

空间信息网络中基于 LT 码的分布式存储策略

孔 博^① 张更新^{*①} 张 威^① 程 磊^②

^①(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

^②(解放军国防信息学院 武汉 430015)

摘 要: 针对空间信息网络(Space Information Network, SIN)节点存储资源严重受限及存储可靠性问题, 该文提出一种基于 LT(Luby Transform)码的分布式存储策略(Distributed Storage Strategy based on LT codes, DSSLT)。采用定向随机漫步机制, 使得源数据包能够更快地遍历整个网络。在信息估计阶段利用基于 ID 的估计方法进行网络全局信息估计, 使所有节点快速获得网络全局信息。合理的数据包选择机制使得最终编码度分布趋于期望的度分布。分析和仿真结果表明, 与具有代表性的分布式存储策略相比, 该方法大幅度减少了数据包传输时的随机漫步步长, 同时提高了译码性能, 简单易行。

关键词: 空间信息网络; 分布式存储; 喷泉码; LT 码

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)04-0787-08

DOI: 10.11999/JEIT150674

Distributed Storage Strategy Based on LT Codes in Space Information Network

KONG Bo^① ZHANG Gengxin^① ZHANG Wei^① CHENG Lei^②

^①(College of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

^②(PLA Academy of National Defense Information, Wuhan 430015, China)

Abstract: To solve the limited storage resource and the data storage reliability problem of Space Information Network (SIN), a novel Distributed Storage Strategy based on Luby Transform (LT) codes (DSSLT) is proposed. According to the proposed strategy, source data packets are transmitted quickly to every node in the network based on directional random walk. The ID-based estimation method is used to estimate the global information at the information estimation phase, the values are obtained without excessive random walks. The procedure of XORing packets is reasonable so that the distribution of code degree tends to the desired degree distribution. As presented by the analyses and simulations, random walk steps are greatly reduced compared with a representative distributed storage strategy, while improving the decoding performance.

Key words: Space Information Network (SIN); Distributed storage; Fountain codes; Luby Transform (LT) codes

1 引言

纵观世界范围内, 各类卫星通信系统针对不同的任务需求和服务对象构建, 缺乏一般性、通用性和协作的能力, 存在重复建设、“烟囱式”发展的不利局面, 空间信息网络(Space Information Network, SIN)概念的提出为解决上述问题提供了有效途径^[1]。空间信息网络是以多种空间平台为载体, 通过多种形式的链路一体化组网设计, 支持海量数据的

实时采集、传输和处理, 实现空间信息体系化应用的网络系统。相比传统卫星网络, 空间信息网络具有体系结构复杂、拓扑动态变化和自组织程度高等特征, 网络某一局部范围内组网应用方式、拓扑结构的变化都会影响到全网的状态。结合未来空间信息网络发展趋势, 按照节点属性将空间信息网络划分为一系列由相似类型节点组成的自治域(Autonomous System, AS), 将整体上是高动态变化的空间信息网解耦为局部具有弱动态性变化的准静态子网^[2], 从而将整网控制的问题简单化。

当前, 空间信息系统所产生的数据信息呈指数级增长, 根据 UCS (Union of Concerned Scientists) 卫星数据库预测, 2020 年数据总量将是 2010 年的 44 倍^[3]。而空间信息网络节点资源严重受限, 无法

收稿日期: 2015-05-15; 改回日期: 2015-12-08; 网络出版: 2016-02-18

*通信作者: 张更新 kbvx_123@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(91338201, 91438109, 61401507, 61571464)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (91338201, 91438109, 61401507, 61571464)

存储大量数据,当节点失效或传输节点双方长时间不可见时,会带来数据丢失问题。因此,如何有效地存储数据是空间信息网络面临的一个巨大挑战。将存储技术和网络技术相结合,即“分布式存储”是一种行之有效的解决方案,它通过网络通信技术连接分散的存储节点,构建持久、高可用的冗余存储空间,存储海量数据^[4]。数据冗余方法可分为两类:基于复制冗余策略和基于编码冗余策略。复制冗余策略易于实现,但会消耗大量的存储空间,不适用于节点存储能力有限,以及规模较大的网络。在基于编码冗余策略如纠删码冗余策略^[5]中,先将源文件进行分块编码,网络中单个存储节点只存储部分编码块,从而减少存储开销,目的节点可通过接收一定数量的冗余数据来恢复原始数据。针对纠删码修复失效节点时需下载全部原始数据,导致修复带宽过大的问题,文献[6]将网络编码的思想引入修复过程,提出再生码^[7]概念,优化了修复失效节点的带宽消耗。作为一类重要的编码方案,喷泉码^[8]具有无码率特性,且编译码复杂度低。LT (Luby Transform) 码^[9]是一种具有实用性的喷泉码,也是使用最广泛的喷泉码,非常适合应用于分布式存储网络中。

