

一种物联网框架下传感节点间跳数与距离关系的研究

于樊鹏¹ 牛延超²

(北京交通大学信息中心 北京 100044)¹ (爱立信(中国)通信有限公司 北京 100102)²

摘要 研究对数阴影衰落模型的无线传感器节点间跳数与距离关系的问题。随机部署在圆形区域内的节点位置服从 Poisson 分布,节点间自组织构成连通网络。借助于对数阴影衰落模型特征和节点分布规律,给出了已知节点间跳数的跳数概率分布表达式,同时考虑了多跳依赖问题对分布表达式的影响;基于贝叶斯公式,推导出已知跳数信息的距离分布关系,并进行了实验分析与验证。结果表明,理论的推导结论与实验统计结果具有较好的一致性。

关键词 物联网,无线传感器网络,对数阴影衰落模型,跳数与距离关系

中图分类号 TP212.9 文献标识码 A

Evaluation of Hop-distance Relationship for Sensor Networks in Internet of Things

YU Fan-peng¹ NIU Yan-chao²

(Information Center, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)¹

(Ericsson(China) Communications Company Limited, Beijing 100102, China)²

Abstract This paper presented an analytical method to evaluate the hop-distance relationship for wireless sensor network in a shadow fading environment, where sensor nodes are randomly and independently deployed in a circular region by a Poisson process. Different from the UDG model, the shadow fading model has the non-uniformity property for connectivity. We derived an approximate recursive expression of the probability of the hop count by a given geographic distance. The multi-hop dependence problem was also taken into consideration. Furthermore, we gave the expressions about the distribution of distance by a known hop count by the Bayes' formula. The simulation results show that the analytical expressions can closely agree with the statistical data and the border effects cannot be ignored.

Keywords Internet of things, Wireless sensor networks, Shadow fading model, Hop-distance relationship

1 引言

随着无线通信业务需求的增长和社会信息化进程的加速,物联网(The Internet of Things)^[1]已经成为当前信息领域的研究热点。通过不同的信息传感设备,物联网能够按照特定的协议实现物与物之间的信息交换,并与现有互联网相互融合。无线传感器网络是物联网的重要组成部分,它的快速部署、自组织、动态协作等特性使其具有得天独厚的技术优势和广阔的应用前景。

无线传感器网络通常由大规模、低成本、微型化的传感器节点组成,节点之间采用无线多跳的通信方式,协作地感知和处理目标区域内的信息,这种无基础设施和自组织的特性使其在环境监测、军事侦察、地质勘探等领域有着广阔前景和实际应用价值。受成本、硬件资源等限制,在这些应用场景中如何优化设计传感器节点的网络协议成为当前至关重要的研究问题。节点间的跳数信息与对应的几何距离之间的关系是“无线传感器网络节点信息传输到达指定距离需要中继节点数量”的量化指标,能够提高地理信息路由^[2]、定位算法^[3]、拓扑控制^[4]等协议性能,降低通信开销和能量损耗,减少协议设

计的复杂性。

基于物联网框架下的传感节点多采用随机抛撒的部署方式,节点间跳数与距离的关系也具有随机特性,与节点密度、节点通信半径等因素有关,因此无法采用简单的几何关系进行推导。现有的跳数与距离关系的研究方法^[5-8]均假设节点采用理想的单位圆网络模型^[4](Unit Disk Graph, UDG)进行通信,即两个传感器节点当且仅当其几何距离小于固定的通信半径时才能够进行信息交互。然而在实际应用中,节点之间并不存在一个固定的理想化通信门限。本文假设传感器节点处于对数阴影衰落的环境^[9]中,即当节点*i*和*j*的相对距离为*d_{ij}*时,节点*j*接收节点*i*发送的功率*P_{ji}*满足以下关系:

$$10\log_{10}\left(\frac{P_{ji}}{P_{th}}\right) = 10\log_{10}\left(\frac{d_{ij}}{d_{max}}\right)^{-n_p} + X_s \quad (1)$$

