

移动自组网中基于部分网络编码的机会主义路由

王晓东,霍广城,孙海燕,孟祥旭,孙言强

(国防科技大学计算机学院,湖南长沙 410073)

摘 要: 完全网络编码可用于解决机会主义路由中空间重用及重复报文问题,但增大了报文平均延迟,且报文数据流表现出突发性特征,不利于目标节点解码.本文针对移动自组网提出基于部分网络编码的机会主义路由 OR-PNC,采用任意长度部分网络编码方式对报文编码.实验表明 OR-PNC 可有效降低报文平均延迟达 26%,目标节点应用层原始报文到达流更均衡.

关键词: 移动自组网; 机会主义路由; 完全网络编码; 部分网络编码

中图分类号: TP393.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 08-1736-05

An Opportunistic Routing for MANET Based on Partial Network Coding

WANG Xiao-dong, HUO Guang-cheng, SUN Hai-yan, MENG Xiang-xu, SUN Yan-qiang

(School of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Based on full network coding, opportunistic routing can be applied to solve the problem of space reuse and redundant packet copies in mobile ad hoc networks. Large average delay and bursty arrival flow of packets make the routing inefficient. An opportunistic routing based on partial network coding (OR-PNC) is proposed in this paper to encode packets using code vectors with variable length. Experimental results show that OR-PNC can effectively decrease packet average delay by 26% at most and make the arrival packet flow at destination nodes more smoothly.

Key words: MANET; opportunistic routing; network coding; partial network coding

1 引言

目前蜂窝通信网和无线局域网得到了快速的发展与普及,但是集中式控制的网络结构无法满足分布式组网的应用需求.移动自组网是一种由无线移动终端自组形成的多跳自治且无中心的分布式网络,具有网络自主、动态拓扑以及分布控制等特点,能很好地适应分布式组网的应用需求.然而传统有线网络以及集中式无线网络中的路由协议都不适合于移动自组网的分布式自组织网络结构,使得移动自组网路由协议成为研究的热点和难点.

传统路由算法均为单路径路由,节点的移动很容易导致链路的断裂或者环境的变化使链路质量下降而造成路由失效.针对上述情况,研究者扩展了单路径方式而形成了多路径路由方式,如 M-DSDV, SMR, AOMDV 等.上述多路径路由算法也仅仅是固定的多条路径而已,并没有真正充分考虑 MANET 的无线广播特性,所以也不能很好的解决问题.目前,基于协同传输思想并针

对无线网络广播特性的无线网络机会主义路由 OR(Opportunistic Routing)引起了广大学者的兴趣,并作了很多深入的研究^[1~3].

机会主义路由 ExOR 极大地提高了无线自组网的吞吐量^[4],但是由于采用集中调度,每一次只能一个节点发送,不利于空间重用.为了解决空间重用问题,Symon Chachulshi 提出了基于网络编码的机会主义路由 MORE^[5].

网络编码的思想简单,但能获得非常好的效果^[6~11].与 ExOR 一样, MORE 同样采用 ETX 来确定转发候选集:只要到目标节点的 ETX 小于源节点的 ETX 都可以作为转发候选节点.利用网络编码, MORE 可以分三个阶段来实现机会主义路由:编码、转发以及解码.

(1)编码 源节点在发送信息之前,把信息分成若干批次(Batches),每个 Batch 包含 k 个包(k 可以根据不同的场景选择).随机产生 k 个系数 $c_1 - c_k$,对 k 个包进行编码 $p' = \sum_i c_i p_i$,其中 $c = (c_1, c_2, c_3, \dots, c_i, \dots, c_k)$ 为编码系数向量 CV.源节点将编码后报文 p' 连同编码

系数向量 CV 以及转发候选集列表 FL(Forwarder List)一起广播出去。

(2) 转发 中继节点监听到报文后,检查自身是否在报文的转发候选集 FL 中。如果不在,则直接丢弃报文;如果在 FL 中,则提取报文的编码系数向量 CV,看是否与先前接收的报文系数向量线性无关。如果线性相关,丢弃报文;如果线性无关,则表明报文中有了新的信息,需要保存并转发该报文。

