

一种适合在无线传感网络中传输实时业务的区分服务方案

朱小松¹ 陈敏²

(广东技术师范学院电子系 广州 510665)¹

(国立汉城大学计算机科学与工程学院 韩国汉城 151742)²

摘要 本文在我们建立的基于 Directed Diffusion(DD)^[1,2]的无线传感器网络模型的基础上,提出一种针对实时业务传输的区分服务方案,称为轮询路径调度算法(Round Robin Path Scheduling,RRPS)。通过泛洪建立路径能量瓶颈梯度及跳数梯度,并根据这两个梯度的组合,将源节点(Source node)和观测节点(Sink node)之间的中继节点(Intermediate node)优化成多条路径。根据网络的资源状况为不同等级的业务分配不同的路径;为实时业务分配延时小的路径组,同时轮流切换该组中的路径,以达到局部负载均衡;剩余的路径组为尽力而为业务提供服务,并以轮询方式选择路径,以均衡网络能耗。实验结果表明,RRPS能支持传感器网络中同时传输不同服务等级的业务,降低实时业务的端对端延时和延时抖动,并使网络生存期得到提高。

关键词 无线传感网络,定向扩散,调度算法,区分服务,实时传输,服务质量

A Novel Differentiated Services Mechanism for Real-time Traffic Transmission in Wireless Sensor Networks

ZHU Xiao-Song¹ CHEN Min²

(Dept. of Electronic & Information Engineering, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665)¹

(School of Computer Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151742, Korea)²

Abstract In this paper, a novel Differentiated Service scheduling algorithm for wireless sensor network based on Directed Diffusion has been introduced. The proposed scheduling scheme called Round Robin Path Scheduling (RRPS). For RT traffic, RRPS takes into consideration the hop count of a path first and then the minimum available energy along the path when it sets up the path between a sensor and a sink. Meanwhile, for BE traffic, RRPS puts higher priority on the minimum available energy of the path compared to the hop count. Comprehensive simulation experiments show that RRPS has the following advantages: (1) differentiates dissemination service for RT and BE traffic, (2) achieves lower delay for RT traffic than Directed Diffusion (DD), (3) exhibits substantially longer network lifetime than DD.

Keywords Wireless sensor networks, Directed diffusion, Energy-balancing, Scheduling algorithm, Differentiated services (DiffServ), Real-time transmission, QoS

1 引言

无线传感器网络^[3,4]是当前的研究热点之一,在军事、民用和工业生产等领域具有广阔的应用前景。它由大量小型甚至微型的传感节点组成,具有有限的数据感知、信息处理和无线通信能力。节点间以无线多跳的无中心方式连接,网络拓扑动态可变。

与传统基于全局地址的IP网络相比,无线传感网络中,节点缺乏全局地址。并且由于在配置之后常无人照料,能量得不到补充(例如仅配置电池),因此能量受限。传感网络的特征要求网络协议栈中的大多数协议能量有效,特别是对网络层的设计,从而使得能量有效路由成为具备挑战性的课题。针对这个课题,大多数文献集中研究如何延长网络生存期,在节点失效或者电池耗尽时支持网络容错等^[5-10]。

无线传感器网络是面向应用的,“一次部署多种应用”的多业务无线传感器网络是必然发展趋势,不同业务对网络服务质量(QoS)提出了不同要求。在传感网络中,有些应用要求及时发送数据包。例如,当一个目标进入一个兴趣区域,在定位和检测目标之后,传感节点可能周期性向观测节点(Sink node)报告事件,及时报告感知事件可能是很重要的。如果事件没有在接收期限之内到达观测节点,则业务的端对端延时

要求不被满足,而视为无效。根据实时应用的要求,低延时传输可能比可靠传输更加重要。因此,在无线传感器网络中,要求提供有保证的区分服务,同时能在全网范围内实现资源的充分有效利用。能耗均衡的QoS路由是解决该问题的关键技术之一^[11,12]。

QoS研究的目的是有效提供端到端的服务质量控制或保证,近几年IETF(Internet Engineering Task Force)在此方面做了很多工作。区分服务(DiffServ, Differentiated Services)是IETF在QoS领域所做的新尝试^[13,14]。区分服务网络由边界节点和内部节点构成,边界节点对各流完成分类、标记、测量、整形和丢弃等各种功能,并给数据包的DS域标记上不同的DSCP(Differentiated Service Code Point)值;内部节点在调度转发IP包时,根据包头的DSCP选择提供特定质量的调度转发服务。虽然针对IP网络和ad hoc网络提出了许多针对延时敏感数据的QoS路由和区分服务机制,但是它们不能直接应用于传感网络。目前,对于传感网络中提供服务质量的研究尚未深入。

本文在我们建立的基于Directed Diffusion(DD)的无线传感器网络模型的基础上,提出一种针对实时业务传输的区分服务方案,称为轮询路径调度算法(Round Robin Path Scheduling)。通过泛洪建立梯度,并根据梯度组合,将源节点

(Source node)和观测节点(Sink node)之间的中继节点(Intermediate node)优化成多条路径。根据网络的资源状况为不同等级的业务分配不同的路径:为实时业务分配延时小的路径组,同时采用 RRPS 算法轮流切换该组中的路径,以延长网络的生存期;剩余的路径组为尽力而为业务提供服务,并采用 RRPS 算法均衡负载。实验结果表明,RRPS 能支持传感网络中同时传输不同服务等级的业务,并能够降低实时业务的端对端延时和延时抖动,而且使网络生存期得到提高。

2 无线传感器网络模型

如图 1,我们采用网络仿真软件 OPNET^[15]建立的无线传感器网络模型。300 个传感节点随机地分布在长宽各 200m 的区域中。除了观测节点不受能源限制之外,其他传感节点皆为电池驱动。无线最大传输距离为 15m。假定观测节点和传感节点都是静止的。观测节点被放置在区域的一角,而目标区域(target region)被指定在网络的另一角。观测节点通过周期性地泛洪兴趣包来发起新一轮任务。兴趣包中包含的属性描述了观测节点希望得到的数据,包括期望的传感节点类型、数据率、地理区域等等。中继节点不仅仅可以转交分组,还能够存储和解释兴趣包。中继节点接收到兴趣包后,根据其中的信息建立指向观测节点方向的梯度。

