

基于 OFDMA 子载波功率分配的 FFR 广义分析模型^①

■ 伟^② 尹长川 乐光新

(北京邮电大学信息与通信工程学院泛网无线通信教育部重点实验室 北京 100876)

摘 要 基于正交频分多址接入(OFDMA)系统对分数阶频率复用(FFR)技术进行了研究。通过引入功率比值和软频率复用因子的概念,提出了 FFR 广义分析模型。目前现存的 FFR 方案均可作为特例统一在该广义分析模型的框架之下。该模型从 OFDMA 子载波功率分配的角度出发,为分析 FFR 提供了一种新的视角。理论分析表明,可以通过调整功率比值连续地调整软频率复用因子。对于基于 FFR 的 OFDMA 蜂窝系统,通过该模型可以有效地平衡小区容量和覆盖之间的矛盾。最后,基于全球互操作性微波接入(WiMAX)系统,从计算机仿真的角度证实了该结论,同时给出了功率比值的合理取值范围,这对于实际系统的设计颇具指导意义。

关键词 分数阶频率复用(FFR), 功率比值, 全球互操作性微波接入(WiMAX), 软频率复用因子, 同道干扰, 正交频分多址接入(OFDMA)

0 引 言

基于正交频分多址接入(orthogonal frequency division multiple access, OFDMA)的全球互操作性微波接入(worldwide interoperability for microwave access, WiMAX)系统由于能够提供高速无线数据业务,因此得到了广泛关注。但是,当相邻小区使用同一频段时,就会产生严重的同道干扰,从而直接导致系统性能的下降,特别是当用户处于小区边缘时性能下降更加严重。此时,覆盖问题将成为制约其发展的瓶颈。由于蜂窝系统是干扰受限系统,提高发射功率只会导致更强的干扰,并不能从根本上解决问题。因此,克服同道干扰变得至关重要。

与码分多址接入(code division multiple access, CDMA)系统不同,OFDMA 系统利用子载波之间的正交性较好地克服了小区内的干扰,但是小区间的同道干扰仍然是 OFDMA 系统中亟待解决的问题之一。

克服小区间同道干扰的方法主要有:(1)提高频率复用因子消除小区间的干扰^[1],但此法会降低频谱利用率;(2)通过无线网络控制(radio network control, RNC)单元给相邻小区分配不同的扰码,系统将变成 OFDM-CDMA 系统,但其实现的复杂度太高;(3)使用跳频 OFDMA(frequency hopping OFDMA, FH-

OFDMA)技术^[2],用户按照特定的跳频图样共享频谱。虽然跳频有频率分集增益,但是在某一个特定的时刻,每一个子载波只能固定地分配给一个特定的用户,从而损失了多用户分集增益;(4)采用宏分集解决方案,即通过把来自多个基站的信号进行合并,提高小区边缘用户的信道质量,但这种方案代价非常大,不仅多个基站下行链路要严格同步,而且需要添加额外的网络节点来负责相邻基站间的相互协调。(5)采用分数阶频率复用(fractional frequency reuse, FFR),这是一种简单有效的可行方法。FFR 通过在不同频段上发送不同的功率,将全部可用资源分为信道条件参差不齐的多个组,然后将信道条件比较好的资源分配给小区边缘的用户,将信道条件比较差的资源分配给中心用户。因此,FFR 可以有效地克服小区间干扰,提高小区边缘用户的吞吐量。FFR 技术源于全球移动通信系统(global system for mobile communications, GSM)网络^[3],后来被 WiMAX 论坛采用^[4],并被第三代合作伙伴计划(3rd generation partnership project, 3GPP)纳入其长期演进(long term evolution, LTE)标准^[5,6]。本文基于现有的 FFR 方案提出了广义 FFR 分析模型,从 OFDM 子载波功率分配的角度,把 FFR 技术划分为硬频率复用(hard frequency reuse, HFR)和软频率复用(soft fre-

