

文章编号:1001-9081(2014)06-1533-04

doi:10.11772/j.issn.1001-9081.2014.06.1533

## 时变信道正交频分复用系统绿色资源分配算法

龙 恳, 郭炳进\*

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

(\*通信作者电子邮箱 bingjin26@163.com)

**摘要:**传统的基于终端节能的绿色资源分配算法大都忽略了无线信道的时间选择性对能耗与系统性能的影响,为此提出一种结合多用户分集的绿色资源分配算法。在保证用户公平性的基础上引入多用户分集,动态调整多用户分集子模块大小以满足信道时变特性要求;分集子模块内有多个频带可供使用,用户资源尽可能集中在比较少的时隙内传输以降低总的终端接收能耗,通过顶点搜索快速寻找最优解。仿真结果表明,系统吞吐量可以提高13%左右,其稳定性得到改善;同时算法具有计算复杂度低、收敛速度快等特点,保持了良好的终端节能增益。

**关键词:**正交频分复用; 时变信道; 时延; 多用户分集; 绿色资源分配

**中图分类号:** TP301.6    **文献标志码:**A

### Green resource allocation algorithm in orthogonal frequency division multiplexing cellular system over time-varying channel

LONG Ken, CUO Bingjin\*

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** The traditional green resource allocation algorithms are based on terminal energy saving, while most of them neglect the impact of time-selectivity of the channel on energy consumption and system performance. An efficient green resource allocation algorithm which incorporated multi-user diversity was proposed. This algorithm guaranteed fairness among users and dynamically adjusted size of diversity sub-module to satisfy the time-varying character of channel. Due to multiple available frequency bands in any diversity sub-module, the receiving energy of user equipments could be minimized by scheduling users' resources into fewer time slots. The optimal solution could be reached efficiently by searching along the boundary. The simulation results illustrate that the proposed algorithm can increase system throughput about 13% with improved stability, lower computational complexity and faster convergence, maintaining a good terminal power-saving gain.

**Key words:** Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM); time-varying channel; time delay; multi-user diversity; green resource allocation

## 0 引言

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术作为长期演进(Long Term Evolution, LTE)系统核心技术之一,将系统频带划分成许多正交的子载波,子载波相互独立,系统可以非常灵活地进行分配。因此LTE系统具有更高的频谱利用率和更好的抗频率选择性衰落的能力<sup>[1]</sup>。但是LTE系统在提供高业务速率的同时,终端能量消耗也随之增加。不连续接收(Discontinuous Reception, DRX)机制作为无线通信系统链路层优化能量效率的一个重要方法被大多数的无线通信系统所采纳<sup>[2]</sup>。没有数据接收时,终端开启去激活定时器,超过门限值后进入休眠状态,终端关闭无线收发单元以节省功耗。根据对LTE系统DRX模式终端能耗的分析,可看出终端能耗与其数据收发情况紧密联系<sup>[3]</sup>。关于LTE系统中基于终端节能的绿色资源分配算法,文献[4-5]将用户数据集中在尽可能少的时隙内传输,可以有效降低终端能耗;然而现有LTE系统绿色资源分配算法大都忽略了无线信道的时间选择性对能耗与系统

性能的影响,不能适应无线信道状态的不断变化,限制了该算法应用范围的扩大和系统吞吐量的提高。

无线信道的一个显著特征是时变性,信道状态随时间发生随机变化。人们认识到信道状态的随机变化可以作为一种机会加以利用,当信道处于较好的状态时才发送信息,从而使衰落信道的容量得到提高,甚至会超过无衰落信道的容量<sup>[6]</sup>。这种利用信道时变特性的调度方法主要应用在多用户环境下,称为多用户分集资源分配。

因此,本文提出一种结合多用户分集的绿色资源分配算法。跟踪多用户信道状态的变化,动态调整分集子模块大小;运用凸优化理论求解分集子模块内资源分配最优解。该算法与基于基站节能的自适应资源分配算法<sup>[7-8]</sup>相互独立,可以进一步降低LTE系统总能耗。

