

# 具有时延 QoS 保证的 OFDM 中继系统 子载波配对与功率分配算法

黄高飞<sup>1,2</sup>, 罗丽平<sup>3</sup>, 张广驰<sup>4</sup>, 唐 冬<sup>1</sup>, 秦家银<sup>2</sup>

(1. 广州大学机械与电气工程学院, 广东广州 510006; 2. 中山大学信息科学与技术学院, 广东广州 510275;  
3. 广西民族大学信息科学与工程学院, 广西南宁 530006; 4. 广东工业大学信息工程学院, 广东广州 510006)

**摘 要:** 本文研究具有直接通信链路的 OFDM 解码转发(Decode-and-Forward, DF)中继系统的子载波配对与功率分配算法, 目标是在满足业务时延 QoS 要求的前提下最大化系统容量. 利用有效容量模型, 首先把 OFDM DF 中继系统的子载波配对与功率分配问题形成为混合整数规划问题, 然后将其转化为连续松弛凸规划问题, 利用凸优化方法得到原问题的最优解, 从而提出了一种联合最优的子载波配对与功率分配迭代算法. 理论推导结果和仿真结果表明, 最优子载波配对与功率分配不仅取决于子载波的信道增益, 还取决于业务的时延 QoS 要求. 与已有算法相比, 本文算法获得的有效容量最大.

**关键词:** 正交频分复用; 无线中继; 服务质量; 子载波配对与功率分配; 有效容量; 凸优化

**中图分类号:** TN911.5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2013)02-0335-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.02.020

## Subcarrier Pairing and Power Allocation Algorithm for OFDM Relay Systems with Delay QoS Guarantees

HUANG Gao-fei<sup>1,2</sup>, LUO Li-ping<sup>3</sup>, ZHANG Guang-chi<sup>4</sup>, TANG Dong<sup>1</sup>, QIN Jia-yin<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006, China;

2. School of Information Science and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China;

3. School of Information Science and Engineering, Guangxi University for Nationalities, Nanning, Guangxi 530006, China;

4. School of Information Science, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

**Abstract:** In this paper, the subcarrier pairing and power allocation algorithm for OFDM decode-and-forward (DF) relay systems with direct link is investigated. The goal is to maximize the system throughput while meeting the delay QoS requirements of transmission services. Firstly, by integrating the effective capacity model, the subcarrier pairing and power allocation problem is formulated as a mixed integer programming problem. Then, the problem is transformed into a continuous relaxed convex problem. By using the convex optimization theory, the optimal solution of the primal problem is obtained, and an alternative algorithm to achieve jointly optimal subcarrier pairing and power allocation is proposed. The derived analytical and simulation results show that both the optimal subcarrier pairing and power allocation depend on not only the channel quality of the subcarriers but also the delay QoS requirements of the service. Compared with the existing algorithms, our proposed algorithm achieves the highest effective capacity.

**Key words:** orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM); wireless relay; quality of service (QoS); subcarrier pairing and power allocation; effective capacity; convex optimization

## 1 引言

随着移动多媒体业务应用逐步普及, 人们期望新一代无线通信系统不仅具有更大的容量, 还要支持具有各种时延 QoS (quality-of-service) 要求的业务<sup>[1,2]</sup>, 如时延 QoS 要求较宽松的非实时数据业务和具有严格时延 QoS 要求的实时音视频业务. 然而, 由于无线信道的高度时

变性, 设计大容量且具有时延 QoS 保证的无线通信系统非常困难. 一方面, 要使系统容量达到最大, 信道质量较好时应分配较多资源, 信道质量较差时分配较少资源甚至不分配资源, 例如经典的注水功率分配策略<sup>[3]</sup>. 另一方面, 为了提供时延 QoS 保证, 系统应提供恒定的数据传输速率, 为此, 信道质量较好时应分配较少资源, 信道质量较差时应分配较多资源, 从而使接收信噪比为定

收稿日期: 2012-04-26; 修回日期: 2012-07-25

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61102070, No. 61173148); 广东省教育部产学研结合项目 (No. 2011B090400581); 广州市科技计划 (No. 12C42051578, No. 11A11060133); 广东省自然科学基金 (No. S2011040004135); 广西省自然科学基金 (No. 2012GXNSFBA053162)

值.因此,如何在系统容量和提供时延 QoS 保证这两者间进行折中,是下一代无线通信系统需解决的重要问题.

