

无线传感网络中空间失效模式下的数据存储恢复算法

徐路, 郑淑丽, 樊玉琦, 胡东辉

(合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽合肥 230009)

摘要:针对空间失效模式下的数据存储和恢复问题,设计了一种基于数据复制的存储和恢复算法.该算法为每个数据节点分配一个冗余节点,在数据节点失效时可以利用冗余节点中的数据来成功恢复数据,并且使整个过程消耗的代价最小.理论分析和仿真实验表明,同 Greedy 算法相比,在保证成功恢复的同时,该方法显著降低了网络的整体能耗,从而有效延长了网络的生存周期.

关键词:数据存储;节点失效;数据复制;数据恢复

中图分类号:TP393 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2011.10.015

Data storage and recovery algorithm under spatial failures pattern in wireless sensor networks

XU Lu, ZHENG Shuli, FAN Yuqi, HU Donghui

(School of Computer, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In accordance with data storage and recovery at a spatial failure pattern, a storage and recovery algorithm based on data replication was proposed. The algorithm assigns a redundant node for every data node, and it can recover data successfully from the redundant node when the data nodes fail and thus minimise the total cost. Compared with the Greedy algorithm, theoretical analysis and simulation results show that this method can not only reduce the total energy cost but also prolong the lifetime of networks for successful recovery.

Key words: data storage; node failure; data replication; data recovery

0 引言

无线传感器网络是一个以数据为中心的网络,数据的存储和查询问题一直是人们研究的热点问题^[1-3],根据感知数据存储策略的不同,数据节点在采集到用户感兴趣的数据以后可以分3种方式存储数据^[1]:集中式存储^[3-5]、本地存储^[3,5]和分布式存储^[6-7].

分布式存储是一种以数据为中心的存储策略,其核心思想是节点产生的感知数据不一定存储在本

地,而是利用分布式技术将数据存储在其他节点,并采用有效的信息中介机制来协调数据存储和数据访问之间的关系,保证数据访问请求能够被满足.但是无线传感器网络是基于微型传感器节点的网络,其特点是价格便宜、不可靠,导致了其通信计算及存储容量受到了很大限制,而且节点很容易由于种种原因失效(例如人为因素及自然灾害等).在分布式存储方式下当网络被攻击时可能造成被攻击范围内的全部节点失效,用来存储感知数据的节点和产生感知数据的节点可能在同一个攻击范围内,如何为数

收稿日期:2011-04-28;修回日期:2011-06-23

基金项目:安徽省自然科学基金(090412041,11040606M138)资助.

作者简介:徐路,男,1987年生,硕士生.研究方向:无线传感器网络. E-mail: xulu6568957@163.com

通讯作者:郑淑丽,副教授. E-mail: zsl251@163.com

据节点分配存储节点来保证在空间失效(空间失效概念在节 2 进行定义)发生时不会被同时摧毁,又要保证数据在存储过程中整个网络消耗的代价最低是本文要解决的问题。

本文主要贡献是将 Kuhn-Munkra 算法(以下简称 K-M 算法)用于解决无线传感器网络在空间失效时如何为数据节点分配存储节点的问题,以保证数据能够成功恢复并使整个网络消耗的代价最小。本文接下来的内容安排:节 1 介绍本文涉及的相关工作;节 2 对问题进行描述,包括网络模型、失效模式、通信代价;节 3 介绍基于 K-M 算法的数据恢复算法;节 4 展示了算法的模拟结果及对结果的分析;最后对本文进行了总结及展望。

1 相关工作

无线传感器网络可以看作一个大规模的分布式数据库,由于无线传感器网络与传统网络在节点数量、节点能量等方面存在很大不同,这就决定了传统网络的数据保存和恢复方法很难直接用于无线传感器网络。无线传感器网络存储和恢复算法中目前已有的研究工作分为两类:数据复制(data replication)方法和擦除码(erasur codes)方法。

(I) 数据复制方法原理^[10]

无线传感器网络中的每个数据节点在完成数据采集工作以后在自身保存一份数据,同时把数据复制到网络中的多个存储节点进行存储。在网络受到攻击时,可以利用基站从相应的存储节点中来恢复被摧毁节点中的数据。

