

# 无线物联网中基于网络编码的能量受限数据传输机制

黄 辰<sup>1</sup>,李可维<sup>2</sup>,张 伟<sup>1</sup>,潘永才<sup>1</sup>,黄本雄<sup>3</sup>,戴 彬<sup>3</sup>

(1. 湖北大学物理学与电子技术学院,湖北武汉 430062;

2. 武汉第二船舶设计研究所,湖北武汉 430064;

3. 华中科技大学电信系,湖北武汉 430074)

**摘 要:** 本文针对无线物联网能量有限的应用场景,提出一种基于网络编码的能量受限数据传输机制 NCDT. NCDT 引入传染病路由的思想,对网络编码数据包的传输方式进行建模.通过限制编码数据包在网络中的复制次数,以及参与数据包交换的移动终端数量,控制网络的整体能量消耗. NCDT 机制在限制网络编码资源消耗的同时,保证了在传输过程中取得较高的传输可靠性.

**关键词:** 网络编码; 物联网; 能量

**中图分类号:** TP301 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013)01-0144-04

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.01.025

## Network Coding Based Energy Constrained Data Transmission Mechanism in Wireless Internet of Things

HUANG Chen<sup>1</sup>, LI Ke-wei<sup>2</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, PAN Yong-cai<sup>1</sup>, HUANG Ben-xiong<sup>3</sup>, DAI Bin<sup>3</sup>

(1. Faculty of Physical and Electronics, Hubei University, Wuhan, Hubei 430062, China;

2. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan, Hubei 430064, China;

3. Department of Electronic and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** A network coding based energy constrained data transmission mechanism NCDT is proposed in this paper for limited energy scenario in wireless internet of things. NCDT makes use of epidemic routing to construct mathematical model to describe transmission process of coding packets. NCDT controls overall energy overhead through constraining duplication time of coding packets and the number of terminals that exchange packets. While constraining resource consumption, NCDT maintains high transmission reliability.

**Key words:** network coding; internet of things; energy

## 1 引言

无线物联网扩展了物联网的覆盖广度和宽度,智能移动终端是无线物联网的重要组成部分.移动终端进行复杂运算的前提是有足够的能量保障,如何在降低网络整体能量消耗的前提下,保证无线物联网通信的效率和可靠性,成为无线物联网领域的重要研究课题.

本文提出了一种基于网络编码的能量受限数据传输机制 NCDT(Network Coding Based Energy Constrained Data Transmission).该机制在能量受限的无线物联网环境中,参照经典的传染病模型,将编码数据包在无线物联网中的传输视作传染病毒的感染和扩散,结合终端的运

动轨迹特点,对编码数据包的传输方式进行建模分析.

## 2 相关研究工作

目前无线网络数据传输机制的研究中存在着诸多理想化的假设条件.文献[1]假设信源拥有网络连接状态的先验知识,文献[2]则假定节点移动的历史数据可以用于预测消息发送成功概率. Tao 等人<sup>[3]</sup>在多个单播会话之间执行异或网络编码.文献[4]只缓存单播会话队列的头队列.

Katti 等人提出了经典的 COPE 协议<sup>[5]</sup>,将网络编码理论用于单播,动态以及突发的数据流场景. Sengupta 等人<sup>[6]</sup>提出将编码感知和信道干扰感知相结合. Chaporkar

等人<sup>[7]</sup>提出了一种用于 COPE 协议的优化调度机制. Le 等人<sup>[8]</sup>提出将路由发现和编码机会探测相结合的思路,搜索可能的高吞吐率路径. Alireza 等人<sup>[9]</sup>分析了网络编码在吞吐率和能耗这两个方面的性能上界.

### 3 受限数据传输模型

#### 3.1 传染病模型

目前已有研究将数据包在网络中的随机转发过程类比为传染病的传播<sup>[10]</sup>.在基于网络编码的数据传输过程中,可以将节点的状态分为感染、健康和隔离三种类型.文献<sup>[11]</sup>用受感染节点数目表示网络所处状态,状态转移服从随机逗留时间的半马尔科夫链模型. NCDT 机制采用了一个连续时间模型,去近似 Yoon 等人<sup>[12]</sup>提出的离散马尔科夫模型,推导出基于时间变化的网络性能的闭合表达式.在一般的传染病模型的基础上, NCDT 机制将受限感染策略和网络编码结合在一起,限制信源生成的编码数据包被移动终端编码的次数,达到降低编码数据包的交换次数,最终减少网络能量开销的目的.

