

无线传感器网络中的调度算法研究^{*}

康波^{1,2} 柯欣^{1,2} 孙利民¹ 任雍^{1,2}

(中国科学院软件研究所多媒体通信与网络工程研究中心 北京 100080)¹

(中国科学院研究生院 北京 100049)²

摘要 无线传感器网络调度算法通过合理分配节点数据采集和传输的时间,使其在不需工作时转入低功耗的休眠模式,在满足应用要求服务质量的前提下,高效利用节点能量,达到延长网络生存期的目的。本文介绍了无线传感器网络调度算法的性能评价标准和分类方法,着重讨论了一些典型的调度算法,最后进行了各种算法的比较性总结,并指出了一些亟待解决的问题。

关键词 无线传感器网络,调度,能量高效,时分复用

Research on Scheduling Algorithms for Wireless Sensor Network

KANG Bo^{1,2} KE Xin^{1,2} SUN Li-Min¹ REN Yong^{1,2}

(Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)¹ (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)²

Abstract The scheduling algorithms of the wireless sensor network efficiently conserve the energy and prolong the life-time of the network while preserving the quality of service desired, by distributing soundly the data gathering and transmitting time slots of the nodes and turning them into sleep mode when they don't need to work. In this paper, the evaluation criterion of the performance and the taxonomy for wireless sensor networks scheduling algorithms are described, and several typical algorithms are discussed in detail. In the end, advantages and disadvantages of the algorithms are summarized.

Keywords Wireless sensor network, Scheduling, Energy efficiency, Time division multiplex

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)^[1~3]由大量集成各种微型传感器和无线通信模块的节点组成,这些节点通过传感器感知环境或采集监测对象信息,并以自组织多跳无线通信方式发送给汇聚节点(sink),再通过互联网将信息传送到用户。集成了网络技术、嵌入式技术及传感器技术的 WSN,适合军事、目标跟踪、环境监测、建筑物监测以及人体健康检测等多种应用,它将逻辑上的信息世界与真实的物理世界融合在一起,改变了人与自然的交互方式。

在 WSN 中,节点往往由电池供电,能量有限且不易补充。而实际应用又要求 WSN 能够持续工作一段比较长的时间,因此能量效率是 WSN 应用的一个关键问题。WSN 调度算法通过合理分配节点数据采集和传输的时间,使其在不需工作时转入低功耗的休眠模式,以减少信道空闲侦听,尽可能消除传输干扰和数据冗余等,从而高效利用节点能量,延长网络的生存时间。

近年来,已有一些学者开展了 WSN 调度方面的研究工作,并取得了一定的进展。本文综述了目前这一领域所取得的研究成果。第 1 节分析了 WSN 调度算法的性能评价标准,第 2 节对现有调度算法进行了分类,第 3 节详细介绍和讨论了一些典型的调度算法,最后对各种调度算法进行了比较和总结,并指出亟待解决的问题。

1 无线传感器网络调度算法性能评价

WSN 调度算法的性能直接影响其可用性,如何评价它们

是一个需要深入研究的问题。下面定性地讨论几个常用的评价标准。

(1)能量效率。高效使用节点能量,延长网络生存时间是调度算法的主要目的。研究表明,除了数据采集、空闲侦听以及数据传输外,频繁的在休眠和工作状态之间切换也会造成节点能量的较大消耗,因此调度算法还需要尽可能地使节点的休眠时间连续。

(2)实时性。节点的调度周期越长,休眠时间越多,工作寿命就越长。但过长的休眠周期会使得节点无法及时响应突发事件,从而影响实时性,而目标跟踪等应用对调度算法的实时性要求很高。

(3)算法精确度。即使在最简单的限制条件和网络模型下,节点的调度问题也是 NP-Hard 的^[4,5]。因此在实际应用中只能通过启发式算法得到近似优化的调度方案,这样势必会造成一定的误差,甚至出现调度不开,或者部分节点无法被调度的情况。

(4)算法复杂度。不同的 WSN 调度算法,在时间复杂度和空间复杂度上都存在着较大的差别。复杂的算法虽然可以得到较精确的调度分配,但是所能支持的网络规模会比较有限,不一定适合 WSN 这种网络规模大、节点资源有限的應用。

