

# 博士学位論文

「広帯域移動通信におけるセル間干渉制御技術に関する研究」

Research on Inter-Cell Interference Coordination Technologies  
for Broadband Mobile Communications

2015年2月

東北大学大学院 工学研究科 通信工学専攻  
(指導教員：安達 文幸 教授)

学籍番号：B2TD2302

氏名：関 宏之

# Research on Inter-Cell Interference Coordination Technologies for Broadband Mobile Communications

**ABSTRACT:** The amount of data traffic is explosively growing because of the increase in video traffic and spread of smartphones, and more high-speed and broadband wireless technologies are expected in future cellular mobile systems, such as Long Term Evolution (LTE)-Advanced and fifth generation cellular mobile systems (5G). The Heterogeneous Network (HetNet), where many small cells whose transmission power is relatively small are located inside the area covered by a macrocell, and the Carrier Aggregation (CA), which aggregates multiple frequency bands, are key technologies for LTE-Advanced. However, such technologies complicate the cell structure and increase the inter-cell interference, which limits the capacity and degrades the cell-edge user throughput. The conventional Signal-to-Interference plus Noise power Ratio (SINR)-based control for the radio parameters (such as the transmission power, the frequency allocation, and the direction of antenna pattern) is insufficient and the throughput-based control is necessary to cope with the complicated inter-cell interference. This thesis explicates Inter-Cell Interference Coordination (ICIC) technologies that control the radio parameters to improve both the capacity and the cell-edge user throughput by applying an original low computational cost algorithm for user throughput calculation. The proposed fast user throughput calculation method, which utilizes the criteria for maximizing the Proportional Fairness (PF) utility function, is applicable to develop novel ICIC technologies for future broadband mobile communication systems. This thesis is organized as follows.

Section 2 describes the inter-cell interference conditions demonstrating the distribution of SINR and that of user throughput in the conventional macrocell and HetNet. Section 2 also analyzes the throughput performance achieved by the PF scheduling in both the single-cell and multi-cell environments. The analysis reveals that the throughput-based PF scheduling automatically allocates users to appropriate radio resources, such as connected cells and allocated frequency bands. This means that the new ICIC schemes can be developed if user throughput is calculated by analyzing the resource allocation ratio after the throughput-based PF scheduling.

Section 3 proposes a method that calculates the resource allocation ratio and user throughput with low computational cost. Convex optimization using the Karush-Kuhn-Tucker (KKT) condition is applied to solve the PF utility maximization problem in order to estimate the resource allocation ratio that enables the user throughput calculation. The proposed method has a faster convergence speed than the conventional “system level simulation” and can greatly reduce the computational time for the user throughput calculation.

Section 4 describes three ICIC technologies that apply the proposed method for estimating the resource allocation ratio and user throughput. The first technology is the “throughput-based small cell design”, where the proposed fast user throughput calculation method is utilized to find better combinations of radio parameters, such as the location of small base stations and the direction of antenna patterns. The Greedy Algorithm is applied to decide the sub-optimum radio parameters that

maximize PF utility because these criteria take into consideration both user throughput and fairness. The second technology is the “centralized ICIC using three dimensional (3D) beam-switching” that controls the direction of 3D narrow beams for each frequency band of each base station. The centralized controller calculates sub-optimum combinations of narrow beams so as to maximize the PF utility of all users. The results of simulations confirm that the 3D beam-switching without user multiplexing achieves about 1.5 times higher average user throughput and about 2.6 times higher cell-edge user throughput. Moreover, with spatial user multiplexing, it achieves about 2.1 times higher average user throughput and about 3.3 times higher cell-edge user throughput than the conventional macrocell. The third technology is the “Centralized-Radio Access Network (C-RAN) base station using baseband pooling”, where the resource allocation ratio calculated by the proposed fast user throughput calculation method is utilized to reduce the necessary baseband resources deployed at the C-RAN base station. The proposed scheme could achieve about 1.2 times higher average user throughput and about 2.2 times higher cell-edge user throughput than the conventional signal strength-based method. The proposed scheme can also achieve an effect on baseband pooling that reduces the usage rate of baseband resources by about 25% for average user throughput, about 45% for median user throughput, and about 60% for cell-edge user throughput compared with the conventional signal strength-based method.

As mentioned above, this thesis proposes a user throughput calculation method that applies the convex optimization using the KKT condition in order to solve the PF utility maximization problem. The proposed method calculates the resource allocation ratio that enables the estimation of user throughput with low computational cost. The proposed method is applicable to develop ICIC technologies that control the radio parameters on the basis of the user throughput analysis to mitigate the inter-cell interference. Since the ICIC technologies demonstrated in this thesis achieve both higher capacity and higher cell-edge user throughput, they can conceivably be applied to future broadband mobile communications.

## 目次

第1章 緒論	3
第2章 PF スケジューリングとユーザ割り当ての考察	5
2.1. セル間干渉のシミュレーションと定量分析	5
2.1.1. シミュレーションモデル	5
2.1.2. マクロセルの SINR 分布	7
2.1.3. マクロセルのユーザスループット分布	10
2.1.4. ヘテロジニアスネットワークの SINR 分布	12
2.1.5. ヘテロジニアスネットワークのユーザスループット分布	15
2.2. スケジューリングアルゴリズムとスループット特性	17
2.2.1. シングルセル環境でのスループット解析	18
2.2.1.1. PF スケジューリング	18
2.2.1.2. シングルセル環境でのスループット解析方法	18
2.2.1.3. シングルセル環境でのスループット解析結果	21
2.2.2. マルチセル環境でのスループット特性	22
2.2.2.1. システムモデル	23
2.2.2.2. システムレベルシミュレーション結果	23
2.2.3. セル間干渉制御技術とスケジューリング	24
2.2.3.1. FFR の原理	24
2.2.3.2. FFR でのスケジューリングの問題	25
2.3. PF スケジューリングとユーザ割り当ての解析	29
2.3.1.1. ユーザ分割を行わない FFR の従来例	29
2.3.1.2. バンド間に電力差があるモデルでの考察	30
2.3.1.3. PF スケジューリング前にユーザ分割を行わない場合の FFR 特性	33
2.4. 第2章のまとめ	36
第3章 KKT 条件を用いたスループット計算手法の提案	37
3.1. PF スケジューリングに関する文献	37
3.2. PF メトリックと PF Utility の関係	38
3.2.1. KKT 条件を用いたスループット計算手法	39
3.2.1.1. KKT 条件による関係式の導出	39
3.2.1.2. 注水定理による導出式の解法	41
3.2.1.3. 注水定理計算の収束特性	42
3.2.1.4. KKT によるスループット計算手法の考察	45
3.3. 第3章のまとめ	46
第4章 スループットを指標としたセル間干渉制御への適用	47
4.1. 適用例1：スループットを指標としたスモールセル設計	47

