

面向近地表地下空间信息监测的 无线传感器网络三维节点部署算法研究*

余华平^a, 郭梅^b

(长江大学 a. 计算机科学学院; b. 科学技术处, 湖北 荆州 434023)

摘要: 从地下空间的基本特点出发,提出了地下空间节点部署算法的约束指标,建立了面向地下空间的自适应、多精度约束的节点部署算法。从网络结构、自适应性、能量消耗及覆盖连通性能等方面对算法进行了分析和仿真,结果表明该算法能有效地解决近地表地下空间节点的部署问题,为土壤环境监测、智能交通监测、管道监测及其他地下目标监测提供理论指导和实践依据。

关键词: 三维部署; 地下空间; 覆盖与连通; 自适应

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)06-1805-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.06.053

Research of three-dimensional node deployment of wireless sensor network for near-surface underground space monitoring

YU Hua-ping^a, GUO Mei^b

(a. College of Computer Science, b. Dept. of Science & Technology, Yangtze University, Jingzhou Hubei 434023, China)

Abstract: This paper firstly analyzed the essential characteristics of underground space and introduced the multi-indices constrains of node deployment algorithm in the 3D underground space, and then proposed an adaptive, multi-precision constrains sensor node deployment algorithm based on grid model (AKGM) for near-surface underground space monitoring. It discussed the analysis and simulation for AKGM algorithm from network structure, adaptive, energy consumption, probability of overage and connectivity, degree of overage and connectivity etc. The results show that the algorithm can efficiently solve the three-dimensional sensor node deployment problem for near-surface underground space monitoring and provide theoretical guidance and practical basis for the monitoring of soil environment, intelligent traffic and other underground target.

Key words: three-dimensional coverage; underground space; coverage and connectivity; adaptability

0 引言

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSN)技术是解决各类信息监测的主要技术手段。WSN由大量资源受限的传感器节点组成,是一种无中心节点的全分布式系统。传感节点一般配置有感测单元、计算单元、存储单元和通信单元等模块。传感器节点以随机部署或确定性部署的方式在监测目标区域内协作完成监测对象的监测、计算和数据传输任务,实现监测区域的长时间、不间断监测^[1]。目前,无线传感器网络已广泛应用在环境监控、科学探索、工业控制以及战场监测等民用和军事等领域。其应用空间主要包括地上空间、水下空间和地下空间等。

面向近地表地下空间的无线传感器网络有着广泛的应用前景:a)土壤环境监测^[2],获取土壤的各种参数,进行精细农业、观赏农业、高尔夫球场等设施农业和环境监测;b)智能交通监测^[3],如高速公路、铁路、城市路网、地下隧道监测等;c)管道监测^[4],包括长距离输油输气管道、城市天然气、自来水及各类污水管网监测等;d)地下目标监测^[3],如山体滑坡、三峡大坝等地下工程安全监测。无线地下传感器网络^[3]通过部

署在近地表地下空间中的节点对目标进行监测,从而对监测目标实施有效的维护,保障目标运行安全,降低物质消耗,提高经济效益和社会效益。

传感器节点部署是WSN技术的基础。近年来,节点部署研究主要集中在地上空间二维平面问题上,其约束条件也主要集中在使用最少的传感器节点实现网络无缝覆盖和网络的连通性能。现有的三维节点部署也主要集中在地上空间的节点部署上,对有特殊感知及通信环境的地下三维节点覆盖问题研究较少,且都与具体的应用领域相关,因此,开展近地表无线地下传感器节点三维部署研究具有重要的理论意义和现实意义。对近地表地下空间的节点部署研究主要有文献[5~8]。其中,文献[5]讨论了土壤对电磁波的衰减情况,建立了近地表空间的信道模型;文献[6]基于覆盖性能提出了一种无线地下传感器网络节点覆盖算法MCC3D;文献[7]针对应用于土壤环境监测的传感器网络,提出了基于连通性的多目标关联覆盖方法,改善了多目标关联覆盖方法因节点间不连通而影响节点间信息交换和传输的问题;文献[8]设计了面向WSN部署的矿山巷道空间数据模型及数据结构,提出了一种巷道网络拓扑图的自动生成算法。上述算法在覆盖度上只达到1-覆盖,没有

