

一种基于 OFDMA 的组播单播联合自适应调度算法

杜恩宽, 胡国荣

(中国传媒大学广芯数字系统集成研究所, 北京 100024)

摘要: 面向未来的大型多媒体组播应用环境, 在 IEEE 802.16 业务分类的基础上, 提出了名为 VARTUL 的业务分类及制约关系, 在此基础上, 研制了基于 OFDMA 的 VARTUL 节能调度算法, 力求终端休眠时间最长, 切换次数最少. 算法中组播和单播共存, 在制约前提下支持大量级用户的自由订阅, 从而支持广播电视业务与数据业务的融合与运营. 实验仿真表明, VARTUL 算法能自适应上下行流量变化和各业务流量分布, 支持各种业务组合, 确保用户体验, 并节约终端能量.

关键词: 节能算法; VARTUL 业务分类; 联合调度

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 12-2944-05

A Multicast and Unicast Traffic Integrated Adaptive Scheduling Algorithm in OFDMA Systems

DU En-kuan, HU Guo-rong

(GxSOC Research Institute, Communication University of China, Beijing 100024, China)

Abstract: For the applications' needs of the future large-scale multimedia multicast system, consulting the service class of IEEE 802.16, proposal a novel service class with some restrict rules, then develop an energy efficient scheduling algorithm called VARTUL based on OFDMA, make best efforts to help mobile station prolong the time in sleep mode and reduce the times of mode switch. In this algorithm, unicast traffic coexist with multicast traffic, following the restrict rules and then users can subscribe the services freely, so VARTUL can support the system which merge broadcast services and data services into one platform to provide video, audio, data and other programs. Numerical results show that VARTUL is adaptive to meet the instance of uplink and downlink traffic ratio variety and random distributing of service traffic, and it can save energy significantly and guarantee the service combinations and service experience of every user.

Key words: energy efficient scheme; VARTUL service class; integrated scheduling

1 引言

宽带无线多媒体网络通信已经成为现在的应用潮流, 移动终端 (MS) 广泛使用电池, 能量效率是系统性能最重要的指标之一. 采用组播技术, 将大大降低基站的能量消耗和信息传送的时间, 通过合理的调度, 也可以大幅节约终端的能量.

2 相关工作

3GPP R6 定义了 MBMS^[1,2], 即多媒体广播多播业务, 提供点到多点传送多媒体的发送机制. MBMS 中已有的调度算法大都基于时分复用 (TDMA) 机制. IEEE802.16e^[3,4] 提供的节能机制备受关注, 其休眠模式^[4] 是目前研究的热点, 许多学者研究其休眠模式, 分析或改进其参数选择^[5,8-13]. 休眠模式中, MS 可以通过

尽量延长休眠时间, 减少清醒时间来达到节能的目的, 另外, 状态转换也有转换开销^[6], 应尽量减少状态转换的次数. 转换开销对应着一个阈值 T_m ^[14], 即连续 T_m 个时隙以上的休眠才是合理的, 或者说, 一次切换, 不可避免会有 T_m 个时隙的能量损失. 文献[6]基于虚拟突发的方式提出了一种降低终端能耗的单播业务调度算法, 文献[7]定义了多播超帧的概念, 同样以突发的方式, 在多播业务调度吞吐量和能耗之间取得折衷. 多播和单播共存时, 多播给单播的突发带来了制约和限制, 针对联合调度文献[6]给出了 3 种调度模型, 文献[14]在其静态模型的基础上研究了多播和单播的联合突发. 算法模型基于 TDMA, 过于静态化, 从其仿真结果来看, 支持的组播、单播数量较小, 在大量级组播单播调度方面的有效性有待提高. 本文基于 OFDMA 系统, 通过对组播和单播业务分类进行细化, 研究其中的制约关系, 从而提出新

的调度机制,以求适用于大量级的组播单播应用,支持并鼓励进行服务组合来适应实际应用中的复杂情况。

3 系统模型

系统中每个小区有一个基站(BS), M 个活跃移动台(MS),基站到移动台为点到多点(PMP)的无线链路.采用 OFDMA 方式接入,基站有 N_C 个有效子载波,划分为 N_{SC} 个子信道,时域上,每秒分为 N_{TF} 个帧,每帧以时隙(TS, Time Slot)为单位,长度为 N_{TS} .

