



移动无线传感器网络中基于概率式运动 预测的可靠服务执行方法^{*}

胡海洋, 张俊峰, 胡 华

(杭州电子科技大学计算机学院 杭州 310018)

摘 要: 移动无线传感器网络(MWSN)中节点间可彼此协作,对数据信息进行过滤、计算与组合后,并通过服务形式对外提供使用。然而由于传感器节点移动的不确定性 & 无线通信距离的有限性,在 MWSN 中实施服务执行时,需考虑各节点执行服务所需的时间及相互间在未来特定时间区间内所处的物理位置。通过节点移动速率、移动方向的概率函数来定义与预测它们运动的多种不确定运动模式及将来可能所处的物理区域,在此基础上度量传感器节点彼此间在特定时间区间内处于有效通信区域内的可靠性,并给出基于蒙特卡罗模拟的近似计算方法。进一步考虑了服务执行所需的最大时间阈值以及最小可靠性阈值,给出了完全遍历的服务选择算法与 Pareto-控制(Pareto-dominated)的局部 k 最优服务选择算法;最后通过实验分析比较了所提出算法的特点。

关键词: 移动无线传感器网络;通信可靠性;移动预测;服务执行

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.02.005

Reliable Service Execution Based on Probabilistic Moving Prediction in Mobile Wireless Sensor Network

Hu Haiyang, Zhang Junfeng, Hu Hua

(School of Computer Science and Technology, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: By collaborating with each other, nodes in mobile wireless sensor network (MWSN) can filter, calculate and composite the data so as to provide it in forms of services to different users. However, due to the uncertain moving behavior and the limited wireless transmission, executing services in MWSN has to consider the time needed in nodes executing their services, and the physical region in which two nodes can communicate with each other by wireless channel. Probabilistic methods were used to define and predict the uncertain moving behavior of each node, and then the reliability was measured that two nodes can successfully communicate with each other under their wireless transmission range during a certain time period in the future. An approximate approach based on Monte Carlo simulation was also given to calculate nodes' motions and the reliabilities of their successful communications. By consider the thresholds of execution time and the reliabilities of nodes' successful communications, two algorithms were given to make the scheme of selecting nodes executing a group of services provided by the users, one using the approach of completely searching and one adopting the Pareto-dominated local k -th optimized method. Finally, experimented were conducted to evaluate our methods.

Key words: mobile wireless sensor network, communication reliability, motion prediction, service execution

^{*} 国家自然科学基金资助项目(No.61272188, No.60903053), 浙江省自然科学基金资助项目(No.LY12F02005)

1 引言

移动无线传感器网络(mobile wireless sensor network, MWSN)包含多个传感器节点,它们彼此间相互协作,可对外部环境中的多种数据信息进行实时感知;这些数据信息经由一系列的过滤、计算与组合后,可通过多种服务的形式向外部应用提供使用。这种通过在网关上提供交互接口、以方便外界使用的服务方式,现已成为 MWSN 应用发展的一类重要方向^[1-3]。在这类应用中,Web 服务技术一般作为通用服务框架,被用于建立 MWSN 服务与外界应用 API 及底层框架之间的有机连接。

目前在 MWSN 中如何有效地实施服务组合,并满足终端用户个性化的需求,已成为研究者所关注的焦点之一^[1-3]。例如,在城市交通监测方面,有若干个流动的无线传感器,彼此相互配合,监视多条道路的车流量、拥塞情况;交通管理人员可定制所需服务,并以无线通信方式获取这些移动传感器上的数据信息。在军事领域,战场上大量移动传感器节点各自有着不同的监视任务,如地理环境的监控、敌人位置的监控、友军位置的监控,在作战环境中,士兵则可根据自身所需通过周围可用的无线传感器来获取整套的环境监控信息。

与固定网络中传统的 Web 服务组合技术相比,在 MWSN 中调用服务时面临着新的技术挑战:首先,由于传感器节点自身计算与存储能力较为有限,当终端用户所需的服务功能较为复杂时,仅凭单个传感器节点往往无法满足用户需求,因此需要多个传感器节点彼此间通过无线信道相互配合,并按照特定的任务流程相互间进行服务调用,从而完成一系列定制的计算,并满足终端用户的个性化需求;另一方面,无线传感器节点自身的无线发射功率较弱,无线通信范围较为有限,当两个传感器节点间的物理距离超过一定阈值时,将无法有效地获取对方传送的数据信息,从而彼此间无法顺利完成服务调用,因此在进行服务执行时,需要有效度量实施服务调用的传感器节点之间的实时物理距离;此外,移动无线传感器节点可时刻处于运动中,其运动方式具有较大的不确定性,并且受通信时延及 GPS(global positioning system,全球定位系统)等定位手段中所存在误差的影响,很难精确计算传感器节点在未来任意 t 时刻所处的物理位置,因此需要通过有效的手段来度量在未来的特定时间区间里,相关的传感器节点彼此间是否能持续处于有效的无线通信范围内。

目前针对 MWSN 中服务组合的研究工作已经展开,这些研究工作^[4-8]主要面向静态的无线传感器网络,即根据当前环境感知的信息,从多属性综合评估、度量服务的可用性,并给出相应的规划算法来挑选服务。然而,现有的研究工作很少涉及当传感器节点自身处于运动状态时,如何评估在特定空间区域及时间区间内各个传感器服务的可用性,并在此基础上进一步度量整个服务执行过程的可靠性。本文针对此方面展开工作,通过概率模型对无线移动传感器节点的运动进行有效预测,提高 MWSN 中服务执行的高效性与可靠性。在本文所提出的方法中,通过移动速率、移动方向的二维概率函数定义传感器节点运动的多种不确定运动模式及可能的运动区域,在此基础上通过双重积分来计算任意传感器节点彼此间在特定时间区间内处于有效通信区域内的可能性,并给出基于蒙特卡罗模拟的近似计算方法。然后针对 MWSN 中服务执行的完全前驱依赖性特点,进一步综合考虑了服务执行所需的最大时间容忍度以及最小可靠性容忍度,给出了完全遍历的服务选择算法与 Pareto-控制(Pareto-dominated)的局部 k 最优选择算法,从而制定出 MWSN 中服务选择与执行的优化策略。

2 相关工作

参考文献[4]通过对 MANET 环境下服务运行环境和对影响服务可用性的节点、网络环境可用性的分析,提出了一个具有环境感知能力的服务可用性量化评估模型,该模型由服务请求出发,实时获取服务运行参数、量化评估指标,并采用层次分析法和多属性综合评估法对服务的可用性进行量化评估。参考文献[5]提出了传感器网络中的两个定位算法——MSL(mobile and static sensor network localization,移动静态传感器网络定位)以及 MSL*,它在静止的传感器定位或运动的传感器定位中都有较好的表现。参考文献[6]提出了一个用来解决动态资源受限问题的移动 Ad Hoc 网络(临时网络)服务组合框架,它用来解决因受环境中节点移动以及资源变量所带来的管理问题。

参考文献[7]提出了在传感器网络下基于图模型的动态服务组合模型,它用映射到传感器网络的操作模型进行适应性分析。并且基于这个模型,将传感器中的服务组合过程视为 NP 完全的成本优化问题。然后提出了两个启发式算法,分别是自上而下和自下而上的方法,并最终讨论了集中式和分布式的实现。



参考文献[8]研究了无线传感器网络下通过贪婪算法和动态规划算法来完成服务组合,从而最大限度地减少在生命周期内对服务组合解决方案的持续查询,并且在最小查询数目的条件下实现服务组合过程中带来的能量消耗。参考文献[9]针对移动传感器网络提出了 DSDP(distributed service discovery protocol, 分布式服务发现协议), DSDP 组织网络区域层次来减少更新所带来的消耗。在覆盖两跳区域的低层区域可以不用更新即能在更大的区域中自由移动。

参考文献[10]研究了移动传感网络下的服务组合,它不仅考虑到用户感知的因素,而且基于移动传感器节点间的位置关系建立了标准 QoS(quality of service, 服务质量)。并且在此基础上提出了基于局部服务选择以及有限广播条件下的全局搜索算法。

