

1-15-2021

Application-aware Cross-layer Energy-efficient Routing Scheme

Xu Fang

1. Computer School, Wuhan University, Wuhan 430072, China; ;2. School of Computer and Information Science, Hubei Engineering University, Xiaogan 430000 China;

Hiyin Zhang

1. Computer School, Wuhan University, Wuhan 430072, China; ;

Wang Jing

1. Computer School, Wuhan University, Wuhan 430072, China; ;

Xu Ning

1. Computer School, Wuhan University, Wuhan 430072, China; ;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Application-aware Cross-layer Energy-efficient Routing Scheme

Abstract

Abstract: An application-aware cross-layer energy-efficient routing scheme (ACER) was presented to minimize the effect of supply of terminals in ad hoc network composed of smart mobile devices. *Features of energy consumption were sensed by application aware energy model with the application monitor and the remaining energy monitor. Stability of network path was monitored by link stability monitoring module in Data link layer. As the scheme used the idea of cross-layer design, network topology information, application-aware information in application layer and link-stability were utilized synthetically to make routing decisions in network layer;* Simulations were carried out on NS2 platform. The results show that, in the same simulation environment, comparing to other routing protocols, the routing scheme performs more effectively on enhancing energy efficiency, increasing the performance of the network.

Keywords

wireless ad hoc network, application-aware, energy-efficient, cross-layer, routing

Authors

Xu Fang, Hiyin Zhang, Wang Jing, Xu Ning, Zhijong Wang, and Deng Min

Recommended Citation

Xu Fang, Zhang Hiyin, Wang Jing, Xu Ning, Wang Zhijong, Deng Min. Application-aware Cross-layer Energy-efficient Routing Scheme[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(6): 1301-1307.

基于应用感知的跨层节能路由机制

徐方^{1,2}, 张沪寅¹, 王晶¹, 徐宁¹, 汪志勇¹, 邓敏²

(1. 武汉大学计算机学院, 武汉 430072; 2. 湖北工程学院计算机与信息科学学院 孝感 432000)

摘要: 针对由智能移动设备组成的无线自组网的能量受限问题, 提出了一种基于应用感知的跨层节能路由机制(ACER)。通过使用应用程序监测模块和剩余能量监测模块感知节点的能量消耗特征。数据链路层采用链路稳定性监测模块监测网络路径上链路的稳定性。提出的 ACER 路由机制采用跨层设计的思想, 综合利用网络层拓扑信息、应用层应用感知信息和链路稳定性信息进行路由决策。通过使用 NS 实验平台对提出的方案进行仿真并与相关的经典路由算法进行分析比较, 仿真结果表明所提出的路由方案能有效提高网络的能量使用效率和性能。

关键词: 无线自组网; 应用感知; 节能; 跨层; 路由

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 06-1301-08

DOI:10.16182/j.cnki.joss.2015.06.022

Application-aware Cross-layer Energy-efficient Routing Scheme

Xu Fang^{1,2}, Zhang Huyin¹, Wang Jing¹, Xu Ning¹, Wang Zhiyong¹, Deng Min²

(1. Computer School, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Computer and Information Science, Hubei Engineering University, Xiaogan 432000, China)

Abstract: An application-aware cross-layer energy-efficient routing scheme (ACER) was presented to minimize the effect of supply of terminals in ad hoc network composed of smart mobile devices. Features of energy consumption were sensed by application aware energy model with the application monitor and the remaining energy monitor. Stability of network path was monitored by link stability monitoring module in Data link layer. As the scheme used the idea of cross-layer design, network topology information, application-aware information in application layer and link-stability were utilized synthetically to make routing decisions in network layer. Simulations were carried out on NS2 platform. The results show that, in the same simulation environment, comparing to other routing protocols, the routing scheme performs more effectively on enhancing energy efficiency, increasing the performance of the network.

