

基于合作中继的 OFDM 蜂窝网络的 QoS 感知子载波分配算法*

黄晓燕, 毛玉明, 吴 凡

(电子科技大学 通信与信息工程学院, 成都 611731)

摘要: 针对基于中继的 OFDM 蜂窝网络, 提出了一种基于合作中继的 QoS 感知子载波分配算法, 即 C-QSA (cooperative QoS-aware subcarrier allocation) 算法。C-QSA 算法利用基站与中继节点之间的合作传输机制来保证 QoS 业务的速率要求, 允许中继节点进行比特重分配, 充分利用无线系统的时变及多用户分集特性, 提高无线资源的利用效率。C-QSA 算法将子载波分配问题抽象为非线性整数规划, 以最大化系统效用为目标, 同时满足 QoS 业务的速率要求。仿真结果表明, C-QSA 算法在用户效用及吞吐量等性能方面都有明显优势, 系统实际效用接近理论最优值。

关键词: 合作中继; 子载波分配; 服务质量

中图分类号: TN914.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2010)08-3086-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2010.08.074

QoS-aware subcarrier allocation algorithm for cooperative relay-based OFDM cellular networks

HUANG Xiao-yan, MAO Yu-ming, WU Fan

(School of Communication & Information Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: This paper proposed a QoS-aware subcarrier allocation algorithm for cooperative relay-based OFDM cellular network with both QoS and BE services, referred to as C-QSA. In C-QSA, employed cooperative transmission between the base-station (BS) and the relay-station (RS) to fulfill the requirements of QoS users. Moreover, allowed each RS to perform bit reallocation to fully exploit time-varying channel state and multiuser diversity, so as to achieve efficient radio resource utilization. C-QSA formulated the design of subcarrier allocation as a non-linear integer optimization problem, which aimed at maximizing the system sum utility while satisfying the data rate requirements of QoS users. Numerical results demonstrate that C-QSA is able to significantly improve the network performance in terms of user utility and system throughput, and the system utility achieved by C-QSA is very close to the optimal value.

Key words: cooperative relay; subcarrier allocation; quality-of-service(QoS)

0 引言

无线通信发展至今,人们对无线传输的数据速率和服务质量的要求不断提高,而无线信道具有的多径衰落特性是阻碍信道容量增加和服务质量改善的主要原因之一。分集技术可以通过在发射端发射多个信号样本,在接收端合并多个经历独立衰落的信号样本,以对抗无线信道中的衰落。近年来,合作分集技术作为一种新兴的传输技术得到了越来越多的关注。在多用户场景中,合作分集技术利用无线传输的广播特性,通过单天线节点间“共享”彼此天线构成虚拟的 MIMO (multiple-input multiple-out-put, 多输入多输出) 多天线系统,以获得空间分集增益。大量研究表明合作分集技术能够有效地增加网络覆盖范围,提高传输可靠性^[1,2]。

目前,OFDM (orthogonal frequency division multiplexing, 正交频分复用) 技术以支持突发高速数据传输、频谱效率高、抗多径能力强等显著特征已被公认为 B3G/4G 系统的核心技术

之一。而在传统蜂窝网络里部署 RS (relay station, 中继节点) 来提高系统容量,扩大网络覆盖范围,正作为一种新的基于中继的蜂窝网络架构成为了业界的一个研究热点^[3,4]。

本文针对基于中继的 OFDM 蜂窝网络,引入合作分集技术,并考虑具有不同 QoS 要求的混合业务,重点研究该网络场景下的多用户子载波分配问题。目前,关于基于合作中继的 OFDM 蜂窝网络的资源优化的文献还比较有限。文献[5]针对只有一个中继节点的网络场景提出了一种启发式的子载波分配算法,但并未考虑业务的 QoS 要求,以及中继节点的选取等问题。文献[6]研究了 OFDMA 蜂窝网络下行链路的机会功率调度问题,提出了一个以最大化系统吞吐量为目标的随机优化模型。但是作者没有考虑合作中继,同时也没讨论子载波分配以及用户公平性问题。文献[7]研究了基于网络合作的资源分配问题,利用相邻小区基站之间的合作分集来保证 QoS 用户的速率要求,但是作者没有考虑合作基站进行比特重分配的情况,以及资源分配的用户公平性问题。

收稿日期: 2010-01-27; 修回日期: 2010-03-25 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60802024)