(5)时间同步要求。通常调度算法都假定网络各节点间已经存在比较精确的时间同步,但在实际应用中,各节点的时间同步总会存在一定的误差。能否容忍这样的时间同步误差

^{*}本文研究得到国家自然科学基金项目(No. 60673178)和国家 863 项目课题(No. 2006AA01Z215 和 No. 2006AA01Z218)资助。康波 硕士研究生,主要研究领域为多媒体和网络通信;柯欣 博士研究生,主要研究领域为无线传感器网络传输服务质量;孙利民 博士,研究员;任雍 硕士研究生。

以及能够容忍的误差范围有多少,成为关系到一个调度算法成功与否的关键。

(6)容错性和自适应性。WSN 较之其它网络具有很强的动态性^[6],新节点加入、节点失效以及能量耗尽都会使网络拓扑发生改变,从而导致调度分配失效。另外,无线信道固有的不稳定性以及外界环境的噪声干扰也会造成调度算法出现误差。因此 WSN 调度算法必须具有很强的容错性和自适应性,能够通过自动调整或重构来适应环境的影响,保证网络和节点工作的正常运行。

上述 6 个性能指标不仅是评价 WSN 调度算法的标准,也是其设计和实现的优化目标。另外,这些性能指标也是相互关联的,必须根据实际应用的具体需求做出权衡,从而选择和设计出最合适的调度算法。

2 无线传感器网络调度算法的分类

2.1 根据调度内容划分

根据调度内容的不同,WSN 调度算法可以分成工作调度和传输调度两类。

2.1.1 工作调度

节点的工作调度是针对节点数据采集的时间进行分配,可以看作是网络应用层的调度。这种调度算法首先需要满足一定的应用需求(例如在目标跟踪中要保证每个时刻进入监测区域的目标至少被一个节点所监视,或者在 k 覆盖中保证监视区域中的每个点至少能被 k 个节点覆盖到),然后尽可能地分配最少的节点进行工作,以节省能量的消耗,并尽可能地将工作平均分配给各个节点,以平衡网络的能量分布。而不需要工作时,节点则可以进入休眠模式。此类算法的相关研究包括文[7~9,17~20]。

2.1.2 传输调度

节点的传输调度是针对节点信息传输的时间进行分配,调度算法涉及到网络的传输层和 MAC 层。其主要思路为,根据网络拓扑和节点间相邻关系,为每个节点的信息收发建立一个时间表,一方面使得节点在不需要进行信息传输时转入休眠状态,另一方面尽量避免相互干扰的信息传输在同一时刻进行,从而减少数据碰撞,提高传输效率并减少因重传所造成的能量消耗。此类算法的研究包括文[10~16]。

2.2 根据计算方式划分

根据调度算法计算方式的不同,可以分为集中式调度和分布式调度两类。

2.2.1 集中式调度

集中式调度一般是由汇聚节点收集网络的全局信息,如各节点位置、网络拓扑、路由信息等,然后根据这些信息分配各个节点的感应采集时间或者是信息传输时间,最后由汇聚节点将分配好的调度信息分发给各个节点,各个节点依照执行。

集中式调度建立在掌握整个网络状况的基础之上,可以综合考虑各方面影响,因此算法的精度较高,网络的实时性也能够得以保证。不过,这种调度算法的复杂度往往很高,所能支持的网络规模有限,且一旦网络拓扑或者路由发生变化,就需要重新进行调度,消耗很大。此类算法的研究包括文[8,10,11]。

2.2.2 分布式调度

分布式调度是由网络中各个节点根据自身以及邻居节点的局部信息对自己的采集和传输时间进行分配。分布式调度

算法比较灵活轻便,适用于大规模网络,并能够自适应网络拓扑路由的改变,可扩展性好。但由于分布式调度只是基于本地的局部信息,算法的准确度和实时性难以保证。分布式的调度过程通常采用协商分配或者规则判断的方法。

