

一種評價和設計蜂窩系統頻率複用方案的新方法

A New Method for Evaluating and Designing Frequency Reuse Schemes in Cellular System

賈亦真 Yi-Zhen Jia, 王有政 You-Zheng Wang*, 陸建華 Jian-Hua Lu

北京清華大學電子工程系, *北京清華大學宇航技術研究中心

jiayz@wmc.ee.tsinghua.edu.cn, yzhwang@mail.tsinghua.edu.cn, lujh@wmc.ee.tsinghua.edu.cn

摘要

在頻率複用方案 (Frequency Reuse Schemes, FRS) 的研究中, 性能分析和對比大都針對某些指標獨立進行。本文提出一種新方法——「吞吐量 (Throughput) - 社區間干擾 (Inter-cell Interference, ICI) 水準折衷關係圖」以全面評價和設計FRS, 並以複用分割方案 (Reuse Partitioning Scheme, RPS) 和軟頻率複用方案 (Soft Frequency Reuse Scheme, SFRS) 為例說明該方法的應用。分析表明: RPS在對抗ICI方面有優勢, 但設計不當將導致吞吐量和抗ICI性能均劣於傳統的頻率複用方案 (Traditional Frequency Reuse Scheme, TFRS); SFRS在吞吐量方面有優勢, 對於低比特率、誤碼率要求低的業務SFRS有望在上述兩項性能上均優於TFRS。

關鍵字: 移動通信、蜂窩系統、頻率複用、社區間干擾。

Abstract

In the research of frequency reuse schemes (FRS), performance analyses and comparisons are mostly based on some merits independently. In this paper, we propose a new method named as “Throughput-Intercell Interference (ICI) Level Tradeoff Map” for evaluating and designing FRS and show its applications by taking Reuse Partitioning Scheme (RPS) and Soft Frequency Reuse Scheme (SFRS) for example. Analyses show that RPS is superior in ICI mitigation but may result in worse performance than Traditional Frequency Reuse Scheme (TFRS) on both throughput and ICI mitigation due to improper design, while SFRS is superior in throughput and may achieve better performance than TFRS on both the two merits for low bit rate and low BER requirement services.

Keywords: Mobile Communication, Cellular System, Frequency Reuse, Inter-cell Interference.

1 緒論

蜂窩系統 (Cellular System) 的誕生是移動通信的一次革命。蜂窩系統通過頻率複用技術利用有限的頻譜資源提供大量的用戶容量, 提高了頻譜效率。頻率複用技術的關鍵參數是頻率複用因數 (Frequency Reuse

Factor, FRF), 定義為每個社區可用帶寬與系統總帶寬的比值[1]。FRF越大社區吞吐量越高, 但社區間干擾 (ICI) 越嚴重, 社區邊緣用戶的通信品質越差。傳統的頻率複用方案 (TFRS) 採用固定的FRF。例如採用FDMA的第一代移動通信系統, 為了滿足較高的信幹噪比 (SINR) 要求, FRF通常為1/7; 採用TDMA的第二代系統由於引入通道編碼、交織等技術, FRF可提高到1/3; 採用CDMA的第二代和第三代系統, 由於存在擴頻增益, FRF理論上可達到1。後三代 (B3G) 和第四代移動通信系統為支援高速資料傳輸和靈活的資源分配將普遍採用OFDMA技術[2]。人們一方面要求提高社區吞吐量以滿足大量用戶接入和傳輸高速業務的需求, 另一方面要求降低社區間干擾, 提高社區邊緣的通信品質以使用戶在移動時獲得均衡的體驗。然而, OFDMA對社區間干擾敏感, TFRS難以同時滿足上述兩方面要求, 設計新的頻率複用方案成為研究熱點。

近年來出現了一系列研究成果[3-9]。其中, 文獻[3]提出的複用分割方案 (RPS) 和文獻[4][5]提出的軟頻率複用方案 (SFRS) 是最基礎和最具應用前景的兩個方案, 本文將詳細討論。文獻[6]提出的軟分數頻率複用方案在SFRS基礎上對社區邊緣區域的可用頻譜做了進一步劃分。文獻[7]提出一種基於功率分配的複用分割方案, 與RPS和SFRS相比提高了社區吞吐量並降低了中斷概率, 但該方案要求社區內部用戶採用干擾消除技術進行檢測, 大大增加了終端複雜度。文獻[8]提出的方案可看作磁區化 (Sectorized) 的RPS, 與未做磁區化的RPS相比可降低干擾。文獻[9]提出了一種自適應選擇FRF的方案, 由用戶根據其通信品質自適應選擇FRF, 但改變FRF時需要所有同通道用戶同步調整, 因此應用範圍受限。

