

无线传感器网络最优搜索泛洪协议研究

于 秦¹ 王伟东² 秦志光² 毛玉明¹

(电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054)¹

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 610054)²

摘 要 泛洪是无线传感器网络中一种基本的方法,像拓扑形成、路由建立、目标探测或者数据查询等经常使用泛洪策略来实现。在泛洪策略的研究上,以前的研究大多关注于如何产生最优的广播树,同时假定节点之间的通讯是可靠的。然而,在实际的无线传感器网络环境中,这一目标并不是最有效的,而其假设更是不成立的。将最优搜索理论与分簇方法相结合,提出一种高效率的泛洪协议——最优搜索泛洪协议(OSFP),应用于无线传感器网络的目标探测。该泛洪协议既可应用于可靠的数据传输网络,也可应用于不可靠的数据传输网络。仿真结果表明,与其他泛洪协议相比,OSFP 可以最大化发现目标的概率而不增加其搜索代价。

关键词 目标探测,最优搜索理论,泛洪协议,分簇,无线传感器网络

中图法分类号 TP391 文献标识码 A

Optimal Search Flooding Protocol for Wireless Sensor Networks

YU Qin¹ WANG Wei-dong² QIN Zhi-guang² MAO Yu-ming¹

(School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China)¹

(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China)²

Abstract Flooding is a fundamental methodology in wireless sensor networks. Applications such as topology formation, route establishment, target detection or data query often use the flooding strategy to provide the solution. Most of previous research on efficient flooding strategies focuses on producing an optimal broadcast tree, with assumption that communications between all nodes are reliable. However, for real-world wireless sensor networks, this aim as well as the assumption may be inefficient. This paper proposed an efficient flooding protocol — Optimal Search Flooding Protocol (OSFP) for applications such as target detection in sensor networks. We took advantage of the clustering methodology and optimal search theory in the OSFP to achieve good performance. Our OSFP can be applied not only to the perfect data transmission network, but also to imperfect data transmission network. Simulations show OSFP can find out the target with a maximum probability and does not increase the search cost compared with other flooding protocols.

Keywords Target detection, Optimal search theory, Flooding protocol, Clustering, WSN

泛洪机制在无线传感器网络中广泛应用,许多应用使用泛洪机制来提供诸如拓扑形成、路由建立、目标探测或数据查询等解决方案。同样地,目标探测问题不仅广泛应用于路由算法,而且也应用于节点定位、数据查询等^[1,2]。

1 模型建立

本文将研究无线传感器网络中基于泛洪机制的目标探测问题,着眼于研究在整个网络中寻找一个具有与其他节点不同属性的特殊节点,如在应用环境中感知具有特殊含义的数据的节点。

考虑一个大规模网络结构,大量节点随机独立地分布于其中。大规模网络的一个重要特性是其网络边界可以认为是

远离节点所能到达的范围,因而网络边界的影响可以忽略,并且发起查询目标数据包的节点可以认为是位于网络的中央^[3]。

假定网络中存在一个需要查询的目标。在查询期间,网络拓扑已成簇,其网络拓扑结构如图 1 所示。其中每个簇包含若干节点和一个簇首。每个簇首分配一个唯一的标识号。通常簇首由能量较大的节点来担任,负责在簇内收集并广播相关的数据,同时也负责将数据从一个簇首传送到另一个簇首或 sink 节点。簇首之间的通信可通过一跳或几跳来完成。其中的 sink 节点产生查询目标的数据包,通常它具有较多的能量和较强的处理能力。

在目标探测策略中,通常定义一个代价函数来评估其性

收到日期:2009-03-30 返修日期:2009-07-02 本文受第 43 批中国博士后基金(200804311278),863 国家重点基金项目(2007AA01Z227)资助。

于 秦(1974—),女,讲师,主要研究方向为无线网络、信息安全等,E-mail:yuqin@uestc.edu.cn;王伟东(1973—),男,讲师,主要研究方向为无线传感网络等;秦志光(1956—),男,教授,主要研究方向为信息安全等;毛玉明(1956—),男,教授,主要研究方向为网络体系结构与协议、无线网络等。