(II) 擦除码方法原理

对原始数据进行分割得到 k 个子数据块,对 k 个子块数据块进行编码得到 $n(n > k)$ 个数据块。由于传输过程导致得到的数据块为 $k' \leq n$,但是只要 $k' \geq k$,解码机制就能够用其中任意 k 个子数据块对原始数据进行恢复。文献[8]提出了非集中式擦除码来完成恢复工作,该方法建立在有限域的基础上,每个数据节点通过 GPRS 等路由算法提前路由 $O(\log n)$ 个数据包到相应的存储节点,每个存储节点创建并存储其收到的所有数据包的代码字及有限域中的相关系数,对代码字进行线性组合,通过在二分图上构建编码矩阵来编码,为了解码数据,基站将数据取出构建解码矩阵并解一个系统级的线性方程。文献[9]将整个传感器网络划分为一个标准的虚拟四叉树,在每个子区域采用文献[8]中的方法来编

码和解码数据,先在树的叶子节点所在区域内解码数据,如果没有解码成功则向上一级区域递归查找,直到根节点所表示的整个网络。文献[10]提出了分布式存储算法 DSA,该算法的特点是在文献[8]的基础上先构建一个存储区域,把每个数据节点下方 $2R$ 处的 $2 \times \varphi$ 矩形区域作为存储区域,每个数据节点只在其对应划分的区域内给所有存储节点发送数据,每个存储节点存储收到的所有数据包的线性组合。文献[11]将非集中式喷泉码(DFC)应用于大规模无线传感器网络的数据保存问题中,初始时,每个节点从 robust soliton 分布中产生节点的编码度,接下来每个传感节点通过随机游走方式分发感知原数据块到网络中,在随机游走尽头的节点收到数据就存储在自身,在所有数据发送完后每个节点从接收到的原数据块中取出个数等于自身编码度的原数据块进行编码。

2 问题描述

本文主要工作是设计一个空间失效模式 P 下的数据存储恢复机制来保证数据的完整性,在数据被破坏后要恢复数据需要把数据备份到其他节点中存储来增加冗余性。空间失效模式下的数据存储恢复,要解决的关键问题是如何为每个数据节点 d_i 在对应的存储节点集合 $S(d_i)$ 中找到对应的存储节点 s_j ,数据节点 d_i 对应的存储节点集合 $S(d_i)$ 的匹配工作利用基站来完成。存储节点集合 $S(d_i)$ 要满足所有失效模式 P_i 发生时,数据节点 d_i 和存储节点集合 $S(d_i)$ 不会被同时摧毁,保证存在备份数据用来进行数据恢复。如图 1 所示,在该网络中数据节点 d_1 周围可能出现失效模式(圆)的 3 种情况,在给数据节点 d_1 查找存储节点集合 $S(d_1)$ 时,存储节点 $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6$ 在失效发生时可能和数据节点 d_1 同时被摧毁,这些节点就不可以放入存储节点集合 $S(d_1)$ 中。本文为每个数据节点 d_i 在对应的存储节点集合 $S(d_i)$ 中只匹配一个存储节点 s_j 。每个数据节点 d_i 和对应的存储节点 s_j 之间的通信代价总和要满足网络整体能耗最低。涉及的网络模型、空间失效、失效模式及通信代价的定义如下:

(I) 网络模型

在平面内随机部署的无线传感器网络中存在一个基站,可以出现在网络的任何地方,既可以查询存储节点的数据,也可以在节点失效时随时恢复数据。在网络中每个节点只能是数据节点或存储节点,不

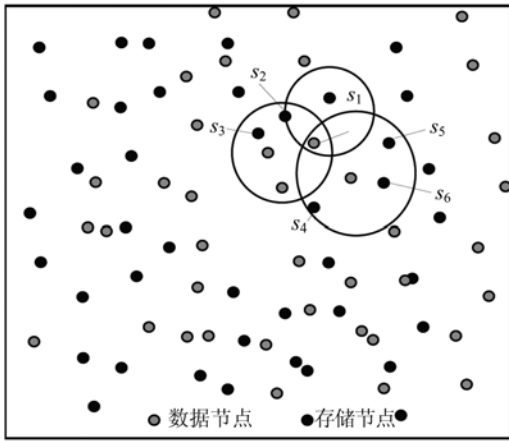


图 1 空间失效模式下的网络模型

Fig. 1 The network model under spatial failure pattern

能同时完成两方面的工作,每个数据节点用于产生用户感兴趣的数据,而存储节点用来存储数据节点产生的数据.考虑节点的廉价性,其存储空间是非常有限的,假设每个数据节点在完成一次工作后产生的数据大小正好与其存储空间大小相同,该数据节点保存自己产生的数据,同样令一个存储节点也只能存储一个数据节点在完成一次工作后产生的数据,在这种假设下数据节点就不需要去存储其他数据节点产生的数据,存储节点只能存储一个数据节点产生的数据.在该模型中每个数据节点知道自己的位置和与其临近的节点的坐标.