此外,由于无线信道质量的不可靠性,提供确定性的时延 QoS 保证存在困难.例如,对瑞利或莱斯衰落信道,系统可用带宽最大下界为 0,因此无法提供具有确定时延界限的 QoS 保证<sup>[4]</sup>.由此,提供统计型时延 QoS 保证<sup>[5]</sup>,使时延超限概率满足给定的要求更为可行.根据统计型时延 QoS 保证的相关理论,Wu 和 Negi 提出了数据链路层的有效容量模型<sup>[4]</sup>,其描述了满足业务统计型 QoS 要求时系统数据传输的最大可达速率,该模型为设计具有高效 QoS 保证机制的无线通信系统提供了重要理论依据.基于有效容量模型,学者们研究了包括多载波系统<sup>[6]</sup>、单载波中继系统<sup>[7]</sup>和 OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access)系统<sup>[8]</sup>等多种无线通信系统的资源分配.

本文研究具有时延 QoS 保证的两跳 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiple)解码转发(Decode-and-Forward,DF)中继系统的子载波配对与功率分配,目标是最大化系统有效容量.针对 OFDM DF 中继系统的子载波配对与功率分配,已有许多相关研究,但其目标均为最大化系统容量,没有考虑业务的时延 QoS 要求.例如,文献[9~11]研究了具有直接通信链路的 OFDM DF 中继系统的子载波配对与功率分配算法,这些算法均无法支持时延 QoS 较严格的实时交付业务.

针对上述问题,本文利用有效容量模型,研究具有直接通信链路的 OFDM DF 中继系统的子载波配对与功率分配算法,在满足业务时延 QoS 要求的前提下最大化系统容量.首先,把 OFDM DF 中继系统的子载波配对与功率分配问题形成混合整数规划(Mixed Integer Programming, MIP)问题;其次,把该问题转化为连续松弛凸规划问题,通过求解转化的凸问题得到了原问题的最优解,提出了联合最优的子载波配对与功率分配迭代算法.理论分析和仿真结果表明,最优子载波配对和功率分配不仅取决于子载波信道增益,还取决于业务时延 QoS 要求.与已有算法相比,本文提出的子载波配对和功率分配算法可提供不同类型的时延 QoS 保证,特别地,当业务时延 QoS 要求较严格时,本文算法优于已有算法.仿真结果进一步验证了本文算法可获得比已有算法更大的有效容量.

## 2 QoS 指数和有效容量

根据大偏差原理<sup>[12]</sup>,对于数据到达时间和系统服务时间为稳态遍历随机过程的动态队列,可以证明队列长度  $Q(t)$  依分布收敛至一个随机变量  $Q(\infty)$ ,从而使  $-\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\log(\Pr\{Q(\infty) > x\})}{x} = \theta$ .以上关系式中的参数

$\theta$  是统计型 QoS 保证的关键指标,表示 QoS 违例概率的指数衰减率.当  $\theta$  较小时,表示系统需要提供的 QoS 保证服务要求较宽松.而当  $\theta$  较大时,表示系统需要提供的 QoS 保证服务要求较严格.由于与统计型 QoS 保证紧密相关,因此把  $\theta$  称为 QoS 指数.