收稿日期:2012-11-15; 修回日期:2012-12-27 基金项目:湖北省自然科学基金资助项目(2012FFB00102)

作者简介:余华平(1978-),男,湖北枝江人,副教授,博士研究生,主要研究方向为计算机检测与控制、无线传感器网络、油气田开发等(yhpjz@126.com);郭梅(1981-),女,讲师,硕士,主要研究方向为无线传感器网络等。

考虑多重覆盖和地下空间链路空变特性,对连通性能也是从整体上约束的。基于此,本文提出了一种基于网格模型的自适应链路质量和多重覆盖连通约束的节点三维部署算法(adaptive, K-cover constrains sensor node three-dimensional deployment algorithm based on grid model, AKGM),以网格对三维待监测区域建模,使得每个网格点至少被 k 个传感器覆盖,传感器节点能够自适应链路质量,提高了监测系统的适应性和可靠性。

1 问题描述

1.1 地下空间的特点

1) 土壤对电磁波的衰减作用远大于空气

对于地上传感器节点来说,节点的通信距离(R_c)往往远大于感知距离(R_s),即 $R_c \gg R_s$,而且当 $R_c \geq 2R_s$,只要传感器节点无缝覆盖监测区域,该节点部署算法就能保障网络全连通。对地下传感器节点来说,节点的 R_c 十分有限,与 R_s 大致相当,甚至更低^[5]。因此,保持网络连通性才是首先考虑的因素,其次才是网络的覆盖性能。

2) 地下感知与通信链路具有明显的空变特性

在地上空间中,通常认为网络条件是均匀的,即不具有空间性。而在地下空间中,节点间的感知和通信质量可能相差较大,分布不均匀,距离相同的两点之间的路径损耗或误码率可能出现较大的差别,并且具体的特征与特定的区域、土壤环境有关^[5]。因此,在设计节点部署方案时,需要考虑地下链路的质量问题。

3) 传感器节点的能耗消耗不平衡

WSN 的能量资源有限,其能量消耗关系到网络的生命周期。节点能量消耗的模块包括传感器模块、处理器模块和无线通信模块。典型的传感器节点能量消耗分布如图 1 所示^[9]。

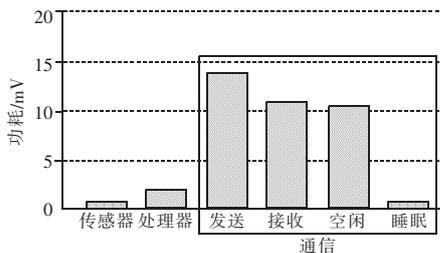


图 1 传感器节点的能量消耗分布

从图 1 中可以看出,通信能耗是最主要能耗单元。尤其是在地下的三维空间中,土壤对信号的衰减大,而且在三维空间中存在能耗不平衡的情况。所以在节点部署算法中也要综合考虑网络能耗平衡性问题,减少网络的数据吞吐量。

1.2 地下空间节点部署算法的约束条件

针对近地表地下空间和节点部署特点,采用基于网格模型的确定性部署方式。其约束条件主要有:

a) 保证网络连通性能和覆盖性能。网络连通性和覆盖性是节点部署算法的基本性能要求,刻画的主要指标包括了连通强度、连通概率(连通精度)以及覆盖强度、覆盖概率(覆盖精度)。

b) 自适应地下空间感知和通信链路质量。由于地下空间感知和通信链路质量容易受到土壤水分、成分等多种因素的影响,在时间和空间上存在非均值现象,因此需要算法自适应探测链路质量,建立网络节点间链路质量矩阵。确定节点间链路