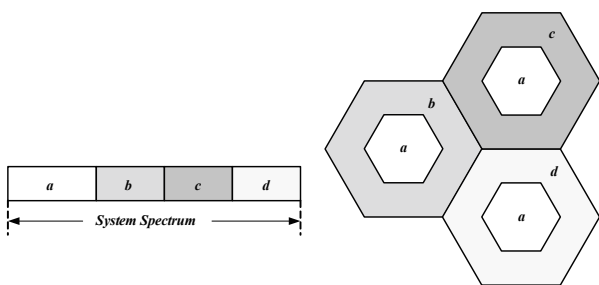
上述文獻在對所提方案和已有方案進行性能比較時大都針對吞吐量、頻譜效率 (Spectral Efficiency)、信幹噪比 (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)、中斷概率 (Outage Probability)、社區邊緣用戶速率等指標獨立進行。然而, 設計頻率複用方案的核心問題是兼顧吞吐量與ICI水準, 取得兩方面性能的良好折衷。因此, 評價和設計方案時應綜合考慮吞吐量和ICI水準兩個因素。本文提出一種評價和設計頻率複用方案的新方法——「吞吐量-ICI水準」折衷關係圖。該圖的橫坐標軸為某項衡量ICI水準的指標, 縱坐標軸為社區吞吐量。複用方案的參數全部給定後, 其「吞吐量-ICI水準」折衷性能可用折衷關係圖中的一個點表示, 當參數改變時, 該點隨之移動。因此, 該

圖不僅可以作為一種評價工具全面評價各種複用方案的性能，還可以作為一種設計工具設計複用方案的參數。當吞吐量和ICI指標給定時，利用該圖可方便地得出滿足指標要求的複用方案及其參數。本文以基於RPS和SFRS的蜂窩系統下行鏈路為例，介紹如何運用折衷關係圖對這兩種複用方案進行評價和設計。

2 系統模型

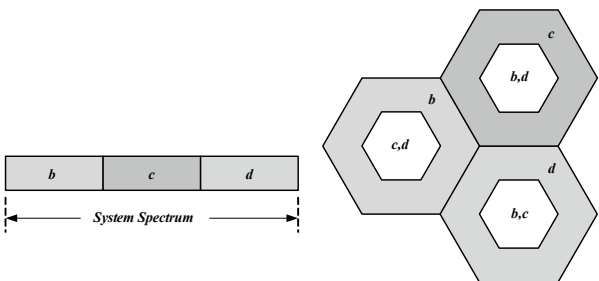
2.1 RPS與SFRS簡介

假定社區為正六邊形。RPS將整個社區分為兩部分：內部和外部。其中，內部為與社區同心的六邊形。全部系統頻譜也分為兩部分。一部分隻分配給內部用戶，另一部分隻分配給外部用戶。所有社區中分配給內部用戶的頻譜是相同的，對內部用戶而言FRF=1。所有分配給外部用戶的頻譜根據事先選定的FRF再分成若干部分，分配給不同社區，使得相鄰社區的外部用戶使用不同的頻譜。在圖一給出的例子中，外部用戶的FRF=1/3。



圖一 RPS示例

SFRS對社區的劃分與RPS相同，也根據事先選定的FRF保證相鄰社區的外部用戶使用不同的頻譜。但與RPS不同的是，SFRS並未劃分出專用於內部用戶的頻譜，而是將相鄰社區外部用戶使用的頻譜在本社區內部進行複用。圖二給出了外部用戶FRF=1/3的SFRS示例。