(1)协商分配:在协商分配的过程中,每个节点与相邻的一跳或者两跳节点协商、竞争用于工作或者传输的时间,从而避免相互间的干扰。协商的过程可以由汇聚节点发起,自上而下的进行;也可以由底层节点开始,由下而上的进行。当协商完成后,每个节点都得到了自身的调度分配。此类算法的研究包括文[12~15,17]。

(2)规则判断:规则判断的调度方法是指事先建立一个调度的分配规则,每个节点根据此规则和本地的局部信息,自主决定工作或者传输的时间安排,而不再需要与其他节点的协商。这种方法可以减少调度过程中的通信开销,但分配规则的合理性将直接影响调度结果的准确度。此类算法的研究包括文[7,9,16,18~20]。

2.3 分类总结

以上两种 WSN 调度算法的分类既有各自特殊的角度,同时又有具体内容上的重叠。基于本部分内容,图 1 分类总结了 WSN 调度算法。

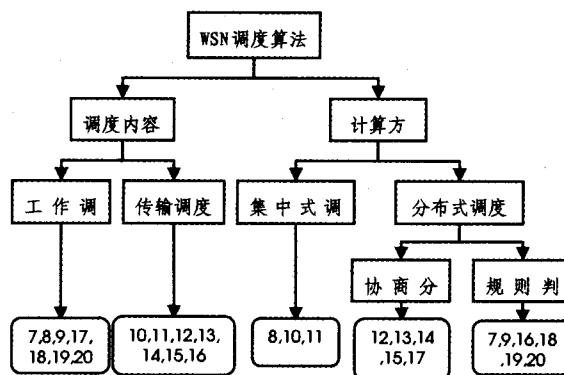


图 1 WSN 调度算法分类

3 几种典型的调度算法

基于前一部分对 WSN 调度问题各种算法的分类,本节将详细介绍一些典型的调度算法研究成果,并深入分析各种算法的优缺点。

3.1 基于网络生存时间的节点调度算法^[8]

文[8]以目标监控应用为背景,提出了一种能够实现网络最大生存时间的集中式节点工作调度算法。为了实现网络最大生存时间,文章规定在任意时刻,监视区域中每个目标有且只有一个节点进行监视,而每个节点在同一时刻最多只能监视一个目标。

假设网络中有 n 个节点和 m 个目标,位置确定且已知,相互间的监控关系也已知。定义 x_{ij} 表示在网络工作过程中,节点 i 对目标 j 进行监视的时间(可以为 0)。令 L 表示网络生存时间,则首先通过线性规划求解 L 的最大值,以及满足最大 L 的各个 x_{ij} 值。

根据各 x_{ij} 值,构造工作量矩阵 $X_{n \times m}$,然后利用图论中二部图匹配方法,将 $X_{n \times m}$ 分解成一系列调度矩阵之和。在每个调度矩阵中,每一列有且只有一个非 0 值,而每一行最多有一个非 0 值,且各行各列的非 0 值相等,记为 Z_i 。每个调度矩阵实际上就是一个节点工作时间分配表, Z_i 代表从调度开始时

刻起节点对目标的连续监视时间。因此这一系列调度矩阵即为网络节点的工作调度分配。

这种调度算法充分考虑了网络中各个节点和监测目标之间的相互关系,调度精确度较高,且能够达到理论计算的网路最大生存时间。不过此算法的复杂度也很高,为 $O(|E| \times n^3)$,其中 $|E|$ 为 $X_{n \times m}$ 中非零元素个数,因此在大规模的 WSN 中难以适用。

3.2 基于信息实时性的传输调度算法^[10]

无线传感器网络中,传统的基于 CSMA/CA 的信道竞争传输协议无法保证信息传输的实时性,而且由于 RTS/CTS 的使用而造成的错误阻塞(false blocked)^[21]现象也会导致传输效率的下降。而在很多实时性应用中,延迟到达的消息不存在任何意义。文[10]以携带无线传感器节点的机器人进行火灾现场探测为应用背景,针对确保信息实时性的问题,提出了一种类似于深度搜索的启发式节点传输调度算法。

