

无标度网络上的队列资源重分配策略*

张 帅, 梁满贵

(北京交通大学 信号与信息处理研究所, 北京 100044)

摘要:在实际的通信系统中,由于物理条件的限制,每个节点都具有有限长度的队列。研究了在有限队列资源的条件下,队列资源对无标度数据流动力学的影响。提出了一种队列资源重分配策略,策略中节点的队列长度与节点的介数成正比。仿真结果表明,在无标度网络中使用最短路径路由的条件下,所提出的重分配策略可以有效地改进网络的容量。同时对有限队列资源条件下的网络容量进行了理论分析。

关键词:队列资源;无标度网络;复杂网络;介数;网络容量

中图分类号:0414 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2013)04-0109-05

Queue resource reallocation strategy for scale-free network

ZHANG Shuai, LIANG Mangui

(Institute of Information Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In real communication systems, each node has a finite queue due to physical constraints. In this study, the influence of queue resource on data traffic dynamic in scale-free networks with finite queue resource was investigated. And a queue resource reallocation strategy was proposed. In this strategy, the allocation of queue length on node i is based on the betweenness centrality of node i . Simulations show that the capacity of the scale-free network can be improved by using the proposed strategy under the shortest path routing. With finite queue resource, the network traffic capacity was also analyzed theoretically.

Key words: queue resource; scale-free network; complex network; betweenness centrality; network capacity

近年来,随着小世界模型和无标度网络特性的发现^[1-2],复杂网络的研究成为了物理和工程等领域的新热点。复杂网络描绘了一个广泛且有效理论架构,这个架构可以处理包括生物网络、社会网络、因特网、电力网络等在内各种问题。以前的研究表明,许多大规模网络具有无标度特性^[3]。

如何确保网络通信效率的同时提高网络的容量是目前的主要研究问题^[4-24]。研究人员提出了各种各样的策略来解决这个问题。一般来说,主要有两种解决方案。第一种方案是改变网络拓扑结构,如在现有网络中添加或者删除一些边,从而使网络变成均匀的拓扑结构。Huang等^[6]提出了一种通过在现有网络中添加捷径边的方法来扩展网络容量的策略。Huang等^[7]还设计了一种有效的边移除策略,通过这种策略也可以有效地提高网络容量。第二种方案是寻找一种最优的路由策略来替换最短路径策略,最短路径策略是目前网络中最广泛使用的路由策略。Yan等^[8]设计了

一种有效路由,节点 i (源)和节点 j (目的)之间路径为路径所经过节点的度之和最小的路径。它可以表示为 $P_{ij} = \min_{x=0}^l k_x^\beta$,式中 k_x 是节点 x 的度, l 是路径长度, β 是一个可变的参数。当 $\beta = 1$ 时,这个路由策略相比最短路径路由可以提高十倍的网络容量。Wang等^[9]提出了一种局部路由算法。在局部路由算法中,数据包的转发是根据局部邻居节点的度的信息而进行的。局部路由算法也可以很好地改进网络容量。Ling等^[10]提出一种基于节点队列长度信息的全局动态路由策略,他们还研究了一种基于“pheromone”信息的网络路由算法。Echenique等^[12]设计了一种名为“traffic awareness”的路由策略,该策略根据邻居节点到目的地的长度及其当前拥塞情况来选择路径。Danila等^[13-14]给出了一种优化路由策略,优化路由策略的方法是 minimized maximum betweenness。Tang等^[11]提出了一种自适应的时间变化路由方法以模拟人类在不同时间的各种通信行为。

* 收稿日期:2012-12-28

基金项目: 中国科技部项目(2007AA01Z203); 国家基础研究规划基金项目(2007CB307101); 北京交通大学基金项目(2006XZ002); 重点大学基本科研基金项目(2012YJS029, 2012JBM025)

作者简介: 张帅(1987—),男,北京人,博士研究生, E-mail: 10112054@bjtu.edu.cn;