文献[10]提出将分布式喷泉码用于无线传感器网络,使用简单随机漫步(Simple Random Walk, SRW)^[11]来传输数据包,每个存储节点根据节点总数 n 和数据包数 k ,利用 Metropolis 算法计算随机漫步步长,使得所有数据包达到稳态分布,提高数据的持久性,其编解码过程类似集中式 LT 码。该方案需要已知网络全局信息(n, k 等),并且需要计算节点概率转移矩阵,复杂度较大。文献[12]利用监听机制来传输数据包,优先选择没有转发过某数据包的邻居节点进行传输,提高了数据包传递效率,但需要已知存储节点数 n ,且每个节点需要维护一个缓存队列,大大增加了存储量。与本文工作类似的是文献[13]提出的 LTCDS (LT-Codes based Distributed Storage)策略, LTCDS 利用简单随机漫步的时间统计特性来估计网络全局信息(n, k),但估计时需要大幅增加随机漫步步长(实际步长 10 倍以上),增加了通信损耗,同时简单随机漫步会对局部簇产生影响,即数据包集中在某一区域进行重复地传输。

本文以空间信息网络自治域内信息存储为背景,以提高能量效率和可靠性为目标,提出了一种基于 LT 码的分布式数据存储策略(Distributed Storage Strategy based on LT codes, DSSLT),采用定向随机漫步(Directional Random Walk, DRW)机制来传输数据包;在信息估计阶段,利用基于 ID

估计法来估计网络全局信息(n, k),减少了数据包遍历自治域所需传输次数;合理的数据包选择机制使得编码度分布趋于期望的度分布。理论分析和仿真表明,与具有代表性的 LTCDS 策略相比, DSSLT 策略能改进传输效率,同时提高译码成功率。

2 网络模型与问题描述

空间信息网络包含卫星、升空平台、传感器、用户等多种异构节点,其任务、功能、地位和分布空间具有明显的差异。结合未来空间信息网络节点种类多、立体多层分布、动态差异性大等特征,根据节点属性将空间信息网络划分为一系列自治域,如图 1 所示。每个自治域采用独立的控制策略,不同自治域之间通过边界节点实现控制信息的交换,从而将整体上是高动态变化的空间信息网络划分为一个个局部具有弱动态性变化的子网络,解决了子网间动态耦合性和整网可控性的问题。

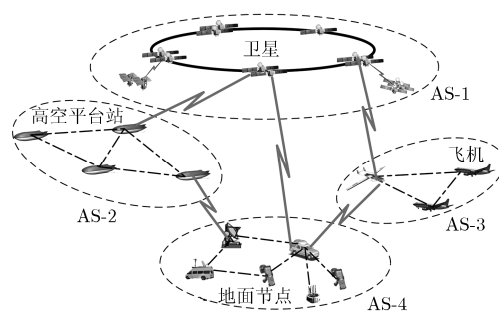


图1 空间信息网络分层自治域划分

本文研究自治域内信息分布式存储问题。假设某自治域由 n 个随机分布的同构节点组成,节点根据其属性被赋予一个唯一的 ID,任选其中 k 个节点作为数据节点,用来产生原始数据,如图 2 所示。不失一般性,假设节点 ID 为 $ID_i = \{i | 1 \leq i \leq n\}$,且 $ID_k = \{i | 1 \leq i \leq k\}$ 节点为数据节点。每个节点具有相同的通信半径,记为 r ,距离小于通信半径的两个节点能够相互交换信息,称为邻居节点。存储过程中,数据包利用随机漫步机制遍历自治域内每个节点,节点按照 LT 码的度分布函数选择一定数量的数据包异或并存储,当某用户节点需要原始数据时,可通过查询通信范围内若干个存储节点,译码恢复所有原始数据。

假设 1 所有节点均相同,节点未知网络全局信息(n, k),只存储通信范围内邻居节点信息。

假设 2 节点存储能力有限,只存储一个大小固定的数据包。

假设 3 自治域是连通的,任意 2 个节点能直

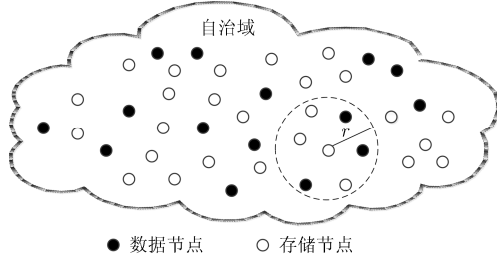


图2 自治域模型

接或间接通信，且所有的链路是对称和不受遮挡的。

定义 1(节点的度) 用图 $G = (V, E)$ 表示一个通信半径为 r 的自治域内的拓扑结构，其中 $V = \{1, 2, \dots, n\}$ 表示节点的集合， $E = \{(i, j) | r(i, j) \leq r\}$ 表示链路的集合， $r(i, j)$ 表示节点 i 和 j 之间的距离。用 $N(u)$ 表示节点 u 的邻居节点的集合，节点 u 邻居节点的个数定义为节点的度，用 $d_n(u)$ 表示，即 $d_n(u) = |N(u)|$ 。