## 1 系统模型

图1为多用户OFDM系统动态资源分配结构框图。LTE无线蜂窝网络模型由一个基站和K个用户组成。下行链路中,发送给每个用户的数包先到达基站,然后由基站发送给

收稿日期:2013-11-08;修回日期:2013-12-27。    基金项目:国家科技重大专项(2013ZX03003014-004, 2011ZX03003-003-02)。

作者简介:龙恳(1978-),男,重庆人,博士,主要研究方向:下一代移动通信、软件无线电; 郭炳进(1984-),男,湖北孝感人,硕士研究生,主要研究方向:新型网络架构下的绿色通信。

对应的用户。假设每个用户都能准确地测量出它的瞬时信道状态并反馈给基站, 用户接收数据的速率只取决于它当时的信道状态, 即信噪比<sup>[9]</sup>。基站端的资源分配模块根据每个用户的信道状态、用户业务量及服务质量 (Quality of Service, QoS) 要求等情况, 通过资源调度算法来决定下一个时间槽为哪些用户服务。

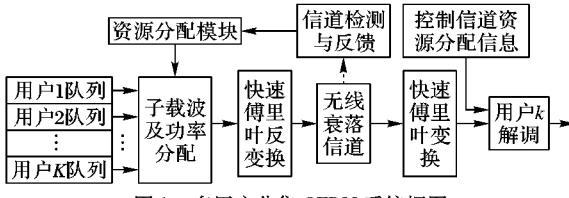


图 1 多用户分集 OFDM 系统框图

对于无线信道模型, 主要包括快衰落和慢衰落两方面的影响。用  $j (j = 1, 2, \dots, J)$  表示时间槽的编号,  $k (k = 1, 2, \dots, K)$  表示用户的编号, 则用户  $k$  在时间槽  $j$  的信道状态, 即能获得的服务速率  $R_k(j)$  可以表示为:

$$R_k(j) = F_k(j) \cdot S_k(j) = F(j) \cdot S_k(j) \quad (1)$$

其中:  $F_k(j)$  是代表快衰落的随机变量, 本文采用瑞利衰落信道来模拟, 其包络服从瑞利分布。对不同的用户来说,  $F_k(j)$  相互独立且具有相同分布, 统一用  $F(j)$  表示。 $S_k(j)$  是代表慢衰落, 即阴影衰落的随机变量, 其衰落速度十分缓慢, 延迟时间尺度内, 慢衰落对信道状态波动的影响可以忽略, 因此本文主要考虑信道的快衰落。

无线信道时域波形表现出时间选择性衰落, 其衰落速度主要受多普勒频移的影响: 多普勒频移越大, 相干时间越小, 信道状态变化也就越快。多普勒频移作为一个随机变量在不断变化, 因此资源分配模块需要动态调整多用户分集子模块大小, 及时进行资源分配以适应无线信道状态的不断变化。

分集子模块包含多个时隙, 每个时隙有多个频带, 子模块内信道状态保持稳定, 用户资源所处的位置并未确定。因此可以进一步资源分配使用户数据的接收在较少的时隙内进行, 从而减少用户处于激活状态的时间, 节省终端能耗。建立小区内终端总能耗目标函数, 结合约束条件, 迭代搜索寻找最优解。

## 2 解决方案

信道衰落是无线信道的本质特性, 通常情况下, 它被视为不可靠的因素, 是需要避免的。而从多用户分集的角度来看, 衰落却被视为一种有利的随机化因素, 是可以被利用的。理论分析显示, 在任意时刻, 将信道资源都分配给拥有最好信道状态的用户时, 信道容量能够最大化<sup>[10]</sup>。信道衰落的动态范围越大, 峰值越高, 多用户分集增益也就越大。

