

三维传感器网络中贪婪算法的可达性分析

侯孟书, 李玉军, 秦志光

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 611731)

【摘要】针对贪婪算法存在路由空洞现象, 定义并研究了半球型3D传感器网络中贪婪算法的可达性问题。基于节点随机分布的数学特性, 分析了传感器传输半径与贪婪算法的可达率之间的定量关系, 推导出保证设定可达率的传感器传输半径的理论上限, 并给出了相应的数值求解方法。仿真实验数据验证了理论上限的正确性和严密性, 为确定节点最小传输半径奠定了理论基础。

关键词 临界传输半径; 可达率; 贪婪算法; 三维传感器网络

中图分类号 TP393

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.03.023

Deliverability Analysis of Greedy Routing in 3D Sensor Networks

HOU Meng-shu, LI Yu-jun, and QIN Zhi-guang

(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract Considering that greedy routing may fail due to routing voids on random network topologies, greedy routing's deliverability is defined and studied in a typical hemi-sphere 3D sensor network deployment scenario. Based on nodes' distribution characteristics, the relationship between the sensor transmission radius and the probability of guaranteed delivery for greedy routing is analyzed. A very tight analytical upper bound on the sensor transmission radius to ensure the designed deliverability probability is derived, and the corresponding numerical solution of this upper bound is proposed. The correctness and tightness of the derived upper bound are verified by extensive simulations, and hence the results can be used to design the minimal transmission for actual sensor network deployment.

Key words critical transmission radius; deliverability probability; greedy routing; 3D sensor network

3D传感器网络可以不依赖固定通信基础设施, 以分布式协作的方式进行信息的收集和处理, 适用于海洋勘探、森林监控和大气成分监测等应用场景。随着通信技术、传感器和空间技术的飞速发展, 3D传感器网络已成为目前通信领域的研究热点之一^[1-6]。

针对多跳无线网络, 研究人员提出了众多的路由协议来保证数据传输的高效性。在这些协议中, 贪婪算法按照距离逼近的方式转发数据分组, 具有路由维护开销低、通信效率较高等优点, 非常适用于能源受限的传感器网络。随着自适应定位技术的飞速发展^[7], 贪婪算法已成为实际无线传感器网络部署的有效解决方案之一。

尽管贪婪算法具有路由维护开销低、通信效率高等优点, 然而该算法存在路由空洞现象。在2D无线网络中, 往往采用平面图算法作为贪婪算法的恢

复机制, 确保节点之间数据分组的可达性^[8]。然而, 最近研究指出, 在3D无线网络中不存在确定性的局部路由算法来保证节点之间数据分组的可达性^[9], 通常采用增大节点传输半径等全局方法来提高节点之间数据分组的可达性。因此, 近年来, 贪婪算法的可达性分析逐渐引起了研究人员的重视。

对于2D无线网络, 基于单位圆理想通信模型, 文献[10-12]研究了任意节点之间数据分组的可达性问题, 给出了节点传输半径与贪婪算法可达性之间的数量关系。文献[13]采用对数正态阴影传播模型, 研究了2D传感器网络中节点与基站之间数据分组的可达性问题, 给出了节点传输功率与贪婪算法可达率之间的数量关系。然而, 对于3D无线网络, 贪婪算法的可达性分析刚刚起步。文献[14]给出了可以保证任意节点之间通信的近似临界传输半径。针对

收稿日期: 2010-08-15; 修回日期: 2011-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(61073177); 中央高校基金(2YGX2011J062)

作者简介: 侯孟书(1971-), 男, 博士, 副教授, 主要从事分布式计算、无线传感器网络等方面的研究。

球型部署的3D传感器网络,文献[15]给出了贪婪算法的可达率与传感器传输半径之间的数量关系。

与文献[15]不同,针对半球型较为真实的3D传感器网络部署,本文考虑了边界效应的影响,分析了贪婪算法可达率与传感器传输半径之间的定量关系,推导出了保证设定可达率的传感器传输半径的理论上限,并给出了相应的数值求解算法。