转发报文时,中继节点同样产生随机系数对已接收报文进行编码。例如某转发节点已接收到 m 个包($m \leq k$): $p_1' - p_m'$,其中假设 $p_j' = \sum_i c_{ji} p_i$ 。则随机产生 m 个系数 $r_1 - r_m$,对已经接收的包进行如下编码: $p'' = \sum_j r_j p_j' = \sum_j (r_j \sum_i c_{ji} p_i) = \sum_i (\sum_j r_j c_{ji}) p_i$,并把 $(\sum_j r_j c_{j1}, \sum_j r_j c_{j2}, \dots, \sum_j r_j c_{jm}, \dots, \sum_j r_j c_{jn})$ 作为该包的编码系数向量 CV。同时,报文中添加转发节点自身的转发候选集 FL 并转发出去。

(3) 解码 解码工作在目标节点完成。当目标节点接收到 k 个编码系数向量 CV 线性无关的报文后,即可利用式(1)解码,得到原报文的 k 个原子包。一旦完成解码,目标节点利用最短路径向源节点发送一个 ACK,停止该批报文的发送。

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{k1} & \cdots & c_{kk} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} p'_1 \\ \vdots \\ p'_k \end{pmatrix} \quad (1)$$

这种等长度的网络编码也称为完全网络编码,因此目标节点必须在接收到 k 个线性无关的报文后才能对原始报文进行解码。该方式增加了报文的延迟,不满足应用对实时性的要求;同时目标节点处报文到达表现出突发性特征,不利于解码。

如图 1 所示,源节点 S 有 3 个报文($k=3$)发送到目标节点 D ,采用完全网络编码的机会主义路由。假设目标节点处报文到达的时间间隔为 t ,即报文 p_1' 、 p_2' 、 p_3' 分别在 $t, 2t, 3t$ 时间达到。在 p_3' 达到后,目标节点同时解出原始报文 p_1 、 p_2 和 p_3 ,则报文平均延迟达 $(3t \times 3)/3 = 3t$ 。

如何保留网络编码空间重用的优点,减少报文平均延迟的同时,使原始报文到达流均衡以便于目标节

点的处理,从而成为本文的目标和出发点。

2 基于部分网络编码的机会主义路由 OR-PNC

部分网络编码 PNC(Partial Network Coding)^[12]应用于复杂环境下传感器网络多副本存储问题。与完全网络编码采用等长度编码方式不同,部分网络编码采用任意长度编码方式,以期解决完全网络编码不能解决的连续数据替换问题。

考虑上述相同示例:如图 2 所示,源节点 S 同样有 3 个报文要发送到目标节点 D ,在 S 将三个报文简单广播出去后,候选转发节点 A 、 B 、 C 分别接收到其中一些报文,当这些转发节点竞争到无线信道时,采用任意长度的部分网络编码对报文进行编码转发。

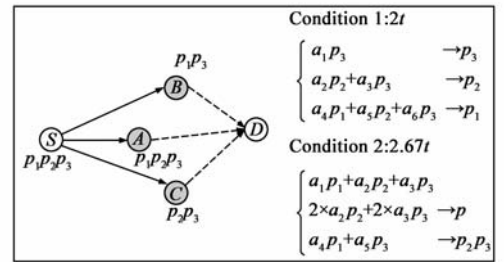


图2 基于部分网络编码的机会主义路由

由于转发节点采用部分网络编码方式,因此目标节点处接收到的报文编码长度不一,解码过程情况也多样:

情况 1: 目标节点 D 在 t 时刻首先接收到节点 B 发送过来的 $a_1 p_3$,即可解出原始报文 p_3 ;在 $2t$ 时刻,节点 D 接收到节点 C 转发的报文 $a_2 p_2 + a_3 p_3$,因为已知 p_3 ,因此可以解出原始报文 p_2 ;在 $3t$ 时刻,节点 D 接收到节点 A 转发的报文 $a_4 p_1 + a_5 p_2 + a_6 p_3$,因为已知 p_3 和 p_2 ,因此可以解出原始报文 p_1 。如此一来,报文到达均匀,而报文平均延迟也只有 $t + 2t + 3t/3 = 2t$,远小于完全编码的平均延迟 $3t$ 。

情况 2: 节点 A 首先竞争到无线信道,发送报文 $a_1 p_1 + a_2 p_2 + a_3 p_3$,目标节点 D 在 t 时刻接收到该报文后无法解码;在 $2t$ 时刻,目标节点 D 接收到 C 转发的报文 $2 \times a_2 p_2 + 2 \times a_3 p_3$,虽然与上一个报文系数线性相关,但可以解出原始报文 p_1 ;在 $3t$ 时刻,节点 D 接收到 B 转发的报文 $a_4 p_1 + a_5 p_3$,因为已知 p_1 ,可以解出 p_3 ,同时可以从第一个报文中解出 p_2 。报文的平均延迟为 $2t + 2 \times 3t/3 = 2.67t$,同样小于 $3t$ 。

基于上述对部分网络编码技术的应用分析,本文设计了基于部分网络编码的机会主义路由 OR-PNC,该路由算法以 OR-RSSI 为基础选择转发候选集,源节点发送原始报文,转发节点采用部分网络编码对接收到报文进行编码,目标节点接收到报文后即可解码得到原始报文。

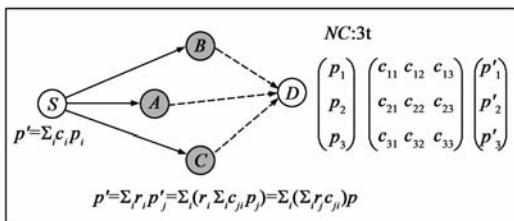


图1 基于完全网络编码的机会主义路由

2.1 基本过程

与基于完全网络编码的机会主义路由一样,基于部分网络编码的机会主义路由 OR-PNC 同样分为三个部分:发送、编码转发与解码。

(1)发送 在 OR-PNC 中,作为源节点,不需要对原始报文进行特殊处理.当有数据要发送时,简单把一个批次(Generation)的 k 个原始报文广播出去即可,当然报文头中同样包含节点自身的机会概率值域 F_{op} ,用以表征该节点成功发送数据报文的机会概率.这些原始报文可以看作特殊的编码报文,只是被编码报文数为 1,而编码系数也同样为 1.

(2)编码转发 中间转发节点接收到报文后,提取报文机会概率值域 F_{op} ,与自身机会概率值 $self.OP$ 比对,如果自身机会概率值较大,并且系数不与已经存储的报文线性相关,则存储报文(对于同一批次报文,存储报文数最多为 k 个).反之则直接丢弃报文,不做任何处理.

当节点竞争到信道后,随机产生一个整数 $L(1 \leq L \leq \text{存储报文个数})$,随机在报文队列中随机抽取 L 个报文,进行网络编码并转发.假设节点 A 存储了同一批次的报文: $p = p_1 \cdot p' = a_1 p_1 + a_2 p_2$ 和 $p'' = a_1' p_1 + a_2' p_2 + a_3' p_3$,并且 $L = 2$,分别抽取了 p 与 p'' 进行编码,则发送报文为:

$$\begin{aligned} p''' &= r_1 p + r_2 p'' \\ &= r_1 p_1 + r_2 (a_1' p_1 + a_2' p_2 + a_3' p_3) \\ &= (r_1 + r_2 a_1') p_1 + r_2 a_2' p_2 + r_2 a_3' p_3 \end{aligned}$$

报文格式如图 3 所示:

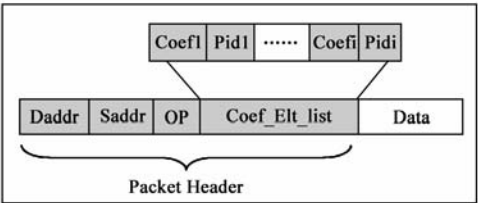


图3 OR-PNC报文格式

(3)解码 每接收到一个报文,目标节点对已接收到的报文进行高斯消解,看是否有报文可解.如果有报文可解,解出的原始报文被立即传送到应用层,并把该报文加入已解报文队列(ddedBuf);否则把报文加入到待解队列(ddingBuf)。

基于部分网络编码机会主义路由 OR-PNC,完整的算法伪代码如图 4 所示,其中包括任意报文的选取、编码和发送等部分。

3 实验测试与结果分析

上一节详细介绍了基于部分网络编码机会主义路由 OR-PNC 的基本思想和基本过程.为了验证其性能,

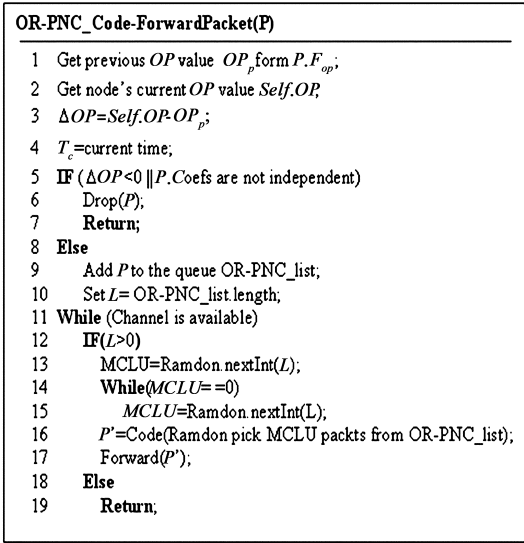


图4 OR-PNC算法伪代码

本文在 Eclipse 3.0 上实现了 OR-PNC 以及 OR-PN,并在配置了 802.11 无线网卡的台式机上进行了测试实验.基于 OR-PNC 有效减小报文平均延迟的出发点,本节也主要比较了两者的报文平均延迟,同时比较了两种方法在目标节点处报文到达流的影响。

3.1 OR-PNC 设计与实现

本文在 Eclipse 3.0 下,采用组播类 MultiCast 类设计和实现了基于部分网络编码的机会主义路由 OR-PNC.该程序主要包括发送线程、接收线程、编码解码模块和用户界面四个部分,主要构造类如图 5 所示。