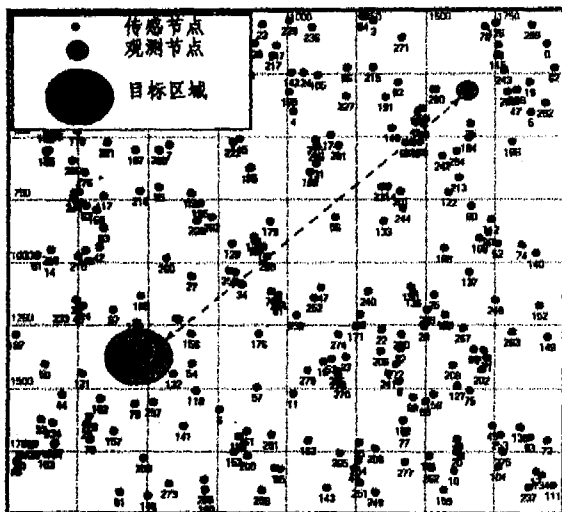


图 1 无线传感器网络模型

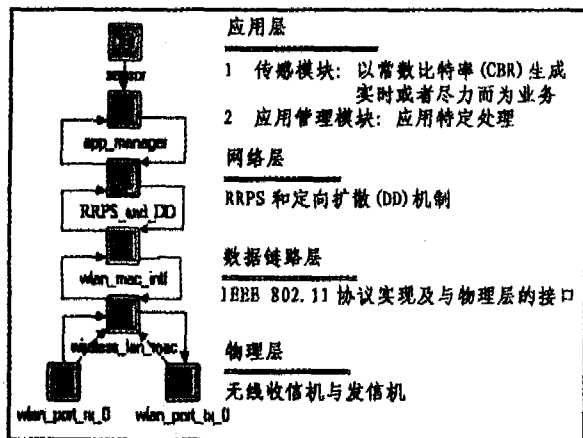


图 2 传感器节点模型

兴趣包朝着图 1 所示灰色圆圈所指示的目标区域传播。在该区域中将有一个节点与兴趣包指定的属性相匹配,从而成为源节点并向观测节点发送数据包。中继节点根据已经建立的梯度,来挑选下一跳节点。数据包经历多跳最终到达观

测节点。

图 2 为传感节点模型所包含的协议栈,它包括应用层、网络层、数据链路层和物理层。在应用层中,传感节点可以同时产生实时业务和尽力而为业务。每个任务期间,源节点周期性地以常比特速率向观测节点发送数据包。RRPS 和 DD 在路由层中实现。数据链路层采用 2Mbps 速率的能量有效 MAC 层协议(例如 S-MAC^[9]等)。

3 梯度的建立

每个传感节点维护了一张邻居信息表。传感节点曾经接收过来自该表每一个邻居所发送的兴趣包,并建立指向每一个邻居的梯度。梯度用来评估邻居节点作为数据转发下一跳节点的可用性。在建立了梯度之后,传感节点视情况再次广播兴趣包。兴趣包从观测节点出发跨越网络,最终到达目标区域后,与之匹配传感节点被触发,启动传感设备收集并发送数据。数据包将被建立好的梯度场“吸”回观测节点。

RRPS 算法的实现有赖于有效梯度的建立。梯度建立是在接收兴趣包时进行的。图 3 所示为兴趣包所包含的内容。

兴趣包格式	
固定属性	
SinkID	观测节点标识号
Application Context	应用上下文
IsseqNum	兴趣包序列号
可变属性	
TTL(only for RTtraffic)	生存期
RpreviousHopID	前一跳标识号
邻居信息表更新标志	
RT-gradient_UpdateFlag (RUF)	RT 梯度更新标志
BB-gradient_UpdateFlag (BUF)	BB 梯度更新标志
梯度	
HopCount (HC)	兴趣包经历的跳数
PreviousMPE	前一跳节点的 MPE 梯度

图 3 兴趣包格式

图 3 中固定属性指定了需要通信的源节点和观测节点对,其中 SinkID 为观测节点识别号;Application Context 为观测节点的特征,也表明了特殊应用的要求(例如节点类型、目标特征、期望分组速率,以及地理区域等)。当观测节点发起新一轮兴趣包泛洪时,则将兴趣包序列号(IsSeqNum)加 1。固定属性在传播过程中是不会被改变的,而可变属性(Variable Attributes)则可能被中间节点所修改。TTL 属性初始值设定了兴趣包可以远离观测节点的最大跳数,它是为实时业务专门设计的。在一般网络环境下,跳数与延时相关联,因此实时业务对于延时的硬性限制可以通过设定最大跳数 TTL 来体现。实时梯度更新标志(RT-gradient_UpdateFlag, RUF)和尽力而为梯度更新标志(BUF)指定了需要更新何种类型的梯度(RT 或 BE)。

为了达到网络能量均衡,我们引入了一种新的梯度度量:最小路径能量(Minimum-Path-Energy, MPE)。MPE 梯度为传感节点指向观测节点路径的一个属性,定义为路径上所有节点能量等级的最小值,这个最小值即为该路径的能量瓶颈。直观上,如果有多条路径可供选择,我们尽可能采用能量瓶颈最大的路径。但是该路径一旦被选择而消耗一定的能源之后,其 MPE 将可能低于其他路径而暂时不再被选择。因此, MPE 的设计初衷是平衡多条路径之间的能耗,以延长整个网络的生存期。进一步,考虑到网络对实时业务的支持,还必须再引入一种用来选择符合延时要求路径的梯度。与延时相关

的梯度有:跳数、距离,以及传统 DD 算法采用的路径端对端延时等等。本文采用跳数梯度(HopCount, HC),定义为传感节点距离观测节点的跳数。当 MPE 与 HC 配合使用时,可以支持无线传感网络下不同服务等级业务的混合传输,并在满足实时业务延时要求的前提下,尽量优化尽力而为业务的能耗。

