

## 基于 QoS 保证的广播/组播 OFDM 系统资源分配策略

盛 煜 彭木根 王文博  
(北京邮电大学电信工程学院 北京 100876)

**摘 要:** 该文提出了一种基于服务质量(QoS)保证的次优广播/组播 OFDM 系统资源分配算法。算法在最优分配原则的基础上采用不同广播/组播业务目标速率作为约束条件,并以业务组中最差接收用户传输速率作为搜索目标,使得业务组中全部用户达到 QoS 要求,算法的公平性及有效性得到提高;同时采用时频格作为分配算法中的基本资源单位,以降低分配算法的复杂度。仿真结果表明,改进分配策略的系统吞吐量性能接近最优广播/组播分配算法,提高了广播/组播系统资源分配的公平性。

**关键词:** 广播/组播 OFDM 系统; 资源分配; 服务质量要求; 时频格

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)12-2943-04

## QoS-Aware Resource Allocation Algorithm for Broadcast/Multicast OFDM Systems

Sheng Yu Peng Mu-gen Wang Wen-bo

(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** A sub-optimal resource allocation algorithm for broadcast/multicast OFDM system is presented in this paper. By proposed algorithm, the fairness and efficiency is improved based on taking the target rates of different services as Quality of Service (QoS) constraint and finding out the lowest rate in one service group for comparison in order that all users can get target QoS requirement. At the same time, the complexity of this algorithm is reduced by introduction of two-dimensional Frequency-Time Grid (FTG) scheme. Simulation results show that the efficiency of proposed allocation algorithm is obvious which has significant higher fairness and throughput being very close to the upper bound of optimum method.

**Key words:** Broadcast/Multicast OFDM system; Resource allocation; QoS; Frequency-time grid

### 1 引言

基于移动网络的广播/组播架构已逐渐成为移动通信系统研究和发展的热点之一。3GPP定了相应的广播/组播框架,即多媒体广播/组播业务(Multimedia Broadcast/Multicast Services, MBMS)。广播/组播模式是指无线网络中一个数据源向多个用户发送数据的点到多点业务,在不改变网络结构的基础上实现网络资源共享。对于增强的广播/组播网络(Enhanced-MBMS),主要以正交频分复用(OFDM)技术作为物理层的基础,合理的资源分配方案可以有效地提高系统的频谱效率以及吞吐量。

广播/组播网络的资源分配与传统分配算法<sup>[1-3]</sup>差别在于系统发射端需要向一组用户发送相同的数据,根据该组用户的整体接收情况做合理的分配,则可以有效地提高系统性能。文献[4]在假设已知所有用户的瞬时信道状态条件下,提出了以吞吐量最大化为目标的广播/组播资源分配算法。文

献[5]提出了基于多发送天线的广播/组播资源分配算法。虽然二者都能获得较高的系统吞吐量,但并没有保证用户达到业务的QoS要求。本文在预先设定不同业务目标速率基础上,提出了一种次优的广播/组播资源分配算法。

### 2 系统及资源分配模型

#### 2.1 系统模型

图1给出广播/组播系统模型。系统发送端具有 $N_t$ 根发送天线,接收用户数为 $K$ ,且接收端只采用一根接收天线。如图所示,广播/组播数据经调制编码后送入不同的子载波承载。对于广播/组播系统,接收相同数据的用户被定义为一个组,该组用户接收相同子载波上承载的信息。业务所使用的子载波及相应的比特分配数目需根据该接收组中接收质量最差用户的信道状态来确定。这里需假设所有用户的信道状态已知,在实际系统中,可以通过类似3GPP R6-MBMS中的Counting过程进行粗略统计。资源分配的信息可以通过单独的控制信道进行传输(如MBMS架构下的控制信道MCCH<sup>[6]</sup>)。