作者简介: 黄晓燕(1982-),女,四川成都人,博士研究生,主要研究方向为无线网络资源管理 (beacon420@gmail.com); 毛玉明(1956-),男,教授,博导,主要研究方向为网络体系结构与协议、宽带通信网、无线通信网等; 吴凡(1978-),男,博士研究生,主要研究方向为无线自组织网络。

本文的主要贡献是为支持混合业务的 OFDM 蜂窝网络里提出了一个简单有效的基于合作中继的 QoS 感知子载波调度算法,兼顾了资源分配的效率和公平性,解决了合作中继节点的选取以及子载波分配问题。该算法将子载波分配问题形式化为非线性整数规划问题,再将其松弛为标准凸规划问题并提出了一种基于最优松弛解的 0-1 整数调整算法。

1 系统模型

本文考虑基于合作中继的 OFDM 蜂窝网络下行链路多用户网络环境,如图 1 所示,包含一个基站, M 个中继节点和 K 个用户,其中包含 K_Q 个 QoS 用户和 K_B 个 BE 用户。系统的整个带宽被划分成 N 个等宽正交的子载波。假设无线信道为时变频率选择性信道,但是每个子载波上的衰落近似为平坦衰落,并且每个子载波的信道增益在一个调度周期内保持不变^[5,6]。

为了提高通信可靠性,保证 QoS 用户的质量要求,本文采用基站与中继节点合作传输的方式为 QoS 用户传输数据,而由基站直接向 BE 用户传输数据。每个 QoS 用户只能选择一个合作中继节点。假设所有中继节点均采用译码前向 (decode-and-forward, DF) 的中继方式,并且不能同时发送和接收数据。每个调度周期分为两个时长相等的阶段:在第一阶段,基站发送数据,中继节点和用户接收数据,中继节点并对接收到的数据进行处理;在第二阶段,基站与中继节点通过频分复用的方式占用信道,基站为 BE 用户发送数据,而中继节点则为对应的 QoS 用户转发数据。最后,QoS 用户需要按照某种规则将两个阶段接收到的数据合并起来以获得合作分集增益。

为了充分利用无线系统的时间、空间、频率及多用户分集特性,提高无线资源的利用效率,本文允许中继节点在第二阶段进行比特重分配。每个中继节点首先解码在第一阶段接收到的关于对应 QoS 用户的数据,并根据当前的信道质量情况将接收到的数据在各个子载波之间进行重新分配;再将数据转发给对应的 QoS 用户。

本文采用基于效用的资源分配策略以兼顾资源分配的效率和公平性,使用不同的关于速率的效用函数来描述 QoS 用户和 BE 用户对网络提供的服务的满意程度^[8,9]。如图 2 所示,QoS 用户的效用函数是一个阶跃函数,一旦满足了速率要求,其效用值则为 1。而 BE 用户的效用函数则是一个非递减的凹函数。

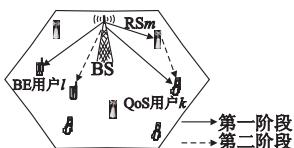


图1 基于合作中继的蜂窝网络

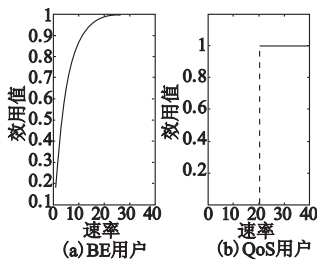


图2 BE和QoS用户的效用函数

假设每条无线链路用 (k, m) 表示。其中 $k \in \{1, \dots, K\}$, $m \in \{0, 1, \dots, M\}$, m 取值为 0 用于表示基站。定义 $H_{n,k,m}$ 为链路 (k, m) 在第 n 个子载波上的信道增益, σ^2 为白噪声功率谱密度。因此,链路 (k, m) 在第 n 个子载波上的单位发射功率信噪比可表示为

$$\eta_{n,k,m} = |H_{n,k,m}|^2 / \sigma^2 \tag{1}$$

定义 $c_{n,k,m}^{(\tau)}$ 为子载波分配指示符, $c_{n,k,m}^{(\tau)} = 1$ 表示在第 τ 阶段

将第 n 个子载波分配给链路 (k, m) ; 否则, $c_{n,k,m}^{(\tau)} = 0$ 。为了避免造成同信道干扰,每个子载波只能分配给一条链路,即

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=0}^M c_{n,k,m}^{(\tau)} = 1, \forall n, \tau \tag{2}$$