#### 3.2 流量控制策略

##### (1) 移动终端的相遇时间期望

在无线物联网的建模中,移动终端遵循随机路点移动模型 RWP(Random Waypoint).相遇时间期望影响到受感染节点数量.将无线物联网中按照 RWP 模型运动的移动终端在位置  $(x, y)$  上的稳态密度函数记作  $f(x, y)$ .定义线段  $(Y_S, Y_F)$ ,移动终端  $A$  和  $B$  位于该线段上,  $Y_S$  与  $Y_F$  分别是该线段的起点和终点,一个随机运动周期就是从  $Y_S$  运动到  $Y_F$  的时间.设传输范围为  $R$ ,所有随机运动周期的集合为  $S = \{(Y_S, Y_F)\}$ ,碰到  $B$  的运动周期的集合为  $S_{MB} = \{(Y_S, Y_F) : \|Y_B - Y_M\| \leq R\}$ .

一个运动周期内移动终端运动轨迹的长度为  $L$ ,  $L$  的均值记为  $\bar{L}$ .设所有穿过  $B$  的线段的集合为  $S_{MB}^A = \{(Y_S, Y_F) : \|Y_B - Y_M\| = 0\}$ ,得  $\|S_{MB}\| \approx 2R \cdot \|S_{MB}^A\|$ ,根据  $f(x, y)$  的定义,可得  $f(x, y) = \|S_{MB}^A\| / V^2 \bar{L}$ ,则  $\|S_{MB}\| \approx 2f(x, y) RV^2 \bar{L}$ .节点停留时间在  $[0, T_{\max}]$  内均匀分布,均值为  $\bar{T}_{\text{stop}}$ ,运动周期的时间均值是  $\bar{T}$ .运动周期时间长度的期望为  $\bar{T}_{\text{stop}} + \bar{T}$ ,可以得到

$$ET_{RWP} = \iint_V \frac{1}{f(x, y)} dx dy \cdot (\bar{T}_{\text{stop}} + \bar{T}) \quad (1)$$

式(1)存在积分不收敛的问题,即是在网络边缘  $f(x, y) \rightarrow 0$ ,可以通过修改边界的方式求取近似值<sup>[14]</sup>,边界修改为  $[-\sqrt{V}/2 + R, \sqrt{V}/2 - R]$ ,可得

$$\iint_V \frac{1}{f(x, y)} dx dy = \frac{V^2}{2} (I_1 + 2I_2)^2$$

$$\begin{aligned} &= \frac{V^2}{2} \left\{ \int_{-\sqrt{V}/2+R}^{\sqrt{V}/2-R} \left( x2 - \frac{V}{4} \right)^{-1} dx \right. \\ &+ \left. \int_{-\sqrt{V}/2+R}^{\sqrt{V}/2-R} \left[ \left( \frac{\sqrt{V}}{2} - R \right)^2 - \frac{A}{4} \right]^{-1} dx \right\} \\ &= \frac{V^2}{2} \left[ \frac{\left( 4 \tanh^{-1} \left( 1 - \frac{2R}{\sqrt{V}} \right) \right)^2}{\sqrt{V}} + 2 \frac{1}{R - \sqrt{V}} \right]^2 \end{aligned}$$

综上,无线物联网中任意两个按照 RWP 模型运动的移动终端的相遇时间期望  $ET_{RWP}$  为

$$ET_{RWP} = \frac{V}{4RL} (I_1 + 2I_2)^2 (\bar{T}_{\text{stop}} + \bar{T})$$

##### (2) 网络流量控制

一个原始编码数据包(病毒)的比例远远超过了其它原始编码数据包,就会影响解码能力,因此需要对其增长速度进行限制.