文献[7]提出了基于OFDM帧的时频格(FTG)资源分配算法,该方案合理地利用了多用户分集并有效地降低最优算

2007-06-01 收到, 2007-10-08 改回

国家 863 计划项目(2006AA01Z257)和国家自然科学基金项目(60602058 和 60572120)资助课题

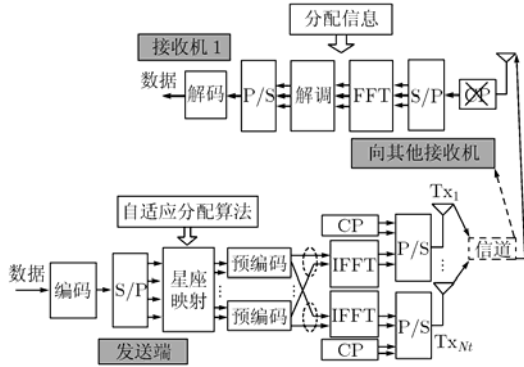


图 1 广播/组播 OFDM 系统

法所带来的复杂度。因此，在广播/组播 OFDM 系统中同样使用类似的分配方案。将广播/组播的 OFDM 系统进行时域和频域最小分配单位的划分，如图 2 所示。假设系统频率资源(有效带宽)被分为  $N$  个频率块，每一个频率块包含一组子载波；同样，时间轴上的资源(一个 OFDM 帧)被分成  $I$  个时隙，一个时隙包含多个 OFDM 符号。 $N$  和  $I$  的具体值可以根据特定的无线传播环境及系统需求来设定。在传输的一帧中，时频格的总数为  $N \times I$ ，分配过程中以时频格作为基本单位分配给接收广播/组播数据的用户。为了清楚地说明分配过程，将处于第  $n$  个频率块、第  $i$  个时隙的时频格定义为  $(i, n)$ 。

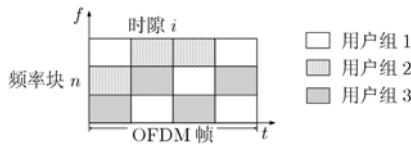


图 2 基于时频格的资源分配帧

2.2 资源分配模型

针对 OFDM 系统，可以采用最大化吞吐量的准则进行自适应子载波分配。而基于 OFDM 的广播/组播系统仍可以按照类似的准则进行资源分配。假设广播/组播系统下一个基站服务的用户总数为  $K$ ，且考虑理想情况下所有用户占用不同资源单位时的信道信息已知， $R_k$  表示系统中第  $k$  个用户的传输速率， $B_{i,n}$  表示时频单位  $(i, n)$  所承载的比特数。设  $c_{i,n}$  表示在  $(i, n)$  时频单位中各子载波所承载的比特数，同一时频块中个载波承载比特数相同，且有  $c_{i,n} \in D = \{1, 2, \dots, M\}$ ，这里  $M$  是星座映射后一个载波所能承载的最大比特数。因此，

$$B_{i,n} = \Delta b \times \Delta t \times c_{i,n} \quad (1)$$

式中  $\Delta b$  和  $\Delta t$  分别为一个资源单位的频率带宽和时隙长度。这样，传输速率  $R_k$  可以表示为

$$R_k = \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N B_{i,n} \times \theta_{i,n,k} = \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N \Delta b \times \Delta t \times c_{i,n} \times \theta_{i,n,k} \quad (2)$$

式中  $\theta_{i,n,k}$  是表示第  $k$  个用户是否占用时频单位  $(i, n)$  的二进制数值，可表示为

$$\theta_{i,n,k} = \begin{cases} 1, & \text{用户 } k \text{ 使用时频格 } (i, n) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

与传统资源分配算法不同，对不同用户  $k$  与  $k'$ ，当其属于同一个广播/组播组时， $\theta_{i,n,k}$  和  $\theta_{i,n,k'}$  是相同的。在广播/组播系统中，某一特定组中的信道质量最差的用户限制了该业务总的吞吐量的大小。因此，带有功率限制的优化问题可以根据广播/组播组中信道增益最小的用户进行讨论。以最大化系统吞吐量为目标，总发射功率最大值为  $P_T$ ，则优化问题可表示如下：

$$\max_{W_{i,n}, c_{i,n}, \theta_{i,n,k}} \sum_{k=1}^K R_k = \max_{W_{i,n}, c_{i,n}, \theta_{i,n,k}} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N \Delta b \times \Delta t \times c_{i,n} \times \theta_{i,n,k} \quad (4)$$