实际的数据量是不对称的, 而且存在距离基站较近、平均信噪比较高的用户。为了避免信道状态较好的用户持续占用资源, 需要有效应对多用户分集所面临的时延与公平性约束的挑战。时延是通信系统的一个重要指标, 特别是语音、视频流和游戏等实时性较强的业务。假设业务时延要求为  $T$ , 暂时忽略网络中其他节点的时延影响。采用全缓冲业务模式, 数据到达基站后进入缓冲队列等待发送。聚集  $T/2$  时长数据, 资源分配模块开始为用户分配资源, 在接下来的  $T/2$  时长内数据全部发送出去。数据缓冲与发送并行处理,  $T/2$  为周期, 依次

循环。随着信道状态的变化,  $T/2$  时长资源分多次分配给用户。由于缓冲队列中用户数和相应的数据量已知, 用户分配到足够资源后, 资源分配器不再为其分配资源, 可以避免资源浪费, 确保用户公平性。

无线信道在固定环境和运动环境下都存在信道波动, 其动态范围和波动速率决定了资源分配算法的性能。因此, 延迟时间范围内, 信道状态的波动主要受信道快衰落的影响。

时变性是无线信道的典型特征, 其变化速度与运动状态紧密联系, 在静止或低速运动状态下, 信道状态呈现出缓慢变化; 随着终端移动速度的提高, 信道的时变特性更加明显。这就意味着相同的延迟时间范围内, 信道状态波动速度越快, 信道波动峰值可能更高, 动态范围更广, 信道状态更多, 用户更有可能在接近其信道状态峰值时发送数据以获得更高的分集增益。然而, 用户相干时间随之降低, 资源分配器需要及时分配资源以适应无线信道状态的变化<sup>[11]</sup>。多用户相干时间的最小值作为分集子模块大小可以满足所有用户的需要, 更小的分集子模块将会带来额外的信道反馈信息, 造成资源浪费。因此, 将多用户相干时间的最小值作为多用户分集子模块大小, 通过跟踪相干时间的变化动态调整分集子模块大小。

相干时间是信道保持恒定的最大时间差范围, 与多普勒频移成反比, 近似定义为

$$T_{j,k} \approx \sqrt{\frac{9}{16\pi}} \cdot \frac{1}{F_{j,k}^2} = 0.423/F_{j,k} \quad (2)$$

其中:  $F_{j,k}$  为用户  $k$  在时隙  $j$  的多普勒频移, 由于用户的高速移动在频域上产生多普勒效应而引起, 在时域上表现为信号的时间选择性衰落。

$$F_{j,k} = f_c \cdot v_{j,k} \cdot \cos \theta_{j,k} / C \quad (3)$$

其中:  $f_c$  是载波中心频率,  $v_{j,k}$  是移动台的运动速度,  $\theta_{j,k}$  表示入射波与移动台运动方向之间的夹角,  $C$  是光速度。

通过向下取整的方式, 计算多用户分集子模块所包含的时隙数  $M(j)$ , LTE 系统的时隙周期  $T_{\text{slot}}$  为 0.5 ms。

$$M(j) = \min_{k \in [1, 2, \dots, K]} \left\lfloor \frac{T_{j,k}}{T_{\text{slot}}} \right\rfloor = \min_{k \in [1, 2, \dots, K]} \left\lfloor \frac{0.423}{F_{j,k} \times T_{\text{slot}}} \right\rfloor \quad (4)$$

系统时延要求为  $T$ , 全缓冲业务模式下分集周期包含的分集子模块个数为  $J$ , 则时延约束条件可以表述如下:

$$\frac{T}{2} \geq T_{\text{slot}} \cdot \sum_{i=1}^J M(j) \quad (5)$$

设频带个数为  $N$ , 第  $j$  个子模块内可分配资源数为  $M(j) \cdot N$ 。多用户分集资源分配按照如下原则进行:

1) 优先分配资源给信道状态较好的用户。

2) 如果用户在上个子模块已分配到部分资源, 则优先满足其剩余资源需求, 以便用户数据连续传输, 减少终端的唤醒次数, 从而节省终端能耗。

3) 已分配足够资源的用户在此分集周期内不再参与分配, 以保证用户公平性。

4) 依次分配下一个子模块资源, 当  $j > J$  时, 进入下一个分集周期, 重置  $j$  为 1, 依此循环往复。

计算系统总的吞吐量:

$$C_{\text{Total}} = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K RB_k(j) \cdot \ln [1 + R_k(j)] \quad (6)$$

其中  $RB_k(j)$  为用户  $k$  在子模块  $j$  中分配的资源数。用户数目  $K$  越大则任意时刻存在某一用户信道处于最佳状态的概率越

大;系统时延要求越宽,同一用户在分集周期内的信道状态数  $J$  越大,用户分配较好信道状态资源的概率越大。因此随着用户数的增加和时延要求的降低,系统可以获取更好的吞吐量增益,  $C_{\text{Total}}$  可以进一步提高。

多用户分集充分利用信道的时变特性,将分集子模块内  $M(j) \cdot N$  个资源块分配给  $U(j)$  个用户,  $U(j) \leq K$ , 用户  $u$  获得的资源块数为  $RB_u(j)$ 。子模块  $M(j)$  时隙内用户信道状态保持稳定,  $N$  个频带可以灵活分配,因此可以进一步资源调度以确定用户所处的时隙以及时隙内所占用的频带个数。用户数据集中在尽可能少的时隙内传输以减少终端处于激活状态的时间,可以有效降低终端能耗。依次对各个子模块独立进行处理,可以忽略子模块序号  $j$ 。 $\pi_{m,n,u} \in \{0,1\}$  用来指示用户  $u$  是否占据第  $m$  个时隙上的频带  $n$ , 用户  $u$  在时隙  $m$  的数据传输指示函数可以表示为  $f\left(\sum_{n=1}^N \pi_{m,n,u}\right)$ , 当  $x = 0$  时  $f(x) = 0$ , 当  $x \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$  时  $f(x) = 1$ 。因此用户  $u$  的数据接收时隙数为  $\sum_{m=1}^M f\left(\sum_{n=1}^N \pi_{m,n,u}\right)$ 。

假设用户  $u$  的接收功率为  $P_u$ , 终端能耗最小化可以表述为:

$$P_r = \min \sum_{u=1}^U W_u P_u T_{\text{slot}} \sum_{m=1}^M f\left(\sum_{n=1}^N \pi_{m,n,u}\right) \quad (7)$$

其中:  $W_u$  为权重因子,可以根据终端电池的容量及状态进行设置。假设  $\sum_{n=1}^N \pi_{m,n,u} = x_{m,u}$ ,  $W_u P_u T_{\text{slot}} = w_u$ , 函数可以简化为如下形式:

$$P_r = \min \sum_{u=1}^U w_u \cdot \sum_{m=1}^M f(x_{m,u}) \quad (8)$$

频带数量和用户业务量约束条件如下:

$$\sum_{n=1}^N \sum_{u=1}^U \pi_{m,n,u} = \sum_{u=1}^U x_{m,u} = N; \forall m \quad (9)$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \pi_{m,n,u} = \sum_{m=1}^M x_{m,u} = RB_u; \forall u \quad (10)$$

上述线性约束条件为多元线性方程组,通过合适的数据安排可以转化为矩阵形式:

$$Ax = b \quad (11)$$

其中:

$$x = [x_{1,1}, x_{1,2}, x_{1,3}, \dots, x_{M,U}]$$

$$x_{1,1}, x_{1,2}, x_{1,3}, \dots, x_{M,U} \geq 0$$

$$A \in \mathbb{R}^{H,M \cdot U}; H = M + U - 1$$

目标函数是非线性最优解函数,它没有一个通用的解决方案。然而,结合目标函数的递增性质及约束条件的线性要求,暗示着最优解处于可行基的边界上。容易证明矩阵  $A$  为全幺模矩阵,对任何整型矢量  $b$ ,  $Ax = b$  的顶点为整数可行解<sup>[12]</sup>; 非线性目标函数全局最优解位于多面体顶点<sup>[14]</sup>。因此,可用线性规划中的经典单纯形法<sup>[13]</sup>,通过边界搜索寻找最优解。算法主要包括初始可行解求解阶段和顶点迭代搜索阶段。