质量可以通过链路质量感知算法及认知无线电技术来确定。

c) 平衡网络能耗。网络能耗是关系网络性能的重要指标。部署算法要充分考虑网络中靠近 sink 节点的网络部分能耗大的问题,消除网络能耗不均衡的现象,延长网络生命周期。

d) 保证网络的时延性能。节点部署算法要为数据传输的时延性能奠定基础,保证紧急数据能及时上传,同时不增加网络的能耗。

e) 使用尽量少的节点。在上述约束条件的基础上,使用尽量少的节点提高传感器节点的覆盖效率。

2 传感器节点三维部署算法

本章描述了三层网络模型和基于网格模型的确定性节点部署算法,即在三层网络模型下先基于网格模型部署节点,再根据网络性能要求进行活跃节点调度。

2.1 三层网络模型

三层传感器网络如图 2 所示^[10]。在第三层,传感器节点部署在近地表的地下空间中,实现监测区域的覆盖和连通。这些节点具有有限的能量、计算和存储资源,节点能量不能及时补充,节点之间通过短距离无线通信传输数据,其主要作用是监测近地表地下空间的各种状态参数,并把数据上传到上层 sink 节点。在第二层,传感器节点主要指部署在地上空间的固定 sink 汇聚节点或移动 sink 汇聚节点。此层节点的计算、存储资源比第三层节点明显增强,能量一般可补充,节点间可通过卫星、无线基站及有线网络通信,主要负责收集第三层节点数据,进行初步的分析整合后上传到最上层的系统监控中心。

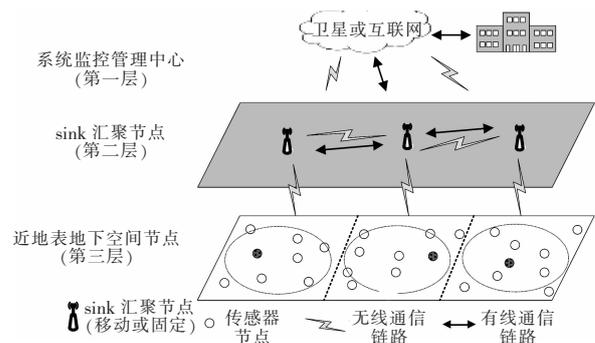


图 2 三层网络体系结构

2.2 节点感知模型

节点感知模型有布尔感知模型和概率感知模型两种。其中,概率感知模型能更真实地描述节点的感知属性,模型如式(1)所示^[11]。

$$P(s, p) = \begin{cases} 1 & d(s, p) \leq R_{s1} \\ e^{-\alpha(d(s, p) - R_{s1})} & R_{s1} < d(s, p) \leq R_{s2} \\ 0 & d(s, p) > R_{s2} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $P(s, p)$ 为传感器节点 s 检测到目标 p 的概率; R_{s1} 为传感器节点不确定感知的起点半径; R_{s2} 为传感器节点感知范围的最大半径;参数 α 为传感器节点的物理特性参数,表示节点感知能力随距离增大的下降程度,一般取 2~6; $d(s, p)$ 表示节点 s 与目标 p 之间的欧式距离,计算公式为

$$d(s, p) = \sqrt{(x_s - x_p)^2 + (y_s - y_p)^2 + (z_s - z_p)^2} \quad (2)$$

在实际应用环境中,传感器节点对监测区域的覆盖往往是多重的,即监测区域中任意一点同时被多个传感器节点覆盖,形成多重覆盖^[12]。如果一个目标 j 同时被 k 个传感器节点覆

盖,则根据概率计算公式,目标 j 的覆盖率可用式(3)计算,其中 p_{ij} 为单个传感器节点 i 对目标 j 的联合感知概率。

$$P(j) = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - p_{ij}) \quad (3)$$

进一步地,整个网络的平均覆盖性能计算如式(4),其中 N 表示网络目标数量。

$$P_{net} = \left(\sum_{j=1}^N P(j) \right) / N \quad (4)$$

2.3 节点通信模型

连通性是衡量实际网络环境中节点间连通性能的指标。其模型也分为布尔模型和概率模型两种。其中,概率模型更能反映实际网络环境中节点间的通信质量,其模型表示如式(5)所示^[11]。其中, $C(s_i, s_j)$ 表示传感器节点 s_i 和 s_j 的连通强度, R_{c1} 、 R_{c2} 表示通信范围的门限值, α 表示通信强度随距离增大的衰减程度。

$$C(s_i, s_j) = \begin{cases} 1 & 0 \leq d(s_i, s_j) \leq R_{c1} \\ e^{-\alpha(d(s_i, s_j) - R_{c1})} & R_{c1} \leq d(s_i, s_j) \leq R_{c2} \\ 0 & R_{c2} < d(s_i, s_j) \end{cases} \quad (5)$$