文献[11]证明，对于图 $G = (V, E)$ ，若通信半径 r 满足：

$$r \geq \left(\frac{b \ln n}{\pi n} \right)^{1/2} \quad (1)$$

那么可以以极大的概率保证图 $G = (V, E)$ 是连通的，其中 b 为大于1的常数。

定义 2 随机漫步(RW)定义为按某一随机序列访问随机图节点的过程，在随机漫步中，下一步要访问的节点是从当前访问节点的邻居节点中选取的；若该选取过程是从所有邻居节点中等概率随机选取，则该随机漫步称为简单随机漫步(SRW)。

定义 3 定向随机漫步(DRW)^[14]定义为按如下两步选取下一步访问节点的过程：

步骤 1 从当前节点 u 中随机均匀地选择2个节点作为备选节点，用 $N'(u)$ 表示；

步骤 2 从 $N'(u)$ 中选择满足式(2)的节点 v 作为下一步访问节点：

$$\frac{c(v)}{d_n(v)} \approx \min_{v' \in N'} \left(\frac{c(v')}{d_n(v')} \right) \quad (2)$$

其中 $c(v)$ 表示该定向随机漫步已访问节点 v 的次数， $d_n(v)$ 表示节点 v 的度。

相比简单随机漫步，定向随机漫步需要记录所有节点的访问次数，且每一步需要在2个备选节点之间进行选择，这会消耗额外的内存和通信能耗。但在LTCDs策略以及下节给出的DSSLT策略中，编码过程中都需要记录节点访问次数，这为采用定向随机漫步机制提供了便利条件。且文献[14]证明，定向随机漫步能够平均化漫步过程中所有节点的访问次数，实现网络内节点的负载均衡，减少系统资源消

耗，从而增加系统可用性。因此，本文采用定向随机漫步机制来传输数据包。

3 DSSLT 策略

3.1 LT 码

喷泉码是一种无速率码，编码器可以按照某种概率分布独立地产生任意数量的码字，具有码率不受限的特征。LT 码是第 1 种具有实用性的喷泉码，被广泛应用在无线多媒体、文件分发、卫星广播等领域^[15]。在 LT 码中，每个编码包由随机选取的原始数据包异或而成，编码包中所包含的原始数据包的个数称为该编码包的度，用 $d_c(i)$ 表示，根据度分布函数得到^[6]。

度分布函数是影响 LT 码性能的关键，好的度分布函数能够尽可能地恢复所有的原始数据包，且拥有较低的译码复杂度。最初，文献[9]提出了理想孤立子分布(Ideal Soliton Distribution, ISD)，如式(3)：

$$\left. \begin{aligned} \Omega_{\text{ISD}}(1) &= \frac{1}{k} \\ \Omega_{\text{ISD}}(d) &= \frac{1}{d(d-1)}, \quad d = 2, 3, \dots, k \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ISD 译码开销很小，但是成功译码所需编码包的数目远远大于 k 。文献[9]通过增加预处理集的初始大小来减小译码失败的概率，给出了鲁棒孤立子分布(Robust Soliton Distribution, RSD)。如式(4)：

$$\Omega_{\text{RSD}}(d) = \frac{\Omega_{\text{ISD}}(d) + \tau(d)}{\sum_{d=1}^k (\Omega_{\text{ISD}}(d) + \tau(d))}, \quad d = 1, 2, \dots, k \quad (4)$$

其中 $c > 0$ ， $\delta \in (0, 1]$ 。令 $R = c \cdot \ln(k/\delta) \sqrt{k}$ ， $\tau(d)$ 可以表示为

$$\tau(d) = \begin{cases} R/dk, & 1 \leq d \leq (k/R - 1) \\ R \ln(R/\delta)/k, & d = k/R \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

文献[9]证明，对任意 $\delta \in (0, 1]$ ，LT 码能以概率 $1 - \delta$ 从 $k + O(\sqrt{k} \ln^2(k/\delta))$ 个编码包中恢复出 k 个原始数据包，复杂度为 $O(k \ln(k/\delta))$ 。

3.2 DSSLT 策略

本节给出DSSLT策略具体方案，在DSSLT中，数据包采用定向随机漫步机制在自治域内传输，随机漫步步长上界为 q ， q 包括两部分： t 和 T ，其中 t 能够保证每个节点正确估计网络全局信息 (n, k) ， T 使得数据包在编码阶段至少遍历自治域内所有节点一次。在随机漫步开始前，在每个数据包包头增加一个初始值为0的计数器，该数据包每访问一个节点，计数器值加1，当计数器的值为 q 时，随机漫步