① 863 计划(2007AA10Z235)和国家自然科学基金(60872049, 60871042)资助项目。
② 男,1980 年生,博士生,研究方向:无线通信;联系人, E-mail: xiwei19800919@gmail.com
(收稿日期:2009-02-24)

quency reuse, SFR)两大类并详细分析了二者的区别与联系。此外,文中定义了功率比值(power ratio)和软频率复用因子(soft frequency reuse factor)两个参数,分别对全频率复用系统(没有频率规划,频率复用因子为 1 的系统)、HFR 系统和 SFR 系统进行了讨论。理论分析表明,软频率复用因子是功率比值的连续函数。最后,基于 WiMAX 系统,对理论分析进行仿真验证,并给出功率比值的应用取值范围,这对实际的系统设计颇具指导意义。

1 广义 FFR 模型

在包含 N 个小区的复用簇中,用户 m 在资源单元(resource unit, RU) k 上的容量 $C_m(k)$ 可表示为^[7,8]

$$C_m(k) = B_{RU} \cdot \log_2 \left(1 + \beta \cdot \frac{g_{m,1} P_1(k)}{\sum_{n=1}^N g_{m,n}(k) P_n(k) + \sigma^2} \right) \tag{1}$$

其中, $g_{m,n}(k)$ 表示在资源单元 k 上从基站 n ($n = 1$ 表示服务基站)到用户 m 的增益,包含路径损耗、阴影衰落、天线增益等; $P_n(k)$ 表示小区 n 在资源单元 k 上的发射功率; σ^2 表示带限加性高斯白噪声(additive white Gaussian noise, AWGN)的功率; B_{RU} 是资源单元的带宽; β 是与目标误比特率 BER 有关的参数, $\beta = -1.5/\ln(5 \cdot BER)$ ^[9]。

由式(1)可知,由于全频率复用系统缺少频率规划和基站间协作,边缘用户会受到来自相邻小区的强干扰,而中心用户受到的干扰相对较弱。所以,对中心用户和边缘用户,应区别对待。因此,我们对资源和用户进行分组。首先按照一定的频率规划把全部带宽分成两个子带,分别称为优子带和劣子带。优子带受到的干扰较弱,信道条件较好;劣子带受到的干扰较强,信道质量相对较差。然后将用户分为中心用户和边缘用户两组。一方面,为了提高边缘用户的吞吐量,就要提高其信号干扰噪声比(signal to interference plus noise ratio, SINR),使其获得优子带资源,我们可以赋予其较高的调度优先级。另一方面,对于中心用户而言,只有剩余的很少一部分甚至根本没有优子带资源可供其使用,只能使用劣子带资源。中心用户的 SINR 势必会下降。实际上,FFR 的本质就是调整用户的 SINR 分布,用中心用户 SINR 的下降来提高边缘用户的 SINR。换句话说,FFR 以牺牲中心用户的吞吐量为代价来换取边缘用

户吞吐量的提高。

根据区分优子带和劣子带的方法不同,FFR 可分为两种类型:HFR 和 SFR。在 HFR 中,每个基站只在优子带上发射信号,把劣子带置为不可用;而 SFR 则是使用全部带宽,但是在优子带和劣子带上的发射功率不同^[10-12]。无论 HFR 还是 SFR,同一复用簇内的小区之间都要保持互补对称。每个小区中优子带所占用的频率恰好是其相邻小区中劣子带所占用的频率。HFR 和 SFR 的出发点都是提高小区边缘用户的 SINR。但是实现方法却不同,前者在于减少干扰的数量,而后者在于降低干扰的强度。

不失一般性,以 3 小区复用为例。图 1 所示的是两种 HFR 方案。在 HFR-I 方案中(如图 1(a)所示),簇中小区之间不会相互产生干扰;在 HFR-II 方案(如图 1(b)所示)中,簇中每个小区受到一个相邻小区的干扰。虽然 HFR-I 方案中的资源质量优于 HFR-II 方案,但是可用带宽仅为 HFR-II 的一半。图 2 所示的是 SFR 方案,与 HFR 方案不同,SFR 没有减少