Keywords: wireless ad hoc network; application-aware; energy-efficient; cross-layer; routing

引言

过去十年里, 智能移动设备得到了迅猛的发展, 智能手机取代了简单功能的手机, 成为强大的

个人数字助理设备。人们随身携带这些智能移动设备, 有可能形成无线 ad hoc 网络, 为本地网络接入和数据传输提供一种廉价而灵活的解决方案。这种无线局域网可以单独工作或作为异构网络环境的一部分连接到互联网^[1]。目前的智能移动设备支持复杂的多媒体应用, 提供良好的用户体验和丰富的应用服务, 包括文件共享、在线游戏、自适应流媒体、在线金融服务和 GPS 导航等。这些设备通常具有高分辨率的互动屏幕、高性能的 CPU、无



收稿日期: 2014-07-14 修回日期: 2014-11-07;
基金项目: 国家自然科学基金(61272454); 高等学校
博士学科点专项科研基金(20130141110022); 湖北省
自然科学基金(2014CFB188); 湖北省教育厅科学研究
项目(Q20152703);

作者简介: 徐方(1981-), 男, 湖北洪湖人, 博士
生, 研究方向为移动通信网络、延迟容忍网络;
张沪寅(通信作者 1962-), 男, 江苏苏州人, 教授,
博士, 博导, 研究方向为网络 QoS、计算机网络、
新一代互联网体系结构。

<http://www.china-simulation.com>

• 1301 •

线网络和多媒体处理能力^[2]。在自组织网络的环境下,由智能移动设备构成的网络节点受能源约束的影响很大,人们希望能够随时随地使用设备和网络,但是由电池供电的智能移动设备往往运行时间有限。此外,智能移动设备上日益增长的复杂应用和无线通信给智能移动设备带来了越来越大的能量压力^[3]。当电池能量耗尽时,设备停止运行不再提供服务,进而导致网络分割的现象,使得网络的一部分不能和网络的另一部分进行正常通信^[4]。

节约能量是无线网络中一个重要的研究课题,研究人员提出了不少节能路由算法来减少网络的综合能量消耗^[5]。最初,研究者主要利用节点的剩余能量作为度量来进行路由开销计算。FAR^[6]路由算法综合考虑节点的初始能量、传输节点的剩余能量和每一次传输的开销来选择最高效的路径。最小电池成本路由(MBCR, Minimum Battery Cost Routing)^[7]计算每条路径沿线上节点的剩余能量的总和,在路由决策时以路径上总的剩余能量作为度量选择最佳路径。文献^[8]对 MBCR 路由算法进行了改进,它记录每条路由的跳数和总的能量消耗,避免具有最小能量的节点降低了每跳的平均剩余能量。

然而,使用节点剩余能量作为度量的路由机制不能在源节点和目的节点之间选择出最适合的路由,如果一个节点只是因为目前有足够的剩余电池容量而接受所有请求路由,则该节点将会承担较大的网络流量负载,这样会加快节点能量消耗的速率,导致电池能量的急剧下降,当节点电池能量耗尽时,节点很快停止工作。因此在路由决策中,利用能量消耗速率作为度量可以有效应对这一问题。最小能量流失率路由(MDR, The Minimum Drain Rate)^[9]引入节点能量消耗速率进行路由的度量。但是,在网络流量有细小变化时,MDR 所使用的方法不容易准确评估和计算。文献^[10]提出了一个具有跨层能量负载感知的框架(DELAR),它适用了 ad hoc 网络中节点的多样化特征,其路由开销度量考虑到了节点剩余能量和节点密度状态。文献^[11]

中提出了链路稳定性和能量感知的 ad hoc 网络路由算法(LAER)。该算法综合考虑两种路由度量:链接稳定性和能量消耗速率,并使用多目标整数线性规划优化模型,力求最小化移动节点的能量消耗和最大化链路传输的稳定性。文献^[12]提出了一种灵活的高能效的路由机制(E2),它平衡的利用了节点剩余能量和节点失效度。

上述路由方案有效降低了 ad hoc 网络路由过程中的能量消耗,它们主要考虑硬件上网络流量负载对能量消耗的影响。但是对于由新型智能移动设备组成的无线 ad hoc 网络,不仅要考虑以上问题,还需要关注智能移动设备的特点和能量约束,不同的应用(在线游戏,在线聊天,视频流)在不同的硬件组件上会产生不同的负载,使智能移动设备的生存时间存在差异。针对由智能移动设备组成的 ad hoc 网络环境,本文提出了一种应用感知的跨层节能路由机制(ACER, An application-aware cross-layer energy-efficient routing scheme)。该路由机制通过对网络中应用层的能量消耗特征的感知和链路的稳定性的度量,动态的优化路由选择策略,实现了网络性能和能量效率之间的平衡。