能。我们用搜索目标所花费的能量来定义搜索策略的代价。对于特定的搜索计划,查询目标所花费的能量直接反映在查询的次数上。我们并没有考虑搜索策略的响应时间,因为对于可控泛洪搜索来说,最快速的搜索策略是在首次查找时泛洪整个网络。对于节点之间通信不可靠的网络来说,其中一个重要的性能参数是目标探测概率。因此,在目标探测策略中,目标即是以最小的搜索代价和最大的概率来探测到目标^[4]。

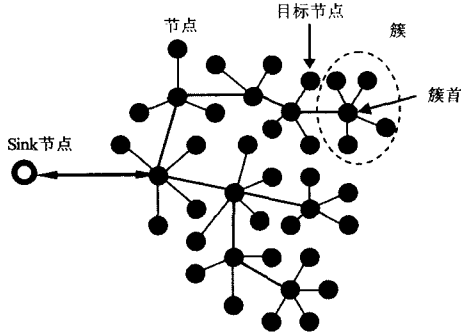


图1 目标探测网络拓扑结构

1.1 数学模型

基于离散最优搜索理论,将建立一个有效的搜索计划。在给出一个通用的数学模型后,考虑无线传感器网络中的目标探测问题,所给出的搜索计划将对每一次的搜索都最大化其探测概率。后面将看到,该搜索计划同时也最小化搜索代价。

假设有 N 个节点随机独立地分布于二维空间。当网络成簇后,所有簇形成一个集合 $J = \{1, 2, \dots, j, \dots\}$ 。以 N_j 来表示簇 j 中节点的数量。对于大多数成簇算法,如 LEACH^[5], LEACH-C^[6], HEED^[7] 及 SEP^[8], 簇首通常知道其簇内的节点成员。依据最优化理论,将无线传感器网络中的目标探测问题看作是在格子中搜索目标的问题,因而将所提出的目标探测问题描述如下:在已成簇的网络的某个簇中,存在着一个需要查找的目标。目标的分布假定是离散的。每一次搜索过程包含一个对簇的查询序列。由于节点之间的通信存在碰撞,假定对一个包含有目标的簇进行一次查询并非总会找到该目标。

这里引入一个探测函数 $b: J \times \{1, 2, \dots\} \rightarrow [0, 1]$ 来表述该情形,用 $b(j, k)$ 表示目标在簇 j 中时对簇 j 进行 k 次搜索而探测到目标的概率。显然, $b(j, 0) = 0, j \in J$ 。这里的目标探测可能包含两部分内容:首先是簇首从 sink 节点接收到查询包的概率;其次是簇首在簇内发送查询包,簇内的目标接收到查询包的概率。

为简单起见,假设所有非簇首节点接收到查询包的概率相互独立,并且簇首和簇首之间以及簇首和 sink 节点之间的通信是可靠的。如果定义 $\beta(j, k)$ 为在簇 j 中进行 $k-1$ 次查询后未找到目标,而在第 k 次查询时找到目标的概率(假定目标在簇 j 中),则显然有:

$$\beta(j, k) = b(j, k) - b(j, k-1), j \in J, k = 1, 2, \dots \quad (1)$$

同时,假定 α_j 为当目标在簇 j 中时对簇 j 进行一次查询探测到目标的概率,如果每一次查询找到目标的概率相互独立,则有:

$$\beta(j, k) = \alpha_j (1 - \alpha_j)^{k-1}, j \in J, k = 1, 2, \dots \quad (2)$$

通常,我们考虑的是指数探测函数,比如 $b(j, k) = 1 - e^{-v_j k}$, 其中 v_j 是与簇 j 中节点数相关的变量,称为目标分布。简单地设定 $v_j = 1/(1 - p_r^{N_j})$, $p_r \in (0, 1)$ 。依据式(1)和式(2),即可得到概率 α_j 。即使目标未知,也可得到最优搜索策略^[9-13]。