定义 $p_{k,m}^{(\tau)}, m \in \{0, 1, \dots, M\}$ 表示在第 τ 阶段基站或第 m 个中继节点在每个子载波上的平均功率。那么,用户 k 在第 τ 阶段在链路 (k, m) 上可获得的速率为

$$R_{k,m}^{(\tau)} = \sum_{n=1}^N c_{n,k,m}^{(\tau)} \log(1 + p_m^{(\tau)} \eta_{n,k,m}), \forall \tau, m \tag{3}$$

在高信噪比环境里, $R_{k,m}^{(\tau)}$ 可近似表示为

$$R_{k,m}^{(\tau)} \approx \sum_{n=1}^N c_{n,k,m}^{(\tau)} \log(p_m^{(\tau)} \eta_{n,k,m}) \approx \log[1 + \prod_{n=1}^N (p_m^{(\tau)} \eta_{n,k,m})^{c_{n,k,m}^{(\tau)}}] \tag{4}$$

根据式(4),定义第 τ 阶段链路 (k, m) 的等效信噪比为

$$SNR_{k,m}^{(\tau)} = \prod_{n=1}^N (p_m^{(\tau)} \eta_{n,k,m})^{c_{n,k,m}^{(\tau)}} \tag{5}$$

假设 QoS 用户 k 的合作中继节点为第 g_k 个中继节点,那么在第一阶段,第 g_k 个中继节点关于 QoS 用户 k 的数据的接收速率可表示为

$$R_{g_k} = \sum_{n=1}^N c_{n,k,0}^{(1)} \log(1 + p_0^{(1)} \zeta_{n,g_k}) \tag{6}$$

其中: ζ_{n,g_k} 表示基站到第 g_k 个中继节点的链路在第 n 个子载波上的单位发射功率信噪比。定义 R_k^{co} 为 QoS 用户 k 可获得的合作速率^[10]:

$$R_k^{co} = \log(1 + SNR_{k,0}^{(1)} + SNR_{k,g_k}^{(2)}), k \in \{1, 2, \dots, K_Q\} \tag{7}$$

综上所述,在一个调度周期内,QoS 用户 k 获得的有效速率为

$$R_k^{QoS} = \frac{1}{2} \min\{R_{g_k}, R_k^{co}\}, k \in \{1, 2, \dots, K_Q\} \tag{8}$$

BE 用户 k 获得的有效速率为

$$R_k^{BE} = \frac{1}{2} (R_{k,0}^{(1)} + R_{k,0}^{(2)}), k \in \{K_Q + 1, \dots, K\} \tag{9}$$

式(8)与(9)中的因子 1/2 表示一个调度周期包含了两个通信阶段。

2 基于合作中继的 QoS 感知子载波调度模型

2.1 合作中继节点选择策略

本文通过基站与中继节点之间的合作传输机制来保证 QoS 用户的服务质量要求,因此,合作中继节点的选取在无线资源分配中起着至关重要的作用。为每个 QoS 用户选择适当的合作中继节点不仅能保证 QoS 用户的服务质量要求,还能尽可能地节约无线资源,从而为 BE 用户分配更多的资源以提高其效用值。显而易见,如果中继节点与基站及用户之间的链路质量都足够好,那么选其作为合作中继节点就可以得到较高的合作分集增益。否则,基站与用户之间的通信质量将因其中任意一条链路质量较差而受到影响。

文本采用的中继节点选取方案是为每个 QoS 用户选择等效端到端信道增益最好的中继节点作为合作中继节点。假设 h_{sj} 和 h_{jk} 分别表示基站到第 j 个中继节点的链路的信道增益,以及第 j 个中继节点到 QoS 用户 k 的链路的信道增益,该信道增益可以通过对每条链路上的每个子载波的信道增益取范数获得。假设 g_k^j 表示 QoS 用户 k 以第 j 个中继节点作为合作中继节点时,该用户到基站的等效端到端信道增益。因此,QoS 用户 k 选择的合作中继节点的索引号可以表示为

$$g_k = \max_j \{g_k^j\}, j \in \{1, 2, \dots, M\} \tag{10}$$

$$\text{其中: } g_k^j = g(h_{sj}, h_{jk}) = \frac{1}{\frac{1}{|h_{sj}|^2} + \frac{1}{|h_{jk}|^2}} = \frac{|h_{sj}|^2 |h_{jk}|^2}{|h_{sj}|^2 + |h_{jk}|^2}$$

