

基于邻居节点数目的洪泛概率计算方法^{*}

侯楠, 冯海林, 顾鑫

(西安电子科技大学理学院, 西安 710071)

摘要: 概率洪泛路由协议中洪泛概率的确定多依赖于实验, 缺乏理论性。在无线传感器网络中, 应用概率洪泛路由时, 每个传感器节点收发信息具有随机性, 在合理假设下, 将网络中信息传输过程建立为一个分支过程模型, 利用分支消亡概率和节点产生后代概率的关系, 给出一种基于邻居节点数目的洪泛概率计算方法, 在此基础上提出一种动态概率洪泛算法, 并以信息覆盖率与节点利用率的差值为标准评价了算法的性能。本方法较现有的其他方法对节点利用更加有效, 且对节点要求低, 适用于各种网络。

关键词: 无线传感器网络; 洪泛概率; 分支过程

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2010)09-3443-03

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2010.09.064

Calculation of flooding probability based on number of neighbor nodes

HOU Nan, FENG Hai-lin, GU Xin

(Dept. of Mathematics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In probabilistic flooding protocol, flooding probability is determined by experimental examinations, lacking of theory basis. In WSN, each node sends and receives messages randomly when probabilistic flooding protocol was applied. Based on reasonable hypothesis, could establish the process of information transmission as a branching process model. Using the relationship between extinction probability and generation probability of the process, obtained a valid flooding probability based on the number of neighbor nodes in fixed probabilistic flooding, and proposed a dynamic probabilistic flooding protocol. Furthermore, evaluated the performance of the approach by difference between the coverage-rate and the usage-rate of the nodes. The proposed method is more effective than calculations existed, low requirement on the nodes and for various networks.

Key words: wireless sensor networks(WSN); branching process; flooding probability

在众多的传感器网络路由协议中洪泛是一种基本的路由协议, 它实现简单, 无须为保持网络拓扑信息和实现复杂的路由发现算法而消耗计算资源, 算法健壮性较高。这些优点使得洪泛算法成为主要的网络路由算法, 成为众多无线网络路由协议的重要组成部分和实现基础。但洪泛算法同时也使得洪泛数据在转发过程中带有很大的盲目性, 造成大量冗余数据包, 占用有限带宽。因此人们提出很多改进方案, 包括基于概率的、计数的、距离的、位置和簇的^[1]。概率方案中节点依概率转发信息; 计数方案中当节点收到复制信息数目小于事先设定的阈值时转发信息; 距离方案中当源节点与目的节点之间的距离大于距离阈值时中间节点转发信息; 位置方案中当最新发射的新增覆盖区域大于界 A 时节点转发信息。本文主要研究概率洪泛路由协议。

概率洪泛是一种应用较广的改进协议, 当节点首次收到信息时, 依一定的概率 p 转发信息, 若非首次收到信息, 则不转发。概率洪泛在减少网络重播信息数目和减缓数据延迟方面都有很好的性能^[2]。由算法可见, 在稀疏的网络中, 需要较大的转发概率才能使得网络信息传输有效, 而在密集的网络中, 所需转发概率则较小。为调节节点密度与重传概率最优值之

间的反相关关系, 研究人员提出了动态概率洪泛协议。文献 [2] 对传统洪泛、固定概率洪泛, 以及动态概率洪泛的性能作了比较。结果表明, 与传统洪泛协议相比, 概率洪泛能在维持较高数据传输成功率的情况下减小重播次数, 其中动态概率协议比固定概率协议有更好的性能。

概率洪泛协议的关键问题是洪泛概率的确定, 目前主要通过实验结果估计。本文首先利用分支过程理论给出一种维持较高信息 Mes 覆盖率(在网络中洪泛信息, 固定步数后收到信息的节点比例)的固定概率洪泛协议洪泛概率的计算方法; 再将其应用于动态概率模型, 并在 Yao 图、G 图(gabriel graph)的拓扑结构下分析算法的性能。

