

基于 MAC/PHY 的无线网络能量感知资源分配算法

肖振球¹, 曾文华²

(1. 嘉应学院 计算机学院, 梅州 514015; 2. 厦门大学 软件学院, 厦门 361005)



摘要:针对无线网络服务能耗较高的问题,提出了一种基于机会主义的能量感知调度方案(OEARS)。首先,该方法将资源分配过程中的能耗和其他自然因素同时考虑,采用一种称为 MAC/PHY 机会主义方法对系统吞吐量进行优化;然后,利用唤醒-休眠模式和信道条件进行实现能耗最小化,并利用物理层信息提高系统容量,最大化能量效率。仿真实验结果表明,在保持接近的系统性能的前提下,OEARS 的能耗低于现有的其他调度方案。

关键词:无线网络;机会主义;能量感知;资源分配

中图分类号: TP18

文献标识码: A

Energy-aware Resource Allocating Mechanism Based on MAC/PHY for Wireless Network

XIAO Zhen-qiu¹, ZENG Wen-hua²

(1. Computer Academy, Jiaying University, Meizhou 514015, China; 2. College of Software, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Aimed at the problem of high energy consumption of wireless network service, an energy-aware resource scheduling scheme-OEARS based on the opportunism is proposed. Firstly, this method considers the energy consumption and other natural factors in the process of resource allocation. An opportunistic approach called MAC/PHY is used to optimize the system throughput. Then, the energy consumption is minimized by using the wake-sleep mode and the channel condition, and the physical layer information is used to improve the system capacity and maximize the energy efficiency. The simulation results show that the energy consumption of OEARS is lower than that of other existing scheduling schemes on the premise of keeping the close system performance.

Key words: Wireless network; opportunism; energy-aware; resource allocation

1 引言

无线网络已经成为社会发展的关键因素,并已经成为文明城市的基本准则。和有线通信相反,无线传输受许多信道破坏的影响,如路径丢失、遮蔽、多路径衰减等^[1]。这些现象严重影响着传输容量和能耗。在无线网络的资源调度中,传统的方法如轮叫调度(RR)^[2]和随机访问(RA)不能达到最佳目的,反而降低了吞吐量。过去十年见证了无线数字通信的丰富研究成果。在所有的资源分配方法中,机会主义调度已经出现在相关文献中。机会主义调度的思想是将资源优先分配为拥有最佳信道条件的用户。利用时间和多用户及频率多样性的优点,能够最大化系统吞吐量。

目前全世界增长的人口和增长的能量需求带

来了诸多关键问题,因此降低能耗已经成为无线网络和资源分配过程中的必要问题。目前有少量针对该问题的研究:本文提出了一种称为机会主义能量感知调度的新解决方案—OEARS。它从根本上改变了传统的机会主义无线资源分配原则。该方案建立在一个拓展的跨层方法上,主要原则是利用活跃-休眠模式和信道条件进行能耗最小化,利用物理层信息如时间、频率和多用户多样性等实现高系统容量。同时利用高层信息实现 QoS 需求,如比特误码率。在 MAC 层利用用户缓存占用和设备功率消耗信息来压缩传输时间以实现降低能耗。在每个调度事件中,OEARS 决定了最佳传输机会和寻找最佳传输映射。在分配过程中最大化休眠时间同时考虑

收稿日期: 2015-10-15; 修回日期: 2015-12-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41172028); 广东省教育部科技部中国科学院产学研结合项目(2012B090600027)

作者简介: 肖振球(1980-),男,广东梅州人,硕士,讲师,主要从事计算机应用等方面的教学与科研工作;曾文华(1964-),男,江苏兴化人,博士,教授,主要从事智能控制等方面的教学与科研工作。

信道质量, OEARs 相对于前面方案实现了更高的无线资源利用率, 达到了高频谱效率, 较大程度地降低了能耗。

本文余下部分组织如下:

第 2 节介绍相关工作, 第 3 节提供了系统模型; 第 4 节描述了本文所提方案; 第 5 节给出了具体的仿真实验与结果分析; 第 6 节给出结论。

2 相关工作

MaxSNR (最大化信噪比调度)^[3-4]每次调度先给定拥有最大信噪比 (SNR) 的用户优先权, MaxSNR 采用动态的调制和编码方式。利用多用户和频率多样性, 可以完全利用无线资源并接近香农极限。MaxSNR 较大程度地增加了系统吞吐量, 但没考虑服务的多样性, 对不同地点和不同通信类型的用户有失公平^[5]。许多研究工作已经实现以解决这些问题, 如加入机会主义调度的权重公平机会主义调度 WFO^[6]。该调度方案拓展了传统的跨层方案考虑物理层特性 (传输条件) 和更高层约束 (通信模式、服务质量约束、比特误码率)。这是一种高效的调度方案, 保证了多媒体网络的高服务区别性。WFO 与 MaxSNR 相比提供了相同的频谱效应和更高的公平性, WFO 带宽管理实现大量无线网络用户条件下的高体验质量 (QoE)。

机会主义在无线网络中应用较为广泛, 赵传强等人^[7]提出的面向吞吐量效率的无线 Mesh 网络机会主义路由算法 EAT, 研究了机会主义路由算法中转发节点数量与质量的制约关系, 并通过分析多转发节点的转发特性, 提出一种新的路径度量及相应的转发节点选择与排序算法。

本文提出了一种称为机会主义能量感知调度的新解决方案-OEARs。它从根本上改变了传统的机会主义无线资源分配原则。该方案建立在一个拓展的跨层方法上, 主要原则是利用活跃-休眠模式和信道条件进行能耗最小化, 利用物理层信息如时间、频率和多用户多样性等实现高系统容量。同时利用高层信息实现 QoS 需求, 如比特误码率。在 MAC 层利用用户缓存占用和设备功率消耗信息来压缩传输时间以实现降低能耗。在每个调度事件中, OEARs 决定了最佳传输机会和寻找最佳传输映射。在分配过程中最大化休眠时间同时考虑信道质量, OEARs 相对于前面方案实现了更高的无线资源利用率, 达到了高频谱效率, 较大程度地降低了能耗。

3 系统模型

本文考虑了一种集中和同步的方法^[8], 聚焦于

一个接入点覆盖区域内用户的无线资源分配问题, 主要研究多输入和多输出 (MIMO)。OFDM^[9]技术在频谱效率方面优于其他策略, 保证了紧缺带宽的高效利用, 将可用总带宽分为分谐波带, 即副载波。无线资源在时间域内进一步划分, 每个帧将自己划分为约束区域内的时间段。时间段 (TS) 是 OFDM 符号持续时间的整数倍。副载波的个数需满足每个子频率带的带宽小于信道的一致带宽。此外需将帧周期固定为一个小于信道一致时间的值。但是, 在不同的副载波上进行的传输假设拥有独立的信道状态值^[10]。本文将基本资源单元 (RU) 定义为一组 (副载波, TS)。每个资源单元 RU 可能分配给任何拥有特定调制顺序的用户。在每个 RU 中, 调制方案是 QAM, 调制顺序是根据接入点和用户之间的信道状态分配的。这对于机会主义调度提供了灵活的资源调度框架。传统横向和纵向的资源单元机会主义管理, 如图 1 和图 2 所示。

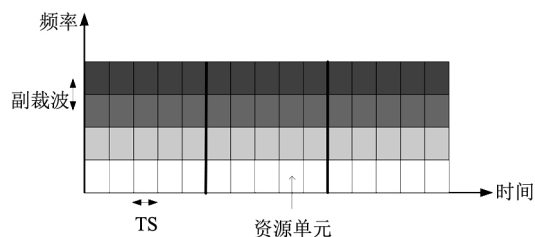


图 1 传统横向的资源单元机会主义管理
Fig. 1 Traditional transverse resource unit opportunism management

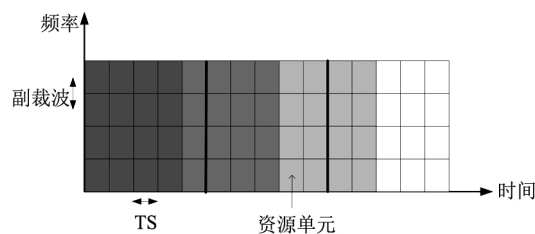


图 2 纵向的机会主义能量感知资源单元管理
Fig. 2 Longitudinal opportunism energy resource unit perception management