进行探测的机器人组成一个无线传感器网络,其中一个机器人掌握网络和其他机器人的全部信息,称之为领导者。领导者在信息传输周期开始前调度分配信息的传输时间,并将结果发送给各个机器人。调度算法的基本思路为,首先根据每个信息的传输时限和传输跳数,计算其每一跳的最晚传输时间(LST),然后按照 LST 从小到大的顺序,逐跳的进行传输分配。分配时,尽量将互不干扰的传输分配到一个调度集合中,使信道的空间复用最大化,从而提高传输效率。如果一个传输与现有的所有传输调度集合都存在干扰,则新建一个集合。如果无论是现有的集合还是新建的集合都无法满足某一传输的实时性,则将该传输(包括前几跳已分配的调度)丢弃。

这种算法充分考虑了信息实时性的要求,并通过最大化信道空间复用的方法来提高传输效率,但算法复杂度和对时间同步的要求都比较高。而且,算法要求领导者节点能够实时掌握网络全部状态以及每个信息的生成和传输所需要的时间,这在 WSN 中也是不太现实的。

3.3 灵活能量调度(Flexible Power Scheduling, FPS)^[13]

FPS 是一种分布式协商分配的调度算法,采用时分复用的方式,并定义每 m 个时隙为一个周期。在 FPS 中,网络节点按跳数分层。每个节点在周期开始时,选择两个时隙分别作为备用接收时隙和通告时隙,然后利用通告时隙将备用接收时隙的信息广播出去。接收到该广播消息的低层邻居节点如果有数据需要发送,则在下一个周期的备用接收时隙向高层节点发送接收请求。高层节点会对在备用接收时隙内收到的第一个接收请求做出应答,然后将该时隙改为接收时隙,并从第三个周期开始利用该时隙进行数据传输。

在 FPS 算法中,如果节点有尚未分配发送的数据(包括自身采集数据和需要转发的数据),则在周期内的每个空闲时隙中保持监听,准备接收高层邻居节点的备用接收时隙广播。如果节点所有数据都已经分配了发送时隙,则在空闲时隙休眠,以节省能量。

由于备用接收时隙的广播在每个周期内都会进行,且节点间协商的过程不依赖网络路由的信息,因此 FPS 算法具有良好的可扩展性,能够适应节点失效或新节点加入等各种网络拓扑变化。另外,通过适当加长单个时隙的长度,可以消除节点间时间同步误差带来的影响,因此 FPS 对时钟同步的要求也不是很高。不过 FPS 算法只能避免同层节点间的传输碰撞,对于隐终端所引起的碰撞则无能为力。另外,FPS 算法

分配的收发时隙比较分散,从而使得节点在一个周期内频繁在工作/休眠状态之间切换,造成了不必要的能量消耗。

3.4 基于网内数据查询的调度 DCS^[14]

文[14]提出了一种基于 WSN 网内信息查询的节点信息传输分布式协商分配调度算法 DCS。DCS 算法与 FPS 算法比较类似,也是采用时分复用,并假设每 m 个时隙为一个周期。但与 FPS 算法中由高层节点广播备用接收时隙的这种自上而下调度不同,DCS 的调度是自下而上进行的。调度由接收到查询请求的叶节点开始,将自身可用于数据发送的时隙汇报给父节点,由父节点进行分配。这种调度分配由下而上逐层进行,最终在汇聚节点处结束。汇聚节点再将分配好的调度结果广播给各个节点,从而执行调度。

该算法中,由于父节点能够掌握全部子节点的空闲时隙信息,因此可以将节点用于接收和发送的时隙安排得比较集中,从而避免节点频繁地状态切换。另外,如果规定父节点的发送时隙要在其全部子节点发送时隙之后,则 DCS 的调度可以完全避免数据传输的冲突。但是 DCS 算法是建立在网络路由确定的基础之上,一旦网络拓扑或路由状态有所改变,DCS 调度将可能无法继续工作。而且,如果父节点在收集全部子节点数据后才进行传输,则 DCS 将需要很大的周期长度 m 才能完成传输分配,而这将会严重影响传输的实时性。

3.5 基于区域覆盖度的节点调度算法^[17]