4.1.1.	スループットを指標としたセル設計の必要性.....	47
4.1.2.	スループットを指標としたセル設計.....	48
4.1.3.	探索パターン削減方法.....	49
4.1.4.	パターン探索における評価指標.....	50
4.2.	適用例2：集中制御型三次元ビームスイッチング.....	54
4.2.1.	集中制御型三次元ビームスイッチング検討の背景.....	54
4.2.2.	集中制御型三次元ビームスイッチングの概要.....	55
4.2.3.	シミュレーションモデル.....	56
4.2.4.	アンテナ指向性の探索アルゴリズム.....	59
4.2.5.	シミュレーション結果と考察.....	62
4.2.5.1.	基本特性：FFR との比較.....	62
4.2.5.2.	基本特性：バンド数の影響.....	63
4.2.5.3.	基本特性：ビーム幅の影響.....	64
4.2.5.4.	基本特性：角度広がりへの影響.....	65
4.2.5.5.	実用性検証：受信電力の測定閾値の影響.....	67
4.2.5.6.	実用性検証：端末移動の影響.....	68
4.2.5.7.	実用性検証：制御非対象基地局の影響.....	70
4.2.6.	提案 ICIC のまとめ.....	72
4.3.	適用例3：C-RAN 型基地局におけるベースバンドプーリング.....	72
4.3.1.	提案 Pooling の概要.....	72
4.3.2.	シミュレーションモデル.....	73
4.3.3.	CC 割り当てと CC アサインの最適値探索アルゴリズム.....	76
4.3.4.	シミュレーション結果と考察.....	77
4.3.5.	提案 Pooling のまとめ.....	82
4.4.	第4章のまとめ.....	83
	第5章 結論.....	84
	謝辞.....	86
	参考文献.....	87
	発表論文等.....	90

## 第1章 緒論

セル間干渉はセルラ移動通信システムの通信容量を決定する重要な要素であり、これまでセル間干渉を考慮したセル設計や、セル間干渉に強い無線アクセス方式、セル間干渉を低減して通信容量を増大する干渉制御技術など、様々な研究が行われてきた。狭帯域伝送である第1世代(アナログ Frequency Division Multiple Access: FDMA)および第2世代(デジタル Time Division Multiple Access: TDMA)の携帯電話システムでは、同一周波数を利用するセル間の距離を離してセル内の所要品質を確保するため、Nセル繰り返し(Nは3,4,7,9などの値)の周波数割り当てが用いられた。一方、広帯域伝送である第3世代(Wideband-Code Division Multiple Access: W-CDMA)以降の携帯電話システムでは、セル繰り返しを用いずに全てのセルで同一周波数を用いており(N=1に相当)、異なる周波数をセル毎に割り振るセル設計の煩わしさを回避している。この時、セル間干渉が大きくなる問題に対しては、拡散利得や符号化利得を用いて所定の通信品質(Signal-to-Interference plus Noise power Ratio: SINR)を確保している。また、第3.5世代(High-Speed Packet Accessを採用した W-CDMA)以降の携帯電話システムでは、セル間干渉の大きいセル端付近の端末と、セル間干渉の小さいセル中心付近の端末で、拡散率やコード多重数、変調多値数や符号化率と言ったパラメータを変えることで、受信 SINR に応じた伝送速度の可変制御が用いられている。また、時間および周波数領域に分割された無線リソースをユーザ毎の受信 SINR に応じて適応的に割り当てるスケジューリングも行われている。そして、第3.9世代(Long Term Evolution: LTE)および第4世代(LTE-Advanced)の携帯電話システムでは、セル間干渉が無線リソース毎に異なる状態を利用し(あるいはセル間干渉が無線リソース毎に異なる状態を意図的に形成し)、各無線リソースにおけるユーザ毎の SINR に応じたユーザ割り当てとスケジューリングを行うことで、セル端付近の端末のスループットを改善する「セル間干渉制御技術」が実用化されている。

本論文では、第5世代移動通信を始めとする広帯域移動通信への適用を想定した「セル間干渉制御技術」に関する研究成果について報告する。近年、スマートフォンやタブレット端末の普及に伴い、動画などのマルチメディアデータがモバイル環境で大量に利用されるようになり、移動通信のトラフィック増加が問題となっている。トラフィックの増加に対応するには、既にサービスが行われているマクロセルに対して、送信電力が小さくセル半径の小さいスモールセルを増設するヘテロジニアスネットワーク(HetNet)や、新たに割り当てられる周波数帯域を用いてマルチバンド化するキャリアアグリゲーション(Carrier Aggregation: CA)の適用が有効とされている。しかしながら、このようなスモールセルの増設や周波数バンドの追加によって、セル間干渉の状態は複雑度を増して行くことが懸念される。このように複雑化するセル間干渉を制御し、セルラシステムの通信容量を最適化するには、セル内に分布するユーザのスループットを解析する方法が最も確実な方法と考えられる。本論文では、まず、ユーザ間の公平性を考慮するために広く利用される Proportional Fairness (PF) のスケジューリングアルゴリズムに着目し、PF スケジューリングと無線リソースへのユーザ割り当ての関係について解析する。これにより、PF スケジューリングは、1つの無線リソース内でのユーザの割り当てを決定するだけでなく、複数の無線リソ

ース間で、最適なユーザ割り当てを行うことができることを明らかにする。そして、この考察をもとに、セル内のユーザスループットを高速に計算するアルゴリズムである「KKT 条件を用いたスループット計算手法」を提案する。この手法は、各ユーザのスループットの対数の総和として定義される PF Utility の最大化問題を解くことで、PF スケジューリングを行った状態での無線リソース毎のユーザ割り当て率を求め、そこから各ユーザのスループットを計算するものである。そして、PF Utility が最大となるように、無線パラメータ（基地局設置位置、基地局毎の周波数割り当て、周波数バンド毎の送信電力やアンテナ指向性など）を調整することで、セル間干渉を考慮した通信容量の最適化を実現する方法を提案する。すなわち、本論文で検討するセル間干渉制御技術とは、「PF Utility 最大化規範に基づくスループットを指標とした通信容量の最適制御」であり、本論文ではこの技術を利用して、今後複雑度が増すことが予想される第 5 世代移動通信を始めとする広帯域移動通信において有効となるセル間干渉制御技術の検討を行う。

本論文は以下の構成となっている。本章に続き、第 2 章では、PF スケジューリングと無線リソースへのユーザ割り当ての関係について検討を行い、セル間干渉下で得られるスループットの解析結果やシミュレーション結果について考察する。そして、PF スケジューリングによって、複数の無線リソースに対して最適なユーザ割り当てが自動的に行われることを示す。第 3 章では、本研究で提案する「KKT 条件を用いたスループット計算手法」について詳しく解説する。第 2 章の考察に基づき、提案手法では、PF スケジューリングによる無線リソース毎のユーザ割り当て率を計算することで、スケジューリング後のユーザスループットを高速に計算することができる。第 4 章では、第 3 章で提案する「KKT 条件を用いたスループット計算手法」を活用する無線パラメータの最適制御の適用例について説明する。セル設計段階でのセル間干渉を考慮した最適化の適用例として「スループットを指標としたスモールセル設計」を、システム運用中の最適制御への適用例としては「集中制御型三次元ビームスイッチング」および「Centralized-Radio Access Network (C-RAN) 型基地局におけるベースバンドプーリング」についてそれぞれ検討を行う。そして、これらの適用例の有効性や実現性について、シミュレーション結果を用いて考察する。第 5 章で本論文のまとめを行う。

