

无线多媒体传感网多时间片多重覆盖路由算法研究

李瑞瑶¹ 白光伟^{1,2,3} 沈 航² 狄海阳¹ 赵耘华¹

(南京工业大学计算机科学与技术系 南京 210009)¹

(南京理工大学高维信息智能感知与系统教育部重点实验室 南京 210094)²

(南京邮电大学宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室 南京 210003)³

摘 要 提出一种无线多媒体传感网多时间片多重覆盖路由协议 MKCR。在事件监测过程中,系统采用视域固定的视频节点,对关键目标进行多角度覆盖以提高监测质量。在多节点协同工作时,协议计算多时间片 k 覆盖路径、合理分配节点参与工作的时间,从而延长网络生存周期。研究并设计了 MKCR-K 和 MKCR-T 算法,前者代表 k 覆盖重数不可变的情况,在目标均达到 k 覆盖要求后,进而计算参与的节点集合及其工作时长;后者表示覆盖重数 k 根据情况可变,在目标全覆盖的基础上尽最大可能对关键目标进行多角度监测并延长网络生存周期。仿真结果表明,MKCR 协议能够协调参与节点的工作时长,实现关键目标多重覆盖监测,同时延长网络生存周期。

关键词 无线多媒体传感网,事件监测,多重覆盖

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.9.020

Multi-slice Multi-cover Routing Protocol in Wireless Multimedia Sensor Networks

LI Rui-yao¹ BAI Guang-wei^{1,2,3} SHEN Hang² DI Hai-yang¹ ZHAO Yun-hua¹

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)¹

(Key Lab of Intelligent Perception and System for High-Dimensional Information of Ministry of Education of China, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)²

(Key Lab of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)³

Abstract This paper proposed a multi-slice multi-cover routing (MKCR) protocol in wireless multimedia sensor networks. We used video sensors with fixed FoVs and fixed location during the monitoring. The purpose is to enhance surveillance quality while providing multi-dimension coverage for key objectives. With cooperation of multi-sensors, the protocol computes multi-slice and k -cover paths, as well as allocates each sensor's practicing time, in order to prolong the network lifetime. We also studied and designed two algorithms named MKCR-K and MKCR-T. The former focuses on the situation where k requests are determined by the system before computing the k -cover paths. The later determines the coverage requirement of each target according to sensor deployment, with the objective of achieving multi-cover and energy efficiency. Our simulation results show that the proposed MKCR can coordinate the working sensors and meet multi-cover requirement for key objectives, in the meanwhile, prolong the network lifetime.

Keywords Wireless multimedia sensor networks, Event monitoring, Multi-cover

1 引言

随着传感器技术、嵌入式技术和成像技术的逐渐成熟,关于自组织和协同工作的智能多媒体节点的研究也如火如荼地进行。无线多媒体传感网(WMSN)就是一种智能多媒体网络,它由大规模的具有感知、数据处理和通信功能的多媒体节

点组成,在环境监测、交通管制、医疗卫生等领域具有广阔的应用前景^[1,2]。

事件监测是 WMSN 的重要应用之一。目前,有关事件监测的研究主要集中在全向或方向可变传感节点的基础上。通过提高覆盖率、保证连通性等方式实现监控过程,相关节点状态调度机制或路由协议的研究都大多围绕如何提高区域覆

到稿日期:2014-09-09 返修日期:2014-11-30 本文受国家自然科学基金(60673185,61073197),江苏省自然科学基金(BK2010548),江苏省科技支撑计划(工业)(BE2011186),江苏省未来网络前瞻性研究项目(BY2013095-4-09),南京邮电大学宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室开放研究基金资助课题项目(NYKL201304),江苏省六大高峰人才基金(第八批)资助课题资助。

李瑞瑶(1989—),女,硕士生,主要研究方向为无线多媒体传感器网络路由协议、无线网络 QoS 保障技术,E-mail: liruiyao1030@gmail.com;白光伟(1961—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究方向为无线传感器网络、移动互联网、网络体系结构和协议、网络系统性能分析和评价、多媒体网络服务质量等,E-mail: bai@njtech.edu.cn(通信作者);沈 航(1984—),男,博士生,CCF 学生会员,主要研究方向为无线网络编码、移动互联网、无线多媒体通信协议等;狄海阳(1990—),女,硕士生,主要研究方向为无线多媒体传感器网络、无线网络编码,E-mail: dihaiyang2008@126.com;赵耘华(1990—),女,硕士生,主要研究方向为位置服务隐私保护,E-mail: zyh625@126.com。

盖率、减少能耗等展开;并且成本和技术限制等因素往往会使研究成果的普遍适用性受到制约。

本文研究视域(FoV)固定的视频节点随机分布时的多目标多覆盖要求路由选择策略。协议利用多节点协作实现 k 覆盖,通过多时间片节点状态调度确定路径,最终实现所有目标达到覆盖要求并最大化网络生存周期的目的。