与传统的香农公式描述的物理层信道容量模型不同,有效容量是包含业务 QoS 要求的数据链路层容量模型,刻画了系统提供时延 QoS 保证服务时可以支持的最大数据传输速率.对于块衰落信道,定义  $R(i)$  为第  $i$  帧传输的数据比特数,则  $\{R(i), i = 1, 2, \dots\}$  为不相关的离散时间稳态遍历随机过程,其有效容量定义为<sup>[4]</sup>

$$E_c(\theta) \triangleq -\frac{1}{\theta} \log E \{ e^{-\theta R(i)} \} \text{ (比特/帧)} \quad (1)$$

## 3 系统模型

具有直接通信链路的两跳(two-hop)OFDM 中继系统模型<sup>[9~11]</sup>如图 1 所示,由源(S)、中继(R)和目的(D)三个终端组成,中继策略是 DF.系统总频谱带宽为  $B$ Hz,OFDM 调制子载波个数为  $N$ .源按帧发送数据,每帧传输时间为  $T_f$ ,且分为时间相等的两个时隙.在第一个时隙,源发送 OFDM 调制信号,中继和目的端接收,且中继选择部分子载波分别独立解码;在第二个时隙,中继对子载波进行配对,使用 OFDM 调制转发解码后的数据至目的端,目的端使用最大比合并接收并解码经中继转发的数据.在此,第一个时隙的部分子载波的数据不经中继转发而由目的端直接接收和解码,因此中继仅需转发第一个时隙接收的部分子载波上的数据<sup>[9]</sup>.

假设系统链路为块衰落信道.第一个时隙的子载波  $m$  与第二个时隙的子载波  $n$  配对记为子载波对  $(m, n)$ .

$\gamma_m^{SD}$ 、 $\gamma_m^{SR}$  和  $\gamma_n^{RD}$  分别表示源至目的端(SD)、源至中继(SR)和中继至目的端(RD)的第  $m$  个子载波和第  $n$  个子载波上的信道增益.

源在第  $m$  个子载波上的发射功率为  $P_m^S$ ,中继在第  $n$  个子载波上的发射功率为  $P_n^R$ ,均为 QoS 指数  $\theta$  和瞬时信道增益  $\gamma$  的函数,其中  $\gamma \triangleq [\gamma_1^{SD}, \dots, \gamma_N^{SD}, \gamma_1^{SR}, \dots, \gamma_N^{SR}, \gamma_1^{RD}, \dots, \gamma_N^{RD}]$ .假设系统总平均功率约束为  $P_{\text{mean}}$ <sup>[7]</sup>,则有

$$E_\gamma \left\{ \sum_{m=1}^N P_m^S + \sum_{n=1}^N P_n^R \right\} \leq P_{\text{mean}} \quad (2)$$

其中,  $E_\gamma \{ \cdot \}$  表示对随机矢量  $\gamma$  取数学期望.

## 4 子载波配对与功率分配算法

### 4.1 问题描述

本文研究的 OFDM DF 中继系统的子载波对  $(m, n)$  可工作于中继模式或直接链路模式<sup>[9]</sup>,子载波对  $(m,$

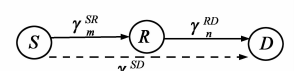


图1 具有直接通信链路的 OFDM DF 中继系统模型

$n$ ) 上的最大可达速率可表示为<sup>[11]</sup>

$$C_{m,n} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_{m,n} P_{m,n})$$

其中  $P_{m,n} = P_m^S + P_n^R$ , 且下式成立<sup>[11]</sup>

$$P_m^S = \begin{cases} \frac{\gamma_n^{RD}}{\gamma_m^{SR} + \gamma_n^{RD} - \gamma_m^{SD}} P_{m,n}, & \text{中继模式} \\ P_{m,n}, & \text{直接链路模式} \end{cases} \quad (3)$$

$$P_n^R = \begin{cases} \frac{\gamma_m^{SR} - \gamma_n^{RD}}{\gamma_m^{SR} + \gamma_n^{RD} - \gamma_m^{SD}} P_{m,n}, & \text{中继模式} \\ 0, & \text{直接链路模式} \end{cases}$$

