

基于网络编码的传染路由协议性能

韩旭*, 杨余旺, 王磊

(南京理工大学 计算机科学与技术学院, 南京 210094)

(*通信作者电子邮箱 yuwangyang@mail.njust.edu.cn)

摘要:针对传染路由(ER)网络中容易出现多种通信半径的通信节点,导致网络性能不稳定的问题,提出了一种网络编码与传染路由相结合的网络模型。该模型在经典传染路由中结合网络编码的方式进行数据传输,并且为了对改进后的网络性能进行有效地评估,为传染路由网络中的传输时延建立了概率模型。使用该概率模型对网络进行评估的结果显示,在多种传输环境下与经典传染路由相比,基于网络编码的传染路由(NCER)具有高效、稳定的优点,并于离散事件仿真实验结果中得到了验证。最后,根据该概率模型的评估结果,提出了一种进一步降低网络传输时延的方案。

关键词:网络编码;传染路由;概率模型;传输时延;通信半径

中图分类号: TP393.17 **文献标志码:** A

Performance of network coding protocol based epidemic routing

HAN Xu*, YANG Yu-wang, WANG Lei

(School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

Abstract: Many different communication radius of the communication nodes that may cause an unstable network performance can be easily found in Epidemic Routing (ER) network. A network model that combines network coding and epidemic routing can solve this problem. Compared with the traditional epidemic routing, the Network Coding Based Epidemic Routing (NCER) can transmit packets with network coding. In order to compare the performances of the ER and NCER, a probability model of the transmission delay of the network was built. The comparative results between the two protocols with the probability model above show that NCER can be more efficient and stable than ER. The correctness of this probability model has been proved in the simulation. Finally, according to the model evaluation results, a scheme has been given to reduce the network transmission delay.

Key words: network coding; Epidemic Routing (ER); probability model; transmission delay; transmission radius

0 引言

在无线传感器网络中,由于先天能源不充足^[1]造成网络的不稳定^[2]以及网络资源极其有限的特点^[3-4],无论是传统的有线路由协议还是无线路由协议都不能很好地适应无线传感器网络这一新环境,这就要求研究新的协议来满足这一需求。

针对无线传感器网络这一特性,Vahdat等^[5]提出了传染路由的概念,借助医学中的传染病模型来构建无线传感器网络。通过两个相遇的节点不断传染(交换数据包)的方式实现网络中数据的传输,以目的节点被传染告终。相对于拓扑结构较为固定的网络^[6],它的优点在于不用知道整个网络的拓扑结构,不需要复杂的算法就可以实现。因此特别适合节点不断移动,没有固定拓扑结构的无线传感网。但是它的缺点也是明显的,它类似于洪泛协议的机制会导致网络中出现大量的副本,占用大量的资源^[7]。网络编码^[8-9]的出现就是为了平衡传染路由对网络资源的需求与网络性能之间的矛盾^[10]。与经典的基于复制的传染路由不同,基于网络编码的传染路由允许在数据包传输的过程中对数据包中的数据进行

编码,它的优越性在于可以在较小的缓存的情况下维持网络性能的稳定。Lin等^[11]对类似的网络进行了研究,但是其主要着眼点是在网络编码的方式,分析模型没有考虑到不同网络半径的实际情况。赵炜等^[12]、杨余旺等^[13-14]也对基于网络编码的传染路由进行了研究,但其主要的讨论方向为以微分方程的形式来描述整个传染路由网络的变化以及缠绕路径算法。

本文针对移动传感网中节点通信半径无法统一、源节点以及目的节点与中转节点的差异等问题进行研究,提出了在传染路由中使用网络编码的方式增强网络的稳定性。构建了分析模型,对基于网络编码的传染路由以及经典传染路由协议进行分析,结果显示了基于网络编码的传染路由在网络环境变化时具有更好的性能和稳定性^[15]。进一步提出了通过改变节点通信半径优化网络性能的具体方案,并通过仿真实验予以证明。