4 基于机会主义能量感知的调度方案-OEARs

OEARs 调度模块位于接入点中, 将一个 RU 到每个用户评价为一个函数: 服务质量、不同能耗模式 (活跃模式和休眠模式)、通信储备、信道状态。服务质量是在连接确立阶段测量的, 信道状态可在接收端获取^[11], 它是通过接入点基于测量阶段每个用户发送信号的 SNR 评估得到。假设信道状态在 50 ms 内是稳定的^[12], 设定帧持续时间为 2 ms, 用户应该选择性的在副载波上传输它们的控制信息,

这样接入节点会每 25 个帧刷新信道状态信息。

OEARS 方案依赖于设定给分配无线资源优先权的权重, 设立这些权重是为了满足两种主要目标: 系统吞吐量最大化和能耗最小化。

4.1 系统吞吐量最大化

在无线通信系统中, 资源是限制的。商业蜂窝系统的频率是最常获得的, 尽管费用通常非常昂贵和紧缺。此外无线通信系统的设施和设备同样非常昂贵。因此系统设计和优化的主要问题是充分利用无线通信系统限制的频率和硬件资源, 保证服务质量的同时提供最高的可能容量。为了实现该目标, 资源管理是非常重要的。

OEARS 方案采用一种称为 MAC/PHY^[12]的机会主义方法来优化系统吞吐量。用户的数据完整性需求强制每个用户独立地采用调制器和到达用户特定信道状态的传输功率。

在每个调度时期, 调度器计算 $m_{k,n}$, 它是副载波 n 在一个 TS 内分配到用户 k 中所有 k 和所有 n 中最大比特位数, 该值主要由 2 种因素限制: 数据完整性需求和支持的调制器顺序。

比特错误概率上界将由信号错误概率限制^[13]。TS 区间假设与一个 OFDM 信号的区间 T_s 相等。在一个 RU 中传输 q 比特同时保证低于用户 k 的数据完整性需求 $BER_{target,k}$ 需要的接收功率 $P_r(q,k)$ 是调制器类型、顺序和噪声 N_0 的单面功率频谱密度的函数。

对于一个平衰落信道^[14]之上 QAM 和一个调制器顺序 M :

$$P_r(q,k) = \frac{2N_0}{3T_s} \left[\operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{BER_{target,k}}{2} \right) \right]^2 (M-1) \quad (1)$$

式中, $M = 2^q$; erfc 为互补性错误功能。

$P_r(q,k)$ 在实际中可能基于 BER 历史决定的, 并根据经历的 BER 上搜集到的信息进行更新。

副载波 n 上用户 k 的传输功率 $P_{k,n}$ 的上界值为 P_{max} , 它遵从传输功率频谱密度规律:

$$P_{k,n} \leq P_{max} \quad (2)$$

设信道增益在副载波 n 上的用户 k 经历的信道增益为 $a_{k,n}$ (包括路径丢失和瑞利衰落), 则:

$$P_r(q,k) \leq a_{k,n} P_{max} \quad (3)$$

因此在副载波 n 上的一个 TS 内用户 k 传输的最大比特数 $q_{k,n}$ 保持低于 BER 目标应满足:

$$q_{k,n} \leq \left\lfloor \log_2 \left(1 + \frac{3P_{max} \times T_s \times a_{k,n}}{2N_0 \left[\operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{BER_{target,k}}{2} \right) \right]^2} \right) \right\rfloor \quad (4)$$

进一步假设方案所支持的 QAM 调制器顺序 q 限制如下: $q \in \{0, 2, 4, \dots, q_{max}\}$ 。因此如果 RU 分配到服务流 k 时, 副载波 n 在一个 TS 上将传输的最大比特数 $m_{k,n}$ 满足:

$$m_{k,n} = \max \{ q \in S, q \leq q_{k,n} \} \quad (5)$$

MaxSNR 方案分配 RU 到拥有最大 $m_{k,n}$ 值的服务流。该带宽分配策略最大化带宽使用效率, 但是能耗管理并不高效。为了提供最小化的能耗同时保证系统吞吐量最大化, 将引进一个新的参数, 它将改进这种纯粹的机会主义资源分配。