文[17]针对数据收集型传感器网络,提出了一个基于区域覆盖度的分布式节点工作调度算法。每轮(round)数据收集对监测区域的覆盖度定义为预定感应度(DSC)。当 DSC 给定时,根据监测区域的范围和节点的感应半径,可以计算出概率上每轮工作的节点数 k ,而根据节点总数和 k 可以计算出每个调度周期包含的轮数。每个节点随机选择一轮工作,在其他轮,节点可以处于休眠模式。

受限于节点的传输半径,为了保证每轮的工作节点形成一棵以基站为根的连通的数据收集树(DGT),还需要调度其他节点参与数据传输。文中提供了一种最小化额外节点数的 DGT 构造法。每轮的 DGT 树初始只包含该轮的工作节点,树中节点优先选择同样在树中且距离基站最近的邻居节点作为自己的父节点,否则选择距离 DGT 树最近的邻居节点作为自己的父节点并发送加入请求包给该节点,使该节点参与本轮的数据传输,并加入当前的 DGT 树。

这种算法综合了节点调度和路由问题,平衡考虑了数据收集延迟和区域覆盖度,极大地延长了网络生存期。但是节点的选择方案没有考虑节点的空间分布,有可能使得每轮选择的工作节点扎堆,导致覆盖度波动较大,同时降低了工作节点间的连通性,需要更多的额外节点来形成 DGT 树,而 DGT 树的构造算法也较为复杂,不能很好地适应网络拓扑的变化。

3.6 基于汇聚传输(Convergecast)的调度算法^[16]

在 WSN 中所有节点都将数据传输给汇聚节点(或基站),因此数据传输是一种“多对一”的汇聚传输。文[16]以最小化全网数据汇聚传输时间为目的,提出了一种分布式基于规则判断的调度算法。该算法建立在网络时分复用和节点间基本时钟同步的基础上,并假设在每个发送周期内,每个节点都有一个数据需要发送。在一个时隙内节点可能的三种状态为:传输状态(记为 T)、接收状态(记为 R)和空闲状态(记为 I)。

文中首先从网络拓扑为线性的情况入手,为每个节点定

义调度规则如下:在第一个时隙时,如果节点跳数模 3 余 1 则进入传输状态,余 2 则进入接收状态,余 0 则进入空闲状态。随后的时隙中,每个节点按照如图 2 所示的状态图进行状态转换。可以证明,按照此方法收集网络全部信息需要 $3N-2$ 个时隙(N 为网络中节点个数),仅比理论上的最短时间 $3N-3$ 多 1。

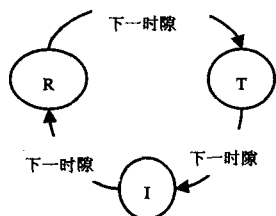


图 2 节点状态图

如果是多线拓扑的网络,则在每个时隙开始时从未被激活的分支中选择剩余数据量最多的一条分支,将其激活,该分支上的每个节点按照线性的调度方法连续运行 3 个时隙,然后转入未激活状态;树形拓扑的网络可以看成是“分岔”的多线网络来处理;普通的网格状拓扑网络可以先形成一棵网络的支撑树,然后按照树形网络处理。不过,此时需要考虑不同分支节点间相互干扰的问题,节点在激活前,必须确保不能干扰已经被激活的节点分支,否则将不被激活。

文[16]的方法可以在最短的时间内收集全网节点的数据,且每个节点可以自主地决定传输状态,但节点所需要记录的信息较多,在普通网络中各分支的相互干扰关系近似于网络全局信息。另外,这些算法也无法适应网络拓扑、路由的变化,可扩展性不强。

3.7 基于最佳活动节点数的调度算法^[18~20]

文[18~20]提出的调度算法,通过管理网络中活动传感器的数目,在维持节点空间分辨率的同时高效利用了节点能量。在这类应用中,由于传感器地理上的随机分布以及节点工作的不稳定性,网络中节点总数不易确定,而网络的最佳活动节点数 k 可以通过实验和历史行为记录确定,调度的目标是保证在任何时隙网络中活动节点数在 k 上下波动。