梁满贵(通信作者),男,教授,博士生导师, E-mail: mgliang58@gmail.com

最近,有限资源的分配策略吸引了越来越多的关注^[15-22]。在实际的通信网络中,节点的处理能力和带宽都是重要的资源。Yang 等^[16]提出了一种基于度的节点处理能力分配策略,其中总的节点处理能力是固定的,每个节点分配到的处理能力与节点的度成比例。Cao 等^[17]设计了一种动态的自适应的节点处理能力分配机制,每个节点的处理能力与这个节点所接收到的数据包个数成比例。文献[18]提出了两种模型,在这两种模型中,每个节点的处理能力分别根据节点的度和介数来分配。文献[19]提出了一种在无标度网络中的有效的带宽分配策略。文献[20]出一种有效的路由策略,这个策略放弃先进先出的排队方式,在有限带宽资源的条件下可以获得更高的网络容量。

目前,针对信息流的研究通常都是假设队列的长度是无限的^[4-20]。由于所有的节点可以接收尽可能多的数据包,所以大多数研究人员忽略了队列长度对信息流的影响。然而,在真正的网络中,由于物理条件的限制,队列的长度都是有限的。本文假设每个节点具有有限的队列长度。在文献[20-22]中,节点的队列长度也被考虑为有限的,这样更符合现实中的实际情况。

1 网络负载传输模型

许多大规模通信网络如互联网和万维网都被发现具有非均匀和无标度特性。无标度网络服从幂率度分布,在幂率度分布中,绝大部分的节点的度相对很低,但存在少量的度相对很高的节点。本文基于 Barabasi-Albert (BA) 算法来构造无标度网络拓扑模型,生成的网络拓扑中节点的度分布可由幂指数为 3 的幂率函数近似描述。BA 无标度模型构造算法如下^[26]:

1) 增长:从一个具有 m_0 个节点的网络开始,每次引入一个新的节点,并且连到 m 个已存在的节点上,这里 $m \leq m_0$ 。

2) 优先连接:一个新节点与一个已存在节点 i 相连接的概率 \prod_i 与节点 i 的度 k_i 、节点 j 的度 k_j 之间满足如下关系:

$$\prod_i = \frac{k_i}{\sum_j k_j}$$

在经过 t 步后,这个算法产生一个有 $N = t + m$ 个节点、 mt 条边的网络。

队列长度 l_i 是节点 i 能够存储的数据包的最大个数。实际上,节点的队列长度经常影响通信系

统的性能。当节点的队列被数据包填满时,这个节点将不能够接收和产生任何数据包。这个限制很自然地影响通信系统,并且可能会引发通信系统的拥塞。文献[22]定义如果一个节点的队列被数据包填满,则认为这个节点处于拥塞状态,它所新接收到的数据包将会被丢弃。为了最大化网络的容量和降低丢包率,一个合理的节点队列长度分配策略是很重要的。

本文给出了一种在给定队列资源条件下的队列资源重分配策略。网络中的队列的平均长度是:

$$\langle L \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N l_i$$

其中, N 是总节点数。为了更好地分配队列资源,我们重分配总队列长度 $N[L]$:

$$l_i = 1 + N(\langle L \rangle - 1) \frac{B_i}{\sum_{i=1}^N B_i}$$

其中, B_i 是节点 i 的介数。简单地讲,一个节点的介数表示所有的节点对之间通过该节点的最短路径条数。其定义如下^[23-24]:

$$B_v = \sum_{i \neq j} \frac{\rho_{ij}(v)}{\rho_{ij}}$$

其中, $\rho_{ij}(v)$ 是从源点 i 到目的节点 j 通过节点 v 的最短路径的数目。 ρ_{ij} 是从节点 i 到节点 j 所有最短路径的数目。由于重分配之后可能会导致 l_i 是一个整数加上一个小数,因此,对于小数部分,我们有如下处理。对队列长度为 l_i 的任意节点 i ,节点 i 首先可以存储 $|l_i|$ 个数据包,之后, $l_i - |l_i|$ 将与一个 0 到 1 之间的随机数 r 相比较。如果 $r < l_i - |l_i|$,则节点 i 可以存储另一个数据包。例如,一个节点的队列长度为 9.7,则这个节点存储 10 个数据包的概率为 0.7,存储 9 个数据包的概率为 0.3。