1 网络模型

本文所研究的网络由一个源节点 S 、 N 个中间节点 R 以及 n 个目的节点 D 组成。整个网络一共有 $N+n+1$ 个节点。所有中

收稿日期: 2011-09-23;修回日期: 2011-11-17。

基金项目: 航天 CAST 基金资助项目;江苏省科技支撑计划项目(BE2008397, SBE201000478)。

作者简介: 韩旭(1987-),男,浙江绍兴人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络; 杨余旺(1966-),男,安徽舒城人,教授,博士生导师,主要研究方向:无线传感器网络、网络编码、Ad Hoc 网络; 王磊(1986-),男,安徽马鞍山人,博士研究生,主要研究方向:无线传感器网络、网络编码。

间节点在某一特定的区域内做无规则运动。在某一特定时间时,节点之间的距离为 d ,节点的通信半径为 r ,只有在节点之间的距离小于通信半径时,两个节点才能进行通信。由于信道的限制,一次握手只能传输一个数据包。节点运动的区域足够大,使得大多数节点之间无法直接进行通信。同时节点的运动速度足够快,使得网络拓扑结构长时间不变的情况不会出现。

源节点共有 K 个数据包要发送给目的节点。每个节点的缓存为 B 。其中源节点和目的节点的缓存大于需要传送的数据包数,而中转节点的缓存大小不一定大于需要传送的数据包数,也即($B_D \geq K, B_S \geq K, 1 \leq B_R \leq K$)。大部分的相似研究发现,节点之间相遇的概率满足马尔可夫模型^[16-17]。因此,本文假设节点相遇的概率为 $P(\eta)$ 。由于移动传感网的特殊性,不同节点之间的差异可能会很大。本文将详细讨论不同节点通信半径 r 对整个网络造成的影响。整个传输过程以目的节点收到了全部的数据包后,发送一个广播报文结束。

2 传染路由协议模型

2.1 经典传染路由

2.1.1 不带网络编码的典型传染路由协议模型

典型的传染路由,就是不对源数据包进行任何处理,直接在节点之间通过不断地产生副本来进行传播。基本思路如下:

两个节点 S_a 和 S_b 相遇,即满足两个节点之间的距离小于两个节点的通信半径 $d < \min(r_a, r_b)$ 。此时两节点进行握手,进行彼此数据包信息的交流。不失一般性,考虑节点 S_a 向节点 S_b 传输的情况。若接收方 S_b 缓存已满,则不进行发送;否则节点 S_a 向节点 S_b 发送数据包。假设节点 S_a 中的数据包集合为 S_A ,节点 S_b 中的数据包集合为 S_B 。那么 $S_A - S_B$ 就是节点 S_a 向节点 S_b 发送的数据包集合。若 $S_A - S_B$ 为空,则节点 S_a 不必向节点 S_b 发送数据包。若集合中有多个数据包,则需要按照策略来选择发送哪个数据包。节点 S_b 在收到节点 S_a 传来的数据包之后,放入自身的缓存中。

一般的选择发送策略有两种:1) 随机发送策略(Random Policy Epidemic Routing, RPER)。就是在集合 $S_A - S_B$ 中随机选取一个数据包进行发送。2) 本地最少发送策略(Local Rarest Epidemic Routing, LRER)。类似于操作系统的最近最少使用(Least Recently Used, LRU)算法,计算本地每个数据包的发送次数,然后选取发送次数最少的发送。此外,文献[11]提到了一种全局LRU算法,由于就目前的网络水平,不具备可实现性,本文不予讨论。

2.1.2 不带网络编码的典型传染路由性能分析模型

本文的性能分析主要针对网络的传输时延,为了方便对协议进行形式化分析,参照文献[18]中的分布式结构,对文献[12]第18页中的网络模型进行扩充,使其适合多汇网络,定义如下:

- 1) 需发送的数据包为 K ;
- 2) 中转节点的个数为 N ;
- 3) 中转节点的缓存大小为 B ;
- 4) 相遇事件为 $\alpha, P(\alpha) > 0$,与之对应的节点通信半径为 r ;
- 5) 第 n 个目的节点收到 i 个编码包的时间为 $T_{D_n i}$;
- 6) 所有目的节点收到 i 个编码包的时间为 T_{D_i} ;
- 7) 源节点持续发送某一数据包,直到中转节点中至少有一个节点获得该数据包后,开始发送下一数据包。

下面考虑从源节点发送第一个数据包,到目的节点收到

第一个数据包之间的情况。首先考虑源节点发送一个数据包给中转节点的成功率为 $1 - (1 - P(\alpha))^N$ 。因此,传输成功的时间期望为:

$$T_s = \frac{1}{1 - (1 - P(\alpha))^N} \quad (1)$$

其中: T_s 为源节点传输成功的期望, α 为获取数据包事件, N 为中转节点总数。即在 T_s 之后,有1个中转节点的缓存中存放了第一个数据包。此时源节点开始发送第二个数据包,这里暂时不做考虑。接下来获得数据包的中转节点继续转发此数据包:

$$T_1 = \frac{1}{1 - (1 - P(\alpha))^{N-1}} \quad (2)$$

其中: T_1 为第一个中转节点传输成功的期望, α 为获取数据包事件, N 为中转节点总数。显然,目的节点获得数据包的概率接近1时,有:

$$T_n = \frac{1}{1 - (1 - P(\alpha))^M} \quad (3)$$

由式(3)可以推出:

$$M = N - \ln \frac{1}{p(\alpha)} \quad (4)$$

其中 α 为获取数据包事件, N 为中转节点总数。综上所述,可以得到以下公式:

$$T_{D_1} = T_s + T_1 + T_2 + \dots + T_n \quad (5)$$

其中: T_{D_1} 为第一目的节点收到第一个数据包的时间的期望, T_s 为源节点发送出数据包的时间期望, T_n 为第 n 跳时中转节点中传播的时间期望。考虑接下来的 $K-1$ 个数据包的发送情况,可以得到:

$$T_{D_{1K}} = T_s + T_1 + T_2 + \dots + KT_n \quad (6)$$

其中: $T_{D_{1K}}$ 为第1个目的节点收到所有 K 个数据包的时间的期望, T_s 为源节点发送出数据包的时间期望, T_n 是第 n 跳时中转节点中传播的时间期望。在这里应考虑调整节点通信半径的同时,目的节点和源节点的通信半径是否应该跟着调整?因为在网络模型中,中转节点是随机运动的,而源节点和目的节点是固定的,因此这两个节点的通信设备显然与中转节点不同。考虑这一因素,将式(3)进行改进,得到:

$$T'_n = \frac{1}{1 - (1 - P(D))^M} \quad (7)$$

其中: T'_n 是第 n 跳时中转节点中传播的时间期望, α 为获取数据包事件, N 为中转节点总数, $P(D)$ 为目的节点的通信概率。因此:

$$T_{DK} = \text{MAX}(T_{D_{1K}}, T_{D_{2K}}, \dots, T_{D_{nK}}) \quad (8)$$

其中: $T_{D_{nK}}$ 为第 n 个目的节点收到所有 K 个数据包的时间的期望, T_{DK} 为所有目的节点收到所有 K 个数据包的时间期望。其中所有参数均可由之前公式得出。

2.2 基于网络编码的传染路由模型

2.2.1 网络编码原理

与传统的复制协议不同的是,网络编码的路由在两个节点相遇时,是将编码包 U 而不是源数据包 E 发送给对方。网络编码的方式有很多种^[19,20,21],各有其优缺点。本文采用随机线性编码的方式对数据包进行编码。编码包 U 是一系列源数据包的线性组合。假定编码系数为 β ,数据包的编码方式为:

$$U = \beta_1 E_1 + \beta_2 E_2 + \dots + \beta_K E_K \quad (9)$$

节点接收到 n 个编码包后,就会继续将编码包进行编码:

$$U'' = U' + \beta U \quad (10)$$

此时,得到的 U' 仍然是 K 个源数据包在另一个编码系数 β' 下的线性编码:

$$U' = \beta'_1 U_1 + \beta'_2 U_2 + \cdots + \beta'_K U_K \quad (11)$$

本协议的最终结果是在传输的过程中,形成一个由 K 个源数据包线性编码而成的编码包,而目的节点不断接收编码包存储起来,直到收到 K 个线性无关的编码包。在编码系数已知,就很容易将源数据包解码出来。