1 研究模型和背景

当前的各类智能移动设备基本上采用相似的硬件体系结构,并且常用的应用程序类型也基本类似。但是,不同类型的应用在节点硬件上产生的工作负载是不一样的,这样就导致了能量消耗的差异^[13]。每个硬件组件的能耗都有着相应的特征,如拨打电话和播放音乐等应用类型就表现出特有的能量消耗特征^[14]。此外,当前的移动软件分销商对应用程序建立的分类管理模式为网络应用层应用类型的识别提供了方便。本文提出的应用感知能量模型能够为每个应用类型的典型能量需求进行建模分析。

1.1 应用感知能量模型

目前的智能移动设备中,主要的耗能组件有图

形处理器(GPU)、处理器芯片(CPU)、屏幕(SCR)、蜂窝网络模块(CELL)和 WLAN 网络模块^[15]。不同的应用在这些组件上的能量消耗差异很大,模型中主要关注智能移动设备中的上述 5 类组件的耗能情况。下面给出了这些组件上能量消耗相关的效用函数。

$$U_{app} = \sum_{i=1}^n (W_{compi} \cdot U_{compi}) \quad (1)$$

$$W_{compi} = \frac{MaxE_{compi}}{\sum_{i=1}^n MaxE_{compi}} \quad (2)$$

$$U_{compi} = \frac{E_{compi}}{MaxE_{compi}} \quad (3)$$

公式(1)中, U_{app} 描述了应用对应能量约束的效用函数。节点的主要的硬件组件分别是图形处理器(GPU)、处理器芯片(CPU)、屏幕(SCR)、蜂窝网络的接口卡(CELL)和 WLAN 接口模块。 E_{compi} 表示应用程序第 i 个硬件组件的平均能量消耗, U_{compi} 表示第 i 个硬件组件上的应用能量约束对应的效用等级。每个耗能组件对节点总的能量消耗效用的影响可以用归一化权值进行衡量。公式(2)中, 说明了权值 W_{compi} 是每个组件的最大能量消耗值占系统的最大消耗量的比值, 其中 $MaxE_{compi}$ 表示组件 i 上的最大能耗。公式(3)描述了每个组件的效用函数 U_{compi} 的计算方法, 是该组件在某个应用阶段的能量消耗点该组件最大能量消耗的比值。

表 1 为组件效用表, 该表描述了某类应用在单个硬件组件上的能量消耗之间的关系。对于应用 j 来说, $U_{CPU}(j)$ 为组件 CPU 的能量消耗相关的效用函数值, 其计算方法见公式(3), $U_{GPU}(j)$ 、 $U_{CELL}(j)$ 、 $U_{WLAN}(j)$ 和 $U_{SCR}(j)$ 分别表示图形处理器(GPU)、蜂窝网络模块(CELL)、WLAN 网络模块和屏幕(SCR)的能量消耗速率。屏幕的能量消耗速率可以通过操作系统获取屏幕亮度参数来记录, 它高度依赖于环境的照度和用户的偏好。在节点中部署了本模型后, 它会将每个典型应用类型在各个组件上的实时效用值记录在表 1 中。因此节点能够识别相应的应用类型, 并且利用表中的效用值计算当前应用类型

能量约束的效用。

表 1 组件效用表

	U_{comp1}	U_{comp2}	U_{comp3}	U_{comp4}	U_{comp5}
App(j)	$U_{CPU}(j)$	$U_{GPU}(j)$	$U_{CELL}(j)$	$U_{WLAN}(j)$	$U_{SCR}(j)$

$$E_{scale} = \frac{E_{cons}}{E_{total}} \quad (4)$$

$$U_{bat} = C_b \cdot \frac{E_{scale}}{e^{1-E_{scale}}} \quad (5)$$

然而, 节点的开销不仅要考虑应用相关的开销, 还应考虑节点电池剩余能量的影响。公式(4)中, E_{cons} 表示在检测过程中取得的实时能耗值, E_{total} 表示总的电池容量。公式(5)定义了节点中能量水平的效用函数 U_{bat} , 它的取值范围是 0 到 1 之间。使用指数式表达, 表明当 U_{bat} 取值越小时, 节点上的剩余能量就越多, 节点的运行状态就越可靠。此外, 不同的类型的电池系统的电量的流失速率特征有较大的差别, 本文采用因子 C_b 表示电某类电池的电量流失特征, 可以补偿因不同电池系统之间的差异。一般对于不同的电池厂商, 因子 C_b 的值是不同的, 而同一厂商的同类电池的 C_b 的值是相同的。

$$C_{node} = W_{app} \cdot U_{app} + W_{bat} \cdot U_{bat} \quad (6)$$

$$W_{app} + W_{bat} = 1$$

节点的开销 C_{node} 由节点中应用的开销和节点中剩余能量的开销组成, 如公式(6)中, 通过使用归一化的权重 W_{app} 和 W_{bat} 来协调上述两个因素对节点总开销的贡献。