(II) 空间失效

当网络受到攻击时可能造成被攻击空间内的节点被摧毁,该空间内的所有节点都失效时,该空间相当于失效.

(III) 失效模式^[13]

二维平面内的几何图形,其所在位置和方向已知或未知,当失效发生时,在失效模式内的所有节点将同时失效.例如炸弹袭击,炸弹爆炸范围内的所有节点将同时被摧毁,此时炸弹爆炸范围可以认为是个几何圆形,这个几何圆形就可以被认为是一个失效模式.这样在给一个数据节点分配存储节点时就不能将数据节点和存储节点部署在同一个失效模式内,保证了数据节点和存储节点不会被同时摧毁,从而在失效发生后可以利用存储节点中存储的数据来恢复数据.

(IV) 通信代价

根据前面的假设,网络中存在基站能完成数据查询工作、在节点失效时随时恢复数据,因此在计算

无线传感器网络的通信代价时只要考虑数据节点把数据存储到存储节点时所消耗的代价,而不需要考查查询和恢复代价.

现在面临的问题是如何确定数据节点对应的存储节点,使数据在存储过程中网络消耗的总代价降低.代价主要是指数据从数据节点传输到存储节点所消耗的能量,因为在无线传感器网络中传感器节点运算所消耗的能量相对于数据传输过程中消耗的能量是微不足道的.数据的传输代价不仅与数据量有关,而且还与数据的存储策略有关,前者由数据速率决定,而后者由数据节点的位置、存储节点的位置决定.为了形象化地描述问题,做如下假设:

① 基站具有强大的计算能力而且不受能量限制,它通过分析网络可以知道数据速率、存储节点和数据节点的位置.网络中每个传感器节点的通信半径为 R ,网络中的 k 个数据节点和 n 个存储节点知道自己的地理位置坐标 (x_i, y_i) .

② 若节点 i 和 j 在相互通信的范围内,二者之间可以直接传输数据,传输 s 单位数据所消耗的能量为 $\alpha_r + s \times \delta_r$. 其中 α_r 为节点在准备发送数据时所消耗的能量, δ_r 为传输一个单位数据经过一跳路由时所消耗的能量.若节点 i 和 j 不能直接通信,可以借助其他节点形成多跳路由来传输数据,其传输路径长度记为 $D(i, j)$,这里的长度是指传输时的路由跳数.

基于上述讨论,在无线传感器网络中每个数据节点到每个存储节点的存储代价为 $C_{store} = \alpha_r + S \times \delta_r \times D(i, j)$. 其中 S 为数据节点存储到存储节点的总数据包大小, $D(i, j)$ 为节点 i 和 j 之间的路由跳数.

3 基于 K-M 算法的数据恢复算法

定义 3.1 二分图

设 $G=(V, E)$ 是一个无向图,如果顶点 V 可分割为两个互不相交的子集 (A, B) , 并且图中的每条边 (i, j) 所关联的两个顶点 i 和 j 分别属于这两个不同的顶点集 $(i \text{ in } A, j \text{ in } B)$, 则称图 G 为一个二分图(偶图).

利用基站完成数据节点 d_i 到存储集合 S_i 的匹配工作后,利用带权二分图来构建需要的网络模型.根据上面的假设,网络中的节点只能是数据节点或存储节点,因此数据节点集合 D 和存储节点集合 S 就满足了二分图定义要求的存在互不相交的子集.

用二分图中的节点代表传感器节点,数据节点 d_i 到对应的存储节点集合 $S(d_i)$ 中的每个存储节点 s_j 都有一个代价 $\text{Cost}(i, j)$, 对于失效模式中的所有失效情况, 若数据节点 d_i 和存储节点 s_j 在失效发生时都不在同一个失效模式内, 就在数据节点 d_i 和存储节点 s_j 之间建立一条带权边, 权值就是 d_i 和 s_j 之间的通信代价 $\text{Cost}(i, j)$.

