

无线传感器网络中面向目标流的反应覆盖方法^{*}

温俊⁺, 窦强, 蒋杰, 齐星云, 窦文华

(国防科学技术大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073)

Proactive Coverage Method for Monitoring Target Flow in Wireless Sensor Networks

WEN Jun⁺, DOU Qiang, JIANG Jie, QI Xing-Yun, DOU Wen-Hua

(School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

+ Corresponding author: E-mail: wenjun@nudt.edu.cn

Wen J, Dou Q, Jiang J, Qi XY, Dou WH. Proactive coverage method for monitoring target flow in wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2010,21(8):1982–1997. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3590.htm>

Abstract: This paper presents a time-variant coverage mechanism, proactive coverage. In proactive coverage, all sensor nodes work in lower power surveillance manner which can detect target intrusion with high probability to save energy when the target flow doesn't arrive. As soon as the target flow arrives, sensor nodes are awakened to build a local high quality coverage networks to sense intervening targets. When target flow leaves the target field, sensor nodes converge to a quiet surveillance state. Proactive coverage is more energy efficient than static area coverage, higher sensing quality than event-driven coverage. This paper analyzes preliminary problems in proactive coverage and finds theoretic results on initial detecting delay, awaking nodes strategy and active sensing duration. Numeric results from simulation reveal that initial detecting delay in proactive coverage is trivial. Compared with static area coverage, this coverage mechanism for an adequate scale target flow (above 30 targets) can prolong the network's lifetime to near 4~7 times.

Key words: proactive coverage; static coverage; target flow; arrive interval; Poisson distribution

摘要: 提出了覆盖质量随时间变化的反应覆盖策略. 反应覆盖的主要思想是: 当目标流没有到达任务区域时, 网络的覆盖强度最低, 但是能够检测目标流的到达, 以节省能量; 当目标流到达时, 节点被唤醒, 网络为目标流提供高质量的感知覆盖; 当目标流离开网络时, 节点又进入低能耗的监视状态. 因此, 反应覆盖比静态覆盖更加能量高效, 比事件驱动覆盖的感知延迟要小, 从而更适合对目标流的感知覆盖. 分析和讨论了反应覆盖策略的基本问题, 给出了感知占空比、唤醒邻居数、持续工作时间等理论结果, 最后通过仿真实验评估了反应覆盖的初始检测延迟、覆盖质量、网络生存期. 仿真实验数据显示, 反应覆盖的初始检测延迟对目标流的覆盖质量影响较小, 当目标流较大(目标数大于 30)时, 覆盖质量接近静态覆盖质量, 而网络生存期增加了 4~7 倍.

关键词: 反应覆盖; 静态覆盖; 目标流; 到达间隔时间; Poisson 分布

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

无线传感器网络可以广泛应用于环境、工业、医疗和军事^[1,2]等多个方面. 覆盖控制是无线传感器网络的

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60603061, 60603064 (国家自然科学基金)

Received 2008-04-30; Revised 2008-10-28; Accepted 2009-02-24

基本任务^[3],覆盖质量则体现了网络对区域或目标的感知能力.静止目标的覆盖通常要求每个目标至少被 1 个活跃节点感知,即静止点目标覆盖问题.但是运动目标具有移动性,因而静止点目标覆盖方法不再适用,可以采用的方法有:(1) 区域覆盖.以目标可能出现的区域作为传感器网络的任务区域,如果当任务区域内任意一点至少被 1 个活跃节点感知时,任务区域被覆盖,运动目标出现于任务区域时就会被覆盖.区域覆盖的特点是:在网络生存期内,覆盖质量在时间维上保持不变,属于静态覆盖.(2) 事件驱动覆盖.受目标跟踪^[4]问题的启发,当没有目标出现时只有很少的节点活跃,节点检测到目标后估算目标速度和方向并预测未来的轨迹以激活相应区域内的节点,被唤醒的节点在目标周围形成一个局部活跃区域,局部活跃区域随着目标的运动而移动,属于事件驱动的覆盖.这种类似于目标跟踪的覆盖策略能量效率较高,但是事件驱动覆盖存在着由目标检测延迟、节点唤醒延迟、目标识别延迟^[5]等组成的覆盖延迟,同时还要求节点能够预测目标运动轨迹,需要节点间密切协调,因而适用于偶然出现的目标或事件.

移动目标的覆盖质量不仅与被多少个活跃节点感知有关,而且与感知的持续时间有关.覆盖目标的节点数越多、被持续覆盖的时间越长,则覆盖质量越高.由于区域覆盖能够保证任务区域内任意一点都被感知,移动目标被感知的时间等于目标在任务区域停留的时间,因而覆盖质量较高,但是在没有目标出现时节点依然保持活跃,从而增加了能量开销.而事件驱动覆盖能量高效,但是存在覆盖延迟,从而导致了目标持续感知时间小于目标在任务区域停留的时间,因而覆盖质量要低于区域覆盖质量.

现在考虑下面两种可能的应用场景:(1) 栖息地动物行为或迁徙规律的观测.例如,一个斑马家族由 1 匹雄斑马、4~5 匹雌斑马以及它们的后代共 10~12 匹斑马组成,通常各个斑马家族又组成更大的群落^[6].当成群的斑马在草场边走边进食或者向水源地运动时将形成一个持续的目标流,而不是孤立的单个目标,如果此时已检测到最先到达的几匹斑马就可以推测后面将出现更多的斑马,那么草场或途经水源的道路可以作为部署传感器网络的任务区域.而斑马的群体活动特性则可被用来改善网络覆盖的能量效率,即观测区域内没有斑马时,网络节点工作于低功耗的监视状态,当网络检测到斑马后唤醒周围节点并持续工作直到斑马群离开观测区域.(2) 路口车流的检测.从宏观角度观察,道路上众多车辆的运行表现出流的聚合特性,可以使用流量、强度、速度等宏观统计量描述^[7],因而如果我们已经观察到有车辆到达则可以预测在未来的某段时间内必然还有其他车辆经过,车流特性可以用来调度节点以提高观测效率.但是,车流特性在时间维上是变化的,例如,白天车流大,车流间隔时间短;夜晚车流稀疏,车流间隔时间长.

在上面的应用场景中,目标或事件以流的方式出现,即目标出现是有规律的,但目标流并不总是连续的,而在两次目标流之间间隔着较长的安静时间.对于具有这种特性的应用,静态覆盖不再能量高效,事件驱动覆盖又存在固有的覆盖延迟,因而我们提出了反应覆盖(proactive coverage)策略.反应覆盖中节点初始工作在低占空比的监测状态,即节点在每个时间片内激活感知模块和通信模块以检测是否有目标出现并监听是否有唤醒消息,其余时间则处于关闭状态;当目标流到达时节点被唤醒,同时根据相邻目标到达的间隔时间分布特性,推测出新目标出现的概率不小于 α 时节点的持续工作时间 ψ ;当目标流离开任务区域后节点再次进入低能耗的监视状态.

由于反应覆盖在网络生存期内覆盖质量不再恒定不变,因而比静态覆盖具有更高的能量效率.与事件驱动覆盖相比,反应覆盖策略不依赖于单个事件的运动轨迹和瞬时运动状态,而是依据目标流的统计特性以牺牲最先出现的若干个目标的感知质量为代价,换取整体覆盖质量的改进以及覆盖延迟的降低和通信开销的减小.反应覆盖与事件驱动覆盖的区别在于:(1) 反应覆盖假设目标的出现是可预测,具有时空规律的;而事件驱动覆盖针对单个移动目标,认为目标的出现是偶然的,很难预测何时到达.(2) 反应覆盖适合于目标流的覆盖,而不关注偶然事件,单个的、孤立的目标可以被检测,但不能保证被有效地覆盖;而事件驱动覆盖为每个目标提供一定质量的覆盖.(3) 反应覆盖不依赖于单个目标的运动轨迹,而是依据目标流到达的统计特性调度节点,节点的协调和通信开销较小;而事件驱动覆盖需要估算目标速度和方向并预测未来的轨迹以激活相应区域内的节点.(4) 反应覆盖的平均覆盖延迟较小,最先到达的目标是反应覆盖的触发源,具有覆盖延迟,但后续目标的覆盖质量接近于静态覆盖;而事件驱动覆盖始终存在一定的覆盖延迟,从而降低了覆盖质量.