1.2 链路稳定性度量

链路的稳定性对网络中数据传输的影响很大, 不稳定的链路会导致消息的多次重传, 增大网络的开销和时延, 本文利用节点接收到的信息强度信息来分析链路的稳定性。假设链路是双向对称的, 每个节点使用固定的发射功率。节点发送功率 P_t 与接收功率 P_r 服从 δ 次方路径损耗, 如下公式(7)所示。

$$P_r = cP_t d^{-\delta} \quad (7)$$

其中 c 为常数, d 为发送节点与接收节点之间的欧

拉距离。 θ 具体取值取决于节点所使用的无线传播模型^[16], 自由模型 θ 取值为 2, 双线模型时 θ 取值为 4。

设 λ 为节点成功接收到数据包的最小信号强度值(阈值), 即只有当接收到的信号强度 $P_r \geq \lambda$ 时, 才能保证数据包的成功接收, 如公式(8)所示。

$$P_r \geq \lambda \quad (8)$$

在公式(9)中, C_{link} 是网络中链路稳定性的效用函数, 其取值范围在 0 到 1 之间。此处假设网络中的所有节点在传输数据时使用固定的发射功率。由公式(9)可以看出成功接收数据的信息强度(P_r)的值越大, C_{link} 的值越小, 链路上的数据传输就越是稳定可靠。

$$C_{link} = \frac{\lambda}{P_r} \quad (9)$$

2 ACER 路由方案

2.1 路由协议的跨层设计

ACER 路由协议是一个基于应用感知的跨层路由协议, 网络层能共享应用层和数据链路层中的有效信息, 然后综合利用这些信息来优化路由决策。图 1 详细描述了 ACER 在网络的各层协议实现信息共享的过程, 说明了网络各层如何交换信息来实现应用感知的高能效路由协议, 以及进行无线的数据传输的过程。图中加灰色背景的组件是重点强调部分, 也是本文的创新之处, 下面将对这些部分进行详细的介绍。应用层使用应用监测(AM)、剩余能量监控(REM)和能量约束计算模块(ECCM) 3 个组件来收集和處理应用相关的信息。应用监测组件持续监测当前运行的应用类型和网络负载, 剩余能量监控组件监测节点剩余能量的情况, 而能量约束计算模块包含 1 个维持应用相关信息和对应能量消耗的能量模型, 它通过应用监测组件和剩余能量监控组件获取应用和能耗相关的信息, 然后将这些信息提供给能量模型来计算 1 个度量值, 这个度量值可以反映出应用层能效的情况。

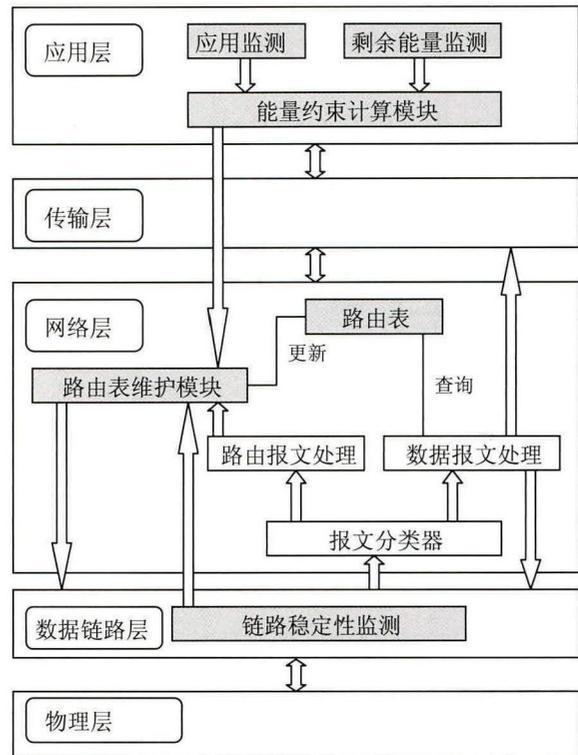


图 1 路由的体系结构

数据链路层部署的链路稳定性监测处理模块能够分析接收到的无线信号强度, 并利用相应的效用函数计算信号强度的效用值。在网络路由的选择中, 节点接收到的无线信号强度也是本路由算法考虑的一个重要因素。因为不稳定的或者是较差的信息强度会导致节点收不到数据或者收到错误数据, 那么, 此时接收节点会频繁发出数据重传请求, 因而会导致路由协议性能的下降。