本文第2节研究分析现有的无线多媒体传感网调度机制和路由算法及其存在的问题;第3节引入本文的网络模型和问题描述;第4节深入研究MKCR路由算法,并证明KCP问题和MKCP问题均为NP完全问题;第5节通过仿真对MKCR路由协议进行性能分析;最后总结全文。

2 相关工作

事件监测中如何利用节点间的协作来实现能耗均衡,从而延长网络生存周期,一直是人们关注的焦点;而近年来多媒体节点视野覆盖问题也受到了越来越多的关注^[3-14]。

文献[4]提出了一种无线传感网覆盖优先的分布式路由算法。算法主要研究WSNs网络中传感节点随机部署下,如何选择总感知区域最大的路径。作者集中解决了区域覆盖领域的两个问题,第一是如何计算多节点监测重叠的感知区域,第二是如何以分布式的方法实现路径选择。算法首先提出利用Monte-Carlo集合来估算感知区域,再采用改进的LS算法建立路径。该协议忽略了GPS定位在WSNs网络中的限制,节约了节点的制造成本,同时实现了最大化覆盖区域的目标。但该方法优先保证覆盖最大化,而没有考虑网络生存周期和节点能耗等问题,并且在无线多媒体传感网中对于有向性的节点没有太大的参考性。

文献[5]提出一种无线多媒体传感网能量高效的目标覆盖调度算法。算法采用可转向的多媒体传感节点,提出多方向覆盖集MDCS问题来解决如何组织节点协作的问题,从而延长网络生存周期。解决MDCS问题是为了找出相关覆盖集并且为每个集合分配工作时间以延长网络生存周期;而DCS问题则是MDCS问题的特例,用来确定当前激活的相关覆盖集。该调度算法利用线性规划优化分配工作时间,并对每个节点的若干感知方向有序调度,实现了目标全覆盖下最大化网络生存周期的目标。但该算法要求节点监测方向可转动,对节点设计制造要求较高,并且没有考虑能耗均衡。

文献[6]提出一种在保证足够覆盖监测区域的同时延长网络寿命的策略。在不依赖节点位置信息的基础上,通过已知监测范围和节点感知半径,计算出达到服务质量期望所需要的节点数量,从而筛选出部分足够覆盖监测区域的节点参与工作,其余冗余节点关闭,最终实现延长网络寿命的目的。该方法主要研究全向性的无线节点调度和通信,并不完全适用于WMSNs网络。

以上算法和策略无法可靠支持WMSNs事件监测过程。为了使成果更具普遍性,本文主要研究视域固定的多媒体节点,通过划分时间片来合理安排节点的工作时长,充分利用节点能量和多节点协作,最终实现目标 k 覆盖和最大化网络生存周期的目的。

3 网络模型和问题描述

3.1 模型和假设

本文考虑包含一个汇聚节点和一定数量的视频传感器节

点以及若干监测目标的WMSNs环境。网络中视频节点和目标随机分布,坐标均不可调。

视频节点集合由 $S=\{s_1, s_2, \dots, s_D\}$ 表示,目标集合由 $A=\{a_1, a_2, \dots, a_M\}$ 表示。假设每个视频节点具有:(1)唯一的id标识;(2)相同的初始能量,且消耗后不予补充;(3)相同的感知距离和感知角度。目标能够被视频节点 s_i 监测到意味着其质心在节点 s_i 的视域内,如图1所示。每个目标都有 k 覆盖要求,表示同时覆盖该目标的视频节点个数至少为 k ,各个目标的 k 覆盖要求集合用 $K=\{K_1, K_2, \dots, K_m\}$ 表示。

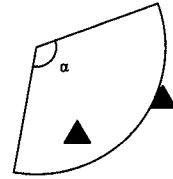


图1 视频节点感知范围FoV

文中使用到的符号如表1所列。

表1 文中使用的符号

符号	符号描述
$S=\{s_1, s_2, \dots, s_D\}$	视频节点集合
$A=\{a_1, a_2, \dots, a_M\}$	目标集合
K_m	目标 a_m 的 k -覆盖要求
$S(a_m)$	覆盖到目标 a_m 的视频节点集合
$A(s_i)$	s_i 节点覆盖到的目标集合
$ A $	集合 A 中的元素个数
P_n	第 n 轮路径序列

3.2 问题描述

网络中的节点随机分布,可以利用关键目标多角度监测提高监测质量。关键目标及其关键程度可以由系统指定,也可以通过启发式算法计算而定。目标关键程度即 k 覆盖要求用 k_m 表示,表示参与监测该目标的节点数至少为 k_m ($k_m \geq 1$)。图2中 a_2 就是2重覆盖,即 $k_2=2$ 。