参考文献[11]提出了一种基于全局 QoS 约束分解的动态服务选择方法。该方法主要是基于模糊逻辑的自适应调整方法和自适应粒子群优化算法进行全局 QoS 约束,自适应地分解为满足用户偏好的局部约束,然后利用局部最优方法获得最合适的组合服务。参考文献[12]提出了一个框架,用于在移动 Ad Hoc 网络中实现服务组合过程中的最小服务中断。该框架包含两个层次:服务路由(用来选择服务组件以实现服务路径)和网络路由(用来找到最佳的网络路径以连接之前的服务组件)。

参考文献[13]提出了一种网络感知的算法进行无线环境下的服务组合,并且用多维度多选择的 0-1 背包问题进行服务组合过程。参考文献[14]研究的是基于 QoS 关联的 Web 服务组合算法。但是此模型只局限于部分服务之间的选择问题,即前面的选项会影响到后面的候选项,且相关方法并不能在移动环境下进行执行。参考文献[15]则是侧重于服务组合过程中可靠性、可维护性的研究,它提出用备份恢复算法来解决服务组合过程中的服务中断问题。

现有的研究工作较少考虑当传感器节点自身处于运动状态时,如何计算它们在特定时间区间、空间区域内进行服务调用与信息传送的有效性,并且很少度量整个服务组合过程的可靠性。本文针对此方面展开工作,通过概率模型对无线移动传感器节点的运动进行有效预测,提高 MWSN 中服务执行的高效性与可靠性。

3 基本模型

在移动无线传感器网络中,节点在环境中可以根据自身所需做自主性移动,每个节点 o_i 都有相应的无线通信有效区域,这样的区域可表示为以 o_i 当前位置为圆心、无线通信传输半径 r_i (即可有效发送无线数据分组的距离)为半径的圆(如图 1 所示)。本文假设所有节点均具有相同的无线通信传输半径 r 。从图 1 中可以看出,在 $t=0$ s 与 $t=4$ s 时刻, o_i 与 o_j 间处于有效的无线通信区域内,可相互传送数据;在 $t=2$ s 时刻, o_j 与 o_k 处于有效的无线通信区域内。此外,设节点 o_i 可提供的服务集为 $\{s_1, s_3\}$, o_j 可提供的服务集为 $\{s_2, s_3\}$, o_k 可提供的服务集为 $\{s_1\}$, 每个节点执行每个服务所需时间均为 2 s。终端用户所需的服务执行流程为: $s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_3$, 执行的起始时刻为 $t=0$ s。由于 o_i 与 o_k 均提供服务 s_1 , 可以选择这两节点为服务的起始执行节点。

- 若选定 o_k 为起始服务节点,则在 $t=0$ s 时 o_k 运行自身服务 s_1 ; 在 $t=2$ s 时, s_1 运行完毕, o_k 向 o_j 发送所需的参数数据后, o_j 运行服务 s_2 ; 在 $t=4$ s 时, s_2 运行完毕, o_j 向 o_i 发送所需的参数后, o_i 运行服务 s_3 , 从而整个服务流程执行完毕共需 6 s。
- 若选定 o_i 作为起始服务执行节点,则在 $t=0$ s 时 o_i 运行自身服务 s_1 ; 在 $t=2$ s 时, o_i 无法在邻近有效的无线通信区域内发现其他节点能提供服务 s_2 , 服务执行流程处于暂停状态; 在 $t=4$ s 时, o_i 与 o_j 通过无线通信传递参数后, o_j 运行服务 s_2 , 此后 o_j 需要寻

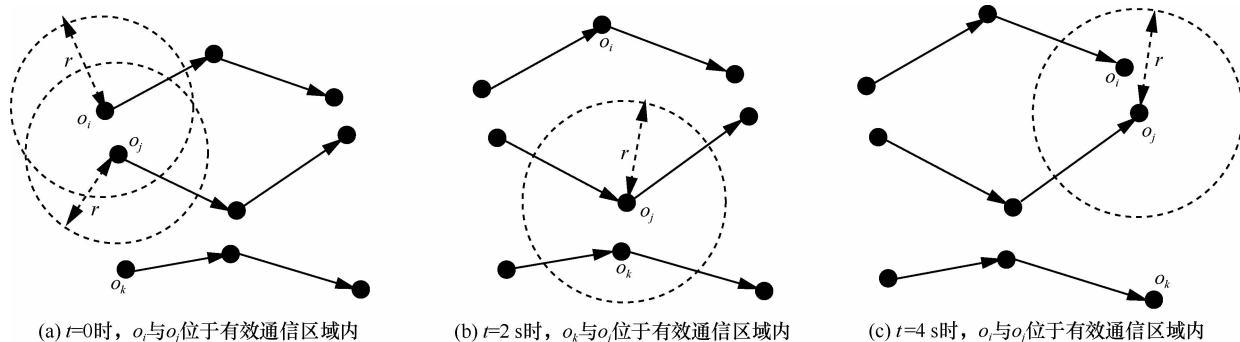


图 1 MWSN 中节点执行服务流程的基本模型

找其他节点来完成服务 s_3 。显然在这种情形中,整个服务流程执行完毕所需时间将远大于 6 s 。

从图 1 可以看出,选择良好的服务选择策略将有利于高效、可靠地完成整个服务执行流程;反之,若未能正确地制定服务选择策略,将使得服务执行效率大为降低,甚至会导致无法顺利完成服务的执行流程。

一般说来,在 MWSN 中制定服务执行策略时,需综合考虑环境中的传感器节点数、各节点的移动模式、各节点所能提供的服务、各服务的执行时间等方面。假设这样的 MWSN 中包含的节点集为 $O=\{o_i\}(|O|=m)$,每个节点 o_i 提供的服务集为 $S_i=\{s_j\}$ 。服务执行流程的逻辑结构主要包括:分支、顺序、并行、循环。由于分支结构可通过事先选择来确定,而循环可更改成单一服务连续运行若干次。因此不失一般性,每个服务执行流程可被描述成仅包含顺序和并行结构的有向图。本文用 $s_1;s_2$ 表示服务 s_1,s_2 按照先后顺序执行,用 $s_1||s_2$ 表示服务 s_1,s_2 并行执行。

在考虑服务执行过程的 QoS 时,本文主要考虑服务执行过程节点间通信的可靠性、服务执行的完成时间来制定合适的服务执行路径。因此,求解出的、满足 QoS 约束条件的服务选择策略可以是一组解。表 1 中给出了本文所需的主要符号与定义。

表 1 参数定义

符号	定义
$\{o_i\}$	移动传感器网络中节点集合
r	传感器节点的无线传输半径
$h(o_i, s_q)$	节点 o_i 完成服务 s_q 所需要用的时间
$[v_i, \bar{v}_i]$	节点 o_i 的速率取值范围
$[\theta_i, \bar{\theta}_i]$	节点 o_i 的运动方向取值范围
E	服务的执行路径图
$R(o_i, o_j, t)$	移动节点 o_i 和 o_j 在未来 t 时刻处于有效通信区内的可靠性
λ_s	节点执行完单个服务的最大时间阈值
α_f	两节点间处于有效通信区域内的最小可靠性阈值

4 基于移动预测的服务选择与执行策略

在 MWSN 中进行服务选择与执行的 QoS 标准有很多(如关注于执行服务的收益,节点的信誉度等),本文主要关注于服务执行的可靠性与执行时间。前者反映了当某节点需要向其他节点传送执行服务所需的参数时,相关的节点是否处于有效的无线通信范围内。此外,由于 MWSN 中的节

点可时刻处于运动中,因此服务执行所需时间将作为预测节点运动的重要依据之一。具体而言,令 $h(o_i, s_j)$ 为节点 o_i 完成服务 s_j 的所需时间,即 o_i 从接收到请求到执行完 s_j 的所需时间。由于 MWSN 中各节点时刻都在运动中,很难准确计算出在任意时刻各节点所处的精确位置,因此用 $R(o_i, o_j, t)$ 表示在 t 时刻,节点 o_j 可顺利接收 o_i 传送的数据并执行相关服务的概率, $R(o_i, o_j, t)$ 反映 o_i 与 o_j 在 t 时刻处于有效通信范围内的概率,即在 t 时刻, o_j 相对于 o_i 的通信可靠性。