系统采取静态配置的方式提供组播服务,服务类型参考了 IEEE 802.16^[3,4] 的业务分类,规定为:音频组播 A ,用于数字电台或音乐等音频业务;视频组播 V ,用于数字电视、流媒体等视频业务;图文组播 R ,用于诸如报纸、游戏等特殊的富媒体业务;文本组播 T ,文字类信息,如字幕、歌词、股票信息,滚动新闻等业务;限时业务 L ,用于高实时下行和上行数据,要求非常低的时延.单播 U ,普通的上网业务、组播订阅流程和其它,由用户自主行为决定.同时,规定从 BS 到 MS 为下行,从 MS 到 BS 为上行,那么 L 为高实时下行加所有上行, VA 为实时下行, RT 为非实时下行, U 为单播下行. V 与 A 从视频(需要显示)与音频(不需要显示)的角度划分, R 与 T 从数据率的角度划分, R 大于 T ,一般而言,数据率 $V > A \gg R \gg T$.

表 1 VARTUL 业务相容关系

	$s_i \in V$	$s_i \in A$	$s_i \in R$	$s_i \in T$	$s_i \in U$	$s_i \in L$
$s_j \in V$	●	●	●	○	●	●
$s_j \in A$	●	●	○	○	○	●
$s_j \in R$	●	○	●	○	●	●
$s_j \in T$	○	○	○	○	○	●
$s_j \in U$	●	○	●	○	○	●
$s_j \in L$	●	●	●	●	●	●

VARTUL 分类中不同的业务实例允许共存,这种共存称为相容.用户 x 所使用的业务集合记为 $S_{USER(x)}$,对于 $\forall s_i, s_j \in S_{USER(x)}$, s_i, s_j 符合表 1 的规则,其中“●”为不相容,“○”为相容。

4 自适应节能算法

注意到现在移动设备的存储卡容量大都在 1GB 以上,不需要实时互动的节目,用户对几秒内的平移型延迟并不在意,可以考虑用时延和储存空间为代价优化算法而节约终端能量,因此我们打破帧的壁垒,以秒为单位建立超帧进行联合调度,保证相容的业务在时间上邻接,从而形成节能突发。

4.1 OFDMA 调度布局设计

分析表明邻接的顺序不影响性能,如 UA 和 AU 是等同的,同时 T 的数据率很小且与很多业务相容,复制

T 能使更多的相容业务邻接,由此,我们设计出如图 1 的调度布局,用坐标 (x, y) 记录业务的调度位置, x 为时隙号,称横坐标; y 为子信道号,称纵坐标, $x \in [0, N_{TS})$, $y \in [0, N_{SC})$.

图 1 是超帧典型的区域划分和用途安排,实际情况根据业务的数量和数据长度变化而变化. $A0$ 和 $A8$ 是宽为常数 $SpanX$ 的预留空间, $A1$ 用于 V ; $A2$ 和 $A6$ 用于 T ; $A5$ 用于 A ; $A7$ 用于 R ; $A9$ 用于 L ; 区域 $A1$ 、 $A5$ 和 $A7$ 被抽象为梯形,是因为业务按长度排序后,长的被安排在下面. E 开头的区域是纵向所在 A 区域的一部分, H_{max} 是一个调节参数。

定义 1 最大 T 服务数 MNT : 用户可以同时使用的 T 类业务最大个数,一般情况下 $MNT = 4$ 。

定义 2 剩余通信能力 RC : 系统在组播业务之外的通信能力,用特定数据率下可支持的用户数表示. RC 对应图 1 中所有斜方格纹所示的区域,用于 U 和 L 的分配. 组播支持的用户数几乎是无限的,而 RC 有限,将决定系统的服务能力。