网络层的路由表维护模块(RTMM)接收应用层能量感知信息和数据链路层信号强度信息, 并根据这些信息进行路由决策。路由表维护模块中设置有一个计时器来定时从应用层获取信息。每当计时器超时, 路由表维护模块从能量约束计算模块中获取当前节点应用相关的能量开销(度量值)和数据链路层中链路稳定性监测处理模块计算出的效用值。同时, 计时器重新开始计时。路由表维护模块根据刚才获得的数据信息计算出的每条路径的开销更新路由表。当计时器超时后, 路由表维护模块还会检查整个路由表并删除超时路由。

为了区分数据报文和路由控制报文, 所有进入

网络层的报文都要通过报文分类模块(PCM)进行分类。报文分类模块将数据报文交给数据报文处理模块(DDPM), 而把路由控制报文转发给路由报文处理模块(RPPM)。数据报文处理模块提取每个数据包中的目的地址并在路由表中进行查找, 如果目的地址是当前节点的地址, 则将数据传给上层协议做本地进一步的处理; 否则, 如果路由表中有相应的目的地址的路由, 则将数据包转发给下一跳。路由报文处理模块将路由控制报文转交给路由表维护模块, 如果路由控制报文中包含了更新的路由信息, 路由表维护模块将该信息加入路由表。在向邻居节点发送路由控制报文之前, 路由表维护模块将当前节点的能量约束加入控制报文的路由开销字段。

2.2 ACER 路由机制

ACER 路由方案是在 AODV^[17]路由协议的基础上加入能量感知和跨层信息共享的方法改进而成。下面重点介绍所提出的基于应用感知的跨层高效路由算法(ACER)的路由机制。说明该算法如何利用应用感知能量模型计算出的节点效用值和链路信号强度效用值进行路由决策, 具体的路由细节可参考文献[17]。

假设在无线网络中的每个节点上部署了上面所提出的应用感知能量模型, 并且能够按照公式(6)计算效用函数。公式(10)描述了计算一个路径上总的开销 C_{route} 的计算方法, 路由的度量是累加一条路径沿线上的每个节点的开销和链路信号强度效用值。ACER 选择具有最小开销的路径并将其存储在路由表中。因为计算工作是在本地执行, 而在是在网络中传输最终的路由开销值, 所以 ACER 能有效的降低网络流量开销。

$$C_{route} = \sum_{i=0}^n (W_{node} C_{node} + W_{link} C_{link}) \quad (10)$$

$$W_{node} + W_{link} = 1$$

路由请求的帧格式如图 2, 路由请求报文包含源节点序列号、目的节点序列号、广播 ID 以及节点的开销(C_{node})和链路的开销(C_{link}), 路由请求报文中主要携带以下信息字段如图 2 所示, C_{node} 和 C_{link}

的取值由公式(6)和公式(9)计算得出。

源节点序列号	目的节点序列号	广播 ID	C_{node}	C_{link}
--------	---------	-------	------------	------------

图 2 路由帧格式

ACER 的路由机制是综合应用了按需路由方法和距离矢量机制, 在 AODV 路由协议的基础上加入应用感知方法, 以跨层信息共享的方式提高网络中能量的使用效率。ACER 路由算法主要在以下 2 个方面进行了改进:

(1) ACER 应用跨层设计的思想, 使得网络层可以利用应用层和数据链路层的信息优化路由决策, 如图 1 所示。ACER 对路由度量值的计算不仅考虑了网络层拓扑结构的变化, 而且利用了应用层和数据链路层的相关信息。

(2) 优化 AODV 路由机制。在 AODV 中, 源节点和目的节点一旦建立了路由, 就不会允许源节点进一步请求从源节点到目的节点的不同路由, 除非出现路由断裂的情况。而 ACER 引入多重路由请求机制, 如果获得的新路由比路由表中的路由有较低的开销, 则会启用新的路由。这种路由机制包含了 1 种主动的周期性的请求更新方法, 它促使源节点周期性的发送路由请求包到目的节点。