算法实现过程如下:

依次处理多用户分集子模块:

for  $j = 1:J$

1) 反馈信道状态信息,计算用户相干时间  $T_{j,k}$ 。

2) 确定多用户分集子模块大小  $M(j) =$

$$\min_{k \in \{1, 2, \dots, K\}} \lfloor T_{j,k} / T_{\text{slot}} \rfloor.$$

3) 查询业务量列表,为信道状态较好的用户分配资源,同时确保用户公平性,反馈资源分配量  $RB_u(j)$  和用户数  $U(j)$ 。

4) 计算多用户分集子模块吞吐量  $C(j) = \sum_{u=1}^{U(j)} RB_u(j) \cdot \text{lb}[1 + R_u(j)]$ 。

5) 求解目标函数初始可行解:

① 线性约束函数(9)~(10)转换成矩阵  $A \in \mathbb{R}^{H,M \cdot U}$  ( $H = M + U - 1$ ) 和整形矢量  $b \in \mathbb{R}^{H,1}$ ,空缺部分用 0 补齐。

②  $A = [\mathbf{B}, \mathbf{D}]$ ,矩阵  $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{H,H}$  且可逆,  $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{H,M \cdot U - H}$ 。

③ 求解初始可行基  $\mathbf{x}_0 \in \mathbb{R}^{M \cdot U, 1}$ ,  $A\mathbf{x}_0 = b$ 。

④  $\mathbf{x}_0 = [\mathbf{x}_{B_0}; \mathbf{x}_{D_0}]$ ,  $\mathbf{x}_{B_0} = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{x}_{D_0} = 0$ 。

6) 顶点迭代搜索寻找最优解:iteration  $i = 1:I$ 。

For  $w = 1:MU - H$

① 求解  $\mathbf{By} = \mathbf{d}_w$ ,  $\mathbf{d}_w$  为矩阵  $\mathbf{D}$  的第  $w$  列向量。

② 计算  $\mathbf{Q} = \mathbf{x}_{B_0} \cdot / \mathbf{y}$ , 两向量对应元素相除。

If  $[\mathbf{Q}]_h < 0, \forall h$  stop。

Else

③  $\bar{h} = \operatorname{argmin}_{1 \leq h \leq H} \{\mathbf{Q}\} \mid \forall [\mathbf{Q}]_h \geq 0\}$ 。

④  $[\bar{\mathbf{x}}_w]_h = [\mathbf{x}_0]_f - [\mathbf{Q}]_h [\mathbf{y}]_f, \forall f \neq \bar{h}$ 。

⑤  $[\bar{\mathbf{x}}_w]_{\bar{h}} = [\mathbf{Q}]_{\bar{h}}, s(w) = \bar{h}$ 。

End If

⑥ 基于  $\bar{\mathbf{x}}_w$  计算目标函数值  $P_r(w)$ 。

End For

⑦  $t = \operatorname{argmin}_{1 \leq w \leq (MU-H)} P_r(w), P(i) = P_r(t)$ 。

If  $P(i) \geq P(i-1)$

⑧ 返回迭代次数  $I(j) = i$ , Break。

End If;