在文[18,19]中,基站广播当前活动节点信息,节点基于 Gur Game 数学模型或者 ACK Automation 策略调整下一轮的活动概率。文[20]采用预测式 QoS 控制策略(PQC),基站根据活动传感器数目的历史纪录来决定当前的控制值,节点基于基站反馈的控制值决定传输下一个数据包的时槽。该算法充分利用了基站的工作能力,在延长网络生存期的同时,提高了节点参与网络活动的等概率性和对网络动态的敏感度等。

这些算法都依赖于全局的网络参数来提供节点间的耦合,依赖于网络流量历史记录来决定当前行为,它们的数学模型都较为简单,能够良好地适应网络动态,能够有效保证网络内的活动节点总数,但是它们没有考虑活动节点的空间分布和能量状态。

4 总结

4.1 调度算法比较

表 1 中根据第 1 节给出的 WSN 调度算法的性能评价标准,对现有的各种调度算法进行了比较性的总结。

表 1 各种调度算法比较

文献	能量效率	实时性	算法精确度	算法复杂度	时间同步要求	自适应性
[7]	较好	较好	中等	中等	较低	较好
[8]	较好	较好	中等	中等	较低	较好
[9]	较好	较好	较好	较高	较高	较差
[10]	中等	较好	中等	较高	中等	较差
[11]	较好	较好	较好	较高	中等	较差
[12]	中等	中等	中等	中等	较高	较好
[13]	中等	中等	中等	较低	中等	较好
[14]	较好	较差	中等	较低	中等	中等
[15]	中等	中等	中等	较低	中等	中等
[16]	中等	较好	中等	中等	中等	较差
[17]	较好	较差	较好	较好	较高	较差
[18]	较差	较差	较好	较低	中等	较好
[19]	中等	较差	较好	较低	较高	较好
[20]	较好	较差	较好	较高	较高	较好

4.2 亟待解决的问题

虽然 WSN 调度算法已经取得了一定的成果,但仍然存在问题需要解决,集中体现在以下几个方面:

(1) 算法精确度与复杂度的折中

一些分布式或算法复杂度较低的调度算法往往无法完全避免传输碰撞,工作休眠的时间分配也比较分散,能量利用率不高。而能量效率或实时性比较高的算法,往往是集中式的,算法复杂度较高,无法适用于大规模的无线传感器网络。

(2) 适应网络动态变化的能力

很多调度算法是建立在网络拓扑、路由相对稳定基础之上的。但 WSN 网络的动态性很强,网络拓扑和路由状态随时可能改变,从而导致已分配的调度无法工作。另外,如何提供对移动节点的支持,也是目前大部分调度算法尚未考虑的。

(3) 服务质量(QoS)的支持

目前的调度算法,尤其是分布式传输调度,主要以完成调度分配为目标,缺乏对调度完成后传输效率的考虑。例如在文[13,14]中,如果周期长度过大,将严重影响数据的实时性;而如果周期长度较小,将为调度分配造成困难,而文中并没有讨论周期长度的合理值。另外,目前的调度算法也缺乏对数据传输的公平性以及提供不同优先级传输调度的考虑。

参考文献

- 1 Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: a survey [J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393~422
- 2 任丰原,黄海宁,林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282~1291
- 3 Pottie G J, Kaiser W J. Wireless Integrated Network Sensors [J]. Communications of the ACM, 2000, 43(5): 51~58
- 4 Lu G, Sadagopan N, Krishnamachari B, et al. Delay efficient sleep scheduling in wireless sensor networks. In: Proc. IEEE Infocom, Miami, FL, United States, 2005
- 5 Choi H, Wang J, Hughes E A. Scheduling on sensor hybrid network. In: Proc. 14th International Conference on Computer Communications and Networks, San Diego, CA, United States, 2005
- 6 李建中,李金宝,石胜飞. 传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展[J]. 软件学报, 2003, 14(10): 1717~1727
- 7 Tian D, Georganas N D. A Coverage-preserving Node Scheduling Scheme for Large Wireless Sensor Networks. In: First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, 2002
- 8 Liu H, Wan P, Yi C W, et al. Maximal Lifetime Scheduling in Sensor Surveillance Networks. In: Proc. IEEE INFOCOM'05
- 9 Ruiz L B, Filipe L, Vieira M, et al. Scheduling Nodes in Wireless

