

文章编号:1007-5321(2017)05-0018-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2016-276

基于流内与流间网络编码的 DTMSN 广播传输机制

姚建盛^{1,2}, 马春光², 袁 琪², 李增鹏²

(1. 吉林师范大学 计算机学院, 吉林 四平 136000; 2. 哈尔滨工程大学 计算机科学与技术学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 提出了一种基于流内与流间网络编码的延迟容忍移动传感器网络(DTMSN)高效广播传输机制. 在该机制中, 汇聚节点利用随机线性网络编码将原始数据处理成编码包, 然后转发给传感器节点. 传感器节点间利用一种优化的机会网络编码算法交换编码包. 当传感器节点收到足够多的线性无关编码包时解码得到原始广播数据. 理论分析和仿真实验表明, 与仅基于随机线性网络编码的广播传输机制相比, 该机制能进一步减小广播时延和网络负载.

关键词: 延迟容忍移动传感器网络; 广播传输; 网络编码; 随机线性网络编码; 机会网络编码

中图分类号: TP393

文献标志码: A

A Broadcast Transmission Scheme for DTMSN Based on Intra-flow and Inter-flow Network Coding

YAO Jian-sheng^{1,2}, MA Chun-guang², YUAN Qi², LI Zeng-peng²

(1. College of Computer, Jilin Normal University, Jilin Siping 136000, China;

2. College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: An efficient broadcast transmission scheme based on intra-flow and inter-flow network coding in delay tolerant mobile sensor networks (DTMSN) was proposed. In the scheme, the sink nodes transform the original broadcast data into coded packets by utilizing random linear network coding, and then forward them to sensor nodes. Sensor nodes exchange the coded packets by employing an optimized opportunistic network coding algorithm. Once receiving enough independent coded packets, the sensor nodes can decode them and obtain the original broadcast data from the sink node. Analysis and simulation show that the scheme can further reduce broadcast delay and network cost than those schemes only based on random linear network coding.

Key words: delay tolerant mobile sensor networks; broadcast transmission; network coding; random linear network coding; opportunistic network coding

延迟容忍移动传感器网络(DTMSN, delay tolerant mobile sensor networks)^[1]利用延迟容忍网络^[2]数据传输技术实现不连通传感器节点间的通信,对

物联网和普适计算有重要意义. 尽管传感网的主要功能是收集数据,但广播仍是其一种基本而重要的数据传输方式^[3]. 当前 DTMSN 的广播传输机制主

收稿日期: 2016-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(61472097); 高等学校博士学科点专项科研基金课题(博导类)(20132304110017); 黑龙江省自然科学基金项目(F201229)

作者简介: 姚建盛(1980—), 男, 博士生, E-mail: yaojiansheng@hrbeu.edu.cn; 马春光(1974—), 男, 教授, 博士生导师.

要基于直接传输^[4]、基于洪泛^[4]和传染病^[5]等。杨奎武等^[6-7]基于随机线性网络编码(RLNC, random linear network coding)提出了广播传输机制(NBT, netcoding-based broadcast transmission scheme)^[6]和高效广播传输机制(NEBT, netcoding-based efficient broadcast transmission scheme)^[7]。笔者鉴于机会网络编码(ONC, opportunistic network coding)能有效提高网络吞吐量,结合RLNC和ONC提出一种基于流内与流间网络编码的高效DTMSN广播传输机制I²NCBT(intra-flow and inter-flow network coding broadcast transmission);为降低开销,提出一种基于二进制位运算的ONC包构建算法。理论分析和仿真实验证明,I²NCBT比NBT和NEBT能进一步减小广播时延和网络负载。

1 基于流内与流间网络编码的广播

I²NCBT在不同时机和不同位置使用不同编码技术,共同完成汇聚节点向传感器节点广播数据的任务,本节分别介绍基于2种编码技术的广播,并定性分析I²NCBT的开销。

1.1 基于RLNC的广播

在I²NCBT中,当汇聚节点生成原始广播数据时,首先依据数据大小将其分成L个批次数据段,然后再将每个批次数据段X等分成m个原始数据,即 $X=[X_1\ X_2\ \cdots\ X_m]^T$,其中 X_i 对应伽罗瓦域 $GF(2^K)$ 上的一个n维向量 $[x_{i1}\ x_{i2}\ \cdots\ x_{in}]$ 。当有转发机会时,汇聚节点随机选取编码向量 $g_i=[g_{i1}\ g_{i2}\ \cdots\ g_{im}]$ ($g_{ij}\in GF(2^K)$),并按式(1)得到编码包 Y_i ,然后将 Y_i 转发给通信范围内的传感器节点。

$$Y_i = g_i X = [y_{i1}\ y_{i2}\ \cdots\ y_{in}]$$
$$(y_{ik} = \sum_{j=1}^m g_{ij} X_{jk}, k=1,2,\cdots,n) \tag{1}$$