如果传感器节点 s_i 有 k 个传感器节点可以相互通信,则节点 s_i 的连通性能可表示为

$$C(i) = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - C(s_i, s_j)) \quad (6)$$

进一步地,整个网络的平均连通性能计算如式(7),其中 N 表示网络工作节点数量。

$$C_{net} = \left(\sum_{i=1}^N C_i \right) / N \quad (7)$$

2.4 节点部署算法

节点部署算法的总体流程如图3所示。

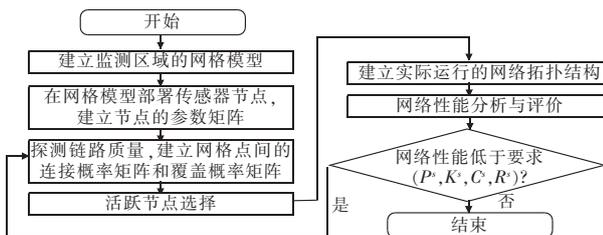


图3 节点部署算法流程

在网络工作一段时间后,一部分传感器节点可能出现异常,或者由于环境变化,网络性能下降。此时,再次激活探测链路质量算法,运行活跃节点选择算法,将作为后备的非活跃节点激活,重新部署网络的拓扑结构。

1) 监测区域网格模型

网格模型是节点部署算法的基础,就是把监测区域用网格均分成大小相同的正方体网格。网格模型如图4所示^[6],其大小为 $n \times m \times l$,即在 (x, y) 平面为 $n \times m$,在 z 方向长度为 l ,则总的放置传感器节点数量为 $n \times m \times l$ 。如果 $l=0$ 时代表地平面,且不考虑在地表面上部署传感器节点的情况,则需放置的节点数为 $n \times m \times (l-1)$ 。节点的编号先按 x 方向、后 y 方向、最后 z 方向顺次排列,即在同一平面上按列排列,排完一个平面再排下一平面。

在图4中, a 表示网格边长。对于给定区域, a 的取值由网络要求的监测精度决定。取值大时, n, m, l 取值小,精度低;取值小时, n, m, l 取值大,精度高。经计算,可以确定网格全覆盖的充分必要条件为 $R_c \geq \sqrt{2}a$, 连通覆盖的充分必要条件为

$$R_c \geq \sqrt{2}R_s \geq a。$$

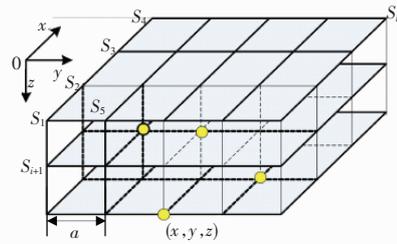


图4 网格模型

2) 节点放置策略

为了平衡网络的能耗,避免靠近 sink 节点的传感器节点能量过早消耗完毕,造成网络覆盖率、连通性下降,最终导致网络生命周期缩短。在第三层传感器节点部署策略选用能耗均衡的部署策略来平衡传感器节点的能量消耗^[4],如图5所示,即首先以 sink 节点为中心(如用 N_{sink} 表示 sink 节点个数),把第三层节点分为 N_{sink} 个簇。每个簇内的第三层传感器节点以多跳方式转发数据至该簇的 sink 节点,在各个簇内越靠近 sink 节点的分区部署更多的传感器节点,各分区内节点通过调度轮换工作或休眠,这样就能有效地节约节点能耗和平衡整个网络的能量消耗。

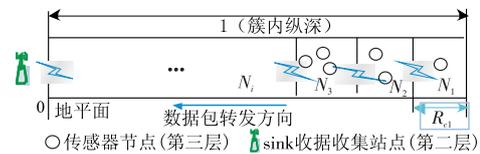


图5 传感器节点的能耗均衡部署策略

3) 链路质量探测

由于地下空间链路的空变特性,采用认知无线电技术^[13]建立网格节点间的连通概率矩阵 C 和感知概率矩阵 P 。其中,连通概率矩阵 C 表示各网格点上传感节点间的连通概率,表示节点间的连通精度;感知概率矩阵 P 表示各网格点对之间的感知概率,表示对目标的感知精度。如式(8)所示,式中 C_{ij} 、 P_{ij} 按照式(1)(5)计算。