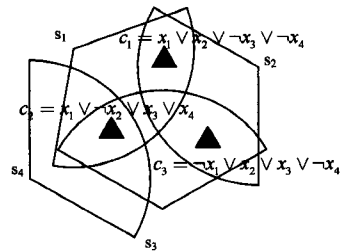


图2 目标 k 覆盖

从图2中可以看到4个视频节点 s_1, s_2, s_3, s_4 和3个目标 a_1, a_2, a_3 。其中, s_1 覆盖了 a_1 和 a_2 , s_2 覆盖了 a_1 和 a_3 , s_3 覆盖了 a_2 和 a_3 , s_4 覆盖了 a_2 。3个目标的 k 覆盖要求分别为 $k_1=1, k_2=2, k_3=1$ 。假设每个视频节点的工作时长为1,则可以找到3组路径集合 $\{s_1, s_3\}, \{s_1, s_2, s_4\}, \{s_2, s_3, s_4\}$ 分别达到3个目标的 k 覆盖要求,且网络生存周期 $t_{\{s_1, s_3\}} = t_{\{s_1, s_2, s_4\}} = t_{\{s_2, s_3, s_4\}} = 1$,但这样选取其中任何一条路径都会出现资源浪费的情况。如果对节点工作时间分片,假设 $\Delta t=0.5$,则有 $P_1=\{s_1, s_2, s_4\}, P_2=\{s_1, s_3\}, P_3=\{s_2, s_3, s_4\}$,网络总工作时间为 $3 * \Delta t=1.5$,从而延长了网络生存周期。

针对图2中的现象,发现利用时间分片和各时间片内节点协作的方法,可以实现目标 k 覆盖并延长网络生存周期。

为了对该问题进行分析,做出如下定义:

定义1(网络生存周期 T) 即系统监测时长,当存在在

意目标 $a(a \in A)$ 无法达到 k 覆盖要求时,意味着网络死亡。

定义 2(k 覆盖路径, k -Cover Path) 已知目标集合 A 和节点集合 S , 路径节点集合 P 是 S 的子集, 使得 A 中任意目标都被 P 中元素覆盖且符合相应 k 覆盖要求。该集合 P 则可以叫做 A 的一组 k 覆盖路径。

定义 3(多重 k 覆盖路径, Multiple k -Cover Path) 已知目标集合 A 和节点集合 S , 存在 N 个 k 覆盖路径 $P_1, P_2, \dots, P_N$, 使得 $N * \Delta t$ 最大, 且满足每个节点工作时长不超过 L 。

根据上述定义, 可以证明 KCP 和 MKCP 是 NP 完全, 并利用启发式算法求解。

3.3 NP 完全问题证明

定理 1 $KCP \in NPC$ 。

证明: 欲证明 KCP 问题是 NPC 问题, 首先要证明 $KCP \in NP$, 即是否可以在多项式的时间里验证一个解的问题。假设已有一个 k 覆盖路径 P 等待验证, 则需验证集合 A 中的每个元素都被 P 中元素覆盖, 且 $S(a_j) \geq k_j, j=1, \dots, m$ 。这个验证过程是在多项式时间内完成的, 因此 KCP 是 NP 问题。

在证明了 KCP 问题属于 NP 问题后, 利用规约的传递性规则来证明已知的一个 NPC 问题能够在多项式时间内规约到 KCP 问题。本文用布尔可满足性问题(即 3-CNF-SAT)进行规约。有合取范式

$$F = c_1 \wedge c_2 \wedge \dots \wedge c_m \quad (1)$$

其中, 每个子句

$$c_j = x_{j,1} \vee x_{j,2} \vee x_{j,3} \quad (2)$$

且每个变量

$$x_{i,k} = \{x_1, \neg x_1, \dots, x_n, \neg x_n\} \quad (3)$$

可以将 KCP 问题表示如下:

$$A = \{c_j | j=1, \dots, M\}, S = \{s_i | i=1, \dots, D\}, K = \{k_j | j=1, \dots, M\} \quad (4)$$

每个 x_i 表示节点 i 覆盖到目标 $c_j, \neg x_i$ 表示节点 i 无法覆盖到目标 c_j

$$d_i = \{c_j | \sum_{c_j \text{ contains } x_i} x_i \geq k_j, i=1, \dots, D, 1 \leq j \leq M\} \quad (5)$$

$$C = \{d_i | i=1, \dots, D\} \quad (6)$$

上文中 F 的标准型可以通过式(4)~式(6)在多项式时间内规约到 KCP 问题。

如图 3 中例子所示, 有 4 个节点 s_1, s_2, s_3, s_4 和 3 个目标 c_1, c_2, c_3 , 其 k 值分别为 $k_1=1, k_2=2, k_3=1$, 有

$$\begin{aligned} c_1 &= (x_1 \vee x_2 \vee \neg x_3 \vee \neg x_4) \\ c_2 &= (x_1 \vee \neg x_2 \vee x_3 \vee x_4) \\ c_3 &= (\neg x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_4) \end{aligned} \quad (7)$$