1 系统模型

系统模型包括网络模型和数学模型两个组成部分。网络模型描述了3D传感器网络的网络特征,数学模型则对贪婪算法的可达性问题进行数学描述。

1.1 网络模型

假设传感器以参数为 λ 的泊松点过程分布在3D空间内的一个半球型区域 $HS(X_{bs}, R)$,其中 X_{bs} 为基站,位于半球型底平面的中心; R 为球半径。将该部署方式称为半球型3D传感器网络,其典型应用场景中的水下传感器网络如图1所示。

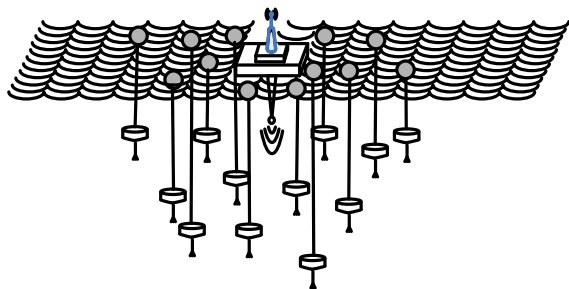


图1 半球型水下传感器网络

假设所有传感器的传输半径均为 r ,任意两个传感器之间、传感器与基站之间能够直接通信的充要条件为它们之间的欧式距离小于或等于传感器的传输半径 r 。所有传感器均采用贪婪算法以多跳的通信方式将感知数据发送至基站。

1.2 数学模型

对于一个传感器网络而言,若采用随机部署方式,则任意一个传感器无法将感知数据传送到基站的概率均大于零。因此基于概率理论,文献[13, 15]引入下列术语来描述贪婪算法的可达性问题。

定义 1 可达率 Pr^{GD} 。对于一个传感器网络而言,可达率 Pr^{GD} 指所有传感器均可以采用贪婪算法将感知数据发送至基站的概率。

显然,增大传输半径可以增加网络的可达率,故传感器临界传输半径的定义^[13, 15]描述如下:

定义 2 临界传输半径 $r^c(\text{Pr}^{\text{th}})$ 。对于一个传

感器网络而言,临界传输半径 $r^c(\text{Pr}^{\text{th}})$ 是指可以保证该传感器网络的可达率 Pr^{GD} 不低于 Pr^{th} 的最小传输半径,其中 $0 < \text{Pr}^{\text{th}} < 1$ 是预设的可达率阈值。

基于定义1和定义2,半球型3D传感器网络中贪婪算法的可达性可以归纳为一个数学问题,即给定一个预设的可达率阈值 Pr^{th} ,确定半球型3D传感器网络 $HS(X_{bs}, R)$ 的临界传输半径 $r^c(\text{Pr}^{\text{th}})$ 。

2 临界传输半径的理论上限

与文献[13, 15]的方法类似,本文首先建立半球型3D传感器网络的可达率与空洞节点概率之间的数量关系,随后讨论传输半径与空洞节点概率之间的数量关系,最后基于上述两个数量关系,推导半球型3D传感器网络临界传输半径的理论上限。

2.1 可达率与空洞节点概率

对于半球型3D传感器网络而言,若网络中不存在空洞节点,则贪婪算法能够把任何一个传感器上的感知数据成功传送到基站。反之,贪婪算法会在空洞节点上传送失败。因此,贪婪算法的可达率与空洞节点概率之间存在密切关系,故引入下述定义。

定义 3 空洞节点。对于一个传感器网络而言,若传感器 X_i 与基站之间的距离大于传感器的传输半径,并且 X_i 比其任何一个邻居传感器更靠近基站,则 X_i 是一个空洞节点。

定义 4 随机变量 $B(X_i)$ 。对于一个随机部署的传感器网络而言,随机变量 $B(X_i)$ 描述了传感器 X_i 是否为空洞节点,即有:

$$B(X_i) = \begin{cases} 1 & X_i \text{ 为空洞节点} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