表 1 ONC 收益

节点	NBT	NEBT	I ² NCBT	π_B	π_C
B	$B\rightarrow C: \{c, d, h\}$	$B\rightarrow C: \{c, d\}$	$B\rightarrow C: \{c\}$	1	2
	$B\rightarrow D: \{g, h\}$	$B\rightarrow D: \{g\}$	$B\Rightarrow C, D: \{d\oplus g, h\}$		
C	$C\rightarrow A: \{e, f, g\}$	$C\rightarrow A: \{e, f\}$	$C\rightarrow A: \{f\}$	2	3
	$C\rightarrow B: \{a\}$	$C\Rightarrow A, B, D: \{a, g\}$	$C\Rightarrow A, B, D: \{a\oplus e, g\}$		
	$C\rightarrow D: \{a, g\}$				

在表1中, \rightarrow 表示单播, \Rightarrow 表示广播。以节点B为例,在NBT中需要分别向节点C和D各单播3次和2次数据,其中数据h是重复转发的;在

汇聚节点向网络中注入 $h(h\geq m)$ 个线性无关的同一批次数据编码包,但只有经过Sink节点的传感器节点能收到部分编码包,然后传感器节点间通过ONC获得同一批次数据的不同编码包。当传感器节点收到任意m个编码包组成的向量 $Y=[Y_1\ Y_2\ \cdots\ Y_m]$ 时,若其对应的编码矩阵 $G=[g_1\ g_2\ \cdots\ g_m]$ 满秩,则根据式(2)解码得出原始数据X。

$$X^T = G^{-1} Y^T \tag{2}$$

1.2 基于ONC的广播

首先对比NBT、NEBT和I²NCBT中节点在交换数据时的不同策略,得出ONC的优势,然后基于二进制位运算提出优化的ONC包构建算法。

1) ONC 收益示例

依据NEBT中节点广播收益的定义^[7]给出节点编码收益定义。假设在没有通信差错的情况下,节点编码收益是指节点采用ONC方式向其通信范围内其他节点传输广播数据时比其采用单播方式节省的通信开销的量。2种收益的大小都是用节省传输数据的数量来衡量,广播收益和编码收益分别用 π_B 和 π_C 表示。假设汇聚节点发送同一批次数据的8个线性无关编码包 $a\sim h$,传感器节点A、B、C和D分别得到如图1所示的数据,示例中节点B和C具体收益如表1所示。

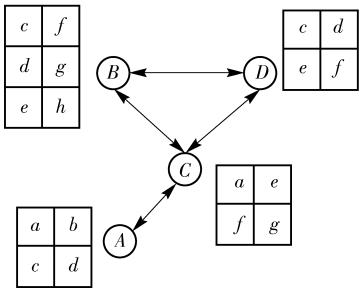


图 1 ONC 收益示例

NEBT中通过广播数据h,节省一次数据传输, $\pi_B=1$;在I²NCBT中通过ONC将数据d和g异或后广播,又节省一次数据传输, $\pi_C=2$ 。同理,节点

C 在 NEBT 中广播收益 $\pi_B = 2$; 在 I^2 NCBT 中编码收益 $\pi_C = 3$.

Msg	Val					Num
P_1	0	1	0	0	0	1
P_2	1	0	0	0	1	2
P_3	0	0	1	0	0	1
P_4	1	0	0	1	0	2
P_5	0	1	0	0	0	1
P_6	0	0	0	1		1
P_7	0	0	0	0	1	1
	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	

图 2 CBT

2) 构建 ONC 编码包

构建 ONC 编码包是利用 ONC 实现广播的关键,目前主要使用散列搜索算法. 然而,该方法存在不合理之处,并且复杂度较高. 为此基于二进制位运算提出一种优化的构建 ONC 包的算法,既节省存储空间又具有较低的复杂度. 首先描述相关数据结构,然后设计构建 ONC 包算法.