3 实验仿真与结果分析

在实验仿真中, 本文采用 NS2 网络仿真平台, 对提出的 ACER 算法的能源效率和性能进行评估, 并在同样的网络参数环境中, 与 AODV 和 LAER 路由算法进行了对比分析。在长 400 m、宽 250 m 的网络范围内随机分布 240 个节点, 移动模型采用双径传播模型。为了简化实验, 我们把 240 个节点分为 3 类, 根据它们所运行的应用类型不同分别为: 80 个空闲节点(class A)、80 个游戏节点(class B)和 80 个 3G 视频流媒体节点(class C)。随机选择四对的源节点和目的节点, 传数据包大小为 200 bit 的恒定比特率数据流(CBR), 传输速率为 1 Mbps, 所有节点都是随机移动的。每次模拟实验的持续时

间为 160 s，每次实验重复 10 次。在每次实验中记录 A, B, C 类节点的平均能量消耗、四对源节点到目的节点平均端到端的延时和平均吞吐量。设定空闲节点的功率为 150 mw，游戏节点的功率为 350 mw，3G 视频流媒体节点的功率为 550 mw。此外，接入 WiFi/WLAN 的功率为 400 mw。每个节点的初始能量为 200 J。

图 3~5 分别描述了 A, B 和 C 三类节点的平均能量消耗情况，ACER 方案能为每一类节点节约能量。ACER 方案对 A 类节点的节能效果最为明显，这是因为对于 A 类空闲节点来说，节点能量使用率低、剩余能量多，为引入应用感知和跨层机制的 ACER 协议提供了更多的节能的空间。与 AODV 协议为基准进行比较，采用了 ACER 方案的 A 类节点大约节点 17%，B 类节点大约节点 10%，而 C 类节点大约节点 6% 的能量。

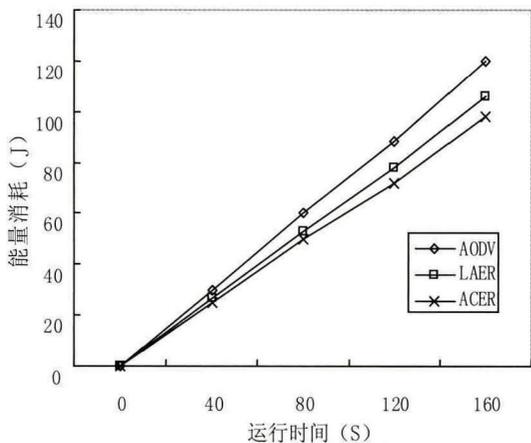


图 3 A 类节点的平均能量消耗

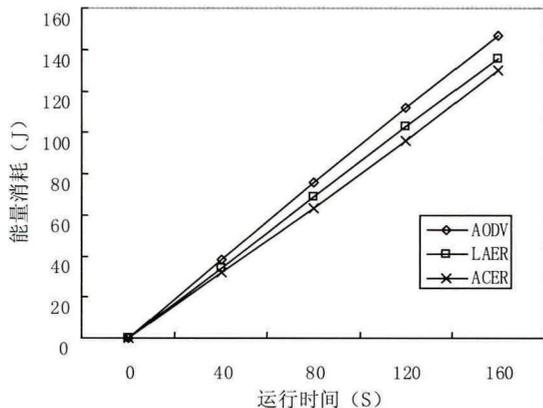


图 4 B 类节点的平均能量消耗

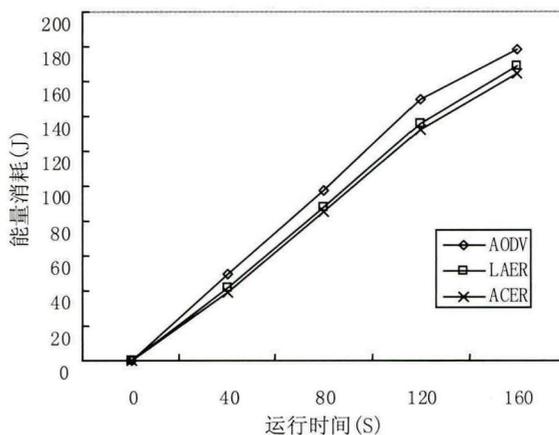


图 5 C 类节点的平均能量消耗

图 6 描述了网络分别使用 3 种协议时，数据接收节点的平均吞吐量。由于 AODV 路由没有考虑能量相关的因素，更容易因网络节点能量耗尽而出现路由断裂和网络拥塞情况，从而影响平均吞吐量，从图 6 中可以看到 3 种路由机制中 AODV 的平均吞吐量表现最差。LAER 应用了能量感知方法并且考虑了路由路径上的链路稳定性，能够更好的平衡网络中的能量消耗，保障网络路径的稳定性，其平均吞吐量要好于 AODV 路由机制。ACER 路由机制不仅考虑了路由路径上的链路稳定性，而且考虑了网络节点的特征和节点上运行的应用程序对节点能耗的影响，能够为不同网络节点节约能量，更好的平衡网络能量效率，在平均吞吐量方面表现最优。