设  $N_i(t)$  为  $t$  时刻,网络中原始编码索引 ID 为  $i$  的受感染的移动终端数目.随着节点数  $N$  的增长,  $N_i(t)$  收敛为常微分方程式(2)的解.  $S_i(t)$  为时刻  $t$  针对  $i$  的流量控制策略的量化值.  $\mu$  为丢包率.

$$\frac{d}{dt} N_i(t) = V(R) \cdot (\bar{T}_{\text{stop}} + \bar{T}) \cdot S_i(t) \cdot \frac{N_i(t)}{N} \cdot \mu \quad (2)$$

$$\text{其中 } V(R) = \frac{V}{4RL} (I_1 + 2I_2)^2$$

设原始编码数据包  $i$  从生成,到感染到健康的信宿所需的时间长度为  $T_A$ ,则处于健康状态的信宿节点在任意时间段  $\Delta t$  内遇到且仅遇到一个编码数据包  $i$  的移动终端的概率如式(3)所示

$$\begin{aligned} &P(t < T_A < t + \Delta t) \\ &= P(T_A > \Delta t) \cdot \int_0^{\Delta t} \frac{N_i(t)}{N} \cdot ET_{RWP} \cdot dt \\ &= [1 - P(t)] \cdot E \left[ \frac{N_i(t)}{N} \cdot ET_{RWP} \cdot dt \right] \end{aligned} \quad (3)$$

因此  $P(t)$  收敛于常微分方程式(4)的解

$$\frac{d}{dt} P(t) = [1 - P(t)] \cdot ET_{RWP} \cdot \frac{N_i(t)}{N} \quad (4)$$

##### (3) 能量限制下的流量控制策略

设  $N(t)$  为网络在时刻  $p$  的病毒总量,在不采用流量控制策略的情况下 ( $S_i(t) = 1$ ),  $t = 0$  时刻,网络中已经存在  $G$  个原始编码数据包,从而有

$$N(t) = G + \sum_{i=1}^G N_i(t)$$

假设网络允许分配给每个单播会话的能量有限,在该能量限制下,允许向网络中复制的病毒最大数量为  $N_x (N_x > G)$ .结合式(3)和式(4),得方程组(5),可以解得达到  $N_x$  所需的时间为  $T_x$ .

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}N_i(t) = V(R) \cdot (\bar{T}_{\text{stop}} + \bar{T}) \cdot S_i(t) \cdot \frac{N_i(t)}{N} \cdot \mu \\ \frac{d}{dt}P(t) = [1 - P(t)] \cdot ET_{\text{RWP}} \cdot \frac{N_i(t)}{N} \\ N(t) = G + \sum_{i=1}^G N_i(t) = N_x \end{cases} \quad (5)$$

取  $T_x$  最小值  $T_{x\min}$ , 在能量受限的情况下, 流量控制策略需要作相应的调整, 最大化信宿的信息解码成功率所要求的流量控制策略为

$$S_1(t) = S_2(t) = \dots = S_G(t) = \frac{T_{x\min}}{G}$$

## 4 仿真结果与分析

使用仿真软件 OMNet++ 4.0 平台模拟无线物联网环境, 在网络整体能量受限的情况下, 对 NCDT 机制的性能进行评估, 并将 NCDT 机制与经典的网络编码数据传输机制 COPE, 以及传染病数据传输机制 ER<sup>[13]</sup> 进行比较. 比较对象参考了文献 [14, 15] 基于节点间协作的网络编码机制.

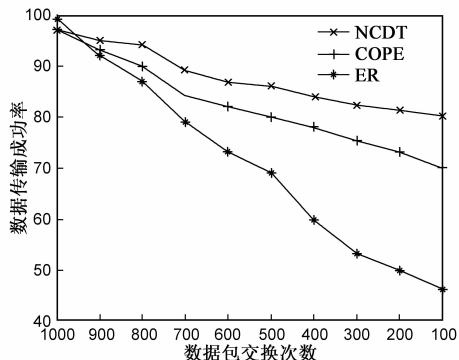


图1 数据传输成功率(丢包率10%)

如图 1 所示, 三种数据传输机制的传输成功率都出现了不同程度的下降, NCDT 和 COPE 的下降程度低于 ER, 且下降幅度较为平坦. 在无线物联网这样的低能耗要求的网络中, 不能无限制复制数据包以保证传输成功率, 因此一旦复制次数受限, ER 的传输成功率就会大

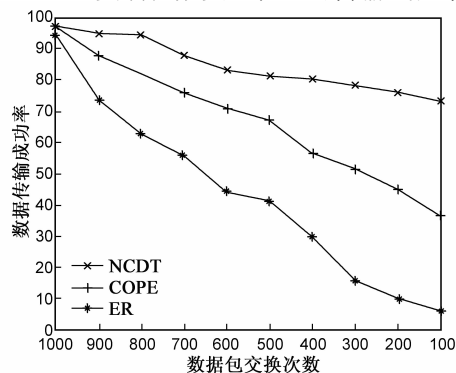


图2 数据传输成功率(丢包率50%)

幅下降.