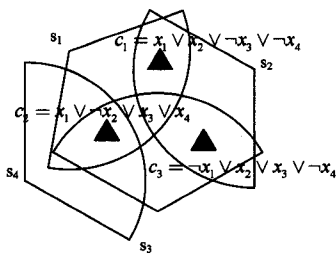


图 3 从布尔可满足性问题规约到 KCP 问题的例子

当每个子句中的变量个数不等于 3 时, 可以通过添加变量将其化为 3-CNF, 如 c_1 可以转化为

$$c_1 = (x_1 \vee x_2 \vee y_1) \wedge (\neg x_3 \vee \neg x_4 \vee y_1) \quad (8)$$

以此类推。

在该例中, 若使得 F 的值为真, 则可以令 $x_1=1, x_2=1, x_3=0, x_4=1$, 得到一个解为 $\{s_1, s_2, s_4\}$ 。

假设公式 F 的值为真, 那么对于每个子句 c_j 至少有一个变量值 $x_{i,k}$ 为 1, 且每个 c_j 都可以根据变量 $x_{i,k}$ 值的选取达到 k 重覆盖要求。因为 3-CNF-SAT 问题中的变量值为 1 或为 0 与 C 中元素 c_j 是否被覆盖的事件一一对应, 所以值为 1 的变量 x_i 对应的 s_i 构成路径节点集合 P , 从而 P 是 A 的一个 k 覆盖路径。因此, 若满足 3-CNF-SAT 值为真, 则 KCP 问题成立, 即公式 F 值为真的情况是当且仅当 KCP 能找到 k 覆盖路径。

其次, 证明 KCP 问题成立则 3-CNF-SAT 中公式 F 为真。假设 KCP 问题存在一个 k 覆盖集 P' , 那么 P' 中的每个元素 s_i 都对应了 3-CNF-SAT 公式 F 中值为 1 的变量 x_i , 而每个变量 x_i 和 $\neg x_i$ 不能同时为 1, 从而 P' 中至少一个元素能够使每个子句为真, 因此 KCP 问题成立时公式 F 值为真。由此可证 3-CNF-SAT 可以在多项式时间内规约到 KCP 问题。

综上所述, KCP 问题是 NPC 问题得证。

定理 2 $MKCP \in NPC$ 。

证明: 根据上文, 首先证明 MKCP 问题是 NP 问题。已知一组解为 $P_1, P_2, \dots, P_N$ 和时间片 Δt 。

可以在多项式时间内验证 $P_1, P_2, \dots, P_N$ 是否是 k 覆盖集, 同时要检验 $N * \Delta t \geq p (p > 0)$, 以及每个出现在 $P_1, P_2, \dots, P_N$ 中的元素 s 的工作总时长不超过 L 。该验证过程可以在多项式时间内完成, 因此 MKCP $\in NP$ 。

MKCP 问题在多项式时间内可以由 KCP 问题规约得到即可证明 MKCP 问题是 NPC 问题。可以找出 MKCP 问题的一个特例, 即 $A' = A, S' = S, P' = P, N=1, L=1, p=1$ 。该特例是一个 KCP 问题, 如果 KCP 问题成立, 那么 MKCP 问题的特例也成立, 说明 KCP 问题可以在多项式时间内规约到 MKCP 问题。综上, 证得 MKCP 问题是 NPC 问题。

4 MKCR 协议

MKCR 协议是利用多时间片的方法, 合理调度节点状态组成合作路径, 在实现目标 k 覆盖要求的基础上, 尽最大可能延长网络生存周期。下面将对 MKCR 协议进行具体分析。

4.1 MKCP 问题线性化

根据上文分析, MKCR 协议即解决 MKCP 问题的过程。将各个节点分配到 N 个 k 覆盖路径中, 设置一个布尔变量 $x_{i,n}$ 如式(9)所示, 第 n 个 k 覆盖路径用 P_n 表示。每个 k 覆盖路径工作 Δt 时间后进行切换。

$$x_{i,n} = \begin{cases} 1, & \text{if } s_i \in C_n \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

表示在第 n 轮中, 节点 s_i 是否参与监测, 若参与则 $x_{i,n}$ 值为 1, 否则为 0。可以将上述问题线性化为:

$$\text{Max: } T = \sum_{n=1}^N \Delta t, n=1, \dots, N \quad (10)$$

$$\text{Subject to: } \sum_{n=1}^N x_{i,n} \cdot \Delta t \leq L_i, \forall s_i \in S \quad (11)$$

$$\sum_{a_m \in C} x_{i,n} \geq k_m, \forall a_m \in A, i=1, \dots, D, 1 \leq n \leq N \quad (12)$$

$$k_m \geq 1, m=1, \dots, M, k_m \in \mathbb{Z}, x_{i,n} = \{0, 1\} \quad (13)$$

问题目标是最大化网络生存周期。式(11)表示每个节点

的最长工作时间不超过 L ; 式(12)表示每个目标 $a_m \in A$ 都能达到 k 覆盖要求; 式(13)规定任意 k_m 的值均不小于 1, 限定了变量的值只能为 1 或 0, 表示 s_i 参与或者不参与全覆盖路径工作。

