

分簇 CDMA 无线 Ad Hoc 网络吞吐量性能研究^{*}余根坚^{1,2} 郑宝玉¹(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)¹ (福州大学数学与计算机科学学院 福州 350002)²

摘 要 本文研究了分簇 CDMA 无线移动 Ad Hoc 网络的簇间吞吐量性能的上界。在分簇无重叠的情况下,网络的簇间吞吐量性能的上界为 $\Theta(n^{1/2})$;若在分簇有部分重叠的情况下,其网络吞吐量的上界则为 $\Theta(1/\log n)$ 。

关键词 CDMA 无线 Ad Hoc 网络, 吞吐量性能, 独占域

The Throughput Capacity of Cluster CDMA Wireless Ad Hoc Networks

YU Gen-Jian^{1,2} ZHENG Bao-Yu¹(Department of Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003)¹(Department of Mathematics and Computer Science, Fuzhou University, Fuzhou 350002)²

Abstract This paper addresses the upper bound of throughput capacity of cluster CDMA wireless Ad Hoc networks, and draws the conclusion that the upper bound throughput capacity is $\Theta(n^{1/2})$ if there is no overlapping cluster of the networks, and in the other hand, the upper bound throughput capacity is $\Theta(1/\log n)$ if there is partial overlapping cluster of the networks.

Keywords CDMA wireless networks, Throughput capacity, Exclusive area

1 引言

Ad Hoc 网络是一个自组织、自启动的无线移动网络,它不需要中心基站的支持,没有固定的网络架构,是一种特殊的无线网络。Ad Hoc 网络的节点之间的相互通信是通过无线信道对等的信息包传送和单跳多跳路由来完成的,这种节点间并发的信息包传送会造成节点间的相互干扰,从而使网络性能和吞吐量下降,那么如何提高网络吞吐量就成了研究 Ad Hoc 网络的一个重要方向,在已有的文献中^[1~4],通过各种信息包传送策略、单跳或多跳路由协议、能量控制、持续性干扰抵消、定向天线等方法来改善网络性能,提高吞吐量。近年来有关无线移动 Ad Hoc 网络、TDMA/CDMA 以及综合 Mesh 网络的网络吞吐量性能研究引起了研究人员的极大关注,成了当前的一个研究热点,大量文章涌现,如文[5~11]。

码分多址 CDMA (Code Division Multiple Access) 无线 Ad Hoc 网络的研究始于上个世纪 80 年代末期,CDMA 是一种组合了随机接入和固定接入的多址接入机制,可以提高系统灵活性。文[1]研究了扩频 CDMA 无线 Ad Hoc 网络传输的差错概率,并且指出跳频(Frequency Hopping)是解决和提高直接序列 CDMA 无线 Ad Hoc 网络吞吐量性能的一个重要方法,扩频也经常用于克服 CDMA 无线 Ad Hoc 网络中不可避免的节点间相互干扰^[2]。文[3]指出,持续性干扰抵消是提高无线 Ad Hoc 网络性能的关键技术之一,在 CDMA 系统中采用功率控制技术是非常重要的,每个节点需要调整它的发送功率,以便接收节点处的信号具有近似相等的功率,否则距离接收节点较近的节点的信号会淹没较远节点的信号,即产生所谓的远近效应(Near-Far-Effect),由于远近效应的影响,跳扩频技术 FHSS(Frequency Hopped Spread Spectrum)

在改进 CDMA 无线 Ad Hoc 网络吞吐量性能方面具有很大优势。

CDMA 无线 Ad Hoc 网络的吞吐量性能细化到节点间时,其实是随着环境、时间、干扰等各种因素变化的随机量,文[4]中无线 Ad Hoc 网络吞吐量性能是以无线信道传送的信息流来衡量的。文[5]则在多径衰弱信道下,针对四种衰弱信道类型:平坦慢衰弱、平坦快衰弱、频率选择性慢衰弱、频率选择性快衰弱,以及节点能量约束的情况下,分别研究了无线网络的吞吐量性能。CDMA 无线 Ad Hoc 网络的吞吐量性能也可以定义为在满足一定的目标节点接收信息概率的条件下,节点间并发传送信息的最大允许密度^[9],对于跳频和扩频 CDMA 无线 Ad Hoc 网络,文[6]中给出了网络吞吐量性能的上下界。文[7]是在大规模 CDMA 无线 Ad Hoc 网络环境下,网络吞吐量性能是被界定为网络在传送信息时,使用网络带宽、时间、频谱、发射功率的效率,这样 CDMA 无线 Ad Hoc 吞吐量性能就结合了通信理论、信息论和编码理论来进行研究,另外文[7]主要研究了在最优码率分配和最优 MAC 路由协议下时,大规模 CDMA 无线 Ad Hoc 网络的吞吐量性能。文[8]研究了如何提高蜂窝式 CDMA 系统的吞吐量性能,提出了网络中继协议 RSSP(Relay Station Selection Protocol),结果发现蜂窝式 CDMA 系统的信息传送通过 Ad Hoc 网络中继,在上述 RSSP 协议下,蜂窝式 CDMA 系统的网络吞吐量得到了提高。文[9,10]分别从持续性干扰抵消和信息包的重传分集角度研究了 CDMA 无线 Ad Hoc 网络的吞吐量性能,而文[11]是在一个恒定节点密度的无线 Ad Hoc 网络环境下,从信息论角度严格证明了当功率以 $O(1/r^\alpha)$ 形式衰减时(这里 $\alpha > 2$),网络吞吐量性能上界将随着用户数的增多而趋于零。