## 第2章 PF スケジューリングとユーザ割り当ての考察

本章では、まず、セル間干渉について理解するため、計算機シミュレーションを用いて従来の基本的なマクロセル構成および将来のスマートセル化において普及が見込まれているヘテロジニアスネットワーク (HetNet) におけるセル間干渉について定量的な分析を行う。次に、スケジューリングアルゴリズムとユーザスループットの関係を理解するため、シングルセル環境におけるユーザスループットの解析結果およびシングルセルとマルチセルの両方の環境におけるユーザスループットの計算機シミュレーション結果を示す。最後に、従来のセル間干渉制御技術の代表例である Fractional Frequency Reuse (FFR) に着目し、バンド間に送信電力差がある場合の PF スケジューリングと無線リソース(バンド)へのユーザ割り当ての関係を明らかにする。そして、各バンドに割り当てるユーザを予め決めておかななくても、スループットベースの PF スケジューリングを実施することで、バンド間で最適なユーザ割り当てが自動的に行われることを示す。

### 2.1. セル間干渉のシミュレーションと定量分析

セル間干渉の定量的な分析を行うため、セル繰り返し数の異なる各種セル構成における SINR 分布の計算機シミュレーション結果を示す。そして、各ユーザの SINR をスループットに換算することで、ユーザスループット分布を求め、セル繰り返し数やセル構成と通信容量の関係について考察する。

#### 2.1.1. シミュレーションモデル

移動通信において通信品質を表す指標として用いられる SINR は式(1)で定義され、 $S$  が所望信号の受信電力、 $I$  が周辺セルからの総干渉電力、 $N$  が受信機での熱雑音電力となる。

$$SINR = \frac{S(\text{所望信号の受信電力})}{I(\text{周辺セルからの総干渉電力}) + N(\text{熱雑音電力})} \quad (1)$$

SINR は、セル構成、ユーザ位置、伝搬モデル、移動通信システムの無線パラメータ (送信電力、アンテナ指向性等)、トラフィックモデルによって異なる値となる。本論文で用いるシミュレーション条件は、3GPP で使われている System simulation baseline parameters [1-2]を参考にした。また、本論文は、移動通信において多くのトラフィックが発生し[3-4]、その対応が求められている下りリンクを研究対象とする。表 2.1.1.1 に本論文で用いるシミュレーション条件を示す。Macro cell と Pico cell の両方のパラメータを記載している。Pico cell のパラメータはヘテロジニアスネットワーク (HetNet) [5-6]のシミュレーションに用いる。表 2.1.1.1 は代表的なパラメータであり、この表とシミュレーション条件が異なる場合はその都度明示する。なお、表中の UE は User Equipment の略であり、ユーザ端末を意味する。



表 2.1.1.1 シミュレーション条件

Parameters	Settings	
	Macro cell	Pico cell
Cell layout	19 cell sites, 3 sectors / site	—
	7 cell sites, 3 sectors / site	5 picos /sector
Inter-site distance (ISD)	500 m (3GPP case1) 1,732 m (3GPP case3)	Random
Transmission bandwidth	10 MHz	
Transmission power	46 dBm	30 dBm
Antenna gain	14 dBi	5 dBi
Antenna Pattern (Horizontal)	$A_H(\varphi) = -\min\left[12\left(\frac{\varphi}{\varphi_{3dB}}\right)^2, A_m\right]$ $\varphi_{3dB} = 70 \text{ degrees}, A_m = 25 \text{ dB}$	Omni directional
Antenna Pattern (Vertical)	$A_V(\theta) = -\min\left[12\left(\frac{\theta - \theta_{eilt}}{\theta_{3dB}}\right)^2, SLA_v\right]$ $\theta_{3dB} = 10, SLA_v = 20 \text{ dB}$	None
Combining method in 3D antenna pattern	$A(\varphi, \theta) = -\min\{-[A_H(\varphi) + A_V(\theta)], A_m\}$	None
Antenna tilt angle	15 degrees (3GPP case1) 6 degrees (3GPP case3)	None
Shadowing standard deviation	8 dB	10 dB
Shadowing correlation	0.5 (site), 1.0 (sector)	0.5 (pico)
UE distribution	30 UEs / sector, Uniform distribution (4 drops)	
Minimum distance	Macro-Pico 75 m, Pico-Pico 40 m Macro-UE 35 m, Pico-UE 10 m	
Penetration loss	20 dB	
Other losses	9 dB (Noise figure, Cable loss, etc.)	
Carrier frequency	2 GHz	
Number of antennas	Tx: 2, Rx: 2	
Pathloss	128.1 + 37.6log(d) [dB] d: Distance in kilometers	140.7 + 36.7log(d) [dB] d: Distance in kilometers
Fading model	None or flat Rayleigh fading	
Traffic model	Full buffer	
Scheduling	Throughput-based Proportional Fairness	

3GPP ではセルとセクタは同じ概念であり、セクタについてもセルと呼んでいる。本論文では、3 セクタ構成のマクロセルに関しては、3 つに分かれた領域の 1 つをセクタと呼び、3 セクタをまとめた範囲をセルと呼ぶ場合もある。また、セルの中心のマクロ基地局が設置されている場所をサイトと呼び、表 2.1.1.1 では 1 サイト当り 3 セクタのセル構成と表記している。シミュレーションには Wrap around 手法[7]を用いており、計算対象となるセルを中心として常に同数（19 セルモデルの場合は第 1 週の 6 セルと第 2 週の 12 セルの合計となる 18）の周辺セルが存在するようにシミュレーションしている。図 2.1.1-1 は、19 セルモデルの Wrap around のセル配置を表しており、セル#1 だけでなくセル#2~#19 の SINR を計算する場合にも、常に周辺（第 2 周まで）の 18 セルからの干渉を考慮するようにセルを再配置している。