式中,*P_{th}*表示在理想情况下,最大距离为*d_{max}*的节点能够相互通信的最小门限。*N_p*表示路径损耗指数,*X_s*为服从高斯分布的阴影衰落随机变量,*X_s*~*N*(0,σ)。若两节点能够建立直接通信链路,则要求*P_{ji}*>*P_{th}*,即 $10\log_{10}\left(\frac{d_{ij}}{d_{max}}\right)^{-n_p} + X_s > 0$ 。从而很容易得到两节点建立通信链路的概率*p_L*:

$$p_L = \frac{1}{2} [1 - \text{erf}\left(\frac{\alpha}{\eta} \ln(\bar{d}_{ij})\right)] \quad (2)$$

到稿日期:2011-04-12 返修日期:2011-06-25 本文受国家自然科学基金(60972010)资助。

于樊鹏(1978-),男,博士,工程师,主要研究方向为信息网络安全、物联网和无线通信网络,E-mail: yufp@bjtu.edu.cn;牛延超(1981-),男,博士,工程师,主要研究方向为物联网和无线通信网络。

式中, $\alpha = \frac{10}{\sqrt{2 \ln(10)}}$, $\eta = \frac{\sigma_s}{n_p}$, $\bar{d}_{ij} = \frac{d_{ij}}{d_{\max}}$ 。函数 $\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-x^2) dx$ 为高斯误差函数。

基于上述关系, 本文研究对数阴影衰落模型下节点跳数与距离的关系。首先, 给出了已知距离的两节点间跳数分布的计算公式, 结合仿真实验的统计数据 and 贝叶斯公式, 推导出已知跳数信息的节点间距的分布表达式; 最后实现计算公式与仿真统计结果的对比验证。本文提出对数阴影衰落模型下节点跳数与距离的关系, 从而解决了 UDG 模型在实际环境中的应用性能很差这一问题, 增加了无线传感器网络的“实用性”和“可靠性”。

2 已知距离的节点间跳数的概率分布

假设 N 个传感节点随机分布在半径为 R_b 的圆形区域 S_b 内, 节点的位置信息服从参数为 $\lambda = N/S_b = N/(\pi R_b^2)$ 的泊松分布。无线传感器网络跳数与距离的关系具有随机特征, 忽略边界条件的影响, 本文假设任意两节点 O_1 和 O_2 的间距为 d , 跳数值为 h , 那么已知距离的节点间跳数的概率分布为 $\Phi_h(d)$ 。

当 $h=1$ 时, 根据上述对数阴影衰落的模型, 节点 O_1 和 O_2 如果存在直接通信链路, 那么 $\Phi_1(d)$ 必须满足:

$$\Phi_1(d) = p_L = \frac{1}{2} [1 - \text{erf}(\frac{\alpha}{\eta} (\frac{d}{d_{\max}}))] \quad (3)$$

2.1 不考虑多跳依赖问题的 $\Phi_h(d)$ 分布

当跳数值 $h \geq 2$ 时, 节点 O_1 和 O_2 只能通过 $h-1$ 跳的中继节点进行通信, 则其包含两部分内容: (a) 节点 O_2 不是 O_1 的 m 跳邻居 ($m < h$); (b) 在节点 O_2 的通信范围内, 至少有一个节点 O_1 的 $h-1$ 跳邻居, 且与 O_2 存在直接的通信链路。

