

分数频率复用的帧结构及性能分析

高 翟¹ 朱光喜¹ 李彦淳¹ Markus Hidell²

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)¹ (皇家理工学院电信系统实验室 斯德哥尔摩 瑞典)²

摘 要 针对现代无线通信系统在干扰控制方面越来越高的要求,利用通信帧中子载波的重新分配,提出了帧结构设计一种新的分数频率复用方法——时频分分数频率复用,并将其与传统的分数频率复用方式进行比较。这一新方法是在对系统容量进行建模之后,综合资源块分配中的时分和频分模式提出的,其对应的帧结构相对于传统的 FFR 具有更高的调节粒度。实验结果验证了这种设计以少量系统容量为代价,在提升系统公平性、提高边缘用户吞吐率方面的性能优势。

关键词 分数频率复用,干扰控制,比例公平调度,复用因子,边缘用户吞吐率

中图分类号 TN92 **文献标识码** A

Frame Structure and its Performance Analysis of Fractional Frequency Reuse

GAO Di¹ ZHU Guang-xi¹ LI Yan-chun¹ Markus Hidell²

(Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)¹

(Laboratory of Telecommunication System, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden)²

Abstract Aiming at the increasing requirement of interference mitigation in wireless communication system, this paper raised a new style of frame structure design—"Time-frequency division fractional frequency reuse" by reallocating sub-carriers in frames. This new method integrates the modes of time division and frequency division on assigning resource blocks after modeling system capacity. The corresponding frame structure has a more precise granularity for adjustment compared with tradition fractional frequency reuse pattern. The results of simulation validate its advantages on system fairness and throughput of edge users, with the cost of slight capacity drop of the entire system.

Keywords Fractional frequency reuse, Interference mitigation, Proportionally fair scheduler, Reuse factor, Throughput

1 引言

无线通信应用的介质通常是一个公共的开放空间,因此无线信道比有线信道复杂很多,同时无线环境中的干扰是分析和改进无线通信质量不可忽略的因素之一。很多改善通信质量的方法都围绕如何控制或削弱干扰来进行。例如近年被热议的 MIMO 技术能降低误码率;OFDM 技术能很好地消除符号间干扰^[1];基于干扰模型的多信道分配策略可以降低无线通信网中的信道间的干扰^[2]。当前随着 3G 标准的制定和对应设备的逐步普及,面向新一代无线通信系统的干扰控制策略得到越来越多的关注;其它并行标准的干扰控制研究也在不断深入和发展中。

目前在无线通信系统的设计中,有 3 种小区间下行干扰抵消的方法:干扰随机化、干扰消除和干扰协同避免。对于干扰协同避免,常用的办法是在小区间对下行资源进行约束或协调。在相邻小区对应的空时频资源配置下,小区中的某些条件在一定程度上提供了信干比、小区边缘速率和覆盖的提

升空间;这样的条件(也可看作是一种限制)可以由管理器获得的资源或特定资源的适用发射功率来表示。本文提出的算法亦基于此。

在多用户复用系统中,分数频率复用(FFR)是小区间干扰协同避免的一种重要方法。早在 GSM 网出现时,FFR 的思想就被首次提出,其原始思想是在靠近基站的区域使用单个或较低的频率复用,同时在小区边缘附近应用较高的频率复用^[3]。子带中含不同复用因子的 FFR 方案常被用于提高小区边缘用户的信干噪比(SINR),不过它以降低可用资源量为代价。所以现有的基于小区边缘用户的 FFR 设置,有可能压缩整个系统的频谱效率。如今 FFR 已在 IEEE 802.16 和 802.20 标准中得到研究和应用。由于部分新技术用于实现第三代无线通信系统,FFR 的性能正越来越深刻地影响着服务质量,它在很多新兴系统(如 3GPP-LTE 和 WiMAX)中均扮演重要角色。

最近,提出一种针对 OFDMA/OFDM 小区系统的 FFR 可选方案。在文献[4]中,对应不同子载波的 SINR 决定整个

到稿日期:2010-01-20 返修日期:2010-04-12 本文受国家自然科学基金(60496135),中国国际科技合作项目基金(2008DFA11630),国家科技支撑计划项目(2008BAH30B12)和湖北省自然科学基金(2008CDB325)资助。