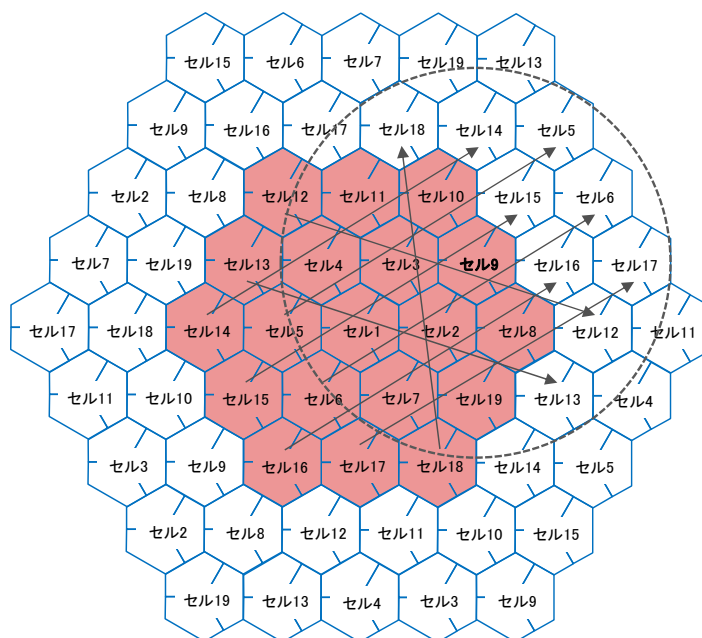


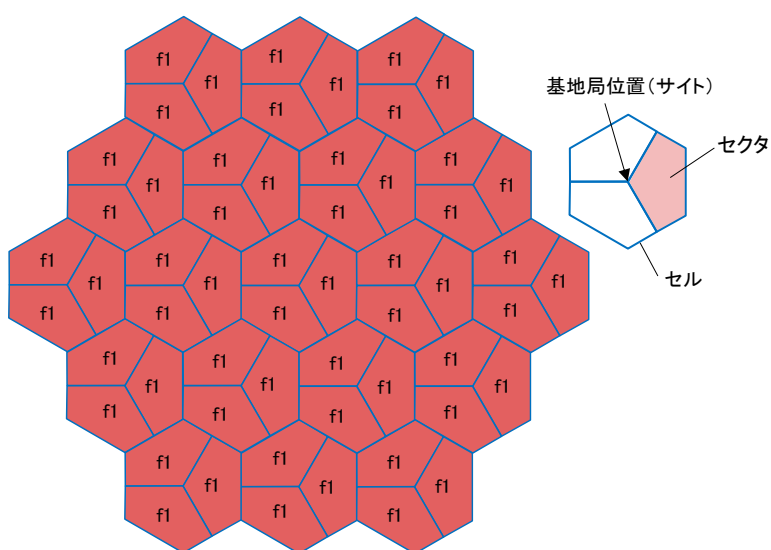
図 2.1.1-1 Wrap around のセル配置（19 セルモデル）

（図中の矢印はセル 9 の SINR を計算する際のセルの再配置の様子を表している）

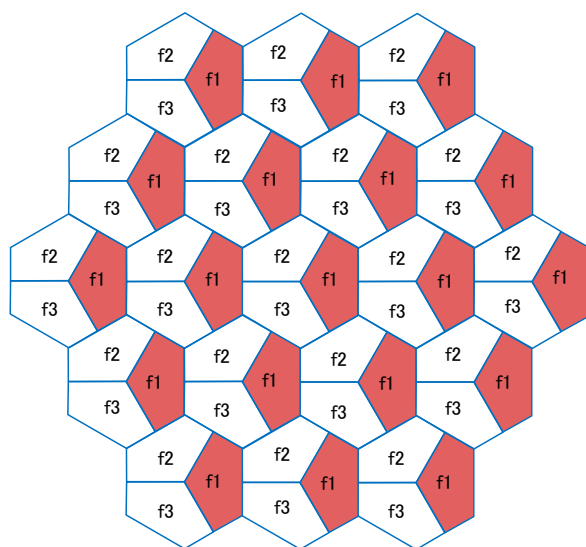
## 2.1.2. マクロセルの SINR 分布

マクロセルのみの条件で、セル繰り返し数 1, 3, 9 の 3 つのパターンで SINR 分布を計算した。SINR 分布は、全ユーザの SINR をプロットした累積分布 (Cumulative Distribution Function: CDF) で表している。セクタ当り 30 ユーザの一樣分布を 4 回ランダムに再配置しているため、19 セル × 3 セクタ × 30 ユーザ × 4 回で 6,840 ユーザの累積分布となる。図 2.1.2-1 の(a)~(c)に示すように、セル繰り返し数 1 は全てのセクタで同じ周波数を使用し、セル繰り返し数 3 はセル内の 3 セクタがそれぞれ異なる周波数を使用し、セル繰り返し数 9 は 3 セル (9 セクタ) 単位で周波数を繰り返し利用する。図 2.1.2-2 に、基地局間距離 (Inter Site Distance: ISD) が 1,732m の場合の

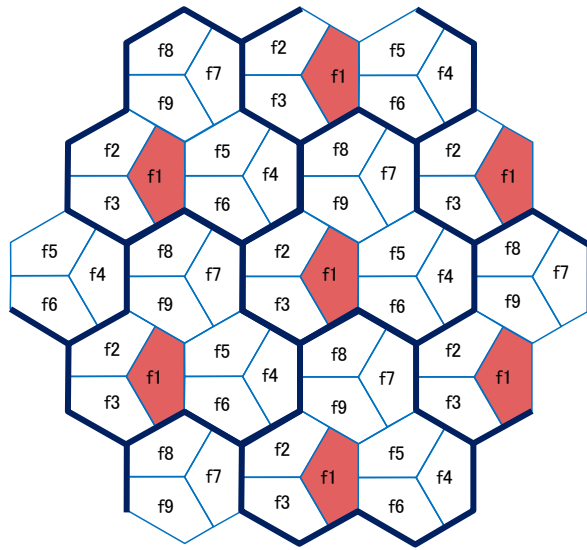
SINR 分布を示す。図 2.1.2-1 から分かるように、セル繰り返し数が大きくなるほど、同じ周波数を利用するセクタとの距離が離れ、また、同じ周波数を利用するセクタ数も少なくなるため、周辺セルからの干渉電力が小さくなり SINR が向上する。なお、ここではシステム帯域幅を一定と仮定しているため、セル繰り返し数が大きくなると 1 セクタで利用できる帯域幅が狭くなり、熱雑音電力  $N$  に対する信号電力  $S$  は大きくなる。図 2.1.2-3 に  $ISD=500m$  の場合の SINR 分布を示す。 $ISD$  が小さいと、熱雑音電力  $N$  に対して干渉電力  $I$  が大きくなるため、干渉電力が支配的となる。従って、 $ISD=1,732m$  よりも  $ISD=500m$  の方が、SINR の値が大きく、セル繰り返し数を大きくした場合の SINR の改善量も大きくなっている。



(a) セル繰り返し数 1



(b) セル繰り返し数 3



(c) セル繰り返し数 9

図 2.1.2-1 19セルモデルでの周波数割り当て（セル繰り返し数 1, 3, 9）

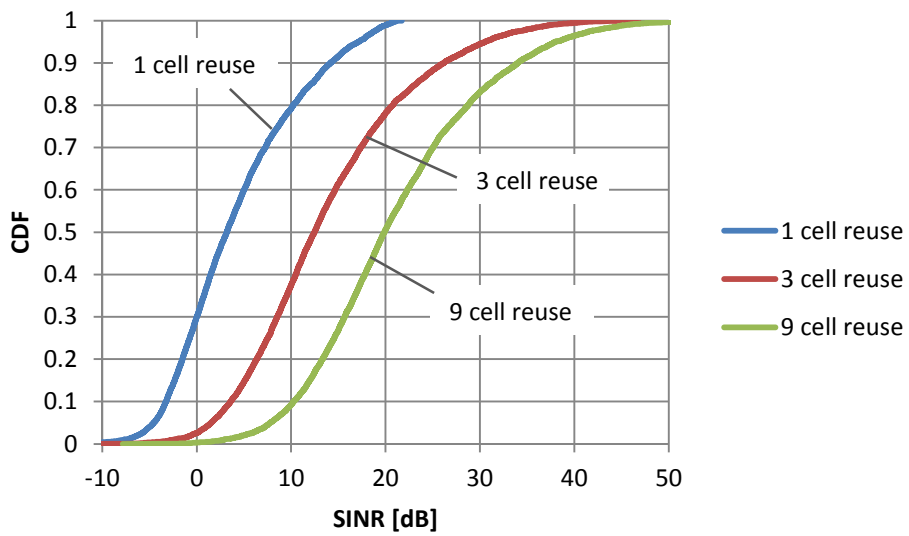


図 2.1.2-2 SINR 分布 (ISD=1,732m)