搜索策略同时也关联了另一个重要的参数:搜索代价。定义代价函数 $c: J \times \{0, 1, 2, \dots\} \rightarrow [0, \infty]$, 则 $c(j, k)$ 表示在簇 j 中进行 k 次搜索的代价。同样, $c(j, 0) = 0, j \in J$ 。如果定义 $\gamma(j, k)$ 为在簇 j 中执行第 k 次搜索的代价,则有:

$$\gamma(j, k) = c(j, k) - c(j, k-1), j \in J, k = 1, 2, \dots \quad (3)$$

其中,假定 $\gamma(j, k) \geq 0, j \in J, k = 1, 2, \dots$ 。

离散搜索计划可用一个搜索序列 $\xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots\}$ 来表示所实现的特定搜索策略。搜索计划 ξ 可以描述如下:首先在簇 ξ_1 中查询,如果目标未找到,则在簇 ξ_2 中继续查询,直到找到目标。

1.2 通用最优搜索模型

首先考虑搜索计划在每次查询时最大化探测概率的情形。在本节的随后部分,将给出该最优搜索计划也最小化的平均搜索代价。设定 K 为所允许的总的搜索次数, $\xi(K)$ 为 K 步搜索计划。针对搜索计划 $\xi(K)$, 我们关联一个函数 $f_\xi: J \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ 以表示对簇 j 的查询次数。所有函数的集合 $f(j)$ 组成了搜索次数的分配方案 $\hat{F}(J)$ 。限定总的搜索次数为 K 意味着:

$$\sum_{j \in J} f(j) = K \quad (4)$$

对于分配方案 $f(j) \in \hat{F}(J)$, 找到目标的概率是:

$$P(f) = \sum_{j \in J} p(j) b(j, f(j)) = \sum_{j \in J} p(j) [1 - (1 - \alpha_j)^{f(j)}] \quad (5)$$

其中, $p(j)$ 是目标在簇 j 中的概率。为简单起见,设定 $p(j) = N_j/N$, 则搜索代价可定义为:

$$C[f] = \sum_{j \in J} c(j, f(j)) = \sum_{j \in J} \gamma(j, f(j)) = K \quad (6)$$

分配方案 $f(j)$ 表示在簇 j 中应该搜索的次数。由于限定了总的搜索次数为 K , 因而所要求的搜索计划实际就是搜索资源的分配问题。其中对每个簇的搜索次数由搜索计划 $\xi(K)$ 给出。这里首先略去如何导出搜索序列, 而直接给出搜索资源 f^* 最优分配的条件。对于总的代价 K , 如果 $C[f^*] \leq K$, 则资源分配方案是最优的, 并且:

$$P[f^*] = \max\{P[f]; f(j) \in \hat{F}(J) \text{ and } C[f] \leq K\} \quad (7)$$

2 目标探测模型

目标探测模型的目标是要找到一个最佳的资源分配方案, 从该方案导出一个最小化搜索资源又最大化目标探测概率的搜索计划。我们希望的是以最少的搜索(查询)次数能最大化探测到目标的概率, 从式(3)可知, 单次搜索的代价可以定义为:

$$\gamma(j, k) = N_j, j \in J, k = 1, 2, \dots \quad (8)$$

单次搜索的代价可以描述为每次查询时所发送的数据包, 也就是一次查询发送一个数据包。因而若簇 j 中包含 N_j 个节点, 则搜索该簇的代价为 N_j 个数据包。由于目标探测所消耗的能量大部分发生在数据包的发送上, 因此定义所发送的总的数据包为搜索代价是合理的。

给定以上假设后, 可得到如下的最优分配定理^[3]。

定理 1 对于搜索代价 $C[f^*] < \infty$, 当且仅当存在一个有限的参数 $\lambda \geq 0$ 以使对所有的簇 $j \in J$, 满足式(9), 则搜索资源 $f^* \in \hat{F}(J)$ 的分配是最优的:

$$p(j)\beta(j, k) \geq \lambda, 1 \leq k \leq f^*(j) \leq \lambda, f^*(j) < k < \infty \quad (9)$$

定理的证明可参考文献[3]。

如果每次对目标的查询数据包都能被节点接收到, 则 $\alpha_j = 1$ 。从式(2)可得到:

$$\beta(j, k) = \alpha_j (1 - \alpha_j)^{k-1} = \begin{cases} 1, k=1 \\ 0, k \neq 1 \end{cases} \quad (10)$$