约束条件为

$$\sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N \max_k (p_{B_{i,n,k}} \times \theta_{i,n,k}) \leq P_T \quad (5)$$

式(4)中， $W_{i,n}$  是  $1 \times N_t$  的预编码向量，可参照文献[5]进行设定。 $p_{B_{i,n,k}}$  是对于时频单位  $(i, n)$  接收端可靠接收  $B_{i,n}$  比特时发端所需要的发送功率。 $B_{i,n}$  与接收信噪比之间的关系可参照文献[8]得出。

3 基于 QoS 的自适应资源分配算法

按照最大吞吐量准则(MA)进行时频格的分配虽然可以使某一个特定的广播/组播用户组获得最高的传输速率，但 MA 准则并没有考虑到每个广播/组播业务的目标速率需求。因此，为了提高系统资源分配的公平性及有效性，考虑将不同业务的目标速率引入分配算法，形成基于 QoS 的自适应资源分配。

假设系统提供的广播/组播业务数为  $Q$ 。令所有  $Q$  个广播/组播业务的目标速率向量为  $\nu_q (q = 1, 2, \dots, Q)$ ，则对于接收业务  $q$  的用户  $k$ ，其传输速率应该大于  $\nu_q$ ，这样才能可以保证业务的正常接收。即  $R_k - \nu_q \geq 0, (k \rightarrow q)$ 。式中， $k \rightarrow q$  表示第  $k$  个用户订阅了业务  $q$  并且接收业务  $q$  的数据，并将其作为分配过程中的另一个约束条件。将目标速率的限制引入广播/组播分配算法，形成一种次优的分配策略。预编码向量的判决过程参考文献[5]。具体过程如下：

步骤 1 分配算法初始化。根据用户的订阅信息构造用户组集合，表示如下：

$$M_q = \{k | k \in K, a_{k,q} = 1\}, \forall q \in Q \quad (6)$$

式中  $a_{k,q}$  表示用户  $k$  是否订阅业务  $q$ ，可表示为

$$a_{k,q} = \begin{cases} 1, & \text{用户 } k \text{ 订阅业务 } q \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

令  $x_{i,n,q}$  表示业务  $q$  是否占用时频单位  $(i, n)$ ，则

$$x_{i,n,q} = \begin{cases} 1, & \text{业务 } q \text{ 使用时频单位 } (i, n) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

由式(7)、式(8)可以得:  $\theta_{i,n,k} = x_{i,n,q} \times a_{k,q}$ 。

步骤 2 完成第 1 次 MA 分配。

根据等式(2), 可以计算出系统中每个用户的传输速率。 $R_k$  寻找到每个业务组中用户的最小传输速率  $r_q = \min_{q \in Q, k \rightarrow q} R_k$ , 并定义两个业务集合  $\Psi_1$  和  $\Psi_2$ , 分别代表达到目标速率的业务集和没有达到目标速率的业务集。即  $\Psi_1 = \{q | r_q \geq \nu_q, q \in Q\}$ ,  $\Psi_2 = \{q | r_q < \nu_q, q \in Q\}$ 。

步骤 3 寻找业务集  $\Psi_1$  中的业务  $q^*$ , 使得业务  $q^*$  具有最大的传输速率余量。

$$q^* = \arg \max_{q \in Q} (r_q - \nu_q) \quad (9)$$

对于业务  $q^*$ , 寻找时频格  $(i', n')$ , 满足如下条件:

$$(i', n') = \arg \min_{i' \in I_{q^*}, n' \in N_{q^*}} \left( \sum_{k \rightarrow q^*} \Delta b \times \Delta t \times c_{i', n'} \times \theta_{i', n', k} \right) \quad (10)$$

$(I_{q^*}, N_{q^*})$  为分配给业务  $q^*$  的时频单位集合。对业务  $q^*$  没有占用时频格  $(i', n')$  时的最小传输速率  $r_{q^*}'$  重新计算。若  $r_{q^*}' \geq \nu_{q^*}$ , 则令  $x_{i', n', q^*} = 0$ ,  $\theta_{i', n', k} = 0$ ; 若  $r_{q^*}' < \nu_{q^*}$ , 则令  $\Psi_1 = \Psi_1 - \{q^*\}$ 。