网络生成后,假设网络中的全部节点兼有路由和主机的功能,既可以生成也可以发送和接收数据包。全部节点的队列采用先进先出(FIFO)的队列方式。每个单位时间内将随机产生 R 个数据包放入未了的队列中。数据包的源地址和目的地址都是随机选择的。每个节点在单位时间步内最多只能处理一个数据包。如果将要被转发一个数据包存储在节点 i ,那么有 2 种可能的情况:(a) 如果数据包的下一跳地址的队列未了,则这个数据包将被直接转发到下一跳,并且从节点 i 中移除。(b) 如果数据包的下一跳地址的队列是满的,则这个数据包在这个时间步内将不能被转发,等待下一个时间步进行判断是否转发。本文采用最短路径路由策略,如果节点 i 到节点 j 之间有多条最

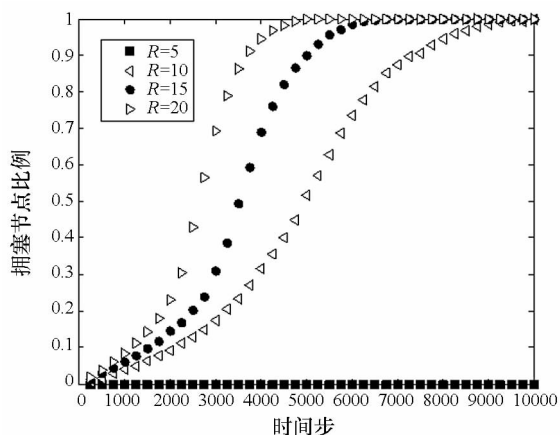
短路径,则随机的选择其中一条,而且一旦数据包到达目的地址,数据包将会从网络中移除。

本文的模型与以前研究的模型的主要区别在于,本文的模型加入了队列长度的这个限制条件。由于队列长度的限制,整个网络很容易进入拥塞状态。因为当节点拥塞时不能生成新的数据包,所以在本文中数据包的生成率可能会略小于 R 。

2 仿真结果

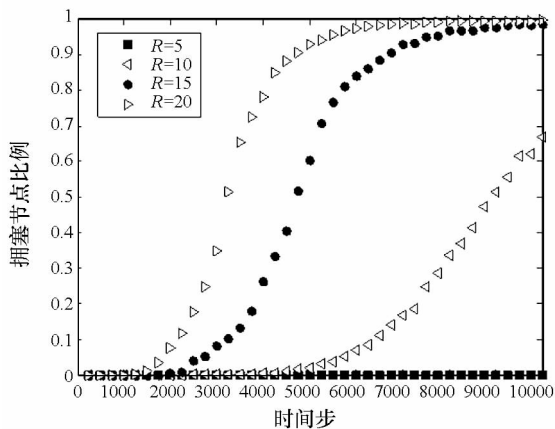
采用 BA 模型生成的无标度网络,仿真结果是 20 个独立的 BA 无标度网络运行结果的统计平均值。

在图 1 中,我们研究了在不同数据包生成率下 (R 分别为 5, 10, 15, 20), 随着时间的变化网络中拥塞的节点的比例变化。图 1(a) 显示了平均队列长度为 50 的相同队列长度分配策略的仿真结果。从中我们可以看出,对于相对小的 R 值,例如 $R = 5$ 时,拥塞节点的个数为零,也就意味着网络处于没有任何拥塞的状态;当 R 值较大时,网络中拥塞的节点数目迅速增大,随后趋于平稳,最终网络中所有的节点都发生拥塞。 R 越大,网络中的节点拥塞也越快。从图 1(b) 中可以看出,在我们提出的队里重分配策略下,当 R 值较大时,拥塞的起始点向后推移了。 R 值越大,曲线增长的越快。从图 1 中可以推断,必定存在一个临界的包生成速率 R_c : 当 $R < R_c$ 时,网络保持自由流通状态;当 $R > R_c$ 时,拥塞出现在一些节点上,随着时间的推移,数据包开始在这些节点上积累,之后这些节点引发更多的节点拥塞,最后,网络进入完全拥塞状态。显然, R_c 是可以维持系统正常的最大数据包生成率, R_c 的值越大,也就意味网络具有越大的容量。