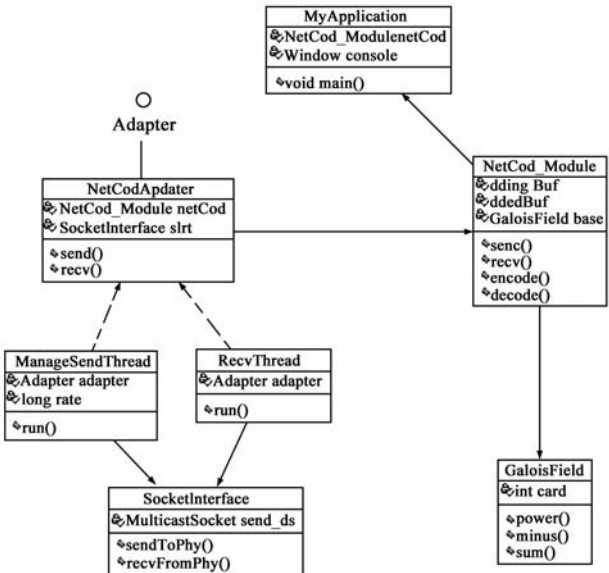


图5 OR-PNC实现类图

程序执行效果如图 6 所示(该图为 OR-PNC 测试实验 $k = 9$ 时,接收端程序效果图)。

3.2 测试实验与结果分析

实验测试中,我们架设了多台带有 802.11 无线网

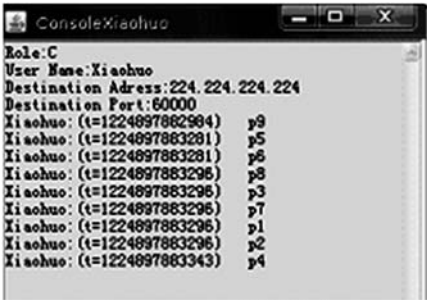


图6 OR-PNC测试界面

卡以及安装了 JAVA 环境的台式机节点,对 OR-PNC 与 OR-NC 的性能做简单的测试和性能比较。

3.2.1 报文平均延迟

对于不同的 k 值(同一批次原始报文的个数),OR-PNC 与 OR-NC 都进行 10 次独立的数据测试,并计算对应的报文平均延迟 \bar{D} 以及解出 k 个报文需要的报文数 N . 其中报文平均延迟计算如式(2)。

$$\bar{D} = \sum_{i=1}^K (T_i - T_f) / K \tag{2}$$

其中, T_i 为解出第 i 个原始报文的系统时间, T_f 为接收线程接收到该批次第一个原始报文的系统时间。

发送线程发送频率设为:1Packet/50ms(实际上物理层是每 62 – 63ms 发送一个报文)时,部分测试数据如表 1 所示。

表 1 OR-PNC 部分实验测试数据 (\bar{D}/N)

k 次数	$k = 3$		$k = 5$		$k = 10$	
	OR-NC	OR-PNC	OR-NC	OR-PNC	OR-NC	OR-PNC
1	135.67/3	62.33/3	259.60/5	259.80/6	577.20/10	628.30/12
2	135.00/3	88.67/4	256.00/5	199.40/6	567.40/10	571.60/11
3	135.00/3	135.67/4	319.00/6	231.20/5	580.80/10	512.60/11
4	197.67/4	135.67/4	262.00/5	316.00/7	676.00/11	695.10/14
5	135.67/3	62.33/4	312.00/6	180.80/5	634.60/11	588.00/10

从表中我们可以看出,基于完全编码的机会主义路由 OR-NC 中,对于同一 k 值,报文平均延迟差别不大,而在基于部分网络编码的机会主义路由 OR-PNC 中,即使在同一 k 值下,报文平均延迟差异较大,如 $k = 3$ 时, \bar{D} 最小可达 62.33ms,而最大又可以到 135.67ms。

同时,在同一 k 值下,基于完全编码的机会主义路由 OR-NC 一般只需要 k 个编码报文即可解出 k 个原始报文,而基于部分网络编码的机会主义路由 OR-PNC,则需要较多的编码报文才能成功解出 k 个原始报文。

对于不同的 k 值,我们分别对 OR-NC 和 OR-PNC 做十次独立的测试实验,再对十次测试的延迟求平均值 \bar{D} ,结果如图 7 所示。

从图 7 中我们看出,当 k 较小时,OR-PNC 的报文平均延迟均小于 OR-NC。当 $k = 6$ 时,OR-PNC 对报文平均

延迟的改善效果最好,由 OR-NC 的 359.90ms 降低到 264.5683ms,报文平均延迟降低了约 26.489%。随着 k 的增大($k \geq 7$),延迟改善效果降低,甚至出现 OR-PNC 的延迟大于 OR-NC 的情况($k = 10$)。究其原因,这是由于解码所需报文数增多造成的,可以从图 8 进行分析。