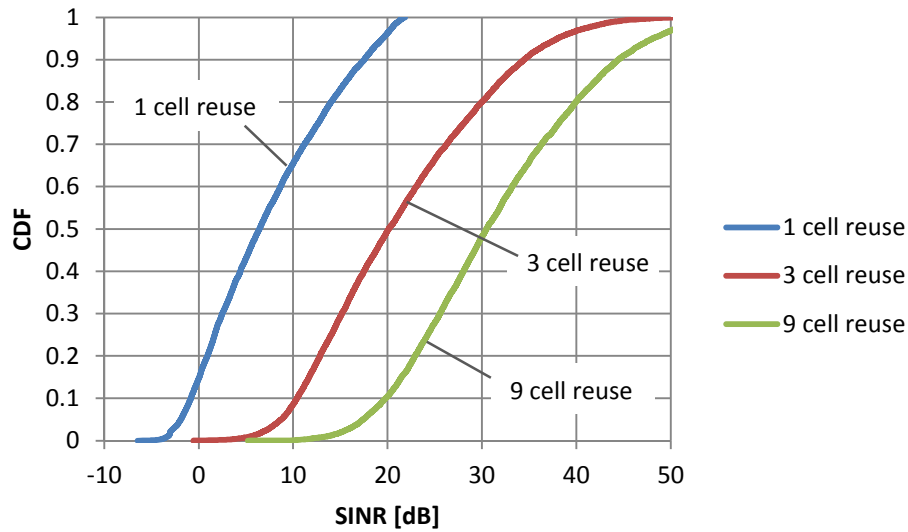


図 2.1.2-3 SINR 分布 (ISD=500m)

### 2.1.3. マクロセルのユーザスループット分布

前節で示したように、セル繰り返し数を大きくすると SINR 分布は改善するが、1 セクタで利用できる帯域幅が狭くなるため、最終的にはスループット分布で評価しなければならない。本節では、SINR 分布をユーザスループット分布に変換する方法について説明する。本論文では、SINR からスループットへの換算には、シャノン式をベースとした式(2)を用いる。

$$T_{user} = \frac{W}{N_{user}} \cdot \min \left\{ \log_2 \left( 1 + \frac{SINR}{K} \right), 8.33 \right\} \quad (2)$$

ユーザスループット  $T_{user}$  の単位は [bps] で、帯域幅  $W$  の単位は [Hz] である。式(2)の SINR は dB 値ではなく真値である。 $K$  は受信機の固定劣化を考慮するための係数で、本論文では  $K=2.0$  としている。8.33 [bps/Hz] は 2x2 MIMO を用いる LTE 下りリンクの最大周波数利用効率で、 $W=9$  MHz (システム帯域幅 10 MHz の実効帯域幅) の時、最大スループットは約 75 Mbps となる[8]。また、 $K=2.0$  の時、シャノン式の値が 8.33 となるのは SINR が約 28 dB の場合である。実際の装置では、送信機で発生する雑音成分 (Error Vector Magnitude: EVM) の影響により、受信 SINR が 28 dB 以上になることは無い (SNR=28 dB は EVM=4% に相当)、8.33 の上限は妥当な値と言える。なお、式(2)は MIMO を想定した理論式ではないが、2x2 MIMO のリンクレベルシミュレーション結果に近いことから、式(2)を 2x2 MIMO に利用しても問題ないと判断した。また、ここでは Full buffer のトラフィックモデルを仮定しているため、ユーザの割当率が均等なスケジューリングアルゴリズムを想定した場合、式(2)のようにスループットをセクタ当りの接続ユーザ数  $N_{user}$  で割ることで、ユーザ当りのスループット  $T_{user}$  が求められるとした。ここでは、セクタ当りのユーザ数が 30 なので、マクロセルの場合  $N_{user}=30$  となる。

図 2.1.2-2 と図 2.1.2-3 の SINR 分布を、式(2)を用いてユーザスループット分布に変換した結果を図 2.1.3-1 と図 2.1.3-2 にそれぞれ示す。この時、1セル繰り返しでは  $W=9\text{MHz}$ 、3セル繰り返しでは  $W=3\text{MHz}$ 、9セル繰り返しでは  $W=1\text{MHz}$  としている。結果を見ると、セル繰り返し数が3と9の場合は、最大周波数利用効率  $8.33[\text{bps/Hz}]$  の上限によって、CDFがある割合以上の領域でスループットが最大値に張り付いている。ISD=500mの方が最大値に張り付くユーザの割合が多くなっていることからセル半径を小さくする場合は、最大スループットの上限値を高くするとともに、送信機で発生する雑音 (EVM) を低く抑える効果が大きいことが分かる。表 2.1.3.1 に、図 2.1.3-1 と図 2.1.3-2 の結果から読み取れる平均ユーザスループットとセル端ユーザスループット (5% CDF で定義) を示す。参考のため、 $8.33[\text{bps/Hz}]$  の上限を設けなかった場合の平均ユーザスループットの値を括弧内に示しておく。表 2.1.3.1 から、平均ユーザスループットで見ると、1セル繰り返しの特性が最も良いことが分かり、この結果は  $8.33[\text{bps/Hz}]$  の上限を設けなかった場合も同じである。一方、セル端ユーザスループットは、3セル繰り返しの特性が最も良くなっており、セル半径が小さく干渉電力が支配的な ISD=500mの方が、1セル繰り返しのメリット (平均ユーザスループットが良い) が小さくなり、3セル繰り返しのメリット (セル端ユーザスループットが良い) が大きくなっている。

以上のことから、今後小セル化が進むことが予想される移動通信システムでは、良好な平均ユーザスループット特性が得られる1セル繰り返しの周波数割り当てを用いながら、セル端ユーザスループットの改善効果が得られる3セル繰り返しを部分的に活用するような「セル間干渉制御技術」の適用が重要になると言える。