显然,对于顺序执行的服务路径图 $E=s_1;\cdots;s_n$ (设 s_i 由节点 o_i 提供执行),则 E 执行所需总时间为: $h(E)=\sum_{1\leq i\leq n} h(o_i, s_i)$;对于并行执行的一组服务 $E=s_1||\cdots||s_n$,则 E 执行所需总时间为: $h(E)=\max_{1\leq i\leq n} h(o_i, s_i)$ 。

设服务执行路径图 E 中包含的服务集为 $\{s_i\}_{1\leq i\leq n}$ (设 s_i 由节点 o_i 在时刻 t_i 提供执行),则整个服务执行路径 E 能顺利完成的可靠性为:

$$\prod_{1\leq i\leq n-1} R(o_i, o_{i+1}, t_{i+1}) \quad (1)$$

为了计算方便,用对数形式来表示整个服务执行的可靠性,即:

$$g(E)=\sum_{i=1}^{n-1} \ln(R(o_i, o_{i+1}, t_{i+1})) \quad (2)$$

令 λ_s 为系统对单个服务执行所需时间的最大阈值, α_f 为系统对两传感器节点间通信可靠性的最小阈值, E 中的任意服务 s_i 由节点 o_i 在 t_i 时刻提供执行,则在 MWSN 中优化服务执行的目标方程可为:

$$\min h(E) \text{ and } \max g(E) \quad \text{s.t. } \forall s_i \in E, h(o_i, s_i) \leq \lambda_s \wedge R(o_{i-1}, o_i, t_i) \geq \alpha_f \quad (3)$$

下面本文通过具体的例子来说明上述服务执行过程的实施。用户所需的服务执行流程如图 2 所示;在图 3 中,每个节点旁边列出了它所能提供的服务及完成服务所需的执行时间。设 $\lambda_s=5\text{ s}$, $\alpha_f=0.5$,首先选择节点 o_1 提供的服

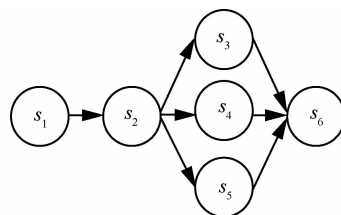


图 2 服务执行的路径

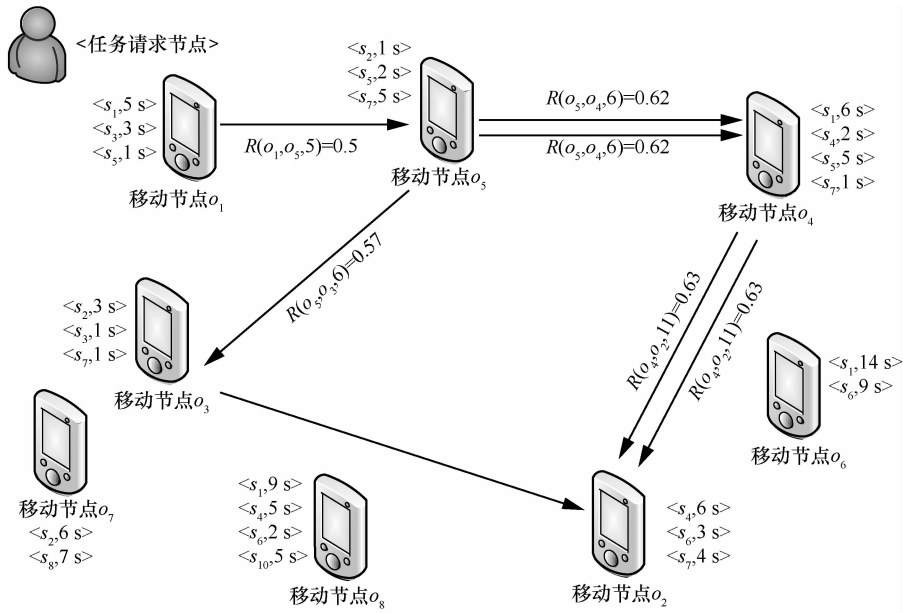


图3 服务选择与执行过程的示例

务 s_1, o_1 完成 s_1 的时间为 $\lambda_{s_1} \geq 5$ s。设 o_1 和 o_5 在 $t=5$ s 时通信的可靠性为 $\alpha_f \leq 0.5$, 则选择节点 o_5 来完成服务 s_2 ; 节点 o_5 完成服务 s_2 所需要的时间为 1 s, 从服务 s_2 开始进入并行过程; 选择节点 o_3 来执行服务 s_3 , 其所需的时间为 1 s (o_5 和 o_3 在 6 s 时的通信可靠性为 0.57); 同时选择移动节点 o_4 来完成服务 s_4 和 s_5 (o_4 完成服务 s_4 和 s_5 所需要的时间), 同样节点 o_5 与节点 o_4 在 6 s 时的通信可靠性为 0.62。最后选择节点 o_2 来完成服务 s_6 , 其中节点 o_3, o_4 与节点 o_2 在 $t=11$ s 时的通信可靠性分别为 0.71 和 0.63 均能满足需求, 并且节点 o_2 完成服务 s_6 所需要的时间为 3 s 也满足需求。整个服务执行所需时间为 14 s, 因此, 找到了一条服务选择策略来完成任务。

4.1 概率式运动预测

在现实世界中, 传感器节点作自主式运动, 其在未来的物理位置难以精确获取, 但其运动模式仍然具有一定的规律性, 并受到当前物理环境的影响。例如在某段道路上, 节点的移动速度将受到当前道路上速度限制的影响, 此外交通的阻塞程度也会影响到节点的移动。并且, 在每段路径中, 节点移动的方向与角度范围也会受到特定限制, 这样的情形可用于描述传感器节点的运动、现实中路人行走、汽车移动等多种场景。因此, 本文通过移动速率区间、移动方向区间来联合表示 WMSN 中各节点的运动状况, 并在此基础上预测任意两个节点在未来的某个时间点能够进行有效通信交互的可靠性。

设节点 o_i 运动速率的区间为 $[v_i, \bar{v}_i]$, 其中 v_i 为最小的可能速率, $\bar{v}_i$ 为最大的可能速率; o_i 运动方向 (与 x 轴正向的夹角) 的区间为 $[\theta_i, \bar{\theta}_i]$, 其中 θ_i 为最小夹角, $\bar{\theta}_i$ 为最大夹角。显然, 若有 $v_i = \bar{v}_i$, 且 $\theta_i = \bar{\theta}_i$, 则表示沿直线做匀速运动; 若 $v_i \in [v_i, \bar{v}_i]$, 且 $\theta_i = \bar{\theta}_i$, 则表示沿直线做变速运动; 若 $v_i \in [v_i, \bar{v}_i]$, 且 $\theta_i = 0, \bar{\theta}_i = 2\pi$, 则表示 o_i 做随机运动。下面, 本文针对节点可能的运动模式, 给出度量节点间通信可靠性的方法。

4.2 v_i 未知且 θ_i 已知的情形

首先分析节点运动方向 θ_i 固定且运动 v_i 速率未知的情形。如图 4 所示, 设节点 o_i 与 o_j 在 t_0 时刻的位置分别为 $o_i(t_0) = (x_i^0, y_i^0)$ 与 $o_j(t_0) = (x_j^0, y_j^0)$, 两者移动方向的角度分别固定为 θ_1 与 θ_2 , 移动速率所在区间分别为 $v_i \in [v_i, \bar{v}_i]$ 和 $v_j \in [v_j, \bar{v}_j]$ 。设在 t_1 时刻 ($t_1 > t_0$), 节点 o_i 需向 o_j 传送参数, 并让其执行服务。由于 o_i 沿直线运动, 则其在 t_1 时刻的位置将位于