式(11)中的 $x_{i,n} \cdot \Delta t$ 为非线性, 令

$$y_{i,n} = x_{i,n} \cdot \Delta t, z_m = k_m \cdot \Delta t \quad (14)$$

则上述问题转化为:

$$\text{Max: } T = \sum_{n=1}^N \Delta t, n=1, \dots, N \quad (15)$$

$$\text{Subject to: } \sum_{n=1}^N y_{i,n} \leq L_i, \forall s_i \in S \quad (16)$$

$$\sum_{a_m \in C} y_{i,n} \geq z_m, \forall a_m \in A, i=1, \dots, D, 1 \leq n \leq N \quad (17)$$

$$z_m \geq \Delta t, m=1, \dots, M \quad (18)$$

$$\text{Where } y_{i,n} = \{0, \Delta t\}, \Delta t \geq 0 \quad (19)$$

上文利用全局优化模型对 MKCP 问题进行优化分析, 但考虑到无线多媒体传感网节点数量多、密度大的特点, 采用启发式分布算法对该 NPC 问题求解, 由每个节点分别计算并选择参与监测的下一跳节点。下文设计 MKCR 算法来合理选择节点组成 P_k , 并叠加 Δt 计算网络生存周期 T 。

4.2 算法描述

上文详细分析了需要解决的问题, 本节在此基础上对算法进行描述。考虑两种算法: 第一种是固定关键目标和相应 k 覆盖要求, 即已知 $K = \{k_1, k_2, \dots, k_M\}$, 用于满足关键目标已知的监测需求; 第二种则根据各个目标所处环境, 在最大化生存周期的前提下合理安排 k 覆盖要求, 用于关键目标未知的情况。本文设计 MKCR-K 和 MKCR-T 算法分别用于两种监测情况。

4.2.1 KCR 算法

为了解决多时间片 k 覆盖 MKCR 问题, 首先要解决 k 覆盖路径问题, 即 KCP 问题。为此设计 KCR 算法找到能够实现目标 k 覆盖的路径。

该算法随机确定关键目标及其 k 覆盖要求, 将能够覆盖到目标 $a_i (i=1, \dots, M)$ 的视频节点集合组成 S' 集合并根据剩余能量由大到小排序, $S(a_i)$ 由至少一个视频节点构成, 每个视频节点 $s_j (1 \leq j \leq D)$ 能够覆盖到的目标构成集合 A' , 每个目标节点 a_i 都有对应的 k_i 值。为使每个目标都达到各自 k 覆盖要求, 选出的路径集合中覆盖每个 a_i 的 $|S(a_i)| \geq k_i$ 。

对视频节点赋予权值 W_j , 表示节点 j 能够覆盖到的目标个数, W_j 越大, 说明节点 j 能够覆盖越多的目标。在计算 k 覆盖路径 P 的过程中, 优先加入权值更大的节点, 使得路径能够用较少的节点实现 k 覆盖, 减少并均衡能耗。解决 KCR 问题的过程如算法 1 所示。

算法 1 KCR 算法

1. Input: S, A, K
2. Output: C_n
3. $S' \leftarrow \{S(a_m) | i=1, \dots, M\}, A' = \{A(s_i) | i=1, \dots, N\}$
4. $K \leftarrow \{k_m | i=1, \dots, M\}$
5. $C_n \leftarrow \emptyset$
6. for each $a_m \in A$
7. $S_m' \leftarrow S(a_m)$
8. $\text{temp} \leftarrow k_m$
9. while $\text{temp} > 0$

10. search $\text{Max}(W_i), s_i \in S_m'$
11. $\text{temp} \leftarrow \text{temp} - 1$
12. $C_n \leftarrow C_n \cup \{s_i\}$
13. endwhile
14. $A \leftarrow A - \{a_m\}$
15. endfor
16. end

为避免参与节点因位置因素造成回传而增加到达 sink 节点的时延, 将路径集合 C 中的元素通过动态规划算法计算后得到最短路径序列 P 。

Given: C_n

Find: P_n

Min: $\text{dist}(s_{\max})$

$$\text{Subject to: } \text{dist}(s) = \min_{v \in C} \{d(s, v) + \text{dist}(v)\} \quad (20)$$