址)。所有的 NIE 组成邻居信息表(Neighbor Information Table, NIT)。

中继节点处理带 BUF 标志的兴趣包	
第一步:	得到兴趣包中的信息
第二步:	按照前一跳标识号(PreviousHopID)在邻居信息表(NIT)中查找相应的记录(NIE)
第三步:	在邻居信息记录中更新 BE 梯度
第四步:	决定兴趣包是否需要重新广播
MaxMPE:	前一跳节点到观测节点路径 MPE 的最大值;
CurrentMPE:	当前节点的 MPE;
$CurrentMPE = \min[\text{节点能量等级}, PreviousMPE]$; 如果 第一次收到新一轮任务发送的兴趣包(采用 SinkID 与 IseqNum 联合标识), 或者 $CurrentMPE > MaxMPE$, 那么 $MaxMPE = CurrentMPE$; 更新并广播兴趣包。	

图 4 BE 梯度建立算法描述

通过 MPE 与 HC 的组合可以得到 RT 梯度和 BE 梯度。RT 梯度将 HC 子梯度视为等级更高的梯度,首先筛选符合实时传输延时要求的路径,其次考虑能量均衡;而对于尽力而为业务,由于其延时不受限制,因此能量均衡是算法设计的主要目标,故 MPE 梯度优先于 HC 梯度。

3.1 尽力而为(BE)梯度的建立

图 4 解释了当一个中继节点收到带 BUF 标志(BE 梯度更新标志)兴趣包时所做的处理。首先,它将查看兴趣包中所包含的信息。兴趣包中的 PreviousHopID 为图 5 所示邻居信息记录(Neighbor Information Entry, NIE)的索引号,该索引号为邻居节点的唯一整型标识(例如,采用 IEEE MAC 层地

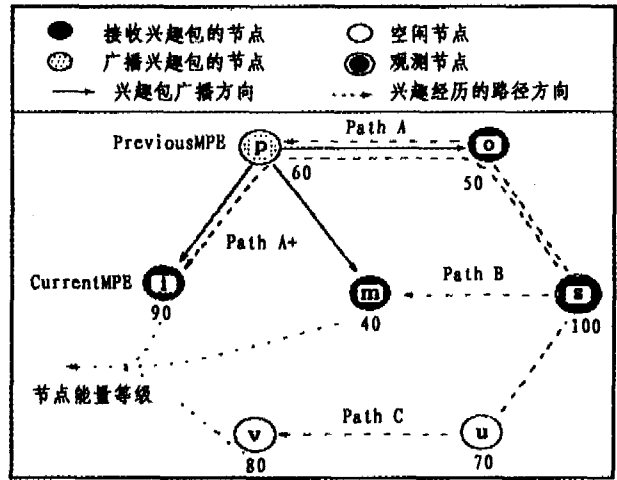


图 5 中继节点接收兴趣包时计算 CurrentMPE

中间节点根据需要进行更新的梯度类型来刷新 NIE。图 4 中的第 4 个步骤是最关键的。如图 5 所示,令路径 A(Path-A)由节点 s, o 以及 p 组成;路径 B 由节点 s 和 m 组成;路径 C 包括节点 s, u 和 v。则路径 A+, B+, C+ 分别为路径 A, B, C 与节点 i(包括节点 i 与前一跳节点之间链路)的组合。当中继节点 i 收到来自前一跳节点 p 的兴趣包时,它将计算路径 A+ 的 MPE,即为图中的 CurrentMPE,等于 $\min[\text{节点 } i \text{ 能量等级}, MPE(\text{Path-A})]$ 。如果该值是当前所有路径中最大的,即 $MPE(\text{Path-A+}) > MPE(\text{Path-B+})$ 以及 $MPE(\text{Path-C+})$,则中继节点 i 认为路径 A+ 中的节点 p 是实现最大 MPE 梯度的节点。同时,节点 i 在兴趣包中激活 BUF 标志,并且通过广播兴趣包的方式通知其邻居节点更新各自的 MPE 梯度值。

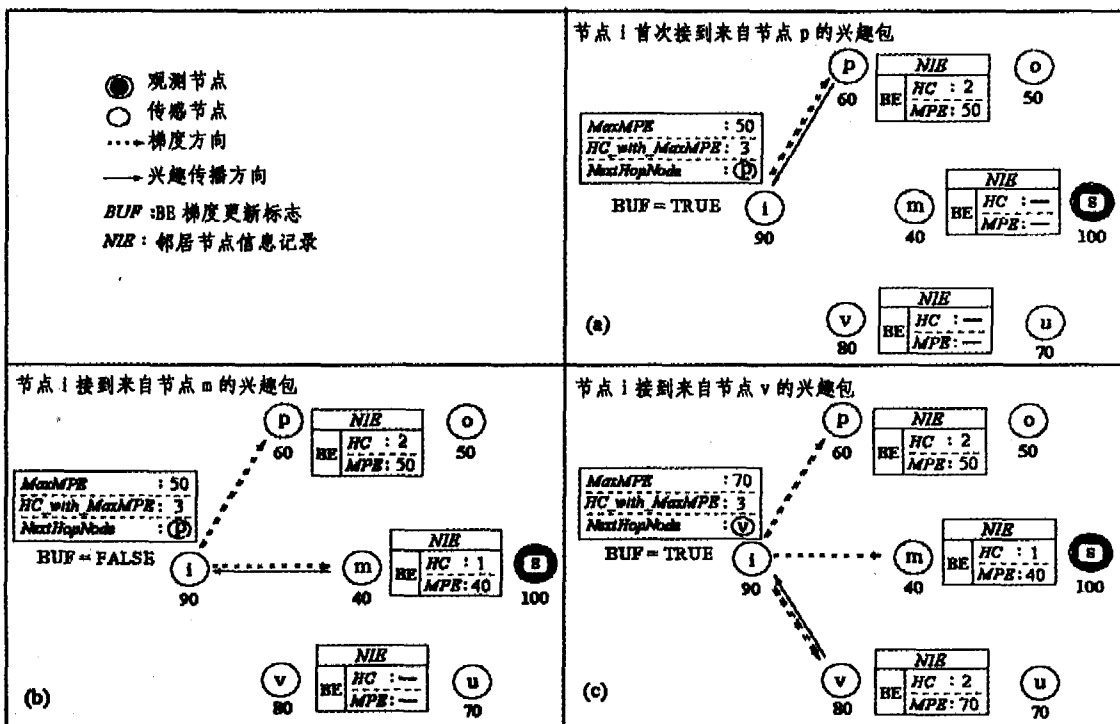


图 6 中继节点接收带 BUF 标志兴趣包时建立 BE 梯度

图 6 给出了如何更新 BE 梯度的例子。如图 6(a)所示, 中继节点 i 接到第一个兴趣包, 它将进行如下操作: (1) 建立指向节点 p 的 BE 梯度; (2) 选择节点 p 为下一跳节点; (3) 在兴趣包中设置 BUF 标志并广播更新后的兴趣包。