结束。节点利用基于ID估计法来估计全局信息。DSSLT策略的实施分为4个阶段:初始化、信息估计、编码及存储阶段。

3.2.1 初始化阶段

步骤 1 每个数据节点 $s_i, i = 1, 2, \dots, k$ 产生一个源数据包 x_i , 增加包头信息, 格式为

$$P_i = [Ek_i, En_i, T_i, t_i, U_i, ID_i, x_i]$$

其中 x_i 为数据节点 s_i 产生的源数据包, ID_i 为数据节点 s_i 的ID号, t_i 为全局信息估计阶段数据包漫步步长上界, T_i 为编码阶段数据包漫步步长(t_i 及 T_i 取值将在后面说明), U_i 为计数器, 用来记录随机漫步已访问的节点个数, Ek_i 和 En_i 分别为数据节点 k 和自治域内总节点 n 的估值, Ek_i 的初始值为数据节点 s_i 的ID, En_i 的初始值为节点 s_i 的度、节点 s_i 的邻居节点ID的最大值、节点 s_i 的ID 3个值中的最大值, 即

$$En_i = \max \left(d_n(s_i), \max_{v \in N(s_i)} ID_v, ID_{s_i} \right)$$

步骤 2 每个存储节点 $i, i = 1, 2, \dots, n$ 产生 k 和 n 的初始估值 k'_i 和 n'_i , k'_i 初值为0, n'_i 初值为节点 i 的度、节点 i 的邻居节点ID的最大值、节点 i 的ID 3个值中的最大值, 即

$$n'_i = \max \left(d_n(i), \max_{v \in N(i)} ID_v, ID_i \right)$$

步骤 3 每个存储节点 $i, i = 1, 2, \dots, n$ 初始化存储数据包 Y_i 的值, 令 $Y_i = 0, i = 1, 2, \dots, n$;

步骤 4 根据定向随机漫步机制, 每个数据节点选择邻居节点发送数据。

3.2.2 信息估计阶段 在信息估计阶段, 数据包根据定向随机漫步机制在自治域内进行传输, 与 LTCDS策略利用随机漫步的时间统计特性估计全局信息不同, 本文提出一种简单高效的基于ID估计法, 使得所有存储节点能够准确快速估计 k 和 n 。具体步骤如下:

步骤 1 存储节点 $i, i = 1, 2, \dots, n$ 每接收到一个数据包 P_e , 更新全局信息 k 和 n (用 $\tilde{k}$ 和 $\tilde{n}$ 表示), 若是第1次接收该数据包, 则 k'_i 加1, 令 $\tilde{k}'_i = \max(k'_i, Ek_e)$, $\tilde{n}_i = \max(n'_i, En_e)$;

步骤 2 根据 $\tilde{k}$ 和 $\tilde{n}$ 更新包头信息, 使 $Ek_e = \tilde{k}_i$, $En_e = \tilde{n}_i$, 且 $U_e = U_e + 1$;

步骤 3 根据定向随机漫步机制, 选择某个邻居节点发送数据;

步骤 4 $U_e = t_e (e = 1, 2, \dots, k)$, 信息估计阶段结束。

3.2.3 编码阶段 信息估计阶段结束后, 存储节点已知 k 和 n 。在编码阶段, 数据包根据定向随机漫步机制在自治域内进行传输, 漫步步长由 T 决定。每

个存储节点对所有接收到的数据包 $P_s, s = 1, 2, \dots, k$ 进行概率选择, 更新存储数据包 Y_i 。在编码阶段开始之前, 将每个数据包的计数器置零, 令 $S(i)$ 表示节点 i 异或的原始数据包集合, 且 $ns(i) = |S(i)|$ 。具体步骤如下:

步骤 1 存储节点 $i, i = 1, 2, \dots, n$ 根据 k 及度分布函数 Ω (本文选择RSD分布)产生编码度分布 $d_c(i)$;

步骤 2 若 $ns(i) < d_c(i)$, 且 $P_s \notin S(i)$, 即节点 i 之前未异或数据包 P_s , 则以概率 $d_c(i)/k$ 更新自己数据包, 即 $Y_i = Y_i \oplus x_s$ 。在LTCDS策略中, 节点只在数据包第1次到达时进行判断异或, 可能导致节点无法异或满足度分布条件的数据包;

步骤 3 无论是否异或数据包 P_s , 令 $U_s = U_s + 1$;

步骤 4 根据定向随机漫步机制, 选择某个邻居节点发送数据;