步骤 4 寻找业务集  $\Psi_2$  中的业务  $\bar{q}^*$ , 使得业务  $\bar{q}^*$  对时频格  $(i', n')$  具有最大的传输速率。

$$\bar{q}^* = \arg \max_{k \rightarrow \bar{q}^*} \sum_{k \rightarrow \bar{q}^*} \Delta b \times \Delta t \times c_{i', n'} \times \theta_{i', n', k} \quad (11)$$

将时频格  $(i', n')$  分配给业务  $\bar{q}^*$ , 并令  $x_{i', n', \bar{q}^*} = 1$  和  $\theta_{i', n', k} = 1$ 。重新计算业务  $\bar{q}^*$  的最小速率  $r_{\bar{q}^*}'$ 。若  $r_{\bar{q}^*}' \geq \nu_{\bar{q}^*}$ , 则  $\Psi_2 = \Psi_2 - \{\bar{q}^*\}$ 。

步骤 5 分配算法结束判决

若  $\Psi_1 = \Phi$  或  $\Psi_2 = \Phi$  ( $\Phi$  为空集), 则算法结束; 否则转至步骤 3。

子载波分配完成后, 比特分配可以采用改进的 Levin-Campello 算法<sup>[4]</sup>。上述步骤中, 第 1 步是算法的初始化; 第 2 步通过 MA 算法求得分配结果作为算法的初始值, 这样可以保证分配算法按照吞吐量最大的方向进行; 第 3 步到第 5 步是对广播/组播组中速率最小的用户进行相应的支持, 确保了公平性的加强。

### 4 仿真结果与分析

为了验证提出的基于 QoS 的广播/组播资源分配算法, 将系统平均吞吐量作为评价标准, 同其他算法进行对比。仿真中采用如下参数: 子载波数  $N_c = 64$ ; 频率块数为  $N=32$  或  $N=16$ , 帧长 2ms 的时隙数为 8; 接收端进行理想的信道估计; 广播/组播用户数为 6-30; 星座映射后一个载波所能承载的最大比特数为  $M = 6$ ; 多径信道为 3 径的 Rayleigh 衰落信道, 各径上的信号功率按指数规律衰减, 并对 3 径的信号功率进行归一化; 噪声为加性复高斯噪声。

图 3 所示为系统吞吐量随平均信噪比变化的曲线, 用户数  $K$  为 10。可以看出, 基于 QoS 保证的分配算法与 MA 算法相比吞吐量略有下降, 性能接近 MA 算法。但由于考虑了

不同业务的 QoS 保证, 因此算法的公平性及有效性较 MA 算法有显著提高; 当时频格的分辨率设定的较高时, 即  $N$  较大时, 系统吞吐量有所增加, 这是以算法复杂度的增加为代价的。图 4 所示为系统吞吐量随用户数变化的曲线, SNR 为 10dB。当系统信噪比较低时, 由于最优算法和本算法都不能获得较高传输速率, 因此性能差别不大; 信噪比较高时, 最优算法可以获得更高的传输速率, 而提出算法需要满足所有广播/组播业务的目标速率, 此时的性能差别有所增加。