① 数据结构. 编码构建表 (CBT, coding-built table) 是一维数组,数组长度为节点当前拥有的消息数 M ,数组元素是结构体 $\{\text{Msg}, \text{Val}, \text{Num}\}$. 其中, Msg 是数据; Val 是二进制位串,长度为节点邻居数,令 w_{ij} 是第 i 个数据的 Val 值的第 j 个值, $w_{ij} \in \{0, 1\}$, 则 Val 生成过程是传感器节点周期性探测邻居节点数据列表 l (l 仅包含数据的 ID), 如果邻居节点 N_j 已经拥有数据 P_i 则 $w_{ij} = 0$, 反之 $w_{ij} = 1$; Num 记录 Val 中 1 的个数,即需要该数据包的邻居数. 图 2 是 CBT 的一个示例.

② 构建 ONC 包. 在传统散列搜索算法中,首先依据一个类似 Val 组成的 $M \times N$ 矩阵计算数据 P_i 的散列值 $\rho_i = \sum_{j=1}^M 2^{j-1} w_{ij}$ ($\rho_i \in [0, 2^{M-1}]$), 然后构建有序的散列表,最后计算当前散列值的邻域. 散列值 ρ_n ($n = 1, 2, \dots, M$) 的邻域 $U = \left\{ \sum_{j=1}^N 2^{j-1} \lambda_j \right\}$, 其中 $\lambda_j \in \{0, 1\}$, $\exists \lambda_j \neq 0$ s. t. $j \in \{1, 2, \dots, N\}$ and $\forall b_i^j = 0, b_i^j (1 \leq i \leq n)$ 是 ρ_i 的第 j 比特. 该算法优先选择散列值最大的数据编码不一定是最优的,而应该优先选择被更多邻居节点需要的数据包编码,如图 2 所示,数据 P_7 和 P_4 对应的散列值分别为 16 (10000) 和 9 (01001), 虽然 $16 > 9$, 但从二进制值看, P_4 被更多邻居需要, 优先编码能获得更大效益. 其次, 算法构建的邻域中很多元素在散列表中并未

出现,如图 2 所示的例子中,散列值 17, 其邻域 $U = \{12, 10, 8, 6, 4, 2\}$, 而数据的散列值没有 12、10 和 6 等元素, 因此没有必要计算邻域中所有元素. 为此提出一种基于二进制位运算构建 ONC 包算法, 如算法 1 所示.

算法 1 构建 ONC 编码包

SelMsgBits = 0, ONCPkts = 0;

for ($i = 1$; $i < M$; $i++$)

$j = \text{CBT}[i \sim M]$ 中 Num 最大的元素的下标;

交换 $\text{CBT}[i]$ 和 $\text{CBT}[j]$;

if ($\text{SelMsgBits} \& \text{CBT}[i].\text{Val}$) $= 0$ then

SelMsgBits $\mid = \text{CBT}[i].\text{Val}$;

ONCPkts $\oplus = \text{CBT}[i].\text{Msg}$;

end if

end for

算法 1 的输入是编码构建表 $\text{CBT}[M]$, 输出是 ONC 包 ONCPkts, 初始值为 0. SelMsgBits 是二进制串, 用来存储所选数据 Val 值按位或的结果, 串长度是节点的邻居数. 为优化性能, 算法每次从 CBT 表剩余元素中选择 Num 值最大的数据进行编码判断. 如果 $\text{SelMsgBits} \& \text{CBT}[i].\text{Val} \neq 0$, 则意味着 ONCPkts 中已经包含节点 v ($v \in V$, V 是需要数据 P_i 的邻居节点集) 需要的一个数据, 再将 P_i 编入 ONCPkts 中, 节点 v 将无法解码; 否则, 编码该数据. 如图 2 所示, 首先选择 P_2 , $\text{SelMsgBits} = 10001$, 再选择 P_4 时, $\text{SelMsgBits} \& \text{CBT}[4].\text{Val} \neq 0$, 放弃编码, 如此按算法 1 得 $\text{ONCPkts} = P_2 \oplus P_6 \oplus P_3 \oplus P_1$.

1.3 算法开销

本节定性分析 NBT、NEBT 和 I^2 NCBT 的存储开销和计算开销.

1) 存储开销

假设 $E(M)$ 和 $E(N)$ 分别是节点数据队列长度和邻居节点数的数学期望, C 是 I^2 NCBT 和其他 2 种算法相比的额外存储开销, C 的值取决于 CBT 表中 Val 和 Num 的长度和个数. Val 是二进制位串, 长度为 $E(N)$; Num 也可以用二进制存储, 最大值为 Val 的长度, 因此 Num 的长度为 $\lceil \lg(E(N) + 1) \rceil$; CBT 表元素数为 $E(M)$, 则

$$C = E(M)(E(N) + \lceil \lg(E(N) + 1) \rceil) \quad (3)$$

由于 C 是二进制位的个数, 因此即便是最坏情况下, $E(M)$ 和 $E(N)$ 的上限为系统中存在的所有数据数量和除节点自身以外的所有节点数, I^2 NCBT 的空间开销也是一个可以接受的值.