4.2 能耗最小化

OEARS 方案的第二个主要目标是提供高效能量管理的同时保证系统吞吐量最优化。现有的机会主义资源分配方案如 MaxSNR 或 WFO 基本上相同。由于一个帧期间的平衰落, 通常每个 TS 内, 相同用户会完全经历一个副载波的的最好信道条件。因此根据传统的机会主义调度方案, 相同用户通常接收到一个副载波的所有 TS, 并且需要保持活跃模式一段时间。注意到每个可用副载波上可能潜在在一个不同的用户, 因此在所有 TS 期间, 许多选择的用户不能设置为休眠模式, 它们长时间内消耗了许多能耗 (分配了许多 TS 但是副载波很少) 以传输很少的比特。因此本文将机会主义调度作为管理无线资源、最大化系统容量的理想方案。

OEARS 方案的目标是在休眠模式期间彻底最小化能耗。为实现该目标, OEARS 方案拓展了传统的机会主义跨层设计来获取一种新的纵向机会主义资源分配方案。当一个用户为活跃模式时, OEARS 方案尝试从活跃期获利以压缩活跃时间, 并在使用的 TS 期间传输更多的比特。OEARS 可以明显地增加休眠模式持续时间和可用能耗持续时间。OEARS 方案计算了一种“能耗传输花费” (EYC_k) 参数 (单位: W)。它是基于用户 k 在一个 RU 上传输的能耗计算得到:

$$ETC_k = A_k * Cn_k + (1 - A_k) * Cl_k \quad (6)$$

当用户 k 是活跃模式时, $A_k = 1$, 否则 $A_k = 0$ (即休眠模式)。此外 Cn_k 和 Cl_k 时两种常量 (单位为瓦特)。 Cl_k 表示用来将用户 k 从休眠模式唤醒为活跃模式并在第一个分配的副载波上传输所需要的能

耗， Cn_k 表示在第 n 个分配的副载波上传输的能耗（用户已经唤醒）。可知 $Cn_k < Cl_k$ ，因为传输一些比特的开销小于用来唤醒的能耗。

OEARS 方案的准则是在一个 TS 内分配副载波 n 到拥有最大比特传输概率（ $BTP_{k,n}$ ）的用户 k 。

$$BTP_{k,n} = \frac{m_{k,n}}{ETC_k} \quad (7)$$

该动态优先权明显降低了能耗同时最优化全系统吞吐量。OEARS 方案寻找能提供传输最大比特数和最小能耗两种目标折中的用户。

通过参数 $BTP_{k,n}$ 将更高的优先权分配给已经唤醒的用户和能够传输最大比特数的用户。因为 $Cn_k \ll Cl_k$ ，继续分配副载波到一个相同用户比选择一个新用户对于能耗更有利，压缩了用户活跃模式时间，最小化休眠持续时间并有助于降低能耗。