高 翟(1983—),男,博士生,主要研究方向为无线通信等,E-mail: leoxyss@gmail.com;朱光喜(1945—),男,教授,主要研究方向为宽带无线与多媒体通信等;李彦淳(1984—),男,博士生,主要研究方向为无线通信等;Markus Hidell(1967—),男,助教,主要研究方向为无线系统中的网络技术。

系统的有效 SINR,而中断概率表示为有效 SINR 的函数。这种方法论证了分配给用户的子载波数的重要性。实验证实,当资源块中分配的子载波数目增加时,复用距离能够降低。2008 年,有学者在 FFR 方案中引入标准化频谱效率的概念^[5]。通过设置最优频率复用因子,FFR 以提升小区边缘用户吞吐率的途径来最大化系统频谱效率。一些研究甚至比较了 FFR 在 802.16e 和 802.20 中的性能,评估参数是平均吞吐量、中断概率和频谱效率^[6]。同年,贝尔实验室的研究人员通过 OFDMA 下行动态 FFR 实现小区外干扰避免。他们描述了一种子载波和功率分配的算法,使系统“自组织”到有效的频率复用模式^[7]。但此算法只针对用户比特率为常量(如 VoIP)的情形,而且它的自适应设定需要的复杂度成本很高,故不容易实现实时处理。周月峰博士率先在系统级仿真性能层面上量化地讨论 WiMAX 中的 FFR,他指出 FFR 能改进吞吐率和覆盖,在调度网络中含 FFR 的覆盖可以在接近全复用覆盖的同时提升吞吐量^[8]。类似地,藤井浩正和吉野仁志分析了引入 FFR 的 OFDMA 蜂窝系统的理论容量和中断率。在中断率低时,FFR 能帮助实现更高的系统容量^[9]。

$$SINR_k^{(0)}(n) = \frac{diag\{f[\sigma_0^2, D(n)]\}_{kk}}{diag\{f[\sigma^2, W^*(n)] + f[\sigma_0^2, I_{self}] + \sum_{j=1}^{N_I} f[P_{if}^{(j)} P_{loss}^{(j)} \sigma_j^2, W^*(n) H^{(j)}(n)]\}_{kk}} \quad (1)$$

其中

$$f(p, M) = pMM^* \quad (2)$$

式中, $D(n)$ 是有用信号, $W(n)$ 是 MMSE 权值, $I_{self}(n)$ 是 MIMO 数据流间的自干扰, $P_{if}^{(j)}$ 是扇区中第 j 个 BS 或 MS 的总发射功率, $P_{loss}^{(j)}$ 是来自第 j 个扇区或 MS 的距离关联的路径损耗(包括阴影和天线增益/损耗以及线路损耗), $H^{(j)}(n)$ 是目

$$SINR_k^{(0)}(n) = \frac{diag\{f[\sigma_0^2, D(n)]\}_{kk}}{diag\{f[\sigma^2, W^*(n)] + f[\sigma_0^2, I_{self}] + \sum_{j=1}^{N_I} f[P_{if}^{(j)} P_{loss}^{(j)} \sigma_j^2, W^*(n) \sum_{i=1}^{N_C} (\alpha_i H^{(j)}(n))]_{kk}} \quad (3)$$

式中, N_C 是子信道数目, α_i 是子信道系数。对于 FFR 中使用不同频率的子信道而言,它们之间的干扰可以忽略,所以对应的 α_i 视为零。

2.2 信道容量

Shannon-Hartley 定理给出信道容量的表达式为

$$C = B \log(1 + SNR) \quad (4)$$

式中, B 为信道带宽。由于 SNR 可通过下式的 SINR 得到

$$SNR = \frac{S \cdot SINR}{S - I \cdot SINR} \quad (5)$$

故信道容量可进一步表示为

$$C = \sum_{k=1}^{N_S} B \log \left\{ 1 + \frac{diag\{f[\sigma_0^2, D(n)]\}_{kk} \cdot SINR_k^{(0)}(n)}{diag\{f[\sigma_0^2, D(n)]\}_{kk} - f[\sigma_0^2, I_{self}] \cdot SINR_k^{(0)}(n)} \right\} \quad (6)$$