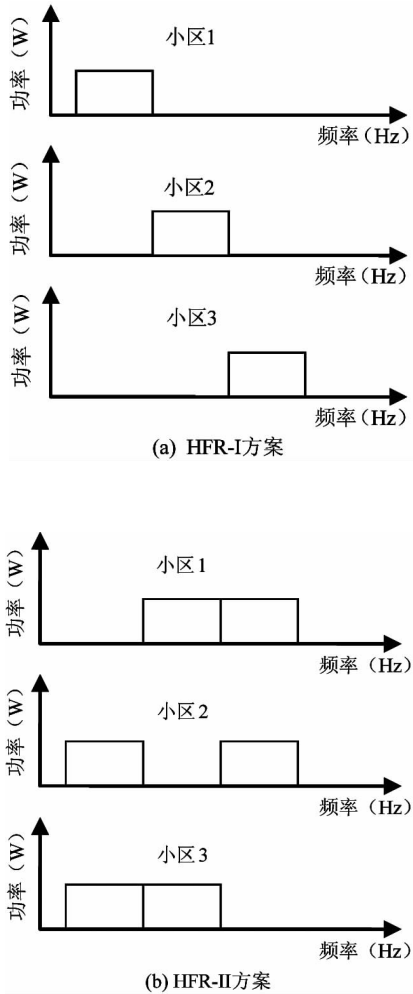


图 1 HFR-I 方案

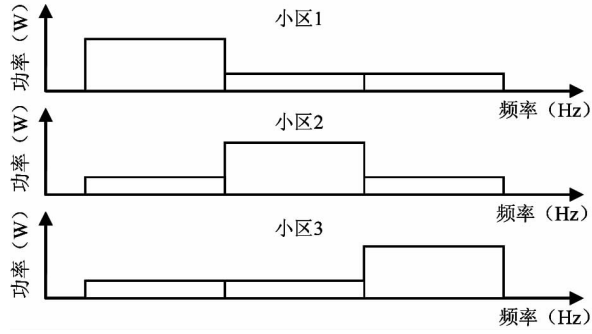


图2 SFR 方案

干扰的数目,但是降低了干扰的强度。其实,簇中每个小区的优、劣子带的带宽不必相同,并且可以根据各自的业务负载情况动态调整。这里假设簇内各个小区的负载都相同,所以图1和图2中3个小区的优、劣子带的带宽是相等的。

2 目前的 FFR 方案

在该节中,我们从广义模型的角度来分析当前各种 FFR 方案。

如图2所示,在 SFR 方案中,设每个小区基站在优子带和劣子带上的发送功率分别为 P_{good} 和 P_{bad} 。对于一个包含 $N(N = i^2 + i \cdot j + j^2, i, j \in \overline{Z^-})$ 个小区的簇来讲,总发送功率约束为 $P_{\text{total}} = P_{\text{good}} + (N - 1) \cdot P_{\text{bad}}$,定义功率比值 R_P 如下

$$R_P = \frac{P_{\text{good}}}{P_{\text{bad}}} \quad (2)$$

式中,当 $R_P = 1$ 时,有 $P_{\text{good}} = P_{\text{bad}} = P_{\text{total}}/N$,这是全频率复用系统;当 $R_P \rightarrow \infty$ 时,有 $P_{\text{good}} = P_{\text{total}}, P_{\text{bad}} = 0$,这恰是 HFR-I 方案(频率复用因子等于 N),如图1(a)所示;当 $R_P = 0$ 时, $P_{\text{good}} = 0, P_{\text{bad}} = P_{\text{total}}/N$,这就变成 HFR-II 方案,如图1(b)所示。因此,两种 HFR 方案以及全频率复用系统,分别是 SFR 当功率比值等于 0, ∞ 和 1 时的特例。在文献[13]中,频率复用因子被定义为频率复用簇中小区的数目。按照该定义,频率复用因子只能取整数,显然仅适用于 HFR-I 方案。为此,我们这里定义广义的频率复用因子——软频率复用因子 K 。与传统的频率复用因子不同,当复用簇中小区数目一定时,软频率复用因子是功率比值 R_P 的连续函数,而取值不再局限于离散的整数点。通过连续调整 R_P 取值, K 能够连续变化。假设复用簇中包含 N 个小区,并且总带宽被分成 N 等份,把第 i 子带为优子带的小区编号为小