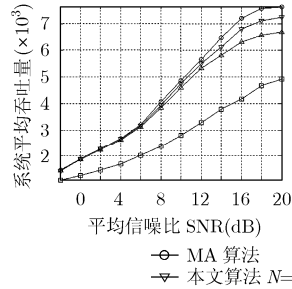


图 3 信噪比不同时系统平均吞吐量对比  $K=10$

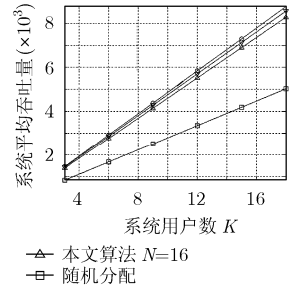


图 4 用户数不同时系统平均吞吐量对比 SNR=10dB

为了评估提出算法的公平性, 利用业务实际速率与目标速率的方差 (VAR) 对公平性进行定义, 即  $VAR = \sum_{q=1}^Q \left( \min_{k \rightarrow q} R_k - \nu_q \right)^2$ 。当 VAR 越小时, 表明各广播/组播业务可以较好地达到目标速率, 因此公平性越好。图 5 所示为不同算法的公平性对比, 这里对 VAR 进行了归一化。本文提出算法的公平性与 MA 算法相比有较大提高。图 6 所示为不同算法在广播/组播业务数为 5 时的载波分配比例, 这里设定各业务目标速率相同, 因此载波分配比例趋于平均。

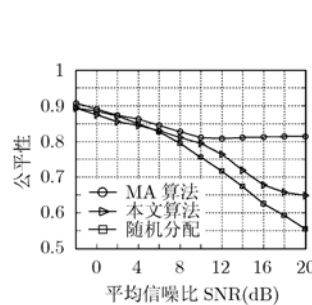


图 5 不同算法公平性(VAR)比较

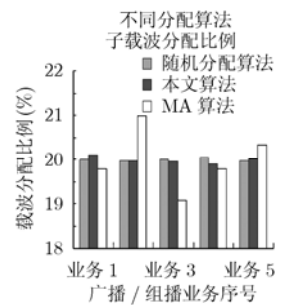


图 6 相同目标速率时不同算法载波分配比例

### 5 结束语

为了提高广播/组播系统资源分配的公平性及有效性, 本文将不同广播/组播业务的目标速率引入分配算法, 形成基于 QoS 保证的自适应资源分配方案。算法以业务组中最差接收用户传输速率作为搜索目标, 使得业务组中全部用户达到 QoS 要求; 同时, 基于时频格的分配方案可以有效地降低

算法的复杂度。仿真结果表明,本文提出的分配算法在吞吐量性能上可以接近最优算法,但由于考虑了不同业务的 QoS 保证,故算法的公平性有显著提高。

### 参 考 文 献

- [1] Wong C Y, Cheng R S, and Letaief K Ben, *et al.* Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit and power allocation. *IEEE J. on Select. Areas Commun.*, 1999, 17(10): 1747-1758.
  - [2] Shen Z, Andrews J G, and Evans B L. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional constraints. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2005, 4(6): 2726-2737.
  - [3] Willink T J and Wittke P H. Optimization and performance evaluation of multicarrier transmission. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 1997, 43(2): 426-440.
  - [4] Suh C and Hwang C S. Dynamic subchannel and bit allocation for multicast OFDM systems. PIMRC'04, Barcelona, Spain, 2004, 3: 2102-2106.
  - [5] Ozbek B, Ruyet D L, and Khiari H. Adaptive resource allocation for multicast OFDM systems with multiple transmit antennas. *IEEE ICC'06*, Istanbul, Turkey, 2006, 10: 4409-4414.
  - [6] Sheng Yu, Peng Mugen, and Wang Wenbo. Adaptive traffic multiplexing for MBMS in the UMTS system based on the scalable coding. CHINACOM'06, Beijing, China, 2006: 1-5.
  - [7] Zhang Xing, Wang Wenbo, and Liu Yuanan. An efficient multiuser frequency-time grid (FTG) allocation algorithm for OFDM-based broadband wireless systems. PIMRC'04, Barcelona, Spain, 2004, 3: 2092-2096.
  - [8] Goldsmith A J and Chua S G. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels. *IEEE Trans. on Commun.*, 1997, 45(10): 1218-1230.
- 盛煜: 男, 1978年生, 博士生, 研究方向为无线多媒体广播/组播及无线资源调度算法。
- 彭木根: 男, 1978年生, 博士生, 讲师, 研究方向为3G/B3G和无线宽带接入网的无限资源管理和组网技术等。
- 王文博: 男, 1965年生, 教授, 博士生导师, 北京邮电大学电信工程学院院长, 研究方向为无线通信系统信号处理及无线宽带通信系统关键技术。