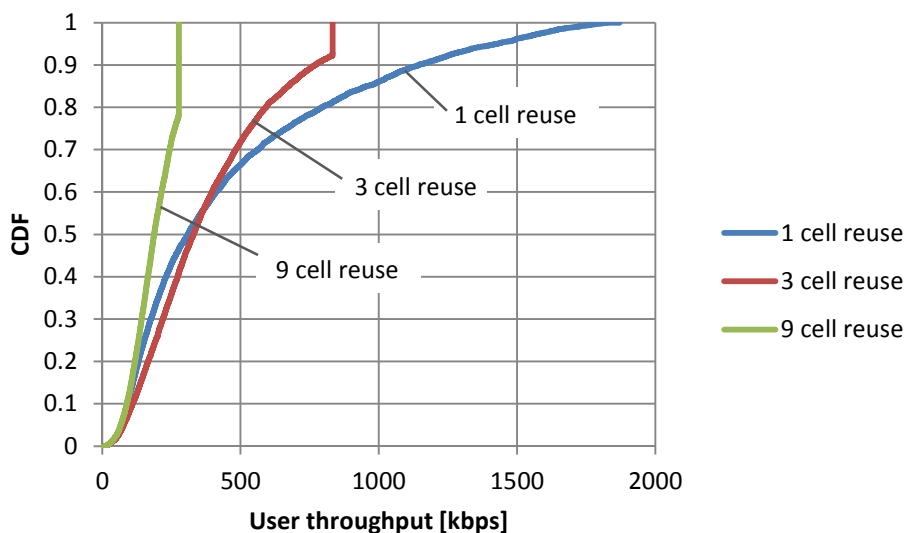


図 2.1.3-1 ユーザスループット分布 (ISD=1,732m)

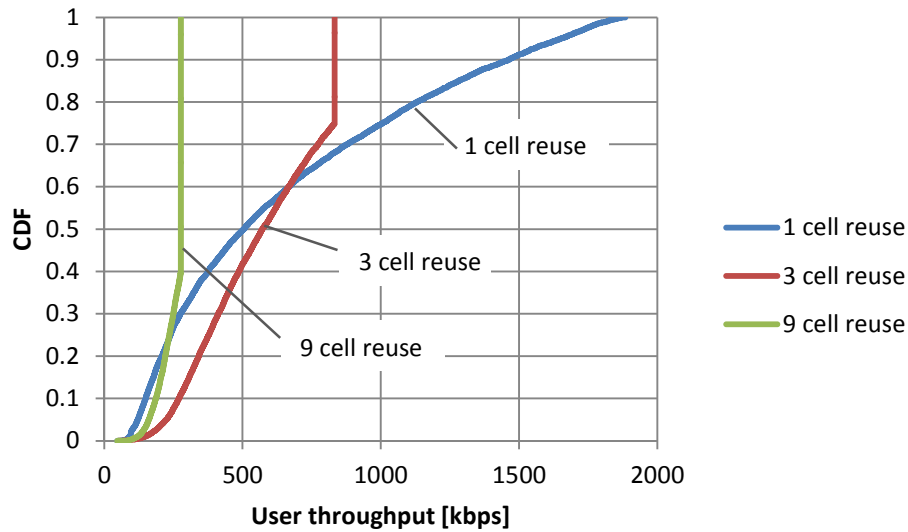


図 2.1.3-2 ユーザスループット分布 (ISD=500m)

表 2.1.3.1 平均ユーザスループットとセル端ユーザスループット (5% CDF)

	ISD=1,732 m		ISD=500 m	
	Average user throughput [kbps]	Cell-edge user throughput [kbps]	Average user throughput [kbps]	Cell-edge user throughput [kbps]
1 cell reuse	471 (471)	70	659 (659)	121
3 cell reuse	379 (391)	78	570 (621)	225
9 cell reuse	188 (204)	67	253 (315)	161

括弧内は 8.33[bps/Hz] の上限を設けない場合の平均ユーザスループット

#### 2.1.4. ヘテロジニアスネットワークの SINR 分布

マクロセルにピコセルをオーバーレイするセル構成であるヘテロジニアスネットワーク (HetNet) は、移動通信のトラフィック増加に対応するスモールセルソリューションである。本節では、HetNet の SINR 分布について考察する。ここでは、セル繰り返し数 1 および ISD=500m の条件で評価を行う。また、セル繰り返し数 1 ではセル間干渉となるセクタ数が十分多いことから、計算時間を短縮するために 7 セルモデルを用いることにする。参考までに、セル繰り返し数 1、ISD=500m、マクロセルのみの条件で、19 セルモデルと 7 セルモデルの SINR 分布およびユーザスループット分布を比較した結果を図 2.1.4-1 と図 2.1.4-2 にそれぞれ示す。発生させる乱数が変わるため、僅かな違いはあるが、19 セルモデルと 7 セルモデルの分布はほぼ同じ結果となっており、7 セルモデルの評価でも問題がないことが分かる。

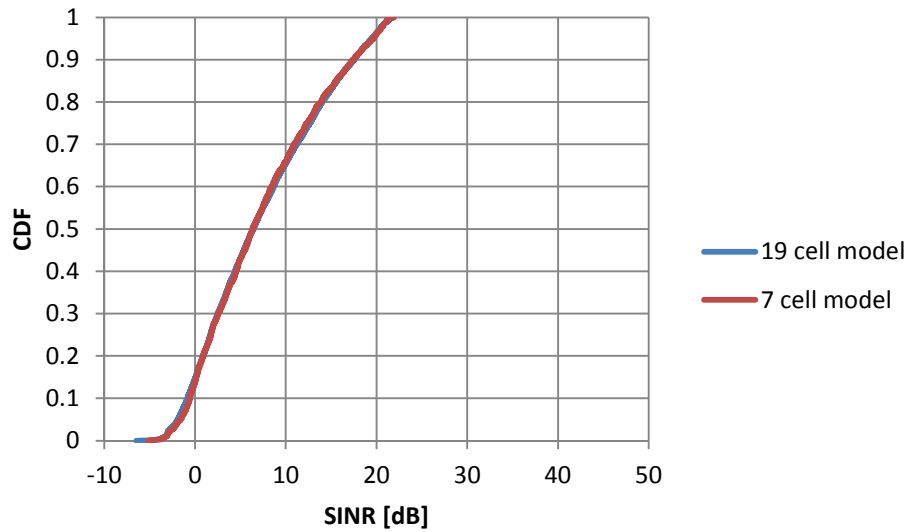


図 2.1.4-1 19セルモデルと7セルモデルのSINR分布比較  
(図の2つの特性はほぼ一致している)

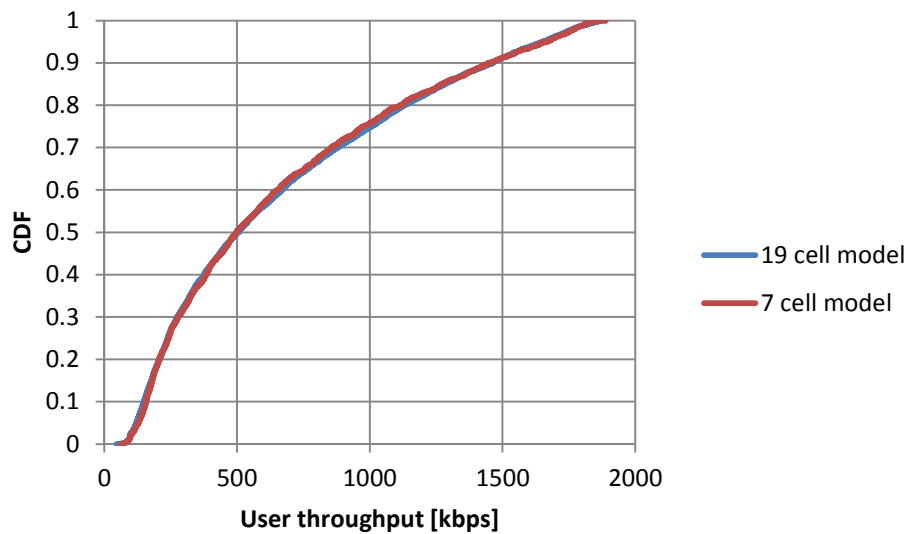


図 2.1.4-2 19セルと7セルモデルのスループット分布比較  
(図の2つの特性はほぼ一致している)