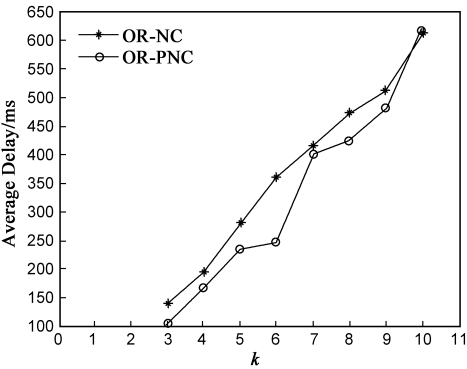


图7 不同k值下报文平均延迟

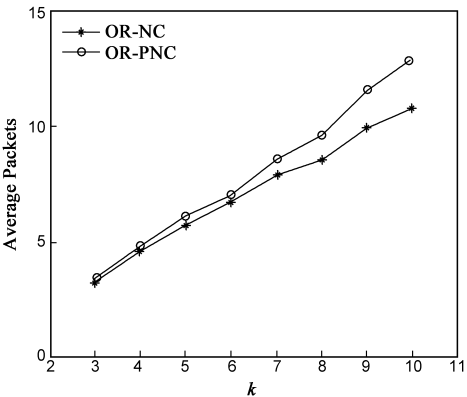


图8 不同k值下,解出k个报文需要的报文数

从图 8 我们可以看出,OR-NC 一般只需要 k 个编码报文即可解出 k 个原始报文,也就是说线性相关的可能性很小,最多也不会超过 $k + 2$ 个。当 $k \leq 6$ 时,OR-PNC 需要的报文数与 OR-NC 差不多;当 $k \geq 7$ 时,OR-PNC 需要的报文数较多于 OR-NC,导致延迟相应增大,优化效果下降明显。

OR-NC 采用完全网络编码的方式,只要系数非线性相关,则携带新的信息,一般只需要 k 个编码报文即可解码;而 OR-PNC 采用的部分网络编码,随着 k 的增加,每次任意抽取任意个报文进行编码,报文被重复编码的可能性增加,冗余无效编码报文增加,则需要的解码报文也相应的增加,延迟也相应的增加。

3.2.2 到达流的均衡性

如前所述,基于完全网络编码的机会主义路由 OR-NC 导致目标节点处报文到达流不均衡。由于 OR-NC 必须等待 k 个编码报文后才能一起解码得到 k 个原始报文,因此导致目标节点应用层接收到的原始报文具有突发性,不利于节点的处理。但基于部分网络编码的机

会主义路由 OR-PNC 可随时解码,目标节点应用层接收到的原始报文较均衡,利于目标节点的解码。

实验中,在目标节点应用层增加一个统计模块,每 100ms 统计一次接收到的报文数。当 $k=9$ 时,发送 3 批报文,前 2000ms 所统计的报文数如图 9 所示。

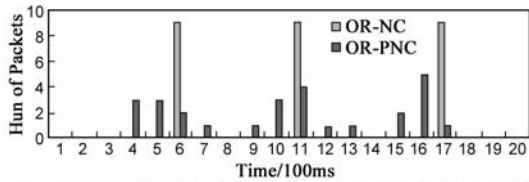


图9 k 为9时,每100ms到达目标节点应用层的原始报文数

从图9中可以看出,OR-NC中目标节点应用层的到达流具有突发性,要么无包可处理,要么突发得到9个原始报文;而OR-PNC中目标节点应用层的到达流比较均衡,在时间上得到较合理的分布,目标节点处理起来更加便捷和快速。

下面我们利用报文到达数量的统计方差来定量分析报文流到达的均衡度,方差越小,均衡度越高。如图9所示,每100ms所到达的原始报文数已知,则可以通过式3计算方差值。

$$E = \sum_{i=1}^n |N_i - \bar{N}|^2 \quad (3)$$

其中 N_i 表示第 i 个 100ms 目标节点应用层接收到的报文数, \bar{N} 表示前 n 个 100ms 到达应用层的报文平均数。

因此,可以算得上图中前 2000ms, OR-NC 和 OR-PNC 的方差分别为 206.55、44.54。OR-PNC 的方差要比 OR-NC 的方差小的多,因此到达流也更均衡。同样可以体现基于部分网络编码的机会主义路由 OR-PNC 目标节点处到达流的均衡性。