4.2 算法实现步骤

(1) 调度调整与缓存处理. L 类有限时要求不能延迟,在此不处理. T 、 R 是非实时组播,刷新率低,以秒为单位集中发送,并彼此错开. 如 T 有 96 个, R 有 32 个,刷新周期为 5min, 1s 内有 24 个逻辑子信道可用于组播发送,那么调整为: 1~4s 内发送 T , 5~6s 内发送 R , 7~300s 内无 R 、 T 发送. V 、 A 是实时组播,集中后每秒开始时发送. 单播 U 随时出现,当前秒内如果有,集中后下一秒开始时发送. VART 类,每个业务一个缓存区, U 类,每个用户一个缓存区. 每秒开始时取走非空缓冲区,并按数据长度排序,重新编号。

(2) 区域 $A2$ 、 $A6$: T 类处理. 设 $A2$ 和 $A6$ 的宽度为 LT , 当前秒 T 类业务发送的数量为 n (由算法第 1 步的统计得到), 若 $n = 0$, 则 $LT = 0$; 若 $n \leq MNT$, 则 $LT = n$; 若 $n > MNT$, 则 $LT = MNT$. $A2$ 和 $A6$ 高度等于 n 。

(3) 区域 $A1$ 、 $A5$ 、 $A7$: VAR 类处理. $A1$ 对应 V , $A5$ 对应 A , $A7$ 对应 R , 按长度对 VAR 类业务分配子信道号,使长度大的业务子信道号小,从而在图 1 中梯形的下面. $A1$ 和 $A5$ 右对齐, $A7$ 左对齐. $A5$ 的斜边倾斜程度决定 AU 类相容业务的解决,所以,无 T 和 R 的超帧中,空闲时隙较多,将 $A5$ 向右 45° 倾斜,增加 AU 解决的空间,如图 2(b)。

(4) 坐标调整. 将步骤(2)、(3)得到的相对坐标按图 1 所示的布局转换为绝对坐标. 最后确定 $A3$ 和 $A4$, 两者均分剩余长度. 位置确定后,完成区域内业务的时隙分配。

(5) $A3$ 、 $A4$ 、 $A0$ 、 $A8$: U 类处理。

定义 3 相关业务块 LSB: 某个业务 $s, s \in A \cup R \cup T$, s 被 m 个用户同时使用, m 中的 n 个用户在此时有 U 类数据需发送, 对这些 U 来说, s 就是相关业务, s 在 OFDMA 超帧中占据的块集, 叫做相关业务块. 用相关业务的类别对 U 进行分类, 如 $s \in T$, 标记 U 为 U_T , 没有相关业务的 U 称为独立 U .

定义 4 节能邻域 ESA: LSB 两侧各 $H_{\max} \times T_m$ 个块之中的空闲块的集合.

定义 5 长度统计量 CLU : 对每个 LSB 计算其相关的 U 业务的长度统计量.

$$CLU = \sum_{i=1}^n f(\text{Length}(U(i)))$$

$$\text{其中, } f(x) = \begin{cases} 8-x, & x < T_m \\ 4, & x \geq T_m \end{cases}$$

(i) U_A, U_{AT}, U_R, U_{RT} 的处理: 显然, n 个单播 U 最好都能在 ESA 内分配. 以 T_m 为长度阈值, 先对所有短 U 业务按长度越短越优先的原则分配 ESA, 越靠近 LSB 越好. 再对所有长 U 业务, 如果 ESA 还有空闲, 则分配, 如果 ESA 已经耗尽, U 退化为半独立 U 等待步骤 (iii) 处理. CLU 用来确定 LSB 处理顺序, 值越大越优先. CLU

大, 则 LSB 单播用户众多或短 U 众多, 优先分配效果最好, 分配结果如图 2(a)、图 2(b).