(a) 相同队列长度分配策略

(a) The uniform queue length allocation strategy



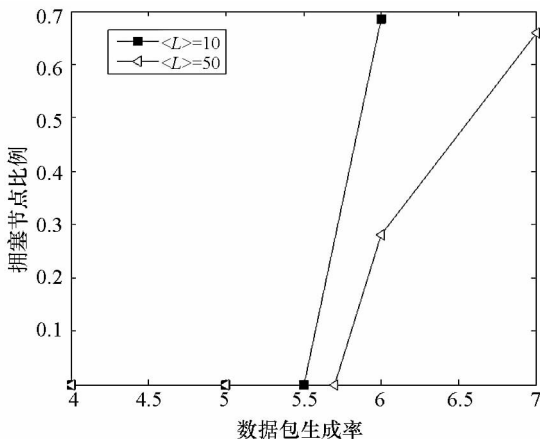
(b) 队列重分配策略

(b) The queue reallocation strategy

图 1 在不同的数据包生成率 R 下,拥塞节点比例随时间步的变化关系,BA 网络模型参数为 $N = 1000, m = m_0 = 3$, 平均队列长度为 $[L] = 50$

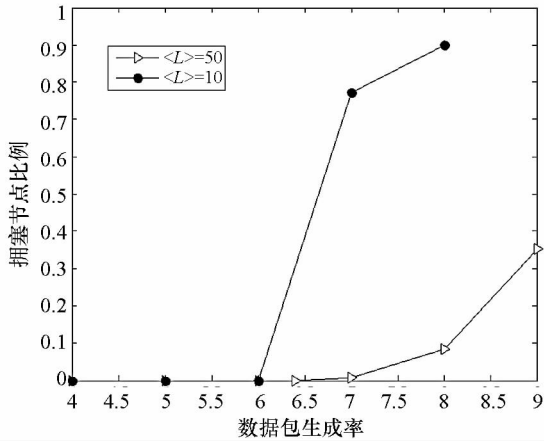
Fig. 1 Time evolution of the congested nodes for different R in BA scale-free networks with $N = 1000$, and $[L] = 50$ under different queue allocation strategies

通过改变数据包生成 R 和计算拥塞节点的个数,我们可以给出一个 R_c 近似估计值。随机数据包生成率 R (对应每一个 R 值,运行 10000 个时间步) 的增加网络会从自由状态变化为拥塞状态。这个变化的临界点就是临界数据包生成率。从图 2 中可以看出,当分配策略和队列长度固定时,网络都会存在一个临界数据包生成率 R_c 。当分配策略固定时, R_c 的值会随着平均队列长度的增长而增长。与相同队列长度分配策略相比较,我们的重分配队列策略可以更明显地提高网络容量。



(a) 相同队列长度分配策略

(a) The uniform queue length allocation strategy



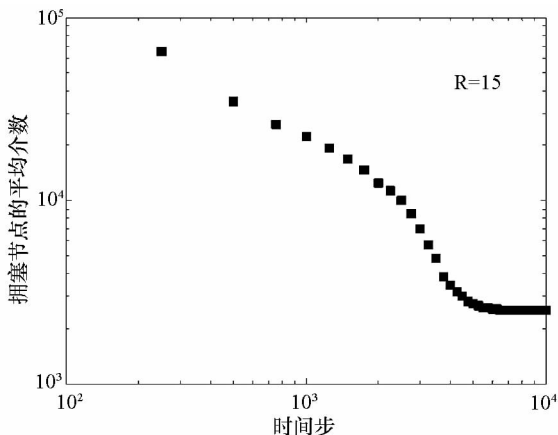
(b) 队列重分配策略

(b) The queue reallocation strategy

图 2 数据包生成率与节点拥塞比例的关系

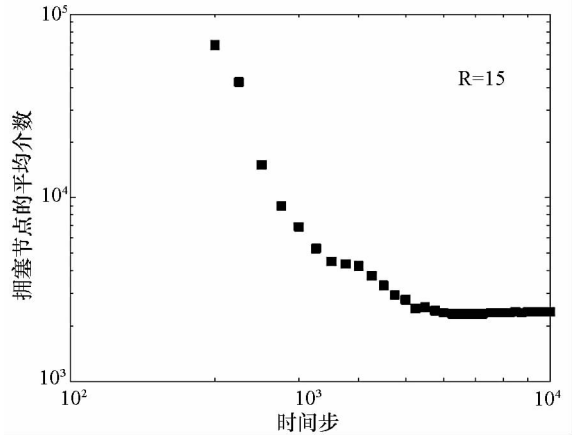
Fig.2 The fraction of congested nodes versus packet generation rate under different queue lengths allocation strategies and different $[L]$.