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \cdots & \beta_{1K} \\ \vdots & & \vdots \\ \beta_{K1} & \cdots & \beta_{KK} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_K \end{bmatrix} \quad (12)$$

2.2.2 基于网络编码的传染路由模型

基于网络编码的传染路由,就是在节点接收到编码包后,与自身原有的编码包按照特定的编码规则进行编码,形成新的编码包,并将新的编码包继续发送下去。基本思路如下:

两个节点 S_a 和 S_b 相遇,即满足 $d < \min(r_1, r_2)$, 此时两节点进行握手。在网络编码方式的传输中,若编码包线性不相关,则数据包能够发送;否则终止此次通信。不失一般性,这里考虑节点 S_a 向节点 S_b 传输的情况,在握手过程中, S_b 收到 S_a 发来的编码矩阵,查看与自身的编码矩阵是否线性相关:若相关,则终止此次通信;若不相关,则接收编码包。之后将接收到的编码包与自身的编码包重新按照编码规则进行编码,形成新的编码矩阵并存储。

2.2.3 基于网络编码的传染路由性能分析模型

这里采用和 2.1.2 节类似的网络模型,由于随机有限域^[22] 足够大,假定每个编码包之间高度线性不相关。考虑从源节点发送第一个数据包到目的节点收到第一个数据包之间的情况。首先考虑源节点发送一个数据包给中转节点的成功率为 $1 - (1 - P(\alpha))^N$ 。此时,传输成功的期望为:

$$T_s = \frac{1}{1 - (1 - P(\alpha))^N} \quad (13)$$

其中: T_s 为源节点传输成功的期望, α 为获取数据包事件, N 为中转节点总数。即在 T_s 之后, 中转节点中有了 1 个中转节点的缓存中存放了第一个数据包。接下来获得数据包的中转节点继续转发此数据包:

$$T_1 = \frac{1}{1 - (1 - P(\alpha))^{N-1}} \quad (14)$$

其中: T_1 为源节点传输成功的期望, α 为获取数据包事件, N 为中转节点总数。考虑目的节点收到数据包的概率,可以得到公式:

$$T_{D_n} \approx \frac{1}{1 - (1 - P(S))^N} + \frac{\text{lb} \frac{1}{P(D_1)}}{1 - (1 - P(\alpha))^{N-1}} \quad (15)$$

其中: T_{D_n} 为目的节点收到第一个数据包的时间的期望, α 为获取数据包事件, N 为中转节点总数, $P(S)$ 为源节点握手成功的概率, $P(D_1)$ 为目的节点 1 握手成功的概率。考虑接下来的 $K-1$ 个数据包的发送情况:

$$T_{D_nK} = \frac{1}{1 - (1 - P(S))^N} + \frac{\text{lb} \frac{1}{P(D_n)}}{1 - (1 - P(\alpha))^{N-1}} + K - 1 \quad (16)$$

其中: T_{D_nK} 为目的节点收到所有 K 个数据包的时间的期望, α 为获取数据包事件, N 为中转节点总数, $P(S)$ 为源节点通信概率, $P(D)$ 为目的节点通信概率。同样:

$$T_{DK} = \text{MAX}(T_{D_1K}, T_{D_2K}, \cdots, T_{D_nK}) \quad (17)$$

其中: T_{D_nK} 为第 n 个目的节点收到所有 K 个数据包的时间的期望, T_{DK} 为所有目的节点收到所有 K 个数据包的时间的期望。其中所有参数均可由式(13) ~ (16) 得出。