2.2 QoS 感知子载波调度模型

为了兼顾资源分配的效率和公平性,本文提出了一种基于效用的 QoS 感知子载波调度模型。该模型将子载波分配问题形式化为一个非线性整数规划问题(P1),以最大化系统效用为目标,同时满足 QoS 用户的速率要求以及同信道干扰等约束条件。

$$\text{P1: } \max_{c_{n,k,m}^{(\tau)}} \sum_{k=1}^K U_k(R_k) \quad (11.1)$$

s. t.

$$R_k^{\text{QoS}} \geq R_k^{\text{req}}, k \in \{1, 2, \dots, K_Q\} \quad (11.2)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=0}^M c_{n,k,m}^{(\tau)} = 1, \forall n, \tau \quad (11.3)$$

$$c_{n,k,m}^{(\tau)} \in \{0, 1\}, \forall n \quad (11.4)$$

式(11.2)表示了 QoS 用户的速率要求;式(11.3)表示同信道干扰约束,即任一子载波 n 在任何阶段只能分配给一条链路;式(11.4)表示子载波分配指示符的值只能取 0 或 1 整数。

值得注意的是 QoS 用户的效用函数是一个阶跃函数,那么一旦满足了约束条件(11.2),QoS 用户的总效用值将恒为 K_Q 。因此,规划 P1 的优化目标可等效为最大化 BE 用户的总效用:

$$\max_{c_{n,k,m}^{(\tau)}} \sum_{k=K_Q+1}^K U_k(R_k) \quad (12)$$

根据式(8),QoS 用户的速率约束条件式(11.2)可以重新表示为

$$\frac{1}{2} R_{g_k} \geq R_k^{\text{req}}, k \in \{1, 2, \dots, K_Q\} \quad (13)$$

$$\frac{1}{2} R_{g_k}^{\text{op}} \geq R_k^{\text{req}}, k \in \{1, 2, \dots, K_Q\} \quad (14)$$

规划 P1 是一个全局优化问题,包含了合作通信的两个阶段之间,以及基站与合作中继节点之间的资源协调。当子载波数 N 和用户数 K 取值较大的时候,求解非线性整数规划 P1 的计算复杂度非常高。因此,本文提出了一种基于合作中继的 QoS 感知子载波分配算法,即 C-QSA (cooperative QoS-aware subcarrier allocation) 算法,将原规划 P1 按照合作通信的两个阶段分解为两个子问题,分别完成第一阶段和第二阶段子载波分配,并且第二阶段的子载波分配依赖于第一阶段的分配结果。

3 基于合作中继的 QoS 感知子载波分配算法

3.1 第一阶段子载波分配算法

在合作通信的第一阶段,只有基站发送数据,而中继节点与用户接收数据。假设基站的总发射功率为 P ,那么基站在每个子载波上的平均功率为 $p_0^{(1)} = E_0/N$ 。根据式(11)~(13),第一阶段的子载波分配问题可以形式化为如下规划:

$$\text{P2: } \max_{c_{n,k,0}^{(1)}} \sum_{k=K_Q+1}^K U_k \left(\sum_n c_{n,k,0}^{(1)} \log_2 \left(1 + \frac{E_0 \eta_{n,k,0}}{N} \right) \right) \quad (15.1)$$

s. t.

$$\frac{1}{2} \sum_{n=1}^N c_{n,k,0}^{(1)} \log \left(1 + \frac{E_0 \zeta_{n,gk}}{N} \right) \geq R_k^{\text{req}}, k \in \{1, \dots, K_Q\} \quad (15.2)$$