2.3 标准化频谱效率

平均频谱效率的表达式为^[5]

$$SE = K \left[\log \omega_\eta \cdot SINR + \frac{1-\eta}{\eta} \log \left(\frac{1}{1-v_\eta} \right) - \frac{v_\eta}{\eta} \right] \quad (7)$$

其中

$$\omega_\eta = \frac{1}{2} [1 + \eta + SINR + \sqrt{(1 + \eta + SINR)^2 - 4\eta}] \quad (8)$$

$$v_\eta = \frac{1}{2} [1 + \eta + SINR - \sqrt{(1 + \eta + SINR)^2 - 4\eta}] \quad (9)$$

$$\eta = \frac{T_x}{R_x} \quad (10)$$

本文第 2 节简要介绍包含干扰抵消、比例公平调度和计算 SINR 的相关工作;第 3 节详细介绍我们的帧结构方案;第 4 节论述本文方案的性能仿真;最后是结论。

2 系统模型

对 FFR 系统而言,系统容量是最重要的性能指标之一。它可以由以下步骤获得:首先考虑信道和频率复用模式,为各数据流计算已有的 SINR,然后由香农遍历信道容量估计得出数据流速率。为把干扰避免的成本计算在内,我们给出一种标准化频谱效率^[5]。

2.1 复用中后处理 SINR 的计算

为使情形简化,设定如下条件:

1) 发射天线和接收天线数分别为 N_T, N_R 。

2) 有 N_T 个空间数据流被发送且 $N_R \geq N_T$ 。

3) 有用信号和干扰使用相同的 MIMO 传输策略。

则目标 MS 上第 n 个子载波和第 k 个 MIMO 数据流上的后处理 SINR 为^[10]

标 MS 上第 j 个用户/扇区第 n 个子载波上的信道增益, $\sigma_0^2 I$ 和 $\sigma_j^2 I$ 是目标 MS 和第 j 个干扰 MS 数据模块向量的协方差, $\sigma^2 I$ 是接收端热噪声的协方差, N_I 是干扰数目。

引入 FFR 时,考虑一个信道由多个子信道组成。设 $H_i^{(j)}$ 为第 i 个子信道的增益,则 SINR 表示为

式中, T_x, R_x 分别为发射和接收天线数,则标准化频谱效率定义为

$$nSE_\tau^k = SE_\tau^k \frac{\omega_\tau}{\omega_k} \quad (11)$$

式中, SE_τ^k 为子集 τ 中用户 k 的频谱效率, ω_k 为子集 τ 中用户 k 拥有的带宽, ω_τ 为子集 τ 中的总带宽。

3 FFR 帧结构

在频率复用中,不同的复用因子对容量的影响不一样。在蜂窝系统中,每个小区通常被划分为面积相等的 3 个扇区,而每相邻的两个扇区使用完全不同的频带。因此我们选择比较 1 和 3 两种复用因子。全复用(复用因子为 1)在高 SINR 时系统容量较高;而在 SINR 较低时,1/3 复用(复用因子为 3)具有优势。所以我们决定将这两种复用模式合并,即在帧结构设计中同时应用全复用和 1/3 复用。

当前 FFR 帧结构多在频率维上划分资源,也有一部分在时间维上划分。频率维上的资源块有限,这使得划分方式不太灵活。而双维度上的划分具有更好的粒度,这样我们就有了 3 种 FFR 帧结构。

如果全复用和部分复用区域在频率维上分隔,则形成频分分数频率复用(FD-FFR)。假设有 N_{band} 个信道,其中 N 个信道用于全复用,则全-分复用比(FPR)为 $N/(N_{band} - N)$ 。如果全复用和部分复用区域在时间维上分隔,则形成时分分数频率复用(TD-FFR)。设每 M 帧中有一个部分复用帧,则