図 2.1.4-3 に HetNet におけるピコセルとユーザの配置例を示す。ユーザ配置と同様にピコ局もマクロセル内に一様分布でランダムに配置している。但し、表 2.1.1.1 に規定したように、マクロ局とピコ局およびピコ局同士の最少距離を考慮してピコ局を配置している。そして、マクロ局およびピコ局との最小距離を考慮してユーザを分布させている。セクタ当りのピコ局数は5としている。ピコ局がない場合は、各セクタのマクロ基地局にはそれぞれ30のユーザが接続しているが、ピコ局を配置するといくつかのユーザはピコ局に接続(オフロード)される。この時、ユ



ーザは、受信信号電力にオフセット値（dB 値）を加えた値が最も大きい基地局に接続している。なお、オフセットをピコ局の受信電力に加算するのは、送信電力が低くセル半径が小さいピコ局にユーザを接続し易くすることでオフロードの効果を得るためであり、この技術を 3GPP では Cell Range Expansion (CRE) と呼んでいる[9-10]。図 2.1.4-4 に、オフセット値を変えた場合にマクロ局とピコ局それぞれに接続するユーザ数の比率を計算した結果を示す。CRE のオフセットを加えることで、マクロ局からピコ局にオフロードするユーザ数が増加していることが分かる。

図 2.1.4-5 に、HetNet の SINR 分布のシミュレーション結果を示す。図 2.1.4-5 では、マクロ局のみの場合 (Macro)、マクロ局とピコ局が同じ周波数を用いる場合 (Co-channel)、マクロ局とピコ局が異なる周波数を用いる場合 (Orthogonal) の 3 種類の結果を示している。なお、ここでは、簡易評価のため、接続ユーザが存在しないピコ局も送信を行う (干渉源になる) として SINR を計算している。図 2.1.4-5 の結果から分かるように、Co-channel の場合は、ピコ局の設置によってセル間干渉が増加するため、マクロ局のみの場合に比べてピコ局設置後の SINR が劣化している。一方、Orthogonal の場合は、ピコ局に接続することで SINR が改善するユーザが存在するため、SINR 分布も良くなっている。なお、Orthogonal の場合は、マクロ局とピコ局それぞれの帯域幅を 1/2 にしているため、熱雑音電力  $N$  に対する信号電力  $S$  を 2 倍にして SINR を計算している。

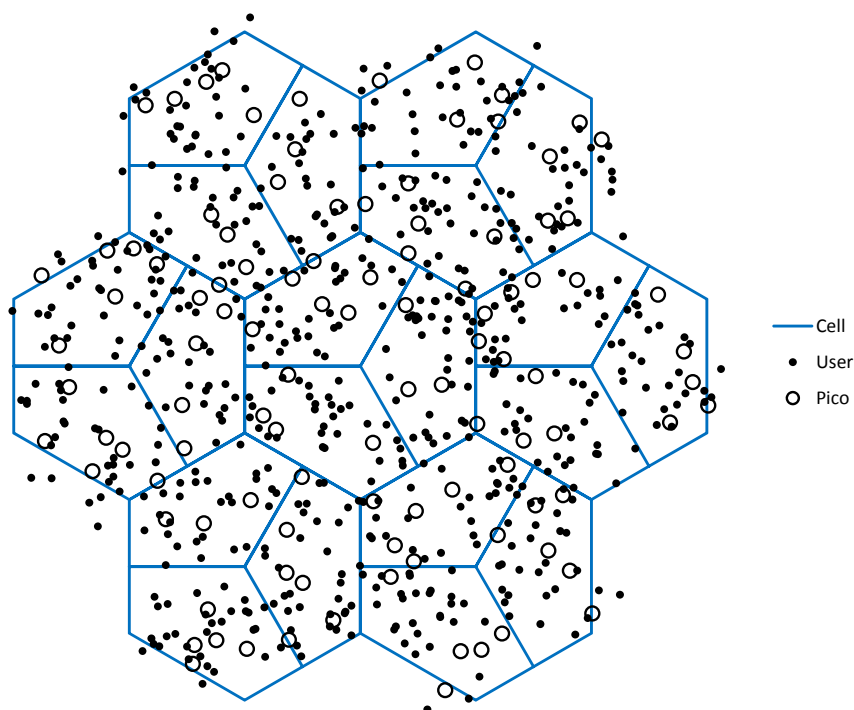


図 2.1.4-3 ヘテロジニアスネットワークでのピコ局とユーザ分布の例  
(5 ピコ/セクタ、30 ユーザ/セクタ)

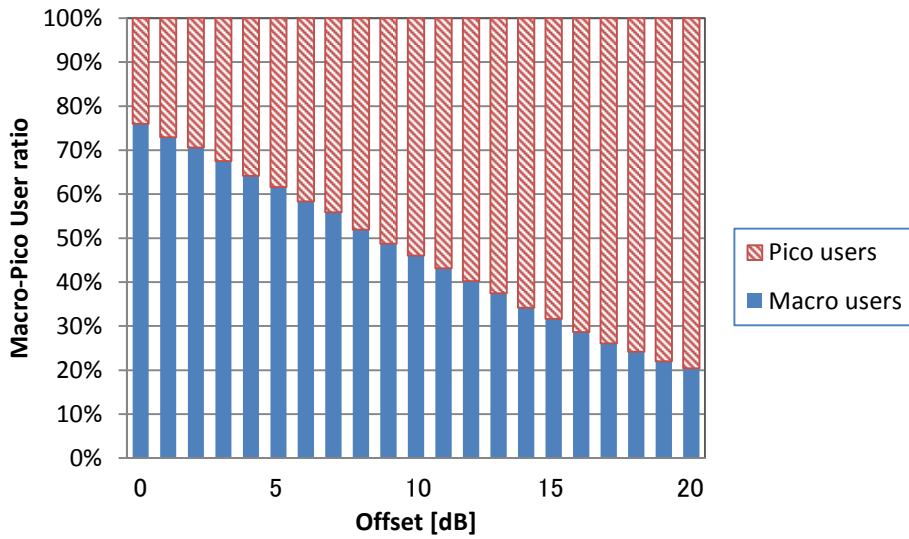


図 2.1.4-4 オフセットを変えた場合のマクロ局とピコ局のユーザ比率  
(ピコ局数はマクロ局数の5倍であることに注意)