步骤 5 $U_s = T_s (s = 1, 2, \dots, k)$, 编码阶段结束。

3.2.4 存储阶段 在编码阶段, 每个数据包至少遍历自治域内所有存储节点一次, 存储节点在选择异或所有数据包之后, 在存储阶段存储更新之后的数据包 Y_i 。

DSSLT策略伪代码如表1所示。

4 性能分析

4.1 随机漫步步长

由3.2小节可知, 随机漫步步长由两部分组成: 信息估计阶段和编码阶段, 即 $q = t + T$, 其中 t 使得所有存储节点在信息估计阶段能够正确估计网络全局信息(k 和 n), T 使得数据包在编码阶段至少遍历自治域内所有节点一次。 t 的取值在下节通过仿真说明, 本节分析遍历所有节点所需步长 T 。

定义 4(覆盖时间) 对于一个连通图 $G=(V, E)$, T 表示随机漫步步数, 该随机漫步访问图中不同节点的个数占总节点个数的比, 称为该随机漫步对图的覆盖率, 用 $C_t(T)$ 表示, 如果一次随机漫步能够访问图中所有的节点, 即 $C_t(T) = 100\%$, 此时随机漫步的平均步数称为覆盖时间^[16], 用 $T_c(G)$ 表示。

文献[16]证明, 对于一个连通图 $G=(V, E)$, $T_c(G)$ 可以表示为

$$T_c(G) = \Theta(n \ln n) \quad (6)$$

即当 $T = \Theta(n \ln n)$ 时, $C_t(T) \approx 100\%$ 。

4.2 译码成功概率

译码成功概率等于每个节点满足其编码度分布的概率, 假设数据包 j 在某次随机漫步中已访问节点 u 的次数为 $c_j(u)$, 则节点 u 未异或数据包 j 的概

表1 DSSLT 策略伪代码

算法: DSSLT
输入: 源数据包 $x_i, i = 1, 2, \dots, k$, 常数 C_1, C_2
输出: 存储数据包 $Y_i, i = 1, 2, \dots, n$
开始:
 /*初始化阶段*/
for 所有数据节点 $s_i, i = 1, 2, \dots, k$ **do**
 $P_i = [\text{Ek}_i, \text{En}_i, T_i, t_i, U_i, \text{ID}_i, x_i]$
end
for 所有存储节点 $i, i = 1, 2, \dots, n$ **do**
 $Y_i = 0;$
 $k'_i = 0;$
 $n'_i = \max \left(d_n(i), \max_{v \in N(i)} \text{ID}_v, \text{ID}_i \right);$
end
 /*信息估计阶段*/
while ($U_e \leq t_e$) **do**
 for 数据包 P_e 访问的所有节点 $u, u = 1, 2, \dots, n$ **do**
 $c_e(u) = c_e(u) + 1;$
 if u 第1次收到 P_e **then**
 $k'_u = k'_u + 1;$
 end
 $\tilde{k}_u = \max(k'_u, \text{Ek}_e);$
 $\tilde{n}_u = \max(n'_u, \text{En}_e);$
 $t_e = C_1 \times (\text{En}_e) \times \ln(\text{En}_e);$
 $U_e = U_e + 1;$
 选择 $v \in N(u)$, 传输 P_e ;
 end
end
 /*编码阶段*/
for 所有存储包 $P_s, s = 1, 2, \dots, k$ **do**
 $c_s = 0;$
end
for 所有存储节点 $i, i = 1, 2, \dots, n$ **do**
 $d_c(i) \leftarrow k$ 和 $\Omega_{\text{RSD}};$
end
while ($U_s \leq T_s$) **do**
 for 数据包 P_s 访问的所有节点 $u, u = 1, 2, \dots, n$ **do**
 $c_s(u) = c_s(u) + 1;$
 if $\text{ns}(u) < d_c(u)$ & $P_s \notin S(u)$ **then**
 $\text{coin} = \text{rand}(1);$
 if $\text{coin} \leq d_c(u) / k$ **then**
 $Y_u = Y_u \oplus x_s;$
 end
 end
 $U_s = U_s + 1;$
 选择 $v \in N(u)$, 传输 P_s ;
 end
end
 /*存储阶段*/
for 所有存储节点 $i, i = 1, 2, \dots, n$ **do**
 return $Y_i;$
end

率为

$$P_j^R(u) = \prod_{i=1}^{c_j(u)} \left(1 - \frac{d_c(u)}{k} \times \text{sgn}(d_c(u) - \text{ns}_i(u)) \right) \quad (7)$$

其中, i 表示数据包 j 访问节点 u 的次数, sgn 函数定义为

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

sgn 函数的目的是使得节点异或编码数据包的个数不超过度分布 $d_c(u)$ 。若放松该限制, 则

$$P_j^R(u) = \prod_{c_j(u)} \left(1 - \frac{d_c(u)}{k} \right) = \left(1 - \frac{d_c(u)}{k} \right)^{c_j(u)} \quad (9)$$

则节点 u 异或数据包 j 的概率为

$$P_j^A(u) = 1 - P_j^R(u) = 1 - \left(1 - \frac{d_c(u)}{k} \right)^{c_j(u)} \quad (10)$$