5 仿真实验与结果分析

5.1 仿真实验设置

本文使用 OPNET 离散事件仿真器^[15]进行性能评估。对比方案选用 RR 和 WFO。在仿真实验中，具体参数设置，见表 1。

表 1 实验参数设置
Tab. 1 Experimental parameter setting

参数	值
n_{sub}	16
n_{ts}	50
Cl_k	157 mW
Cn_k	46.8 mW
BER 目标	10^{-3}
VBR	150 Kbps

5.2 无线资源管理性能

资源调度中 3 种方案的性能，如图 3~5 所示。

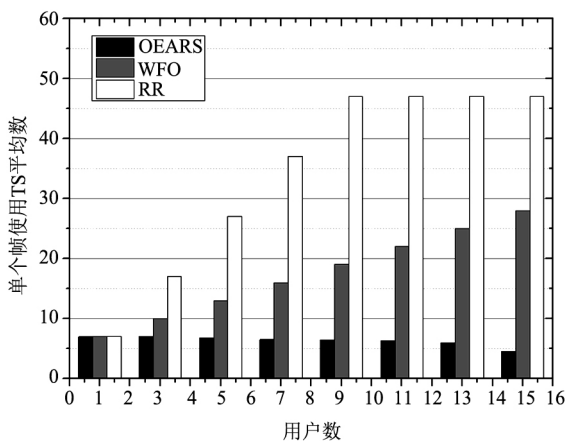


图 3 单个帧使用 TS 平均数
Fig. 3 The average of single frame using TS

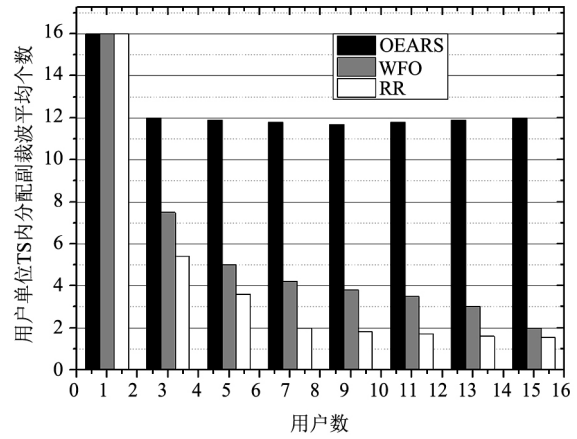


图 4 用户单位 TS 内分配副载波平均个数
Fig. 4 The average number of subcarriers allocated in user units TS

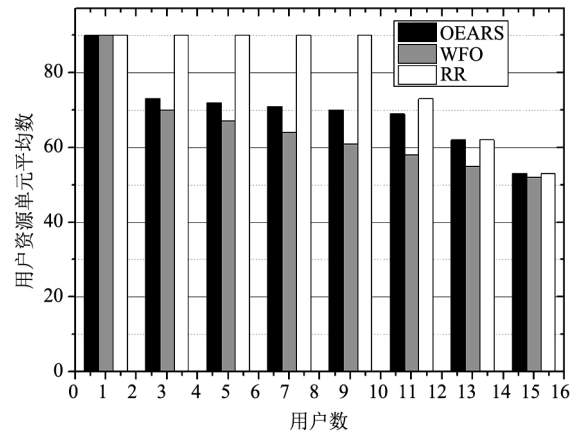


图 5 用户资源单元平均数
Fig. 5 The average of user resource units

图 3 所示为每个用户每个帧中使用的 TS 平均个数，一个 TS 认为是使用的当用户接收到一个帧内 TS 内至少一个 RU，因此该用户在该 TS 内不能设置为休眠模式。该值越高，用户活跃持续时间越长，能耗越高。图 4 展示了每个 TS 内平均分配到相同用户的副载波个数（介于 1~16）。图 5 展示了每个帧内平均分配到每个用户的 RU 全部数量。

首先可以观察每个调度方案，如果系统中仅有一位用户，该用户不和其他用户竞争，它接收到第一个 TS 内所有的副载波（ $n_{max}=16$ ）。经过大约 5TS 分配完所有副载波后，满足用户吞吐量需求。

然后可以观察当用户数增加时，RR 模型中分享了每个 TS 的副载波以实现用户之间的公平。这是由于 RR 调度方案选择性的服务 RU 中的用户。每个用户需要使用更多的 TS 将带来更多的能耗。如果增加用户数为 9，将超过系统容量，每个用户使用系统中最大可用 TS。

关于 WFO 的结果，可以发现和 RR 相似，每个 TS 的副载波在用户之间分析。用户数越大，每

个用户一个 TS 内分配的副载波个数越少,用户需要的 TS 个数越大。但是和 RR 有很少的区别。首先 WFO 曲线在 RR 曲线之上。此外,曲线的斜率低于 RR 的斜率。根据这些调度方案,RU 不是简单的在用户之间分配,而是机会主义的分配到拥有最好无线条件的用户,从统计学上说在相同帧中许多副载波上拥有好条件的相同用户。此外,图 5 的结果表明 WFO 利用了多用户密度的优点来最大化每个 RU 内传输比特的数量。系统中用户数越高,分配过程对于系统吞吐量越高效,因为用户需要更少的 RU。