本文的主要研究贡献有:(1) 提出了一种新的覆盖机制以满足目标流的感知覆盖要求;(2) 分析了节点监视

状态下工作占空比的下限;(3) 详细讨论了节点唤醒方法和节点持续感知时间的选取;(4) 讨论了目标流离开监视区域的判定方法,使得节点可以从活跃状态恢复到监视状态。

本文第 1 节回顾有关覆盖和目标跟踪的研究工作。第 2 节给出问题假设和理论基础。第 3 节详细讨论反应覆盖的基本问题。第 4 节讨论目标流为 Poisson 随机过程时的反应覆盖的理论结果。第 5 节是反应覆盖的工作过程。第 6 节使用实验评估反应覆盖的能量高效和覆盖性能。第 7 节给出全文的结论。

1 相关工作

提高能量利用率可以延长网络生存期,因而研究人员利用节点的冗余性提出了多种能量高效的覆盖控制方法,如将节点划分为多个覆盖集或者降低活跃节点密度以延长网络生存期。用于移动目标感知的事件驱动覆盖则是受到目标跟踪方法的启发,其能量效率高于静态覆盖。下面则分别介绍能量高效覆盖方法和目标跟踪两个方面的研究工作。

1.1 能量高效的覆盖

能量高效的覆盖研究经历了不同的阶段:最先是寻找最小覆盖集问题,使得每次活跃的节点数最少。其次,应用优化的几何结构和数学模型启发式地构建近似最优的覆盖网络。最后,以覆盖质量换取网络生存期的思想为指导,通过适当地降低覆盖质量来延长网络生存期。下面将分类介绍有关的研究工作。Slijepcevic^[8],Berman^[9]等人提出了 SET-K COVER 问题,利用节点的冗余特性,将所有节点划分为多个最小覆盖集,通过覆盖集轮流工作延长网络生存期,覆盖集越多,网络生存期越长。

受到优化的几何结构和数学模型启发,Bai 等人^[10]提出了可以在前、后、左、右 4 个方向连通的渐进最优覆盖。OGDC^[11]则以三角点阵排列为基础构建覆盖网络,同时保证网络连通和覆盖,而且使得活跃节点数近似最少。Mao^[12]通过建立连通支配集的 Rule K 算法提出了一种与节点位置无关的网络连通性覆盖协议 LICCP。该协议能够在较长时间内能量高效地提供高质量的覆盖。Liu 等人^[13]提出,局部覆盖算法在随机调度的基础上考虑节点的连通性,可以保证网络在具有一定有效覆盖的同时能够连通。Liu 等人^[14]提出了一个数学模型,给定监测范围和节点的感知半径的比值就可以计算出达到服务质量期望所需要的节点数。该模型的优点是不依赖于节点的位置信息。Younis 等人^[15]提出了多种判断节点是否冗余的基于节点几何关系和节点密度的检测方法,并在此基础上提出了一种节点位置无关的覆盖算法(LUC)。这些检测方法收集 2 跳距离内的邻居节点信息估计与邻居节点间的距离计算覆盖集。Wang 等人^[16]提出一种结合了 Hopfield 网络与遗传算法的动态节点选择优化策略,在保证网络有效覆盖率的前提下通过动态配置节点状态,降低网络能耗,延长网络寿命。Li 等人^[17]建立了极大相似分布模型,提出了极大相似分布的近似求解算法,可以获得平均覆盖率接近于理论上限。

由于适当地降低覆盖质量可以提高网络生存期,因而多种不保证完全覆盖的方法被提出。如一种基于探测的分布式节点密度控制算法 PEAS^[18],节点睡眠一段时间后将唤醒,在设定距离内探测是否存在活跃节点,若存在,则继续睡眠;若不存在,则进入活跃状态。CCP^[19]是覆盖质量可调的覆盖协议,采用大概率覆盖比例为 a 的感知区域获得更长的网络生存期,当覆盖比例为 90%时,活跃节点数量可以减少 22%。pCover^[20]是一种覆盖质量与生存期折衷的协议,通过降低网络的覆盖质量换取更长的网络生存时间,与全覆盖的算法相比,pCover 在提供部分覆盖(~90%)时能够显著地(2.3~7 倍)延长网络的生存期。Yan 等人^[21]提出了一种可以为目标区域不同点提供不同覆盖质量的节点调度算法。该算法使用离散网格点作为网络覆盖区域的近似,并使用网格点来判断目标区域是否被充分覆盖。

1.2 能量高效的目标跟踪

目标跟踪是网络检测入侵目标和跟踪目标轨迹的一类问题。当前能量高效的目标跟踪算法主要有:Yang 等人^[22]提出了基于分簇的分布预测跟踪算法,当前簇头根据簇成员的感知信息而维护一个目标描述符,通过估计的目标速度和方向预测将来的可能位置,从而把目标描述符转发至下一个簇头,那么新簇头根据描述符中的目标位置唤醒 3 个邻近节点进行跟踪和感知。He 等人^[23]为了获得较长的监视时间,VigilNet 综合使用了 Tripwire

Services(网络中存在多个基站,每个基站划分为一个 Tripwire)、值守服务、值守占空比调度等技术并且兼顾了快速、精确的目标检测与分类.Yu 等人^[24]提出了集中化的目标跟踪算法,服务器节点根据感知信号的传播衰减规律估算目标的位置,传感器节点在活跃、准活跃和监视状态下切换工作以延长网络生存期.Jeong 等人^[25]根据汽车运动学提出了最小等高线跟踪算法.该算法使用的最小等高线跟踪区域显著地小于先前的基于圆周的跟踪区域,唤醒的节点数更少.

与上面两个方面的工作不同,本文重点研究针对目标流的能量高效覆盖问题,提出了反应覆盖方法.

2 问题与假设

2.1 问题提出

与已有的覆盖控制算法认为目标的出现是偶然的、随机的不同,现假设目标不是孤立到达和偶然出现的,而是成群和连续到达,整体上表现出一定的统计规律,通常有下面几个特点:(1) 以流的形式出现.大量目标在短时间内相继出现,相邻目标出现的时间间隔满足特定的概率分布,偶然的、孤立的事件只占很少的部分,因而被忽略.(2) 两次目标流之间间隔一个较长的安静时间,在此期间间隔内没有或只有很少的目标出现.当目标流的最后一个目标离开任务区域时则认为任务区域进入安静状态.假设 2 是提高能量效率的基础,若目标流是持续的、不间断的,节点就不能进入低功耗监视状态.(3) 对于任务区域内的不同位置点,目标到达的间隔时间服从同一的分布特性,但是参数不同.假设 3 反映了目标流在空间上分布的差异.目标流的上述特性使得静态覆盖不再能量高效,事件驱动覆盖又存在固有的覆盖延迟,那么如何利用目标流的特性实现能量高效的感知和覆盖?

2.2 前提假设

假设节点随机部署在($l \times h$)的矩形任务区域内,节点平均分布密度为 λ , l 是任务区域的长度, h 是任务区域的宽度, l 足够长以保证目标总是从较长的边穿越,而不是从较窄的边穿越.若 n 表示部署的节点数,那么以 Poisson 点过程描述节点随机部署方式^[21]为

$$P(N = n) = \frac{(lh\lambda)^n e^{-(lh\lambda)}}{n!}, \quad n=0,1,2,\dots \quad (1)$$

节点感知半径为 r_s ,通信半径为 r_c ,感知模块将时间划分为时间片, w_s 为感知时间片长度,感知占空比为 $s < 1$ 且可调,起始工作时刻在时间片内随机均匀分布,通信模块也将时间划分为时间片,但是通信模块和感知模块的工作占空比独立控制.节点的状态包括监视和活跃.对于监视状态的节点,其通信模块在每个时间片内对信道采样,以探测是否有邻居节点的唤醒消息,采样脉冲的宽度可以忽略,时间片内的其他时间则处于关闭状态以节约能量;感知模块以合适的占空比工作,以检测是否有目标进入其感知区域,若没有发现目标,则在剩余的时间里关闭感知模块.对于活跃状态的节点,其通信模块和感知模块在整个时间片内都处于工作状态.

类似于动物的运动或车辆的前进,目标具有移动性,其运动速度为 v ,目标的运动方向没有限制,当大量目标移动时则形成目标流.目标流是特定的随机过程.若相邻目标出现的时间间隔为 τ ,则 τ 为随机变量,其累积分布函数(相邻两个目标出现的时间间隔小于 τ 的概率)为 $G(\tau) = P\{x < \tau\} = \int_0^\tau g(x)dx$, $G(\tau)$ 是关于 τ 的单调递增函数,即 τ 越大则观察的时间越长,目标出现的概率就越大,当 τ 趋于无穷大时目标出现的概率趋于 1, $g(\tau)$ 是 τ 的概率密度函数.