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1N} \\ \vdots & C_{ij} & \vdots \\ C_{N1} & \cdots & C_{NN} \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1N} \\ \vdots & P_{ij} & \vdots \\ P_{N1} & \cdots & P_{NN} \end{bmatrix} \quad (8)$$

考虑每个节点的覆盖性概率和连通性概率的相互独立性问题,在实际计算中,采用失误概率矩阵 M 和失误连通概率矩阵 W ,如式(9)所示,式中 $w_{ij} = 1 - C_{ij}$, $m_{ij} = 1 - P_{ij}$ 。

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1N} \\ \vdots & w_{ij} & \vdots \\ w_{N1} & \cdots & w_{NN} \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} m_{11} & \cdots & m_{1N} \\ \vdots & m_{ij} & \vdots \\ m_{N1} & \cdots & m_{NN} \end{bmatrix} \quad (9)$$

4) 活跃节点选择

活跃节点选择算法目标是选择尽量少的传感器节点,使得每个网格点以感知概率 P^s 和连通概率 C^s 实现 K^s 重覆盖与 R^s 重连通的要求,将未被选择的非活跃节点关闭,即建立起网络的初始拓扑。

定义输入参数如下:

a) 目标覆盖概率向量 $P^s = (P_1, P_2, \dots, P_N)$, 目标覆盖度向量 $K^s = (K_1^s, K_2^s, \dots, K_N^s)$ 和向量 $K = (K_1, K_2, \dots, K_N)$ 。其中 P_i 、 K_i^s 、 K_i 表示第 i 个节点的目标覆盖概率、目标覆盖度和节点配置过程中所达到的覆盖度。

b) 目标连通概率向量 $C^s = (C_1, C_2, \dots, C_N)$, 目标连通度向量 $R^s = (R_1^s, R_2^s, \dots, R_N^s)$ 和向量 $R = (R_1, R_2, \dots, R_N)$ 。其中 C_i, R_i^s, R_i 表示第 i 个节点的目标连通概率、目标连通度和节点配置过程中所达到的连通度。

c) 失误概率矩阵 M 和失误连通概率 W , 如式(9)所示。

d) 激活节点列表 N , 激活节点数 Num 。

算法的具体步骤如下:

a) 初始化。初始化激活节点列表 N 为空, 激活节点数 Num 为 0; 初始化向量 K, R 为零向量。根据式(9), 建立失误概率矩阵 M 和失误连通概率 W 。建立目标覆盖概率向量 P^s 、目标覆盖度向量 K^s 、目标连通概率向量 C^s 和目标连通度向量 R^s 。

b) 选择一个活跃节点。选择使网络平均未覆盖概率和未连通概率最小的节点, 即选择使 $\sum m_{kj} = m_{k1} + m_{k2} + \dots + m_{kN}$ 的值最小的节点 ($j, k = 1, \dots, N$)。如果这样的点 j 有多个 (记为 h), 则选择使 $\sum C_{kj} = C_{k1} + C_{k2} + \dots + C_{kN}$ 的值最小的节点 ($j, k = 1, \dots, h$)。进一步地, 如果这样的节点 j 还有多个, 则随机选取其中之一。传感器节点数 $Num = Num + 1$, 更新激活节点列表 N 。

c) 根据式(3) 计算选择节点 j 的覆盖概率 $P(j)$ 。若 $P(j) > P_j$, P_j 为目标覆盖概率向量 $P = (P_1, P_2, \dots, P_N)$ 中的第 j 个节点的目标覆盖概率 ($j = 1, \dots, N$), 则对应的覆盖度 $K_j + 1$, 更新向量 $K = (K_1, K_2, \dots, K_N)$ 。

d) 根据式(6) 计算选择节点 j 的连通概率 $C(j)$ 。若 $C(j) > C_j$, C_j 为目标覆盖概率向量 $C = (C_1, C_2, \dots, C_N)$ 中的第 j 个节点的目标连通概率 ($j = 1, \dots, N$), 则对应的连通度 $R_j + 1$, 更新向量 $R = (R_1, R_2, \dots, R_N)$ 。

e) 若 K_j 达到指定的目标覆盖度, 则删除 M 矩阵的第 j 行和第 j 列; 若 R_j 达到指定的目标连通度, 则删除 W 矩阵的第 j 行和第 j 列。

f) 转至步骤 b), 直到 $K_j \geq K_j^s, R_j \geq R_j^s (j = 1, \dots, N)$ 或者已配置的传感器节点数量超过了预设的上界。