⑨  $[\bar{\mathbf{x}}_t]_h = [\bar{\mathbf{x}}_t]_h; \forall 1 \leq h \leq H$

⑩ 交换矩阵  $\mathbf{B}$  的第  $s(t)$  列与矩阵  $\mathbf{D}$  的第  $t$  列。

End iteration

End for

计算系统迭代总数  $\sum_{j=1}^J I(j)$  和总吞吐量  $C_{\text{Total}} = \sum_{j=1}^J C(j)$ 。

$[\mathbf{Q}]_h < 0, \forall h$ , 目标函数无解或者有无穷大解, 算法终止, stop。

$P(i) \geq P(i-1)$ , 目标函数值不能进一步降低, 得到最优解, 终止迭代, Break<sup>[13]</sup>。

接下来分析算法复杂度, 多用户分集包括  $J$  个子模块, 第  $j$  个子模块内有  $I(j)$  次迭代, 每次迭代包括  $U(j)M(j) - H(j)$

次循环, 总的计算复杂度为  $O\left\{\sum_{j=1}^J I(j)[U(j)M(j) - H(j)]\right\}$ 。

可行解非零元素个数  $Z(j) \in [U(j), U(j) + M(j) - 1]$ , 随着迭代的进行,  $Z(j)$  逐渐减少, 迭代次数  $I(j)$  与时隙数  $M(j)$  成正比,  $I(j) < M(j)$ 。时变信道下, 资源分割成  $J$  个子模块, 其总时隙数  $M$  不变, 迭代次数之和  $\sum_{j=1}^J I(j) \leq I$ , 因此

$O\left\{\sum_{j=1}^J I(j)[U(j)M(j) - H(j)]\right\} \approx \frac{1}{J^2} \cdot O\{I(UM - H)\}; \mathbf{B}_j \in$

$\mathbb{R}^{H(j) \times H(j)}, H(j) \approx H/J$ , 求解方程  $\mathbf{B}_j \cdot \mathbf{x} = \mathbf{d}_j$  的速度远快于  $\mathbf{B} \cdot$

$x = d$  方程的求解。因此, 算法计算复杂度获得了极大的降低, 具有很好的实用性。

### 3 仿真结果与分析

参考 3GPP LTE 系统参数设置: 300 个用户 ( $U = 300$ ) 共享 20 MHz 带宽, 即 100 个频带 ( $N = 100$ ); 用户时延不超过 20 ms; 全缓冲业务模式下多用户分集周期为 10 ms ( $M = 20$ ,  $T_{\text{slot}} = 0.5 \text{ ms}$ ); 多用户相干时间的最小值为 2 ms ( $M(j) = 4$ )。接收功率  $P_u$  与权重因子  $W_u$  分别设置为 100 mW 和 1。瑞利信道中, 不同瑞利均值参数下, 多用户分集系统吞吐量改善情况如图 2 所示。与  $T_{\text{slot}}$  为周期的轮询调度自适应资源分配方式<sup>[14]</sup>相比, 多用户分集能够获得比较好的吞吐量增益; 随着用户数的增加和系统时延的延长, 此算法可以获得更好的吞吐量增益。

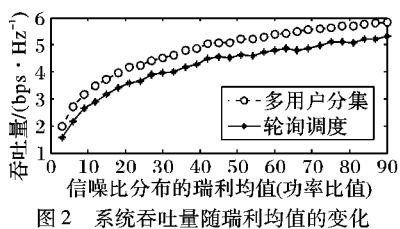


图 2 系统吞吐量随瑞利均值的变化

多次独立重复实验, 用户业务量和信道状态随机分布, 信道瑞利均值为 30, 吞吐量改善情况如图 3 所示。相对于轮询调度方式, 多用户分集系统吞吐量提高 13% 左右; 系统吞吐量不稳定的情况得到改善, 其标准差为  $Div\_var = 0.025$ , 小于轮询调度标准差  $RR\_var = 0.0416$ 。

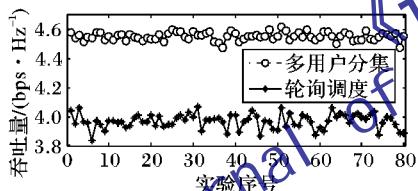


图 3 独立重复实验吞吐量改善情况

终端能耗随迭代次数的变化情况如图 4 所示。以轮询调度终端能耗作为基准, 多用户分集方式终端能耗可以降低 65% 以上, 节能增益随着迭代次数的增加而增加, 经过 14 次以内的迭代达到最优解。相比原始整体处理算法, 多用户分集节能增益略有降低, 但是其迭代次数之和有所减少, 单次迭代循环次数和计算量都明显降低, 算法可以快速收敛。