这 M 帧构成 TD-FFR 的一个周期,其 FPR 为 $(M-1)$ 。

如果全复用和部分复用区域在时间和频率两个维度上分隔,则形成时频分数频率复用(TFD-FFR)。它的 FPR 为 $(MN_{\text{band}} - N_{\text{band}} + N) / (N_{\text{band}} - N)$ 。TFD-FFR 由于具有更高的粒度,能够调整出更多的 FPR 供选择。它的帧结构如图 1 所示,其中周期值 M 为 4。在这种定义下,前两种帧结构可看作是它的特例: $M=1$ 且 $N>0$ 时变为 FD-FFR;若 $M>1$ 且 $N=0$,则变为 TD-FFR。

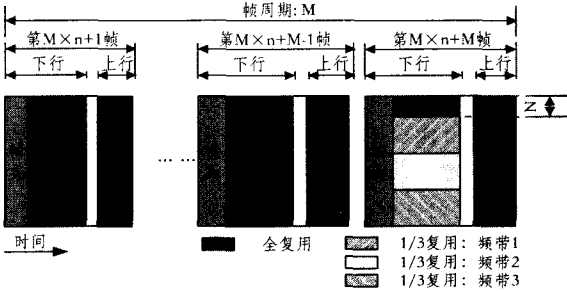


图 1 时频分数频率复用的帧结构

4 仿真结果与分析

在多用户复用系统中,我们计算并比较了前述若干种帧结构的效果。仿真条件见表 1,在此条件下各复用模式中用户的平均速率见表 2。

表 1 系统仿真参数

参数名	参数值	参数名	参数值
载波频率	2.5GHz	系统带宽	10MHz
站间距	500m	对数正态阴影	-8 dB
基站发射功率	46dBm	穿透损耗	-20dB
信道模型	eITU, Ped B, 3km/h	终端噪声指数	9dB
白噪声功率密度	-174dBm/Hz	发射天线数	2(4λ spacing)
接收天线数	2(0.5λ spacing)	预编码码本	Unitary Precoding
调度器	PF, per-frame update	TTI 时长	5/8 ms
交换模型	Full buffer	CQI 时延	4 TTIs
调制方式	QPSK, 16 and 64 QAM	解码方式	Max-Log-Map
最大重传次数	3	子载波数	1024(total), 768(usable)
单个资源块的子载波数	32	单个扇区内的用户数	10

表 2 各复用模式下的用户平均速率

复用模式	自适应 FFR	全复用	FD-FFR	TD-FFR	TFD-FFR
用户平均速率	15.7457	15.3433	14.5987	14.9780	14.9596
与自适应 FFR 的速率比	100.00%	97.44%	92.72%	95.12%	95.01%

表 2 中,自适应 FFR 的平均速率最大,这与期望相符。全复用的平均速率比 3 种 FFR 高,这显示出 FFR 在速率和容量上的弱点。3 种 FFR 的速率比较表明,FD-FFR 的速率最低,这是由于它的部分复用资源块占有的带宽较窄。

由于宽带信道有频选衰落,并且 TD-FFR 中更多频点可用于部分复用,这对于边缘用户很有帮助,因此它在边缘用户上的频选增益更高。不过在长周期 TD-FFR 中,比例公平调度更倾向于将全复用资源分配给边缘用户。

图 2 中 3 条曲线的间距很小,说明在不区分小区中心用户和边缘用户的情况下,复用方式对所有用户的宏观性能影响不大。TFD-FFR 的速率略低于自适应 FFR 且略高于全复用,这是其中边缘用户的影响所致。

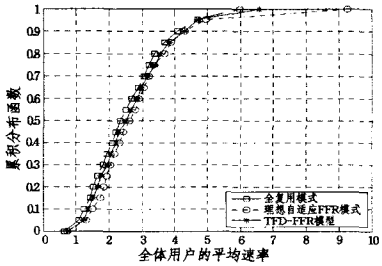


图 2 全体用户平均速率的累积分布

从图 3 可以看出,经过局部平均后,对于相同的 SINR,自适应 FFR 的速率最大,全复用的速率最小。TFD-FFR 的性能位于二者之间,即在 SINR 确定时 TFD-FFR 相对于全复用有效地提高了边缘用户速率。