$$c_{n,k,0}^{(1)} \in \{0, 1\}, \forall n \quad (15.3)$$

$$\sum_{k=1}^K c_{n,k,0}^{(1)} = 1, \forall n \quad (15.4)$$

$$c_{n,k,m}^{(1)} = 0, \forall m \neq 0 \quad (15.5)$$

式(15.2)表示 QoS 用户对应的中继节点在第一阶段的接收速率必须大于等于速率要求的两倍;式(15.5)表示在第一阶段只有基站发送数据。

规划 P2 是一个非线性整数规划问题,为降低求解 P2 的计算复杂度,本文首先对同信道干扰约束条件进行松弛,引入一个实数变量 $\rho_{n,k}, 0 \leq \rho_{n,k} \leq 1 (\forall n, k)$ 来替代原整数变量 $c_{n,k,0}^{(1)}$,从而将规划 P2 转换为一个凸规划问题,进而可采用优化工具直接求解。但是,最优松弛解 $\rho_{n,k}^*$ 是实数取值,需要将其调整为整数值才能完成子载波的分配。因此,本文基于最优松弛解提出了一个简单高效的子载波分配算法,如图 3 所示。首先,在所有未满足速率要求的 QoS 用户中查找 $\rho_{n,k}^*$ 值最大者,并将对应的子载波分配给它。当执行完第 2) 步之后,若还存在没有满足速率要求 QoS 用户,则执行补偿算法(图 4),对于任何一个未满足速率要求的 QoS 用户,依次为其分配信道容量最接近其速率要求的子载波,直到满足速率要求,或子载波分配完毕为止。最后,在第 4) 步为 BE 用户分配子载波:将每个子载波分配给 $u_k(R_k^*) r_{n,k}$ 取值最大者,其中边界效用值 $u(R_k^*) = dU(R)/dR|_{R=R_k^*}$;若同时存在多个最大者,则分配给 $\rho_{n,k}^*$ 取值最大者。其间,BE 用户一旦达到最优速率将不再参加分配。

- 1) 设子载波集合为 $S = \{n | n \leq N\}$,并初始化每个用户的速率;
- 2) while(1)
 - $\rho_{n,k}^* = \max_{n \in S, 1 \leq k \leq K_Q} \{\rho_{n,k}^*\}$;
 - if $\rho_{n,k}^* = 0$, 跳转至 3) ;
 - if $0.5 * R_{gk} \leq R_k^{\text{req}}$
 - $R_{gk} = R_{gl} + \log(1 + E_0 \zeta_{n,gk} N^{-1})$;
 - $\rho_{n,k}^* = 1; \rho_{n,l}^* = 0 (\forall l' \neq l); S = S \setminus l$;
 - else $\rho_{n,l}^* = 0$;
 - end-while
- 3) 判断是否所有 QoS 用户都满足了速率要求,如果不是,则对未满足要求的 QoS 用户执行补偿算法(图 4) ;
- 4) 设 BE 用户的集合为 $G = \{k | K_Q + 1 \leq k \leq K\}$,并根据 P2 的最优松弛解计算每个 BE 用户的最优速率 R_k^* ;
 - for $i = 1$ to $|S|$;
 - $L = \{l | l = \arg \max_{k \in G} u_k(R_k^*) r_{n,k}, \forall n \in S\}$;
 - if $|L| > 1$, then $l = \arg \max_{k \in G} \rho_{n,k}^*$;
 - if $R_l < R_l^*$
 - $R_l = R_l + \log_2(1 + E_0 \eta_{n,l,0} N^{-1})$;
 - $\rho_{n,l}^* = 1; \rho_{n,l'}^* = 0 (\forall l' \neq l); S = S \setminus n$;
 - else $G = G \setminus l$;
 - end-for

图 3 子载波分配算法

将未满足速率要求的 QoS 用户按速率差值逐渐递增的顺序排列;对每个 QoS 用户

```

while(  $\Delta R_k \geq 0$  )
    if  $S = \emptyset$ , stop;
     $c = \arg \min_{l \in S} |\log(1 + E_0 \zeta_{l,gk} N^{-1}) - \Delta R_k|$ ;
     $\rho_{c,k}^* = 1; \rho_{c,k'}^* = 0 (\forall k' \neq k); S = S \setminus c$ ;
     $R_m^k = R_m^k + \log(1 + E_0 \zeta_{l,gk} N^{-1})$ ;
     $\Delta R_k = \Delta R_k - \log(1 + E_0 \zeta_{l,gk} N^{-1})$ ;
end-while
                
```

图 4 补偿算法

3.2 第二阶段子载波分配算法

在合作通信的第二阶段,基站与中继节点通过频分复用的方式分别在不同的子载波上发送数据。其中,基站只向 BE 用户发送数据,而中继节点则向对应的 QoS 用户转发数据。因此,基站与中继节点需要根据当前基站到 BE 用户,中继节点

到 QoS 用户的链路的信道质量相互协作地分配子载波。

假设各中继节点的最大发射功率为 E_1 , 则各中继节点分配给每个子载波的平均功率为 $p_m^{(2)} = E_1/N$, 而基站在第二阶段对应的子载波平均功率仍为 $p_0^{(2)} = E_0/N$ 。根据式 (7) 以及第一阶段的分配结果, 速率约束条件式 (14) 等价于

$$R_{k,g_k}^{(2)} = \sum_{n=1}^N c_{n,k,g_k}^{(2)} \log\left(2 + \frac{E_1 \eta_{n,k,g_k}}{N}\right) \geq \log \beta \quad (16)$$