区 i , 那么软频率复用因子可以表示为如式

$$K_N(R_P) = \begin{pmatrix} \frac{R_P \cdot N}{R_P + N - 1} & \frac{N}{R_P + N - 1} & \cdots & \frac{N}{R_P + N - 1} \\ \frac{N}{R_P + N - 1} & \frac{R_P \cdot N}{R_P + N - 1} & \cdots & \frac{N}{R_P + N - 1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{N}{R_P + N - 1} & \frac{N}{R_P + N - 1} & \cdots & \frac{R_P \cdot N}{R_P + N - 1} \end{pmatrix} \quad (3)$$

所示的 N 阶对称方阵。方阵 $K_N(R_P)$ 中第 i 行、第 j 列元素 $K_N[i, j]$ ($1 \leq i, j \leq N$) 表示第 i 小区第 j 子带的软频率复用因子。 $K_N[i, j]$ 越大表示该子带的信道质量越好,反之,就越差。特别地,当 $K_N[i, j] = 0$ 时,表示第 i 小区中第 j 子带不可用。

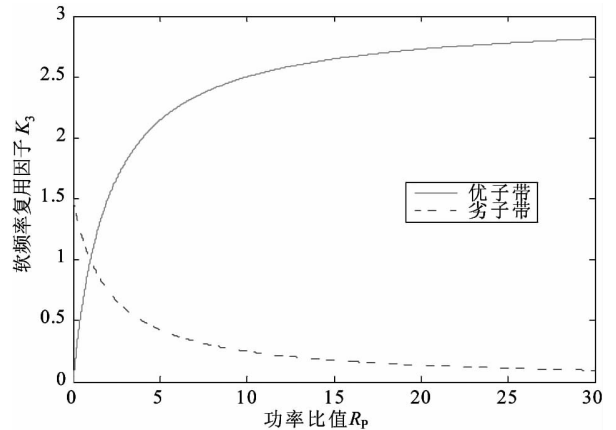
仍以 $N = 3$ 为例, $K_3(1)$ 、 $K_3(\infty)$ 和 $K_3(0)$ 分别对应全频率复用方案、HFR-I 和 HFR-II 方案,分别由

$$K_3(1) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$K_3(\infty) = \begin{pmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$K_3(0) = \begin{pmatrix} 0 & 3/2 & 3/2 \\ 3/2 & 0 & 3/2 \\ 3/2 & 3/2 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

表示。 K_3 随着 $R_P (\geq 0)$ 的逐渐增加连续变化,如图3所示。


 图3 频率复用因子 K_3 与功率比值 R_P 的关系

3 仿真结果

如前所述,FFR 旨在调整用户 SINR 的分布,所以,我们完全可以通过用户 SINR 的分布来评估 FFR 的性能。本节从计算机仿真的角度来验证功率比值

的变化对用户 SINR 分布的影响。该仿真基于 WiMAX (IEEE 802.16m) 系统, 仿真参数见表 1。

表 1 仿真参数

参数	取值
网络拓扑	19 个三扇区小区
移动台个数	10 个/扇区
系统带宽	10MHz
小区半径	1500m
帧长	5ms
FFT 长度	1024
载频	2.5GHz
发射功率	46mW
阴影衰落(对数正态分布)	$\mu = 0\text{dB}, \sigma = 8.9\text{dB}$
移动台噪声图样	8dB
天线相关系数	0.5(包括基站和移动台)
子载波排列方式	AMC 2×3
资源单元大小	48 子载波×6 符号
小区负载因子	1
信道模型	ITU-R Pedestrian A 3km/h
路径损耗模型	COST 231-Hata Suburban V
MIMO 天线数	2×2
发送/接收天线增益	17dB / 0dBi

