简单的多跳中继链路为例,若每段链路最大传输能力为 W ,通信跳数为 H ,则无论是绝对公平调度

到稿日期:2008-07-24 返修日期:2008-11-10 本文受 863(2006AA1Z277, 2008AA01Z204), 国家自然科学基金(60496315, 60502023), 湖北省自然科学基金(2007ABA008), 国际科技合作计划(2008DFA11630)资助。

陈永辉(1975—),男,博士生,讲师,主要研究方向为宽带无线通信, E-mail: hg_cyh@126.com; 朱光喜(1945—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为宽带无线通信; 杨永立(1971—),男,博士生,副教授,主要研究方向为宽带无线通信; 王德胜(1975—),男,博士,副教授,主要研究方向为宽带无线通信。

方式,还是虚电路方式,如图 1(a),(b)所示,每个节点最大有效传输能力均值都是 W/H 。虽然多信道、多射频技术可以带来 QoS 的改善,但不能提高无线资源利用效率。如图 1(c),(d)所示,信道交叠带来的隐蔽站与暴露站问题,在实际多跳通信系统中将变得更加复杂。

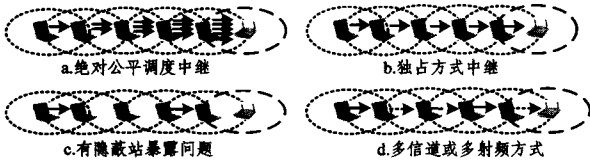


图 1 中继传输中的多跳问题

在单跳通信系统中,传输半径的减小预示着更低的传输功耗、更高的频率复用指数。但在多跳通信中,传输半径的减少,却预示着平均跳数的增加以及交叠信道冲突概率的升高。另外,虽然可以证明存在网络尺度无关的最短点到点连接^[7],但是网络半径的增加同样预示着网内通信平均跳数的增加或者节点功率的增加,也意味着更多的信道干扰、更复杂的资源调度,意味着有 QoS 保证的协议设计更加困难,甚至不可实现。

1.2 业务与容量

系统容量分析与应用场景直接相关,当前容量分析主要是单播与多播两类。广播与 Internet 回传业务虽然同属多播,而且吞吐量同阶^[4,5],但是通信冲突发生原因却有明显不同。对于 Internet 回传业务,网关处发生的冲突直接导致吞吐量下降。对于广播业务,所有通信链路上传输的是同样负载,同样导致通信系统效率下降。当然,无论是什么业务,中继通信必须逐跳去完成,即使中继节点是移动的。

无论移动方向是随机的还是有约束的,移动节点参与中继,从概率上说都可以减小通信跳数,从而提升系统吞吐能力^[7,8]。但节点移动性带来的拓扑时变性同时也限制了系统容量^[9]。现有实用移动中继通信研究主要集中在车载通信相关问题上,主要是因为运动具有很强的可预测性。节点移动性对于多跳通信仍然是难以取舍的两难问题。

2 多跳容量竞争与协同共存

本文的容量分析模型更加关注部分交叠的信道竞争与协同性分析。多跳通信与单跳通信的本质区别不在于物理信道的接入方式,而在于对时、频、空等资源的协同优化。部分信道交叠情况下,协同必然存在竞争。无线多跳通信系统容量估计的困难就在于对协同与竞争的描述。为更合理、有效讨论部分信道交叠多跳网络容量,模型有如下基本假设:1)每个多跳通信子网半径为 R ,容纳 N 个节点;2)节点最大传输半径为 r ,最大传输能力为 ω ,平均发送概率为 p_u ;3)节点空间位置在 $>2r$ 的尺度上符合均匀分布,在 $<2r$ 尺度上符合泊松分布;4)节点通过发现帧可以确定一跳邻节点位置及目的节点方向。

2.1 竞争性与协同性的概率分析

2.1.1 节点密度与跳数的归一化

根据上述假设 1、2、3,在一个多跳子网内,若存在且仅存在一个区域调度/接入中心,则其最小跳数覆盖拓扑的边界应为以该节点为中心、以 R 为半径的圆形,如图 2 所示。覆盖在 $k=1$ 中心区域内的节点只需要一跳通信,覆盖在 $k=2$ 环