定义 5 空洞节点概率 $\text{Pr}(B(X_i)=1)$ 。对于一个随机部署的传感器网络而言,空洞节点概率是指任意一个传感器 X_i 成为空洞节点的概率。

用符号 $H_\lambda = \{X_1, X_2, \dots, X_{|H_\lambda|}\}$ 表示半球型3D传感器网络中节点的集合,则 $B(X_1), B(X_2), \dots, B(X_{|H_\lambda|})$ 是独立同分布的随机变量。基于定义3~5,可以得出下述定理。

定理 1 对于半球型3D传感器网络 $HS(X_{bs}, R)$ 而言,贪婪算法的可达率与空洞节点概率之间满足关系式: $\text{Pr}^{\text{GD}} \geq 1 - 2\pi R^3 \lambda \text{Pr}(B(X_i)=1) / 3$ 。

证明:定义半球型3D传感器网络中空洞节点数目为 Y ,则 Y 为随机变量,其数学期望计算如下:

$$\begin{aligned}
E[Y] &= E\left[\sum_{X_i \in H_\lambda} B(X_i)\right] = \\
&\sum_{k=0}^{+\infty} E\left[\sum_{i=1}^k B(X_i)\right] \Pr(|H_\lambda| = k) = \\
&2\pi R^3 \lambda \Pr(B(X_i) = 1)/3
\end{aligned} \quad (1)$$

基于Markov不等式^[16]可知:

$$\Pr(Y \geq 1) \leq E[Y] \quad (2)$$

基于定义1和定义3可知, 贪婪算法的可达率等于传感器网络中不存在空洞节点的概率, 则有:

$$\begin{aligned}
\Pr^{\text{GD}} &= \Pr(Y = 0) = 1 - \Pr(Y \geq 1) \geq 1 - E[Y] = \\
&1 - 2\pi R^3 \lambda \Pr(B(X_i) = 1)/3
\end{aligned} \quad (3)$$

定理得证。

2.2 理论上界

在建立空洞节点概率与传感器传输半径之间的数量关系前, 首先引入下列引理。

引理 1 对于一个半径为 r 、高度为 h 的球缺而言, 若用垂直于底平面的平面去切割该球体, 且球面到切割平面的距离为 l , 其投影如图2所示, 则阴影部分所对应的切割体的体积为:

$$V_l(r, h, l) = \begin{cases} \int_{r_h-l}^{r_h} 2(\sqrt{r^2 - \rho^2} - (r-h))\rho \arccos((r_h-l)/\rho) d\rho & l \leq r_h \\ \pi h^2(3r-h)/3 - \int_{l-r_h}^{r_h} 2(\sqrt{r^2 - \rho^2} - (r-h))\rho \arccos((l-r_h)/\rho) d\rho & l \leq r_h \end{cases}$$

式中, $r_h = \sqrt{r^2 - (r-h)^2}$ 为球缺底平面半径。

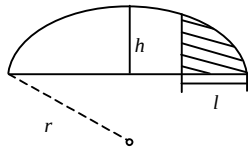


图2 球缺投影图

证明: 假设球心的坐标为 $(0,0,0)$, 其中球缺的底平面平行于坐标平面 xoy 。

当 $l \leq r_h$ 时, 假设阴影部分所对应的切割体在 xoy 平面的投影面积为 Ω , 则有:

$$\Omega: \begin{cases} x^2 + y^2 \leq r_h^2 \\ r_h - l \leq x \leq r_h \end{cases} \quad (4)$$