OEARS 激励纵向资源分配。这说明了 OEARS 曲线低于其他方案(如图 3),在图 4 中高于其他方案。这表明非常少的用户同步处于活跃状态。OEARS 仅当足够数量的用户时才唤醒以保证较好的频谱效率。因此,TS 的副载波在用户间共享仅当传输盈利率需要时。这将保证吞吐量和能耗之间较好的折中。

5.3 能耗的优化效果

用户和全局能耗,如图 6 和图 7 所示。

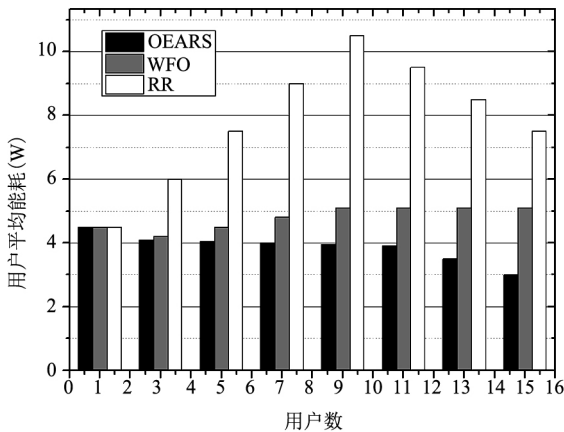


图 6 用户平均能耗

Fig. 6 User average energy consumption

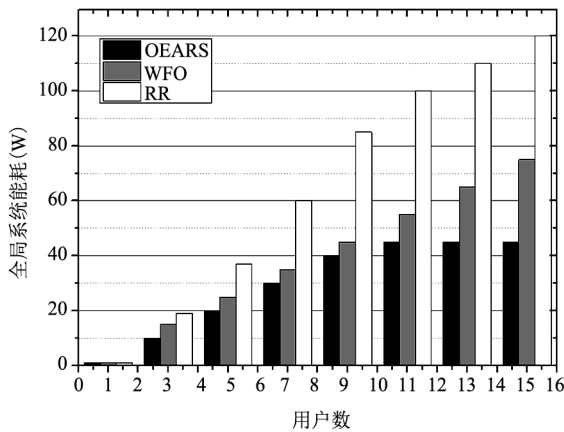


图 7 全局系统能耗

Fig. 7 Global system energy consumption

从 RR 曲线可看出,在 1 到 9 个用户之间,平均用户能耗随着用户数增加。这是由于用户间 TS 的副载波之间的分享(图 4),这引起了活跃持续时间增加(图 3)。当用户数大于 9 时,系统超载,RR 不能提供每个用户需要的 RU。尽管有数据需要传输,但是由于缺乏 RU,它们不得不保持休眠状态。在休眠模式下用户的能耗更小。这说明了当用户数超过 9 时,RR 曲线下降(图 6)。

如 RR、WFO 在用户之间分享 TS 的副载波,使得能耗随着通信负载下降。但是这种共享欠公平因为在一个相同的帧中更有可能有较好条件的副载波上的相同用户,这对应符合一个相对于 RR 更纵向的分配。此外当用户数增加时,多用户多样性密度的使用使得使用的 RU 更少。这降低了用户活跃模式持续时间,因此降低了能耗,OEARS 能耗增益曲线,如图 8 所示。

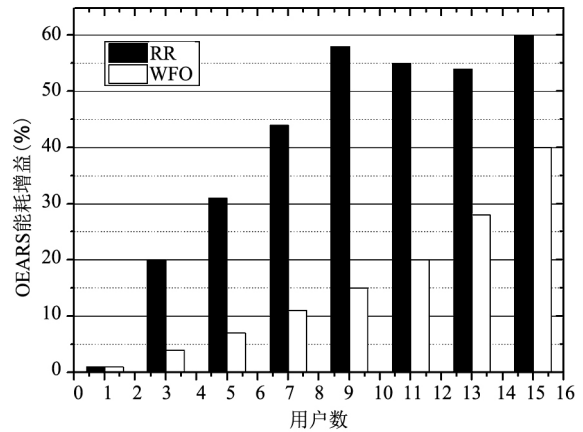


图 8 OEARS 能耗增益

Fig. 8 OEARS energy gain

图 8 说明了 OEARS 方案曲线比 RR 增长得缓慢。可看出转而使用所有的多用户多样性以专门提高系统容量,OEARS 同样降低了能耗。系统中用户数越大,分配过程越节省。此外,当用户容量超过 OEARS 时(12 个用户),可发现全局能耗稳定在一个较低水平。和唤醒许多用户以在 TS 内的副载波上同时传输比特的方案相反,OEARS 采取最大化 RU 效用(即消耗单位瓦特传输的比特数)。无论怎样考虑通信负载,但是多数用户同时保持活跃以提供较好而廉价的服务。当休眠模式持续时间增加时,OEARS 相对于其他方案提供了重要的能量增益。