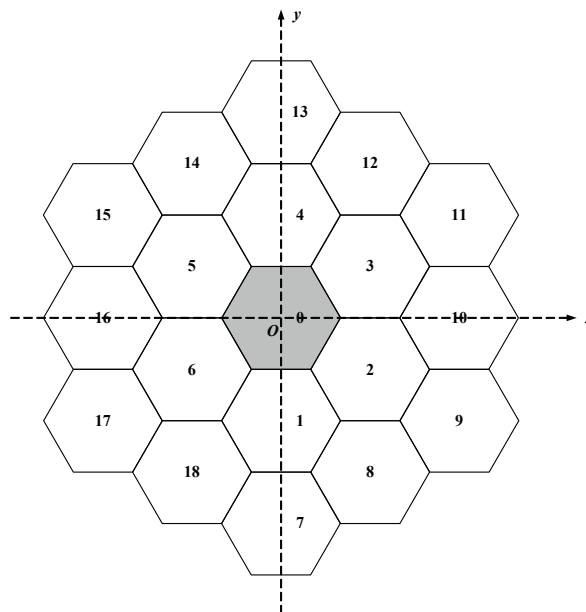


圖二 SFRS示例

2.2 系統模型

本文以圖三所示的兩層六邊形蜂窩為例，共19個社區，編號依次為0~18，基站（Base Station）位於社區中心，也依次編號為0~18。0號社區為目標社區，以目標社區中心為座標原點建立直角坐標系。設社區半

徑為 R ，用戶均勻分佈且數量足夠多，系統所有通道全部被使用，每條通道具有相等的帶寬，每個用戶僅允許使用一條通道。RPS與SFRS的外部用戶FRF均取為1/3。



圖三 兩層蜂窩模型

取定目標社區中某一用戶為目標用戶，座標為 (x, y) ，使用目標社區第 j 條通道，第 i 號基站的座標為 (x_i, y_i) ，其在第 j 條通道上的發射功率為 $P_{i,j}$ ，則目標用戶的SINR為：

$$\gamma(x, y) = \frac{P_{0,j} L_0(x, y)}{\sum_{i=1}^{18} P_{i,j} L_i(x, y) + N_0} \quad (1)$$

其中 $L_i(x, y) = L_r [d_i(x, y)/d_r]^n \chi_i$ ($i=0, 1, \dots, 18$) 為第 i 號基站到目標用戶的包含陰影衰落（Shadow Fading）的路徑損耗（Path Loss）[10]； $d_i(x, y) = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}$ 為第 i 號基站到目標用戶的距離； d_r 稱為參考距離，對於宏蜂窩（Macro Cell）通常取1km，微蜂窩（Micro Cell）取100m或1m[10]； $L_r = G_t G_r (\lambda/4\pi d_r)^2$ 為參考距離處的自由空間路徑損耗， G_t 和 G_r 為發射和接收天線的增益（Gain），本文中取 $G_t = G_r = 1$ ； λ 為載波波長； n 為路徑損耗指數； χ_i 為獨立同分佈的對數正態分佈隨機變數，用於建模陰影衰落； $N_0 = kTB_u$ 為熱雜訊功率， k 為玻爾茲曼常數， T 為環境的熱力學溫度， B_u 為通道帶寬。計算用戶傳輸速率時，考慮信噪比差額（SNR Gap） Γ 的影響。 Γ 用於衡量香農通道容量與實際傳輸速率之間的差距。對於給定的誤碼率 P_e ， $\Gamma \equiv -\ln(5P_e)/1.5$ [8][11]。考慮信噪比差額後的目標用戶傳輸速率可表示為：

$$Rate(x, y) = B_u \log_2 [1 + \gamma(x, y) / \Gamma] \quad (2)$$

3 折衷關係圖的計算

折衷關係圖的縱坐標軸為社區吞吐量，橫坐標軸為某項衡量ICI水準的指標。本文選擇兩種衡量ICI水準的指標：(a)社區服務的用戶數一定時，最小的用戶速率（Minimum User Rate, MUR）；(b)最小用戶速率一定時，社區可同時服務的最大用戶數（Maximum User Account, MUA）。分別採用以上兩種指標作為折衷關係圖的橫坐標軸時，可得到吞吐量-最小用戶速率折衷關係圖（Throughput-MUR, T-MUR）和吞吐量-最大用戶數折衷關係圖（Throughput-MUA, T-MUA）。下面給出這些指標在RPS和SFERS中的計算方法。

3.1 RPS中折衷關係圖的計算

設RPS中社區內部區域和外部區域分別用 A_{in} 和 A_{out} 表示，面積分別為 S_{in} 和 S_{out} ，內部六邊形的半徑為 R_d （ $0 \leq R_d \leq R$ ）。由於本文假定用戶均勻分佈、每條通道帶寬相等且每個用戶僅能使用一條通道，故每個用戶佔用相等的帶寬且系統分配給內外兩部分區域的頻譜量之比等於兩部分區域的面積之比。只要 R_d 確定則內部區域和外部區域擁有的頻譜量也隨之確定。當 $R_d=0$ 時，RPS退化為FRF=1/3的TFRS；當 $R_d=R$ 時，RPS退化為FRF=1的TFRS。 R_d 越大，內部區域分得的頻譜量越多，整個社區的FRF越接近1。以下推導MUR與社區用戶數的關係。