其中: $\beta = e^{2R_k^{req}} - 1 - \prod_{n=1}^N \left(\frac{E_0 \eta_{n,k,0}}{N}\right)^{c_{n,k,0}^{(1)}}$, 根据第一阶段的分配结果可获得 β 。

因此, 第二阶段的子载波分配问题可以形式化为如下规划:

$$P3: \max_{c_{n,k,m}^{(2)}} \sum_{k=K_Q+1}^K U_k \left(\sum_n c_{n,k,0}^{(2)} \log_2 \left(1 + \frac{E_0 \eta_{n,k,0}}{N} \right) \right) \quad (17.1)$$

s. t.

$$\sum_{n=1}^N c_{n,k,g_k}^{(2)} \log\left(1 + \frac{E_1 \eta_{n,k,g_k}}{N}\right) \geq \log \beta, k \in \{1, \dots, K_Q\} \quad (17.2)$$

$$c_{n,k,m}^{(2)} \in \{0, 1\}, \forall n \quad (17.3)$$

$$\sum_{k=1}^K c_{n,k,m}^{(2)} = 1, \forall n \quad (17.4)$$

规划 P3 同样是一个非线性整数规划, 因此可以采用与求解规划 P2 类似的方法得到第二阶段的子载波分配结果。最后, 根据两个阶段的分配结果, 结合式 (8) 与 (9) 便可得到每个用户获得的有效速率。

4 仿真结果与分析

假设 OFDM 蜂窝网络的半径为 1 000 m, 基站位于小区的中心, 中继节点均匀分布在距基站 300 m 处的圆周上, 而用户则均匀分布在距基站 700 ~ 1 000 m 的边缘区域。QoS 用户的速率要求均匀分布于 0.7 ~ 2 Mbps。假设 E_0 和 E_1 分别表示基站和中继节点的最大发送功率。具体仿真参数如表 1 所示。

假设节点 i 到 j 的路径增益 $G_{i,j}$ 为

$$G_{i,j} = d_{i,j}^{-\alpha} \psi_{i,j} \quad (18)$$

其中: $d_{i,j}$ 表示节点 i 与 j 之间的距离, α 表示路径损耗因子, 而 $\psi_{i,j}$ 表示对数正态分布的阴影衰落。

假设 r 表示速率, 单位是 bit/s/Hz, BE 用户的效用函数定义为

$$U_k(r) = 1 - e^{-0.1r}, r > 0 \quad (19)$$

表 1 仿真参数

参数	取值
系统总带宽/MHz	5
子载波数	128
中继节点个数	6
基站与中继节点之间的路径损耗因子	2
基站与用户, 中继节点与用户之间的路径损耗因子	4
阴影衰落方差/dB	7
基站最大发射功率(E_0)/W	8
中继节点最大发射功率(E_1)/W	4
白噪声功率谱密度/dBm	-105

为了验证 C-QSA 算法的有效性, 本文将 C-QSA 算法与以下两种子载波分配算法进行比较: a) 基于合作中继的简单 QoS 感知子载波分配算法 (simple cooperative QoS-aware subcarrier allocation, SC-QSA)^[7], 在该算法中, 中继节点直接在与第一阶段接收数据相同的子载波上转发数据, 而没有进行比特重分配; b) 非合作动态子载波分配算法 (non-cooperative QoS-aware subcarrier allocation, NC-QSA)^[11], 该算法没有采用合作分集技术。

在仿真实验中, BE 用户数 $K_b = 50$ 保持不变, 而 QoS 用户数 K_Q 从 15 逐步增长为 36。图 5 比较了三种算法获得的 BE 用户总效用。仿真结果表明, 随着 QoS 用户数的逐渐递增, BE 用户获得的总效用随之递减。然而, C-QSA 算法获得的 BE 用户总效用始终优于其他两种算法, 而且获得的增益随着 QoS 用户数的递增而不断增加。如图 5 所示, 当 QoS 用户数增长为 36 时, C-QSA 算法相对于 SC-QSA 算法和 NC-QSA 算法分别获得高达 8.31% 和 36.07% 的增益。

图 6 比较了三种算法获得的 BE 用户总吞吐量。仿真结果表明三种算法的 BE 用户总吞吐量均随着 QoS 用户数的递增而逐渐减小。但是, C-QSA 算法获得的吞吐量始终高于其他两种算法。