为了更加清晰地观察拥塞现象,我们记录下网络中每一时刻发生拥塞的节点的平均介数。从图 3 中可以看出,介数比较大的节点首先发生拥塞,随后,介数较小的节点也迅速地发生拥塞。最终,整个网络进入完全拥塞的状态。以前的研究表明, hub 节点在非均匀网络中起着非常重要的作用。网络中 hub 节点承载了更大的信息流量。显然,随着时间的增加,网络中产生的数据包个数也随着增加。由于 hub 节点通常都是介数比较大的节点,而介数大的节点比介数小的节点具有更高的概率从邻居节点接收到数据包,这也就意味着 hub 节点更加容易发生拥塞。因此,介数较大的节点在我们的重分配策略中会获得更多的队列资源。



(a) 相同队列长度分配策略

(a) Under the same queue length allocation strategy



(b) 队列重分配策略。

(b) Under the queue reallocation strategy

图 3 拥塞节点的平均介数与时间的变化

Fig.3 Evolution of average betweenness of congested node

文献[22]给出了在有限队列资源的条件下临界数据包生成率 R_c 的理论近似估计值,

$$R_c = \frac{N(N-1)L}{B_{\max}(L+1)}$$

式中, $N(N-1)$ 是网络中总路径的条数, B_{\max} 是网络中最大介数, L 是最大介数节点所具有的队列长度。从图 3 中可以看出大介数节点首先发生拥塞。因此在我们的分配策略中,介数较大的节点具有更长的队列长度。显然,在我们的分配策略中最大介数节点具有最长的队列长队。因此当 L 较大时,上式可以化简为:

$$R_c = \frac{N(N-1)}{B_{\max}}$$

在图 4 中,我们通过仿真实验来验证上式的正确性。其中 BA 网络的规模 N 从 200 增长到 1800,平均度 $[k] = 6$ 。从图 4 中可以看出,理论估计值与仿真实验的结果存在一定误差,但是,误差的范围很小,仿真结果与理论估计值基本一致。

当队列资源是无限时,网络容量通常可以通过序参数 $H(R)$ 来定量表述:

$$H(R) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C}{R} \frac{[\Delta W]}{\Delta t}$$

式中 $\Delta W = W(t + \Delta t) - W(t)$, $[\dots]$ 表示时间窗 Δt 取平均, $W(t)$ 为 t 时刻的数据包的个数。当 H 约等于零时,网络中新生成的数据包与被处理数据包数量相等,没有拥塞产生。有趣的是,无限队列资源的临界数据包生成率的理论估计值与化简后的有限队列资源的相同, $R'_c = (N(N-1))/B_{\max}$ 。这也就意味着使用我们的队列重分配策略可以获得与无限队列资源模型相近的临界数据包生成率。图 5 给出了这两种模型的仿真结果。可

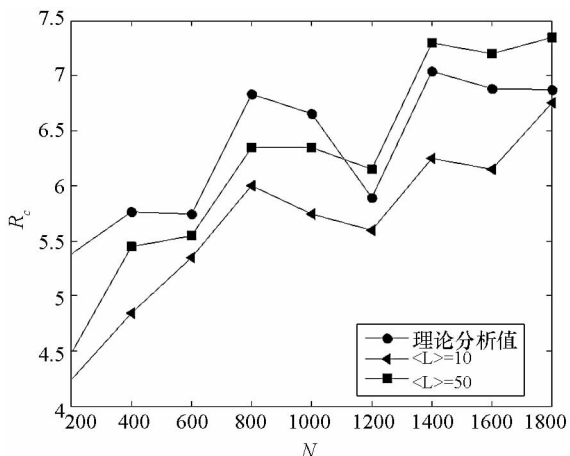


图4 通过公式计算和仿真得到的 R_c 与网络规模 N 的关系。BA 网络模型参数为 $m = m_0 = 3$ 。

Fig.4 Network capacity R_c of theoretical estimations and simulations vs network size N . BA network parameters are $m = m_0 = 3$.