2) 计算开销

3 个算法的 RLNC 广播部分的时间复杂度相同,因此重点分析和比较编码包在传感器节点间传输时的时间开销. I^2NCBT 的时间开销主要由生成 CBT 表和构建 ONC 包 2 部分组成. 设前者时间复杂度为 A_1 (见式(4)), 后者的时间复杂度为 A_2 .

$$A_1 = O((E(M))^2E(N)) \tag{4}$$

事实上,节点在 NBT 和 NEBT 中交换编码包时的时间复杂度和 I^2NCBT 的 A_1 相同. NBT 通过传染病路由 (ER, epidemic routing) 扩散编码包,每次只和一个节点通信,需要将数据列表中所有数据和相遇节点的数据列表比较,其时间复杂度为 $O((E(M))^2)$, 当和 N 个节点相遇时其时间复杂度为 A_1 . NEBT 通过广播机制扩散编码包,也需要遍历自己的数据队列和每个邻居节点的数据队列,其时间复杂度也为 A_1 .

因此,与 NBT、NEBT 相比, I^2NCBT 付出的额外计算开销为 A_2 ,即算法 1 的时间复杂度, A_2 相当于对 $CBT[M]$ 进行排序,即

$$A_2 = O\left(\frac{E(M)(E(M)-1)}{2}\right) \tag{5}$$

和 A_1 相比, A_2 的计算开销最坏情况下也小于 A_1 的一半 ($A_2 < \frac{A_1}{2E(N)}$),且节点密度越大,优势越大.

2 仿真实验

基于 ONE 仿真器实现了 DTMSN 广播传输. 仿真区域大小为 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$,网络中有 1 个汇聚节点和 N 个传感器节点,汇聚节点位于区域中心不动,传感器节点遵循随机路点 (RWP, random waypoint) 移动模型. 汇聚节点生成广播数据,服从参数为 $\lambda = 0.05$ 的 Poisson 分布,网络带宽为 2 Mbit/s ,其他仿真参数如表 2 所示.

仿真实现了 NBT、NEBT 和 I^2NCBT ,并比较了平均广播时延和网络负载,仿真结果如下.

1) 节点数对广播性能的影响 ($r = 4\text{ m}$, $h = 8$)

如图 3(a) 所示,随节点数增多 3 种算法的平均广播时延都呈下降趋势. 因为区域大小不变,则节点相遇机会随节点数增多而增大,导致节点通信更加频繁,加速了数据传播,从而减小了广播时延. 平均广播时延性能比较: $NBT > NEBT > I^2NCBT$, 因为 NEBT 和 I^2NCBT 都利用无线信道的广播特性,节点密度越大,通信范围内邻居节点数越多,广播收益越

表 2 仿真参数

参数	默认值
传感器节点数 N	10,20,30,40,50,60,70,80
传感器传输半径/m	1,2,3,4,5,6,7,8
汇聚节点传输半径/m	10
传感器移动速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	4.0
RWP 中静止等待时间/s	0 ~ 50
数据大小/KB	1024
汇聚节点注入编码包数 h	8,10,12,14,16
RLNC 包含原始数据包数 m	8
探测周期/s	0.6
GF 域参数 K	8

大,其中 I^2NCBT 的机会网络编码进一步减少通信量,加速数据传输,减小广播时延.

图 3(b) 显示随节点数增多,一次广播平均转发编码包数 (平均网络负载) 也随之增大. 因为每个节点都需要得到广播数据的副本,所以节点数越多需要传输的数据包的数量也越多. 网络负载比较结果: $NBT > NEBT > I^2NCBT$. 因为 NBT 是通过单播转发数据的,所以网络负载受节点数影响较大,而 NEBT 和 I^2NCBT 通过广播减少网络负载,节点密度