目标被多少个节点覆盖用于衡量静止目标的覆盖质量,但是目标流具有移动性,因此,用目标被覆盖的时间长度来衡量覆盖质量比用目标被多少个节点覆盖来衡量更合理,因而我们给出如下的运动目标覆盖度的定义:

定义 1. 目标被感知的时间长度与停留于任务区域的时间长度之比为运动目标的覆盖度.

上面的定义避免了目标感知质量与区域宽度和运动路径关系的讨论,进而专注于节点状态对目标覆盖质量的关系.由于目标流是由大量运动目标组成的,目标流的覆盖度为所有目标覆盖度的算术平均值.下面列出了在本文中常用的标记和符号.

l	任务区长度	h	任务区宽度
λ	节点部署密度	r_s	节点感知半径
r_c	节点通信半径	n	大于等于 0 的整数
s	感知工作占空比	w_s	感知时间片长度
τ	目标出现的间隔时间	v	目标移动速度
$G(\tau)$	τ 的累积分布函数	$g(\tau), g(\tau, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$	τ 的分布密度函数
z	目标轨迹与节点感知区域相交的弦长	β	目标被网络检测的概率
d	节点到目标轨迹的垂直距离	$L_{X,Y}(x,y)$	随机变量 X 和 Y 的联合概率分布函数
γ	被 k 个节点感知的概率	φ	节点对目标的平均检测概率
δ	节点活跃概率	λ_a	活跃节点密度
$Avg(x)$	目标被发现时的平均移动距离	ω	目标到达概率
ψ	节点持续活跃时间	ϕ	判定目标流离开的显著性水平
ξ_ϕ	判定为目标流离开时的拒绝域临界点	m	样本容量
ρ	目标 Poisson 到达时的强度	$\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m$	容量为 m 的目标到达间隔时间样本值

3 反应覆盖

反应覆盖(proactive coverage)是根据目标流的特点提出的一种不同于区域覆盖和事件驱动覆盖的覆盖策略.反应覆盖是一种覆盖质量随时间变化的覆盖方法:当目标流没有到达任务区域时,网络的覆盖强度最低,但是此时的网络覆盖强度可以检测到目标的进入;当目标流到达时,节点被唤醒,为目标流提供高质量的感知覆盖;当目标流离开网络时,节点又进入低能耗的监视状态.图 1 给出了目标流刚进入任务区时反应覆盖的工作状况,虚线矩形框为任务区,虚曲线为目标流可能的穿越轨迹,圆点表示节点,其中灰色点表示处于低功耗监视状态的节点,深色的点表示活跃的节点,人形标志表示目标.反应覆盖的工作过程被划分为目标检测、目标流覆盖和目标流离开这 3 个工作阶段.本节以下部分将详细讨论各个阶段需要考虑的基本问题并给出一般情况下的理论结果.

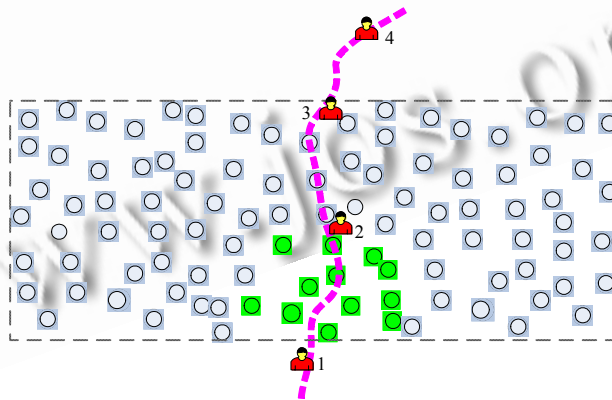


Fig.1 An illustration for proactive coverage
图 1 反应覆盖示例

3.1 目标检测

当没有目标出现或目标流离开任务区域时,节点工作在低占空比的监视模式以节省能耗,但是为了能够有效地发现目标则要求沿任意路径穿越任务区域的目标能够以较高的概率被发现.占空比的工作模式使得进入节点感知区域的目标以一定的概率被检测,那么目标穿越任务区域被发现的概率是目标沿轨迹运动时被发现概率的累积.为了节省能量,希望节点感知占空比越小越好,但是从提高目标检测概率的角度则占空比越大越有

利,因此占空比应该为满足目标检测概率时的最小值.因而单个节点的感知占空比下限应该是使目标沿最短路径穿越目标区域时,目标被检测的概率不小于设定值 β .

感知时间片长度为 w_s ,感知起始时刻均匀分布于时间片内,工作占空比为 s ,那么位于节点感知区域内的目标在任一时刻被检测的可能性为 s .若一目标由 E 点进入任务区域,由 F 点移出任务区域,在不考虑目标的运动模式时,直线段 EF 是目标可能路径中最短的,而所有目标的最短路径则是垂直穿越任务区域的直线段,如图 2 中的 DR 所示.以直线段 DR 为对称轴,距离小于 r_s 的所有点形成一个矩形区域 $OHIJ$ (面积为 $2r_s \times h$),则位于此矩形区域内的任意节点的感知区域都与 DR 相交,相交部分为节点感知圆盘的弦.

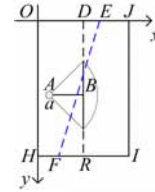


Fig.2 Target traverses field
图 2 目标穿越任务区域

假设目标沿 DR 运动,线段 DR 与节点 a 的感知区域相交部分的弦长为 z ,节点以占空比的感知工作方式使得目标穿越其感知圆盘时能否被检测成为一个随机事件.

事件 $E_1 = \{\text{目标穿越节点的感知区域时被感知}\}$.

目标通过弦长为 z 的弦需要的时间为 $t=z/v$,当 $t > w_s(1-s)$ 时,即目标通过弦的时间与占空比之和大于时间片的长度时,目标被检测的概率为 1;当 $t < w_s(1-s)$ 时,目标被检测的概率为 $(s+t/w_s)$,即

$$P(E_1) = \begin{cases} S + \frac{z}{w_s v}, & 0 < z < w_s v(1-s) \\ 1, & z > w_s v(1-s) \end{cases} \quad (2)$$

当目标穿越整个任务区域时,目标会穿越 0 个或多个节点,穿越每个节点时经过的弦长 Z 则是变化的,弦长 Z 是一个随机变量.下面考虑 Z 的累积分布函数和分布密度函数.位于矩形区域 $OHIJ$ 内的节点 a 的 X 和 Y 坐标的联合概率分布函数为 $L_{X,Y}(x,y)$,即 X 和 Y 坐标同时小于 x,y 的概率.由于节点随机分布, $L_{X,Y}(x,y) = P\{X < x, Y < y\} = xy/2r_s h$,其中, $0 < x < 2r_s, 0 < y < h$.对 y 积分可以得到节点 X 坐标的累积分布函数为 $L_X(x) = x/2r_s$,其中 $x < 2r_s$,由于节点 a 到 DR 的距离 d 是关于坐标 x 的函数,即 $d = |AB| = |r_s - x|$,则 d 的累积分布函数 $L_D(d) = 1 - d/r_s$,其中, $0 < d < r_s$.由于弦长 $z = 2\sqrt{r_s^2 - d^2}$,弦长的分布函数为

$$L_Z(z) = 1 - 2\sqrt{\frac{r_s^2 - \left(\frac{z}{2}\right)^2}{r_s^2}}, \quad 0 < z < 2r_s \quad (3)$$

$$l_z(z) = 1 - \frac{z}{4r_s \sqrt{r_s^2 - (z/2)^2}}, \quad 0 < z < 2r_s \quad (4)$$

因此,通过式(2)和式(4)可以得到节点对穿越其感知区域的目标的平均检测概率 $\overline{P(E_1)}$,简记为 ϕ ,

$$\phi = \overline{P(E_1)} = \begin{cases} \int_0^{2r_s} \frac{(s + z/w_s v) z}{4r_s \sqrt{r_s^2 - (z/2)^2}} dz, & 2r_s < w_s v(1-s) \\ \int_0^{w_s v(1-s)} \frac{(s + z/w_s v) z}{4r_s \sqrt{r_s^2 - (z/2)^2}} dz + \int_{w_s v(1-s)}^{2r_s} \frac{z}{4r_s \sqrt{r_s^2 - (z/2)^2}} dz, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