1 相关工作

无论在有线网络还是无线网络, 概率洪泛都是一种重要的数据传输方式, 它能有效弥补传统洪泛所导致的数据大量冗余和资源浪费的不足, 已经引起人们的广泛关注。

文献 [3] 提出了 Ad hoc 网络的概率洪泛算法, 并对洪泛过程中信息传输成功率与洪泛概率的关系作了研究。实验表明, 在小型网络中洪泛概率与信息传输成功率呈线性关系; 在较大

收稿日期: 2010-03-19; **修回日期:** 2010-04-29 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60874085, 60974082); 综合业务网络理论与关键技术国家重点实验室专项基金(ISN02080003); 西安电子科技大学基本科研业务费(JY10000970012)

作者简介: 侯楠(1985-), 女, 山西长治人, 硕士, 主要研究方向为无线传感器网络路由协议及拓扑控制(houn.851010@163.com); 冯海林(1966-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为无线传感器网络路由协议、容错等; 顾鑫(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络拓扑控制。

型的网络中,信息传输成功率随着洪泛概率的变化呈现出一种相变现象,当转发概率大于 0.65 时网络中信息传输成功率可达到 90%。

文献[2]针对 Ad hoc 网络给出动态概率广播方法,每个节点依据其邻居区域节点密度设置重传概率;预先给定重传概率的最大值 $p_{\max} = 0.9$ 与最小值 $p_{\min} = 0.4$,当节点收到信息时,由其邻居节点数目计算重传概率 $p(i) = p_{\max} (p_{\max}^{nbr-1} - p_{\min}^{nbr}) / (1 - p_{\max})$ 。其中 nbr 为节点 i 的邻居节点数目。若 $p(i) < p_{\min}$,节点 i 的重传概率取 p_{\min} ;若 $p(i) > p_{\max}$,节点重传概率取 p_{\max} ;若 $p_{\min} < p(i) < p_{\max}$,节点重传概率取 $p(i)$ 。

文献[4]结合计数方案给出了动态概率协议中洪泛概率的确定方法;预先给定重传概率初始值 p 、广播数据副本数目临界值 N_c 以及微调参数 d, d_1 ,当节点 i 收到的信息副本数目 $N_i > N_c$ 时,重传概率 $p_i = p - d$,当 $N_i < N_c$ 时重传概率 $p_i = p + d_1$ 。

文献[5]提出了 Ad hoc 网络中一种基于计数的有效广播方案,此方案结合了计数和概率两种改进方案的思想。当节点收到新信息时,首先计算收到信息的副本数,一个随机的时间延迟后,当副本数目大于事先给定的临界值 C 时,节点丢弃信息;当副本数目小于临界值 C 时,节点依概率转发信息,利用已有的研究结果转发概率取 0.65。

现有概率洪泛路由协议中,洪泛概率初始值的确定多取自实验,本文利用无线传感器网络信息传输过程的马尔可夫性,给出了一种确定洪泛概率值的方法。

2 概率洪泛的分支过程模型

2.1 固定概率洪泛的分支过程模型

在面积为 D 的区域上随机放置 N 个节点,节点依某种拓扑算法形成一网络。记网络中节点 r 发送半径为 R_r ,且其邻居节点数目为 n_r 。设位于区域中心的节点为源节点,从源节点用概率洪泛方式传播信息到整个网络,记洪泛概率为 $p(0 \leq p \leq 1)$,即除源节点依概率 1 发送信息外,首次收到信息的节点依概率 p 转发信息。

取第一次广播中收到信息的某一个节点作为初始群体,记为 X_0 ,此后每次广播中节点彼此独立地依概率 p 产生 $k(0 \leq k \leq n, n = \max_{r \in N} \{n_r\})$ 个新的接收信息节点,记第 t 次广播网络中收到信息的新节点总数为 X_t ,则 $\{X_t\}$ 构成一列整数值随机变量,且是一个马尔可夫过程。设 r 是某次广播中转发信息的节点,收到由 r 广播的信息的新节点数目为 ξ_r ,并称其为节点 r 的后代。由传输过程知对网络中所有重传信息节点 r, ξ_r 是独立同分布随机变量,记其分布为

$$\Pr\{\xi_r = k\} = p_k, 0 \leq k \leq n_r, \sum_{k=0}^{n_r} p_k = 1$$

设初始群体由一个节点组成,即 $X_0 = 1$,显然,对每个 $t = 0, 1, 2, \dots$, 有 $X_{t+1} = \sum_{r=1}^{X_t} \xi_r$ 。可见,由以上定义网络中概率洪泛可建立为一分支过程。