3 模型仿真

下面通过仿真对前文提出的模型及公式加以验证。这里使用 VC 6.0 构建网络仿真环境,使用 Matlab 7.0 作为计算和分析的工具,对模型网络的传输时延进行分析。

3.1 通信半径对网络的影响

在现实的无线网络中,每个节点的通信半径往往是不同的,节点的型号、处理速度都会有很大的差别。所以,节点的通信半径不同对整个网络的通信时延的影响必须在考虑之中。通信半径对整个网络时延的影响如图 1 所示,其中 RPER 为随机策略传染路由, LRER 为本地策略传染路由, NCER 为网络编码传染路由, ER 为传染路由。

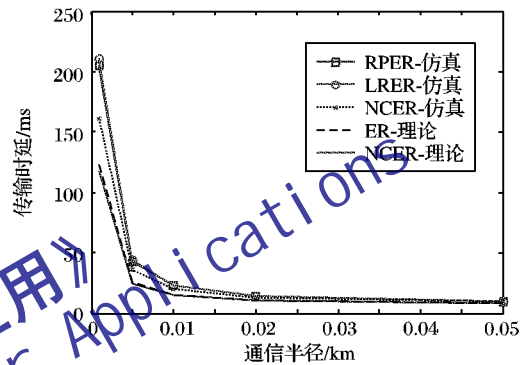


图1 通信半径对整个网络时延的影响

从图 1 可看出:通信半径 r 越长,会使得节点之间能够通信的概率 $P(\eta)$ 越大;随着通信半径的增加,整个网络的时延变短。这里可以假设当通信半径为无限大时,源节点就可以直接将数据发送给目的节点。因此,随着通信半径的增加,网络时延越来越趋近 8 ms。同样,在通信半径较小时,网络编码策略较其他两种策略的优越性仍然存在。

3.2 多种通信半径对网络的影响

同一个网络中,不同通信半径的节点的情况如图 2 所示。

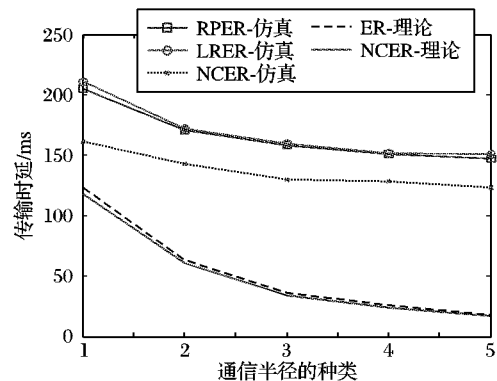


图2 同一网络中,不同的通信半径对整个网络时延的影响

图 2 中:横轴表示的是在网络中,节点通信半径的种类。横坐标为 1 时,表示在网络中只有一种通信半径的节点,即 $r = 0.001$ km;横坐标为 2 时,表示有 $r = 0.001$ km 和 0.005 km 两种通信半径的节点存在,其所占的数量各为 50;横坐标为 3 时,表示网络中有 $r = 0.001$ km, 0.005 km, 0.01 km 共 3 种通信半径的节点存在,其数量分别为 30, 40, 30;横坐标为 4 时,表示网络中有 $r = 0.001$ km, 0.005 km, 0.01 km, 0.02 km 共 4 种通信半径的节点存在,其数量均为 25;横坐标为 5 时,表示

网络中有 $r = 0.001 \text{ km}, 0.005 \text{ km}, 0.01 \text{ km}, 0.02 \text{ km}, 0.05 \text{ km}$ 共 5 种通信半径的节点存在,其数量均为 20。

综上可知,基于网络编码的策略在性能上远远优于其他两种策略,主要体现为效率更高,曲线更平滑。并且在加入了传输距离更大的节点后,传输时延略有减少,但并不明显。原因在于两个节点在通信时,是以其中最短的通信半径作为通信半径的,加入新的节点对整个网络通信性能的提高有限。所以,向网络中加入大通信距离的新节点,并不一定能快速提升整个网络的性能。