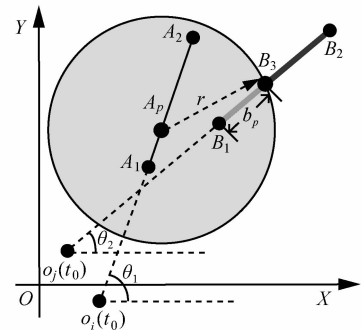


图4 v_i 未知且 θ_i 已知的情形

线段 $\overline{A_1A_2}$ 上, 其中 A_1 坐标为 $(x_i^0 + v_i \Delta t \cos \theta_i, y_i^0 + v_i \Delta t \sin \theta_i)$, A_2 坐标为 $(x_i^0 + \bar{v}_i \Delta t \cos \theta_i, y_i^0 + \bar{v}_i \Delta t \sin \theta_i)$, 其中 $\Delta t = t_1 - t_0$; 同理, o_j 在 t_1 时刻的位置将位于线段 $\overline{B_1B_2}$ 上, 其中 $B_1: (x_j^0 + v_j \Delta t \cos \theta_j, y_j^0 + v_j \Delta t \sin \theta_j)$, $B_2: (x_j^0 + \bar{v}_j \Delta t \cos \theta_j, y_j^0 + \bar{v}_j \Delta t \sin \theta_j)$ 。

下面, 需要求取 o_i 在 t_1 时刻可以与 o_j 进行有效通信的概率, 即 o_j 位于 o_i 的有效通信区域内 (半径为 r 的圆形区域) 的可能性。如图 4 所示, 在 $\overline{A_1A_2}$ 上任取一点 $A_p(x, y)$, 以 $A_p(x, y)$ 为圆心、 r 为半径画圆 $\omega(x, y, z)$, 设 $\overline{B_1B_2}$ 落在 $\omega(x, y, z)$ 中的线段长度为 $b_p(x, y)$ (在图 4 中即 $|\overline{B_1B_2}|$), 考虑该圆与线段 $\overline{B_1B_2}$ 相交的情形, 有如下几种情形。

- 若 B_1 和 B_2 两点均在圆 $\omega(x, y, r)$ 内, 即 A_p 到 B_1 的距离 $|\overline{A_pB_1}| \leq r$ 且 A_p 到 B_2 的距离 $|\overline{A_pB_2}| \leq r$, 则有 $b_p(x, y) = |\overline{B_1B_2}|$ 。
- 若 B_1 和 B_2 中仅有一点在圆 $\omega(x, y, r)$ 内, 即 $|\overline{A_pB_1}| \leq r$ 且 $|\overline{A_pB_2}| > r$, 或 $|\overline{A_pB_1}| > r$ 且 $|\overline{A_pB_2}| \leq r$ 。在此情形下, $\overline{B_1B_2}$ 与 $\omega(x, y, r)$ 仅相交于一点 B_3 , 则对于前者而言, 有 $b_p(x, y) = |\overline{B_1B_3}|$, 对于后者而言, $b_p(x, y) = |\overline{B_3B_2}|$ 。
- 若 B_1 和 B_2 均不在圆 $\omega(x, y, r)$ 内, 此时若 A_p 到 $\overline{B_1B_2}$ 的最短距离小于 r , 则 $\overline{B_1B_2}$ 与 $\omega(x, y, r)$ 将相交于两点: B_3 和 B_3' , 且 $b_p(x, y) = |\overline{B_3B_3'}|$; 若 A_p 到 $\overline{B_1B_2}$ 的最短距离大于 r , 则有 $b_p(x, y) = 0$ 。

求得 $b_p(x, y)$ 后, 则可得当 o_i 在 $A_p(x, y)$ 处时, o_j 可有效通信的可靠性概率为:

$$Pr(A_p(x, y)) = \frac{b_p(x, y)}{|\overline{B_1B_2}|} \quad (4)$$

由于 $|\overline{B_1B_2}| = (\bar{v}_j, v_j) \Delta t$, 则式 (4) 可表示为: $Pr(A_p(x, y)) = b_p(x, y) / (\bar{v}_j, v_j) \Delta t$ 。

则当移动节点 o_i 在 t_1 时刻位于 $\overline{A_1A_2}$ 上时, 节点 o_j 处于 o_i 的有效通信区域内的可靠性为:

$$R(o_i, o_j, t_1) = \iint_{A_p(x, y) \in \overline{A_1A_2}} \frac{1}{(v_i - \bar{v}_i) \Delta t} Pr(A_p(x, y)) dx dy \\ = \int_a^b \frac{1}{(v_i - \bar{v}_i) \Delta t} Pr[A_p(x, \psi(x))] \sqrt{1 + \psi'^2(x)} dx \quad (5)$$

其中, 线段 $\overline{A_1A_2}$ 可以表示为 $y = \psi(x) = \tan \theta_i (x - x_i^0) + y_i^0$, $x \in [a, b]$, 这里 $a = x_i^0 + v_i \Delta t \cos \theta_i$, $b = x_i^0 + \bar{v}_i \Delta t \cos \theta_i$ 。

4.3 v_i 已知且 θ_i 未知的情形

接下来, 分析节点运动速率 v_i 固定、运动方向 θ_i 未知

的情形。如图 5 所示, 设节点 o_i 与 o_j 在 t_0 时刻的位置分别为 $o_i(t_0) = (x_i^0, y_i^0)$ 与 $o_j(t_0) = (x_j^0, y_j^0)$, 两者移动的速率分别为 v_i 和 v_j , 运动方向的区间分别为 $[\theta_i, \bar{\theta}_i]$ 与 $[\theta_j, \bar{\theta}_j]$, 则在 t_1 时刻 ($t_1 > t_0$) o_i 所处可能区域为: 以 $o_i(t_0)$ 为圆心、 $v_i \Delta t$ 为半径、夹角为 $\bar{\theta}_i - \theta_i$ 的圆弧 $\widehat{A_1A_2}$, o_j 所处可能区域为: 以 $o_j(t_0)$ 为圆心、 $v_j \Delta t$ 为半径、夹角为 $\bar{\theta}_j - \theta_j$ 的圆弧 $\widehat{B_1B_2}$ 。

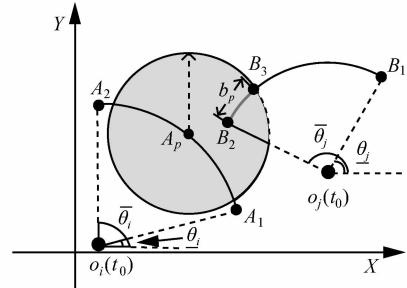


图 5 v_i 已知且 θ_i 未知的情形

对于求解在 t_1 时刻节点 o_j 处于 o_i 的有效通信区域内的可靠性, 基本方法与上述类似: 在圆弧 $\widehat{A_1A_2}$ 中任取一点 $A_p(x, y)$, 以 $A_p(x, y)$ 为圆心、 r 为半径画圆 $\omega(x, y, r)$, 然后计算圆弧 $\widehat{B_1B_2}$ 上的点落入 $\omega(x, y, r)$ 中的可能性。

设 $\overline{B_1B_2}$ 落在 $\omega(x, y, r)$ 中的线段长度为 $b_p(x, y)$, 考虑该圆与 $\widehat{B_1B_2}$ 相交的情形, 有如下几种情形。

- 若 B_1 和 B_2 均在 $\omega(x, y, r)$ 内部, 即 $|\overline{A_pB_1}| < r$ 且 $|\overline{A_pB_2}| < r$ 且 $\forall B_3 \in \widehat{B_1B_2}, |\overline{A_pB_3}| \leq r$, 则显然有 $b_p(x, y) = |\overline{B_1B_2}| = (\bar{\theta}_j - \theta_j) v_j \Delta t$ 。
- 若 $|\overline{A_pB_1}| < r$ 且 $|\overline{A_pB_2}| < r$ 且 $\exists B' \in \widehat{B_1B_2}, |\overline{A_pB'}| > r$, 则有 $\widehat{B_1B_2}$ 与 $\omega(x, y, r)$ 相交于 B_3 和 B_3' 且 $b_p(x, y) = |\overline{B_1B_3}| + |\overline{B_3'B_2}|$ 。
- 若仅有 B_1 或 B_2 在 $\omega(x, y, r)$ 内部, 设 $\widehat{B_1B_2}$ 与 $\omega(x, y, r)$ 相交于 B_3 , 则 B_1 若在 $\omega(x, y, r)$ 内, 即 $|\overline{A_pB_1}| < r$, 则 $b_p(x, y) = |\overline{B_1B_3}|$, 若 $|\overline{A_pB_2}| < r$, 则 $b_p(x, y) = |\overline{B_2B_3}|$ 。
- 若 $\forall B' \in \widehat{B_1B_2}, |\overline{A_pB'}| > r$, 即 $\widehat{B_1B_2}$ 与 $\omega(x, y, r)$ 没有交点, 则 $b_p(x, y) = 0$ 。
- 若 $|\overline{A_pB_1}| < r$ 且 $|\overline{A_pB_2}| < r$ 且 $\exists B' \in \widehat{B_1B_2}, |\overline{A_pB'}| > r$, 则 $\widehat{B_1B_2}$ 与 $\omega(x, y, r)$ 有两交点 B_3 和 B_3' , 则 $b_p(x, y) = |\overline{B_3B_3'}|$ 。