如图 6(b)所示, 当它接到第二个兴趣包时, 将做如下处理: (1) 建立指向节点 m 的 BE 梯度; (2) 因为路径 B+ 的 MPE 梯度等于 40, 小于路径 A+ 的 MPE, 因此兴趣包被丢弃。

图 6(c)指示节点 i 收到第三个兴趣包时所做的处理: (1) 建立指向节点 v 的梯度; (2) 由于路径 C+ 的 MPE 为 70, 大于路径 A+ 的 MPE, 因此下一跳节点被替换成节点 v ; (3) 在兴趣包中设置 BUF 标志并广播更新后的兴趣包。

3.2 RT 梯度的建立

图 7 为建立 RT 梯度的步骤。与建立 BE 梯度相比, 区别主要是第四个步骤(图 8 所示)。图 8(a)所示, 中继节点 i 接到第一个兴趣包, 将进行如下操作: (1) 建立指向节点 p 的 RT 梯度; (2) 选择节点 p 为下一跳节点; (3) 在兴趣包中设置 RUF 标志并广播更新后的兴趣包。

如图 8(b)所示, 当它接到第二个兴趣包时, 将做如下处理: (1) 建立指向节点 m 的 RT 梯度; (2) 由于路径 B+ 的 HC 梯度等于 1, 小于路径 A+ 的 HC 梯度, 因此下一跳节点被替换成节点 m ; (3) 在兴趣包中设置 RUF 标志并广播更新后的兴趣包。

图 8(c)指示节点 i 收到第三个兴趣包时所做的处理: (1)

建立指向节点 v 的梯度; (2) 因为路径 C+ 的 HC 梯度等于 2, 小于路径 B+ 的 MPE, 因此兴趣包被丢弃。值得注意的是, 当 HC 相同, 而 MPE 更大时, 仍然更新 RT 梯度(如图 7)。

中继节点处理带 RUF 标志的兴趣包	
第一步:	得到兴趣包中的信息
第二步:	按照前一跳标识号 (PreviousHopID) 在邻居信息表 (NIT) 中查找相应的记录 (NIE)
第三步:	在邻居信息记录中更新 RT 梯度
第四步:	决定兴趣包是否需要重新广播
MinHC: 前一跳节点到达观测节点跳数的最小值; MPB_with_MinHC: 具有 MinHC 梯度的一前一跳节点的 MPE 梯度; PreviousMPE: 前一跳节点的 MPE 梯度; CurrentMPE: 当前节点的 MPE;	
$CurrentMPE = \min\{\text{节点能量等级}, \text{PreviousMPE}\};$ 如果 第一次收到新一轮任务发送的兴趣包 (采用 SinkID 与 IseqNum 联合标识), 那么 $MinHC = \text{兴趣包经历的跳数}; MPB_with_MinHC = CurrentMPE;$ 否则 兴趣包经历的跳数 $< MinHC$, 那么 $MinHC = \text{兴趣包经历的跳数}; MPB_with_MinHC = CurrentMPE;$ 否则 (兴趣包经历的跳数 $= MinHC$) && $(CurrentMPE > MPB_with_MinHC)$, 那么 $MPB_with_MinHC = CurrentMPE.$ 以上三种情况任何一种发生, 则更新并广播兴趣包。	

图 7 RT 梯度建立算法描述

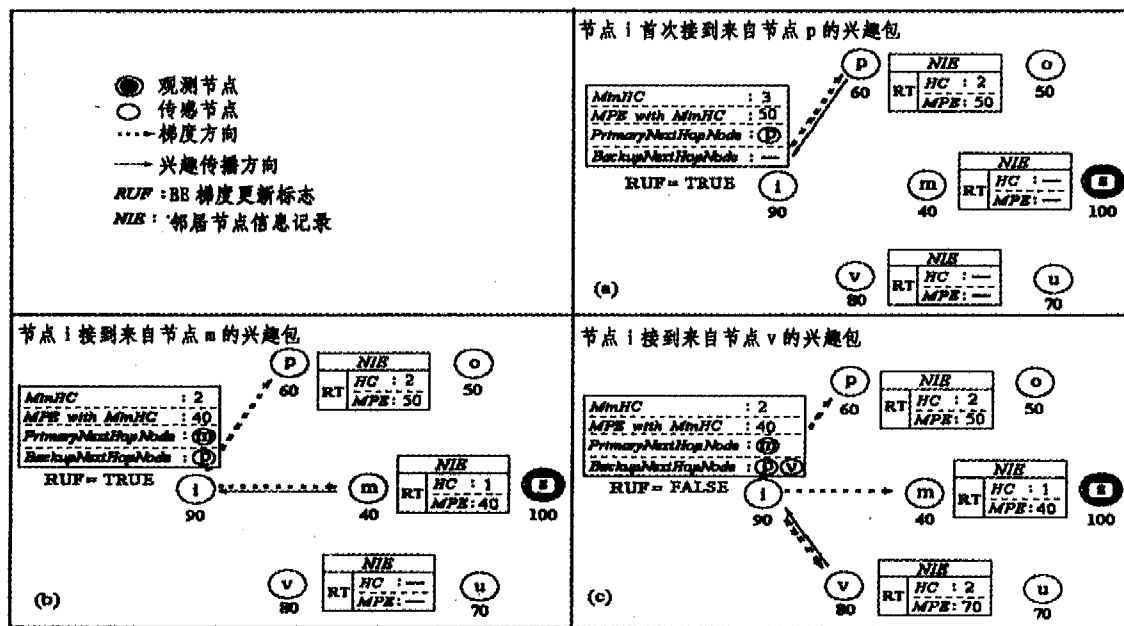


图 8 中继节点接收带 RUF 标志兴趣包时建立 RT 梯度

4 轮询路径调度算法 (Round Robin Path Scheduling, RRPS)