定理 1 意味着应该查询那些具有较高目标存在概率 $p(j)$ 的簇, 并且每次只应该查询一次。由于 K 是总的查询次数, 因此所要求的搜索计划意味着在具有较高 $p(j)$ 的簇中进行查询。然而, 大多数情况下, $\alpha_j < 1$, 则前面所提出的搜索计划将不再适用。下面导出一致最优搜索计划。

定理 1 给出了最优分配方案的充分条件, 但并未给出最优搜索计划的搜索序列。一致性最优搜索计划最大化每一次搜索时的目标探测概率。假定 Ξ 为所有搜索计划 $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots), \xi_n \in J$ 的集合, 则依据式(5), 最优分配 f^* 可从式(7)获得。定义 $P(n, \xi)$ 为当使用搜索计划 ξ 时在第 n 次或第 n 次之前的探测概率。根据式(5), 可得 $P[n, \xi] = \sum_{j \in J} p(j) [1 - (1 - \alpha_j) f_{\xi(n)}(j)]$ 。

若搜索计划满足下式:

$$P[n, \xi^*] = \max\{P[n, \xi] : \xi \in \Xi\}, n=1, 2, \dots \quad (11)$$

则称搜索计划 $\xi^* \in \Xi$ 是一致最优的, 这意味着每次在簇中搜索时应该选择最大探测的簇。设 $r(j, n, \xi^*)$ 为搜索计划 ξ^* 在簇 j 中进行的前 n 次搜索的次数, 则对计划 ξ^* , 其第一次搜索为 ξ_1^* :

$$p(\xi_1^*)\beta(\xi_1^*, 1) = \max_{j \in J} p(j)\beta(j, 1) \quad (12)$$

确定了前 $n-1$ 次搜索后, 就可推导出第 n 次搜索方案 ξ_n^* :

$$p(\xi_n^*)\beta(\xi_n^*, r(j, n-1, \xi^*) + 1) = \max_{j \in J} p(j)\beta(j, r(j, n-1, \xi^*) + 1) = \max_{j \in J} p(j)\alpha_j (1 - \alpha_j)^{r(j, n-1, \xi^*)} \quad (13)$$

因而基于计划 ξ^* 的第 n 次搜索为:

$$\xi_n^* = \arg \max_{j \in J} p(j)\beta(j, r(j, n-1, \xi^*) + 1) \quad (14)$$

以上的离散搜索计划是局部的。显然, $\alpha_j = 1$ 意味着搜索计划只是简单地以概率值 $p(j)$ 的降序来查询对应的簇。

通常, 要得到 ξ_n^* , 只需知道 $r(j, n-1, \xi^*), j \in J$, 这是一个指示函数 $r(j, n-1, \xi^*) = \sum_{i=1}^n I_{[\xi_i^* = j]}$, 其中若 $\xi_i^* = j$, 则 $I_{[\xi_i^* = j]} = 1$, 否则 $I_{[\xi_i^* = j]} = 0$ 。

根据式(12)一式(14), 得到如下结论:

定理 2 一致最优搜索计划对于任何搜索次数均最大化目标探测的概率^[3]。

确定了一致最优搜索计划后, 我们来考虑最小化搜索次数的情形。能量约束是无线传感器网络中最关键的一个问题, 因而最小化搜索次数来节约能量是一个非常现实的问题。如前所述, 我们定义搜索代价为找到目标所需执行的搜索次数。该定义的目的就是要消耗最少的能量来找到目标。下面的定理描述了前述的最优搜索计划的同时也最小化搜索代价。

定理 3 最优搜索计划是最小化期望的搜索代价。

证明: 做如下定义。

$\hat{P}[n, \xi]$: 在搜索计划 ξ 下在第 n 次查询时的探测概率;

$\hat{C}[n, \xi]$: 前 n 次搜索的代价;