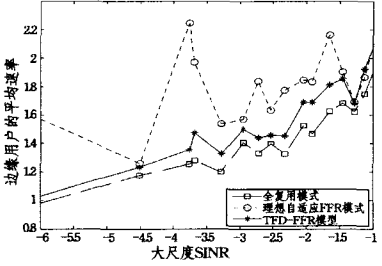


图 3 SINR-边缘用户平均速率

如果只考虑边缘用户平均速率的累计分布(见图 4),则 FFR 的效果明显好得多(与图 2 比较)。从图 4 中边缘用户的平均速率可以看出,自适应 FFR 在边缘用户的资源分配上公平性最佳。全复用明显压缩了低 SINR 的边缘用户速率,而 TFD-FFR 的结果则较接近自适应 FFR。FPR 值越大,边缘用户被忽略的可能性越高,这印证了 FFR 在调度公平性上的优势。

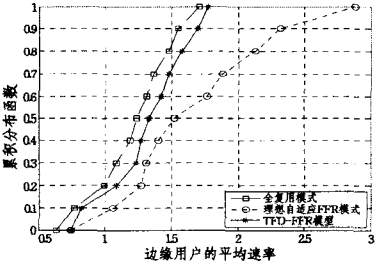


图 4 边缘用户平均速率的累积分布

资源块的分配情况如图 5 所示。全复用对应的图线斜率最小,说明用户的资源块分配有较大差别。相对地,自适应 FFR 图线的高斜率值体现了它较好的公平性。在这种性能上,TFD-FFR 与自适应 FFR 接近,它的公平性显著优于全复用模式。

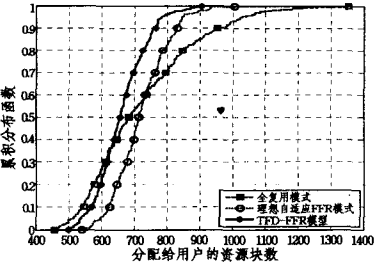


图 5 用户资源块分配的累积分布

从图 6 可以看出,经过局部平均后,大体上部分复用比随 SINR 的升高而降低。在 SINR 较低时,自适应 FFR 大幅提升该比例,其图线显著高于 TFD-FFR;而在 SINR 较高时,二者差别不大,TFD-FFR 的部分复用比略高。其原因是本文中的 TFD-FFR 对部分复用比的调整较少,同一组用户中的相应参数(M 和 N)保持恒定。这在一定程度上决定了它与自适应方式的差距。

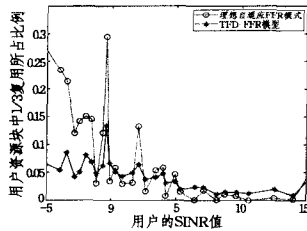
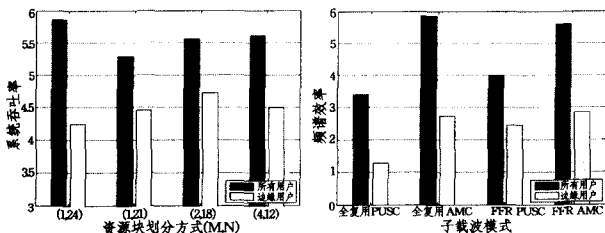


图 6 SINR-部分复用比

在复用比固定的条件下,时频资源的分配方式同样影响着比例公平调度的性能。考虑 3 种 FFR 相同的 FFR 方式: FFR(1,21), FFR(2,18)和 FFR(4,12),帧周期 M 越长,FFR 的吞吐率越高。准确地说,当用户的总体 SINR 在中等水平时,FFR 吞吐率与 M 值的单调性一致;但在干扰和噪声能量极低时,FFR 吞吐率随 M 值提升不明显,甚至呈现下降趋势。这是由于 1/3 复用模式在高 SINR 条件下对吞吐率的制约更明显。FFR 固定时 M 值越高,1/3 复用占有的频带越宽,吞吐率随之受到影响。不同的调制方式对 SINR 的评估不同: QPSK 方式下高 SINR(下行)的评判阈值为 5dB 左右;而在 64QAM 调制中该阈值提升至约 35dB。若系统的 SINR 高于该阈值, M 值增大有可能导致吞吐率降低。因此,为提高边缘用户的吞吐率,适当的分配方式须结合 SINR 因素。图 7(a)示出中等 SINR 条件下系统吞吐率随资源块划分方式的变化。