本节提出的轮询路径调度算法 (RRPS) 有赖于 BE 梯度与 RT 梯度的建立 (如第 3 节所述)。当传感节点要发送数据包时, 将启动 RRPS 调度算法。

本文假设传感节点初始能量相同, 并且观测节点与目标区域位置固定, 因此图 9 所示的根据 RT 梯度所分割的路径是有规律的, 形状与磁场中磁力线相似。假设路径 A-1、A-2 和 A-3 组成最短跳数路径组 (Path Group, PG), 简称 PG-A。

对于实时业务, 具有最小跳数的 PG-A 中的路径最能满

足其延时的要求。在 3 条候选路径 (A-1、A-2、A-3) 中, RRPS 采用第二级 MPE 梯度选择机制, 挑选出具有最大 MPE 的路径。如果 PG-A 中的路径能源全部耗尽, 则 PG-B 成为满足延时要求的最优选择。换句话说, 对于实时业务, RRPS 首先寻找低延时路径, 其次在 PG 内寻求局部的能量均衡。因此, 用于传输实时业务的路径使用顺序为: A-1, A-2, A-3, A-1, A-2, A-3, ... (PG-A 能源耗尽), B-1, B-2, B-1, B-2, ... (PG-B 能源耗尽), C-1, C-2, C-1, C-2, 依次类推。

由于延时不是尽力而为 (BE) 业务的主要考虑因素, 因此 RRPS 调度 BE 业务时总是选择最大 MPE 所对应的路径 (即为瓶颈能量最大的路径), 以寻求整个网络范围的全局能量均

衡(global energy balance)。可以想象,用于传输 BE 业务的路径使用顺序为:A-1, A-2, A-3, B-1, B-2, C-1, C-2, D-1, D-2, E-1, E-2, A-1, A-2,…。如果所有的传感节点在路径调度的开始有着相同的电池能源,则 RRPS 调度 BE 业务最终导致所有可利用路径包含的传感节点几乎同时耗尽能源。

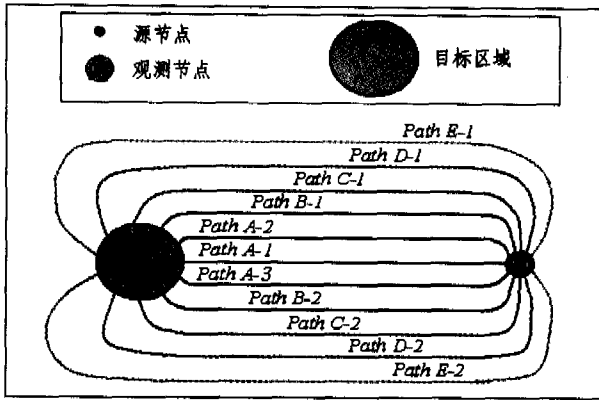


图 9 RRPS 分割的路径组

我们采用 RRPS 调度机制分别针对 RT 和 BE 业务的传输做了两组实验。实验在源节点与观测节点之间没有任何可利用的路径时结束。图 10 为传输实时业务时的延时图,可以看出 RT 业务端对端延时(数据包从源节点出发到达观测节点所经历的延时)呈阶梯状增长。不同的延时等级对应着不同 PG 的跳数。可以看出,在同一个能量等级(Delay level)中,存在着一定程度的延时抖动,这是由于第二级 MPE 梯度选择的结果,从而达到局部(在 PG 内)的能量均衡。随着延时等级的增大,传感网络对实时业务传输的支持度也依次降低,到达一定程度,将失去对实时业务传输的支持。在第 3 节中,我们已经提到可以采用 TTL 来限制路径的最大的跳数,从而保证实时业务所需的延时等级。

如果可能的最短路径的延时已经超过了服务质量要求,那么传感网络已经不能支持这种业务的传输,此时任何调度算法都将失效。因此,RRPS 并不能对 RT 业务的端对端延时提供硬性保障。

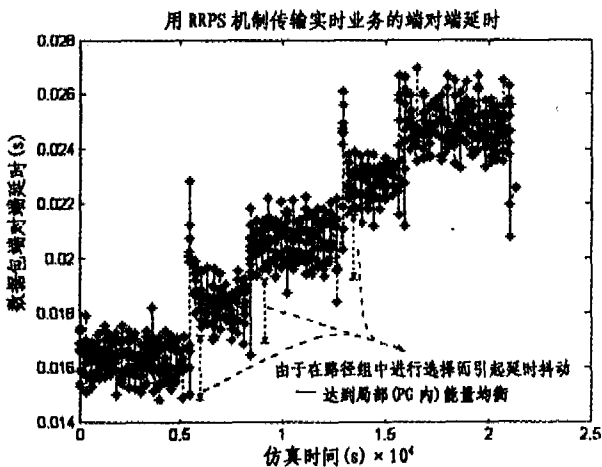


图 10 采用 RRPS 传输实时业务的端对端延时

图 11 所示为传输尽力而为业务的延时图。可以看出, BE 的延时抖动远大于图 11 中 RT 的延时抖动,这是 RRPS 为尽力而为业务在所有可利用路径中挑选最大 MPE 路径造成的。在本轮任务中,被选择的路径有可能因为本轮所消耗