^{*} 基金资助项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60372107)。余根坚 在职博士,主要研究方向:网络智能信息处理、无线网络、复杂网络;郑宝玉 教授,博士生导师,主要研究方向:网络智能信息处理、通信信号处理和无线网络。

从已有的文献来看,分簇 CDMA 无线 Ad Hoc 网络的吞吐量性能的研究还未见报道,所以本文将着重于研究分簇 CDMA 无线 Ad Hoc 网络的吞吐量性能。

2 分簇 CDMA 无线 Ad Hoc 网络系统模型

考虑一个具有 n 个节点的 CDMA 无线 Ad Hoc 网络 Ω_n , 节点在平面上随机分布,不失一般性,我们考虑 Ω_n 由两簇组成,如图 1 所示,每一簇含 $n/2$ 个节点,并都落在半径为 R 的圆内,两簇之间的距离为 d ,簇内节点随机分布。并用 X_i ($1 \leq i \leq n$) 来表示节点, ρ_{ij} 表示节点 X_i 与 X_j 之间的距离,每个节点都装备有无线收发装置,节点的信息传送通过 CDMA 公用信道,如图 2 所示。

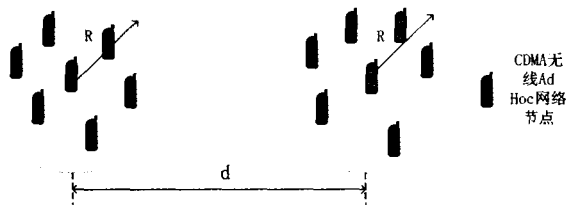


图 1 分簇 CDMA 无线 Ad Hoc 网络

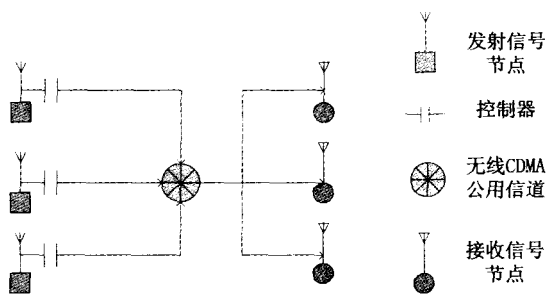


图 2 CDMA 无线 Ad Hoc 网络的信息包传送

协议模型采用文[4]中模型,即节点 X_i 通过某个 CDMA 公用子信道成功实现向节点 X_j 的信息包传送的充要条件为:

$$\rho_{ij} \leq r_i, \text{ 且 } \rho_{ij} \geq (1+\Delta)r_i, \quad k \neq i \quad (1)$$

其中 r_i 为节点 X_i 的通信距离, $\Delta > 0$ 为常数参量。并假定在成功传输的情况下,其传输带宽为 W 比特/秒(Bit/s)。

3 分簇 CDMA 无线 Ad Hoc 网络的信息传输和独占域

CDMA 无线 Ad Hoc 网络通信的拓扑结构为点对多点传输,通信环境为多址链路,假设在时隙 Δt 内节点 X_i 向节点 X_j 发送的扩频码信号所占用 k_i 的个信道状态增益为 $(\mu_{i1}^{(\Delta t)}, \mu_{i2}^{(\Delta t)}, \dots, \mu_{ik_i}^{(\Delta t)})$ 。由于存在多用户干扰和多径干扰,发送信号的信干比 SINR(Signal to Interference and Noise Ratio)必须大于某个门限值 α ,所以在一个时隙 Δt 内,分组信息包被成功接收的条件可表达为:

$$\frac{P \mu_{ij}^{(\Delta t)}}{\sigma^2 + \sum_{m=1, m \neq j}^k P \mu_{im}^{(\Delta t)}} > \alpha \quad (2)$$