$\gamma_{m,n}$  为子载波对  $(m,n)$  等效信道增益, 定义为<sup>[11]</sup>

$$\gamma_{m,n} \triangleq \begin{cases} \frac{\gamma_m^{SR} \gamma_n^{RD}}{\gamma_m^{SR} + \gamma_n^{RD} - \gamma_m^{SD}}, & \text{中继模式} \\ \gamma_m^{SD}, & \text{直接链路模式} \end{cases}$$

引入变量  $\phi_{m,n}$ , 如果第一个时隙的子载波  $m$  与第二个时隙的子载波  $n$  配对, 则  $\phi_{m,n} = 1$ , 否则  $\phi_{m,n} = 0$ . 显然,  $\phi_{m,n}$  应满足以下约束条件:

$$\sum_{n=1}^N \phi_{m,n} = 1, \quad \forall m, \quad \sum_{m=1}^N \phi_{m,n} = 1, \quad \forall n$$

综上所述, OFDM 中继系统的最大化系统有效容量的优化问题可描述为:

$$\begin{aligned} & \max_{C_{m,n}, \phi_{m,n}} -\frac{1}{\theta} \log E_\gamma \left[ 4^{-\frac{\beta}{N} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \phi_{m,n} C_{m,n}} \right] \\ & \text{s.t.} \quad E_\gamma \left\{ \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \left[ \frac{1}{\gamma_{m,n}} (4^{C_{m,n}} - 1) \right] \right\} \leq P_{\text{mean}}, C_{m,n} \geq 0 \\ & \sum_{n=1}^N \phi_{m,n} = 1, \quad \forall m, \quad \sum_{m=1}^N \phi_{m,n} = 1, \quad \forall n, \phi_{m,n} \in \{0, 1\} \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $\beta \triangleq \theta T B / (2 \log 2)$ .

式(4)为难以处理的混合整数规划问题. 若允许  $\phi_{m,n}$  在非负实数集上取值, 并定义  $R_{m,n} \triangleq \phi_{m,n} C_{m,n}$ , 则式(4)可改写为以下连续松弛规划问题:

$$\begin{aligned} & \min_{R_{m,n}, \phi_{m,n}} E_\gamma \left[ 4^{-\frac{\beta}{N} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \phi_{m,n} R_{m,n}} \right] \\ & \text{s.t.} \quad E_\gamma \left\{ \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \left[ \frac{\phi_{m,n}}{\gamma_{m,n}} (4^{\frac{R_{m,n}}{\phi_{m,n}}} - 1) \right] \right\} \leq P_{\text{mean}}, R_{m,n} \geq 0 \\ & \sum_{n=1}^N \phi_{m,n} = 1, \quad \forall m, \quad \sum_{m=1}^N \phi_{m,n} = 1, \quad \forall n, \phi_{m,n} \geq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

可以证明, 式(5)的目标函数和总平均功率约束条件给定的函数为凸函数<sup>[13]</sup>. 因此, 式(5)为凸优化问题, 存在唯一的全局最优解.

## 4.2 最优子载波配对与功率分配算法

式(5)可通过块坐标下降法(block coordinate descent method)<sup>[13]</sup>在对偶域求解. 首先, 给定子载波配对方案, 求得功率分配的最优解. 其次, 给定功率分配, 求得子载波配对的最优解.

根据式(5), 可构造如下拉格朗日函数:

$$L = E_\gamma \left[ 4^{-\frac{\beta}{N} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N R_{m,n}} \right] + \lambda \left[ E_\gamma \left\{ \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \left[ \frac{\phi_{m,n}}{\gamma_{m,n}} \cdot (4^{\frac{R_{m,n}}{\phi_{m,n}}} - 1) \right] \right\} - P_{\text{mean}} \right] - \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \epsilon_{m,n} R_{m,n} \quad (6)$$

其中, 拉格朗日乘子  $\lambda \geq 0$  和  $\epsilon_{m,n} \geq 0$ .