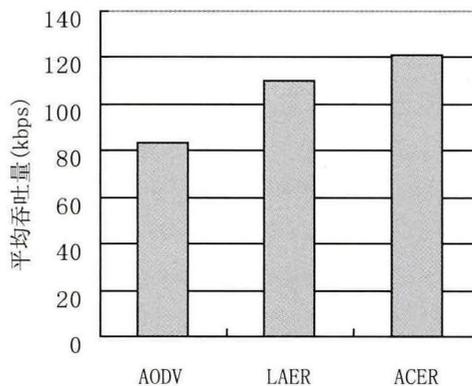


图 6 平均吞吐量

图 7 表明了各路由机制进行数据传输时平均端到端的时延情况，由于 AODV 协议只考虑了最

短路径, 所以平均端到端的时延最小。ACER 采用了跨层信息共享的机制, 能够综合利用应用层、网络层和数据链路层的信息, 从整个网络层面来协调路由的决策过程, 因此 ACER 路由机制在平均端到端的时延方面要优于 LAER 路由方案。

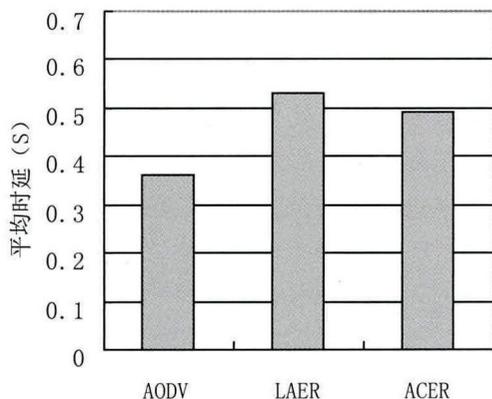


图 7 平均端到端的时延

4 结论

随着智能移动设备的快速发展, 由智能移动设备组成的 ad hoc 网络为本地网络服务提供了一种廉价的解决方案。智能移动设备不同于传统的 ad hoc 终端, 它支持丰富的网络富媒体应用。不同的应用对终端的能量效率的影响也各不相同, 如果不对这一因素加以考虑, 会导致某些节点的过度使用, 使其有限的能量过快耗尽, 出现路由断裂和网络分割的现象。此外, 链路稳定性也是路由选择的一个重要因素, 节点接收到的信号的强度不够, 会出现数据包的多次重传, 增加网络拥塞, 导致数据传输率的下降。本文提出的基于应用感知的跨层节能路由方案, 在降低网络能量消耗, 增加数据传输的吞吐量和减少网络延时方面有一定优势, 同时对网络的负载均衡有着积极的影响。

参考文献:

[1] Collins K, Mangold S, Muntean G. Supporting mobile devices with wireless LAN/MAN in large controlled environments [J]. *IEEE Communications Magazine* (S0163-6804), 2010, 48(12): 36-43.
[2] Collins K, Mangold S, Muntean G M. Supporting Mobile Devices with Wireless LAN/MAN in Large