設系統總帶寬為 W ，社區用戶數為 M ，社區總面積為 $S_c=S_{in}+S_{out}$ ，用戶密度為 $D=M/S_c$ 。由於社區內部FRF=1，社區外部FRF=1/3，故 $B_u DS_{in}+3B_u DS_{out}=W$ ，解得：

$$B_u = WS_c / [M(S_c + 2S_{out})] \quad (3)$$

當目標用戶位於社區內部時，第1~18號基站都對其造成干擾；當目標用戶位於社區外部時，僅第8、10、12、14、16和18號基站對其造成干擾。兩種情況下的SINR可分別表示為：

$$\gamma_{in}^{RPS}(x, y) = \frac{P_{0,j} L_0(x, y)}{\sum_{i=1}^{18} P_{i,j} L_i(x, y) + N_0} \quad (4)$$

$$\gamma_{out}^{RPS}(x, y) = \frac{P_{0,j} L_0(x, y)}{\sum_{i=8,10,12,14,16,18} P_{i,j} L_i(x, y) + N_0} \quad (5)$$

由於存在陰影衰落，用戶的SINR是隨機變數。我們關心系統的平均性能，用陰影衰落的均值 $\bar{\chi}_i$ 代替瞬時值 χ_i ，並假設所有基站在所有通道上的發射功率均為 P_i ，則以上兩式可簡化為：

$$\gamma_{in}^{RPS}(x, y) = \frac{d_0(x, y)^{-n} \bar{\chi}_0}{\sum_{i=1}^{18} d_i(x, y)^{-n} \bar{\chi}_i + \frac{d_r^{-n} k T W S_c}{L_r P_i M (S_c + 2S_{out})}} \quad (6)$$

$$\gamma_{out}^{RPS}(x, y) = \frac{d_0(x, y)^{-n} \bar{\chi}_0}{\sum_{i=8,10,12,14,16,18} d_i(x, y)^{-n} \bar{\chi}_i + \frac{d_r^{-n} k T W S_c}{L_r P_i M (S_c + 2S_{out})}} \quad (7)$$

用戶速率可表示為：

$$Rate_{in}^{RPS}(x, y, M) = \frac{W S_c}{M(S_c + 2S_{out})} \log_2(1 + \gamma_{in}^{RPS}(x, y) / \Gamma) \quad (8)$$

$$Rate_{out}^{RPS}(x, y, M) = \frac{W S_c}{M(S_c + 2S_{out})} \log_2(1 + \gamma_{out}^{RPS}(x, y) / \Gamma) \quad (9)$$

社區的最小用戶速率（MUR）可表示為：

$$MUR(M) = \min\left(\min_{(x,y) \in A_{in}} Rate_{in}^{RPS}(x, y, M), \min_{(x,y) \in A_{out}} Rate_{out}^{RPS}(x, y, M)\right) \quad (10)$$

根據基本的幾何運算可得[10]：

$$\min_{(x,y) \in A_{in}} Rate_{in}^{RPS}(x, y, M) = Rate_{in}^{RPS}(R_d, 0, M) \quad (11)$$

$$\min_{(x,y) \in A_{out}} Rate_{out}^{RPS}(x, y, M) = Rate_{out}^{RPS}(R, 0, M) \quad (12)$$

於是(10)式可簡化為：

$$MUR(M; R_d) = \min(Rate_{in}^{RPS}(R_d, 0, M), Rate_{out}^{RPS}(R, 0, M)) \quad (13)$$

由上式可知，在系統總帶寬給定的情況下，MUR是用戶數 M 的函數，其中 R_d 為參數。任意給定 R_d ，均可根據 M 計算MUR。反之，也可根據MUR計算 M 。

根據(8)、(9)式可求出位於社區內任意位置處的用戶的速率，於是社區吞吐量可表示為：

$$T(M; R_d) = \iint_{A_{in}} Rate_{in}^{RPS}(x, y, M) Dxdy + \iint_{A_{out}} Rate_{out}^{RPS}(x, y, M) Dxdy \quad (14)$$