在DSSLT策略中, 数据包之间独立进行随机漫步, 则在随机漫步结束时, 节点 u 异或的数据包个数等于期望度分布的概率为

$$\begin{aligned} \Pr(\text{ns}(u) = d_c(u)) &= \Omega(d) \times \prod_{i=1}^{d_c(u)} P_j^A(u) \\ &= \Omega(d) \times \prod_{i=1}^{d_c(u)} \left(1 - \left(1 - \frac{d_c(u)}{k} \right)^{c_{j_i}(u)} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

其中 Ω 为DSSLT策略中所采用的度分布函数(本文选择RSD分布), $i = 1, 2, \dots, d_c(u)$ 为节点 u 异或的编码包, 令 t 为随机漫步步长, 忽略转移时间的影响, 随机漫步结束之后, 数据包 j 访问节点 u 次数的期望值为

$$E[c_j(u)] = t \times d_c(u) / \sum d = t \times d_c(u) / \sum_{v=1}^n d(v) \quad (12)$$

其中 $\sum d = \sum_{v=1}^n d(v)$ 表示自治域内所有节点异或的编码包个数, 将式(12)代入式(11)得

$$\begin{aligned} \Pr(\text{ns}(u) = d_c(u)) &= \Omega(d) \times \left(\frac{k}{d_c(u)} \right) \\ &\times \left[1 - \left(1 - \frac{d_c(u)}{k} \right)^{t \times \frac{d_c(u)}{\sum d}} \right]^{d_c(u)} \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)表示节点 u 满足度 $d_c(u)$ 的概率, 但放松了满足 $d_c(u)$ 后不能继续接收其它数据包的限制, 在节点 u 异或数据包的个数少于 $d_c(u)$ 时, 该限制无影响, 因此式(13)为节点 u 异或 $d_c(u)$ 个数据包的概率上界。

5 仿真结果

为了验证DSSLT策略的性能, 我们通过蒙特卡洛仿真, 从3个方面对其进行仿真分析, 首先测试覆

盖率与随机漫步步长之间的关系,称为数据包覆盖实验;其次测试全局信息估计性能与随机漫步步长的关系,称为全局信息估计实验;最后测试成功译码概率与访问节点个数之间的关系,称为数据包恢复实验。在仿真过程中, n 个节点均匀随机分布在 $A = 2000 \times 2000 \text{ km}^2$ 的区域中,其中数据节点的比例为10%,即 $k = 0.1n$,自治域内每个节点的通信半径 r 满足条件 $r^2 = 3A \ln n / (\pi n) \text{ km}$ 。

5.1 数据包覆盖实验

数据包采用随机漫步的方式在自治域内传输,根据式(6),当随机漫步的步数 $T = C_1 n \ln n$ 时,数据包以能够极大的概率遍历网络中每个节点,覆盖率近似达到100%。数据包遍历整个自治域步长越小,网络通信能耗就越小。我们比较简单随机漫步和定向随机漫步对数据包覆盖性能的影响,仿真次数为500次。

图3所示为 n 分别取100和300,即不同网络规模时 k 个数据包覆盖率的平均值与随机漫步步长参数 C_1 的关系,可以看出,数据包覆盖率随着参数 C_1 的增大而增大,并且逐渐稳定,此时覆盖率达到100%。采用定向随机漫步时,数据包覆盖率与理论值近似相等,且当 $C_1 > 2.0$ 时,所有数据包均覆盖整个自治域,而采用简单随机漫步时,数据包平均覆盖率远小于理论值,当 $C_1 > 4.5$ 时,才能覆盖整个自治域。因此采用定向随机漫步可以减少数据包覆盖自治域的传输次数,这对资源严重受限的空间信息网络来说通信能耗降低是明显的。

5.2 全局信息估计实验

在全局信息估计实验中,比较分别采用基于ID估计法和LTCDS策略中的估计法时,自治域内所有存储节点正确估计自治域全局信息 k 和 n 时,定向随机漫步所需步长 t ,蒙特卡洛仿真次数为500次。作为比较,给出采用简单随机漫步时全局信息估计性能。

表2所示为 n 分别取100和300,即不同网络规

表2 全局信息估计实验所需随机漫步步长

网络规模	估计方法	定向随机漫步		简单随机漫步	
		估计 k 值	估计 n 值	估计 k 值	估计 n 值
$n=100,$ $k=10$	ID估计法	8.44	23.90	11.04	60.40
	LTCDS 估计法	20.54	456.30	44.59	1752.60
$n=300,$ $k=30$	ID估计法	78.76	145.23	130.20	188.60
	LTCDS 估计法	249.05	1482.50	582.47	4790.60