2.2 洪泛概率的求解

事实上,信息传输过程中节点 r 的 n_r 个邻居节点均可收到节点 r 广播的信息,但其中一部分为已经收到信息的节点,下次广播不转发信息,其余首次收到信息的节点,下次广播中依概率转发信息,这时 ξ_r 的分布律不易求得。考虑到某节点 r 的各邻居节点是否收到信息是相互独立的随机事件,假设此分

布是参数为 $\lambda = n_r p$ 的 Poisson 分布。其中 p 为节点的转发概率。因此, ξ_r 的分布律为 $\Pr\{\xi_r = k\} = \frac{(n_r p)^k}{k!} e^{-n_r p}$ 。为求得分支过程的消亡概率,首先给出概率母函数的定义。

定义 1 对于仅取非负整数值的随机变量 X ,与特征值相对应的一个函数是母函数,其定义为

$$g(s) = \sum_{k=0}^{\infty} p_k s^k = E[s^X]$$

其中: $p_k = \Pr\{X = k\}$ 。

由母函数的定义知概率洪泛的分支过程概率母函数为

$$g(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(n_r p)^k}{k!} e^{-n_r p} s^k = e^{n_r p(s-1)} \quad (1)$$

分支过程的概率母函数与其消亡概率有着密切的关系,见定理 1。

定理 1 设 $\{X_n\}$ 为分支过程,其概率母函数为 $g(s)$,则 $g(s) = s$ 的根 μ 为此分支过程的消亡概率。

可见对于概率洪泛分支过程,式(1)的不动点 $\mu(g(s) = e^{n_r p(s-1)} = s$ 的解)则为分支的消亡概率。记 $\eta = 1 - \mu$ 为分支存在的概率,将 η 带入式(1)有

$$1 - \eta = e^{-n_r p \eta} \quad (2)$$

式(2)是一个隐函数方程,当网络中节点的邻居节点数目一定时,分支存在的概率 η 是洪泛过程中节点转发概率 p 的函数。在网络概率洪泛过程中,洪泛概率与网络信息覆盖率之间存在相变现象^[3]。即存在洪泛概率 p 的临界值 $p_c, p > p_c$ 时,网络信息覆盖率趋于 1。故在式(2)中,令 $\eta \rightarrow 1$,所得 p 的值即可作为网络洪泛概率的有效值。

由于 η 表示分支存在的概率,由式(2)可知, $\eta \neq 1$,为计算 $\eta \rightarrow 1$ 时的洪泛概率值,算法中给定 η 的特殊值。经过计算发现,在稀疏的网络中(邻居节点数目小于 10), η 取 0.97 可得转发概率最优值;在较稠密的网络中, η 取 0.995。

3 动态概率洪泛

利用分支理论计算洪泛概率的过程可知,分支存在概率趋于 1 时,节点产生后代的概率仅与其邻居节点数目有关。由此得到一种基于邻居节点数目的网络动态概率洪泛算法:若将要传播的信息记为 Mes,源节点必发送信息,动态概率洪泛算法可描述如下:

算法 1:

- a) 当节点 r 收到信息 Mes;
- b) 若节点 r 是首次收到信息 Mes,转 c); 否则,转 d);
- c) 计算其邻居节点数目 n_r ,令 $\eta \rightarrow 1$ 求解 $1 - \eta = e^{-n_r p \eta}$ 得到节点 r 的转发概率 p_r ,节点 r 依概率 p 转发信息 Mes;
- d) 停止。

4 仿真

设区域 D 的面积为 100,网络中节点数目服从参数为 λ_0 的 Poisson 分布,用 MATLAB 软件对结果进行仿真。取不同的 λ_0 和发送半径,由式(2)可得不同节点密度下网络洪泛概率值,进一步仿实现概率洪泛过程,并比较不同转发概率条件下的信息传输成功率和节点利用率。