由上面分析得到, 对于数据节点集合 D 中的每个数据节点 d_i , 对于给定的任何失效模式均可以求出对应的存储节点集合 $S(d_i)$, 在 S_i 中分别为每个数据节点 d_i 找一个存储节点 s_j , 使它们之间的通信代价之和 $\sum \text{Cost}(i, j)$ 最小.

本文采用 K-M 算法, 为每一个数据节点 d_i 在对应的存储节点集合 $S(d_i)$ 中找到一个存储节点 s_j , 使网络总体通信代价最小.

K-M 算法过程如下:

初始的时候, 令 $l(x_i) = \max_{c_{i,*}}, l(y_j) = 0$. 设二分图 $K_{m,n} = G$ 是具有正常顶标 l 的加权图, 取 G 的边子集 $E_l = \{e_{i,j} | e_{i,j} \in E(G), l(i) + l(j) = c_{i,j}\}$. 令 G_l 是以 E_l 为边集的生成子图, 如果有 G_l 完备匹配 M , 则 M 即为 G 的最佳匹配.

① 选定初始正常顶标 l , 构作图 G_l , 在 G_l 中用匈牙利算法求一个最大匹配.

② 若 X 饱和则结束, 此时所得匹配就是最佳匹配, 否则在 X 中任选一个非饱和点 x_0 , 令 $V_1 = \{x_0\}, V_2 = \{\}$.

③ 若 $N_{G_l}(V_1) = V_2$, 则取

$$\alpha = \min(l(x_i) + l(y_j) - c_{i,j}),$$

其中 $x_i \in V_1, y_j \in N_{G_l}(V_1) - V_2$, 使得

$$\left. \begin{aligned} l(v) &= l(v) - \alpha, v \in V_1; \\ l(v) &= l(v) + \alpha, v \in V_2; \\ l(v) &= l(v), \text{其他.} \end{aligned} \right\}$$

重新构作图 G_l , 在 $N_{G_l}(V_1) - V_2$ 任取一点 y , 转向步骤④.

否则在 $N_{G_l}(V_1) - V_2$ 任取一点 y , 转向步骤④

④ 若 y 已饱和, M 中必有 (y, z) , 作 $V_1 = V_1 \cup \{z\}, V_2 = V_2 \cup \{y\}$, 转步骤③; 否则求一条从 x_0 到 y 的可增广道路 P , 对之进行增广, 转步骤②.

通过上面的算法为每个数据节点在对应的存储节点集合中找到一个存储节点, 而且所有的代价之和总体最大. 由于 K-M 算法求出的是最大价值匹配, 只需要对原算法进行改动即可实现最小代价匹

配, 方法是把所有已求出的顶标取反再求最大价值匹配, 在求出最大价值匹配后只需要将该最大价值取反就可得到结果.

4 算法模拟及结果分析

为了评估文中所提出算法的性能, 对算法进行了模拟实验. 使用通信半径为 20 m 的传感器节点在 300 m × 300 m 的正方形区域内随机分布的拓扑进行仿真, 在该仿真环境中失效模式是一个几何图形圆. 仿真过程中通信总代价指把数据节点产生的数据存储到对应存储节点所要消耗的总代价. 仿真从影响网络整体能耗的各因素出发, 对 K-M 和 Greedy 算法进行比较. 其中 Greedy 算法每次为数据节点 d_i 分配存储节点时总是从对应的存储集合 $S(d_i)$ 中找到具有最小代价的存储节点 s_j 进行匹配, 在完成一次匹配后将存储节点 s_j 从各个数据节点对应的存储集合中移除, 其他节点的匹配在修改后的存储节点集合中进行, 直到所有数据节点完成匹配. 该算法的缺点是没有从总体考虑最优代价. 最后对本文提出的方法和基于擦除码的 DSA 方法^[8] 进行比较. 两者在存储和恢复策略上是两种不同的机制, 数据复制在存储和恢复上操作简单, 而擦除码利用有限的空间存储更多的数据. 本文只对两者的成功恢复率和通信总代价关系进行对比.