图 7 比较了在用户总数逐渐递增的情况下, C-QSA 算法获得的系统效用与理论最优效用的差别。仿真结果表明系统的总效用值随着用户数的增加而逐渐递增, C-QSA 算法获得的系统效用与理论最优效用的平均相对偏差为 2.03%。需要注意的是, 图 7 所示的理论最优效用是求解松弛凸规划问题得到的最优解, 它是原始非线性整数规划问题的最优解的上限。因此, 可推知 C-QSA 算法获得系统效用逼近原始优化问题的最优效用值。

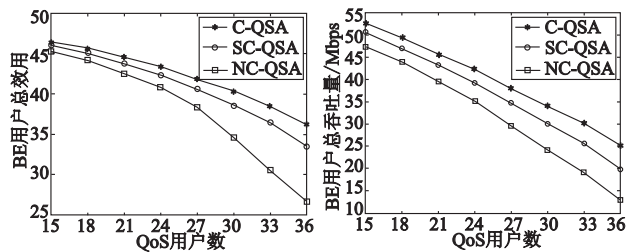


图 5 BE 用户总效用 vs. QoS 用户数

图 6 BE 用户总吞吐量 vs. QoS 用户数

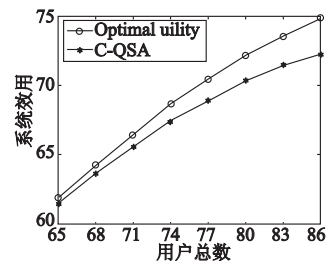


图 7 系统效用 vs. 用户总数

由此可见, 在混合业务场景下, 引入合作分集技术, 并允许中继节点进行比特重分配, 不仅能保证 QoS 用户的质量要求, 还能有效提高 BE 用户的吞吐量, 获得更高的系统效用。

5 结束语

本文针对下一代 OFDM 混合业务蜂窝网络提出了一个基于合作中继的 QoS 感知子载波调度算法。C-QSA 算法以最大化系统效用为目标, 并考虑 QoS 用户的速率要求, 解决了中继节点的选择以及子载波分配等问题。由于 C-QSA 算法引入了合作分集技术, 并允许中继节点进行比特重分配, 仿真结果表明 C-QSA 算法相比于未采用合作分集技术或中继节点未进行比特重分配的调度算法在用户效用及吞吐量等性能方面都有显著优势。

下一步的研究工作将是进行联合子载波, 功率分配, 以充分利用无线系统的时间、空间、频率和多用户分集特性, 进一步提高系统性能。

自然梯度批处理算法性能对比(在仿真中两种方法的共同参数设置相同)。从图 7(a)可以看出,本文提出的算法在收敛速度方面有很大的提高,在 100 个点左右能够收敛,而基于 ERM 算法需要接近 300 个数据点时才能收敛;图 7(b)给出了两种算法在收敛后串音误差的对比,可以看出基于 VRM 算法解的精确度要明显高于基于 ERM 的算法。

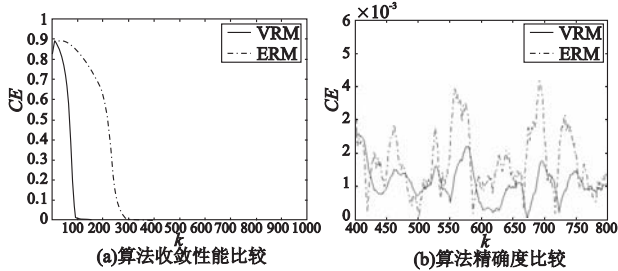


图7 算法串音误差性能比较

5 结束语

本文对基于 VRM 概率密度函数估计方法进行了研究,提出一种新的邻域函数构造方法,使得概率密度估计式对不同样点是在不同形式核函数上展开的;将该概率密度估计算法应用到自然梯度批处理盲分离算法中,并在前人工作的基础上对盲分离算法解的精确度作了进一步分析。仿真实验表明,相对于基于 ERM 概率密度估计的盲分离算法,本文提出的算法在收敛速度和精确度方面有很大优势,但由于概率密度估计算法需要逐样点设计合理的邻域函数,算法的运算复杂度相对有所增加。

参考文献:

- [1] CARDOSO. Blind beamforming for non-Gaussian signals [J]. IEE Proceedings F, 1993, 140(6): 224-230.
- [2] XIE S L, HE Z S, FU Y L. FIR convolutive BSS based on sparse representation [C]// Proc of the 2nd International Symposium on Neural Networks. 2005:532-537.
- [3] PARRA L, SPENCE C. Convolutive blind separation of non-stationary sources [J]. IEEE Trans on Speech Audio Processing, 2000, 8(3): 320-327.
- [4] PUNTONET C G, PRIETO A, ORTEGA J. New geometrical approach for blind separation of sources mapped to a neural network [C]// Proc of International Workshop on Neural Networks for Identifi-

cation, Control, Robotics and Signal/Image Processing. 1996: 174-182.