3.3 大通信半径节点数量对网络的影响

由以上的分析结果可以得出,在其他的条件同样的情况下,大通信半径的网络的传输效率必然比小通信半径的网络要好。但是直接在小通信半径的网络中随机加入大通信半径的节点并不能显著地提高网络的性能。为了得到最优的效率,先考虑存在 $r = 0.001 \text{ km}$ 和 $r = 0.01 \text{ km}$ 两种状态,如图 3 所示。

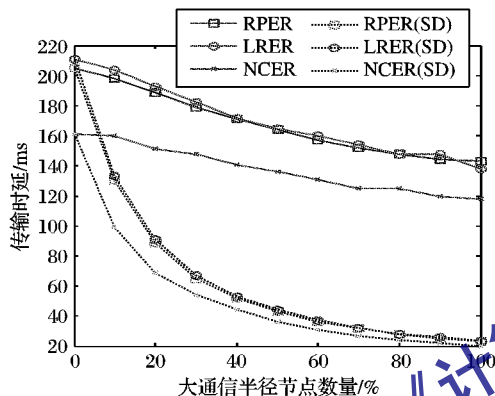


图3 加入大通信半径节点对网络性能的影响

图 3 中 SD 表示在调整节点的通信半径时,源节点和目的节点的通信半径随中转节点调整的曲线。没有加 SD 标志的曲线为源节点和目的节点的通信半径并不随中转节点通信半径变化而变化的曲线。可以很容易地看出,虽然源节点和目的节点只有两个节点,但是其通信半径的改变会使整个网络的效率得到显著地提升。也就是说在通过增加大通信半径的节点来提高网络效率的同时,更新源节点和目的节点的通信半径才能更好地提高网络效率。

3.4 网络性能改善

式(3)和式(16)的结果表明,当向网络中逐步加入大通信半径的节点以提高整个网络平均通信半径时,网络的性能变化如图 4 所示。

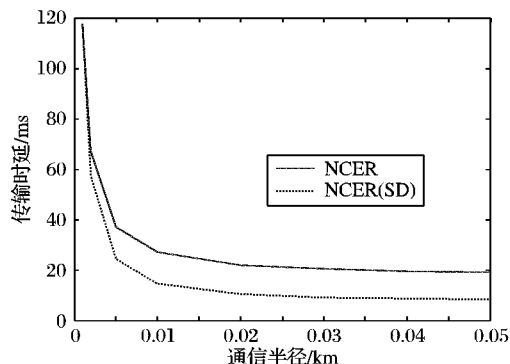


图4 通信半径与传输时延的关系

由图 4 可看出:在改变中转节点通信半径时,如果同时改动源节点和目的节点的通信半径,可以得到更好的效果。同

时也可以计算出,在改变中转节点通信半径时,当新的通信半径下的握手概率为原始通信半径下的握手概率的 5 ~ 10 倍时,对网络的性能提高效果最明显。

同时,参考图 3 对应的仿真实验,根据仿真实验统计的握手概率可知,在大通信节点为 70% 左右时,节点握手概率提高到原始握手概率的 7 倍。也就是之前分析结果中得到的效率最高的优化点。这也与图 3 中的曲线相符合。

假定原网络中中转节点的数量为 n_i ,其握手概率为 P_1 。加入握手概率为 P_2 的大通信半径节点 n_2 个,则 n_1 与 n_2 的关系必须满足:

$$\frac{C_{n_2}^2}{C_{n_1+n_2}^2} \cdot P_2 + \left(1 - \frac{C_{n_2}^2}{C_{n_1+n_2}^2}\right) \cdot P_1 = KP_1 \quad (18)$$