首先, 需要一个区分中心用户和边缘用户的方法。在这里, 我们通过大尺度 SINR 来分类。先确定一个 SINR 的门限值, 当用户的 SINR 大于该门限值时, 该用户属于中心用户, 否则, 属于边缘用户。根据统计结果, 这里的门限值应取 0dB。

图 4 给出了边缘用户 SINR 随 R_p 的变化关系曲线。由图可知, 随着 R_p 的增加, 边缘用户的 SINR 随之增加。当 $R_p = 2$ 时, 有 60% 的边缘用户的 SINR 大于 0dB; $R_p = 4$ 时, 大于 0dB 的边缘用户达到 80% 以上。

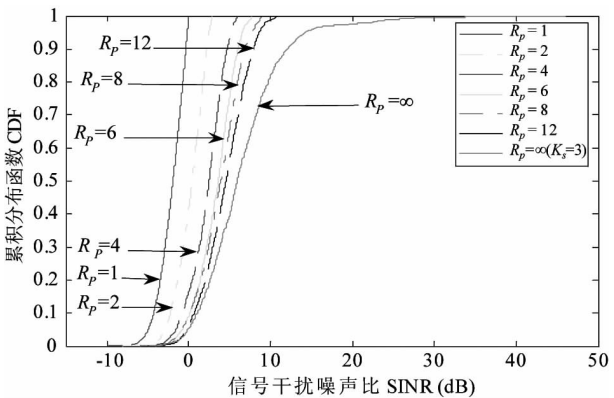


图 4 不同 R_p 下边缘用户 SINR 的分布

在边缘用户的 SINR 增加的同时, 中心用户的 SINR 在下降, 变化关系如图 5 所示。由图可知, 在全频率复用的情况下, 有 30% 的中心用户 SINR 大于 10dB; 当 $R_p = 2$ 时, 大于 10dB 的中心用户数下降到 25% 左右; $R_p = 4$ 时, 大于 10dB 的中心用户数降到 16%。

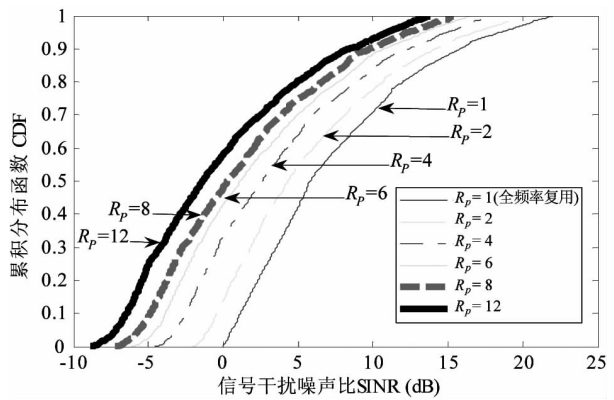


图 5 不同 R_p 下中心用户 SINR 的分布

综合图 4 和图 5 可知, 随着 R_p 的增加, 边缘用户 SINR 的提高幅度逐渐减小, 呈现出饱和的趋势, 但是中心用户 SINR 却持续下降。所以 R_p 取值不宜太大, 否则得不偿失。由图可知, 当 $R_p > 8$ 时, 边缘用户 SINR 的提高幅度可以忽略不计。因此, 综合考虑网络覆盖和系统容量这两方面, R_p 的取值应该在 2~8 较为合理。

4 结 论

本文基于 OFDMA 系统, 从子载波功率分配的角度出发, 提出了广义 FFR 分析模型, 为分析 FFR 提供了一个新的视角。目前现存的 FFR 方案均可作为特例统一在该广义分析模型的框架之下。文中将 FFR 分为 HFR 和 SFR 两种类型, 并指出了二者的区别和联系, 提出了功率比值和软频率复用因子的概念, 分别对全频率复用系统(没有频率规划, 频率复用因子为 1 的系统)、两种 HFR 系统(包括 HFR-I 系统和 HFR-II 系统)以及 SFR 系统进行了详细的讨论。