4 结束语

为了解决机会主义路由中空间重用和重复冗余报文问题,部分学者提出了基于网络编码的机会主义路由。但是基于完全网络编码的实现方案具有报文平均延迟较大、报文到达流不均衡的不足,不利于目标节点的解码。

本文提出了基于部分网络编码的机会主义路由 OR-PNC。在发送时,节点只要把同一批次的 k 个原始报文广播出去即可;转发候选节点对接收到的报文进行任意长度的部分编码转发;目标节点接收到编码报文后可直接解码。实验结果表明,OR-PNC 具有较 OR-NC 更小的延迟,最高可降低 26%,并且报文在目标节点的到达流具有更好的均衡性。

参考文献:

[1] Rahul C shah, Sven Wietholter, Adam Wolisz. When does op-

portunistic routing make sense[A]? 3rd IEEE Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops Proceed-ings[C]. Hawaii: IEEE Communication Society Press, 2005. 350 - 356.

- [2] Zifei Zhong, Srihari Nelakuditi. On the efficacy of opportunistic routing[A]. Proceedings of SECON[C]. San Diego: IEEE Communication Society Press, 2007. 441 - 450.
- [3] Z Zhong, J Wang, G-H Lu, S Nelakuditi. On selection of candidates for opportunistic anyPath forwarding[J]. Mobile Computing and Communications Review, 2006, 10(4). 1 - 2.
- [4] S Biswas, R Morris. ExOR: Opportunistic routing in multi-hop wireless networks[A]. Proceedings of ACM SIGCOMM[C]. Philadelphia: ACM Press, 2005. 133 - 144.
- [5] Szymon Chachulski, Michael Jennings Sachin Katti Dina Katabi. Trading structure for randomness in wireless opportunistic routing[A]. Proceedings of ACM SIGCOMM 2007[C]. Kyoto: ACM Press, 2007. 1036 - 1048.
- [6] Sachin Katti, Hariharan Rahul, Wenjun Hu, Dina Katabi. XORs in the air: Practical wireless network coding[A]. Proceedings of ACM SIGCOMM[C]. Pisa: ACM Press, 2006. 243 - 254.
- [7] Shuo-Yen, Robet Li, Raymond W Yeung. Linear network coding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49 (2): 371 - 381.
- [8] Jilin Le, John C S Lui, Dah Ming Chiu. How many packets can we encode? - An analysis of practical wireless network coding[A]. Proceedings of INFOCOM'08[C]. Phoenix: ACM Press, 2008. 371 - 375.
- [9] Sachin Katti, Dina Katabi, Wenjun Hu, Hariharan Rahul. The importance of being opportunistic: practical network coding for wireless environments[A]. Proceedings of INFOCOM'07[C]. Anchorage: ACM Press, 2007. 569 - 578.
- [10] D S Lun, M Medard, et al. Efficient operation of wireless packet networks using network coding[A]. Proceedings of International Workshop on Convergent Technologies (IWCT)[C]. Oulu: IEEE Communication Society Press, 2005. 247 - 251.
- [11] Xinyu Zhang, Baochun Li. Dice: A game theoretic framework for wireless multipath network coding[A]. Proceedings of MobiHoc'08[C]. Hong Kong: ACM Press, 2008. 26 - 30.
- [12] Dan Wang, Qian Zhang, Jiangchuan Liu. Partial network coding: theory and application for continuous sensor data collection[A]. Proceeding of IEEE MASS[C]. Vancouver: IEEE Communication Society Press, 2006. 93 - 101.

作者简介:

王晓东 男, 1973 年生, 湖南长沙人, 博士, 副研究员, 主要研究领域为无线通信网络与移动计算技术。 E-mail: rdwang@nudt.edu.cn

霍广城 男, 1983 年生, 广东湛江人, 硕士, 主要研究领域为移动自组网, 传感器网络。