因此, 当 $l \leq r_h$ 时, $V_l(r, h, l)$ 计算如下:

$$\begin{aligned}
V_l(r, h, l) &= \\
&\iint_{\Omega} (\sqrt{r^2 - x^2 - y^2} - (r-h)) dx dy = \\
&\int_{r_h-l}^{r_h} \int_{-\arccos((r_h-l)/\rho)}^{\arccos((r_h-l)/\rho)} (\sqrt{r^2 - \rho^2} - (r-h)) \rho d\rho d\theta =
\end{aligned}$$

$$\int_{r_h-l}^{r_h} 2(\sqrt{r^2 - \rho^2} - (r-h))\rho \arccos((r_h-l)/\rho) d\rho \quad (5)$$

根据对称性易得, 当 $l > r_h$ 有:

$$V_l(r, h, l) = \frac{\pi}{3} h^2 (3r-h) -$$

$$\int_{l-r_h}^{r_h} 2(\sqrt{r^2 - \rho^2} - (r-h))\rho \arccos((l-r_h)/\rho) d\rho \quad (6)$$

引理得证。

引理 2 若球 $S(X, r)$ 的球心 X 位于半球 $HS(O, \rho)$ 的球面上, 其中 $r \leq \rho$, X 的球坐标为 (ρ, θ, φ) , 且 ρ 为点 X 到球坐标系原点 O 的距离、 θ 为方位角、 φ 为仰角。则球 $S(X, r)$ 与半球 $HS(O, \rho)$ 公共部分的体积为:

$$V_{hs}(\rho, r, \varphi) =$$

$$\begin{cases} V_{hs1}(\rho, r, \varphi) & 0 \leq \varphi < 2\arcsin(r/(2\rho)) \\ V_{hs2}(\rho, r, \varphi) & 2\arcsin(r/(2\rho)) \leq \varphi < \arcsin(r/\rho) \\ V_{hs3}(\rho, r, \varphi) & \arcsin(r/\rho) \leq \varphi \leq \pi/2 \end{cases}$$

其中,

$$\begin{aligned}
V_{hs1}(\rho, r, \varphi) &= (8\pi\rho r^3 - 3\pi r^4)/(12\rho) - V_l(r, r - \rho \sin \varphi, \\
&\rho(\cos \varphi' - \cos \varphi) + \sqrt{r^2 - \rho^2 \sin^2 \varphi}) - \\
&\pi(\rho - \rho \cos \varphi')^2(2\rho + \rho \cos \varphi')/6 \\
V_{hs2}(\rho, r, \varphi) &= (8\pi\rho r^3 - 3\pi r^4)/(12\rho) - \\
&\pi(\rho - \rho \sin \varphi)^2(2r + \rho \sin \varphi)/3 \\
V_{hs3}(\rho, r, \varphi) &= (8\pi\rho r^3 - 3\pi r^4)/(12\rho)
\end{aligned}$$

式中, $\varphi' = \arccos((2\rho^2 - r^2)/(2\rho^2)) - \varphi$ 。

证明: 球 $S(X, r)$ 与半球 $HS(O, \rho)$ 公共部分的体积与点 X 的方位角 θ 无关。

首先选择投影平面 PL , 平面 PL 与两个球心的连线 XO 平行, 且垂直于半球 $HS(O, \rho)$ 的底平面。当仰角 φ 取不同的数值时, 球 $S(X, r)$ 与半球 $HS(O, \rho)$ 在平面 PL 上的投影示意图分别如图3~5所示。

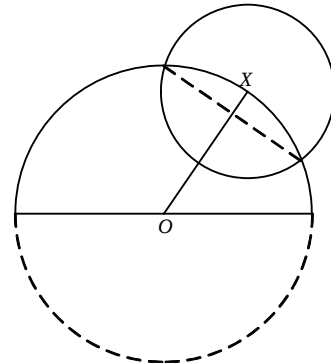


图3 $\arcsin(r/\rho) \leq \varphi \leq \pi/2$ 时的投影图

1) 当 $\arcsin(r/\rho) \leq \varphi \leq \pi/2$ 的情形。通过简单的几何运算可知, 半球 $HS(O, \rho)$ 和球 $S(X, r)$ 的底平面至多只存在一个交点。因此, 二者的公共部分为