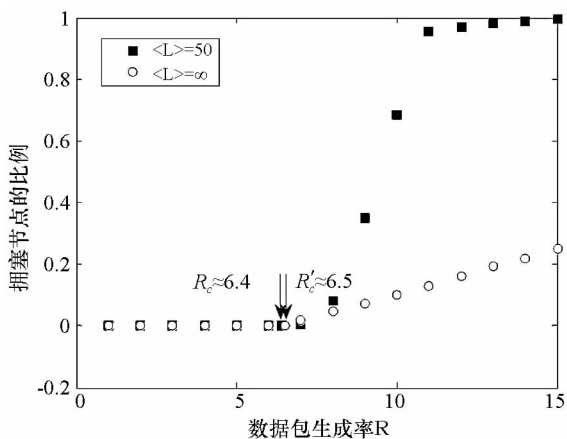


图5 通过仿真得到的 R_c 与 R'_c 和拥塞节点比例的关系。BA 网络模型参数为 $m = m_0 = 3, N = 1000$ 。

Fig.5 Fraction of congested nodes as a function of the packet generation rate R for different average queue lengths $[L]$ under the shortest path routing strategy. The network parameters are $N = 1000, m = m_0 = 3$.

可以看出, R_c 与 R'_c 近似相等。在现实中, 由于物理条件限制, 队列长度不可能为无限长。当有限的队列资源被考虑时, 一个合理队列资源分配策略将会获得更大的网络容量。

3 结论

当平均队列长度固定时, 对于较大的数据包生成率, 无论使用相同队列长度分配策略或队列重分配策略, 随着时间的增长, 网络都会出现从自由流通状态到拥塞状态的相变现象。比较相同队列长度分配策略与队列重分配策略的临界数据包生成率, 结果显示队列重分配策略具有更高的网络容量。在网络中介数较大的节点承载了更大的

信息流量, 考虑到介数较大的节点更容易先发生拥塞, 本文对于队列重分配策略的临界数据包生成率进行了理论分析。仿真结果与理论分析结果相一致。有效的分配队列资源能够使网络具有更高的承载能力。本文表述背景仅仅为 BA 无标度网络, 在下一步的工作中, 我们将该策略推广到其他网络结构中, 希望本文的研究能够对网络队列资源分配的设计起到一定指导作用。

参考文献 (References)

- [1] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of “small-world” network[J]. Nature, 1998, 393(6684): 440 – 442.
- [2] Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509 – 512.
- [3] Albert R, Barabasi A L. Statistical mechanics of complex networks[J]. Reviews of Modern Physics, 2002, 74: 47 – 97.
- [4] Jiang Z Y, Liang M G, Guo D C. Enhancing network performance by edge addition [J]. International Journal of Modern Physics C, 2011, 22: 1211 – 1226.
- [5] Jiang Z Y, Liang M G. Improved efficient routing strategy on scale-free networks[J]. International Journal of Modern Physics C, 2012, 23: 1250016.
- [6] Huang W, Chow W S. Effective strategy of adding nodes and links for maximizing the traffic capacity of scale-free network [J]. International Journal of Modern Physics C, 2010, 20:033123.
- [7] Huang W Chow W S. An efficient strategy for enhancing traffic capacity by removing links in scale-free networks[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2010:01016.
- [8] Yan G, Zhou T, Hu B, et al. Efficient routing on complex networks[J]. Physical Review E, 2006, 73: 046108.
- [9] Wang W X, Wang B H, Yin C Y, et al. Traffic dynamics based on local routing protocol on a scale-free network [J]. Physical Review E, 2006, 73:026111.
- [10] Liang X, Hu M B, Jiang R, et al. Global dynamic routing for scale-free networks [J]. Physical Review E, 2010, 81:016113.
- [11] Tang M, Liu Z H, Liang X M, et al. Self-adjusting routing schemes for time-varying traffic in scale-free networks [J]. Physical Review E, 2009, 80, 026114.
- [12] Echenique P, Gomez-Gardenes J, Moreno Y. Improved routing strategies for Internet traffic delivery [J]. Physical Review E, 2004, 70:056105.
- [13] Danila B, Sun Y D, Bassler K E. Collectively optimal routing for congested traffic limited by link capacity [J]. Physical Review E, 2009, 80: 066116.
- [14] Danila B, Yu Y, Marsh J A, et al. Optimal transport on complex networks[J]. Physical Review E, 2006, 74:046106.
- [15] Lee K H, Hui P M. High-performance distribution of limited resources via a dynamical reallocation scheme, Physical A, 2008 387: 6657 – 6662.
- [16] Yang H X, Wang W X, Wu Z X, et al. Traffic dynamics in scale-free networks with limited packet-delivering capacity [J]. Physical A, 2008, 387: 6857 – 6862.
- [17] Cao X B, Du W B, Chen C L, et al. Effect of adaptive delivery capacity on networked traffic dynamics [J]. China Physical Letter, 2011, 28:058902.