的能量而在下一轮不再具备最大的 MPE,因此被淘汰。如果初始时节点能量相同,则从宏观上来看,RRPS 对尽力而为业务采用严格的轮询路径调度。

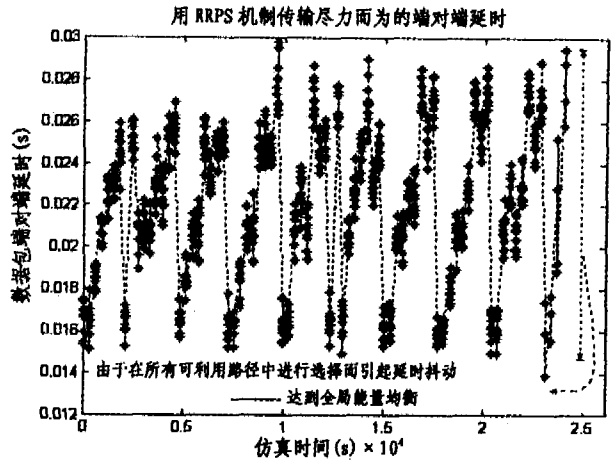


图 11 采用 RRPS 传输尽力而为业务的端对端延时

5 模拟实验及结果

利用我们自己建立的基于 Directed Diffusion 的无线传感网络系统,我们对 RT 与 BE 的混合业务做了传输实验。表 1 为仿真参数配置。

表 1 仿真参数配置

观测节点周期性泛洪兴趣包间隔 (s)	300
源节点生成数据包平均速率 (packet/s)	100
分组大小 (bits)	1024
无线信道速率 (Mbps)	2
网络规模 (m ²)	200×200
总的传感节点个数	300
节点分布模式	随机
最大传输距离 (m)	15

图 12(a)、13(a)、14(a)分别为当 RT 与 BE 业务混合比例为 1/1,1/2,1/3 时数据包的端对端延时,12(b)、13(b)、14(b)为相应的延时抖动。从图中我们能够看出:(1)RT 和 BE 业务的端对端延时明显分离,BE 业务的端对端延时几乎始终低于 RT 业务;(2)随着混合业务比例降低,BE 业务比重加大,RT 业务的端对端延时下降,同时延时抖动幅度也下降;(3)随着混合业务比例降低,BE 业务的延时抖动幅度增大。实验结果与第 4 节的分析是一致的。

当 RT 业务占用具有 MinHC 梯度的最小跳数路径(如图 9 中 PG-A 中的路径)时,被选路径在该轮任务中将消耗一定的能量,在下一轮任务中能量可能低于其他路径组(如图 9 中的 PG-B、PG-C 等)中的路径,而不被 BE 业务所选择。因此,RRPS 将 BE 业务与 RT 业务所占用的路径分离。这是图 12(a)、13(a)、14(a)中 BE 与 RT 业务端对端延时明显分离的原因。

图 15 为分别采用 RRPS 和 DD 算法在无线传感网络中传输混合业务的延时比较图。由于 DD 不提供区分服务,因此 RT 业务与 BE 业务的端对端延时基本一致,而 RRPS 为 RT 业务提供了低延时服务。同时,由于考虑了能耗均衡,RRPS 比 DD 提高网络生存期 3000s。