如果给定子载波配对方案, 定义以下集合

$$S_0 \triangleq \{(m,n) \mid \phi_{m,n} > 0, \forall m, \forall n\} \quad (7)$$

则对  $(m,n) \notin S_0$ , 有  $\phi_{m,n} = 0$  且  $R_{m,n}(\theta, \gamma) = 0$ .

根据 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件<sup>[13]</sup>,  $R_{m,n}(\theta, \gamma)$  的最优解应满足以下方程组:

$$\frac{\partial L}{\partial R_{m,n}(\theta, \gamma)} = 0, \quad \forall (m,n) \in S_0 \quad (8)$$

对式(8)进行求解, 可得最优解

$$\frac{R_{m,n}(\theta, \gamma)}{\phi_{m,n}} = \frac{N}{\beta \sum_{(i,j) \in S_{\text{opt}}} \phi_{i,j} + N} \log_4 \left[ \frac{\gamma_{m,n}}{\gamma_0} \prod_{(i,j) \in S_{\text{opt}}} \left( \frac{\gamma_{i,j}}{\gamma_{m,n}} \right)^{-\frac{\beta}{N} \phi_{i,j}} \right]$$

其中  $(m,n) \in S_{\text{opt}}$ , 且

$$S_{\text{opt}} \triangleq \left\{ (m,n) \in S_0 \mid \log_4 \left[ \frac{\gamma_{m,n}}{\gamma_0} \prod_{(i,j) \in S_{\text{opt}}} \left( \frac{\gamma_{i,j}}{\gamma_{m,n}} \right)^{-\frac{\beta}{N} \phi_{i,j}} \right] > 0 \right\}$$

注意到  $\phi_{m,n} \in \{0, 1\}$ , 因此对  $(m,n) \in S_{\text{opt}}$  有

$$\frac{R_{m,n}(\theta, \gamma)}{\phi_{m,n}} = \frac{N}{\beta N_{\text{opt}} + N} \log_4 \left[ \frac{\gamma_{m,n}}{\gamma_0} \prod_{(i,j) \in S_{\text{opt}}} \left( \frac{\gamma_{i,j}}{\gamma_{m,n}} \right)^{-\frac{\beta}{N}} \right] \quad (9)$$

其中,  $N_{\text{opt}} \triangleq |S_{\text{opt}}|$ , 即  $S_{\text{opt}}$  的势, 临界阈值  $\gamma_0$  可根据总平均功率约束条件求得.

根据式(9), 可得  $P_{m,n}(\theta, \gamma)$  的最优解为

$$\bar{P}_{m,n}(\theta, \gamma) = \begin{cases} \frac{1}{W_{\text{opt}}} - \frac{1}{\gamma_{m,n}}, & (m,n) \in S_{\text{opt}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$W_{\text{opt}} \triangleq \gamma_0^{\frac{N}{\beta N_{\text{opt}} + N}} \prod_{(i,j) \in S_{\text{opt}}} (\gamma_{i,j})^{\frac{\beta}{\beta N_{\text{opt}} + N}} \quad (11)$$

当给定功率分配时, 式(6)可改写为

$$L_1 = \lambda \left[ E_\gamma \left\{ \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \left[ \frac{\phi_{m,n}}{\gamma_{m,n}} (4^{\frac{R_{m,n}}{\phi_{m,n}}} - 1) \right] \right\} - P_{\text{mean}} \right]$$

则  $L_1$  为  $\lambda$  和  $\Phi$  的函数, 其中  $\Phi$  是由  $\phi_{m,n}$  构成的向量. 令  $\Phi$  的可行域为  $\Omega$ , 由于  $L_1$  为  $\Phi$  的凸函数, 对任意的  $\Phi \in \Omega$ , 应有<sup>[13]</sup>:

$$L_1(\Phi') - L_1(\Phi) \geq \nabla_{\Phi} L_1(\Phi)^T (\Phi' - \Phi), \quad \Phi' \in \Omega \quad (12)$$