首先, 设节点 O_2 不是节点 O_1 的 m ($m < h$) 跳邻居的概率为 p_N :

$$p_N = 1 - \sum_{m=1}^{h-1} \Phi_m(d) \quad (4)$$

其次, 定义概率 $p_r(S)$ 表示为分布区域内不存在节点 O_1 的 $h-1$ 跳邻居能与 O_2 构成一跳链路的节点的概率, S 表示分布区域的大小, 即以 O_1 为圆心、距离 r 为半径的圆与以 O_2 为圆心、距离 r_2 为半径的圆相交部分的面积, 如图 1 所示。假设多跳节点间的 $\Phi_h(d)$ 分布是独立的, 即相对于节点 O_1 , O_2 的 $\Phi_h(d)$ 分布独立于其它节点与 O_1 间距为 d 跳数值为 h 的概率分布, 那么在距离 r 的基础上增加微分增量 dr , 给定差分面积 dS , $P_r(s+dS)$ 可以计算为 $P_r(S) \times P_r(dS)$ 。将 dS 分成很多微分区域 $rdrd\theta$ 。由于 dr 和 $d\theta$ 都是微分小量, 因此节点落在该区域的概率近似为 $\lambda rdrd\theta$, 且多于一个节点位于该区域的概率可以忽略不计。

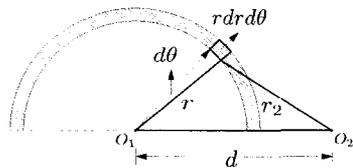


图 1 节点 O_1 和 O_2 间距 d 的几何情况

如图 1 所示, 本文通过 $d\theta$ 对进行累加, 概率 $P_r(dS)$ 可以表示为:

$$P_r(dS) = 1 - \lambda \int_0^{2\pi} \Psi_{h-1}(r) r dr \int_0^{\pi} \Psi_1(r_2) d\theta \quad (5)$$

式中,

$$r_2 = \sqrt{r^2 + d^2 - 2rd \cos\theta} \quad (6)$$

考虑到 $P_r(dS)$ 是 r 的函数, 设 $P_r(dS) = 1 - g(r)$, 则由 $P_r(S+dS) = P_r(S) P_r(dS)$ 可得 $P_r(S+dS) = P_r(S) \cdot (1 - g(r))$, 根据线性微分方程求解可以得到 $P_r(S)$, 如式(7)所示。

$$P_r(S) = \exp(-\int_0^S g(r) dr) \quad (7)$$

因此, 综合式(4)和式(7), 当跳数 $h \geq 2$ 时, 概率 $\Phi_h(d)$ 可以表示为:

$$\Phi_h(d) = (1 - \sum_{i=1}^{h-1} \Phi_i(d)) \times (1 - \exp(-2\lambda \int_0^{\infty} \int_0^{\pi} \Psi_{h-1}(r) \Psi_1(r_2) r dr d\theta)) \quad (8)$$

2.2 多跳依赖问题

式(8)所示 $\Phi_h(d)$ 的计算是基于多跳节点间独立性假设给出的, 然而当 $h > 2$ 时, 节点计算 $\Phi_{h-1}(r)$ 存在着依赖关系, 如图 2 所示。 O_1 和 O_2 相距 d , 跳数为 $h=3$, M_1 (或者 M_2) 是 O_1 的两跳邻居概率为红色边界的斜线 S_1 区域 (或者蓝色边界的反斜线 S_2 区域) 至少存在一个节点能够与 O_1 和 M_1 (或者 M_2) 直接通信; 而 S_1 和 S_2 存在共同的网状区域 S_{12} , 因此, 用 M_1 和 M_2 来计算 O_2 为 O_1 三跳邻居的概率不再独立。本文通过增加系数 $\xi(h)$ 来缓解这种多跳依赖问题, 则式(8)变成:

$$\Phi_h(d) = (1 - \sum_{i=1}^{h-1} \Phi_i(d)) \times (1 - \exp(-2\lambda \xi(h) \int_0^{\infty} \int_0^{\pi} \Psi_{h-1}(r) \Psi_1(r_2) r dr d\theta)) \quad (9)$$