从上式可以看出,平均检测概率存在两个表达式.快速移动的目标即使沿着直径穿过节点的感知区域都不能确保一定被检测到,对应于第 1 个表达式.移动速度相对较慢的目标沿着某长度(不大于直径)的弦穿过节点感知区域时被检测的概率恰好为 1,则沿着小于此长度的弦穿越时检测概率小于 1,沿着大于此长度的弦穿越时检测概率为 1,平均检测概率对应于第 2 个表达式.由于节点是 Poisson 点过程部署的,根据概率论中的全概率公式,可以求得目标经过路径 DR 时的检测概率,并要求此概率须大于设定值 β ,即

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2r_s h \lambda)^n e^{-(2r_s h \lambda)}}{n!} (1 - (1 - \phi)^n) = 1 - e^{-2r_s h \lambda \phi} > \beta \quad (6)$$

$$\varphi > -\frac{\ln(1-\beta)}{2r_s h \lambda} \quad (7)$$

式(7)是目标经过路径 DR 的检测概率不小于 β 时单个节点对目标的平均检测概率应满足的条件,当网络部署后,式(5)和式(7)中的 r_s, h, λ, w_s, v 都是常量,则 φ 是关于占空比 s 的函数,因而可以调节占空比 s 达到目标检测概率不小于设定阈值的要求。

由于上面的结论是基于目标沿着最短路径穿越任务区域时得到的节点感知占空比应满足的条件,实际上,目标的轨迹通常是一条不规则的曲线段,其长度大于 DR ,因而按照式(7)确定的节点感知占空比使得目标穿越任务区域时被检测的概率通常大于 β 。

3.2 目标流覆盖

处于低能耗监视状态的节点发现目标后需要周围节点协助感知目标以获得目标的信息,即节点被唤醒以覆盖目标,因而发现目标的节点将向邻居节点广播唤醒消息,收到唤醒消息的节点自行决定是否进入活跃状态,从而组成满足感知要求的、能量高效的覆盖网络。节点在覆盖目标流阶段需要考虑下面3个问题:(1) 如何使被唤醒的节点组成满足覆盖质量要求和能量高效的局部覆盖网?(2) 唤醒多大范围内的节点以使新到达的目标被活跃区域覆盖,即唤醒消息传播多远?(3) 节点需要持续工作多长时间以获取对目标流的持续覆盖?

3.2.1 节点唤醒

发现目标的节点在当前时间片内发送唤醒消息,而监视状态的节点在每个时间片内都对信道采样,所以邻居节点在一个时间片内总可以收到唤醒消息。若节点冗余部署,为使被唤醒的节点为目标提供适当的、能量高效的覆盖质量,可以采用的方法有:(1) 首先唤醒临近区域所有的节点,被唤醒的节点调用覆盖控制方法进一步降低活跃节点的密度;(2) 在网络初始化阶段应用已有的覆盖控制方法把节点划分为多个覆盖集,每个覆盖集轮转工作,如果节点收到唤醒消息同时又处于调度时间内则转为活跃状态;(3) 唤醒机制与覆盖控制相结合,即节点唤醒过程也是覆盖控制方法执行的过程,唤醒的节点立即形成局部的覆盖网络。下面我们提出一个简单的节点密度受控的唤醒机制,即适当数量的节点被激活进入活跃状态。

假设目标至少被 $k(k>0)$ 个节点感知的概率不小于 γ , 意即在以目标为中心,感知半径 r_s 的圆盘内存在 k 个活跃节点数的概率不小于 γ , 则根据节点随机分布特性容易确定活跃节点的密度 λ_a 。

$$1 - \sum_{n=0}^{k-1} \frac{(\pi r_s^2 \lambda_a)^n e^{-\pi r_s^2 \lambda_a}}{n!} = \gamma \quad (8)$$

由于活跃节点密度越高,目标被 k 个节点覆盖的概率越大,因而从不等式(8)容易得到形如式(9)的活跃节点密度应满足的条件:

$$\lambda_a = h(\gamma) \quad (9)$$

其中, $h(\gamma)$ 是式(8)左边表达式的反函数形式。通过式(9)可以计算出活跃节点密度 λ_a 与节点部署密度 λ 之比 λ_a/λ , 记为 δ ($\delta < 1$), 收到唤醒消息的节点则以 δ 为概率确定自己是否转为活跃节点。

3.2.2 消息传播

与事件驱动覆盖不同,反应覆盖不跟踪和预测目标未来时刻可能的位置和轨迹,而是广播消息唤醒周围节点为即将到达的目标提供较高质量的感知覆盖。由于发现目标的节点没有目标精确的运动模式、速度和方向的信息,故无法推测出目标运动的轨迹,因而不能沿着轨迹唤醒相应的节点而是每次唤醒自身附近的邻居节点逐渐达到覆盖目标流的轨迹,提供高质量的覆盖。因此我们估算被检测目标被发现前在任务区内平均穿越的距离,那么新目标将以较高的概率出现在以平均穿越距离为半径的区域内,因而节点将在以此距离为半径,以自身位置为中心的圆形区域内广播唤醒消息。

令 X 为目标在任务区域内经过的路径长度,累积分布函数 $F(x)$ 为目标移动距离不大于 x 时目标被检测的概率,其相应的概率密度函数记为 $f(x)$:

$$F(x) = 1 - e^{-2r_s \lambda \varphi x} \quad (10)$$

$$f(x) = 2r_s \lambda \varphi e^{-2r_s \lambda \varphi x} \quad (11)$$

$E(X)$ 是 X 的期望,表示目标被发现时移动的平均距离.当任务区域足够宽即 $h \rightarrow +\infty$ 时,目标即使沿最短路径穿越任务区域,其被检测的概率也趋于 1,则目标被发现时目标移动的平均距离等于 X 的期望,

$$\text{Avg}(x) = E(x) = \int_0^{+\infty} xf(x)dx = \frac{1}{2r_s \lambda \phi} \quad (12)$$

但是,任务区域的宽度是有限的,当目标穿越任务区域后仍有可能不被检测.对于有限宽度的任务区域,目标被检测时平均移动距离由两部分组成:(1) 被检测目标的移动距离;(2) 未被检测目标经过的距离,可以认为这些目标被发现的距离等于 $(h+\varepsilon)$,其中 ε 为任意小的正数,则目标平均移动距离为

$$\text{Avg}(x) = \int_0^h xf(x)dx + \int_h^{+\infty} hf(x)dx = \frac{1}{2r_s \lambda \phi} (1 - e^{-2r_s \lambda \phi h}) \quad (13)$$

节点以平均移动距离为半径广播唤醒消息,消息传播的跳步数等于 $\lceil \text{Avg}(x)/r_c \rceil$,消息中包含有剩余跳步数的字段,初始值为 $\lceil \text{Avg}(x)/r_c \rceil - 1$,当剩余跳步数大于 0 时唤醒消息被转发,同时剩余跳步数减小 1,当剩余跳步数为 0 时则停止转发.

由于消息是以目标平均移动距离为半径广播唤醒消息,因而被唤醒的活跃区域可能没有完全覆盖目标流的轨迹,所以需要扩大活跃区域以覆盖整个目标流的轨迹.唤醒消息传播机制是唤醒消息被转发时其剩余跳步数减 1,当剩余跳步数变为 0 时则停止转发,若节点收到了剩余跳步数为 0 的消息时将自己标记为活跃区域的边界节点,那么当任何一个目标进入边界节点的感知区域后,边界节点广播新的唤醒消息,同时取消自己边界节点的标记,不在边界上的节点在发现目标后不广播唤醒消息.若节点收到多个唤醒消息则取最大剩余跳步数确定自己是否为边界节点.通过这种方式,活跃区域可以被有限度地增量式地扩大,最终覆盖整个目标流的轨迹.

3.2.3 流特性估计

为了等待新目标的出现,节点被唤醒后需持续工作一段时间.持续工作时间的选取体现了能量高效性与感知质量的折中,若节点持续工作时间越长,感知新目标的可能性越大,但是不利于节约能量,持续工作时间越短则遗漏目标的可能性越大.持续感知时间 ψ 的选取应满足①) 持续工作的时间充分长,在工作时间内以大概率覆盖新到达的目标,尤其是当目标流刚进入任务区域,目标稀疏,间隔较大时.当目标流通过任务区域时,节点能够持续地感知目标流,避免目标流感知的中断.(2) 当目标流离开监视区域后及时判定目标流离开了任务区域,使得节点能够进入低占空比的监视状态.因此,需要考察目标流相邻目标到达间隔时间的规律,以选取节点持续工作时间,从而满足覆盖质量和能量高效的要求.