在图 2 中, 设网络丢包率达到 50%, 此时 NCDT 的传输成功率相比丢包率为 10% 的时候没有明显下降, 而 COPE 在原始编码数据包的复制次数限制在 500 以下的时候, 传输成功率下降明显. 相比 NCDT 和 COPE, 当数据包复制次数限制在 100 的时候, ER 基本上丧失了传输能力.

## 5 结束语

本文提出了一种基于网络编码的能量受限数据传输机制 NCDT. 仿真实验证明, 在能量受限的无线物联网环境下, 改造后的网络编码机制 NCDT 能够取得较高的数据传输成功率.

## 参考文献

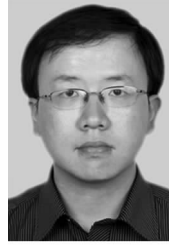
- [1] Courses E, et al. Routing strategy for minimizing the packet loss in disruptive tolerant networks [A]. Proceedings of IEEE, CISS08[C]. USA: IEEE Press, 2008. 1167 - 1172.
- [2] Burgess J, et al. MaxProp: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks[A]. Proceedings of IEEE INFOCOM06[C]. USA: IEEE Press, 2006. 1 - 11.
- [3] Tao C, et al. Efficient opportunistic network coding for wireless networks[A]. Proceedings of INFOCOM2008[C]. USA: IEEE Press, 2008. 361 - 365.
- [4] Tao C, et al. Distributed optimization in wireless networks using broadcast advantage[A]. Proceedings of Decision and Control 2007[C]. USA: IEEE Press, 2007. 5839 - 5844.
- [5] Katti S, et al. XORs in the air: Practical wireless network coding[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(3): 497 - 510.
- [6] Sengupta S, et al. An analysis of wireless network coding for unicast sessions: The case for coding-aware routing [A]. Proceedings of INFOCOM 2007[C]. USA: IEEE Press, 2007. 1028 - 1036.
- [7] Chaporkar P, et al. Adaptive network coding and scheduling for maximizing throughput in wireless networks [A]. Proceedings of ACM MobiCom 2007[C]. USA: IEEE Press, 2007. 135 - 146.
- [8] Le J, et al. DCAR: Distributed coding-aware routing in wireless networks[A]. Proceedings of IEEE ICDCS2008[C]. USA: IEEE Press, 2008. 462 - 469.
- [9] Keshavarz A, et al. Bounds on the benefit of network coding: Throughput and energy saving in wireless networks[A]. Proceedings of IEEE INFOCOM 2008[C]. USA: IEEE Press, 2008. 376 - 384.
- [10] Small T, et al. The shared wireless infostation model: A new ad hoc networking paradigm (or where there is a whale, there is a way)[A]. Proceedings of ACM Mobihoc2003[C]. USA:

IEEE Press,2003. 233 – 244.

- [11] Groenevelt R, et al. The message delay in mobile ad hoc networks[A]. Proceedings of Performance Evaluation[C]. USA: IEEE Press,2005, 62(1 – 4):210 – 228.
- [12] Yoon S, et al. Efficient tradeoff of restricted epidemic routing in mobile Ad-Hoc Networks[A]. Proceedings of MILCOM 2007[C]. USA: IEEE Press, 2007. 1 – 7.
- [13] Ramanathan R, et al. Prioritized epidemic routing for opportunistic networks[A]. Proceedings of ACM MobiSys workshop2007[C]. USA: IEEE Press, 2007. 62 – 66.
- [14] 徐峰,等.分布式协作通信网络中一种新的跨层设计方案[J].电子学报,2009, 37(7):1434 – 1439.  
XU Feng, et al. A novel cross-layer design scheme for distributed cooperative communication networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(7):1434 – 1439. (in Chinese)
- [15] 黄辰,等.基于网络编码的无线网络分布式协作通信机制[J].电子学报,2010, 38(10):2302 – 2308.

HUANG Chen, et al. Network coding based distributed cooperative communication mechanism in wireless network [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(10): 2302 – 2308. (in Chinese)

#### 作者简介



黄 辰 男,1983 年出生,福建龙岩人,博士,湖北大学讲师,主要研究方向为物联网及网络编码.

E-mail: szo094@qq.com

张 伟 男,1979 年出生,湖北武汉人,博士后,湖北大学讲师,主要研究方向为无线传感器网络.

E-mail: 17890521@qq.com