- Sensor Networks; a Voronoi Approach. In: Proc. 28th IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN2003), Bonn/Königswinter, Germany, 2003
- 10 Huan P S, Ramamritham K. Scheduling messages with deadlines in multi-hop real-time sensor networks. In: Proc. The 11th IEEE Real Time and Embedded Technology and Applications Symposium, San Francisco, CA, Mar 2005. 415~425
 - 11 Florens C, McEliece R. Packet distribution algorithms for sensor networks. In: IEEE INFOCOM, 2003
 - 12 Rhee I, Warrier A, Xu L. Randomized dining philosophers to TDMA scheduling in wireless sensor networks; [Technical report]. Computer Science Department, North Carolina State University, Raleigh, NC, 2004
 - 13 Hohlt B, Doherty L, Brewer E. Flexible Power Scheduling for Sensor Networks. In: Proc ISPN 2004
 - 14 Wu Hejun, Luo Qiong, Xue Wenwei. Distributed Cross-Layer Scheduling for In-Network Sensor Query Processing. In: Proc. the Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PERCOM'06) Pisa - Italy, March 2006. 13~17
 - 15 Mihail L, Sichitiu. Cross-Layer Scheduling for Power Efficiency in Wireless Sensor Networks. In: Proc. INFOCOM'04
 - 16 Gandham S, Zhang Ying, Huang Qingfeng. Distributed Minimal Time Convergecast Scheduling in Wireless Sensor Networks. In: Proc. The 26th International Conference on Distributed Computing Systems, Lisboa, Portugal, July, 2006
 - 17 Choi W, Das S K. A Novel Framework for Energy-Conserving Data Gathering in Wireless Sensor Networks. In: Proceedings of IEEE INFOCOM, Miami, Florida, Mar 2005
 - 18 Iyer R, Kleinrock L. QoS Control for Sensor Networks. In: IEEE International Communications Conference (ICC 2003), Anchorage, AK, 2003
 - 19 Kay J, Frolik J. Quality of Service Analysis and Control for Wireless Sensor Networks. In: 1st IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS 2004), Ft Lauderdale, FL, Oct 2004
 - 20 Liang Biyu, Frolik Jeff, Sean Wang X Sean. A Predictive QoS Control Strategy for Wireless Sensor Networks. In: The 1st Workshop on Resource Provisioning and Management in Sensor Networks (RPMSN '05) in conjunction with the 2nd IEEE MASS, Washington, DC, Nov 2005
 - 21 Ray S, Carruthers J B, Starobinski D. RTS/CTS-induced Congestion in Ad Hoc Wireless LANs. In: Proc. Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), March 2003

(上接第 36 页)

的增长, mDOS 进行关键字转移的次数呈现先增长后降低趋势。这是因为, 当加入/退出频率增快时, 失效结点在被淘汰之前再次进入系统, 相应的信息不需要做移动。

下面的实验利用语义树来解决 P2P 系统的物理临近性问题, 演示了语义树对实际应用在可用性方面的提高。取一块平面, 一分为二, 分别代表左子树和右子树; 依次继续, 分为一系列的小方格。小方格代表了结点位置, 并与语义树上的一个叶子结点相对应, 形成一棵能够表达相对位置的语义树。实验分别采用三种路由策略实现搜索来验证搜索策略对物理临近性的影响。这三种策略分别是: 基于前面设计的一维的标识符语义距离、基于一维的几何距离、基于前两者距离的乘积。表 1 是其中的实验结果。从应用层跳数来看, 前两者相当, 第三者最短, 这是因为第三者采用了二维语义树的缘故。从相对距离, 即路由过程经过的几何距离之和与查询结点和目标结点之间几何距离的比值来看, 后两者效果较好, 因为根据相对位置形成的语义树在路由过程起辅助标准作用, 而基于标识符语义树的路由策略忽视了结点之间的物理距离因素, 使得逻辑上的一跳对应物理上的多跳, 更远的物理距离。在实际应用中还可以根据需要设计语义树, 以在结构化 P2P 系统中保留更多应用描述性信息。可以采用其中任意的一维或者多维作为路由的度量标准, 也可在各维之间规定不同的优先级, 以实现不同的应用需求。