两个球缺的组合, 则有:

$$\begin{aligned} V_{hs3}(\rho, r, \varphi) = & \pi(r - (r^2/(2\rho)))^2(3r - (r - (r^2/(2\rho))))^2/3 + \\ & \pi(r^2/(2\rho))^2(3\rho - r^2/(2\rho))/3 = \\ & (8\pi\rho r^3 - 3\pi r^4)/(12\rho) \end{aligned} \quad (7)$$

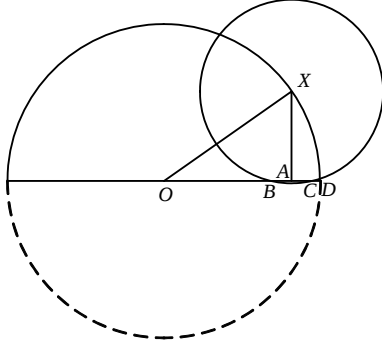


图4 $2\arcsin(r/(2\rho)) \leq \varphi < \arcsin(r/\rho)$ 时的投影图

2) 当 $2\arcsin(r/(2\rho)) \leq \varphi < \arcsin(r/\rho)$ 的情形。在投影图4中, 圆 $C(X, r)$ 和 OD 的连线有两个交点。因此, 半球 $HS(O, \rho)$ 和球型 $S(X, r)$ 的公共部分的体积为两个球缺的体积之差, 则有:

$$\begin{aligned} V_{hs3}(\rho, r, \varphi) = & (8\pi\rho r^3 - 3\pi r^4)/(12\rho) - \\ & \pi(r - \rho \sin \varphi)^2(3r - (r - \rho \sin \varphi))/3 = \\ & (8\pi\rho r^3 - 3\pi r^4)/(12\rho) - \\ & \pi(r - \rho \sin \varphi)^2(2r + \rho \sin \varphi)/3 \end{aligned} \quad (8)$$

3) 当 $0 \leq \varphi < 2\arcsin(r/(2\rho))$ 的情形。在投影图5中, 圆 $C(X, r)$ 和 OE 的连线有一个交点。此时, 半球 $HS(O, \rho)$ 和球 $S(X, r)$ 的公共部分的体积为两个球 $S(O, \rho)$ 和 $S(X, r)$ 公共部分的体积减去阴影部分所对应的切割体的体积。假设点 D 的极坐标为 $(\rho, -\varphi')$, 根据三角余弦定理可得:

$$\varphi' = \arccos((2\rho^2 - r^2)/(2\rho^2)) - \varphi \quad (9)$$

根据引理1可知, 阴影部分 ABD 所对应的切割体

$$\begin{aligned} \Pr(B(X_i) = 1) = & \iiint_{\Omega} \rho^2 \cos \varphi \exp(-V_{hs}(\rho, r, \varphi)\lambda)/(2\pi R^3/3) d\rho d\theta d\varphi = \\ & 3 \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\pi/2} \int_r^R \rho^2 \exp(-V_{hs}(\rho, r, \varphi)\lambda) \cos \varphi d\rho d\varphi / (2\pi R^3) = \\ & R^3 \int_0^{\pi/2} \int_r^R \rho^2 \exp(-V_{hs}(\rho, r, \varphi)\lambda) \cos \varphi d\rho d\varphi / 3 = 3h_{hs}(r)/R^3 \end{aligned} \quad (13)$$

定理得证。

基于定理1和定理2, 关于临界传输半径, 存在下列定理:

定理3 对于半球型3D传感器网络 $HS(X_{bs}, R)$ 而言, 若给定一个预设的可达率阈值 $\Pr^{\text{th}}$ ($0 < \Pr^{\text{th}} < 1$), 半球型3D传感器网络的临界传输半径 $r^c(\Pr^{\text{th}})$ 满足关系式:

$$r^c(\Pr^{\text{th}}) \leq r^{\text{hs}} = \inf\{r | h_{hs}(r) \leq (1 - \Pr^{\text{th}})/(2\pi\lambda)\}$$