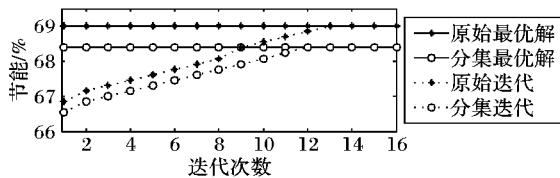


图 4 节能增益随迭代次数的变化

### 4 结语

本文提出结合多用户分集的绿色资源分配算法, 算法可以有效跟踪信道状态的变化, 动态调整多用户分集子模块大小, 多用户分集以提高系统吞吐量; 分集子模块内, 用户资源尽可能集中在比较少的时隙内传输, 通过分析非线性目标函数的性质, 运用凸优化理论快速寻找最优解。该算法性能稳定, 计算复杂度低, 满足用户公平性要求, 获得了良好的吞吐

量增益和节能增益。该算法独立于基站节能自适应资源分配算法, 两者的融合可以进一步降低系统能耗。

### 参考文献:

- [1] DAI L, WANG Z, YANG Z. Time-frequency training OFDM with high spectral efficiency and reliable performance in high speed environments [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(4): 695–707.
- [2] HUANG B, TIAN H, CHEN L, et al. DRX-aware scheduling method for delay-sensitive traffic [J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(12): 1113–1115.
- [3] TING K C, WANG H C, TSENG C C, et al. Energy-efficient DRX scheduling for QoS traffic in LTE networks [C]// Proceedings of the 2011 IEEE 9th International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications. Piscataway: IEEE Press, 2011: 213–218.
- [4] CHU F S, CHEN K C, FETTWEIS G. Green resource allocation to minimize receiving energy in OFDMA cellular systems [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(3): 372–374.
- [5] SHENG Y, PENG M, WANG W. Power-saving aware time-frequency 2D resource allocation algorithm for E-MBMS networks [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008, 31(2): 80–84. (盛煜, 彭木根, 王文博. E-MBMS 网络降低终端能耗时频资源分配算法[J]. 北京邮电大学学报, 2008, 31(2): 80–84.)
- [6] TSE D N C, HANLY S V. Multiaccess fading channels, part I: polymatroid structure, optimal resource allocation and throughput capacities [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1998, 44(7): 2796–2815.
- [7] FAN J, YIN Q, LI G Y, et al. Adaptive block-level resource allocation in OFDMA networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(11): 3966–3972.
- [8] MAZZOTTI M, MORETTI S, CHIANI M. Multiuser resource allocation with adaptive modulation and LDPC coding for heterogeneous traffic in OFDMA downlink [J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(10): 2915–2925.
- [9] ABOUTORAB N, HARDJAWANA W, VUCETIC B. An iterative Doppler-assisted channel estimation for high mobility OFDM systems [C]// Proceedings of the 2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway: IEEE Press, 2012: 2095–2100.
- [10] BERGEL I, BENEDETTO S. Bounds on the capacity of OFDM underspread frequency selective fading channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(10): 6446–6470.
- [11] CHENG L, HENTY B, BAI F, et al. Doppler spread and coherence time of rural and highway vehicle-to-vehicle channels at 5.9 GHz [C]// Proceedings of the 2008 IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1–6.
- [12] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 36–145.
- [13] LU K, LU H. Linear programming [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 31–39. (卢开澄, 卢华明. 线性规划[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 31–39.)
- [14] LIN D, JIANG Y, HAMDI M. Selective request round-robin scheduling for VOQ packet switch architecture [C]// Proceedings of the 2011 International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1–5.