為防止第一項積分發散，可限制用戶距基站的最近距離為 R_c 。相應地， R_d 的取值範圍限制在 $R_c \leq R_d \leq R$ 。

綜上所述，社區用戶數 M 一定時，對任意給定的 R_d 可根據(13)、(14)式求出MUR和吞吐量，進而得到RPS的T-MUR折衷關係圖；社區最小用戶速率一定時，對任意給定的 R_d 可由(13)式解出社區可同時支持的最大用戶數MUA，代入(14)式計算 $T(MUA; R_d)$ ，進而得到RPS的T-MUA折衷關係圖。

3.2 SFERS中折衷關係圖的計算

對於外部區域採用FRF=1/3的SFERS而言，其內部區域佔有的帶寬為外部區域的兩倍。在用戶均勻分佈且佔用相等帶寬的假設下，要求內部區域的面積也應為外部區域的兩倍。於是內部區域的半徑固定為 $\sqrt{2/3}R$ 。與RPS不同的是，為保證社區邊緣的通信品質，SFERS中基站發射給內部用戶的信號功率 $P_{t,in}$ 一般不超過發射給外部用戶的信號功率 $P_{t,out}$ ，二者的比值 $\eta = P_{t,in}/P_{t,out}$ （ $0 \leq \eta \leq 1$ ）是SFERS的重要參數。內部用戶的SINR隨 η 單調遞增，外部用戶的SINR隨 η 單調遞減。 $\eta=1$ 時，SFERS退化為FRF=1的TFRS。 $\eta=0$ 時，如果允許內部用戶和外部用戶共用原分配給外部用戶的帶寬，則SFERS退化為FRF=1/3的TFRS；如果禁止上述共用，則SFERS等價於採用FRF=1/3的頻率複用方案僅對外部用戶提供服務，本文只考慮禁止共用的情形。

SFRS的MUR與社區用戶數關係的推導過程與RPS類似。設社區用戶數為 M ，由於社區可使用全部系統頻譜，故每個用戶佔用的帶寬 $B_u=W/M$ 。與RPS不同的是，不論對於內部用戶還是外部用戶，干擾均來自所有其他社區的基站。其中有6個基站的干擾發射功率為 $P_{t,out}$ ，12個基站的干擾發射功率為 $P_{t,in}$ 。參照圖二和圖三，以使用圖二中 d 頻段內某個通道的內部用戶為例，第2、4、6、7、11和15號基站的干擾發射功率為 $P_{t,out}$ ，其餘12個基站的干擾發射功率為 $P_{t,in}$ ；對於外部用戶，第8、10、12、14、16和18號社區基站的干擾發射功率為 $P_{t,out}$ ，其餘12個基站的干擾發射功率為 $P_{t,in}$ 。參考(6)、(7)式，內部用戶和外部用戶的SINR可表示為：

$$\gamma_{in}^{SFRS}(x,y) = \frac{P_{t,in}d_0(x,y)^{-n}\bar{\chi}_0}{\sum_{i \in J_{in}} P_{t,out}d_i(x,y)^{-n}\bar{\chi}_i + \sum_{i \in J_{in}} P_{t,in}d_i(x,y)^{-n}\bar{\chi}_i + \frac{d_r^{-n}kTW}{L_r M}} \quad (15)$$

$$\gamma_{out}^{SFRS}(x,y) = \frac{P_{t,out}d_0(x,y)^{-n}\bar{\chi}_0}{\sum_{i \in J_{out}} P_{t,out}d_i(x,y)^{-n}\bar{\chi}_i + \sum_{i \in J_{out}} P_{t,in}d_i(x,y)^{-n}\bar{\chi}_i + \frac{d_r^{-n}kTW}{L_r M}} \quad (16)$$

其中

$$\begin{aligned} J_{in} &= \{2, 4, 6, 7, 11, 15\} \\ J_{in} &= \{1, 2, \dots, 18\} - J_{in} \\ J_{out} &= \{8, 10, 12, 14, 16, 18\} \\ J_{out} &= \{1, 2, \dots, 18\} - J_{out} \end{aligned}$$

內部用戶和外部用戶的傳輸速率可表示為：

$$Rate_{in}^{SFRS}(x,y,M) = \frac{W}{M} \log_2(1 + \gamma_{in}^{SFRS}(x,y)/\Gamma) \quad (17)$$

$$Rate_{out}^{SFRS}(x,y,M) = \frac{W}{M} \log_2(1 + \gamma_{out}^{SFRS}(x,y)/\Gamma) \quad (18)$$