模条件下,节点正确估计全局信息 k 和 n 时所需随机漫步步长的平均值。可以看出,相比简单随机漫步,定向随机漫步在估计全局信息时数据包漫步步长大幅减少,以估计 n 值为例,当 $n=100$ 时,采用LTCDS估计策略时,简单随机漫步平均需要传输1800次左右,而定向随机漫步每个节点仅需要传输500次以下,这在一定程度上体现了定向随机漫步的优势。在估计全局信息时,与LTCDS策略估计相比,采用基于ID估计法时数据包漫步步长大幅减少。以估计 k 值为例,当 $n=100$ 时,采用定向随机漫步,基于ID估计法平均需要传输10次以下,而采用LTCDS策略需要传输20次左右,在网络规模增大($n=300$)时优势更加明显,因此采用基于ID估计法减少了数据包传输次数,使得自治域内所有存储节点可以更快速地获得网络全局信息(k 和 n),在一定程度上减少了通信损耗。令 $t = C_2 n \ln n$,可以看出,当 $n=100$ 时, $C_2 \geq 1$ 可以保证所有节点正确估计全局信息 k 和 n 。

比较整个传输过程中数据包随机漫步步长,即 $q = T + t = C_1 n \ln n + C_2 n \ln n = C_3 n \ln n$,由实验1和实验2可知采用定向随机漫步时, $C_3 \geq 3$ 能够同时满足两个阶段要求。而在LTCDS策略中,采用简单随机漫步时, $C_3 \approx 55$,由表2可知LTCDS策略采用定向随机漫步机制时需 $C_3 \geq 15$ 。

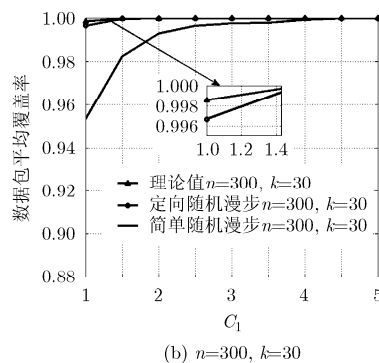
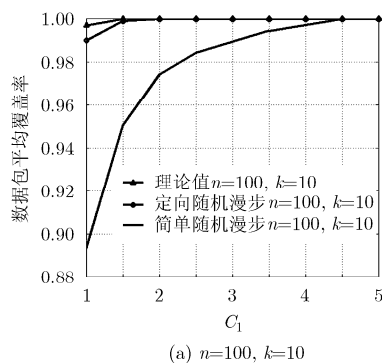


图3 数据包覆盖实验

5.3 数据包恢复实验

在数据包恢复实验中，我们通过仿真来比较 DSSLT 策略与 LTCDS 策略性能。比较成功译码概率 P_s 与数据包查询比率 η 之间的关系，与 LTCDS 策略相同，成功译码概率 $\Pr$ 定义为在 M 次试验中，所有 k 个数据包成功恢复的次数 M_s 所占的比例，即 $\Pr = M_s / M$ ；数据包查询比率 η 定义为查询节点数 h 与数据节点 k 之间的比值，即 $\eta = h / k$ 。在仿真中，数据包采用定向随机漫步进行传输，存储节点采用基于 ID 法估计全局信息。令 $C_1 = 2$ ， $C_2 = 1$ ，即 $C_3 = 3$ ，蒙特卡洛仿真次数为 500 次，即 $M = 500$ 。

图 4 所示为 $n = 100, k = 10$ 时，DSSLT 策略与 LTCDS 策略成功译码概率 P_s 与数据包查询比率 η 之间的关系。可以看出，当 $\eta \leq 2.2$ 时，DSSLT 策略性能优于 LTCDS 策略，随着 η 的增大，两种策略成功译码概率 P_s 都呈上升趋势，并最终趋于平稳。图 5 所示为 DSSLT 策略最终编码度分布情况，可以看

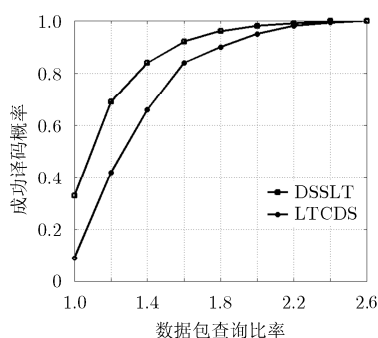


图 4 数据包恢复性能

出其最终度分布趋近于理想 RSD 分布；而在 LTCDS 策略中，大约 10% 的节点最终编码度为 0，即没有异或数据包，同时编码度为 8, 9, 10 的节点个数明显高于理想 RSD 分布^[13]，导致在查询节点数较少时成功译码概率较低。综上，DSSLT 策略在改善传输效率的同时，提高了成功译码概率，可用性较高。

6 结束语

本文对空间信息网络分层自治域内信息存储问题进行了研究，提出了一种简单高效的分布式存储策略 DSSLT。分析和仿真结果表明，与同类方法相比，该策略具有传输效率高、简单易行、译码性能优的特点。因此，DSSLT 策略可以在保证较高译码性能的同时减少自治域内节点通信能耗，使空间信息网络整网管理控制得到优化，具有很高的应用价值。