设随机变量 T 表示通过任务区域内一点的相邻两个目标的时间间隔, $g(\tau, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$ 为 T 的分布密度函数,参数 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$ 未知.考虑到每次到达的目标流的时间特性不同,表现为每次目标流的时间间隔分布函数中的参数值可能不同,此外,由于目标行为的特点和偏好导致目标到达的时间间隔分布函数中的参数与空间位置也相关,即不同的节点观察到的目标流特性也不相同,因而每个节点需要独自估算时间间隔分布函数的参数,进而计算出各自的持续工作时间.

由于目标到达间隔时间的分布函数形式相同且已知,但是需要确定分布中的未知参数.设 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m$ 是节点获得的 m 个目标到达间隔时间的样本值,分布密度函数形如 $g(\tau, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$,包含 k 个待估参数,依据概率与统计理论的矩估计方法和最大似然估计方法可以估算出分布函数中的参数.下面的仿真实验中则使用矩估计方法估算分布函数的参数.

3.2.4 感知覆盖

上一节中每个节点都独自获取了目标流的特性表达式,这样,节点根据特性表达式就可以确定活跃状态的持续工作时间 ψ .若参数 ω 是给定的新目标到达的概率,则根据间隔时间分布函数 $G(\tau) > \omega$ 可以得到新目标到达概率大于 ω 时的持续活跃时间 ψ .由于 $G(\tau)$ 是关于 τ 的单调不减函数,因而其反函数也是关于 ω 的单调不减函数.新目标出现的时间间隔满足下面的表达式:

$$\psi > G^{-1}(\omega) \quad (14)$$

节点持续工作的时间下限应确保新到达目标被感知的概率不小于 ω ,因此节点持续工作下限 ψ_{inf} 为

$$\psi_{inf}=G^{-1}(\omega) \tag{15}$$

当节点持续工作时间大于 ψ_{inf} 时,网络能够为目标流提供更高的感知质量,但是需要消耗更多的能量,额外消耗的能量应不大于在延长时间出现目标时唤醒周围邻居节点的能量开销.设节点活跃状态时的平均功率为 p_{active} ,而节点接收和发送唤醒消息的能量开销为 e_{active} ,忽略节点唤醒延迟,节点持续工作时间间隔满足下式:

$$p_{active}\lambda\pi Avg^2(x)(\psi - \psi_{inf}) - \lambda\pi Avg^2(x)e_{active} \tag{16}$$

$$\psi = \psi_{inf} + \frac{e_{active}}{p_{active}} \tag{17}$$

因此,根据参数矩估计方法可以独自确定目标出现时间间隔的分布函数,通过设定的目标到达概率,则每个节点可以确定自己的持续工作时间.

3.3 目标流离开

对于连续的目标流,我们希望节点能够持续地观测目标以获取更多的信息,因而节点需要谨慎判断目标流是否离开了任务区域.如果错误判断目标流离开了监视区域,则节点转入低能耗的监视状态,导致观测中断,然而此时仍有目标穿越任务区域,那么节点被再次唤醒,进入工作状态.因此,误判了目标流离开任务区域不但不能减小节点能量开销,反而中断了对目标流的覆盖,增大了目标流的感知延迟.

前面已经求得节点持续工作时间的上、下限,那么,如果节点在持续工作时间内没有发现目标,是否就可以判定目标流离开任务区域了呢?从节点持续工作时间的假设上可以看出,在节点持续工作时间内出现新目标的概率不小于 ω ,但是仍然存在 $(1-\omega)$ 的可能性会出现到达间隔时间大于持续工作时间的目标,因而时间间隔大于持续工作时间不能作为目标流离开任务区域的唯一依据.

通过观察发现,在目标流到达、通过和离开的各个阶段里,其相邻目标到达的时间间隔是变化的,目标流刚进入任务区域时目标流比较稀疏,到达的时间间隔较大,但是随着时间的推移,目标流变得密集,即相邻目标到达的平均时间间隔逐渐减小直到稳定在某个值附近,当目标流离开任务区域时,相邻目标到达的平均时间间隔逐渐变大,目标变得稀疏直到全部离开任务区域,因此我们通过检测时间间隔样本均值的偏移量判断目标流是否正离开任务区域.若时间间隔样本均值发生显著偏移,则意味着目标流正离开节点感知区域;若此时在最近的持续工作时间内又没有出现目标,则意味着目标到达的间隔时间大于节点持续工作时间是大概率事件,故节点认为目标流离开了节点的感知区域,可以恢复到低能耗监视状态.

记 $\bar{\tau}, \mu_1, \sigma^2, m$ 分别为目标到达间隔时间的样本均值、总体均值、方差和样本容量,其中 μ_1, σ^2, m 已知.

$$\bar{\tau} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \tau_i \tag{18}$$

如果在显著性水平 ϕ 下,样本均值明显大于总体均值时认为目标流正离开监视区域,那么判定目标流是否正离开监视区域的假设为

$$H_0: \mu = \mu_1 \tag{19}$$

$$H_1: \mu > \mu_1 \tag{20}$$

判定目标流是否正离开任务区域就是作出是接受假设 H_0 还是拒绝假设 H_0 的决策.当接受 H_0 时,意味着样本均值没有超出总体均值可以接受的范围,认为目标流仍在监视区域内;反之,当拒绝 H_0 时,则认为目标流正离开监视区域.

由中心极限定理可知,样本均值的标准化变量服从标准正态分布,即 $(\bar{\tau} - \mu_1) / \sigma / \sqrt{m} \sim N(0, 1)$,因而根据假设检验理论,拒绝域表达式形如 $\bar{\tau} > \mu_1 + \kappa$, 其中 $\kappa > 0$.

$$P\{\text{当 } H_0 \text{ 为真时仍拒绝 } H_0\} = P_{\mu = \mu_1} \left\{ \frac{\bar{\tau} - \mu_1}{\frac{\sigma}{\sqrt{m}}} > \frac{\kappa - \mu_1}{\frac{\sigma}{\sqrt{m}}} \right\} = P_{\mu = \mu_1} \left\{ \frac{\bar{\tau} - \mu_1}{\frac{\sigma}{\sqrt{m}}} > \frac{\kappa - \mu_1}{\frac{\sigma}{\sqrt{m}}} \right\} = \phi \tag{21}$$

因此,检验问题的拒绝域为 $\bar{\tau} > \mu_1 + \sigma \xi_{\phi} / \sqrt{m}$, 其中, ξ_{ϕ} 为标准正态分布的拒绝域临界点.当目标到达时间间

隔的样本均值位于拒绝域时,则认为目标流正离开节点的监视区域;若节点在持续工作时间内没有发现目标,则判定目标流离开了任务区域,目标进入低能耗的监视状态.

4 Poisson 目标流

前面针对一般意义的目标流给出了反应覆盖的解决方法和理论结果,下面以目标或事件流是强度为 ρ 的 Poisson 随机过程为例讨论相应的解.若目标或事件流是强度为 ρ 的 Poisson 随机过程,则在时间间隔 τ 内到达 n 个目标数 $N(\tau)$ 的概率为

$$P\{N(\tau) = n\} = \frac{(\rho\tau)^n}{n!} e^{-\rho\tau}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (22)$$

由于节点感知占空比,唤醒消息传播距离与目标流特性无关,下面给出节点持续工作时间、目标流强度估计和目标流离开任务区域的判定条件的理论结果.由概率论知识可以得到目标到达的时间间隔 τ 的概率密度函数以及时间间隔的期望为

$$g(\tau) = \rho e^{-\rho\tau} \quad (23)$$

$$E(\tau) = \int_0^{+\infty} \tau \rho e^{-\rho\tau} d\tau = \frac{1}{\rho} \quad (24)$$

设 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m$ 是节点在目标流稳定时获得的 m 个目标到达间隔时间的样本值,根据矩估计方法得到目标流的强度估计值:

$$\hat{\rho} = \frac{m}{\sum_{i=1}^m \tau_i} \quad (25)$$

对应于强度为 ρ 的 Poisson 目标流,节点持续感知时间的上、下界为

$$\psi_{\inf} = -\frac{\ln(1-\omega)}{\rho} \quad (26)$$

$$\psi_{\sup} = -\frac{\ln(1-\omega)}{\rho} + \frac{e_{\text{active}}}{p_{\text{active}}} \quad (27)$$

在水平显著性水平 $\phi=0.95$ 时,判定目标流正在离开节点的监视区域的条件是

$$\bar{\tau} > \frac{1}{\hat{\rho}} \left(1 + \frac{1.65}{\sqrt{m}} \right) \quad (28)$$

上述理论结果在实验中也得到了较好的验证.

5 工作过程

下面将详细叙述反应覆盖的工作过程.