区域内的节点至少需要两跳通信。类推,覆盖第 k 个环需要 k 跳。均匀分布情形下,可得 k 环内节点数为

$$N_k = (2k-1)N\rho, k=1,2,\dots,M=R/r$$

其中, $\rho = E(n)/N = (r/R)^2 = 1/M^2$ 为无量纲节点归一化密度。 $E(n)$ 是 $<2r$ 范围区内节点数期望。

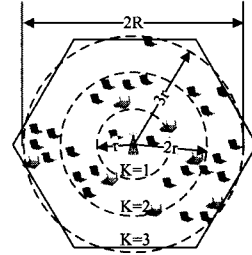


图 2 多跳网络内节点分布与跳数关系

2.1.2 节点孤立概率

根据假设 3、4,节点在一跳传输范围内符合泊松分布,并能够侦测中继节点位置,且节点有 k 个前向中继节点的概率是^[10] $p(k;\lambda = n_f) = e^{-n_f} n_f^k / k!$ 。其中, n_f 是指一跳范围内可用中继节点数的数学期望。若节点为全向天线,其传输区域为圆形,则 n_f 为传输范围内平均节点数的一半^[10];若节点为智能天线,可实现波束成形等技术,则 n_f 为节点天线覆盖区域范围内节点数 $E(n)$ 的加权,权值 α 依赖于智能天线技术,即

$$n_f = \alpha E(n_{\text{cell}}) = \alpha \rho N, \alpha \in (0,1], \rho \in (0,1]$$

故一个节点被孤立的概率为

$$p_{\text{iso}} = P(k=0; n_f) = e^{-n_f}$$

2.1.3 竞争与协同的统一

根据假设 2,节点在一跳范围内成功接入信道的概率 p_f 是其传输半径范围内所有其它 $n-1$ 个节点均不传输,即 $p_f = (1-p_u)^{n-1}$,其数学期望值为:

$$E(p_f) = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{e^{-n_f} n_f^k}{k!} (1-p_u)^k$$

当 $n > 10$ 时,取下式误差几乎可以忽略:

$$E(p_f) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n \frac{e^{-n_f} n_f^k}{k!} (1-p_u)^k = e^{-p_u n_f} \quad (1)$$

节点成功发送概率 p_s 定义为成功接入信道,并将数据向目的节点方向的下一跳节点成功发送。根据下一节点选择策略的层次相关性不同, p_s 可取不同值。当链路选择策略与路由选择策略完全相关时,有

$$p_s = E(p_f) - P_{\text{iso}} = e^{-p_u n_f} - e^{-n_f} \quad (2)$$

在绝对公平调度情况下,根据多跳通信最后一跳约束通信能力约束,还应满足 $\sum_{h=1}^{h_{\text{max}}} p_s^h / h \leq 1$ 。

2.2 容量建模

根据文献[1]的节点吞吐量定义及 2.1 节的讨论,节点 $X(i)$ 平均容量定义为:

$$C_{X(i)} = p_s^i \omega / H_i \quad (3)$$

其中, h_i 为实际通信跳数, H_i 为同流量集合跳数。例如对于单播业务,定义 h_i, H_i 均为 $X(i)$ 至其目的节点的通信跳数,此时 $C_{X(i)} = p_s^i \omega / h_i$ 。在广播情况下,所有节点传输相同数据包,等效为在一个长度为 N 的链路上传输同一个数据包,有 $H_i \equiv N$ 。但不同网络组织形式下,到达 $X(i)$ 传输的数据包实际跳数 h_i 肯定会有所不同,此时 $C_{X(i)} = p_s^i \omega / N$ 。明显

式(3)是统计意义上的定义。依此定义,多跳网络有效容量可以描述为节点有效容量 $C_{X(i)}$ 的累加:

$$C = \sum_{i=1}^N C_{X(i)} \quad (4)$$

3 容量限的估计

3.1 单播容量上限估计

全网任意单播流量,即“任意网络”^[1]流量,系统容量上限与网络拓扑无关。每节点只与一跳邻节点进行通信时,根据式(3)、(4)及 $h_i = H_i \equiv 1$,有

$$C = p_u \omega N = (e^{-p_u n_f} - e^{-n_f}) \omega N = (e^{-\alpha p_u \rho N} - e^{-\alpha \rho N}) \omega N$$

可得容量 C 极值条件为:

$$n_f = \alpha \rho N = \ln p_u / [(p_u - 1)] \quad (5)$$

当 α 与 p_u 均为常数,即发射接收方式固定、节点负载一定时,为获得最大容量, ρ 与 N 在系统容量取值点上呈反比关系。另外,从图 3 可以看出, ρ 一定, N 越大,系统容量越大; N 一定, ρ 越小,系统容量越大。

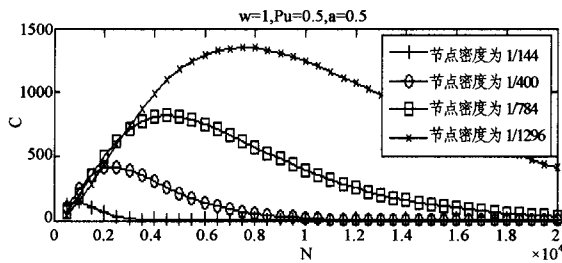


图 3 单播 N - ρ - C 关系

3.2 多播容量上限

3.2.1 广播容量上限

若多跳通信子网内只有一个广播中心,根据 2.1.1 节的基本结论与式(3)、(4),有

$$C = \sum_{k=1}^M N_k p_s^k \omega / N = (\omega / M^2) \sum_{k=1}^M (2k-1) p_s^k \quad (6)$$