1) 网络 N_1 以 Yao 图(分 6 个区域)方式构造网络拓扑,分支过程的 Poisson 分布参数可取为 $6 \times p$,式(2)变形为 $1 - \eta = e^{-6p\eta}$,得 $p > 0.6$ 时, $\eta \rightarrow 1$ 。

从实验结果可见,网络 N_1 中取洪泛概率 $p=0.6$ 时,网络即可达到较高的信息传输成功率。事实上,利用这种方法得到基于任何网络拓扑结构的有效洪泛概率值。

2) 网络 N_2 中 $\lambda_0=300$, 利用 GG (gabriel graph) 构造网络拓扑结构, 由于 GG 中的平均邻居节点数为 3.56, 为计算方便取 4, 并设式(2)中 $\eta=0.97$ 得 $p=0.9038$, 将 $p=0.9038$ 作为固定概率洪泛算法中的洪泛概率, 与动态概率洪泛算法比较。仿真结果如图 2 所示。

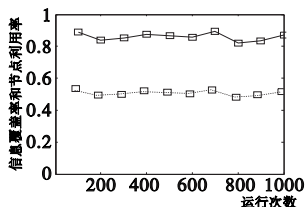


图1 网络拓扑为YC,节点数目服从参数为 $\lambda_0=100$ 的泊松分布

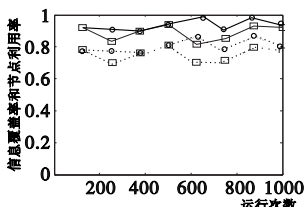


图2 网络拓扑为GG,节点数目服从参数为 $\lambda_0=300$ 的泊松分布

图 2 中实线方格表示动态概率洪泛过程的信息覆盖率, 虚线方格表示其转发概率; 实线圆表示固定概率洪泛过程中的信息覆盖率, 虚线圆表示其转发概率。

由图可见概率洪泛过程中, 随着转发概率的增大, 网络中信息覆盖率也在增大。由洪泛过程可知当网络中节点转发概率相等时, 算法性能越好, 则其信息覆盖率越高; 换言之, 信息覆盖率相等时, 算法性能越好则相应的转发概率越小。故利用信息覆盖率与转发概率之差 σ 来衡量算法性能的优劣。

图 3 中实线方格、圆分别表示动态、固定概率洪泛过程的信息覆盖率; 虚线方格、圆分别表示动态、固定概率洪泛过程的差值 σ 。

由图 3 可见, 动态概率洪泛算法在维持较高信息覆盖率的前提下对节点的利用更加有效。

3) 实验 3 对算法 1 和文献[2]中的动态算法作比较。

图 4 中实线方格、圆分别表示算法 1 和文献[2]动态概率洪泛过程的信息覆盖率; 虚线方格、圆分别表示两算法信息覆盖率与节点利用率的差值。从图中曲线可明显看出算法 1 的优越性。

另外从仿真实验可见, 将 ξ 的分布律近似成参数为 $\lambda = n, p$ 的 Poisson 分布是合理的。由计算过程可以得到, 对于任意一个网络拓扑, 只需得到节点的邻居节点数目, 合理设置参数 η

的值, 就可通过式(2)得到网络的洪泛概率。

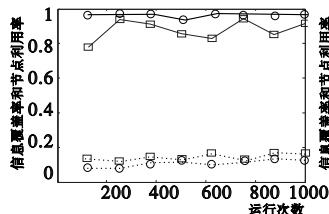


图3 网络拓扑为GG,节点数目服从参数为 $\lambda=300$ 的泊松分布

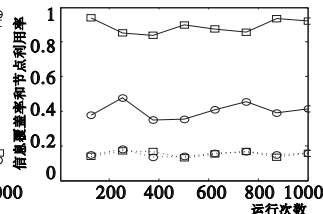


图4 动态概率洪泛

5 结束语

分支过程作为马氏过程的一种重要模型在医学、生物学以及生活的各个领域有着广泛的应用, 然而将分支过程用于传感器网络的研究却是一种新的应用。在传感器网络的应用中, 洪泛概率值的确定依然是一个值得深入探讨的问题。

参考文献:

- [1] TSENG Y C, NI S Y, CHEN Y S. The broadcast storm problem in a mobile Ad hoc network [J]. *Wireless Networks*, 2002, 8(2/3): 153-167.
- [2] HANASHI A M, SIDDIQUE A, AWAN I, et al. Performance evaluation of dynamic probabilistic broadcasting for flooding in mobile Ad hoc network [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2009, 17(2): 364-375.
- [3] SASSON Y, CAVIN D, SCHIPER A. Probabilistic broadcast for flooding in wireless mobile Ad hoc networks [R]. Technical Report IC, 2002: 1124-1130.
- [4] ZHANG Qi, AGRAWAL D P. Dynamic probabilistic broadcasting in MANETs [J]. *Journal Parallel Distributed Computing*, 2005, 65(2): 220-233.
- [5] MOHAMMED A, OULD-KHAOUA M, MAKENZIE L. An efficient counter-based broadcast scheme for mobile Ad hoc networks [J]. *LNCS*, 2007, 4748: 275-283.
- [6] TSENG Y, NI S, SHIH E. Adaptive approaches to relieving broadcast storms in a wireless multihop mobile Ad hoc network [J]. *IEEE Transactions Computer*, 2003, 52(5): 545-557.
- [7] 王汉兴, 方建超, 等. 马氏模型下移动自组网随选型路由协议特性分析 [J]. *应用数学和力学*, 2007, 28(1): 114-126.
- [8] 顾振亚, 郑宝玉. 生灭过程在 Ad hoc 网络中的应用 [C] // 通信理论与信号处理新进展——2005 年通信理论与信号处理年会论文集. 2005.
- [9] KARLIN S, TAYLOR H M. A first course in stochastic processes [M]. New York: Academic Press, 1975: 557.

(上接第 3442 页) PN 序列估计的影响, 而目前发表的论文却没有考虑这个影响因子。对于 DS 信号的 PN 码周期估计, 文献 [5] 中信噪比容限达到了 $SNR = -17.4$ dB, 但是其采用时域延迟相关累加的方法, 这将带来相关时延难以选取及计算机速度太慢等问题。本文通过仿真实验得到多用户 DS-UWB 信号的信噪比容限随着用户数目的增多而变小, 比如文中对 5 个用户 DS-UWB 信号的伪码周期估计信噪比容限做到 $SNR = -21$ dB, 10 个用户情况下 $SNR = -20$ dB, 这就表明此算法性能较好。而且, 此算法在同步和异步多用户 DS-UWB 信号的情况下性能相似。

参考文献:

- [1] ROMME J, PIAZZO L. On the power spectral density of time-hopping impulse radio [C] // Proc of IEEE UWBST. 2000: 241-244.
- [2] 王明阳. 非合作超宽带冲激无线电信号检测技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [3] 虞路勤, 张天骞, 李越雷, 等. 在多径环境下接收 DS-UWB 信号

- 的 PN 序列周期估计 [J]. *电讯技术*, 2009, 49(9): 16-22.
- [4] 张天骞, 周正中, 邱育军. 低信噪比长伪码直扩信号伪码周期的估计方法 [J]. *系统工程与电子技术*, 2007, 29(1): 12-16.
- [5] 谈满堂, 朱德君. 谱相关理论用于直接序列扩谱信号的检测与估计 [J]. *电子对抗*, 1995(4): 53-59.
- [6] 葛利嘉, 曾凡鑫, 刘郁林, 等. 超宽带无线通信 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [7] 张天骞, 林孝康, 周正中. 一种直扩信号伪码周期及序列的盲估计方法 [J]. *电波科学学报*, 2005, 20(3): 400-405.
- [8] TAHA A, CHUGG K M. On the power spectral density of wireless multiple-access UWB impulse radio under realistic propagation conditions [C] // Proc of IEEE International Conference on Communications. 2003: 1298-1302.
- [9] 张天骞, 杨柳飞, 代少升, 等. DS 信号伪码周期及码片速率估计的自相关法 [J]. *航天电子对抗*, 2007(4): 53-57.
- [10] 沈允春. 扩谱技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [11] 张天骞. DS 及 DS/CDMA 信号的估计方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2002.