其中 P 为节点发送功率, σ^2 为独立同分布高斯环境噪声方差。

假定所考察的 CDMA 无线 Ad Hoc 网络的节点密度为 λ , 并且所有节点的地位是平等的,则网络保持连通性的必要

条件是节点的有效信息传输半径为^[12]:

$$r(\lambda) = \sqrt{\frac{c \log \lambda A}{\lambda}} \quad (3)$$

其中 A 为网络在平面上所覆盖的区域面积, $c > 1/\pi$ 为常数。

定义 1 假设 CDMA 无线 Ad Hoc 网络的发射信息节点为 X_i , 接收信息节点为 X_j , 则关于 X_i, X_j 的最大独占域定义为:

$$E = \{l | \rho_{li} + \rho_{lj} \leq (1+\Delta)\rho_{ij}, l \neq i, l \neq j, 1 \leq l \leq n\} \quad (4)$$

上式意味着 $\forall l \in E$, 为了信息的成功传输, 节点 X_i 必须处于休眠状态。并且易见(4)式在平面上所覆盖的区域为椭圆。

4 分簇 CDMA 无线 Ad Hoc 网络吞吐量性能

设 Ω_s 作为 CDMA 无线 Ad Hoc 网络 Ω_n 的发送信息节点簇, 而 Ω_r 作为 CDMA 无线 Ad Hoc 网络 Ω_n 的接收信息节点簇, 并且 $d \geq 2R$, 如图 1 所示。(4)式所覆盖的椭圆的长轴长为 $(1+\Delta)\rho_{ij}$, 短轴长为 $\rho_{ij} \sqrt{\Delta(2+\Delta)}$, 面积为 $\frac{\pi \rho_{ij}^2 (1+\Delta) \sqrt{\Delta(2+\Delta)}}{4}$ 。当节点数 n 充分大时, 为保持 CD-

MA 无线 Ad Hoc 网络的节点密度 λ 不变, 则 R 也变得充分大, 这时在两簇 Ω_s 和 Ω_r 之间最多可以容纳的独占域的个数近似为 $k = \frac{2R}{\rho_{ij} \sqrt{\Delta(2+\Delta)}}$, 由于独占域内信息传输的成功性, 从而两簇 Ω_s 和 Ω_r 之间的最大吞吐量为

$$\text{Max}\{C(\Omega_s, \Omega_r)\} = k \cdot W = \frac{2RW}{\rho_{ij} \sqrt{\Delta(2+\Delta)}} \quad (5)$$

由于 $\lambda = \frac{n/2}{\pi R^2}$, 则 $R = \sqrt{\frac{n}{2\pi\lambda}}$, 所以有:

$$\text{Max}\{C(\Omega_s, \Omega_r)\} = \frac{W}{\rho_{ij}} \sqrt{\frac{2n}{\pi\lambda\Delta(2+\Delta)}} \quad (6)$$

由此可见, 此时分簇 CDMA 无线 Ad Hoc 网络簇间吞吐量的上界为 $\Theta(n^{1/2})$ (Θ 表示同阶)。

如果 $0 < d < 2R$, 这时两簇之间有部分重叠, 如图 3 所示。这时重叠部分面积为:

$$S = 4R^2 \arccos\left(\frac{d}{2R}\right) - \frac{d \sqrt{4R^2 - d^2}}{2} \quad (7)$$

非重叠部分面积为 $S' = 2\pi R^2 - S$, 由(3)式, 当节点数 n 充分大时, 知道非重叠部分的有效连通半径近似为:

$$r' = \sqrt{2\pi R^2 S'} \sqrt{\frac{c \log n}{n}} \quad (8)$$

而重叠部分的有效连通半径近似为:

$$r = \sqrt{2\pi R^2 S} \sqrt{\frac{c \log n}{n}} \quad (9)$$

这时在两簇 Ω_s 和 Ω_r 之间最多可以容纳的独占域的个数近似为:

$$k = \frac{S'}{\frac{\pi r'^2 (1+\Delta) \sqrt{\Delta(2+\Delta)}}{4}} + \frac{S}{\frac{\pi r^2 (1+\Delta) \sqrt{\Delta(2+\Delta)}}{4}} \quad (10)$$

即

$$k = \frac{4}{(\pi R^2) c (1+\Delta) \sqrt{\Delta(2+\Delta)}} \cdot \frac{n}{\log n} \quad (11)$$