$P[n, \xi]$: 在第 n 次或第 n 次之前的探测概率。

显然有, $\hat{P}[n, \xi] = P[n, \xi] - P[n-1, \xi]$ 。

设 $\gamma(\xi_n, k_n)$ 表示基于搜索计划 ξ 时第 n 次搜索在簇 ξ_n 中进行, 并且该簇接收到一个查询后共执行了 k_n 次搜索, 则得到:

$$\hat{C}[n, \xi] = \sum_{r=1}^n \gamma(\xi_r, k_r)$$

设 $\mu(\xi)$ 找到目标的期望代价, 如果 $\lim_{n \rightarrow \infty} P[n, \xi] = 1$ 且 $P[0, \xi] = 0$, 则:

$$\begin{aligned} \mu(\xi) \sum_{n=1}^{\infty} \hat{C}[n, \xi] \hat{P}[n, \xi] &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{r=1}^n \gamma(\xi_r, k_r) (P[n, \xi] - P[n-1, \xi]) \\ &= \sum_{r=1}^{\infty} \gamma(\xi_r, k_r) (1 - P[r-1, \xi]) \end{aligned}$$

如果 $\lim_{n \rightarrow \infty} P[n, \xi] < 1$, 则通常得到 $\mu(\xi) = \infty$ 。因此, 只要 $\lim_{n \rightarrow \infty} P[n, \xi] = 1$ 或大于 0, 则式(15)成立:

$$\mu(\xi) = \sum_{n=1}^{\infty} \gamma(\xi_n, k_n) (1 - P[n-1, \xi]) \quad (15)$$

如果 $\gamma(j, k) = N_j, j \in J, k=1, 2, \dots$, 则式(15)可简化为:

$$\mu(\xi) = \sum_{n=0}^{\infty} N_{\xi_n} (1 - P[n, \xi]) \quad (16)$$

显然, 一致最优计划 ξ^* 可最小化找到目标的期望查询次数。由于 ξ^* 是一致最优的, 因此:

$$P[n, \xi^*] \geq P[n, \xi], \xi \in \Xi, n=0, 1, 2, \dots \quad (17)$$

依据式(16), 可得到 $\mu(\xi^*) \leq \mu(\xi), \xi \in \Xi$, 故定理 3 得证。

3 目标探测机制

建立了最优查询策略后, 开始介绍基于该策略的目标探测机制。假定查询目标的数据包由 sink 节点产生, 并且数据包的到达遵循泊松过程。一旦 sink 节点产生了数据包, 该数据包首先被分配到一个虚拟表中进行缓存。该虚拟表应足够大以保证所产生的查询包不会因存放不下而被丢弃, 我们称该虚拟表为分发器。对于每一个到来的查询包, 目标探测算法分配相应的空间以存储该数据包, 然后循环产生一个簇首并在相应的簇中进行查询。保存每次到达的查询包的目的是使算法能适应并行处理。如果频繁地产生查询包, 则保存起来的查询包可同时执行搜索处理, 也就是每个目标探测过程可以看作是相互独立的。这样算法可以高效地处理并减少目标探测时间。

前面所提到的最优搜索算法将产生一个最优搜索序列 ξ^* 以最小化找到目标的代价。当 sink 节点启动目标探测后, 算法首先基于式(12)和式(14)产生第一个簇首, 然后 sink 节点将查询包发送给该簇首。收到该查询包后, 簇首在自己的簇中进行目标查询。如果目标未找到, sink 节点将继续产生下一个簇首, 依此类推, 直到找到目标。注意算法所产生的簇首可能会重复, 因为我们假设目标探测并不能一次就实现。总结前面的内容, 本文所提出的目标探测机制如下:

(1) 首先网络成簇。每个簇首发送该簇中节点的数量给 sink 节点。

(2) sink 节点产生一个新的查询包, 算法根据式(12)计

算出 ξ_j^* , $j=1$ 。

(3) sink 节点发送查询请求给簇 ξ_j^* 。

(4) 簇首 ξ_j^* 在其簇内进行目标查询,并将查询的结果返回给 sink 节点以指示是否找到目标。

如果目标找到,则搜索算法停止,得到最优搜索序列为 $\xi^*=(\xi_1, \xi_2, \dots)$ 。否则, $j=j+1$,算法依据式(12)到式(14)导出下一个需要搜索的簇 ξ_j^* ,重复执行第(3)、(4)步。