的体积为:

$$V_{ABD} = V_l(r, r - \rho \sin \varphi, \rho(\cos \varphi' - \cos \varphi) + \sqrt{r^2 - \rho^2 \sin^2 \varphi}) \quad (10)$$

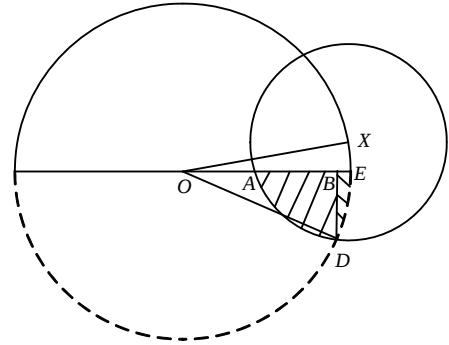


图5 $0 \leq \varphi < 2\arcsin(r/(2\rho))$ 时的投影图

而阴影部分 BDE 对应于半个球缺, 故其体积为:

$$V_{BDE} = \pi(\rho - \rho \cos \varphi')^2(2\rho + \rho \cos \varphi')/6 \quad (11)$$

综合式(10)、(11)可得:

$$\begin{aligned} V_{hs1}(\rho, r, \varphi) = & (8\pi\rho r^3 - 3\pi r^4)/(12\rho) - \\ & V_l(r, r - \rho \sin \varphi, \rho(\cos \varphi' - \cos \varphi) + \sqrt{r^2 - \rho^2 \sin^2 \varphi}) - \\ & \pi(\rho - \rho \cos \varphi')^2(2\rho + \rho \cos \varphi')/6 \end{aligned} \quad (12)$$

引理得证。

基于引理2, 关于空洞节点概率, 存在下列定理。

定理2 对于半球型3D传感器网络 $HS(X_{bs}, R)$ 而言, 空洞节点概率 $\Pr(B(X_i) = 1)$ 满足关系式 $\Pr(B(X_i) = 1) = 3h_{hs}(r)/R^3$, 其中有:

$$h_{hs}(r) = \int_0^{\pi/2} \int_r^R \rho^2 \exp(-V_{hs}(\rho, r, \varphi)\lambda) \cos \varphi d\rho d\varphi$$

证明: 不失一般性, 假设 X_{bs} 在球坐标系中的坐标为 $(0, 0, 0)$ 。显然, 若球 $S(X_i, r)$ 与半球 $HS(X_{bs}, \rho)$ 的公共区域内无其他传感器节点, 则传感器 X_i 为空洞节点, 其中 $\rho > r$ 为 X_i 与 X_{bs} 之间的距离。则有:

证明: 基于定理1可知:

$$\Pr^{\text{GD}} \geq 1 - 2\pi R^3 \lambda \Pr(B(X_i) = 1)/3 \quad (14)$$

因此, 要使 $\Pr^{\text{GD}} \geq \Pr^{\text{th}}$, 只需要保证下式成立, 有:

$$1 - 2\pi R^3 \lambda \Pr(B(X_i) = 1)/3 \geq \Pr^{\text{th}} \quad (15)$$

根据定理2, 化简式(15)可得:

$$h_{hs}(r) \leq (1 - \Pr^{\text{th}})/(2\pi\lambda) \quad (16)$$

根据函数的单调性定义易知 $h_{hs}(r)$ 为严格单调

递减函数, 因此只要下式成立, 即:

$$r \geq r^{hs} = \inf\{r \mid h_{hs}(r) \leq (1 - \text{Pr}^{th})/(2\pi\lambda)\} \quad (17)$$

就可以保证 $\text{Pr}^{GD} \geq \text{Pr}^{th}$ 。

定理得证。

3 数值求解方法

基于定理3可知, 临界传输半径的上界依赖于函数 $h_{hs}(r)$, 然而由于该函数的复杂性, 难以求得精确的解析解。为此, 基于函数 $h_{hs}(r)$ 的特性, 可以采用二分法数值求解方法进行求解。