其中,  $T$  为矩阵转置运算,  $\nabla_{\Phi} L_1(\Phi, \lambda) \triangleq \lambda F$ ,  $F$  为由  $F_{m,n}$  构成的向量, 且有

$$F_{m,n} = \begin{cases} \frac{1}{W_{\text{opt}}} - \frac{1}{\gamma_{m,n}} - \frac{\log 4}{W_{\text{opt}}} \log \left( \frac{\gamma_{m,n}}{W_{\text{opt}}} \right), & W_{\text{opt}} > \gamma_{m,n} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

根据式(12), 如果  $\bar{\Phi}$  为全局最优解, 应有

$$\bar{\Phi} = \arg \min_{\Phi} \phi_{m,n} F_{m,n} \quad (14)$$

易知式(14)为指派问题,可通过匈牙利(Hungary)算法求解。

综上所述,可得联合最优的子载波配对与功率分配迭代求解算法具体描述如下:

- (1)初始化:  $\Phi = \Phi^{(0)}$ ,  $l = 0$ ;
- (2)基于  $\Phi^{(l)}$ ,根据式(7)定义  $S_0^{(l)}$ ;
- (3)基于  $S_0^{(l)}$ ,根据式(11)计算  $W_{opt}^{(l)}$ ;
- (4)根据式(13)计算  $F_{m,n}^{(l)}$ ;
- (5)根据式(14),求解  $\bar{\Phi}$ ,并令  $\Phi^{(l+1)} = \bar{\Phi}$ ;
- (6)如果  $\Phi^{(l+1)} \neq \Phi^{(l)}$ ,则更新  $\Phi^{(l)} = \Phi^{(l+1)}$ ,  $l = l + 1$ ,并返回步骤(2),否则执行(7);
- (7)得到最优子载波配对  $\bar{\Phi} = \Phi^{(l)}$ ,根据  $W_{opt}^{(l)}$ 、式(10)和式(3)计算最优功率分配。

文献[9~11]提出的子载波配对和功率分配算法没有考虑业务时延 QoS 要求,子载波配对和功率分配仅与子载波信道增益有关.然而,本文提出的最优子载波配对和功率分配不仅与子载波信道增益有关,还与业务的时延 QoS 要求有关.此外,式(10)为联合注水功率分配<sup>[6]</sup>,因此本文算法可提供各种类型的时延 QoS 保证。

## 5 仿真结果

仿真参数设置如下:衰落信道采用 COST 207 标准中的 6 径典型城市(TU)信道模型<sup>[14]</sup>,子载波个数  $N = 128$ ,总平均功率约束为  $P_{mean} = 10\text{dB}$ .帧时长  $T_f = 2\text{ms}$ ,系统带宽  $B = 100\text{kHz}$ ,各子载波信道的加性高斯白噪声方差设为 1.源与目标之间的距离归一化为  $d_{SD} = 1$ ,大尺度路径衰落指数设为 4.假设源与中继和目标位于同一直线,  $d_{SR}$ 为源与中继的距离,  $d_{RD}$ 为中继与目标的距离。

图 2 比较了不同算法获得的有效容量,其中  $d_{SR} = d_{RD} = 0.5$ .由图 2 可见,本文提出的最优算法获得的有效容量最大.而且,对任意的 QoS 指数  $\theta$ ,本文提出的最优算法获得的有效容量都近似为一个远大于 0 的常数,而文献[9~11]算法获得的有效容量随着  $\theta$  的增大急剧减小,当  $\theta \rightarrow \infty$  时,其有效容量近似为 0.因此,本文提出的最优算法可支持不同时延 QoS 要求的业务,而文献[9~11]算法均无法支持时延 QoS 要求较严格的实时业务,这是由于本文提出的最优算法的功率分配为联合注水分配,而文献[9~11]算法的功率分配为传统的注水功率分配.对等功率分配算法,也有类似的结论.图 3 进一步比较了当  $\theta = 1000$  时,中继位于不同位置时各种算法获得的有效容量.由图 3 可以看出,无论中继位于源与目标之间的任何位置,本文提出的最优算法都可以获得最大的有效容量,而已有算法的有效容量均近

似为 0.