其中 K 为 5 ~ 10 的优化常数。这里依旧取 $K = 7$,将图 3 中的数据代入方程,左边为 0.00687,右边为 0.007,与仿真结果基本符合。

4 结语

本文着眼于在移动传感网中使用网络编码进行数据传输,指出了在网络环境不稳定的情况下可以使用网络编码传输提高网络的健壮性,提出了一个提高网络性能的具体方案,通过仿真实验证明了以上分析的正确性。在移动传感网中,由于资源的受限,性能和资源的平衡就显得尤为重要。下一步的工作是研究基于能量与传输距离之间的关系,建立分析模型,实现网络的优化配置。

参考文献:

- [1] 刘强,毛玉明,冷魁鹏,等. 无线传感器网络中多 Sink 节点优化部署方法[J]. 计算机应用, 2011, 31(9): 2313-2316.
- [2] LINDGREN A, DORIA A, SCHELEN O. Probabilistic routing in intermittently connected networks[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2003, 7(3): 19-20.
- [3] WU Y, CHOU P A. Minimum-energy multicast in mobile Ad Hoc networks using network coding[J]. IEEE Transactions on Communications 2005, 53(11): 1906-1918.
- [4] LI SHAN-SHAN, ZHU PEI-DONG, LIAO XIANG-KE, et al. Energy efficient multipath routing using network coding in wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 5th International Conference, LNCS 4104. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 114-127.
- [5] VAHDAT A, BECKER D. Epidemic routing for partially connected Ad Hoc networks, CS-2000-06[R]. Durham, UK: Duke University, 2000.
- [6] JAGGI S, SANDERS P. Polynomial time algorithms for multicast network code construction[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(6): 1973-1982.
- [7] FRAGOULI C, SOIJANIN E. Information flow decomposition for network coding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(3): 829-848.
- [8] AHLWEDE R, CAI N. Network information flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216.
- [9] ZHANG QIAN, JIN ZHIGANG, ZHANG ZHENJING, et al. Network coding for applications in the Delay Tolerant Network (DTN) [C]// Proceedings of the 5th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Networks. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 376-380.
- [10] SMALL T, HAAS Z. J. Resource and performance tradeoffs in delay-tolerant wireless networks[C]// WDTN'05: Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking. New York: ACM Press, 2005: 260-267.

- 3955.
- [5] WU J, CHEN T W. Design of networked control systems with packet dropouts[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(7): 1314–1319.
 - [6] GOODWIN G C, HAIMOVIC H, QUEVEDO D E, *et al.* A moving horizon approach to networked control system design[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1427–1445.
 - [7] WALSH G C, YE H. Scheduling of networked control systems[J]. IEEE Control Systems, 2001, 21(1): 57–65.
 - [8] AMIR Y, DOLEV D, KRAMER S, *et al.* Transis: A communication subsystem for high availability [C]// Proceedings of 22 International Symposium on Fault-Tolerant Computing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1992: 76–84.
 - [9] PFISTER F. In search of clusters[M]. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998.
 - [10] BRADEN R. RFC 1122, Requirement for Internet hosts-communication layers[S], 1989.
 - [11] CHANDRA T D, TOUEG S. Unreliable failure detectors for reliable distributed systems[J]. Journal of the ACM, 1996, 43(2): 225–267.
 - [12] CHEN W, TOUEG S, AGUILERA M K. On the quality of service of failure detectors [J]. IEEE Transactions on Computers, 2002, 51(1): 561–580.
 - [13] FETZER C, RAYNAL M, TRONEL F. An adaptive failure detection protocol [C]// PRDC '01: Proceedings of the 2001 Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2001: 146–153.
 - [14] HAYASHIBARA N, D'EFAGO X, YARED R, *et al.* The crucial failure detector [C]// Proceedings of the 23rd IEEE International Symposium on Reliable Distributed Systems. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2004: 66–78.
 - [15] BERTIER M, MARIN O, SENS P. Implementation and performance evaluation of an adaptable failure detector [C]// DSN '02: Proceedings of the 2002 International Conference on Dependable Systems and Networks. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2002: 354–363.
 - [16] SÁ A D S, JOSÉ R, MACEDO A. An adaptive failure detection approach for real-time distributed control systems over shared Ethernet [C]// COBEM 2005: Proceedings of the 18th International Congress of Mechanical Engineering. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2005: 43–50.
 - [17] van RENESSE R, MINSKY Y, HAYDEN M. A gossip-style failure detection service [C]// Middleware '98: Proceedings of the IFIP International Conference on Distributed Systems Platforms and Open Distributed Processing. Berlin: Springer-Verlag, 1998: 55–70.
 - [18] DEMERS A, GREENE D, HAUSER C, *et al.* Epidemic algorithms for replicated database maintenance [C]// PODC '87: Proceedings of the Sixth Annual ACM Symposium on Principles of Distributed Computing. New York: ACM Press, 1987.
 - [19] HORITA Y, TAURA K, CHIKAYAMA T. A scalable and efficient self-organizing failure detector for grid application [C]// KATZ D S. Proceedings of the 6th IEEE/ACM International Workshop on Grid Computing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2005: 202–210.
 - [20] ZHANG W, BRANICKY M S, PHILLIPS S M. Stability of networked control systems[J]. IEEE Control Systems, 2001, 21(1): 84–99.
 - [21] MESKIN N, KHORASANI K. Fault detection and isolation of discrete-time Markovian jump linear systems with application to a network of multi-Agent systems having imperfect communication channels [J]. Automatica, 2009, 45(9): 2032–2040.
 - [22] SCHER P, SENGUPTA R. An H_∞ approach to networked control [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(3): 356–364.
 - [23] ZHANG P, DING S X, WANG G Z, *et al.* Fault detection of linear discrete-time periodic systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(2): 239–244.
 - [24] SHEN BO, WANG ZIDONG, SHU HUIHENG, *et al.* H_∞ filtering for nonlinear discrete-time stochastic systems with randomly varying sensor delays[J]. Automatica, 2009, 45(4): 1032–1037.
 - [25] DING S X. Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms and tools [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2008: 473–480.