(ii) U_T 的处理: 复制 T 使 U_T 组合的解决比较灵活. A2、A6 的每列都包含当前发送的所有 T 业务, 是 LT 个等同的列. 这种复制策略能保证用户的 x 个 T 业务都能在任意相邻的 x 列里找到, 从而保证时间上紧邻. 如果 U_T 组合很多, 以 A4 的左边界线为中心多次复制 T , T 的两旁分配 U_T , 图 2(c) 中的黑色即为 T .

(iii) U 的处理: 寻找长度足够的空闲块分配 U , 若长度不能满足, 则分裂 U 块为两个, 再进行分配, 尽力而为. 半独立 U 在横坐标的投影不能与其 LSB 的投影有任何重合, 即时间上必须错开.

(6) 反向映射和 L 类处理. 将超帧映射回到帧, 建立分配表. 系统采用分布式子载波分配, 物理层保证各逻辑子信道的容量大致相等, 波动范围较小, 从而算法以 T 业务为轴建立的纵向对齐关系能够保持. 考虑到信道的时变性特点, 时隙-信道网格会在时间轴上伸缩, 所以预留了伸展区域 A0、A8, 映射不难实现. 所有 L 业务都是彼此独立的, 在 A9 对应的区域按照一般算法进行调度即可.

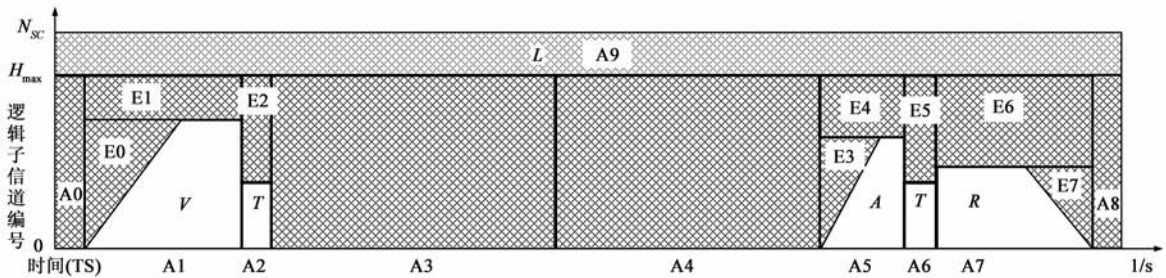


图1 OFDMA超帧调度布局

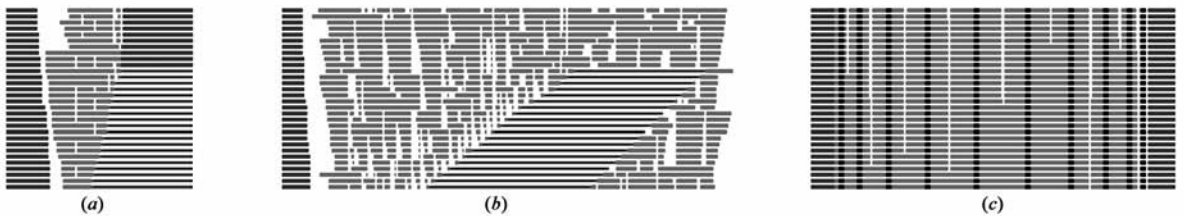


图2 可视化的超帧分配图(局部)

4.3 算法分析

算法具备了大量用户进行多业务组合服务的能力, 步骤(2)的排序, 统计较为复杂, 是对长度的整数排序, 复杂度不超过 $O(5n \cdot \log(n))$, n 为某类业务的总数的最大值, 5 为 VARTU 这 5 个种类都要排序; 算法其余步骤基本上是坐标计算, 空间分配标记与判断, 为 U 搜寻空闲块较为复杂, 复杂度不超过 $O(N_{sc} \times N_{ts} \times N_{tr})$, 取决于 U 的数量和剩余空间的丰富程度.