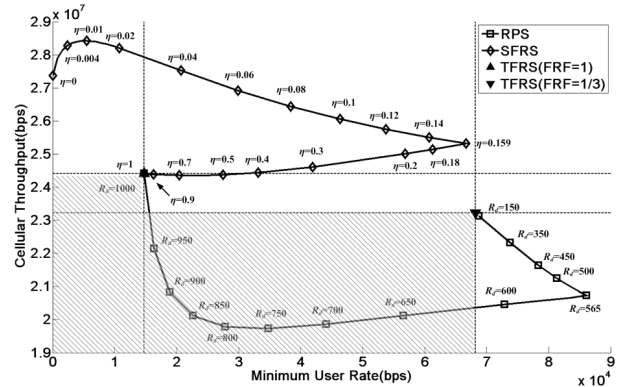
以下計算過程與RPS相同，不再贅述。

4 數值計算結果分析

本節結合一組具體的系統參數，給出T-MUR和T-MUA折衷關係圖的數值計算結果，並說明二者的物理意義及應用。系統參數如下：系統總帶寬 $W=20\text{MHz}$ ；載波波長 $\lambda=0.15\text{m}$ ；參考距離 $d_r=100\text{m}$ ；路徑損耗因數 $n=4$ ；陰影衰落均值 $\bar{\chi}_i=0.01$ ($i=0, 1, \dots, 18$)；社區半徑 $R=1\text{km}$ ；環境的熱力學溫度 $T=300\text{K}$ ；基站發射功率 $P_t=P_{t,out}=20\text{W}$ ；用戶距基站的最小距離 $R_c=100\text{m}$ 。

4.1 T-MUR折衷關係圖

圖四為 $M=100$ 時，RPS和SFRS的T-MUR折衷關係圖，其中誤碼率 $P_e=10^{-6}$ 。在計算吞吐量時，參照文獻[7]的做法用圓形蜂窩對六邊形蜂窩做了近似。



圖四 RPS與SFRS的T-MUR折衷關係圖

圖四中，用正方形標記點標注的曲線為RPS的T-MUR曲線，用菱形標記點標注的曲線為SFRS的T-MUR曲線，參數 R_d 和參數 η 的採樣值分別標注在兩條曲線周圍。同時用正三角形和倒三角形標記點將FRF=1的TFRS和FRF=1/3的TFRS的T-MUR折衷關係標注在圖中以作對比。分析該圖可得出以下結論：

- (1)極限情況： R_d 趨向於 R 時，RPS趨向於FRF=1的TFRS； R_d 趨向於 R_c 時，RPS趨向於FRF=1/3的TFRS； η 趨向於1時，SFRS趨向於FRF=1的TFRS； η 趨向於0時，由於本文禁止社區內部用戶分享社區外部用戶分配到的頻譜，於是SFRS並不趨向於FRF=1/3的TFRS，而MUR趨向於0，這是由於內部用戶接收到的信號功率趨於0從而速率趨於0。
- (2)陰影區：縱坐標值大的點在吞吐量指標上優於縱坐標值小的點；橫坐標值大的點在最小速率指標上優於橫坐標值小的點。位於圖中陰影區域的點所代表的複用方案，其吞吐量指標和最小速率指標均劣於某種TFRS，因此這些複用方案實用價值不大。從圖中可見當 $R_d > 0.615R$ 時，RPS將位於陰影區；而不論 η 取何值，SFRS均不會落入陰影區。
- (3)轉換點：當參數改變時，RPS和SFRS的T-MUR折衷關係圖上均出現明顯的轉換點 ($R_d=0.565R$ 和 $\eta=0.159$)，該點對應的參數可獲得最大的最小速率。分析出現轉換點的原因時應抓住一點：在本文的假設下所有用戶佔有相等的帶寬，因此速率大小取決於信噪比。對於RPS，當 $0.565R < R_d < R$ 時，由於 R_d 取值相對較大，內部區域最外沿用戶的SINR是社區所有用戶中最低的；當 $R_d < 0.565R$ 時外部區域的最外沿用戶的SINR是社區所有用戶中最低的，即決定MUR的用戶由社區內部轉移到了外部。SFRS遵循類似的規律。
- (4)SFRS在吞吐量性能上有優勢，只要 $\eta < 0.5$ 則吞吐量指標優於兩種TFRS，並且在相當大的一段範圍內 ($0.159 < \eta < 0.5$) 隨著 η 減小，吞吐量和MUR兩項指標都有所提高。 η 繼續減小時MUR指標急劇下降，當 η 足夠小時 ($\eta < 0.01$) 兩項指標都開始下降。造成這一現象的原因是， η 減小將降低內部用戶的SINR同時提高外部用戶的SINR。當 η