图 2 显示了 K-M 算法和 Greedy 算法在数据节点数目不同时网络的整体能耗对比, 仿真时取失效模式的失效半径为 40 m. 由图可见, 在整个网络中数据节点数和存储节点数之比为 1 : 1 时, K-M 算法在降低网络的整体能耗方面具有显著的优势, 而

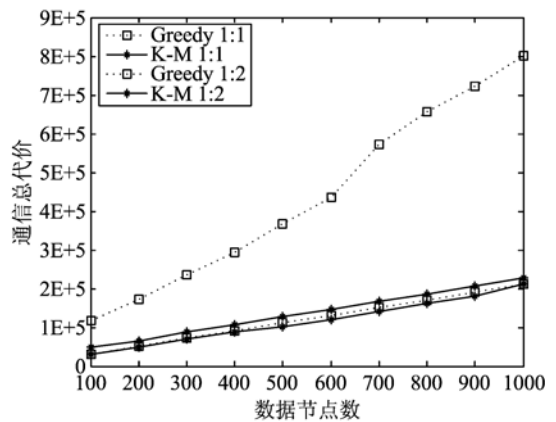


图 2 通信总代价和数据节点个数之间的关系
Fig. 2 The total communication cost vs the number of data nodes

当节点数之比为 1 : 2 时, K-M 算法虽然和 Greedy 算法性能方面很接近但仍然优越于 Greedy 算法.

图 3 从数据节点数与存储节点数比率来对比两种算法的性能, 验证了数据节点数分别为 100 和 200 时算法的性能. 随着存储节点数的增加, 网络的通信总代价在降低, 因此在部署网络时可以适当增加存储节点数来降低网络能耗. 从图中可以看出, 在数据节点数与存储节点数相同时, Greedy 算法性能非常低, 消耗的代价是 K-M 算法的 2 倍多; 随着存储节点数的增加, 两种算法都降低了网络能耗, K-M 算法变化趋势比较平缓, 而且 K-M 算法一直比 Greedy 算法消耗更少的代价.

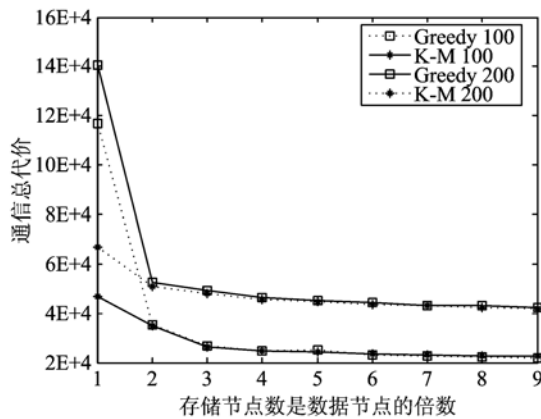


图 3 通信总代价和节点之间比率的关系
Fig. 3 The total communication cost vs the ratio of storage nodes to data nodes

图 4 展示了数据节点个数为 500 时通信总代价和失效半径之间的关系. 由图中的曲线变化趋势可得出, 失效半径越大, 所消耗的总代价越大. 数据节点与存储节点数量比为 1 : 1 时 K-M 算法消耗的网

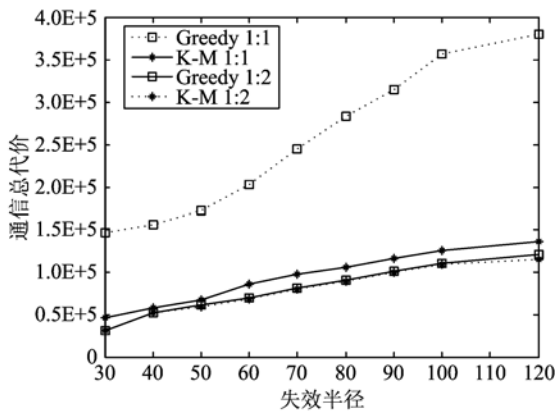


图 4 通信总代价和失效半径之间的关系
Fig. 4 The total communication cost vs the failure radius

络总能耗是 Greedy 算法的 33%, 明显优越于 Greedy 算法. 数据节点与存储节点数量比为 1 : 2 时, 两种算法的性能很接近, 性能很接近的原因是此时存储节点的个数是数据节点个数的 2 倍, Greedy 算法在迭代过程中有足够的候选存储节点来保证每次迭代的代价最优, 但每次的最优不等于整体的最优, K-M 算法仍优越于 Greedy 算法.

图 5 比较了 K-M 算法和 DSA 算法的成功恢复率和通信总代价之间的关系. K-M 算法是集中式算法, 每次都能成功恢复, 其消耗代价一直不变; 而 DSA 算法要想保证高的成功恢复率就必须为数据节点分配足够大的存储区域, 这就导致在数据分发阶段消耗更高的代价^[8]. 对成功恢复率要求较低时可以选择 DSA 算法, 要求高时选择 K-M 算法.