4 性能评估

将本文所提出的目标探测机制与泛洪控制机制以及随机泛洪机制进行了比较。仿真了通信不可靠的网络环境。网络的能量和拓扑模型与 LEACH-C^[6]类似。

假设仿真网络环境为 500m×500m。查询包由 sink 节点发起。所有节点均假设具有相同的发射半径 50m。重复 100 次查询过程,最后取平均值。网络中的目标在非簇首节点中随机指定。对于泛洪控制查询和随机泛洪查询方法,我们假定每一个节点只发送或接收一次同一个查询包。

由于考虑的是数据通信是不可靠的网络环境,需要知道每一个查询在簇中的探测概率。在最优搜索理论中,通常使用指数探测函数。这里,也假设每一次的探测概率为指数函数,即 $b(j, k)=1-e^{-v_j k}$,其中 j 是簇标号, k 是搜索次数, $v_j=1/(1-p_r^j)$ 。设定 $p_r=0.9$,因而簇 j 中的探测概率 α_j 即可由式(1)和式(2)计算出。当目标探测概率大于 0.99 时,则认为目标已找到。

4.1 搜索代价(Search Cost)

首先仿真搜索代价与节点密度之间的关系。节点密度定义为发射半径区域内的平均节点数量。图 2 是仿真结果。

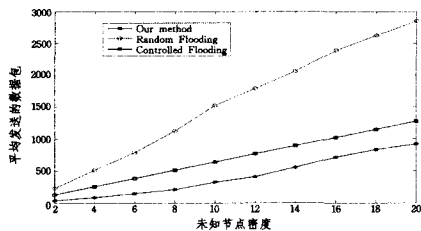


图 2 不同未知节点密度下的搜索代价(平均发送数据包)

很明显,所有策略的搜索代价都随节点密度的增长而增加,相对来说,我们的目标探测策略所需要的查询包最少。当节点密度从 2 变化到 20 时,本文所提出的方法所花费的搜索代价是随机泛洪策略的 16.16%到 32.22%,是泛洪控制策略的 28.90%到 72.42%。随机泛洪策略随机地选择一个簇首来探测目标是否位于该簇中。如果目标未找到,则需要再次随机地选择一个簇首并执行查询,直到目标找到。由于簇首选择的随机性,搜索代价也随着节点密度的增加而增加。对于泛洪控制策略,每次搜索过程均需要搜索整个网络。当一次搜索未成功,下次将同样需要搜索整个网络,因而其搜索代价仍然较高。而我们的搜索机制利用算法产生的簇首查询序列来选择下一次需要搜索的簇,最小化了目标探测的搜索代价。

4.2 能量消耗

能量的有效性是无线传感器网络最受关注的因素之一。本节仿真了不同节点密度条件下找到目标后所消耗的总能量(焦耳)。仿真结果如图 3 所示。



图 3 不同未知节点密度条件下找到目标所需消耗的总能量

仿真结果表明,随着节点密度的增加,能量消耗也增长。泛洪控制机制消耗最多的能量,而我们的机制相对较少。

4.3 目标探测概率

最后,对目标探测概率与搜索次数的关系进行了仿真,结果如图 4 所示。在本仿真中,网络共分成 36 个簇。采用相同的搜索次数时,本文所提出的目标探测机制能得到最大化的目标探测概率,而随机泛洪机制得到的目标探测概率最小。当所搜索的簇的数量逐渐增加到总的簇数量时,本文所提出的目标探测机制、随机泛洪机制和泛洪控制机制的目标探测概率分别是 91.4%,46.4%和 58.6%。随着搜索次数的增加,本文所提出的机制将在第 48 次搜索时找到目标。然而,要找到目标,泛洪控制机制至少需要搜索 60 次,而随机泛洪机制则需要更多。

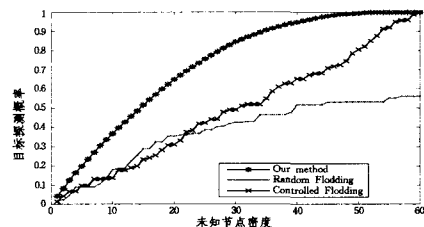


图 4 目标探测概率

仿真结果显示基于最优搜索理论的目标探测机制比传统的泛洪策略不仅花费较少的搜索代价,而且更有效。基于最优搜索理论的目标探测机制特别适合于节点发送和接收数据不可靠的情形,该特性具有重要的意义。