求得 $b_p(x, y)$ 后, 则可得当 o_i 在 $A_p(x, y)$ 处时, o_j 可有效通信的可靠性概率为:

$$Pr(A_p(x, y)) = \frac{b_p(x, y)}{|\overline{B_1B_2}|} = \frac{b_p(x, y)}{(\bar{\theta}_j - \theta_j) v_j \Delta t} \quad (6)$$



则当移动节点 o_i 在 t_1 时刻位于 $\widehat{A_1A_2}$ 上时, 节点 o_j 处于 o_j 的有效通信区域内的可靠性为:

$$R(o_i, o_j, t_1) = \frac{\iint_{A_p(x,y) \in \widehat{A_1A_2}} Pr(A_p(x,y)) dx dy}{(\bar{\theta}_i - \underline{\theta}_i) v_i \Delta t} = \frac{\int_{\underline{\theta}_i}^{\bar{\theta}_i} Pr(A_p(\varphi(\theta), \psi(\theta))) \sqrt{\varphi'^2(\theta) + \psi'^2(\theta)} d\theta}{(\bar{\theta}_i - \underline{\theta}_i) v_i \Delta t} \quad (7)$$

其中, 曲线 $\widehat{A_1A_2}$ 的参数方程可以表示为:

$$\begin{cases} x = \varphi(\theta) = x_i^0 + v_i \Delta t \cos \theta \\ y = \psi(\theta) = y_i^0 + v_i \Delta t \sin \theta \end{cases} \quad (\underline{\theta}_i \leq \theta \leq \bar{\theta}_i) \quad (8)$$

4.4 v_i 与 θ_i 均未知的情形

接下来, 分析节点运动速率 v_i 、方向 θ_i 均不确定的情形。如图 6 所示, 设节点 o_i 与 o_j 在 t_0 时刻的位置分别为 $o_i(t_0) = (x_i^0, y_i^0)$ 与 $o_j(t_0) = (x_j^0, y_j^0)$, 两者移动的速率区间分别为 $[v_i, \bar{v}_i]$ 与 $[v_j, \bar{v}_j]$, 运动方向的区间分别为 $[\underline{\theta}_i, \bar{\theta}_i]$ 与 $[\underline{\theta}_j, \bar{\theta}_j]$, 则在 t_1 时刻 ($t_1 > t_0$) o_i 所处可能区域为: 以 $o_i(t_0)$ 为圆心、 $\bar{v}_i \Delta t$ 为半径、夹角为 $\bar{\theta}_i - \underline{\theta}_i$ 的扇形圆弧区域 $\Theta(\widehat{A_1A_2A_3A_4})$, 其中 $|o_i(t_0)A_1| = |o_i(t_0)A_4| = \bar{v}_i \Delta t$, $|A_1A_2| = |A_3A_4| = (\bar{v}_i - v_i) \Delta t$ 。同样, 在 t_1 时刻 ($t_1 > t_0$) o_j 所处可能区域为图 6 中的区域 $\Theta(\widehat{B_1B_2B_3B_4})$ 。

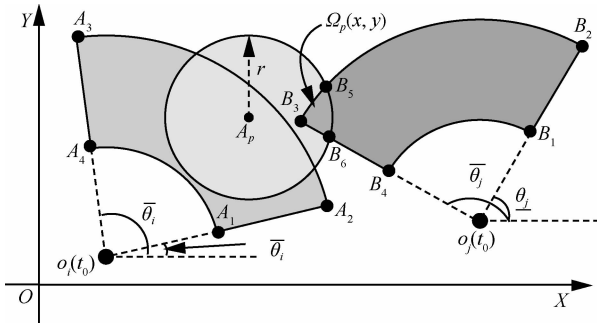


图 6 v_i 与 θ_i 均未知的情形

为了度量在 t_1 时刻 ($t_1 > t_0$) 位于 o_i 有效通信区域内的可能性, 在区域 $\Theta(\widehat{A_1A_2A_3A_4})$ 中任取一点 $A_p(x, y)$, 并以 A_p 为圆心, r 为半径画圆 $\omega(x, y, r)$ 。设 $\omega(x, y, r)$ 与 $\Theta(\widehat{A_1A_2A_3A_4})$ 相交区域为 $\Theta(\widehat{B_3B_5B_6})$, 设 $\Theta(\widehat{B_3B_5B_6})$ 的面积为 $\Omega_p(x, y)$, 即 $\Omega_p(x, y) = |\Theta(\widehat{B_3B_5B_6})|$ 。求得 $\Omega_p(x, y)$ 后, 则可得当 o_i 在 $A_p(x, y)$ 处时 o_j 可有效通信的可靠性概率为:

$$Pr(A_p(x, y)) = \frac{\Omega_p(x, y)}{|\Theta(\widehat{B_1B_2B_3B_4})|} = \frac{2 \cdot \Omega_p(x, y)}{(\bar{\theta}_j - \underline{\theta}_j)(\bar{v}_j^2 - v_j^2) \Delta t^2} \quad (9)$$

由于 $\omega(x, y, r)$ 与 $\Theta(\widehat{A_1A_2A_3A_4})$ 相交情形的种类较多且求解复杂, 在这里就不进一步讨论了, 对于其他场景的求解通过蒙特卡洛模拟算法^[16]进行估算。

5 算法描述

为了表示方便所需, 将服务执行路径 E 表示成有向图形式, 即 $G_s = \langle D_s, F_s, s_b, s_e \rangle$: 其中 $D_s = \{s_i\}$ 为路径中的服务集, 为 $F_s = \{f_{ij} | \exists s_i \rightarrow s_j \in E\}$ 服务之间的有向边集, s_b 为全局唯一的起始服务, s_e 为唯一的终止服务。此外, 令 $Pr e(s_i) = \{s_j | \exists f_{ij} \in F_s\}$ 为服务 s_i 的前驱服务集, $Next(s_i) = \{s_j | \exists f_{ij} \in F_s\}$ 为服务 s_i 的后续服务集。显然若有 $|Next(s_i)| > 1$, 服务 s_i 可被视为一个并行服务, 即其后面将并发执行多个服务; 若有 $|Pr e(s_i)| > 1$, 则 s_i 需等待其前驱所有服务执行完毕后才能被执行。在设计相应的服务执行算法时, 将考虑每次节点执行服务时的所需时间 $h(o_i, s_j)$ 需低于系统阈值 λ_s ; 此外每次节点间传送数据以开始执行下一个服务时, 相应的可靠性 $R(o_i, o_j, t_k)$ 需高于系统阈值 α_s 。

在实施服务选择的过程中, 需要为每个服务找到一个合适的节点加以执行, 以达到式(3)中联合优化的目标。由于在 WMSN 中, 节点可时刻处于移动中, 因此在为执行路径中的当前服务 s_i 选择节点时, 需要计算从起始节点 s_b 开始, 到 $Pr e(s_i)$ 中所有节点执行完毕这一过程所需的总时间, 再以该总时间为基础, 分析在这一时刻各节点之间的物理相互位置, 即相互间可进行有效通信的可靠性, 从而制定出优化的服务选择与执行方案。这里提供两个算法, 一个是全遍历 (complete_searching) 算法, 另一个是提出的 Pareto-控制局部 k 最优选择算法。

5.1 全遍历算法

全遍历算法是通过遍历所有可能的服务选择策略, 将符合 QoS 要求 (即满足 α_s 与 λ_s) 的选择方案保持下来。下面以图 3 为例来说明全遍历算法主要执行过程, 其中 $\lambda_s = 5$ s, $\alpha_j = 0.5$ 。