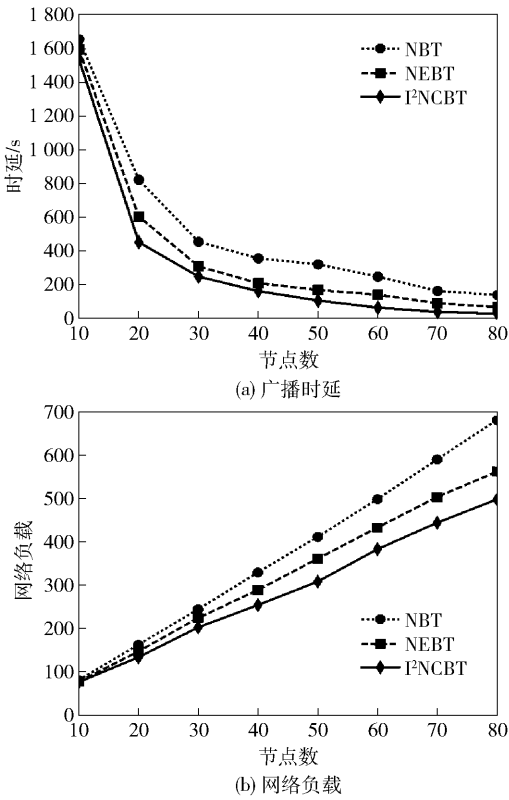


图 3 节点数对算法性能的影响

越大广播性能越好,其中 I^2NCBT 利用机会网络编码进一步压缩广播数据,从而减小网络负载。

2) 通信半径对广播性能的影响 ($N=50, h=8$)

如图4(a)所示,节点通信半径越大传输时延越小。因为随着通信半径增加节点连通概率增大,通信机会越多,所以时延下降。广播时延性能比较结果: $NBT > NEBT > I^2NCBT$ 。因为 $NEBT$ 通过广播转发数据而加速数据传播,而 I^2NCBT 的机会网络编码能进一步加速数据传播,所以时延较小。

从图4(b)中得出, NBT 的网络负载随节点半径增大而基本不变,而 $NEBT$ 和 I^2NCBT 的网络负载随节点半径增大而减小。原因是 NBT 是基于 Epidemic 的转发机制,是一对一的复制,在节点总数不变时,网络负载也基本不变。 $NEBT$ 和 I^2NCBT 利用无线信道的广播特性广播数据,当通信半径增大时,通信范围内的邻居节点增多,极大地提高了广播效率,有效减少网络负载,其中 I^2NCBT 的机会编码性能也随邻居数增加而进一步提高。

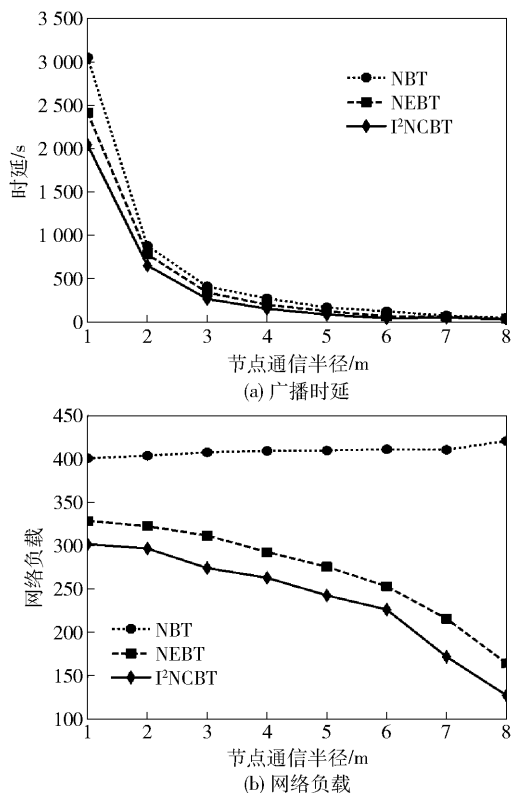


图4 通信半径对算法性能的影响

3) 参数 h 对广播性能的影响 ($N=50, r=4$ m)

算法 X_1 (X 代表 NBT 、 $NEBT$ 或 I^2NCBT) 中,当传感器节点接收到 m ($m=8$) 个不同编码包后不再接收新的编码包,算法 X_2 则无此限制。

由图5(a)可看出,随着 h 的增大,广播算法的时延都减小。因为 h 越大,网络中同一批次不同编码包数越多,传感器节点得到 8 个线性无关编码包的机会越大,时延越小。其中 X_2 类算法优于 X_1 类算法,原因是当节点能接收多于 8 的编码包时,加速了编码包传输。