活跃节点选择算法的流程如图 6 所示。

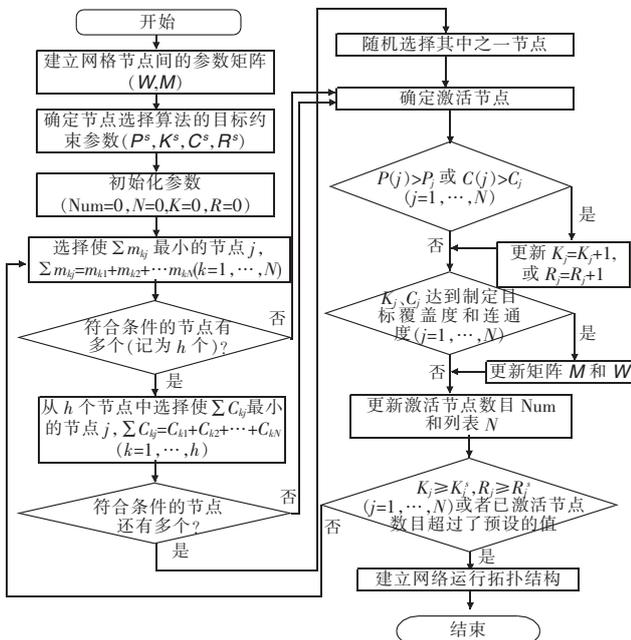


图 6 活跃节点选择算法流程

3 算法性能分析

借助 MATLAB 对节点部署算法进行仿真分析。在仿真中, 将三维待监测区域划分为 $60 \times 60 \times 30$ 的网格, 在 z 轴方向有 30 个维度, 每个维度代表 0.5 m, 表示深度为 15 m、平面上长宽为 30 m 的区域。每个网格点的目标覆盖度、覆盖概率、连通度、连通概率分别由向量 K^s, P^s, R^s, C^s 控制。将本文提出的 AKGM 与 MCC3D 算法进行比较, 如图 7~10 所示。

3.1 链路衰减因子对激活节点数目的影响

根据节点感知模型和通信模型(式(1)(5)), 链路衰减因子 α 对激活节点数目有较大的影响, 如图 7 所示。一般地上空间中, α 取值在 1~3 之间; 而在地下空间, α 会随不同深度和环境有较大变化, 一般在 10~13 之间^[5]。

3.2 节点覆盖约束目标对激活节点数目的影响

算法约束目标由向量 K^s, P^s, R^s, C^s 控制, 为了仿真方便, 取所有节点的约束目标一致、链路质量均匀。从图 8 中可以看出, 如果节点的覆盖率达到 60% 时, 两个需要激活的节点数基本趋于稳定, 说明两种算法的覆盖性能相差不大, 这与激活节点的选择标准相似有关。

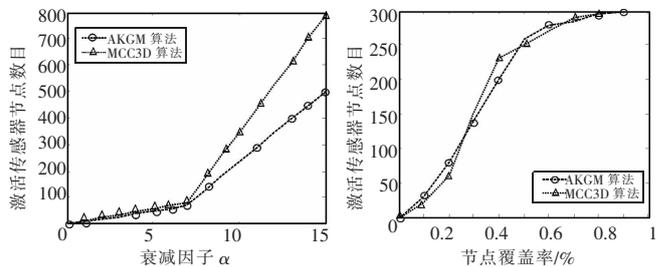


图 7 衰减因子对激活节点数量的影响

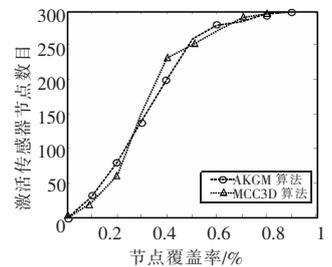


图 8 节点覆盖率约束目标对激活节点数量的影响

对于节点连通率对激活节点数的影响, 两者就有一定差异, 仿真分析如图 9 所示。从图中可看出, MCC3D 算法需要较多的节点才能达到一定的连通率, 而 AKGM 算法则需要较少的节点。这与 MCC3D 算法没有把连通概率约束目标作为输入参数有关。