- 对于服务 s_1 , 有移动节点 o_1, o_4, o_6, o_8 可提供, 获取这些节点完成 s_1 所需要的时间, 如果所需要的时间小于给定的 λ_s , 则加入候选列表。显然, 符合要求的只有 o_1 , 对应的完成时间为 5 s, 即候选表中有元素 $\{o_1(s_1) 5 \text{ s}\}$ 。

- 下面查找能够完成服务 s_2 的节点。 s_2 与 s_1 是一个串行结构。可以看出,能够完成 s_2 的节点包括 $o_3(3\text{ s})$ 、 $o_5(1\text{ s})$ 、 $o_7(6\text{ s})$,首先对这3个节点完成服务所需要的时间进行判断,去除不满足要求的节点(o_7)。下面分析 o_1 与可完成服务 s_2 的节点 $\{o_3, o_5\}$ 在 $t=5\text{ s}$ 时可进行有效通信的概率,由于 $R(o_1, o_5, 5)=0.5$ 满足要求 α_7 ,则将 $\langle o_1(s_1), o_5(s_2) | 5\text{ s}+1\text{ s}=6\text{ s} \rangle$ 加入候选表中。
- 由于服务 s_2 的后继包含了3个服务 (s_3, s_4, s_5),首先查找可以提供这些服务的节点情况:提供服务 s_3 : ($o_1(3\text{ s})$, $o_3(1\text{ s})$),提供服务 s_4 : ($o_2(6\text{ s})$, $o_4(2\text{ s})$, $o_8(5\text{ s})$),提供服务 s_5 : ($o_1(1\text{ s})$, $o_4(5\text{ s})$, $o_5(2\text{ s})$)。然后按照 λ_5 去除不符合时间要求的节点。这时,剩下的分别为 s_3 : ($o_1(3\text{ s})$, $o_3(1\text{ s})$), s_4 : ($o_4(2\text{ s})$, $o_8(5\text{ s})$) 以及 s_5 : ($o_1(1\text{ s})$, $o_4(5\text{ s})$, $o_5(2\text{ s})$),顺序遍历候选表集中的候选策略,计算节点间在相应时刻可进行有效通信的概率。可得当前的候选策略为: $AList$ 。
- 最后对于服务 s_6 ,因为服务 s_6 的服务前驱为 s_3, s_4 和 s_5 ,这时需要计算每个前驱节点与提供 s_6 的节点之间相应的通信有效性的概率。首先,获得可以完成服务 s_6 ,并满足 λ_5 要求的节点为 $o_2(3\text{ s})$ 、 $o_8(2\text{ s})$ 。然后需要对每个前驱节点与节点 o_2, o_8 的可靠性进行判断,可得 $R(o_3, o_2, 11)=0.71$ 以及 $R(o_4, o_2, 11)=0.63$ 。最终可得服务选择策略为: $\langle o_1(s_1), o_5(s_2), \{o_3(s_3), o_4(s_4), o_4(s_5)\}, o_2(s_6) | 5\text{ s}+1\text{ s}+\max\{1\text{ s}, 2\text{ s}, 5\text{ s}\}+3\text{ s}=14\text{ s} \rangle$,其中 $o_i(s_j)$ 表示服务 s_j 由节点 o_i 提供执行。

5.2 Pareto-控制的局部 k 最优算法

由式(3)可知,服务选择策略实际是一个多目标优化问题,上述的全遍历算法都需要较长的执行时间与较大的空间存储,因此这里提出一种 Pareto-控制^[17]的局部 k 最优算法。所谓 Pareto-控制是指在多目标优化场景中,若策略 A 在所有的目标中均做得不比策略 B 差,并且在一个或多个目标上做得比策略 B 好,则称策略 A 可 Pareto-控制策略 B。显然对于策略 A 与策略 B 而言,若双方均不能 Pareto-控制对方,则有如下两种情形:

- 双方在所有目标上都做得同样好;
- 在某些目标上,策略 A 做得比策略 B 好,而在其他一些目标上,策略 B 做得比策略 A 好。

本文提出的 Pareto-控制的局部 k 最优算法采用上述概念,该算法的主要思想是:每次通过扫描 $G_S=\langle D_S, F_S, s_b, s_e \rangle$ 图中的下一个服务,找到所有可能的服务选择策略,然后

采用基于 Pareto-控制的 Pareto 等级划分(Pareto ranking)方法^[18]对这些服务选择策略给出相应的等级,保存前 k 个 Pareto 等级最优的策略并丢弃其余策略,然后再次扫描 $G_S=\langle D_S, F_S, s_b, s_e \rangle$ 图中的下一个服务。在进行 Pareto 等级划分时,具体做法如下:对于当前已找到的一组服务选择策略 $PSS=\{ps_i\}$,找出其中所有的 Pareto-非控制(Pareto non-dominated)服务选择策略(即对于这些服务策略而言,任意一个服务策略均无法 Pareto-控制其他的任何一个策略),这些 Pareto-非控制服务选择策略将构成的 Pareto-控制的“边缘”(Pareto-dominated front),给这些服务选择策略赋予最高的等级分后,把它们 $PSS=\{ps_i\}$ 从中移去;然后在剩下的策略中,找出那些构成新的 Pareto-控制边缘的策略,并给这些策略赋予次高的等级分,然后再次将这些策略移去。如此重复,直至 $PSS=\{ps_i\}$ 中所有的策略均被移去为止。此时,所有的服务策略均已被赋予相应的等级分,选择等级分最高的前 k 个策略。

然而由于这样基于 Pareto-控制的服务选择策略是一种局部最优算法,则在运行过程中可能会出现如下情形:对于当前找到的某个具有较高等级分的服务选择策略而言,当扫描 $G_S=\langle D_S, F_S, s_b, s_e \rangle$ 到上的其他后续服务时,可能无法再找到其他合适的节点来执行这些服务(即处于有效通信区域内的节点均不提供相应的服务,而提供相应服务的节点均处于有效通信区域之外),从而导致整个服务执行流程的失败。在第6节的实验中将比较局部 k 最优算法与全遍历算法的特点。

6 实验分析

在本节中,通过使用实验来分析和验证本文中所提出的方法。实验环境为:T7500 2.20 GHz CPU/2 GB 内存、160 GB 硬盘。实验程序用 Java 语言编写。在实验环境中部署 $N=50$ 个移动节点,每个节点的起始位置 $[x_i^0, y_i^0]$ 在 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 空间中随机选取, $[v_i, \bar{v}_i]$ 在 $[0, 10\text{ m/s}]$ 中随机选取, $[\theta, \bar{\theta}]$ 在 $[0, \pi]$ 中随机选取,可有效通信的距离为 $r=50\text{ m}$ 。每个节点 o_i 被分配的服务数在 $[2, 10]$ 中随机选取,完成服务所需时间 $h(o_i, s_q)$ 在 $[2\text{ s}, 20\text{ s}]$ 中随机选取。在执行服务选择时,设置 $\lambda_s=5\text{ s}$, $\alpha=0.4$ 。在对通信有效性的测试过程中,采用基于蒙特卡罗模拟算法来求解概率的,其中随机投点 N 在 20 000 次左右,落在重合区域内的次数为 M ,这个值随不同的实验情形是不同的,具体看投中情况。

在第 6.1 节中,主要对概率式运动预测模型的准确性



进行测试,即首先根据节点的不确定移动信息,计算出两节点间可处于有效通信区域内的可靠性,在此基础上进一步观察该两节点间是否在实际运行过程中的确会处于有效的通信区域。在第6.2节中,对全遍历算法与局部 k 最优算法进行对比实验,分析了两者的执行时间与可找到有效服务选择策略的概率。

6.1 对通信有效性的测试

在本节的实验中,设置了如下3种情形进行测试与比较。

- 情形1: $[v_i, \bar{v}_i] = [0, 2 \text{ m/s}]$, $[\theta_i, \bar{\theta}_i] = [0, \pi/4]$ 。
- 情形2: $[v_i, \bar{v}_i] = [0, 2 \text{ m/s}]$, $[\theta_i, \bar{\theta}_i] = [0, \pi/2]$ 。
- 情形3: $[v_i, \bar{v}_i] = [0, 8 \text{ m/s}]$, $[\theta_i, \bar{\theta}_i] = [0, \pi]$ 。