文中所提出的软频率复用因子不仅是信道质量的直接体现, 更是对经典蜂窝理论中的频率复用因子概念的扩展。理论分析和仿真结果表明, 当复用簇内小区数目一定时, 软频率复用因子是功率比值的连续函数。也即通过调整 FFR 系统中的功率比

值,软频率复用因子可以连续变化。对于蜂窝系统,软频率复用因子的大小决定了对小区边缘用户吞吐量的提高幅度,以及对小区系统容量影响的程度。换句话说,通过综合考虑小区系统容量和小区覆盖两个方面,我们可以准确地找到最佳的功率比值,以满足系统设计的要求。

参考文献

- [1] Wang Z, Stirling-Gallacher R. A Frequency reuse scheme for cellular OFDM systems. *Electronics Letters*, 2002, 38(8): 387-388
- [2] Stamatiou K, Proakis J G. A performance analysis of coded frequency-hopped OFDMA. In: Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, New Orleans, USA, 2005. 1132-1137
- [3] Begain K, Rozsa G I, Pfening A, et al. Performance analysis of GSM networks with intelligent underlay-overlay. In: Proceedings of the 7th International Symposium on Computers and Communications, Taormina, Italy, 2002. 135-141
- [4] Mobile WiMAX--Part I: A technical overview and performance evaluation. WiMAX Forum Tech Rep, 2006
- [5] 3GPP TSG RAN WG1 # 42 R1-050841. Further analysis of soft frequency reuse scheme. Huawei, 2005

- [6] 3GPP TSG RAN WG1 # 42 R1-050764. Inter-cell interference handling for E-UTRA. Ericsson, 2005
- [7] Shen Z, Andrews J A, Evans B L. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional rate constraints. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2005, 4(6): 2726-2737
- [8] Kumaran K, Viswanathan H. Joint power and bandwidth allocation in downlink transmission. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2005, 4(3): 1008-1016
- [9] Seo H, Lee B G. A proportional-fair power allocation scheme for fair and efficient multiuser OFDM systems. In: Proceedings of the IEEE Global Communications Conference, Texas, USA, 2004. 3737-3741
- [10] 3GPP TSG RAN WG1 # 43 R1-051341. Flexible fractional frequency reuse. Samsung, 2005
- [11] 3GPP TSG RAN WG1 # 44 R1-060291. FDMA downlink inter-cell interference mitigation. Nokia, 2006
- [12] 3GPP TSG RAN WG1 # 41 R1-050507. Soft frequency reuse scheme for UTRAN LTE. Huawei, 2005
- [13] Lee D, Xu C, Mayekar U, Mohile M. Frequency reuse factor vs. pathloss exponent and sectorization. Wireless Applications Digest, IEEE MTT-S Symposium on Technologies for. 1997. 109-112

Generalization FFR model based on subcarrier power Allocation in OFDMA

Xi Wei, Yin Changchuan, Yue Guangxin

(Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract

Based on orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) cellular systems, the paper studies the fractional frequency reuse (FFR) technique in detail. By defining the concepts of power ratio and soft frequency reuse factor, a generalized FFR model is proposed. Moreover, all the existing FFR schemes can be considered as its special cases. The model originates from the subcarrier power allocation in OFDMA, and provides a novel perspective on FFR. The theoretical analysis shows that the soft frequency reuse factor can be adjusted smoothly as power ratio varies continuously. For FFR-based OFDMA cellular systems, the tradeoff between cell capacity and coverage can be efficiently balanced by the model. Subsequently, based on worldwide interoperability for microwave access (WiMAX) systems, the simulation was conducted and the results agreed well with the theoretical analysis in the study. Finally, an effective range for power ratio was presented, which is very instructive to practical system design.

Key words: fractional frequency reuse (FFR), power ratio, worldwide interoperability for microwave access (WiMAX), soft frequency reuse factor, co-channel interference, OFDMA