同理, 由 $R = \sqrt{\frac{n}{2\pi\lambda}}$, 从而知道:

$$k = \frac{8\lambda}{\pi c (1+\Delta) \sqrt{\Delta(2+\Delta)}} \cdot \frac{1}{\log n} \quad (12)$$

(下转第 91 页)

2001. 49~58
- 15 Mitra P, Wiederhold G, Kersten M. A graphoriented model for articulation of ontology interdependencies. In: Proc. Extending DataBase Technologies, Lecture Notes in Computer Science, Vol 1777. Springer, Berlin Heidelberg New York, 2000. 86~100
 - 16 ZDo Hong-Hai, Rahm E. COMA - A System for Flexible Combination of Schema Matching Approaches. In: Proc. 28th Intl Conference on Very Large Databases (VLDB), Hongkong, Aug, 2002
 - 17 Doan A, Domingos P, Halevy A Y. Reconciling Schemas of Disparate Data Sources: A Machine Learning Approach. In: Proceedings of the ACM SIGMOD Conference, 2001
 - 18 Madhavan J, Bernstein P, Doan A, et al. Halevy. Corpus-based schema matching: [Technical Report]. 2004-06-04. University of Washington, 2004
 - 19 Dhamankar R, Lee Y, Doan A, et al. iMAP: Discovering Complex Semantic Matches between Database Schemas. In: Proceedings of the 2004 ACM SIGMOD, International Conference on Management of Data, Paris, France, 2004
 - 20 Doan A. Learning to Map between Structured Representations of Data: [Ph D Dissertation]. Univ of Washington-Seattle, 2002
 - 21 Xu Li, Embley D W, Young B. Discovering Direct and Indirect Matches for Schema Elements. Eighth International Conference on Database Systems for Advanced Applications (DASFAA '03). Kyoto, Japan, March 2003
 - 22 Miller R J, Haas L M, Hernández M. Schema Mapping as Query Discovery. VLDB Cairo, Egypt, Sept, 2000. 77~88
 - 23 Yan Ling-Ling, Miller R, Haas L. Data-driven understanding and refinement of schema mappings. In: Proc. 2001 ACM SIGMOD Conference, 2001. 485~496
 - 24 Velegarakis Y, Miller R J, Popa L, et al. Mapping Adaptation Under Evolving Schemas. In: 2nd Hellenic Symposium of Data Management, Sep. 2003
 - 25 费爱蓉, 穆斌, 蒋建国. 基于本体的 xml 数据集集成及映射关系的研究. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2004, 27(8): 911~914

- 26 Melnik S, Rahm E, Bernstein P. Rondo: A programming platform for generic model management. In: Proc. of SIGMOD, 2003
- 27 Bernstein A. Applying Model Management to Classical Meta Data Problems. In: Proceedings of the Conference on Innovative Data Systems Research (CIDR), 2003
- 28 Melnik S, Bernstein P A, Halevy A Y, et al. Supporting Executable Mappings in Model Management. In: SIGMOD Conference 2005. 167~178
- 29 Ng W S, Ooi B C, Tan K L, et al. Peerdb: A p2p-based system for distributed data sharing. Intl. Conf. on Data Engineering (ICDE), 2003
- 30 Arenas M, Kantere V, Kementsietsidis A, et al. The Hyperion Project: From Data Integration to Data Coordination. SIGMOD Record, 2003. 53~58
- 31 Kementsietsidis A, Arenas M, Miller R. Mapping Data in Peer-to-Peer Systems: Semantics and Algorithmic Issues. In: Proc. of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, 2003
- 32 Kantere V, Kiringa I, Mylopoulos I, et al. Coordinating Peer Databases Using ECA Rules. International Workshop on Databases, Information Systems and Peer-to-Peer Computing (DBISP2P), September 2003
- 33 Tatarinov I, Ives Z, Madhavan A, et al. Peter Mork: The Piazza peer data management project. SIGMOD Record 2003, 32(3)
- 34 Halevy A Y, Ives Z G, Suciu D, et al. Schema Mediation in Peer Data Management Systems. In: Proc. of ICDE, 2003
- 35 Halevy A Y, Ives Z G, Mork P, et al. Peer Data Management Systems: Infrastructure for the Semantic Web. WWW Conference, 2003
- 36 Tatarinov I, Halevy A. Efficient Query Reformulation in Peer Data Management Systems. SIGMOD, 2004

(上接第 41 页)

从而两簇 Ω_k 和 Ω_l 之间的最大吞吐量为

$$\text{Max}\{C(\Omega_k, \Omega_l)\} = k \cdot W = \frac{8\lambda W}{\pi c(1+\Delta) \sqrt{\Delta(2+\Delta)}} \cdot \frac{1}{\log n} \quad (13)$$