在实验过程中,移动节点可自行随机改变自身运动状态,即各自可在自身的运动速率、方向区间内每秒随机生成一个新的 v_i 与 θ_i ,这样保证了在MWSN中每个移动节点的速度可随时改变。在这3种情形下,分别预测了在 $t=2 \text{ s}$ 、 5 s 、 10 s 、 20 s 后两节点间处于有效通信区域的概率,并且实际观察在相应的时间后,两节点间是否的确处于有效通信区域内。

具体的实验过程如下:首先根据节点的不确定移动信息,预先计算出两个节点间处于有效通信区域内的概率;按照相应的计算概率分布区间,将其分为 $[0, 20\%)$ 、 $[20\%, 40\%)$ 、 $[40\%, 60\%)$ 、 $[60\%, 80\%)$ 和 $[80\%, 100\%]$ 5个区间,并分别统计处于这些区间内的节点对的数目;然后在实际运行过程中,对于每个区间,分别记录在 t 时刻实际可进行有效通信的节点对的数目,即设在计算概率分布区间 $[a, b]$ 上有节点对 M 个,而在实际运行过程中,在 t 时刻这 M 对节点间仅有 N 对可进行有效的通信,则用 N/M 作为实际可通信概率的衡量值。

从图9中可以看出,概率式移动预测模型可以较好地预测两个节点在 $t=2 \text{ s}$ 、 5 s 的通信有效性情况,即计算得到的有效性概率与对应的实际可通信情况较为相近。但当计算得到的有效性概率值较小时,实际可通信的可能性较差;而当计算得到的有效性概率值较大时,实际可通信的可能性较高。此外,随着移动速率的增加及移动的角度范围增加时,预测效果会有所降低,这是因为随着 $[v_i, \bar{v}_i]$ 与 $[\theta_i, \bar{\theta}_i]$ 区间的扩大,节点会发生更多的移动不确定性,因此增加了预测的难度。另一方面,当 $t=10 \text{ s}$ 、 20 s 时,预测的准确性也有所下降,这是因为随着 t 的增加,节点有更多的时间实施自身的移动,其移动的物理范围大为扩展,从而造成了预测的偏差;然而也可以看出,在 $t=10 \text{ s}$ 、 20 s 时,若计算概率值较大时,节点间实际可通信的可能性仍然较高,这也反映了预测模型的有效性。

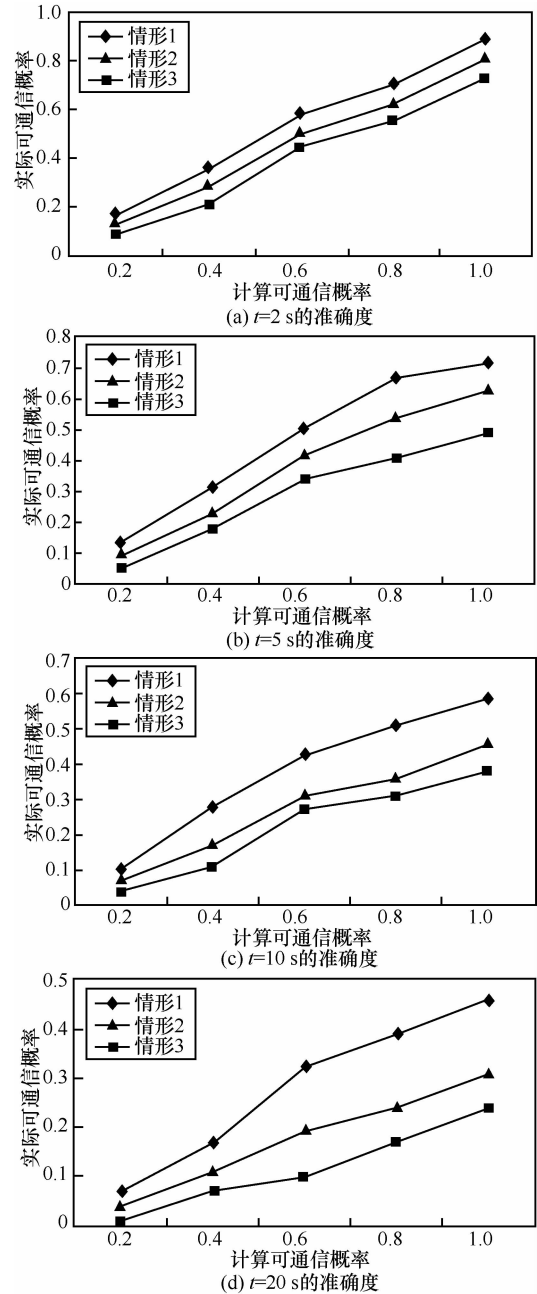


图9 对通信有效性的测试

6.2 对比实验

在本节的实验中,将完全遍历算法所得到的结果与局部 k 最优的遍历算法进行比较,分析了两者的平均执行时间及可正确找到服务选择策略的概率。

在测试执行时间时,分别测试了服务数在8、12、20时各个算法的执行时间。具体而言,针对每种服务数目的情形,随机生成1000个服务执行路径图,然后找出其中可行的服务选择策略数,并按照策略数进行区间划分,然后统计每个区间内的平均查找时间。此外,在考察局部 k 最

优的遍历算法时,分别测试了 $k=2,5,10$ 时的执行时间。此外,实验中还根据当前已找到的服务选择策略数,随机生成 k 值,并进行相应的局部概率 k 最优遍历,则在此情形中,令 N 为当前找到的服务选择策略数, $\alpha=0.2$,则概率式 k 的随机取值设为 $k=N\cdot\alpha$ 。

在测试服务选择策略的正确性时,实验首先针对服务数为8、12、20时,各随机生成1 000个服务执行路径图,并通过完全遍历算法找出这些图各自的服务选择策略数,然后再通过局部 k 最优的遍历算法找出这些图的服务选择策略数,最后测试后者相对于前者的比值。显然,在理想的情形下,若比值为1,则表示局部 k 最优的遍历算法可查找出全遍历算法中所能找出的所有服务选择策略。

从图10中可以看出,局部 k 最优的遍历算法所需的执行时间明显小于完全遍历算法。尤其当 k 值较小时,其执行时间大为减少。这是因为在此情况下,每次扫描服务执行路径图进行搜索时,仅需保持少量的局部最优执行策

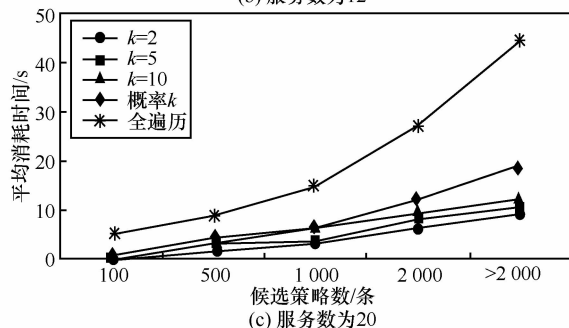
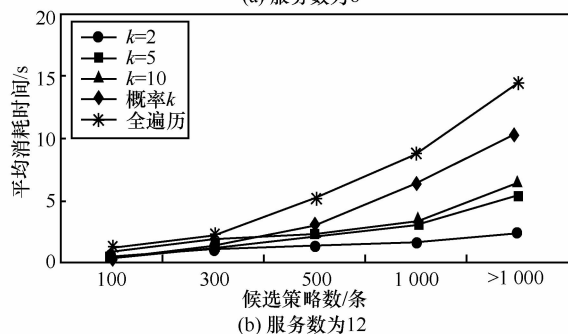
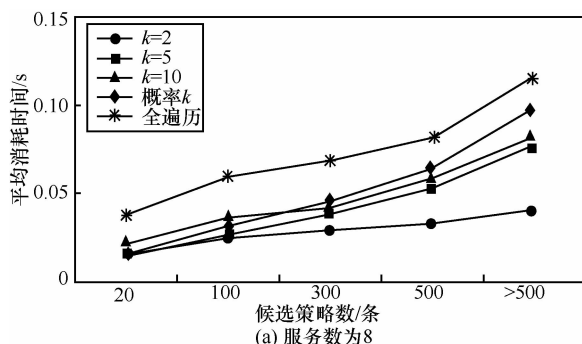