5 实验与仿真

基本实验参数如表 2 所示. 其中业务概率是指在

$1s$ 内使用某类业务的人次数与全体用户总数的比, 算法用统计平均值简化, 各类业务的使用者随机分布于全体用户中.

5.1 自适应性能

(1) 业务的无限制随机分布: 任意随机分布的 VARTUL 相容业务组合都可以用图 3 所示的过程得到. 其中 M 为总用户数, 大括弧代表集合的随机划分, 箭头代表随机加入, 虚线右侧为得到的组合, \emptyset 是无业务的不活跃用户. VARTUL 分类能服务于大用户量的各种业务组合情景.

(2) 无限的 TA 服务能力: 由 RC 的定义有 $RC = U$

表 2 实验仿真参数

总带宽 B	160Mb/s	VTS 数据率	320B/s
N_{SC}	64	V 最大长度	160VTS
H_{max}	56	A 最大长度	120VTS
N_s	32	R 最大长度	80VTS
帧/s	50	T 最大长度	1VTS
时隙/帧	200	L 最大长度	5VTS
TS 宽度	100 μ s	U 最大长度	20VTS
VTS 宽度	1ms	T_m	4VTS
V 业务数量	32	L 业务概率	10%
A 业务数量	32	A 业务概率	40%
R 业务数量	32	T 业务概率	120%
T 业务数量	280	V 业务概率	20%
总用户数	10000	R 业务概率	10%
概率计算时间	1s	U 业务概率	40%

说明:为了计算方便将 T 的长度定为 1VTS,1VTS = 10TS.

+ L , 由图 3 可得 $U = (M-L-V-R) \times a, L = M \times b$. 其中 a 为 U 的概率(全集 $M-L-V-R$), b 为 L 的概率(全集 M), 由此可得 $M = (RC + a(V + R))/(a + b - ab)$.

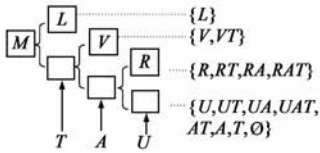


图3 业务组合过程

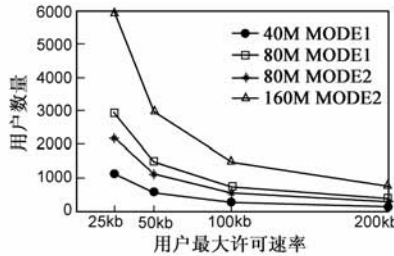


图4 用户数量和最大速率

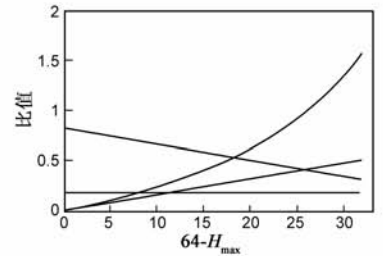


图5 H_{max} 的调节作用

5.2 节约能量性能

根据算法的第 1 步,进行算法仿真时划分了 3 种情景:(A)有 T 无 R ,长 5s,(B)有 R 无 T ,长 1s,(C)无 T 无 R ,长 294s. 图 6~8 是本文算法和 SSBIS^[14]算法的结果对比.SSBIS 算法将所有 MS 划分到多播或单播调度集合中,在多播的相邻时隙内发送多播调度集合中的终端的单播,对于单播调度集合中的终端,通过凸优化方法求得休眠时间最长的单播调度方案,以降低终端能耗.