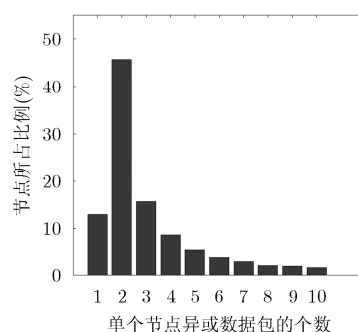


图 5 编码度分布情况

参考文献

- [1] DONG Feihong, Huang Qinfei, LI Hongjun, *et al.* A novel M2M backbone network architecture[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015, 15(11): 1-10. doi: 10.1155/2015/512321.
- [2] ZHANG Wei, ZHANG Gengxin, GOU Liang, *et al.* A hierarchical autonomous system based topology control algorithm in space information network[J]. *KSI Transactions on Internet and Information Systems*, 2015, 9(9): 3572-3593. doi: 10.3837/tiis.2015.09.016.
- [3] ZHANG Gengxin, ZHANG Wei, and ZHANG Hua. A novel proposal of architecture and network model for space communication networks[C]. *Proceeding of the 65th International Astronautical Congress*, Toronto, Canada, 2014: 147-153.
- [4] LI Bo, WANG Mengdi, ZHAO Yongxin, *et al.* Modeling and verifying Google file system[C]. *Proceeding of the 16th IEEE International Symposium on High Assurance Systems Engineering (HASE)*, Daytona Beach Shores, FL, 2015: 207-214.
- [5] 王娟, 王萍. 一种自适应数据逐层分解的 Reed-Solomon 码迭代纠错方法及应用[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(5): 1173-1179. doi: 10.11999/JEIT140907.
- [6] Wang Juan and Wang Ping. An adaptive Reed-Solomon iterative correction method based on data layer-wise decomposition and its application[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(5): 1173-1179. doi: 10.11999/JEIT140907.
- [6] Dimakis A G, Godfrey P B, Wainwright M, *et al.* Network coding for distributed storage systems[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2010, 56(9): 4539-4551. doi: 10.1109/TIT.2010.2054295.
- [7] Toni E. Codes between MBR and MSR points with exact repair property[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2014, 60(11): 6993-7005. doi: 10.1109/TIT.2014.2351252.
- [8] 郭晓, 张更新, 徐任晖, 等. 一种用于 RaptorQ 码的降维快速

- 译码算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(6): 1310–1316. doi: 10.11999/JEIT141037.
- GUO Xiao, ZHANG Gengxin, XU Renhui, *et al.* Fast decoding algorithm for RaptorQ code using matrix dimensionality reduction[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(6): 1310–1316. doi: 10.11999/JEIT141037.
- [9] Byers J W, Luby M, and Mitzenmacher M A. Digital fountain approach to asynchronous reliable multicast[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, 20(3): 1528–1540. doi: 10.1109/JSAC.2002.803996.
- [10] LIN Yunfeng, LIANG Ben, and LI Baochun. Data persistence in large-scale sensor networks with decentralized fountain codes[C]. *Proceeding of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, Anchorage, AK, 2007: 1658–1666.
- [11] Tzeveleksa L, Oikonomou K, and Stavrakakis I. Random walk with jumps in large-scale random geometric graphs[J]. *Computer Communications*, 2010, 33(13): 1505–1514. doi: 10.1016/j.comcom.2010.01.026.
- [12] LIANG Junbin, WANG Jianxin, and CHEN Jianer. An overhearing-based scheme for improving data persistence in wireless sensor networks[C]. *Proceeding of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Cape Town, South Africa, AK, 2010: 1–5.
- [13] KONG Zhenning, Aly S A, and Soljanin E. Decentralized coding algorithms for distributed storage in wireless sensor networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010, 28(2): 261–267. doi: 10.1109/JSAC.2010.100215.
- [14] Avin C and Krishnamachari B. The power of choice in random walks: an empirical study[J]. *Computer Networks*, 2008, 52(1): 44–60. doi: 10.1016/j.comnet.2007.09.012.
- [15] Abdulhussein A, Oka A, and Nguyen T T. Rateless coding for hybrid free-space optical and radio-frequency communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(3): 907–913. doi: 10.1109/TWC.2010.03.090108.
- [16] Gianini G and Damiani E. The cover time of neighbor-avoiding gossiping on geometric random networks[C]. *Proceeding of the 7th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (DEST)*, Menlo Park, CA, 2013: 7–12.
- 孔 博: 男, 1987 年生, 博士生, 研究方向为卫星通信、空间信息网络、网络编码理论及其应用.
- 张更新: 男, 1967 年生, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为卫星通信、深空通信.
- 张 威: 男, 1987 年生, 博士生, 研究方向为空间信息网络、拓扑控制、网络容量.