6 结论

本文所提 OEARS 调度方案是可持续发展方法的一部分。最大化消耗每瓦特能传输的比特位数,OEARS 方案降低了无线通信网络的能耗,而没有

影响效率。所提方案可以带来诸多效益：环境和经济层面的。首先，OEARS 使得无线计算设备的能耗明显降低，因此降低了温室效应。然后 OEARS 增加了装备电池的生存周期。这使得降低了电力负载时间和操作开销。未来的工作将聚焦于 OEARS 方案的改进，尝试调整吞吐最大化和能耗最小化之间的折中。

参考文献(References)

- [1] Rosas F, Oberli C. Impact of the channel state information on the energy-efficiency of MIMO communications[J]. *Wireless Communications IEEE Transactions on*, 2015, 14(8): 1-1.
- [2] Kafi M A, Djenouri D, Ben-Othman J, et al. Congestion control protocols in wireless sensor networks: A survey[J]. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 2014, 16(3): 1369-1390.
- [3] Wong C Y, Cheng R S, Lataief K B, et al. Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, 17(10): 1747-1758.
- [4] Wang X, Xiang W. An OFDM-TDMA/SA MAC protocol with QoS constraints for broadband wireless LANs[J]. *Wireless Networks*, 2006, 12(2): 159-170.
- [5] Garnaev A, Trappe W. Bargaining over the fair trade-off between secrecy and throughput in OFDM communications[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics & Security*, 2016, 12(1): 242-251.
- [6] Salameh H B, Jararweh Y, Khreishah A, et al. Cooperative weighted-fair control strategy for spectrum self-coexistence in multi-cell WRAN systems[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2015, 46(1): 65-77.
- [7] 张三峰, 黄迪, 陈州, 等. 一种面向机会网络路由的最优停止决策方法[J]. *软件学报*, 2014, 25(6): 1291-1300.
Zhang S F, Huang D, Chen Z, et al. An optimal opportunity to stop network oriented routing decision method. *Journal of software[J]*. 2014, 25 (6): 1291-1300.
- [8] J-J V D B, Borjesson P O, Boucheret M L, et al. A time and frequency synchronization scheme for multiuser OFDM[J]. *Selected Areas in Communications IEEE Journal on*, 1999, 17(11): 1900-1914.
- [9] Rafique Z, Seet B C, Alanbuky A. Performance analysis of cooperative virtual MIMO systems for wireless sensor networks[J]. *Sensors*, 2013, 13(6): 7033-7052.
- [10] Andrews M, Kumaran K, Ramanan K, et al. Providing quality of service over a shared wireless link[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2001, 39(2): 150-154.
- [11] Ye L, Seshadri N, Ariyavisitakul S. Channel estimation for OFDM systems with transmitter diversity in mobile wireless channels[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 17(3): 461-471.
- [12] Fujisawa T, Hasegawa J, Tsuchie K, et al. A single-chip 802.11a MAC/PHY with a 32-b RISC processor[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2003, 38(11): 2001-2009.
- [13] Boulis A, Tselishchev Y, Libman L, et al. Impact of wireless channel temporal variation on MAC design for body area networks[J]. *Acm Transactions on Embedded Computing Systems*, 2011, 11(2): 1-18.
- [14] Sklar, Bernard. *Digital communications: fundamentals and applications[J]*. *Hypertension Research Official Journal of the Japanese Society of Hypertension*, 2001, 33(3): 177-180.
- [15] Salah K, Alkhoraidly A. An OPNET-based simulation approach for deploying VoIP[J]. *International Journal of Network Management*, 2010, 16(16): 159-183.