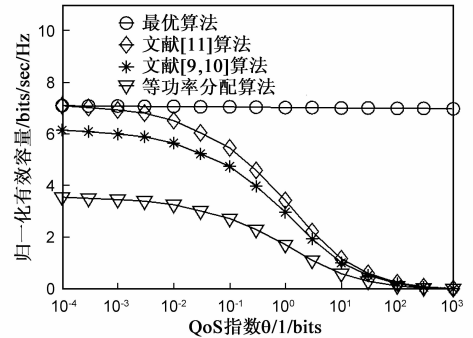


图2  $d_{SR} = d_{RD} = 0.5$ 时不同算法的有效容量

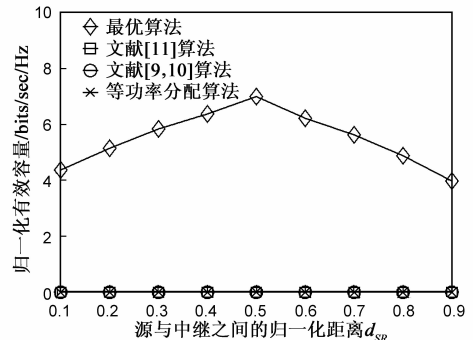


图3 中继位置不同时不同算法的有效容量

图 4 比较了当功率分配均为联合注水功率分配时,不同子载波配对算法系统获得的有效容量,其中  $d_{SR} = d_{RD} = 0.5$ .部分中继排序子载波配对表示先分别把源至中继链路的子载波和中继至目标链路的子载波按信道增益大小排序并配对,子载波对工作于中继模式或直接链路模式.全中继排序子载波配对的子载波配对方式与部分中继排序子载波配对相同,区别在于所有子载波都对都工作于中继模式.无排序子载波配对是表示直接把源至中继链路的第  $n$  个子载波与中继至目标的第  $n$  个子载波配对.由图 4 可见,相对于现有的子载波配对算法,本文提出的最优子载波配对方案获得有效容量最大.图 5 进一步比较了当  $\theta = 1000$  时,中继位于不同位置时各种子载波配对方案获得的有效容量.由图 5 可以看出,无论中继位于源与目标之间的任何位