定理 4 定义 $m(r) = h_{hs}(r) - (1 - \text{Pr}^{th})/(2\pi\lambda)$, 则 $m(r)$ 为严格单调递减函数, 且 $m(r) = 0$ 在区间 $(0, R]$ 内有唯一解。

证明: 根据函数的单调性定义易知 $m(r)$ 为严格单调递减函数。

$$\begin{aligned} m(0^+) &= \lim_{r \rightarrow 0^+} h_{hs}(r) - (1 - \text{Pr}^{th})/(2\pi\lambda) = \\ &= \lim_{r \rightarrow 0^+} \int_0^{\pi/2} \int_r^R \rho^2 \exp(-V_{hs}(\rho, r, \varphi)) \cos \varphi d\rho d\varphi - \\ &= (1 - \text{Pr}^{th})/(2\pi\lambda) = R^3/3 - (1 - \text{Pr}^{th})/(2\pi\lambda) \quad (18) \end{aligned}$$

半球型3D传感器网络 $HS(X_{bs}, R)$ 内传感器的数目远远大于1, 因此 $2\pi R^3\lambda/3 > 1$ 。

同时, 由于 $0 < \text{Pr}^{th} < 1$, 所以 $m(0^+) > 0$ 。

$$\begin{aligned} m(R) &= \int_0^{\pi/2} \int_R^R \rho^2 \exp(-V_{hs}(\rho, r, \varphi)) \cos \varphi d\rho d\varphi - \\ &= (1 - \text{Pr}^{th})/(2\pi\lambda) = -(1 - \text{Pr}^{th})/(2\pi\lambda) < 0 \quad (19) \end{aligned}$$

因此可得 $m(0^+)m(R) < 0$; $m(r) = 0$ 在区间 $(0, R]$ 内有唯一解。

根据定理1可知, 可以用二分法求解方程 $m(r) = 0$ 在区间 $(0, R]$ 内的根, 且该方程的根即为 r^{hs} 。限于篇幅, 不再赘述。

4 仿真实验

本文对临界传输半径上界的正确性和严密性予以检验。在实验中假设有1 000个传感器均匀分布在半个单位球内 $HS(X_{bs}, R)$, 即 $4\pi R^3/3 = 1$ 。进一步设定所有传感器具有相同的传输半径。并设定若干个传输半径, 对于每个传输半径重复实验1 000次, 并统计所有传感器都能通过贪婪算法把数据传送至基站的次数, 再把该统计数据除以1 000作为该传输半径下仿真实验的可达率。同时, 分别设定若干个可达率, 对于每个设定的可达率, 根据定理1计算其对应

的临界传输半径的理论上限。二者的曲线如图6所示。

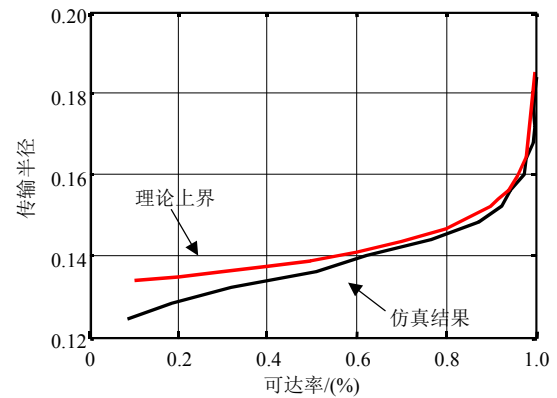


图6 半球型3D传感器网络中传输半径与可达率的关系
针对本文的实验数据总结如下:

1) 对于可达率较高的情况, 本文推导出的临界传输半径的理论上限非常接近于仿真实验的临界传输半径; 当可达率数值较小时, 本文推导的临界传输半径的理论上限略大于仿真实验的临界传输半径。证实了理论推导的正确性与良好的严密性。