$\xi(h)$ 值是使其与仿真实验的统计数据的差值最小来获得。多次进行仿真实验, 统计位于不同区域的节点统计的跳数和距离的数据 Sim_h 。计算累积绝对误差 (CAD, Cumulative Absolute Difference), $\text{CAD} = \sum_d |\Phi_h(d) - \text{Sim}_h|$, 获得最合适的 $\xi(h)$ 。

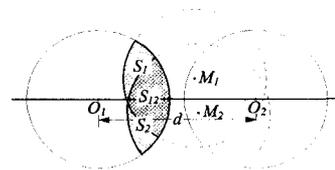


图 2 多跳依赖问题图示

3 已知跳数的距离分布情况

本文假设节点随机部署在半径为 R_b 的圆形区域内, 那么由几何关系可以得到任意两节点间的距离 D 的概率密度函数为 $f_D(d)$:

$$f_D(d) = \frac{d}{\pi R_b^2} (4R_b^2 \arccos(\frac{d}{2R_b}) - d \sqrt{4R_b^2 - d^2}) \quad (10)$$

根据贝叶斯公式, 由节点间距的概率密度函数 $f_D(d)$ 和已知距离的跳数概率分布 $\Phi_h(d)$ 可以得出已知节点间距的跳数 H 概率密度函数 $f_H(d)$, 如式(11)所示。

$$f_H(d) = \frac{\Phi_h(d) f_D(d)}{\int_0^{\infty} \Phi_h(x) f_D(x) dx} \quad (11)$$

4 仿真分析与性能评估

为了验证本文提出的节点跳数与距离关系的分析方法,在 Matlab 上进行仿真对比分析,取 $N=400$, $R_b=200$, $d_{max}=50$, $\sigma_s=4.0$ 和 $n_p=3.0$ 。参数 $\xi(h)$ 的值如表 1 所列,概率分布密度如图 3 所示,直线表示式(11)的理论推导数据,‘ ∇ ’表示实验统计值。虽然当 $h=6$ 时受到边界效应的影响,结果略有差异,但图 3 的实验仿真数据和理论分析值表现出很好的一致性。给定任意两节点间的跳数,本文提出的方法可以有效地估计出距离的概率分布情况。

表 1 $\xi(h)$ 的取值

| h | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------|---|---|------|------|------|------|
| $\alpha(h)$ | 1 | 1 | 0.82 | 0.78 | 0.63 | 0.54 |

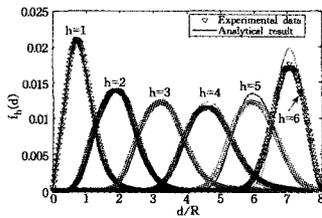


图 3 概率密度函数 $f_H(d)$ 实验数据与理论推导对比

结束语 传感节点的跳数与距离的关系信息对物联网的协议设计有着重要的意义。然而,目前大多数的研究集中在 UDG 模型,与实际网络环境不符。本文基于对数阴影衰落模型重新分析物联网框架下传感器节点间跳数与距离的关系,给出相应的概率分布表达式,并充分考虑多跳节点依赖问题。仿真结果表明,本文提出的计算表达式与实际仿真结果具有很好的一致性,增强了物联网应用的“实用性”和“可靠性”。

参考文献

[1] Presser M, et al. The SENSEI project: integrating the physical world with the digital world of the network of the future[J].

Communications Magazine, IEEE, 2009, 47: 1-4

[2] Zorzi M, Rao R R. Geographic random forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: multihop performance[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2003, 2(4): 337-348

[3] Sheu Jang-ping, Chen Pei-chun, Hsu C-S. A Distributed Localization Scheme for Wireless Sensor Networks with Improved Grid-Scan and Vector-Based Refinement[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(9): 1110-1123

[4] Chen Jia-ner, Jiang An-xiao, Kanj I A, et al. Separability and Topology Control of Quasi Unit Disk Graphs[C]// INFOCOM 2007. 26th IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE, 2007: 2225-2233