首先,网络部署后节点需要初始化以估算邻近区域的节点密度、消息传播的距离和设定初始的持续感知时间.部署结束后节点广播 Hello 消息,并监听邻居节点的 Hello 消息,通过收到的 Hello 消息数与通信半径覆盖的区域面积之比可以近似地估算邻近区域内的节点密度,进而可以求得目标检测概率不小于给定值时的感知部件工作占空比.根据估算的节点密度和感知占空比可以得到消息传播的距离,而节点的初始持续感知时间则使用默认的参数进行估算.当节点完成初始化工作后,若没有发现目标则进入监视状态.

节点发现目标后,向周围邻居节点广播唤醒消息.节点在以目标平均移动距离为半径,以自身位置为中心的圆形区域内广播和转发唤醒消息,接收到唤醒消息的节点根据设定的覆盖质量估算出进入活跃状态的概率并以此概率决定是否进入活跃状态.唤醒消息里的剩余跳步数则表示消息还应传播多远,唤醒消息每被转发一次,剩余跳步数就减 1,当剩余跳步数为 0 时则停止转发.若被唤醒的节点收到的唤醒消息的剩余跳步数为 0 时,则将自己标记为活跃区域的边界节点,而边界节点在发现目标后则广播唤醒消息,不是边界的节点在发现目标后不广播唤醒消息.这种限制广播的方式可以使活跃区域被有限度地增量式地扩大.

节点被唤醒时启动目标到达时间计时器,当新目标到达时,则记录目标到达时的时间间隔且计时器清零,重新开始倒计时.当目标流到达稳定状态时,节点从保留的最近 m 个时间间隔样本值估算出对应于自身位置的目标流分布参数值,不再使用默认的参数设置.若在持续工作时间内没有发现目标,即计时器归零时仍未发现目标,则节点使用最近记录的 $(m-1)$ 个样本值和当前已等待的时间作为样本值估算样本均值偏移的程度.若样本均值发生显著偏移,则认为目标流离开了任务区域,节点进入低功耗状态;若样本均值未出现显著的偏移,则认为目标流仍在任务区域内,只是出现了大时间间隔的事件,节点仍继续等待,直到新目标到达或样本均值显著偏移.因此,在判定目标流是否离开监视区域的条件是样本均值出现显著偏移,且在持续时间内没有目标出现.若到达的目标总数少于 m ,但是在持续工作时间内没有目标出现,则认为是偶然到达的和零星的目标,因而节点在等待时间结束后则进入低占空比的监视状态.

表 1 是伪码描述的反应覆盖过程.

Table 1 Procedure of proactive coverage

表 1 反应覆盖的工作过程

Procedure: Proactive node schedule	
1	initialize parameters $\lambda, s, Avg(x), \psi$;
2	while (1) do
3	if (detect a target)
4	record the arrival instant, calculate mean interval time and reset timer;
5	if (in monitoring state) or (on border)
6	Broadcast a wakeup message;
7	end if
8	end if
9	if (receive a wakeup message)
10	reset timer;
11	if ($hops > 0$)
12	forward the wakeup message with ($hops-1$);
13	end if
14	if (in monitoring state)
15	convert active or not through density control method;
16	end if
17	end if
18	if (the timer is timeout)
19	evaluate the sample interval time value $\bar{\tau}$;
20	if ($\bar{\tau} > \mu_t + \sigma_{\tau}^e / \sqrt{m}$)
21	cancel the timer, convert into monitoring state;
22	end if
23	end if
24	if (in monitoring state)
25	sleep for awhile;
26	end if
27	end while

反应覆盖过程不断地在监视和活跃的两种状态之间转换,直到节点能量耗尽,因而没有返回值和终止状态.在 while 循环内,每条语句的执行时间可以认为是常数时间的.在执行 while 循环语句时,若节点处于监视状态,则在每个循环内睡眠一段时间.

6 性能度量与仿真实验

为了评估反应覆盖策略对目标流的覆盖性能,我们使用 C++ 语言设计了一个模拟仿真程序 (proCoverageSim),从初始检测延迟、覆盖质量、网络生存期等方面进行性能评估.实验环境为一台配备了 Intel Pentium 4 的双核处理器,主频 3.0GHz,主存 1GB,运行 Windows XP sp2 的系统.实验场景为 100×50 的任务区域,节点随机部署,密度可变.节点的通信半径为 8,感知半径可变,感知占空比可变,假设目标流是 Poisson 到达的,目标流强度可变,两次目标流的间隔时间可变,而运动目标在每个时刻的位置不是固定的,而是以某一直线段为基础路径,高斯分布于其周围,因而目标流的轨迹是一条包含基础路径的带状区域.

6.1 初始检测延迟

初始检测延迟是目标流进入任务区域到首次被检测时经历的时间,反映了网络对新到达目标流的反应灵敏度.初始检测延迟越大,则目标流被检测前移动的距离越长,感知覆盖时间也就越小,降低了目标流的覆盖质量.由于绝对初始检测延迟不能真正体现反应覆盖对目标流覆盖的性能,因而使用相对初始检测延迟作为度量.相对初始检测延迟是初始检测延迟与目标通过任务区域的时间之比.它可以避免任务区域的宽度和目标轨迹对初始检测延迟的影响.另一个与检测延迟相关的度量是目标的漏检率.当目标的相对检测延迟等于 1 时,若目标离开任务区域时仍不被检测,则称为漏检,漏检的目标数占总目标数的比例就是漏检率.漏检率越小越好.

实验的默认参数设置如下:节点密度为 0.02,感知半径为 3,占空比为 0.01,目标运动速度为 8.我们通过调节节点密度、感知占空比、感知半径和目标流速度研究它们对相对初始检测延迟和漏检率的影响.每次实验独立运行 100 次,取结果的统计平均为实验值.为了评估反应覆盖的性能,我们将实验结果与理论值进行了对比.第 3.2.2 节中已得出目标被发现时平均移动的距离 $Avg(x)$,那么理论上相对初始检测延迟为 $Avg(x)/h$.

实验结果如图 3~图 6 所示.从图中的曲线可以看出,初始检测延迟的实验值与理论值比较接近,初始检测延迟与节点密度、占空比和感知半径近似成反比关系,与目标移动速度成线性增长关系.此外,实验结果还显示漏检率与初始相对延迟有一定的关系,当初始相对延迟为 0.25 时,漏检率下降到 0.001;当初始相对延迟为 0.2 时,漏检率接近 0.

6.2 覆盖质量

第 3 节中描述了使用目标覆盖时间与目标逗留时间之比作为运动目标覆盖质量的度量,所有目标覆盖度的平均值为目标流的覆盖度.根据反应覆盖工作过程,可以分析影响目标流覆盖质量的因素:(1) 初始检测延迟.初始检测延迟减小了目标被感知的时间长度.(2) 唤醒延迟.即节点检测到目标后唤醒周围邻居需要的时间,因而唤醒延迟也减小了目标覆盖的时间.(3) 目标流的抖动.偶然的因素使目标流产生较大的到达间隔时间,被节点误认为目标流的离开而进入监视状态,中断了对目标流的覆盖.(4) 目标突然改变运动轨迹.突然改变运动轨迹使得目标离开了活跃区域而出现了覆盖中断.