参考文献 (References)

- [1] Yucek T, Arslan H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(1):116-130.
- [2] Lexa M A, Davies M E, Thompson J S, et al. Compressive power spectral density estimation [C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2011, 3884-3887.
- [3] Lexa M A, Davies M E, Thompson J S. Reconciling compressive sampling systems for spectrally sparse continuous-time signals [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(1):155-171.
- [4] Ping F, Bresler Y. Spectrum-blind minimum-rate sampling and reconstruction of multiband signals [C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, Signal Processing, Atlanta, USA, 1996, 1688-1691.
- [5] Bresler Y. Spectrum-blind sampling and compressive sensing for continuous-time signals [C]. Information Theory and Applications Workshop, California, USA, 2008, 547-554.
- [6] Mishali M, Eldar Y C. Blind multiband signal reconstruction: Compressed sensing for analog signals [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(3):993-1009.
- [7] Mishali M, Eldar Y C. From theory to practice: sub-Nyquist sampling of sparse wideband analog signals [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(2):375-391.
- [8] Mishali M, Eldar Y C. Reduce and boost: Recovering arbitrary sets of jointly sparse vectors [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(10):4692-4702.
- [9] Papoulis A. Probability, random variables, and stochastic processes [M]. McGraw Hill, New York, 3 edition, 1991.
- [10] Tropp J A, Gilbert A. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit [J]. Transactions on Information Theory, 2007, 53(12):4655-4666.
- [11] Tropp J A. Algorithms for simultaneous sparse approximation. Part I: Greedy pursuit [J]. Signal Process, 2006, 86(3):572-588.
- [12] Newman M E J. Scientific collaboration networks. II. Shortest paths, weighted networks, and centrality [J]. Physical Review E, 2001, 64:016132.
- [13] Guan Z H, Chen L, Qian T H. Routing in scale-free networks based on expanding betweenness centrality [J]. Physical A, 2011, 390:1131-1138.
- [14] Zhang G Q, Zhou S, Wang D, et al. Enhancing network transmission capacity by efficiently allocating node capability [J]. Physical A, 2011, 390:387-391.
- [15] 汪小凡,李翔,陈关荣. 复杂网络理论及其应用. 北京:清华大学出版社,2006.
- [16] WANG Xiaofan, LI Xiang, CHEN Guanron. Complex networks theory and its application [J]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)
- [17] Zhao L, Lai Y C, Park K, et al. Onset of traffic congestion in complex networks [J]. Physical Rev E, 2005 71:026125.
- [18] Ling X, Hu M B, Du W B, et al. Bandwidth allocation strategy for traffic systems of scale-free network [J]. Physical Letter A, 2010, 374:4825-4830.
- [19] Tang M, Zhou T. Efficient routing strategies in scale-free networks with limited bandwidth [J]. Physical Review E, 2011, 84:026116.
- [20] Wang W X, Wu Z X, Jiang R, et al. Abrupt transition to complete congestion on complex networks and control [J]. Chaos, 2009, 19: 033106.
- [21] Wu Z X, Wang W X, Yeung K H. Traffic dynamics in scale-free networks with limited buffers and decongestion strategy [J]. New Journal of Physics, 2008, 10: 023025.

(上接第 113 页)