[5] Bettstetter C, Eberspacher J. Hop distances in homogeneous ad hoc networks[C]// Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Spring, The 57th IEEE Semiannual, volume 4, 2003: 2286-2290

[6] Li Z, Trappe W, Zhang Y, et al. Robust statistical methods for securing wireless localization in sensor networks[C]// Proc. of the Int'l Symp. on Information Processing in Sensor Networks. Washington: IEEE Computer Society Press, 2005: 91-98

[7] Ta Xiao-yuan, Mao Guo-qiang, Anderson B D O. Evaluation of the probability of k-hop connection in homogeneous wireless sensor networks[C]// Global Telecommunications Conference, 2007. GLOBECOM '07. IEEE, 2007: 1279-1284

[8] Dulman S, Rossi M, Havinga P, et al. On the hop count statistics for randomly deployed wireless sensor networks[J]. Int. J. Sen. Netw., 2006, 1(1/2): 89-102

[9] Zhao Liang, Liang Qi-lian. Hop-distance estimation in wireless sensor networks with applications to resources allocation[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2007: 8

[10] Bettstetter C, Hartmann C. Connectivity of wireless multihop networks in a shadow fading environment[J]. Wireless Networks, 2005, 11(5): 571-579

(上接第 103 页)

是对传统蜜网体系结构的重要扩充。研究分析蜜网核心功能在虚拟系统中的具体实现,对提高蜜网的安全性,改善蜜网的体系结构起着十分重要的作用。本文首先对虚拟蜜网中的核心功能进行分析,在此基础上给出了具体实现模型,并设计了测试用例,对建立的虚拟蜜网进行测试。实验及其结果表明,使用虚拟技术构建蜜网,不仅可以较好地实现蜜网的各项功能,而且可以最大程度地利用硬件资源并降低管理和配置难度。今后的工作是进一步研究和分析虚拟蜜网的核心功能,完善虚拟蜜网中的不足之处,并在规模更大、结构更复杂的网络环境下进行测试。

参考文献

[1] Project H. Know Your Enemy: Honeynets [EB/OL]. <http://old.honeynet.org/papers/honeynet/>, 2006-05-31

[2] Jason Chang C-H, Tsai Y-L. Design of Virtual HoneyNet Collaboration System in Existing Security Research Networks[C]// Communications and Information Technologies. Tokyo, 2010: 798-803

[3] Project H, Alliance R. Know Your Enemy: Honeywall CDROM

Roo [EB/OL]. <http://old.honeynet.org/papers/cdrom/roo>, 2005-08-17

[4] Shuja F A. Virtual HoneyNet: Deploying Honeywall Using Vmware [EB/OL]. <http://www.honeynet.pk/honeywall/index.html>, 2008-06

[5] 诸葛建伟. 蜜罐及蜜网技术简介 [EB/OL]. <http://www.honeynet.org.cn/reports>, 2004-10-15

[6] Abbasi F H, Harris R J. Experiences with a Generation III Virtual HoneyNet[C]// Telecommunication Networks and Applications Conference. Canberra, 2009: 1-6

[7] 北京大学计算机科学技术研究所 Artemis 项目组. 基于 Vmware-Workstation 的虚拟 HoneyNet 的部署实例 [EB/OL]. <http://www.icst.pku.edu.cn/honeynetweb/>, 2005-04-18

[8] Dornseif M, Freiling F C, Gedicke N, et al. Design and Implementation of the Honey-DVD [C]// Information Assurance Workshop. New York, 2006: 231-238

[9] 孙印杰, 王敏, 陈智芳. 解析蜜罐技术在网络安全方面的应用[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(7): 130-131

[10] Mware V. Workstation User's Manual [EB/OL]. <http://communities.vmware.com/docs/DOC-12156/version.2010-05>

[11] 冯朝晖, 范锐军, 张彤. HoneyNet 技术研究与实例配置[J]. 计算机工程, 2007, 33(5): 132-134