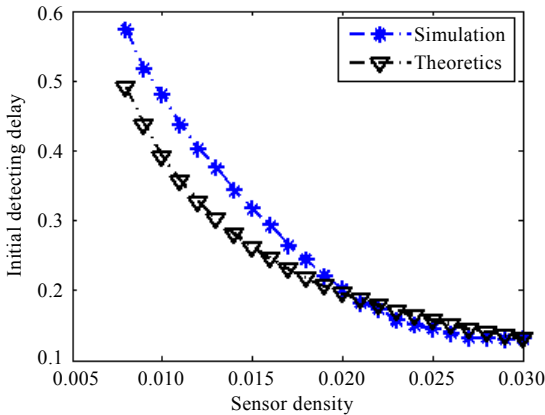


Fig.3 Relative initial detecting delay vs. node density

图 3 相对初始检测延迟与节点密度

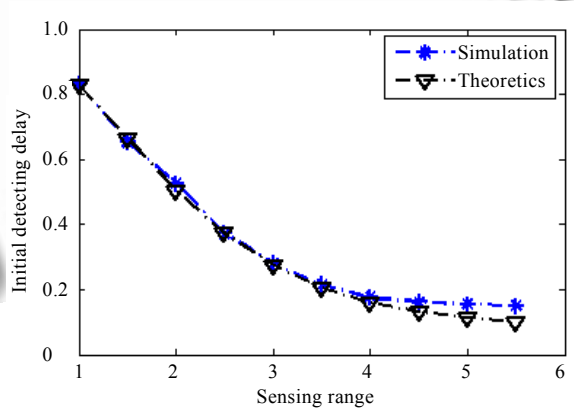


Fig.4 Relative initial detecting delay vs. sensing range

图 4 相对初始检测延迟与感知半径

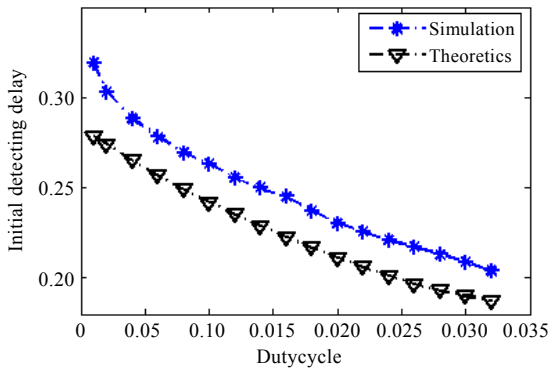


Fig.5 Relative initial detecting delay vs. sensing dutycycle

图 5 相对初始检测延迟与感知占空比

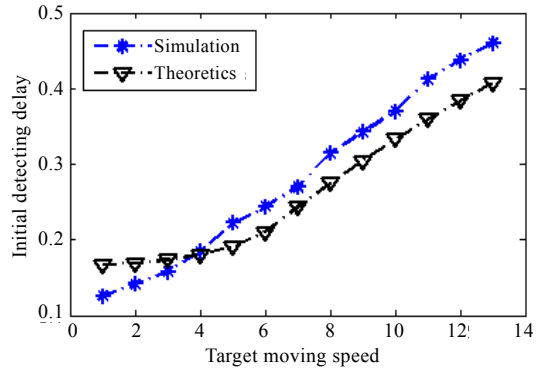


Fig.6 Relative initial detecting delay vs. target moving speed

图 6 相对初始检测延迟与目标运动速度

proCoverageSim 仿真实验中默认的参数设置为:节点密度为 0.036,感知半径为 3,占空比为 0.01,目标运动速度为 5,节点唤醒延迟为 1 个时间单位,目标位置的标准差(反映了目标运动轨迹变化的大小)为目标运动速度的 1/4.我们通过调节节点密度和目标流规模观察反应覆盖对目标流的覆盖质量,为了对比研究反应覆盖的覆盖质量,我们还给出了使用活跃节点密度控制的静态覆盖方法对目标流的覆盖质量曲线.图 7 和图 8 显示出反应覆盖质量与静态覆盖质量比较接近,但是在目标流规模较小时(目标数<30,如图 8 所示),反应覆盖和静态覆盖的覆盖质量差异较大.这是由于初始检测延迟引起了反应覆盖质量下降,但随着目标流规模变大,初始检测延迟对反应覆盖造成的影响变小,二者的覆盖质量趋于接近.

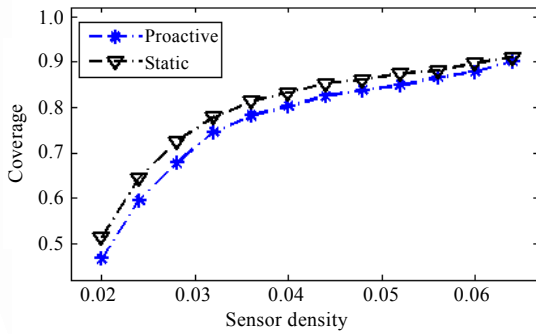


Fig.7 Coverage vs. node density

图 7 覆盖度与节点密度

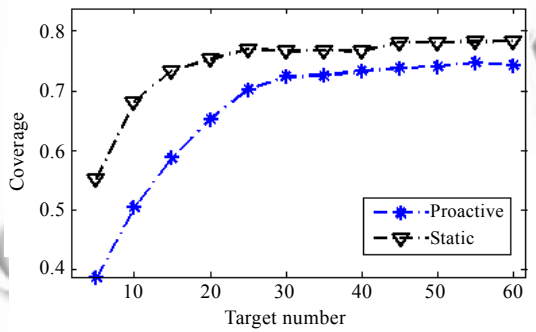


Fig.8 Coverage vs. target flow scale

图 8 覆盖度与目标流规模

6.3 网络生存期

能量高效的目的是提高网络生存期,虽然静态覆盖也可以实现对目标流的覆盖,但是在没有目标流出现时,节点也是活跃的,因而不够高效.反应覆盖能够判断目标流的到达和离开,自适应地调整覆盖度,从而提高能量效率,延长网络生存期.影响反应覆盖网络生存期的因素有:(1) 目标流的间隔时间(安静时间).由本文假设可知,目标流在时间域上并不总是连续的,而是存在安静时间的,若安静时间较长,则节点能量消耗得慢,网络生存期就长;反之,则网络能量消耗得快.(2) 目标流基础轨迹的分布.如果目标流的基础轨迹总是不变的,那么基础轨迹周围节点的失效会导致网络失效;如果基础轨迹是均匀分布于任务区域的,那么能量在空间域里可以均匀地消耗,以延长网络生存期.(3) 目标流强度.目标流强度越小意味着目标平均到达间隔时间越长,节点需要工作在活跃状态的时间就越长,消耗的能量也越多,因而在相同规模的目标流下,目标流强度也就越大,网络生存期也越

长.(4) 收敛时间.收敛时间是目标流离开任务区域到节点都进入低功耗监视状态时经历的时间.收敛时间越短,节点进入低功耗监视状态越快,但是可能会作出目标流离开任务区域的误判;收敛时间越长越不容易遗漏目标,但是消耗的能量却越多.由于收敛时间对网络生存期的影响不是很关键,我们不评估其对网络生存期的影响.

Table 2 Energy consumptions during a time unit by different node states

表 2 节点各状态在单位时间内消耗的能量

Active	Yes	Yes	No	No
Sensing	Yes	No	Yes	No
Energy consumption	1.2	1	0.5	0.1

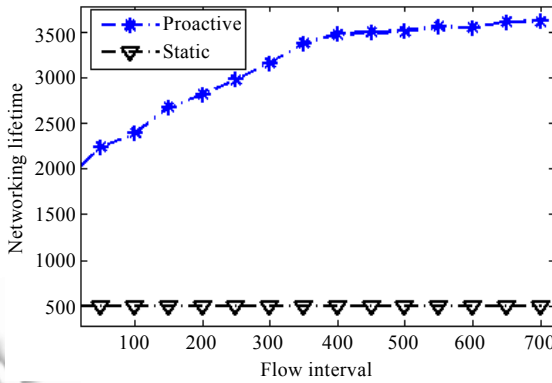


Fig.9 Networking lifetime vs. interval of target flow

图 9 网络生存期与目标流间隔时间

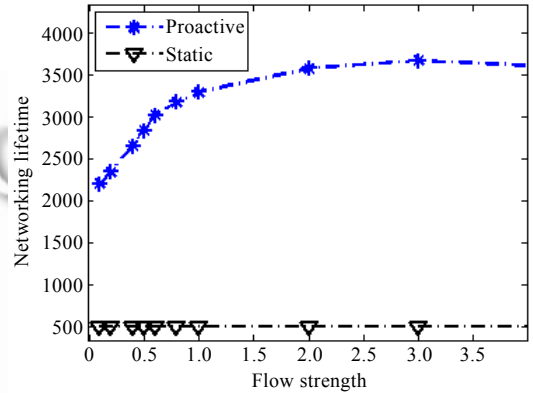


Fig.10 Networking lifetime vs. target flow strength

图 10 网络生存期与目标流强度

在 proCoverageSim 仿真实验中假设目标流的基础轨迹是径直穿越任务区域的直线段.直线段的初始横坐标均匀分布于区域长边上,从而使得能量在空间上均匀消耗.通过改变目标流的间隔时间和目标流强度,观察网络生存期的变化情况.实验的默认参数设置为:随机部署 300 个节点,当节点数减少到 180 时认为网络失效,节点初始能量为 500(节点在不同状态的能量消耗值见表 2),目标流的间隔时间为 300,目标流强度为 1.为了比较反应覆盖的网络生存期性能,实验还给出了静态覆盖时的网络生存期曲线.图 9 和图 10 表明,静态覆盖不关心目标流的特性,因而对于目标流的特性参量不敏感,而反应覆盖的网络生存期受目标流间隔时间和强度的影响,当目标流间隔时间短时,能量消耗快,网络生存期变短(如图 9 所示);当目标流强度小时,节点持续工作时间长,能量消耗快,网络生存期变短(如图 10 所示).仿真实验结果显示,反应覆盖的网络生存期是静态覆盖的 4~7 倍,性能明显优于静态覆盖.