图 6 为切换数量对比,浅灰色为未优化的,黑色为本文算法,SSBIS 算法为深灰色条,SSBIS 算法在本文所述应用环境下,优化效果不明显,本文算法效果显著,

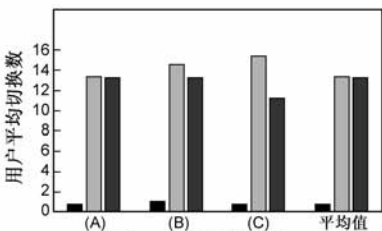


图6 切换数量对比

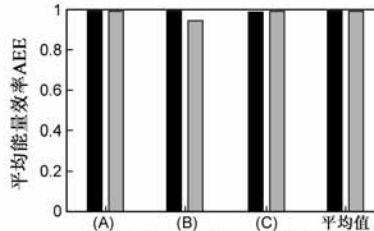


图7 BS端AEE对比

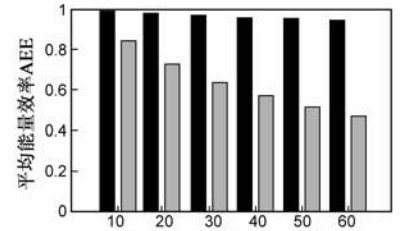


图8 MS端AEE对比

此处 $LVRU$ 均指该类业务的人数.可见 M 正比于 RC 和 V, R , 与 T, A 无关,也即文本和音频业务理论上可以向无限多的人群服务.

(3) U 速率变化的适应性:图 4 为用户最大单播数据率 K 和剩余通信能力支持的用户数量 RC 的关系仿真结果,显然, K 越大, U 的平均长度越大, RC 越小.在 25kb/s 的条件下,各个模式支持的 RC 从 1000 到 6000 不等;50kb/s 时,从 600 到 3000 不等,数量相当可观.40M 和 80M1 模式音视频业务质量较低,80M2 和 160M 模式质量较高.

(4) H_{max} 的自适应调节作用:图 5 为 H_{max} 的调节作用仿真结果,取 $N_{SC} = 64$,水平横线代表组播所占的比例,恒定为 18%;上升直线代表 L 业务所占比值,随着 N_{SC} 和 H_{max} 差值(64 - H_{max})的增大,从 0 增加到 0.5;下降直线代表 U 所占比值,从 0.82 下降到 0.32;上升曲线代表 L 和 U 的比,可以从 0 变化到 1.6.可见 H_{max} 的调节作用是比较大的,算法能在此范围内自适应流量变化.

非常明显地降低了切换次数.

根据文献[6]定义的 AEE 计算能耗效率,AEE 即总能耗中用于数据传输的比.在 BS 端,图 7 中黑色为本文算法,灰色为 SSBIS^[14]算法,在(B)情景下,由于 T 的大量复制,本算法 AEE 有所降低,但平均值和 SSBIS 算法基本持平,相差仅 0.01%.在 MS 端,图 8 中黑色为本文算法,灰色为 SSBIS 算法,可见本算法有明显优势,而且,随着阈值 T_m ^[14]的增大而更加明显,这是由切换次数的大量减少而获得的,即能耗的效率和能耗节约的绝对量都极大地得到提高.本算法对阈值 T_m 不敏感,对终端芯片或系统的工艺水平、实现算法的实时性要求相应降低,有利于降低设备成本.

6 结论

相比于 TDMA 模式的调度算法,基于 OFDMA 的调度算法以更高的系统容量、更有效的资源控制,具备更大的性能优化空间.本文从应用层、MAC 层和 PHY 多层联合优化的角度,提出了 VARTUL 业务分类和制约原则,设计了基于 OFDMA 的超帧调度布局,最终构建了用于大型组播系统的节能调度算法,经理论分析和实验仿真对比,算法表现出很好的适应性,能够自适应上下行流量变化和各业务流量分布,支持各种概率的业务组合,确保用户体验,具备较好的节能性能,适用于未来的各种带宽下的组播应用系统.