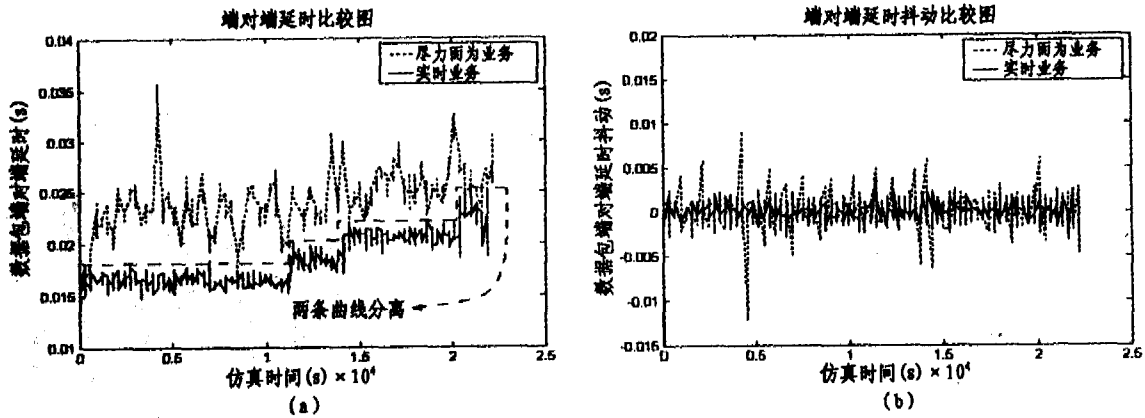


图 12 RT 与 BE 业务量之比为 1:1 时的端到端延时和延时抖动

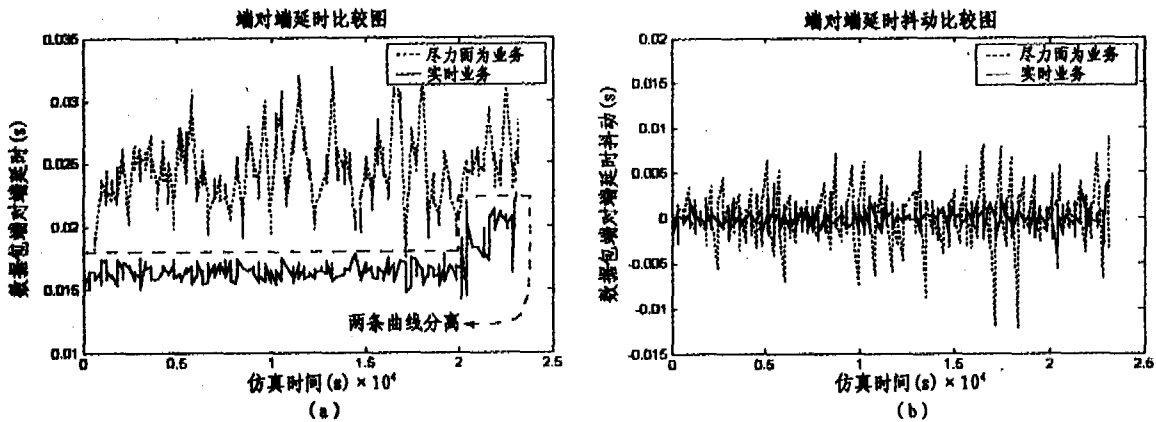


图 13 RT 与 BE 业务量之比为 1:2 时的端到端延时和延时抖动

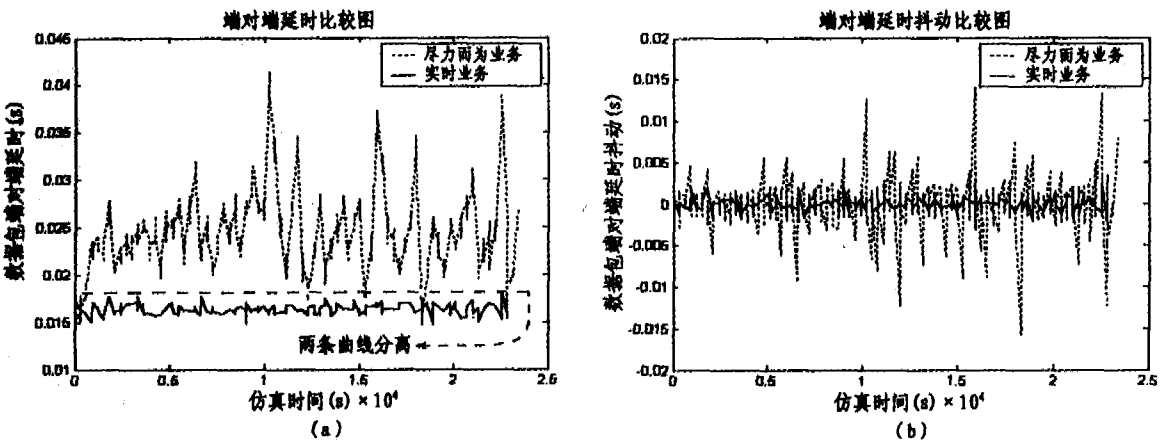


图 14 RT 与 BE 业务量之比为 1:3 时的端到端延时和延时抖动

结论与将来工作 本文在我们建立的基于 Directed Diffusion(DD)的无线传感器网络模型的基础上,提出一种针对实时业务传输的区分服务方案,称为轮询路径调度算法(Round Robin Path Scheduling, RRPS)。RRPS 综合考虑了路径的跳数以及瓶颈能量。当 RT 业务与 BE 业务共存时,为实时业务分配延时小的路径组,同时轮流切换该组中的路径,以达到局部负载均衡,从而延长网络的生存期;剩余的路径组为尽力而为业务提供服务,并以轮询的方式占用可利用的路径,从而达到能耗均衡。实验结果表明,RRPS 能支持传感网络中同时传输不同服务等级的业务,同时降低实时业务的端到端延时和延时抖动,并且使网络生存期得到提高。

本文的工作有待进一步深入,目前只为 RT 与 BE 两种服务等级业务提供区分服务,并未考虑为延时要求不同的多种 RT 业务流提供区分服务。

另外,本文考虑的场景目标区域和观测节点固定,如果观测节点移动或者目标区域位置改变,则多条路径互相交叉,路径的选择算法将更加复杂。

参考文献

- Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE MobiCom'00, Boston, MA, August 2000
- Silva S, Heidemann J, Govindan R, et al. Directed Diffusion: [Technical Report]. ISI-TR-2004-586, USC/Information Sci-

ences Institute, January, 2004. To appear in *Frontiers in Distributed Sensor Networks*, Iyengar S S and Brooks R R, ed

- Akkaya K, Younis M. A Survey of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks. in the Elsevier Ad Hoc Network Journal (to appear)
- Chong C Y, Kumar S. Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenge. *Proceedings of the IEEE*, 2003, 91(8):1247~1256
- Choi W, Shah P, Das S K. A Framework for Energy-Saving Data Gathering Using Two-Phase Clustering in Wireless Sensor Networks. *Proceedings of Mobile and Ubiquitous Systems (MobiQuitous); Networking and Services*, Boston, Aug. 2004
- Shah R, Rabaey J. Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks. *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Orlando, FL, March 2002
- Wu K, Gao Y, Li F, et al. Lightweight Deployment-Aware Scheduling for Wireless Sensor Networks. To appear in *ACM/Kluwer MONET Journal, Special Issue on Energy Constraints and Lifetime Performance in Wireless Sensor Networks*
- Sichitiu ML. Cross-Layer Scheduling for Power in Wireless Sensor Networks. *Proceedings INFOCOM'04*, Hong Kong, China, March 2004
- Hong Xiaoyan, Gerla M, Wang Hanbiao, et al. Load balanced, energy aware communications for Mars sensor networks. In: *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, vol. 3, 2002, 3. 3-1109-3-1115
- Huang Shih-Chang, Jan Rong-Hong. Energy-aware, load balanced routing schemes for sensor networks. In: *Proceedings of Tenth International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS 2004)*, 2004. 419~425
- Akkaya K, Younis M. Energy-aware routing of time-constrained traffic in wireless sensor networks. *International Journal of Communication Systems, Special Issue on Service Differentiation and QoS in Ad Hoc Networks*, 2004, 17(6):663~687
- He T, et al. SPEED: A stateless protocol for real-time communi-

- cation in sensor networks. *Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems*, Providence, RI, May 2003
- Blake S, Black D, Carlson M, et al. An architecture for differentiated services. RFC 2475, IETF, Dec. 1998
- Nichols K, Blake S, Baker F, et al. Definition of the differentiated services field (DS field) in the IPv4 and IPv6 headers. RFC 2474, IETF, Dec. 1998
- 陈敏. OPNET 网络仿真. 北京:清华大学出版社, 2004. 352

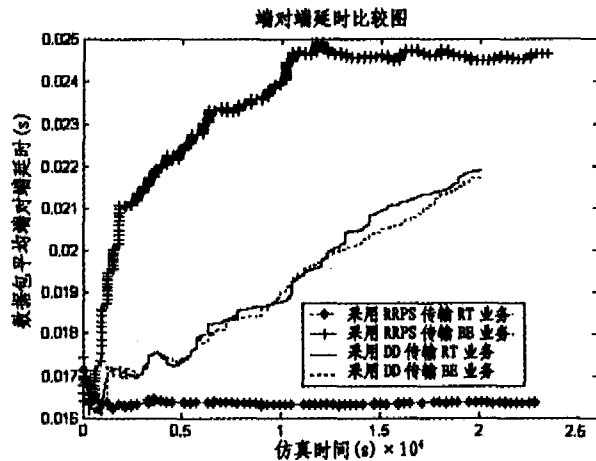


图 15 RT 与 BE 业务量之比为 1:3 时分别采用 RRPS 与 DD 机制的端对端延时比较

(上接第 16 页)