表 1 不同路由策略下搜索路径长度与相对距离比较

系统 规模	路由依据					
	语义距离		几何距离		语义距离 * 几何距离	
	Hops	相对路径	Hops	相对路径	Hops	相对路径
2 ¹⁰	2. 91	2. 54	2. 67	1. 64	2. 13	1. 21
2 ¹²	3. 53	3. 69	3. 19	2. 1	2. 58	1. 69
2 ¹⁴	4. 14	4. 72	3. 72	2. 57	3. 06	2. 2

此外, mDOS 中的热点内容不仅仅由一个结点负担, 而是由协作的几个结点共同负担, 因此, mDOS 对热点访问具有适应性, 比之传统的 DHTs 更利于负载均衡。

结论 本文给出了一种 Internet 环境下完全分布的、容错的、可扩展的 P2P 搜索系统, mDOS, 介绍了基于小世界构造自组织覆盖网络的方法以及查询消息自适应路由的策略。在查找路径、容错、维护代价等方面与 Pastry 的实验比较说

明, mDOS 具有如下优点: mDOS 具有很高的搜索效率, 具有 $\log(N)$ 搜索路径长度; mDOS 以“懒惰维护”机制管理关键字, 以“被动修改”维护覆盖网络, 能够克服传统 DHTs 中结点动态性带来关键字维护和覆盖网络维护负担; mDOS 在叶子内结点之间实现协同备份, 对结点离线具有很好的容错性, 利于负载均衡; mDOS 采用层次性语义树组织结点, 利于保持许多有价值的应用描述性信息。接下来我们将着手 mDOS 的实现, 并加强可用性方面的工作。

参考文献

- 1 Milgram S. The small world problem. Psychology Today, 1967, 67(1)
- 2 Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of small world networks. Nature, 1998, 393
- 3 Kleinberg J. The small-world phenomenon: an algorithmic perspective. In: Proc. 32nd ACM Symposium on Theory of Computing (STOC 2000), 2000
- 4 Watts D J, Dodds P S, Newman M E J. Identity and search in social networks. Science, 2002, 296, 1302~1305
- 5 Stoica I, Morris R, Karger D, et al. Chord: a scalable peer-to-peer lookup service for internet applications. In: Proc. ACM SIGCOMM, 2001
- 6 Ratnasamy S, Francis P Mhandley, Karp R M. A scalable content-addressable network. In: Proc. ACM SIGCOMM 2001, 2001
- 7 Rowstron A I T, Druschel P. Pastry: Scalable, decentralized object location, and routing for large-scale peer-to-peer systems. In: IFIP/ACM International Conference on Distributed Systems Platforms, 2001
- 8 Hildrum K, Kubiawicz J D, Rao S, et al. Distributed object location in a dynamic network. In: Proc. 14th ACM Symposium on Parallel Algorithms and Architectures (SPAA), 2002
- 9 Keleher P J, Bhattacharjee B, Silaghi B D. Are Virtualized Overlay Networks Too Much of a Good Thing? IPTPS, 2002. 225~231
- 10 FreeNet. <http://freenet.sourceforge.net>
- 11 Sripanidkulchai K, Maggs B, Zhang Hui. Efficient Content Location Using Interest-based Locality in Peer-to-Peer Systems. Infocom, 2003
- 12 Iamnitchi A, Ripeanu M, Foster I. Locating Data in (Small-World) Peer-to-Peer Scientific Collaborations. In: 1st International Workshop on Peer-to-Peer Systems (IPTPS'02), Cambridge, MA, March 2002
- 13 Manku G S, Bawa M, Raghavan P. Symphony: Distributed hashing in a small world. In: 4th USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems, USITS, 2003
- 14 Kleinberg J. Small-world phenomena and the dynamics of information. Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS) 14, British Columbia, Canada, 2001