对于集合 C_n , 存在与 sink 节点距离最近和最远的两个元素, 分别用 $s_{\min}$ 和 $s_{\max}$ 表示 ($s_{\min}, s_{\max} \in C_n$), 通过动态规划方法一定可以找到一条路径序列 P_n 使得传输过程总路径最短。

4.2.2 MKCR-K 算法

解决 KCR 问题是解决 MKCR-K 问题的基础。每个节点以 Δt 为间隔交替工作, 考察下一跳节点集合中的元素剩余能量, 通过分布式算法选择最优节点进行数据传输, 需要计算出 N 个 k 覆盖路径 $P_n (1 \leq n \leq N)$, 每个集合中的节点以 Δt 时间片为间隔交替工作, 充分利用节点间协作合理分配节点参与时间, 延长网络生存周期。网络生存周期 T 初始值为 0, 最大值由路径数量和 Δt 决定。

通过 KCR 算法将所有 S' 中的节点都分配到相应 k 覆盖路径中, 使得每个节点的工作总时长不超过 L , 网络工作时长最大。MKCR-K 算法过程如算法 2 所示。

算法 2 MKCR-K 算法

1. Input: S', A', K, P_n
2. Output: T
3. $T \leftarrow 0, T_{\text{temp}} \leftarrow 0$
4. for each P_n
5. if $P_n \neq \emptyset$
6. $T_{\text{temp}} \leftarrow T_{\text{temp}} + \Delta t$
7. for each $d_i \in P_n$
8. $L_i \leftarrow L_i - \Delta t$
9. endfor
10. endif
11. endfor
12. end

4.2.3 MKCR-T

为了应对目标关键程度未知的监测情况, 设计 MKCR-T 算法计算 N 个 k 覆盖路径来延长网络生存周期, 同时调整关键目标的 k 覆盖要求, 使其尽量大, 从而充分利用节点剩余能量进行多角度监测。

算法初始 k 覆盖要求为 1, 即将 $K = \{k_1, k_2, \dots, k_m\}$ 中的元素均赋值为 1, 使目标能够全覆盖。具体如算法 1 所示, 以下不再赘述。

在目标关键程度未知的情况下, 首先要保证目标全覆盖, 即寻找 $k_m = 1 (m=1, \dots, M)$ 时的 k 覆盖路径。其次是保证网络生存周期尽可能长, 再根据节点剩余能量合理分配其参与时间, 实现多角度目标检测。以上过程如算法 3 所示。

算法3 MKCR-T 算法

```

1. Input:  $S', A', K, P_n$ 
2. Output:  $T$ 
3.  $T \leftarrow T_{temp} = 0, P_n \leftarrow \emptyset, n = 1, \dots, N$ 
4.  $k_i \leftarrow 1, i = 1, \dots, M$ 
5. for each  $P_n$ 
6.   if  $P_n \neq \emptyset$ 
7.      $T_{temp} \leftarrow T_{temp} + \Delta t$ 
8.     for each  $d_i \in P_n$ 
9.        $L_i \leftarrow L_i - \Delta t$ 
10.    endfor
11.  endif
12. while  $s_i \in S_m'$  and  $L_i > 0$ 
13.    $k_{temp} \leftarrow k_{temp} + 1$ 
14. endwhile
15. endfor
16. end

```

5 仿真实验与结果分析

本节通过仿真的方法对所提出的 MKCR 协议进行性能分析。首先介绍实验环境和参数设置,然后针对实验数据进行分析。

5.1 实验环境和参数设置

在 Matlab 平台上实现 MKCR 协议,并设计一系列仿真实验。网络中唯一的 sink 放置在 $50m \times 50m$ 的区域右上角,区域内随机播撒 50 个视频节点,各个节点位置固定不变,初始能量相同。随机部署目标位置固定不变,在 MKCR-K 的实现过程中随机部署每个目标的 k 覆盖要求,使其不超过 2。

视频节点主要在处理过程、传输过程和感知过程消耗能量。根据文献[5]中资料,能量消耗根据节点工作模式的不同而不同。假设当路径序列中的节点工作时,处理过程为活动模式,传输过程为空闲模式,感知过程为活动模式。假设每个视频节点的初始能量为 200J,那么每个节点的期望工作时间为 3120s。仿真过程的基本参数设置见表 2。

表 2 实验参数设置

参数名称	参数值
目标区域	$50m \times 50m$
节点数量	50
目标数量	3-10
节点感知距离	15
节点感知角度	120°
sink 节点坐标	(50,50)
节点初始能量	200J
数据传输速率	19.2kbps
节点处理过程能耗	21.6mW
节点传输过程能耗	22.5mW
节点感知过程能耗	20mW
单个节点期望工作时间	3120s

5.2 实验结果分析

本节主要从目标数量不同情况下的网络生存周期、网络中平均 k 覆盖重数、最大 k 覆盖重数、节点剩余能量百分比的平均值和方差等方面考察协议的性能。将 k 值固定的 MKCR-K 协议和 k 值可变的 MKCR-T 协议进行比较,考察在 k 覆盖要求固定和可变的情况下协议的适应性。通过改变目标个数进行了大量实验,数据结果取若干次实验结果的平均值。