若存在多个均匀分布式广播中心,有

$$C_R = (\omega / M_R^2) \sum_{k=1}^{M_R} (2k-1) p_s^k \quad (7)$$

其中 N_A 是广播中心个数, $M_R = M / \sqrt{N_A}$ 。

3.2.2 回传容量上限

若多跳通信子网内只有一个接入点时,根据 2.1.1 节的基本结论与式(3)、(4),有

$$C = \sum_{k=1}^M N_k p_s^k \omega / k = (N \omega / M^2) \sum_{k=1}^M (2k-1) p_s^k / k \quad (8)$$

同理,子网分裂后有

$$C_R = (N \omega / M_R^2) \sum_{k=1}^{M_R} (2k-1) p_s^k / k \quad (9)$$

所不同的是 N_A 是接入点的个数。

3.2.3 小结

根据式(6)、(7)以及式(8)、(9),很容易有结论

$$C_R / C \approx (M / M_R)^2 = N_A$$

故讨论可以只限于式(6)、(8)。若不考虑个性通信效用,即对于广播流量也取 $H_i = h_i$,广播流量与回传流量的容量限应该是一致的。但是如果考虑该效应,如图 4 所示,节点密度的降低并不利于广播容量的提升。相反,节点密度越高,系统

容量越高。

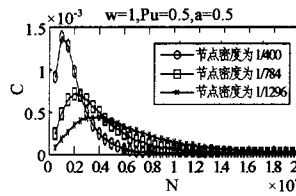


图 4 广播单播 N - ρ - C 关系

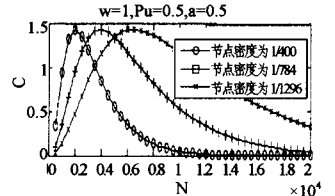


图 5 回传 N - ρ - C 关系

在回传流量时(如图 5 所示),系统容量上限与节点数或密度并不相关,系统容量上限始终是个常量,节点密度明显对于容量限曲线稳定性有很强相关性。节点密度越小,系统能容纳的节点数越多,并且系统稳定性也越好。相反,节点密度越大,结论正好相反。实际上,对式(8)求极值,同样可得到与式(5)相同的近似极值条件。

结束语 本文提供的容量渐近估计算法有明确实效参数,并充分考虑竞争与协同问题。模型分析中没有考虑多子信道问题,因为根据香农的容量限结论,多子信道在单路由传输时并不能本质提高系统容量。只要获得合理的 p_s 估计值,模型在精确分析多跳网络容量上有更强的实用性与指导性。

模型揭示,无论是单播还是广播业务,影响网络容量峰值的是可中继节点数与用户发送概率关系的匹配,更具体地说是节点密度与网络节点数的乘积与节点发送概率的匹配。

参考文献

- [1] Gupta P, Kumar P R. The capacity of wireless networks[J]. Information Theory, IEEE Transactions on, 2000, 46: 388-404
- [2] Kulkarni S R, Viswanath P. A deterministic approach to throughput scaling in wireless networks[J]. Information Theory, IEEE Transactions on, 2004, 50: 1041-1049
- [3] Li J, Blake C, Couto D S J D, et al. Capacity of ad hoc wireless networks[C] // Proc. ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM). 2001: 61-69
- [4] Jangeun J, Sichitiu M L. The nominal capacity of wireless mesh networks[J]. Wireless Communications, IEEE [see also IEEE Personal Communications], 2003, 10: 8-14
- [5] Tavli B. Broadcast capacity of wireless networks[J]. Communications Letters, IEEE, 2006, 10: 68-69
- [6] Gallager R. A perspective on multiaccess channels[J]. Information Theory, IEEE Transactions on, 1985, 31: 124-142
- [7] Grossglauser M, Tse D N C. Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks[J]. Networking, IEEE/ACM Transactions on, 2002, 10: 477-486
- [8] Diggavi S N, Grossglauser M, Tse D N C. Even One-Dimensional Mobility Increases the Capacity of Wireless Networks[J]. Information Theory, IEEE Transactions on, 2005, 51: 3947-3954
- [9] Jafar S A. Too much mobility limits the capacity of wireless ad hoc networks[J]. Information Theory, IEEE Transactions on, 2005, 51: 3954-3965
- [10] Miorando E, Granelli F. On Connectivity and Capacity of Wireless Mesh Networks[C] // Communications, 2007. ICC '07. IEEE International Conference, 2007: 91-95