这个概念是非常重要的,因为操作语义只有被应用到有效的格局时才能产生有意义的结果。

引理 1 若 $\langle e, A \rangle \downarrow \langle e', A' \rangle$,
则 $\text{Context}(A') \vdash \text{Context}(A)$ 。

证明:对 $\langle e, A \rangle \downarrow \langle e', A' \rangle$ 的过程中可能用到的推理规则分情形进行归纳证明,即可得证。

该引理表明,一个格局 $\langle e, A \rangle$ 计值到另一个格局 $\langle e', A' \rangle$, 则第二个环境的类型上下文扩展了第一个环境的类型上下文。

定理 1 (主题归约定理)

若 $\text{Context}(A) \vdash e : t$, A 是有效的 (valid), 且 $\langle e, A \rangle \downarrow \langle e', A' \rangle$, 则 $\text{Context}(A') \vdash e' : t$, 且 A' 是有效的。

证明:对 $\langle e, A \rangle \downarrow \langle e', A' \rangle$ 的过程中可能用到的推理规则分情形进行归纳证明,对 OS_Appl 等情形还需要用到引理 1。

该定理表明,计值过程保持类型不变。也就是说,一个表达式的类型和它的规范形式(normal form)的类型是一样的。

结束语 通过前面对语义性质的描述及证明,我们已经看到,对此类论域,Plastic 系统可被直接用于形式化定义以及对性质的证明工作。事实上,我们已经完成了对语言 LAZY-PCF+SHAR 的所有感兴趣的语义性质的形式化的机器验证(感兴趣的读者可以发送 email 来索取证明代码)。由此可见,Plastic 适合直接处理这类问题。换句话说,对这类论域,我们不需要提供其它的界面。经过这个案例研究之后,我们更加确信 Plastic 在作为底层的定理证明器方面是足够强大的。后续的工作将围绕网络协议性质的形式化与计算机辅助推理的应用而展开,我们期待更加庞大的应用。

致谢 感谢英国伦敦大学罗朝晖(Prof. Zhaohui Luo)教授、英国杜伦大学保罗·卡拉汉博士(Dr. Paul Callaghan)的帮助和指导,感谢来自欧盟和杜伦大学的资助。

参考文献

- Seaman J, Iyer S P. An Operational Semantics of Sharing in Lazy Evaluation. *Journal of Computer Programming*, 1996, 27(3):289~322
- Abadi M, Cardelli L, Curien P-L, et al. Explicit Substitutions.

- Journal of Functional Programming. Preliminary version in POPL 1990, 1991, 1(4):375~416
- Field J. On laziness and optimality in lambda interpreters: Tools for specification and analysis. In: *Proceedings of the seventeenth symposium on Principles of Programming Languages*. San Francisco, 1990. 1~15
- Seaman J, Felty A. Proving Properties About a Lazy Functional Language with the Coq Proof Development System, 1993. <http://www.site.uottawa.ca/~afelty/bib.html>
- Luo Z. Computation and Reasoning: A Type Theory for Computer Science. Oxford University Press, 1994
- Callaghan P C, Luo Z. Plastic: an Implementation of Typed LF with Coercive Subtyping and Universes. *Journal of Automated Reasoning*, special issue on Logical Frameworks, 2000
- Paulson L-C. Isabelle: A Generic Theorem Prover. *Lecture Notes in Computer Science*, 1994, 828: xvii + 321
- Isabelle. Isabelle WWW Page. <http://www.cl.cam.ac.uk/Research/HVG/Isabelle>
- 陈火旺, 庞建民. 直觉主义逻辑、类型理论与软件形式化开发. *计算机科学*, 1988, 01
- Per Martin-Löf. Intuitionistic Type Theory. Napoli; Bibliopolis, 1984. Notes of Giovanni Sambin on a series of lectures given in Padova
- Nordström B, Petersson K, Smith J M. Programming in Martin-Löf's Type Theory. *International Series of Monographs on Computer Science*. New York, NY: Oxford University Press, 1990. 7
- Curry H B, Feys R. *Combinatory Logic*. North-Holland, 1958
- Howard W A. The Formulae-as-types Notion of Construction. Hindley J, Seldin J, Editors To H. B. Curry; *Essays on Combinatory Logic*. Academic Press, 1980
- Girard J-Y. *Interprétation fonctionnelle et élimination des coupures de l'arithmétique d'ordre supérieur*; [Ph D thesis]. Université Paris VII, 1972
- Harper R, Honsell F, Plotkin G. A Framework for Defining Logics. *Proc 2nd Ann Symp on Logic in Computer Science IEEE*, 1987
- Plotkin G D. A structural approach to operational semantics, [Tech Rep]. DAIMI FN-19. Computer Science Department, Aarhus University, Aarhus, Denmark, 1981
- Kahn G. Natural Semantics. In: *Proceedings of the Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science (STACS)*. Springer-Verlag, of Lecture Notes in Computer Science. 1987, 247:22~39
- Pang J, Callaghan P, Luo Zhaohui. LFTOP: An LF-based approach to domain-specific reasoning. *Journal of Computer Science and Technology*, 2005, 20(4):526~535
- 庞建民, 赵荣彩. Haskell 语言的列表内涵特性及其应用. *计算机工程与应用*, 2005, 41(4):99~101
- 庞建民, 赵荣彩, 王怀民. Haskell 语言的高阶特性及其应用. *计算机科学*, 2005, 32(6):167~168, 198
- 周建涛, 史美林, 叶新铭. 工程流过程建模中的形式化验证技术. *计算机研究与发展*, 2005, 42(1)
- Fu Yuxi. Semantics of constructions (I)-The traditional approach. *Journal of Computer Science and Technology*, 2001, 16(1):13~24