图5(b)显示了参数 h 对网络负载的影响。 NBT_1 的网络负载受 h 影响不大,而 $NEBT_1$ 和 I^2NCBT_1 的网络负载随 h 的增加而减小。因为每个节点最终接收的数据包固定,网络中传输数据包总量也是固定的, NBT_1 是单播传输,所以网络负载基本不变,但是 h 增大,系统中不同编码包增多,传感器节点之间数据相异概率增大,广播和编码收益增加,因此 $NEBT_1$ 和 I^2NCBT_1 的网络负载减小。 X_2 类算法不限制节点接收数据包数,因此随 h 增大,节点在广播完成之前收到不同编码包数增多,导致网络负载增大。

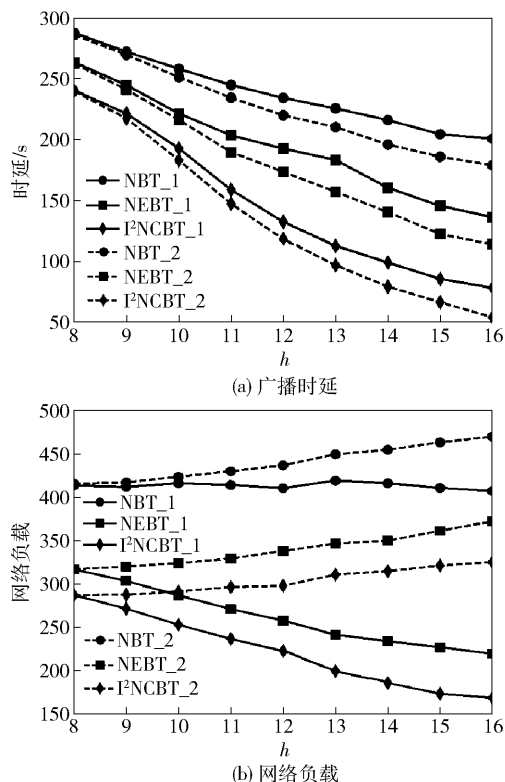


图5 参数 h 对算法性能的影响

3 结束语

面向 DTMSN 提出了 I^2NCBT 机制。在 I^2NCBT 中,汇聚节点利用 RLNC 处理广播数据,传感器节点之间利用 ONC 转发 RLNC 包,并基于二进制位运算

设计了高效 ONC 包构建算法. 理论分析和仿真实验证明, I²NCBT 不仅能减小网络负载而且进一步降低了广播时延. 下一步工作将建立数学模型, 分析广播性能和其他网络参数, 如节点密度、半径和移动速度等之间的关系.

参考文献:

- [1] Wang Yu, Dang Ha, Wu Hongyi. A survey on analytic studies of delay-tolerant mobile sensor networks [J]. *Wireless Communications & Mobile Computing*, 2010, 7 (10): 1197-1208.
- [2] Benhamida F Z, Bouabdellah A, Challal Y. Using delay tolerant network for the internet of things: opportunities and challenges [C] // 2017 International Conference on Information and Communication Systems (ICICS2017). Irbid-Jordan: IEEE Press, 2017: 252-257.
- [3] 邱慧敏, 杨义先, 钮心忻. 无线传感器网络中广播通信的安全协议设计[J]. *北京邮电大学学报*, 2006, 29 (5): 103-106.
Qiu Huimin, Yang Yixian, Niu Xinxin. Security protocol design about broadcast in wireless sensor network [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2006, 29 (5): 103-106.
- [4] Koushik CP, Vertrivelan P. Survey on opportunistic networks in delay tolerant mobile sensor networks [J]. *International Journal of Engineering & Technology*, 2016, 8 (1): 257-264.
- [5] Zhang X, Neglia G, Kurose J, et al. Performance modeling of epidemic routing [J]. *Computer Networks the International Journal of Computer & Telecommunications Networking*, 2007, 51 (10): 2867-2891.
- [6] 杨奎武, 郭渊博, 马骏, 等. 基于网络编码的延迟容忍移动传感器网络广播传输机制[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34 (5): 1239-1245.
Yang Kuiwu, Guo Yuanbo, Ma Jun, et al. A netcoding-based delay-sensitive broadcast transmission scheme for delay tolerant mobile sensor networks [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34 (5): 1239-1245.
- [7] 杨奎武, 郭渊博, 郑康锋, 等. 延迟容忍移动传感器网络高效广播数据传输机制[J]. *北京邮电大学学报*, 2013, 36 (1): 91-95.
Yang Kuiwu, Guo Yuanbo, Zheng Kangfeng, et al. An efficient broadcast transmission scheme for delay tolerant mobile sensor networks [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2013, 36 (1): 91-95.