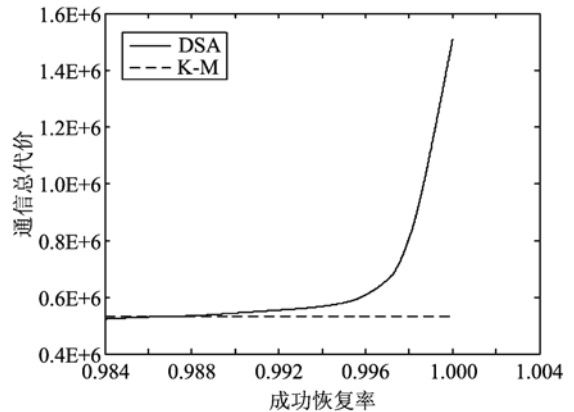


图 5 成功恢复率和通信代价之间的关系
Fig. 5 The total communication cost vs the successful recovery rate

通过仿真模拟影响网络能耗的各方面因素发现, K-M 算法始终比 Greedy 算法在降低网络能耗方面优越, 延长了网络的生命周期. 和 DSA 算法比较, 如果要求高的成功恢复率可以选择 K-M 算法.

5 结论

本文提出了具有空间失效模式的数据节点数据存储和恢复问题, 利用了 K-M 算法在每一个数据节点对应的存储节点集合中找到唯一的一个存储节点. 同 Greedy 算法相比, 该算法大大降低了整个网络所消耗的能量, 延长了整个网络的生命周期. 本文只为每个数据节点匹配一个存储节点, 在将来的工作中将研究为每个数据节点分配多个存储节点的方法.

参考文献(References)

- [1] Yu Zhaochun, Zhou Shuigeng, Guan Jihong. Data storage and access in wireless sensor networks: A survey[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(10): 2 001-2 010.
蔚赵春, 周水庚, 关信红. 无线传感器网络中数据存储与访问研究进展[J]. 电子学报, 2008, 36(10): 2 001-2 010.
- [2] Fu Xiong, Wang Ruchuan, Deng Song. An energy-efficient data storage method in wireless sensor network [J]. Journal of Computer Research and Development, 2009, 46(12): 2 111-2 116.
付雄, 王汝传, 邓松. 无线传感器网络中一种能量有效的数据存储方法[J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(12): 2 111-2 116.
- [3] Ratnasamy S, Karp B, Shenker S, et al. Data centric storage in sensornets with GHT, a geographic hash table [J]. Mobile Networks and Applications, 2003, 8(4): 427-442.
- [4] Shenker S, Ratnasamy S, Karp B, et al. Data centric storage in sensornets[J]. ACM SIGCOM- M Computer Communications Review, 2003, 33(1): 137-142.
- [5] Intanagonwivat C, Govindan R, Estrin D, et al. Directed diffusion for wireless sensor network- rking [J]. IEEE/ ACM Transactions on Networking, 2003, 11(1): 2-16.
- [6] Gil T M, Madden S. Scoop: An adaptive indexing scheme for stored data in sensor networks [C]// Proceedings of IEEE 23rd International Conference on Data Engineering. New York: IEEE, 2007: 1 320-1 324.
- [7] Sarkar R, Zhu X, Gao J. Double rulings for information brokerage in sensor networks [C]// Proceedings of ACM MOBICOM. New York: Assoc Computing Machinery, 2006:286-297.
- [8] Dimakis A G, Prabhakaran V, Ramchandran K. Decentralized erasure codes for distributed networked storage [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(6): 2 809-2 816.
- [9] Lin Yunfeng, Liang Ben, Li Baochun. Geometric random linear codes in sensor networks [C]// Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Communications. New York: IEEE, 2008: 2 298-2 303.
- [10] Azimi N H, Hou X, Gupta H, et al. Data preservation under spatial failure in sensor networks [C]// Proceedings of the Eleventh ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. Chicago, 2010:171-180.
- [11] Lin Yunfeng, Liang Ben, Li Baochun. Data persistence in large-scale sensor networks with decentralized fountain codes [C]//Proceedings of the 26th IEEE Conference on Computer Communications. New York: IEEE, 2007: 1 658-1 666.