3.3 监测区域深度对所需节点数目的影响

为了避免数据传输过程中靠近 sink 的节点过早“死亡”, 采用 2.4 节所述的节点放置策略。经分析可知, 监测区域越深, 所需部署在网格模型上的节点就呈二次关系增加, 如图 10 所示。

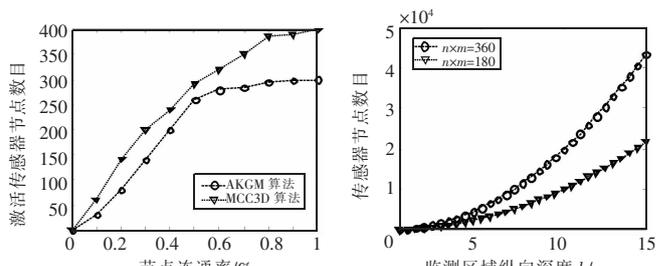


图 9 节点连通率约束目标对激活节点数量的影响

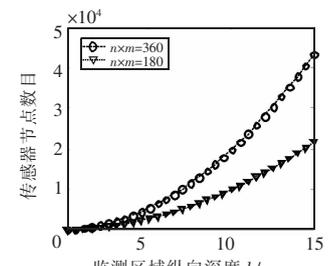


图 10 监测区域纵向深度对传感器节点数目的影响

4 结束语

建立基于无线传感器网络的近地表地下 (下转第 1812 页)

图3展现了RPT模型在个体层面的转发行为和网络层面的传播速率的预测结果。在最终的转发次数上模型的预测结果与真实数据存在误差,这主要是由于选取的训练集有限,其中并未包含一些用户的转发微博,导致在计算用户转发概率 Pr_u 时出现偏差。

为验证RPT模型在消息传播范围上的预测能力,定义信息扩散密度 $\rho = \frac{R}{N}$, R 为信息传播结束时网络中获得信息的节点个数, N 为网络中总的节点个数。微博1与微博2的扩散密度预测情况如表3所示。

表3 扩散密度预测结果

微博	扩散密度/%		预测准确率/%
	真实数据	预测结果	
1	62	53	85.5
2	46	41	89.1

微博网络中,转发行为是信息传播的关键。在进行RPT传播模型仿真实验时,计算了传播子网中2000个用户的信息接受阈值 $f(u)$,也就是用户对一条微博的转发概率。为了解网络中用户转发行为背后的规律特征,对计算得到的概率值进行了统计,结果如图4所示。

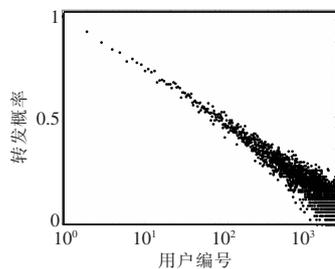


图4 用户转发概率分布

从图4可以看出,网络中用户的转发概率分布呈现显著的幂律特性,网络中对于一条微博,只有少数用户倾向于转发,而大多数用户则不会转发,这种特性说明在网络中存在一定数量的影响力用户对信息传播起着决定性的作用。

(上接第1808页)空间监测系统具有重要的理论意义和实践意义。本文从地下空间的基本特点出发,提出了地下空间节点部署算法的约束指标,建立了基于网格模型的面向地下空间的节点部署算法,并从网格结构、能量消耗及约束目标性能等方面对算法进行了分析和仿真。结果表明,该算法能有效地解决地表地下空间三维节点部署问题。下一步工作将在本文提出的部署算法的基础上进一步讨论认知无线电技术和链路质量的探测算法,以提升算法的自适应性能。

参考文献:

[1] YICK J, MUKHERJEE B, GHOSAL D. Wireless sensor network survey [J]. *Computer Networks*, 2008, 52(12): 2292-2330.
 [2] 韩文霆, 吴普特, 郝晓庆. 农业环境信息无线传感器网络监测技术研究进展[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(S2): 336-340.
 [3] AKYILDIZ I F, STUNTEBEEK E P. Wireless underground sensor networks: research challenge[J]. *Ad hoc Networks*, 2006, 4(6): 669-686.
 [4] YU Hua-ping, GUO Mei. An efficient oil and gas pipeline monitoring systems based on wireless sensor networks[C]//Proc of International Conference on Information Security and Intelligent Control. 2012: 178-181.