结束语 本文讨论了利用最优搜索理论来解决无线传感器网络中的目标探测问题,并提出了基于最优搜索理论的目标探测机制,用来解决分簇网络中的目标探测问题。本文所提出的方法的优点是:目标搜索不需要节点的本地信息,而且节点之间的通信考虑了不可靠的情形。仿真结果表明该目标探测机制比传统的泛洪策略具有更好的性能。

参考文献

- [1] Cheng Zhao, Heinzelman W B. Searching strategy for multi-target discovery in wireless networks[C]//Proc. of the 4th Workshop on Applications and Services in Wireless Networks (ASWN '04). Boston, Massachusetts, USA, Aug. 2004: 1-10
- [2] Rezaifar R, Makowski A M. From optimal search theory to sequential paging in cellular networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Comm., 1997, 15(7): 1253-1264
- [3] Stone L D. Theory of Optimal Search(2nd ed)[M]. Arlington, VA: ORSA Books, 1989
- [4] Zhu Qingxin. Theory of Optimal Search in Discrete and Continuous Space (in Chinese)[M]. Beijing, China: Science Press, 2005
- [5] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-ef-

efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]//Proc. of the Hawaii

- [6] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans. On Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670
- [7] Younis O, Fahmy S. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4): 366-379
- [8] Smaragdakis G, Matta I, Bstavros A. SEP: A stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks[C]//Proc. of the 2nd International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications (SANPA 2004). Boston, MA, Aug. 2004
- [9] Zhu Qingxin, Oommen J. On the optimal search problem: the case when the target distribution is unknown[C]//Proc. of the Chilean Computer Science Society. Valpariso, CHILE, Nov. 1997; 268-277
- [10] Hefeeda M, Ahmadi H. A probabilistic coverage protocol for wireless sensor networks[C]//Proc. of IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP'07). Beijing, China, Oct. 2007
- [11] Huang Rui. Probabilistic localization of mobile ad hoc networks [D]. The University of Texas at Arlington; Arlington, Texas, USA, Dec. 2006
- [12] Ekici E, Vural S, McNair J, et al. Secure probabilistic location verification in randomly deployed wireless sensor networks[J]. Elsevier Ad Hoc Networks Journal, 2008, 6(2): 195-209
- [13] Sheng Xiao-hong, Hu Yu-hen, Ramanathan P. Distributed particle filter with GMM approximation for multiple targets localization and tracking in wireless sensor network[C]//Proc. of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '05). Los Angeles, California, April 2005; 181-188

(上接第 43 页)