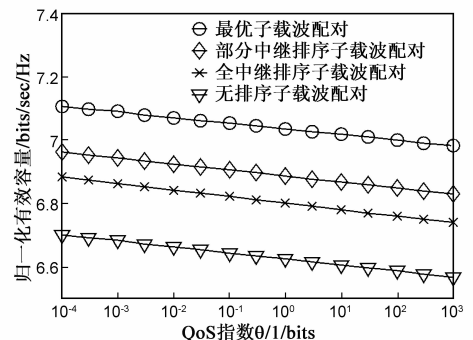


图4  $d_{SR} = d_{RD} = 0.5$ 时不同子载波配对的有效容量

置,本文提出的子载波配对算法都可以获得最大的有效容量。

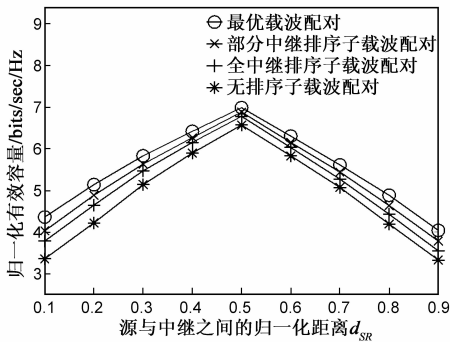


图5 中继位置不同时不同子载波配对的有效容量

## 6 结论

本文研究了具有时延 QoS 保证的 OFDM DF 中继系统的子载波配对与功率分配,旨在最大化系统的有效容量,满足各种业务的时延 QoS 要求。利用有效容量模型,首先把子载波配对和功率分配问题形成为混合整数规划问题。其次,把该问题转化为连续松弛的凸问题。通过求解转化后的凸问题,得到子载波配对和功率分配的最优解,并提出联合最优的子载波配对和功率分配迭代算法。理论推导结果与仿真结果表明,最优子载波配对和功率分配不仅取决于子载波信道增益有关,还取决于业务时延 QoS 要求。与已有算法相比,本文算法可获得更大的有效容量。此外,本文算法可以支持不同类型时延 QoS 要求的业务,尤其当业务时延 QoS 要求较严格时,本文算法的性能优于已有算法。因此,本文提出的最优算法可有效提高具有时延 QoS 要求的系统容量。

## 参考文献

- [1] 雷春娟,曹晏波,李承恕.一种适用于 W-CDMA 系统的多业务无线资源调度算法[J].电子学报,2003,31(7):1005-1007.  
Lei Chun-juan, Cao Yan-bo, Li Cheng-xu. A multi-service radio resource scheduling algorithm suitable for W-CDMA systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(7): 1005-1007. (in Chinese)
- [2] 孙岩,马华东.无线多媒体传感器网络 QoS 保障问题[J].电子学报,2008,36(7):1412-1420.  
Sun Yan, Ma Hua-dong. The QoS guarantee problem for wireless multimedia sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(7): 1412-1420. (in Chinese)
- [3] Goldsmith A. Wireless Communications[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.
- [4] D Wu, R Negi. Effective capacity: A wireless link model for support of Quality of Service[J]. IEEE Transactions on Wire-

less Communications, 2003, 2(4): 630-643.

- [5] C S Chang. Performance Guarantees in Communication Networks[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [6] J Tang, X Zhang. Quality-of-service driven power and rate adaptation for multichannel communications over wireless links [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(12): 4349-4360.
- [7] J Tang, X Zhang. Cross-layer resource allocation over wireless relay networks for quality of service provisioning [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(4): 645-656.
- [8] H X Zhang, Y Ma, D Yuan, et al. Quality-of-service driven power and sub-carrier allocation policy for vehicular communication networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(1): 197-206.
- [9] L Vandendorpe, R Duran, J Louveaux, et al. Power allocation for OFDM transmission with DF relaying [A]. IEEE International Conference on Communications[C]. Beijing: IEEE Communications Society, 2008. 3795-3800.
- [10] L Vandendorpe, J Louveaux, Oguz, et al. Rate-optimized power allocation for DF-relayed OFDM transmission under sum and individual power constraints [J]. EURASIP Journal on Wireless Communication Networks. 2009, Article ID 814278.
- [11] C N Hsu, H J Su, P H Lin. Joint subcarrier pairing and power allocation for OFDM transmission with decode-and-forward relaying [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(1): 399-414.
- [12] G L Choudhury, D M Lucantoni, Whitt W. Squeezing the most out of ATM [J]. IEEE Transactions on Communications, 1996, 44(2): 203-217.
- [13] Bertsekas D P. Nonlinear Programming [M]. Belmont, MA: Athena Scientific, 1999.
- [14] M Patzold. Mobile Fading Channels [M]. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd, 2002.

## 作者简介



黄高飞 男,1978 年出生于广东信宜,中山大学博士生,广州大学教师,主要研究方向为无线通信系统资源分配技术。

E-mail: huanggaofei@126.com

罗丽平 女,1980 年出生于湖北麻城,中山大学博士,广西民族大学教师,主要研究方向为无线通信,认知无线电。

E-mail: lping.luo@gmail.com