在需要检测的目标个数不同的情况下, MKCR-K 和 MKCR-T 的网络生存周期如图 4 所示。MKCR-K 根据系统要求确定每个目标的 k 覆盖要求,通过路径选择尽可能延长网络生存周期。MKCR-T 是根据网络覆盖情况,在尽量延长网络生存周期的前提下进行多角度检测。因此从图 4 中能看出 MKCR-T 的平均网络生存周期明显高于 MKCR-K。MKCR 路由协议能够利用节点能量有效延长网络生存周期, MKCR-K 算法平均能延长 1.34 个单位的有效工作时长, MKCR-T 算法能够使有效工作时长平均扩大 2.16 倍。

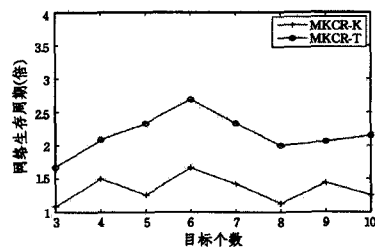


图 4 目标个数的变化对网络生存周期的影响

图 5 和图 6 显示出 MKCR-K 和 MKCR-T 算法在若干次实验后的平均 k 覆盖重数和最大 k 覆盖重数,以此反映关键目标的多角度覆盖情况。本文中根据随机撒点的覆盖情况规定 MKCR-K 算法的最大 k 覆盖重数为 2,关键目标位置随机,通过若干次实验可以看出每个目标的 k 覆盖重数最低可以达到 1.42。MKCR-T 算法首先保证目标全覆盖,在此基础上合理安排参与的节点,以使得每个目标 k 覆盖重数尽可能大。从图 5 和图 6 中可以看出, MKCR-T 算法多次实验的平均 k 覆盖重数可以达到 1.62,最大 k 覆盖重数最低为 2.83,增加了监测视角,从而有效提高了监测质量。

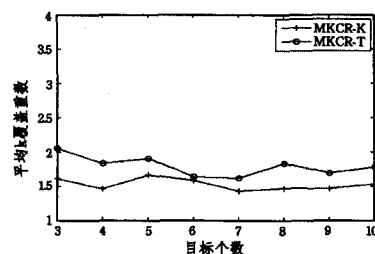


图 5 目标个数的变化对平均 k 覆盖重数的影响

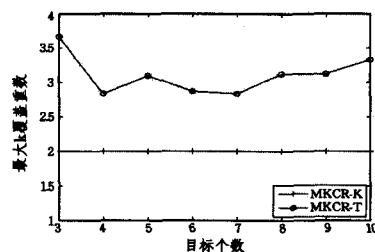


图 6 目标个数的变化对最大 k 覆盖重数的影响

表 3 列出目标不同情况下节点平均能耗和能耗方差的改变。MKCR-T 算法通过增加参与的节点来提高监测质量,这使得各个目标的 k 覆盖重数相差也较大,然后以自适应的方法确定关键目标。从能耗方面的比较可以看出,调用更多节点参与合作监测的 MKCR-T 算法虽然相对于 MKCR-K 算法提高了监测质量,但会消耗更多能量,并且节点能耗方差更大。

(下转第 133 页)

选择[J]. 小型微型计算机系统, 2014, 4(5): 786-790

Kang Guo-sheng, Liu Jian-xun, Tang Ming-dong, et al. Consider the QoS Attribute Correlation for Web Service Selection[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2014, 4(5): 786-790

[3] Wan Jian-xiong, Xiang Xu-dong, Bai Xiao-ying. Performability Analysis of Avionics System with Multilayer HM/FM Using Stochastic Petri Nets [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 54(2): 363-377

[4] Ana M, Carlos A. JWSPerf: A Performance Benchmarking Utility with Support to Multiple Web Services Implementations[C]// International Conference on AICT-ICIW, 2006: 159-165

[5] 郑梁须. 基于 BPEL 文档验证的 Web 服务组合入侵检测技术研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2013

Zheng Liang-xu. Research on Intrusion Detection Technology for Web Service Composition Based on BPEL[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013

[6] Mounir L, Fatiha Z, Ana C. Timed Modeling of Web Services Composition for Automatic Testing [C] // Third International IEEE Conference on Signal-Image Technologies and Internet-Based System, 2007(SIFIS'07). 2007: 417-426

[7] 王盼盼. 基于 BPEL 工作流的服务组合技术研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2011

Wang Pan-pan. Research on BPEL Service Composition Based on Workflow[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2011

[8] László G, Silvano C, Felicita D G, et al. Dependability Evaluation of Web Service-Based Processes[M]// Formal Methods and Stochastic Models for Performance Evaluation: Third European Performance Engineering Workshop (EPEW 2006). 2006: 166-180