- [23] Cavagna R, Bouville C, Royan J. P2P Network for Very Large Virtual Environment [C]//Proceedings of ACM VRST'06. Limassol, Cyprus; ACM, 2006; 269-276
- [24] Hu Shun-yun, Chen Jui-fa, Che Tsu-han. Von: A Scalable Peer-to-Peer Network for Virtual Environments [J]. IEEE Network, 2006, 20(4): 22-31
- [25] Keller J, Simon G. Toward a Peer-to-Peer Shared Virtual Reality [C]//Proceedings of IEEE Workshop on Distributed Computing System. Vienna, Austria; IEEE, 2002; 695-700
- [26] Rueda S, Morillo P, Ordufia J M. A Peer-To-Peer platform for simulating distributed virtual environments [C]//Proceedings of Parallel and Distributed System. Nevada, USA; IEEE, 2007; 1-8
- [27] Lazem S, Elteir M, Hamid A, et al. Prediction-Based Prefetching for Remote Rendering Streaming in mobile virtual environments [C]//Proceedings of IEEE ISSPITL. Cairo, Egypt; IEEE, 2007; 760-765
- [28] Li Tsai-Yen, Hsu Wen-Hsiang. A Data Management Scheme for Effective Walkthrough in Large-Scale Virtual Environments [J]. Visual Computer, 2004, 20(10): 626-634
- [29] Hanawa D, Tatsuhiro Y. A Proposal of Dead Reckoning Protocol in Distributed Virtual Environment Based on the Taylor Expansion [C]// Proceedings of Cyberworlds06. Lausanne, Switzerland; IEEE, 2006; 107-114
- [30] Koltun V, Chrysanthou Y, Cohen D. Hardware-accelerated From-region Visibility Using a Dual Ray Space [C]// Proceedings of 12th Eurographics Workshop on Rendering. London, UK, 2001; 204-214
- [31] Zheng Zhi, Chan T K Y. Optimized Neighbor Prefetch and Cache for Client-Server Based Walkthrough [C]//Proceedings of Cyberworlds03. Singapore; IEEE, 2003; 143-150
- [32] Cevikbas S B, Koldas G, Isler V. Prefetching Optimization for Distributed Urban Environments [C]// Proceedings of CyberWorlds08. Hangzhou, China; IEEE, 2008; 340-348
- [33] Patel K M, Gotz D. Scalable, Adaptive Streaming for Nonlinear Media [J]. IEEE Transaction on Multimedia, 2007, 14(3): 68-83
- [34] Peng Qing-jin, Chung Chui-ho, Cai Yu, et al. A Networked Virtual Manufacturing System for SMES [J]. Computer Integrated Manufacturing, 2007, 20(1): 71-79
- [35] Shang Hui-ping, Zhao Zheng-xu, Thorn R. Implementing Manufacturing Message Specifications (MMS) within Collaborative Virtual Environments over the Internet [J]. Computer Integrated Manufacturing, 2003, 16(2): 12-127
- [36] 贾连兴, 单维峰. 作战仿真研究热点及发展[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(14): 3148-3150
- [37] 顾朝林, 段学军. 论数字城市及其三维再现关键技术[J]. 地理研究, 2002, 21(1): 14-25
- [38] 赵沁平, 沈旭昆, 齐越. 数字博物馆若干关键技术研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(2): 1-7
- [39] 卢威, 曾定浩, 陈继明, 等. 虚拟博物馆系统构建中的关键技术研究[J]. 计算机科学, 2007, 34(7): 244-247
- [40] 沈旭昆, 赵学伟, 赵沁平. 一种保留特征的网格简化和压缩递进传输方法[J]. 计算机研究与发展, 2007, 44(7): 1097-1104
- [41] 程志全, 李俊, 金士尧. 三维几何模型的流式传输技术综述[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(2): 238-242
- [42] 吴玲达, 高宇, 魏迎梅. 大规模复杂场景交互绘制技术综述[J]. 计算机研究与发展, 2007, 44(9): 1579-1587
- [43] 高宇, 邓宝松, 吴玲, 等. 一种复杂场景遮挡剔除的优化算法[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2007, 19(5): 583-588
- [44] 吴言华, 蔡云泽, 许晓鸣. 分布式虚拟环境的可扩充性研究[J]. 计算机应用, 2006, 26(4): 926-929
- [45] 吴言华, 蔡云泽, 许晓鸣. AOI 交会触发服务器消息过滤方法 [J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(1): 80-84
- [46] 沈瑜, 崔业怡, 李惠, 等. 分布式虚拟环境中兴趣管理技术的分类研究[J]. 计算机科学, 2005, 32(3): 113-117
- [47] 冯洁, 查红彬. 大型三维网格模型的简化及基于视点的 LOD 控制[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2006, 18(2): 186-193
- [48] 李公立. 三维模型的渐进式编码与流传输技术的研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(4): 370-374
- [49] 杨劲松, 苏鸿根. 关于三维单元压缩和渐进传输问题的几点探讨 [J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(22): 4306-4308
- [50] 李起成, 汪国平. 数字博物馆中的三维模型渐进传输方法[J]. 计算机工程, 2006, 32(19): 221-223
- [51] 尚慧萍, 张丽娜. 网络虚拟现实的网络架构和通信协议研究[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(24): 4699-4704
- [52] 朱军, 龚建华, 张健钦, 等. 基于对等结构的虚拟地理环境系统研究[J]. 微计算机信息, 2006, 22(12): 191-194