参考文献:

- [1] 3GPP TS 23.246, Multimedia Broadcast/Multicast Service; Architecture and Functional Description[S].
- [2] 3GPP TS 25.346, Introduction of the Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS) in the Radio Access Network[S].
- [3] IEEE 802.16-2001, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems[S]. Apr 8, 2002.
- [4] IEEE 802.16e/D5-2004, Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems[S]. Nov, 2004.
- [5] Xiao Y. Energy saving mechanism in the IEEE 802.16e wireless MAN[J]. IEEE Communication Letters, 2005, 9(7): 595 - 597.
- [6] Shi J L, Fang G F, Sun Y, Zhou J, Li Z, Dutkiewicz E. Improving mobile station energy efficiency in IEEE 802.16e WMAN by burst scheduling [A]. Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference [C]. San Francisco: IEEE Press, 2006. 1 - 5.
- [7] Cohen R, Katzir L, Rizzi R. On the trade-off between energy and multicast efficiency in 802.16e-like mobile networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(3): 346 - 357.
- [8] Xiao Y. Performance analysis of an energy saving mechanism in the IEEE 802.16e wireless MAN [A]. Proceedings of the Consumer Communications and Networking Conference [C]. USA: IEEE Press, 2006, 1(8 - 10): 406 - 410.
- [9] Chen J C, Sivalingam K M, Agrawal P. Performance comparison of battery power consumption in wireless multiple access protocols[J]. ACM Wireless Networks, 1999, 5(6): 445 - 460.
- [10] Jones C E, Sivalingam K M, Agrawal P, Chen J C. A survey of energy efficient network protocols for wireless networks [J]. ACM Wireless Networks, 2001, 7(4): 343 - 358.
- [11] Seo J B, Lee S Q, Park N H, Lee H W, Cho C H. Performance analysis of sleep mode operation in IEEE 802.16e [A]. Proceedings of the IEEE 60th Vehicular Technology Conference [C]. USA: IEEE Press, 2004. 1169 - 1173.
- [12] Feeney L M, Nilsson M. Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment [A]. Proceedings of the IEEE Computer and Communications Conference [C]. USA: IEEE Press, 2001. 1548 - 1557.
- [13] Sayandev Mukherjee, Kin K Leung, George E Rittenhouse. Protocol and control mechanisms to save terminal energy in IEEE 802.16 networks [A]. Proceeding of the IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing [C]. USA: IEEE Press, 2005. 5 - 8.
- [14] 田霖, 杨育波, 方更法, 石晶林, Dutkiewicz Eryk. 基于调度集合的多播单播数据联合调度算法 [J]. 软件学报, 2008, 19(12): 3196 - 3207.
Tian L, Yang Y B, Fang G F, Shi J L, Dutkiewicz E. A scheduling set based integrated scheduling algorithm for unicast and multicast traffic [J]. Journal of Software, 2008, 19(12): 3196 - 3207. (in Chinese)
- [15] 郝丹丹, 李永华, 张瀚峰, 邹仕洪, 程时端. 一种跨层的 OFDMA 系统调度和资源分配算法 [J]. 电子学报, 2008, 36(10): 1923 - 1930.
Hao Dan-dan, Li Yong-hua, Zhang Han-feng, Zou Shi-hong, Cheng Shi-duan. A cross-layered scheduling and resource allocation algorithm in OFDMA systems [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(10): 1923 - 1930. (in Chinese)
- [16] 赵新胜, 鞠涛, 尤肖虎. 一种适用于 B3G 移动通信系统下行共享信道的调度算法 [J]. 电子学报, 2005, 33(7): 1173 - 1176.
Zhao Xin-sheng, Ju Tao, You Xiao-hu. A scheduling algorithm for downlink shared channel in beyond 3G mobile communications system [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(7): 1173 - 1176. (in Chinese)

作者简介:



杜恩宽 男, 1976 年 8 月出生于四川射洪. 1999 年毕业于北京交通大学计算机系, 2005 年进入中国传媒大学. 现为博士研究生, 从事数字移动多媒体、现代软件工程等方面的研究.
E-mail: duenkuan@yahoo.com.cn



胡国荣 男, 1966 年生于江西吉安. 教授, 博士生导师. 现为中国传媒大学广芯数字系统集成研究所所长, 主要从事片上系统集成、数字移动多媒体、宽带家庭网络等方面的研究.
E-mail: hugarong66@yahoo.com.cn