[9] Apostolos Z, Panos V, Valerie I. Model-Driven Dependability Analysis of WebServices[M]// On the Move to Meaningful Internet Systems 2004: COOPIS, DOA, and ODBASE: OTM Confederated International Conference, COOPIS, DOA, and ODBASE, 2004: 1608-1625

[10] 门鹏, 段振华. 广义随机 Petri 网下的组合 Web 服务建模与评价 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(8): 967-971

Men Peng, Duan Zhen-huan. Modeling and Evaluation of Composite Web Services Based on Generalized Stochastic Petri Nets [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(8): 967-971

[11] Lin C. Stochastic Petri Net and System Performance Evaluation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 293-294

(上接第 101 页)

表 3 目标数改变时节点平均剩余能量和剩余能量方差的比较

目标数	比较项		MKCR-K 节点		MKCR-T 节点	
			剩余能量百分比		剩余能量百分比	
	平均	方差	平均	方差	平均	方差
3	0.9167	0.0541	0.9133	0.0567		
4	0.8983	0.0666	0.8983	0.0685		
5	0.8667	0.0785	0.8483	0.0914		
6	0.8117	0.1148	0.8050	0.1125		
7	0.8467	0.0856	0.8067	0.1070		
8	0.8650	0.0787	0.8300	0.0927		
9	0.7950	0.1162	0.6987	0.1810		
10	0.8280	0.0893	0.6520	0.2025		

结束语 本文研究一种无线多媒体传感网多时间片 k 覆盖路由策略 MKCR, 根据监测要求提出了固定 k 值和自适应 k 值的两种算法 MKCR-K 和 MKCR-T。通过启发式选择算法在每个目标均达到 k 覆盖要求的前提下合理分配节点参与时间, 实现最大化网络生存周期的目的。最后通过一系列仿真实验, 对其性能进行分析和评价。仿真结果表明, MKCR 协议能够协调参与节点的工作时长, 实现关键目标多重覆盖监测, 同时延长网络生存周期。

参 考 文 献

[1] Shen Hang, Bai Guang-wei, Tang Zhen-min, et al. QMOR: QoS-aware multi-sink opportunistic routing for wireless multimedia sensor networks[J]. Wireless Personal Communications, 2014, 75(2): 1307-1330

[2] Costa D G, Guedes L A. The coverage problem in video-based wireless sensor networks: A survey[J]. Sensors, 2010, 10(9): 8215-8247

[3] Wang Bang. Coverage problems in sensor networks: A survey [J]. ACM Computing Surveys(CSUR), 2011, 43(4): 32

[4] Li Jing-jing, Cao Jian-nong, Liu Xue-feng. Distributed Coverage-Preserving Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks [C]// Proceedings of the IEEE International Conference Communication(ICC 2011). 2011: 1-5

[5] Cai Yan-li, Lou Wei, Li Ming-lu, et al. Energy Efficient Target-

Oriented Scheduling in directional Sensor Networks[J]. IEEE Transaction on Computers, 2009, 58(9): 1259-1274

[6] 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

Liu Ming, Cao Jian-nong, Zheng Yuan, et al. Analysis for Multi-Coverage Problem in Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Software, 2007, 18(1): 127-136

[7] Munishwar V P, Abu-Ghazaleh N B. Coverage algorithms for visual sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks(TOSN), 2013, 9(4): 45

[8] Liu Ming, Cao Jian-nong, Lou Wei, et al. Coverage analysis for wireless sensor networks[M]// Mobile Ad-hoc and Sensor Networks. Springer Berlin Heidelberg, 2005: 711-720

[9] Cai Yan-li, Lou Wei, Li Ming-lu, et al. Target-Oriented Scheduling in directional Sensor Networks [C] // Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications(IEEE INFOCOM 2007). 2007: 1550-1558

[10] Luo Wu-sheng, Lu Qin, Xiao Jing-jing. Distributed Collaborative Camera Actuation Scheme Based on Sensing-Region Management for Wireless Multimedia Sensor Networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2012, 2012: 486163

[11] Tian D, Georganas N D. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications. ACM, 2002: 32-41

[12] Tsai Y-R. Coverage-preserving routing protocols for randomly distributed wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(4): 1240-1245

[13] Cheng Wei-fang, Li Shan-shan, Liao Xiang-ke, et al. Maximal Coverage Scheduling in Randomly deployed Directional Sensor Networks[C]// International Conference on Proceedings of the Parallel Processing Workshops 2007 (ICPPW 2007). IEEE, 2007: 68-68

[14] Yang Chao, Zhu Wei-ping, Liu Jia, et al. Self-orienting the cameras for maximizing the view-coverage ratio in camera sensor networks[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2015, 17: 102-121