- [5] MANSOUR A, PUNTONET C G, OHNISHI N A. Simple ICA algorithm based on geometrical approach [C]//Proc of the 6th International Symposium on Signal Processing and Its Applications. 2001: 835-836.
- [6] 谭北海,赵敏,谢胜利. 带源个数估计的 BPSK 信号盲分离算法 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(7): 1624-1626.
- [7] AMARI S, CICHOCKI A, YANG H. A new learning algorithm for blind signal separation [J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 1996, 8: 657-663.
- [8] 何文雪. 自适应盲信号分离理论与算法研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2005.
- [9] 张贤达. 盲信号处理几个关键问题的研究 [J]. 深圳大学学报:理工版, 2004, 21(3): 196-200.
- [10] CHOI S, CICHOCKI A, AMARI S. Flexible independent component analysis [C]//Proc of IEEE Workshop on Neural Networks for Signal Processing. 1998: 83-92.
- [11] VLASSIS N, MOTOMURA Y. Efficient source adaptivity in independent component analysis [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 2001, 12(3): 559-565.
- [12] 付卫红,杨小牛,刘乃安,等. 基于概率密度估计盲分离的通信信号盲侦察技术 [J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2006, 34(10): 24-27.
- [13] 高鹰. 基于小波概率密度函数估计的盲信号分离算法 [J]. 广州大学学报:自然科学版, 2006, 5(6): 15-18.
- [14] 胡波平,何选森. 盲源分离的 SVM 概率密度函数估计算法 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(17): 142-144.
- [15] VAPNIK V N. 统计学习理论的本质 [M]. 张学工,译. 北京:清华大学出版社, 2000: 187-200.
- [16] 张κ,张素,章琛曦,等. 基于支持向量机的概率密度估计方法 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17(10): 2355-2357.
- [17] 杨行峻,郑君里. 神经网络与盲信号处理 [M]. 北京:清华大学出版社, 2003: 339-357.
- [18] PHAM D T, GARAT P. Blind separation of mixture of independent sources through a quasi-maximum likelihood approach [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1997, 45(7): 1712-1725.
- [19] CICHOCKI A, UNBEHAUEN R, MOSZCZYNSKI L, et al. A new online algorithm for blind separation of source signals [C]//Proc of ISANN. 1994: 406-411.

(上接第 3089 页)

参考文献:

- [1] SIRIWONGPAIRAT W P, SADEK A K, LIU K J R. Cooperative communications protocol for multiuser OFDM networks [J]. IEEE Trans on Communications, 2008, 7(7): 2430-2435.
- [2] SADEK A K, SU W, LIU K J R. Multi-node cooperative communications in wireless networks [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2007, 55(1): 341-355.
- [3] 3GPP TS 36.300. E-UTRA and E-UTRAN: overall description: stage 2 (release 8) [S]. 2008.
- [4] GENÇ V, MURPHY S, YU Y, et al. IEEE 802.16j relay-based wireless access networks: an overview [J]. IEEE Wireless Communications, 2008, 15: 56-65.
- [5] KANEKO M, POPOVSKI P. Radio resource allocation algorithm for relay-aided cellular ofdma system [C]// Proc of IEEE ICC. 2007: 4831-4836.

- [6] KIM B G, LEE Jang-won. Opportunistic power scheduling for OFDMA cellular networks with scheduling at relay stations [C]//Proc of IEEE WCNC. 2009.
- [7] PISCHELLA M, BELFIORE J-C. Resource allocation for QoS-aware OFDMA using distributed network coordination [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2009, 58(4): 1766-1775.
- [8] SONG Guo-cong, LI Ye. Cross-layer optimization for OFDM wireless networks-Part II: algorithm development [J]. IEEE Trans on Communications, 2005, 4(2): 625-634.
- [9] KUO W H, LIAO W. Utility-based optimal resource allocation in wireless networks [C]// Proc of IEEE GLOBECOM. 2005.
- [10] LANEMAN J N. Cooperative diversity in wireless networks: algorithms and architectures [D]. [S. l.]: Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [11] HUANG Xiao-yan, MAO Yu-ming, WU Fan. Low complexity utility-based scheduling algorithm for heterogeneous services in OFDM wireless networks [C]// Proc of ICCAS. 2009: 48-52.