4 结束语

本文在分析微博用户转发行为的基础上,建立了一种基于行为预测的网络传播模型。实验仿真结果表明,RPT模型可以较好地模拟真实网络中的信息扩散速率与扩散范围。此外,通过统计发现,网络中用户转发概率分布呈现出幂律特性,这说明在网络中有少部分用户热衷于转发,从而对信息的扩散起到关键性作用。本文将为下一步进行的微博网络舆论管控研究打下基础。

参考文献:

[1] 王晶, 朱珂, 汪斌强. 基于信息数据分析的微博研究综述[J]. *计算机应用*, 2012, 32(7): 2027-2029.
 [2] LESKOVEC J, McGLOHON M, FALOUTSOS C, et al. Cascading behavior in large blog graphs patterns and a model[C]//Proc of the Society of Applied and Industrial Mathematics: Data Mining. 2007: 551-556.
 [3] GRUHL D, GUHA R, LIBEN-NOVELL D, et al. Information diffusion through blogspace[C]//Proc of the 13th International Conference on World Wide Web. New York: ACM Press, 2004: 491-501.
 [4] NARAYANAM R, NARAHARI Y. A shapley value-based approach to discover influential nodes in social networks[J]. *IEEE Trans on Automation Science and Engineering*, 2011, 20(1): 130-147.
 [5] LAHIRI M, CEBRIN M. The genetic algorithm as a general diffusion model for social networks[C]//Proc of the 24th AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2010: 494-499.
 [6] 赵丽, 袁睿翁, 管晓宏, 等. 博客网络中具有突发性的话题传播模型[J]. *软件学报*, 2009, 20(5): 1384-1392.
 [7] SUH B, HONG Li-chan, PIROLLO P, et al. Want to be Retweeted? Large scale analytics on factors impacting retweet in twitter network [C]//Proc of IEEE International Conference on Social Computing. 2010: 177-184.
 [8] CHA M, HADDADI H, BENEVENUTO F, et al. Measuring user influence in twitter: the million follower fallacy [C]//Proc of the 4th International AAAI Conference on Weblogs and Social Media. 2010: 10-17.
 [9] 张旻, 路荣, 杨青. 微博客中转发行为的预测研究[J]. *中文信息学报*, 2012, 26(4): 109-114.
 [5] VURAN M C, KYILDIZ I F. Channel model and analysis for wireless underground sensor networks in soil medium[J]. *Physical Communication*, 2010, 3(4): 245-254.
 [6] 李莉, 刘元安. 无线地下传感器网络节点放置算法[J]. *吉林大学学报: 信息科学版*, 2007, 25(6): 15-20.
 [7] 张启忠. 应用于土壤环境监测的传感器若干理论与技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009: 29-48.
 [8] 王珂. 矿井无线传感器网络节点部署关键技术的研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2011: 36-48.
 [9] 余华平, 邬春学, 郭梅. 移动 sinks 无线传感器网络的能量效率分析[J]. *计算机工程*, 2009, 35(14): 127-129.
 [10] 余华平, 郭梅, 胡杰. 移动 sinks 无线移动传感器网络时延性能分析[J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(1): 317-320.
 [11] HOSSAIN A, CHAKRABARTI B. Sensing models and its impact on network coverage in wireless sensor network [C]//Proc of the 3rd IEEE Region 10 and International Conference on Industrial and Information Systems. 2008: 1-5.
 [12] 刘明, 曹建农, 郑源, 等. 无线传感器网络多重覆盖问题分析[J]. *软件学报*, 2007, 18(1): 127-136.
 [13] 王永华, 杨健, 程良伦, 等. 无线认知传感器网络的研究[J]. *计算机科学*, 2011, 38(7): 47-51.