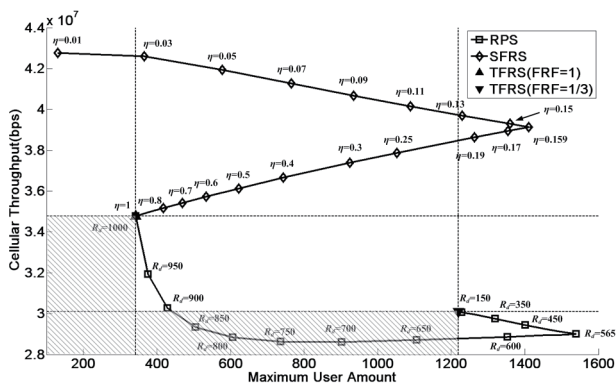
較大時，外部用戶的速率受限於SINR而內部用戶的速率受限於帶寬，因此減小 η 導致的外部用戶增加的速率會超過內部用戶減小的速率，使得兩項指標均提高。當 $\eta < 0.159$ 後，MUR由內部用戶決定，因此指標開始下降，但此時外部用戶仍是SINR受限、內部用戶仍是帶寬受限的，故 η 減小導致的外部用戶增加的速率仍大於內部用戶減小的速率。當 η 足夠小時，內部用戶逐漸成為SINR受限的，外部用戶成為帶寬受限的，吞吐量開始下降。

(5) T-MUR折衷關係圖可用於指導用戶密度確定時的系統設計。若吞吐量比最小速率對系統更重要，則複用方案應選用SFRS，在此基礎上根據MRU要求選擇 η ；若最小速率比吞吐量對系統更重要，則複用方案應選用RPS，選擇 R_d 時應在滿足MRU要求的前提下使吞吐量儘量高。

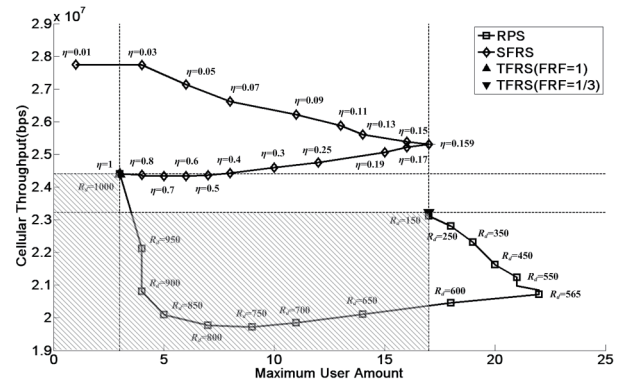
4.2 T-MUA折衷關係圖

本小節針對兩種業務給出RPS和SFRS的T-MUA折衷關係圖。圖五針對語音業務，最小用戶速率取9.6kbps，誤碼率指標取 10^{-3} ；圖六針對資料業務，最小用戶速率取384kbps，誤碼率指標取 10^{-6} 。總的來看，圖五和圖六中RPS和SFRS的T-MUA折衷曲線走勢與圖四大致相同，並且也存在轉換點、陰影區等現象。這是因為MUR和MUA都是反映ICI水準的指標，T-MUR與T-MUA都反映了吞吐量與ICI水準的折衷關係。從圖四中得出的結論和分析對圖五和圖六同樣適用。對比圖五和圖六，對於同樣的複用方案，社區可同時支援的資料業務用戶數遠小於語音業務用戶數；由於誤碼率要求高，資料業務的吞吐量小於語音業務的吞吐量。值得注意的一點是，在圖五中，當 $0.13 < \eta < 0.19$ 時SFRS在吞吐量和MUA性能上均優於兩種TFRS。可見當業務速率和誤碼率要求較低時，SFRS能更有效地利用頻譜資源。

T-MUA圖可用於指導業務類型確定時的系統設計。當業務速率和誤碼率要求確定後，可做出不同複用方案的T-MUA折衷關係圖，根據用戶密度和吞吐量等要求選擇適當的方案和參數。