7 结 论

成群出现或连续出现的目标形成目标流.目标流在时间和空间域上具有一定的统计特性.此外,目标流在时间域上是间断的,因此,静态覆盖对于目标流不再是能量高效的,而事件驱动覆盖又存在较大的覆盖延迟和较高的通信代价,因而本文提出了覆盖质量随时间变化的反应覆盖方法:当目标流没有到达任务区域时,网络的覆盖强度最低,但是能够检测目标流的到达,从而节省能量;当目标流到达时,节点被唤醒,网络为目标流提供高质量的感知覆盖;当目标流离开网络时,节点又进入低能耗的监视状态.反应覆盖根据目标流的时间和空间统计特性选取感知占空比、唤醒邻居数、持续工作时间等参数,给出了节点判定目标流离开而进入监视状态的方法.仿真实验数据显示,反应覆盖的初始检测延迟对目标流的覆盖质量影响较小,当目标流较大(目标数大于 30)时,覆盖质量接近静态覆盖质量,而网络生存期增加了 4~7 倍.

References:

- [1] Akyildiz IF, Su WL, Sankarasubramanian Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8):101–114.
- [2] Ren FY, Huang HN, Lin C. Wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2003,14(7):1282–1291 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm>
- [3] Ren Y, Zhang SD, Zhang HK. Theories and algorithms of coverage control for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2006, 17(3):422–433 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/422.htm> [doi: 10.1360/jos170422]
- [4] Gui C, Mohapatra P. Power conservation and quality of surveillance in target tracking sensor networks. In: Haas ZJ, Das SR, Jain R, eds. *Proc. of the 10th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*. New York: ACM Press, 2004.
- [5] He T, Vicaire P, Yan T, Luo LQ, Gu L, Zhou G, Stoleru R, Cao Q, Stankovic JA, Abdelzaher T. Achieving real-time target tracking using wireless sensor networks. In: *Proc. of the 12th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symp.* Washington: IEEE Computer Society Press, 2006. 37–48.
- [6] Juang P, Oki H, Wang Y, Martonosi M, Peh LS, Rubenstein D. Energy-Efficient computing for wildlife tracking: Design tradeoffs and early experiences with ZebraNet. *ACM SIGARCH Computer Architecture News*, 2002,37(10):96–107.
- [7] Hoogendoorn SP, Bovy PHL. State-of-the-Art of vehicular traffic flow modeling. *Journal of Systems and Control Engineering*, 2001,215(4):283–303.
- [8] Slijepcevic S, Potkonjak M. Power efficient organization of wireless sensor networks. In: Glisic S, ed. *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC)*. New York: IEEE Press, 2001. 472–476.
- [9] Berman P, Calinescu G, Shah C, Zelikovsky A. Power efficient monitoring management in sensor networks. In: Roberto J, de Marca B, Weinstein S, Cuthbert L, eds. *Proc. of the Conf. on IEEE Wireless Communication and Networking*. Washington: IEEE Communications Society Press, 2004. 2329–2334.
- [10] Bai XL, Yun ZQ, Xuan D, Lai TH, Jia WJ. Deploying four-connectivity and full-coverage wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM)*. New York: IEEE Press, 2008. 296–300.
- [11] Zhang HH, Hou JC. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. *Wireless Ad Hoc and Sensor Networks: An International Journal*, 2005,1(1-2):89–123.
- [12] Mao YC, Feng GF, Chen LJ, Chen DX. A location-independent connected coverage protocol for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2007,18(7):1672–1684. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1672.htm> [doi: 10.1360/jos181672]
- [13] Liu W, Cui L, Huang CC. EasiFCCT: A fractional coverage algorithm for wireless sensor networks. *Journal of Computer Research and Development*, 2008,45(1):196–204 (in Chinese with English abstract).
- [14] Liu M, Cao JN, Zheng Y, Chen LJ, Xie L. Analysis for multi-coverage problem in wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2007,18(3):127–136 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1672.htm> [doi: 10.1360/jos180127]
- [15] Younis O, Krunz M, Ramasubramanian S. Coverage without Location Information. In: Xu K, ed. *Proc. of the 13th IEEE Int'l Conf. on Network Protocols*. Washington: IEEE Computer Society Press, 2007. 51–60.
- [16] Wang S, Wang X, Bi DW. Dynamic sensor selection optimization strategy for wireless sensor networks. *Journal of Computer Research and Development*, 2008,45(1):188–195 (in Chinese with English abstract).
- [17] Li XL, Lin YP, Hu YP, Liu YH. A subset-based coverage-preserving distributed scheduling algorithm. *Journal of Computer Research and Development*, 2008,45(1):180–197 (in Chinese with English abstract).
- [18] Ye F, Zhong G, Lu SW, Zhang LX. PEAS: A robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks. In: Almeroth K, Calvert K, eds. *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Network Protocols (ICNP)*. Washington: IEEE Computer Society Press, 2003. 28–37.
- [19] Zhang MZ, Chan MC, Ananda AL. Coverage protocol for wireless sensor networks using distance estimates. In: Cruz R, Heinzelman W, eds. *Proc. of the Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*. New York: IEEE Communications Society, 2007. 183–192.
- [20] Wang LM, Kulkarni SS. Sacrificing a little coverage can substantially increase network lifetime. In: Sivalinga K, Yarvis M, eds. *Proc. of the 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*. Reston: IEEE Communications Society, 2006. 326–335.

- [21] Yan T, He T, Stankovic JA. Differentiated surveillance for sensor networks. In: Akyildiz IF, Estrin D, eds. Proc. of the 1st Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press, 2003. 51–62.
- [22] Yang H, Sikdar B. A protocol for tracking mobile targets using sensor networks. In: Proc. of the 1st IEEE Int'l Workshop on Sensor Network Protocols and Applications. New York: IEEE Communications Society, 2003. 71–81.
- [23] He T, Vicaire P, Yan T, Cao Q, Zhou G, Gu L, Luo LQ, Stoleru R, Stankovic JA, Abdelzaher TF. Achieving long-term surveillance in VigilNet. In: Domingo-Pascual J, ed. Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM). New York: IEEE Press, 2006. 1–12.
- [24] Yu XB, Niyogi K, Mehrotra S, Venkatasubramanian N. Adaptive target tracking in sensor networks. In: Proc. of the 2004 Communication Networks and Distributed Systems Modeling and Simulation Conf. 2004.
- [25] Jeong J, Hwang T, He TY, Du D. Mcta: Target tracking algorithm based on minimal contour in wireless sensor networks. In: Ramasubramanian S, ed. Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM). New York: IEEE Press, 2007. 2372–2375.

附中文参考文献:

- [2] 任丰原,黄海宁,林闯.无线传感器网络.软件学报,2003,14(7):1282–1291. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm>
- [3] 任彦,张思东,张宏科.无线传感器网络中覆盖控制理论与算法.软件学报,2006,17(3):422–433. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/422.htm> [doi: 10.1360/jos170422]
- [12] 毛莺池,冯国富,陈力军,陈道蓄.与位置无关的无线传感器网络连通性覆盖协议.软件学报,2007,18(7):1672–1684. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1672.htm> [doi: 10.1360/jos181672]
- [13] 刘巍,崔莉,黄长城.EasiFCCT:一种保证连通性的传感器网络局部覆盖算法.计算机研究与发展,2008,45(1):196–204.
- [14] 刘明,曹建农,郑源,陈力军,谢力.无线传感器网络多重覆盖问题分析.软件学报,2007,18(3):127–136. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1672.htm> [doi: 10.1360/jos180127]
- [16] 王晟,王雪,毕道伟.无线传感器网络动态节点选择优化策略.计算机研究与发展,2008,45(1):188–195.
- [17] 李小龙,林亚平,胡玉鹏,刘永和.基于分组的分布式节点调度覆盖算法.计算机研究与发展,2008,45(1):180–197.



温俊(1979 -),男,安徽合肥人,博士,主要研究领域为无线传感器网络.



齐星云(1979 -)男,博士,主要研究领域高级计算机网络,高性能计算.



竇强(1973 -)男,博士,研究员,CCF 会员,主要研究领域为高性能计算,体系结构.



竇文华(1946 -),男,教授,博士生导师,主要研究领域为高级计算机网络,高性能计算.



蒋杰(1976 -),男,博士,助理研究员,CCF 学生会员,主要研究领域为无线传感器网络,Ad-hoc 网络.