(上接第794页)

- [11] LIN YUNFENG, LIANG BEN, LI BAOCHUN. Performance modeling of network coding in epidemic routing [C]// MobiOpp'07: Proceedings of the 1st International MobiSys Workshop on Mobile Opportunistic Networking. New York: ACM Press, 2007: 2687–2891.
- [12] 赵伟, 唐振民, 陆伟, 等. 基于网络编码的移动传感网传染路由性能分析[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(23): 17–20.
- [13] YANG YUWANG, ZHONG CHUNSHAN, SUN YAMIN, *et al.* Network coding based reliable disjoint and braided multipath routing for sensor networks[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2010, 33(4): 422–432.
- [14] 卢莉萍, 黄飞, 张宏, 等. 基于网络编码的传感器网络多径路由模型能量分析[J]. 南京理工大学学报, 2010, 34(4): 436–440.
- [15] KOETTER R, MEDARD M. An algebraic approach to network coding[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(5): 782–795.
- [16] HAAS Z J, SMALL T. A new networking model for biological applications of Ad Hoc sensor networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2006, 14(1): 27–40.
- [17] SMALL T, HAAS Z J. Quality of service and capacity in constrained intermittent-connectivity networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(7): 803–814.
- [18] WU Y N, STANKOVIC V. On practical design for joint distributed source and network coding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(4): 1709–1720.
- [19] LI X M, JIANG T, ZHANG Q, *et al.* Binary linear multicast network coding on acyclic networks: principles and applications in wireless communication networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(5): 738–748.
- [20] HARVEY N J A, KARGER D R. Deterministic network coding by matrix completion [C]// SODA'05: Proceedings of the Sixteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms. New York: ACM Press, 2005: 489–498.
- [21] KATTI S, RAHUL H. XORs in the air: Practical wireless network coding [C]// SIGCOMM'06: Proceedings of the 2006 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. New York: ACM Press, 2006: 243–254.
- [22] HO T, KOETTER R, MEDARD M, *et al.* The benefits of coding over routing in a randomized setting [R]. Yokohama: ISIT, 2003.