圖五 RPS與SFRS的T-MUA折衷關係圖之一
(最小用戶速率：9.6kbps, $P_e=10^{-3}$)



圖六 RPS與SFRS的T-MUA折衷關係圖之二
(最小用戶速率：384kbps, $P_e=10^{-6}$)

5 結論

本文提出一種評價和設計頻率複用方案的新方法——「吞吐量-ICI水準」折衷關係圖，並對兩類典型的頻率複用方案RPS和SFRS的折衷關係圖進行了計算和分析。分析結果表明，SFRS在吞吐量性能上優於RPS，而RPS能提供更高的最小用戶速率（社區用戶數一定時）或更大的用戶容量（業務速率要求一定時）。此外，若RPS參數選擇不當會使吞吐量和最小用戶速率（或最大用戶數）指標均低於TFRS，而對於速率和誤碼率要求較低的業務，SFRS有望使吞吐量和最大用戶數指標均優於TFRS。

致謝

本研究受到中華人民共和國重點基礎研究發展規劃（973）專案（2007CB310601）和國家自然科學基金（60532070）的支持。同時作者對審稿人提出的寶貴意見深表謝意。

參考文獻

- [1] D. Tse, P. Viswanath, "Fundamentals of Wireless Communication," Cambridge: Cambridge University Press, 2005, pp.123-124.
- [2] 3GPP. TR25. 814, "Physical Layer Aspects for Evolved UTRA," Release 7. 2006.
- [3] 3GPP. R1-050738, "Interference Mitigation-- Considerations and Results on Frequency Reuse," 2005.
- [4] 3GPP. R1-050629, "Inter-cell Interference Mitigation," 2005.
- [5] 3GPP. R1-050841, "Further Analysis of Soft Frequency Reuse Scheme," 2005.
- [6] 許方敏、陶小峰、許曉東，軟分數頻率複用，中興通訊技術，Vol. 13, No. 4, 2007, pp.17-19。 Xu Fangmin, Tao Xiaofeng, Xu Xiaodong, "Soft Fractional Frequency Reuse," ZTE Communications, Vol. 13, No. 4, 2007, pp.17-19 (in Chinese).

- [7] T. Kwon, H. Song, and J. Lee, et al., "A Power Division Reuse Partitioning Scheme with Half Frequency Reuse Factor for OFDMA Downlink Systems," IEEE ICC '08, 2008, pp. 3237-3241.
- [8] H. Lei, X. Zhang, and D. Yang, "A Novel Frequency Reuse Scheme for Multi-Cell OFDMA Systems", IEEE VTC2007-Fall, 2007, pp.347-351.
- [9] Y. Liang, A. Goldsmith, "Adaptive Channel Reuse in Cellular Systems," IEEE ICC '07, 2007, pp.857-862.
- [10] T. Rappaport 著，周文安等譯，無線通信：原理與應用(第二版)，北京：電子工業出版社，2006，pp.47、95-96。
T. Rappaport, Translated by Zhou Wenan et al., "Wireless Communications Principles and Practice (2nd Edition)," Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006, pp.47, 95-96
- [11] H. Seo, B. Lee, "A Proportional-Fair Power Allocation Scheme for Fair and Efficient Multiuser OFDM Systems," IEEE Globecom '04, 2004, pp.3737-3741.
- [12] Chyi-Ren Dow, Jong-Shin Chen, and Yu-Feng Hwang, "PLOW: An Adaptive Channel Allocation Strategy for Large-Scale Mobile Cellular Networks," Journal of Internet Technology, Vol. 3, No. 2, 2002, pp. 89-98.

作者簡歷



賈亦真 (Yi-Zhen Jia)，2005年於北京清華大學電子工程系取得學士學位，目前是北京清華大學電子工程系博士生。主要研究領域為無線通信、衛星通信、蜂窩移動通信等。



王有政 (You-Zheng Wang)，1997年於北京清華大學電子工程系取得物理電子學與光電子學碩士。目前是北京清華大學宇航技術研究中心副研究員。主要研究方向為衛星通信與航太資訊處理、第4代移動通信等。



陸建華 (Jian-Hua Lu)，北京清華大學電子工程系教授，博士生導師，學術委員會副主任。研究方向為無線通信系統，無線多媒體通信、圖像通信以及無線網路等。