在子载波不连续(PUSC)时,FFR 使边缘用户的频谱效率提升 93%,同时提升全小区的频谱效率 17%,如图 7(b)所示。但在连续子载波(AMC)条件下,由于比例公平调度利用了信道频率衰减,使得 FFR 对频谱效率的影响很有限。



(a)资源块的划分方式不同

(b)子载波模式不同

图 7 不同条件下的系统性能评估

综合以上分析可以得出,在应用 FFR 时有若干因素影响系统性能,这其中包括帧周期 M 、未帧全复用信道数 N 、边缘用户所占的权重(或低 SINR 用户占全体用户的比例)、子载波模式、资源分配的自适应程度等。在实际应用中,还需要

考虑小区内地形的复杂度、相邻小区基站的功率及其波动、跨区界的边缘用户间的干扰、用户移动的速度等。

结束语 基于通信系统中有限的无线资源和不断提高的服务质量要求,越来越多地引入了资源分配方案,包括分数频率复用。这项技术通过少量降低小区的整体吞吐量来改善边缘用户性能,使调度的公平性得以提升。频分和时分法都曾在传统 FFR 中得到单独应用,但由于每帧中资源块数目有限,传统 FFR 难以提供多种形式的划分机制供选择。通过将它们整合为 TFD-FFR,便得到一个更具弹性的帧结构,它更容易帮助系统实现更高的性能。

为进一步发展 FFR 的应用,有必要尽可能弱化它的缺陷,即最小化其速率跌幅。本文中的实验大多包含参数测试,在预先设置好复用参数(如 M 和 N)后比较它们的实验结果。这种方法可行但计算复杂度高。因此,未来的工作可能探讨系统条件和参数选择之间更为精确的关系,从而为实现 FFR 参数的智能化调整铺平道路。

参考文献

- [1] 刘敏,张小飞,徐大专. 多用户 MIMO-OFDM 系统中基于延时信道状态信息的自适应传输方案[J]. 通信学报, 2008, 29(5): 19-25
- [2] 束永安,洪佩琳,覃振权. 无线网中基于干扰模型的多信道分配策略[J]. 电子学报, 2008, 36(7): 1256-1260
- [3] Assaad M. Optimal fractional frequency reuse(FFR) in multicellular OFDMA system[C]// VTC 2008-Fall, IEEE 68th. Sept. 2008; 1-5
- [4] Giuliano R, Loreti P, Mazzenga F, et al. Fractional frequency reuse planning for WiMAX over frequency selective channels[C]// IEEE Conf. IWCMC'08, Aug. 2008; 666-671
- [5] Fang Lintang, Zhang Xiaolin. Optimal fractional frequency reuse in OFDMA based wireless networks[C]// IEEE Conf. WiCOM'08, Oct. 2008; 1-4
- [6] Luo Haiyan, Zhang Zhaoyang, Jia Huiling, et al. Performance comparison of IEEE 802. 16e and IEEE 802. 20 systems under different frequency reuse schemes[C]// VTC 2008-Fall, IEEE 68th. Sept. 2008; 1-5
- [7] Stolyar A L, Viswanathan H. Self-organizing dynamic fractional frequency reuse in OFDMA systems[C]// IEEE Conf. INFOCOM2008, April 2008; 691-699
- [8] Zhou Yuefeng, Zein N. Simulation study of fractional frequency reuse for mobile WiMAX[C]// IEEE Conf. VTC Spring 2008. May 2008; 2592-2595
- [9] Fujii H, Yoshino H. Theoretical capacity and outage rate of OFDMA cellular system with fractional frequency reuse[C]// IEEE Conf. VTC Spring 2008. May 2008; 1676-1680
- [10] IEEE 802. 16 Broadband Wireless Access Working Group[S]. IEEE 802. 16m evaluation methodology document. July 2008; 78-79