图10 各算法的执行时间

略,在此基础上进行下一轮的扫描与搜索。此外,随着服务执行路径图中服务数的上升,几种算法所需的遍历时间均随之增加。然而局部 k 最优的遍历算法上升的趋势较为缓和,而完全遍历算法所需的时间则大大增加;例如在服务选择策略为1 000的情况下,当服务数为12时,完全遍历算法所需时间为8.765 s,而当服务数为20时,其所需时间则迅速上升为15.163 s。

从图11中可以看出,当 k 值较大时而服务数较少时,局部 k 最优的遍历算法对服务选择策略的预测准确性与完全遍历算法相比,几乎相当。例如在服务数为8、 $k=10$ 时,局部 k 最优的遍历算法可以查找出92.8%的服务选择策略。此外,当 k 值较小时,可以看出其遍历结果并不理想,这是因为此时局部 k 最优的遍历算法在每次搜索过程中丢弃了大量的其他局部次优策略,导致最后搜索的准确性大为下降。另外,可以看出随着服务数的增加,局部遍历算法的搜索效率明显下降。这是由于随着服务数的增加,

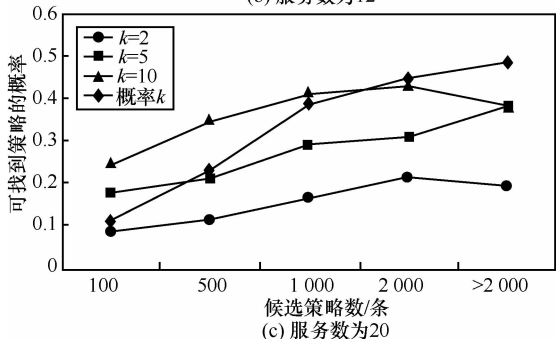
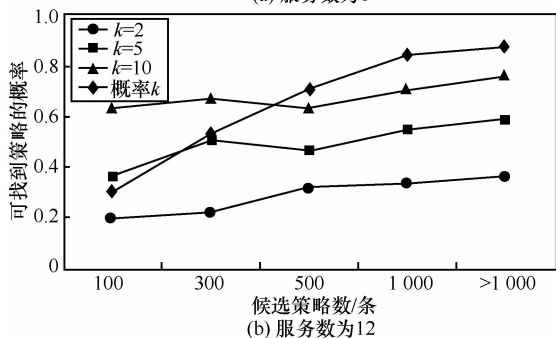
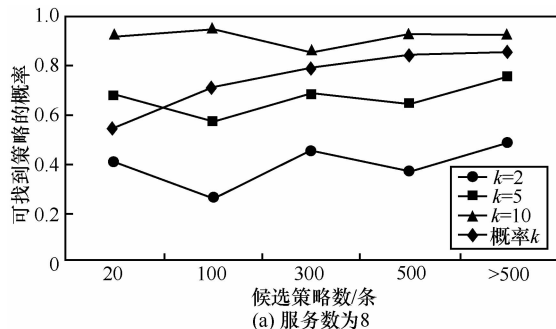


图11 服务选择策略的准确性



环境中可行的服务选择策略也大为增加,然而局部遍历算法每次均丢弃大量局部次优策略时,使得许多可行的服务选择策略被放弃。此外,可发现局部概率 k 算法的搜索效率优于其他局部遍历算法。这是因为局部概率 k 算法中的 k 值可随着当前所搜索到的服务选择策略数而动态改变,在搜索过程中,当服务选择策略数增加时, k 值也随着上升,从而可保留更多的服务选择策略。

7 结束语

移动无线传感器网络包含多个传感器节点,它们彼此间相互协作,对相应的数据信息进行过滤、计算与组合后,通过多种服务的形式向外部应用提供使用。目前在MWSN中如何有效地实施服务组合,并满足终端用户个性化的需求,已成为研究者所关注的焦点。本文通过移动速率、移动方向的二维概率函数定义传感器节点运动的多种不确定运动模式及可能的运动区域,在此基础上度量了传感器节点彼此间在特定时间区间内处于有效通信区域内的可靠性,并给出基于蒙特卡罗模拟的近似计算方法,还考虑了服务执行所需的最大时间阈值以及最小可靠性阈值,给出了完全遍历的服务选择算法与Pareto控制的局部 k 最优选择算法。

参考文献

- 1 Gracanin D, Eltoweissy M, Wadaa A, *et al.* A service-centric model for wireless sensor networks. *IEEE Selected Areas in Comm*, 2005, 23(6):1159~1166
- 2 Koutsoukos X, Kushwaha M, Amundson I, *et al.* Service-oriented architectures for networked embedded sensor systems. *Proceedings of Monterey, Paris, France*, 2006
- 3 Wang J. Exploiting mobility prediction for dependable service composition in wireless mobile Ad Hoc networks. *IEEE Trans on Services Computer*, 2011, 4(1):44~55
- 4 王文彬, 孙其博, 杨放春. MANET 下环境感知的服务可用性量化评估模型. *计算机研究与发展*, 2012, 49(3): 558~564
- 5 Hu L, Evans D. Localisation for mobile sensor networks. *Proceedings of the Tenth International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, Philadelphia, PA, USA, 2004
- 6 Kaefer G, Schmid R, Prochart G, *et al.* Framework for dynamic resource-constrained service composition for mobile Ad Hoc networks. *Proceedings of Workshop on System Support for Ubiquitous Computing*, Orange County, CA, USA, 2006
- 7 Geyik S C, Szymanski B K, Zerfos P, *et al.* Dynamic composition of services in sensor networks. *Proc IEEE Int Conf on Service Composition (SCC)*, Miami, Florida, USA, 2010:

242~249

- 8 Wang X, Wang J, Zheng Z, *et al.* Service composition in service-oriented wireless sensor networks with persistent queries. *Proceedings of Consumer Communications and Networking Conference*, Las Vegas, NV, 2009: 1~5
- 9 Hwang C, Talipov E, Cha H. Distributed geographic service discovery for mobile sensor networks. *Computer Networks*, 2011, 55(1):1069~1082
- 10 Yang K, Galis A, Chen H H. QoS-aware service selection algorithms for pervasive service composition in mobile wireless environments. *Mobile Networks & Applications*, 2010 (15):488~501
- 11 王尚广, 孙其博, 杨放春. 基于全局 QoS 约束分解的 Web 服务动态选择. *软件学报*, 2011, 22(7):1426~1439
- 12 Jiang S, Xue Y, Schmidta D C. Minimum disruption service composition and recovery in mobile Ad Hoc networks. *Computer Networks*, 2009, 53(10): 1649~1665
- 13 Luo Y S, Yang K, Tang Q, *et al.* A multi-criteria network-aware service composition algorithm in wireless environments. *Computer Communications*, 2012, 35(15): 1882~1892
- 14 叶世阳, 魏峻, 李磊等. 支持服务关联的组合服务选项方法研究. *计算机学报*, 2008, 31(8): 1383~1397
- 15 Zhou X, Shi J S, Xu Y X, *et al.* A backup restoration algorithm of service composition in MANETS. *Proceedings of International Conference on Communication Technology (ICCT)*, Hangzhou, China, 2008: 588~591
- 16 Metropolis N, Ulam S. The Monte Carlo method. *Journal of the American Statistical Association*, 1949, 44(247):335~341
- 17 Fonseca C M, Fleming P J. Multiobjective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms I A unified formulation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 1998, 28(1):26~37
- 18 Srinivas N, Deb K. Multiobjective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary Computation*, 1994, 2(3):221~248

[作者简介]



胡海洋,男,博士,杭州电子科技大学副教授,主要研究方向为分布式系统、工作流技术。

张俊峰,男,杭州电子科技大学硕士研究生,主要研究方向为服务组合技术。

胡华,男,杭州电子科技大学教授,主要研究方向为分布式系统、数据库技术。

(收稿日期:2013-10-09)