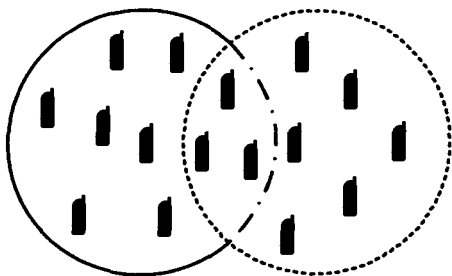


图 3 有重叠的分簇 CDMA 无线 Ad Hoc 网络

由此可见,此时分簇 CDMA 无线 Ad Hoc 网络簇间吞吐量的上界为 $\Theta(1/\log n)$,这意味着当分簇网络有重叠时,其吞吐量上界将随着用户数的增多而趋于零,这个结论与文[11]有着异曲同工之处,而文[4]中指出每个源宿节点对之间的吞吐量近似地以 $1/\sqrt{n}$ 的速率递减,这从多方面印证了网络吞吐量在许多种情况下都受到制约。

若 $d=0$,则两簇 Ω_k 和 Ω_l 完全重合,这种情况相关文[1~3, 12, 13]都详细进行了谈论,本文就不再赘述。

结论 本文主要研究了分簇 CDMA 无线 Ad Hoc 网络的簇间吞吐量性能上界,在网络分簇无重叠的情况下,网络的簇间吞吐量性能的上界为 $\Theta(n^{1/2})$;若在分簇有部分重叠的情况下,其网络吞吐量的上界则为 $\Theta(1/\log n)$,所以要保持较高的系统吞吐量,分簇的 CDMA 无线 Ad Hoc 网络不能重叠,当分簇网络有重叠时,其吞吐量上界将随着用户数的增多而趋于零。

将来需要进一步研究的工作是结合具体的网络分簇算法,以及网络拓扑控制理论等来研究 CDMA 无线 Ad Hoc 网络的吞吐量性能。

参考文献

- 1 Diggavi S, Grossglauser M, Tse D. Even One-dimensional Mobility Increases Ad Hoc Wireless Capacity [J]. In: Proc. IEEE Int. Symp. Inform. Theory, Lausanne, Switzerland, 2002
- 2 Knopp R, Humblet P A. Information Capacity and Power Control in Single-cell Multiuser Communications [J]. In: Proc. Int. Conf. Communications, Seattle, WA, 1995, 1: 254~335
- 3 Toupis S, Goldsmith A J. Capacity regions for wireless ad hoc networks [J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2003, 24(5): 736~748
- 4 Gupta P, Kumar P R. The capacity of wireless networks [J]. IEEE Transaction of Information Theory, 2000(46): 388~404
- 5 Xue F, Xie L L, Kumar P R. The transport capacity of wireless networks over fading channels [J]. Information Theory, IEEE Transactions on, 2005, 51(3): 834~847
- 6 Weber S, Yang X, De Veciana G, Andrews J G. Transmission capacity of CDMA ad hoc networks [C]. In: Proc. IEEE Intl. Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, Sydney, Australia, 2004.
- 7 Sun Y. Transport Capacity of Large Wireless CDMA Ad Hoc Networks [C]. IEEE 6th CAS Symp. on Emerging Technologies; Mobile and Wireless Commun. Shanghai, China, 2004
- 8 Zhao D M, Terence D, Todd. Cellular CDMA capacity improvement using ad hoc relaying [C]. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2004. PIMRC 2004. 15th IEEE International Symposium on, 2004, 1: 719~723
- 9 Weber S, Andrews J G, Yang X. Transmission capacity of CDMA ad hoc networks employing successive interference cancellation [C]. Global Telecommunications Conference, 2004, GLOBECOM IEEE, 2004, 5: 2838~2842
- 10 Sun Y. Capacity of large wireless CDMA ad hoc networks with retransmission diversity [C]. Signals, Systems and Computers, Conference Record of the Thirty-Sixth Asilomar Conference on, 2002, 2: 1508~1512
- 11 Leveque O, Telatar I E. Information-theoretic upper bounds on the capacity of large extended ad hoc wireless networks Information Theory [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(3): 858~865
- 12 Gupta P, Kumar P R. Critical power for asymptotic connectivity in wireless networks. In stochastic analysis, control, optimization and applications [M]. Boston, MA, Birkhauser, 1998. 100~135
- 13 Viswanath P, Anantharam V. Optimal sequences and sum capacity of synchronous CDMA systems [J]. IEEE Transactions on information theory, 1999, 45(6): 1984~1991