Controlled Environments [J]. *IEEE Communications Magazine* (S0163-6804), 2010, 48(36): 36-43.
[3] Paul K, Guinevere S, Jacob Z, *et al.* Energy savings from using mobile smart technologies [J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* (S1941-7012), 2013, 5(3): 53-61.
[4] Machado K, Denis R, Cerqueira E, *et al.* A routing protocol based on energy and link quality for internet of things applications [J]. *Sensors* (S1424-8220), 2013, 13(2): 1942-1964.
[5] M Conti, S Giordano. Mobile ad hoc networking: milestones, challenges, and new research directions [J]. *IEEE Communications Magazine* (S0163-6804), 2014, 52(16): 85-96.
[6] Chang J H, Tassiulas L. Energy Conserving Routing in Wireless Ad-hoc Networks [C]// *IEEE Computer and Communications Societies. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. USA: IEEE, 2000, 1: 22-31.*
[7] Toh C K. Maximum Battery Life Routing to Support Ubiquitous Mobile Computing in Wireless Ad hoc Networks [J]. *IEEE Communications Magazine* (S0163-6804), 2001, 39(6): 138-147.
[8] Arezoomand A S, Pourmina M. Prolonging Network Operation Lifetime with New Maximum Battery Capacity Routing in Wireless Mesh Network [C]// *2nd Int Computer and Automation Engineering (ICCAE) Conf. Singapore: IEEE, 2010, 4: 319-323.*
[9] Kim D, Garcia-Luna-Aceves J J, Obraczka K, *et al.* Power-aware routing based on the energy drain rate for mobile ad hoc networks [C]// *IEEE Eleventh International Conference on Computer Communications and Networks, Florida, USA, 2002. USA: IEEE, 2002: 565-569.*
[10] Liu W, Zhang C. DELAR: A device energy load aware relaying framework for heterogeneous mobile ad hoc networks [J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* (S0733-8716), 2011, 29(8): 1572-1584.
[11] De Rango F, Guerriero F, *et al.* Link stability and energy aware routing protocol in distributed wireless networks [J]. *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.* (S1045-9219), 2012, 23(4): 713-726.
[12] Ramrekha T A, Talooki V N, Rodriguez, *et al.* Energy efficient and scalable routing protocol for extreme emergency ad hoc communications [J]. *Mobile Networks and Applications* (S1383-469X), 2012, 17(2): 312-324.

(下转第 1315 页)

<http://www.china-simulation.com>

- dual polarization radar scattering matrix of rain backscatterer measurements in the X and Q band [C]// Proc. of ICAP-97. New York, USA: Springer, 1997: 223-229.
- [3] Giuli D, Fossi M. Radar target scattering matrix measurement through orthogonal signals [J]. IEE Proc.-F (S978-3-642), 1993, 140(4): 233-242.
- [4] R D Scott, P R Krehbiel, W Rison. The Use of Simultaneous Horizontal and Vertical Transmissions for Dual-Polarization Radar Meteorological Observations [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology (S57863328), 2001, 18(4): 629-648.
- [5] 刘克成, 天线原理 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1989.
- [6] 罗佳, 王雪松, 鲍亮. 实测天线的空域瞬态极化特性 [J]. 电波科学学报, 2007, 22(S): 373-376.
- [7] 罗佳, 王雪松, 等. 天线空域极化特性的表征及分析 [J]. 电波科学学报. 2007, 22(9): 373-376.
- [8] Luo Jia, Wang Xuesong, Spacial Polarization Characteristics of Antenna [C]// APSAR-2007, Huangshan, Anhui, China. New York, USA: Springer, 2007, 11: 139-144.
- [9] 罗佳, 王雪松, 李永祯, 等. 雷达目标极化散射矩阵测量的新方法研究 [J]. 信号处理, 2009, 25(6): 868-873
- [10] 施龙飞. 雷达极化抗干扰技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.
- [11] 王雪松, 王涛, 李永祯, 等. 雷达目标极化散射矩阵的瞬时测量方法 [J]. 电子学报, 2006, 34(6): 1020-1025.
- [12] 庄钊文, 肖顺平, 王雪松. 雷达极化信息处理及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [13] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

(上接第 1307 页)

- [13] 徐方, 查文亮. 具有上下文认知的高能效多径路由算法研究 [J]. 微电子学与计算机, 2014, 31(5): 121-129. (Fang Xu, Wen-liang Zha. An Energy-efficient Multi-path Algorithm with Context-aware [J]. Microelectronics and Computer, 2014, 31(5): 121-129.)
- [14] Carroll A, Heiser G. An analysis of power consumption in a smartphone [C]// Proceedings of the 2010 USENIX Conference on USENIX Annual Technical Conference. Washington, USA: USENIX, 2010: 21-21.
- [15] G Perrucci, F Fitzek, J Widmer. Survey on energy consumption entities on the smartphone platform [C]// IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Yokohama, Japan. USA: IEEE, 2011: 1-6.
- [16] 黄浩军. 无线Ad Hoc网络中能量优化的路由协议研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012: 46-48. (Haojun Huang. Research on Energy-optimized Routing Protocols in Wireless Ad Hoc Networks [D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology, 2012: 46-48.)
- [17] Perkins C, Belding-Royer E, Das S. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing RFC 3561, Internet Engineering Task Force, 2003. [EB/OL]. (2003-07-09) [2014-07-02]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>