2) 当可达率达到一定数值时, 随着可达率的增大, 所需要的临界传输半径急剧增长。说明一个过高设置的可达率阈值 Pr^{th} (如 $> 99.9\%$) 需要过大的传输半径, 不利于3D传感器网络的实际部署。

5 结束语

本文分析了半球型3D传感器网络中贪婪算法的可达性问题。基于概率理论, 首先将半球型3D传感器网络中贪婪算法的可达率与传感器传输半径之间的关系定义为一个数学问题, 随后推导出了临界传输半径的理论上限。仿真实验数据验证了理论上限的正确性与严密性, 这些结论为部署3D传感器网络提供了技术依据。

参考文献

- [1] AKYILDIZ I F, POMPILI D, MELODIA T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges[J]. Ad hoc Networks, 2005, 3(3): 257-279.
- [2] VASILESCU I, KOTAY K, RUS D, et al. Data collection, storage, and retrieval with an underwater sensor network[C]//SenSys'05: Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York, NY, USA: ACM, 2005.
- [3] PARTAN J, KUROSE J, LEVINE B N. A survey of practical issues in underwater networks[J]. SIGMOBILE Mob Comput Commun Rev, 2007, 11(4): 23-33.

- [4] SYED A, YE W, HEIDEMANN J. T-lohi: a new class of MAC protocols for underwater acoustic sensor networks[C]//INFOCOM'08. Phoenix, AZ, USA: IEEE, 2008.
- [5] HSU C C, LAI K F, CHOU C F, et al. St-mac: A spatialtemporal MAC scheduling for underwater sensor network[C]//INFOCOM 2009. Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2009.
- [6] LEE U, WANG P, NOH Y, et al. Pressure routing for underwater sensor networks[C]//INFOCOM 2010. San Diego, CA, USA: IEEE, 2010.
- [7] ZHOU Z, CUI J H, BAGTZOGLOU A. Scalable localization with mobility prediction for underwater sensor networks[C]//INFOCOM 2008. Phoenix, AZ, USA: IEEE, 2008.
- [8] FREY H, STOJMENOVIC I. On delivery guarantees of face and combined greedy-face routing in Ad hoc and sensor networks[C]//MobiCom'06. Los Angeles, CA, USA: ACM, 2006.
- [9] DUROCHER S, KIRKPATRICK D, NARAYANAN L. On routing with guaranteed delivery in three-dimensional Ad hoc wireless networks[J]. *Wireless Networks*, 2010, 16(1): 227-235.
- [10] XING G, LU C, PLESS R, HUANG Q. On greedy geographic routing algorithms in sensing-covered networks[C]//MobiHoc'04. New York, NY, USA: ACM, 2004.
- [11] WAN P J, YI C W, YAO F, et al. Asymptotic critical transmission radius for greedy forward routing in wireless Ad hoc networks[C]//MobiHoc'06. New York, NY, USA: ACM, 2006.
- [12] WANG L, YI C W, YAO F. Improved asymptotic bounds on critical transmission radius for greedy forward routing in wireless Ad hoc networks[C]//MobiHoc'08. New York, NY, USA: ACM, 2008.
- [13] YANG Ya-ling, LI Yu-jun, HOU meng-shu. Many-to-one deliverability of greedy routing in 2D wireless sensor networks[C]//INFOCOM 2011. Shanghai, China: IEEE, 2011.
- [14] WANG Y, YI C W, LI F. Delivery guarantee of greedy routing in three dimensional wireless networks[C]//WASA'08: Proceedings of the Third International Conference on Wireless Algorithms, Systems, and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [15] LI Yu-jun, YANG Ya-ling. Deliverability of greedy routing in underwater sensor networks[C]// ICCET 110. Chengdu, China: IEEE, 2010.
- [16] ROSS S M. Introduction to probability models[M]. 9th ed. Burlington, MA, USA: Academic Press, 2006.

编辑 黄 莘