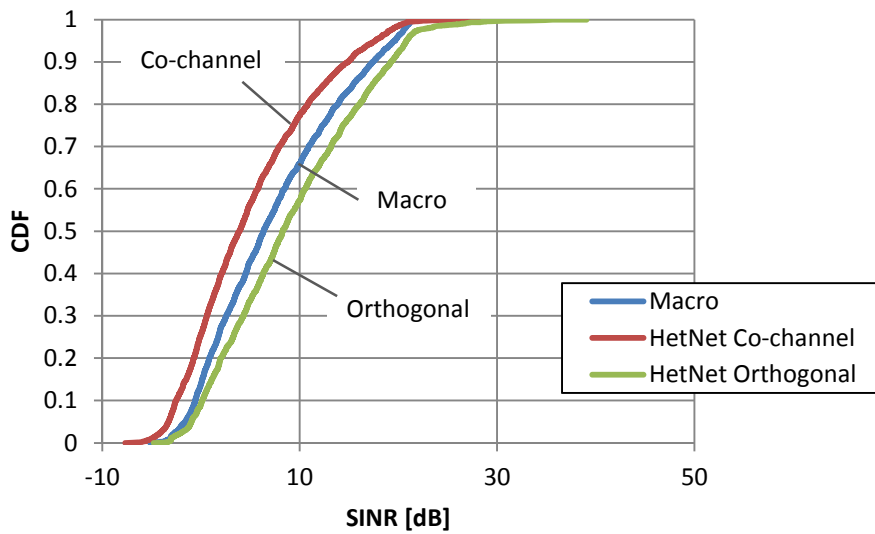


図 2.1.4-5 ヘテロジニアスネットワークの SINR 分布

### 2.1.5. ヘテロジニアスネットワークのユーザスループット分布

HetNet でも式(2)を用いて SINR 分布からユーザスループット分布に変換できる。マクロセルのみの場合は、セクタ当りのユーザ数  $N_{user}$  を 30 に固定していたが、HetNet では、ピコ局の配置やユーザの配置によって接続ユーザ数が変わるため、ピコ局配置とユーザ配置を変える毎に、SINR から変換したスループットを各局の接続ユーザ数で割ることで、各ユーザのスループットを計算する。なお、Co-channel の場合は  $W=9.0\text{MHz}$ 、Orthogonal の場合は  $W=4.5\text{MHz}$  としている。

図 2.1.5-1 は、ピコ局に加える受信信号電力のオフセット毎に、SINR 分布から計算したユーザスループット分布の平均ユーザスループットとセル端ユーザスループット（5% CDF）をプロットしたものである。平均ユーザスループットは、オフセット 0dB の時が最も高く、オフセットが大きくなるにしたがって低下している。これは、オフセットを大きくすることでマクロ基地局からピコ基地局にオフロードするユーザの SINR が劣化するためで、特にトラフィックモデルが Full buffer で、各ユーザの送信機会が均等のスケジューリングを仮定している場合には、平均スループットは必ず低下することになる。一方、セル端ユーザスループットは、オフセットが 0dB より大きい場合に最大となっており、オフセットの最適値が存在することが分かる。これは、図 2.1.4-4 に示したように、ピコ局に比べてマクロ局に接続するユーザの割合が多いため、5% CDF で定義したセル端ユーザはマクロ局に接続するユーザであり、オフセット値を大きくすることで、ピコ局へのオフロード効果によりマクロ局に接続しているユーザのスループットが改善するためである。そして、Co-channel ではオフセット値 5dB が、Orthogonal ではオフセット値 14dB が、それぞれセル端ユーザスループットの最適値となっている。図 2.1.5-2 に Co-channel の場合、図 2.1.5-3 に Orthogonal の場合のユーザスループット分布を示す。どちらも、マクロのみの場合、HetNet でオフセット 0dB の場合、HetNet でセル端ユーザスループットが最大となるオフセットを用いた場合の累積分布を示している。これらの結果から、HetNet の Orthogonal において、スループットが比較的低いユーザのスループットを改善するためには、高いオフセットを用いて、より多くのユーザをピコ局にオフロードする必要があることが分かる。

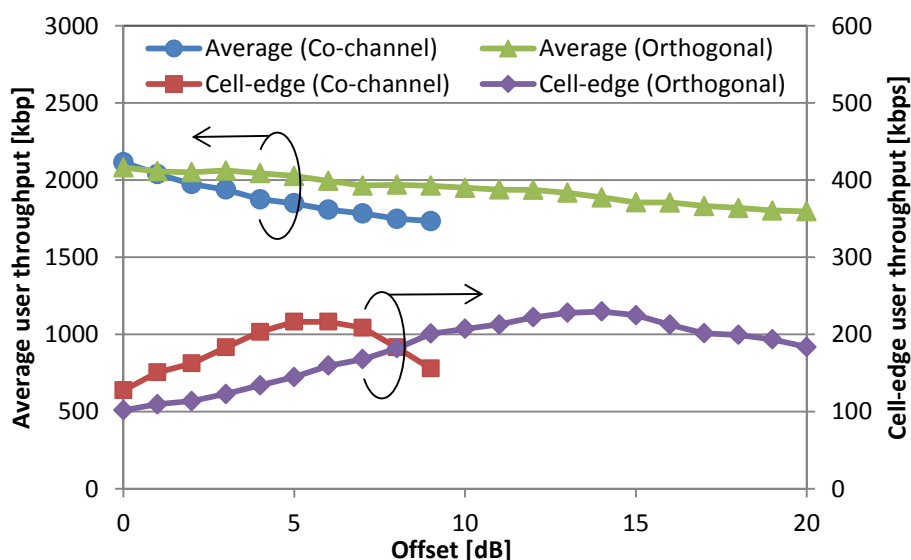


図 2.1.5-1 オフセットを変えた場合の平均およびセル端ユーザスループット

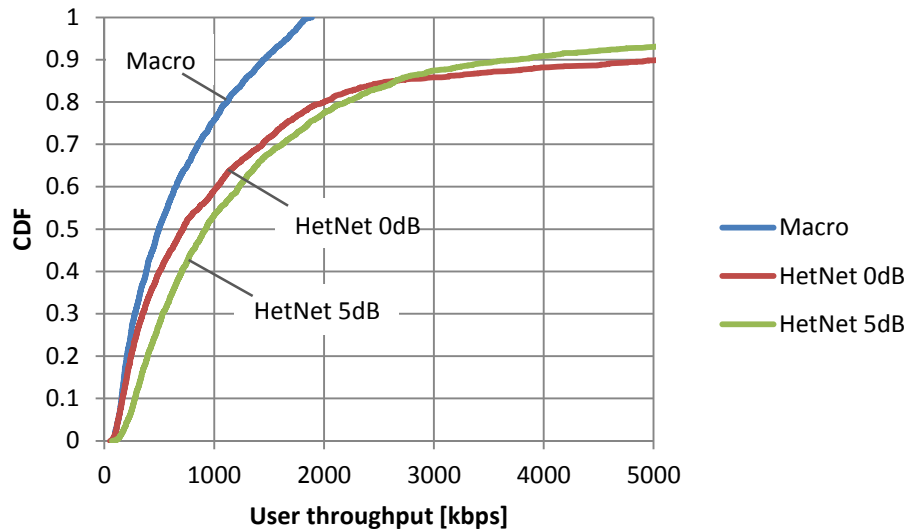


図 2.1.5-2 HetNet のユーザスループット分布 (Co-channel)

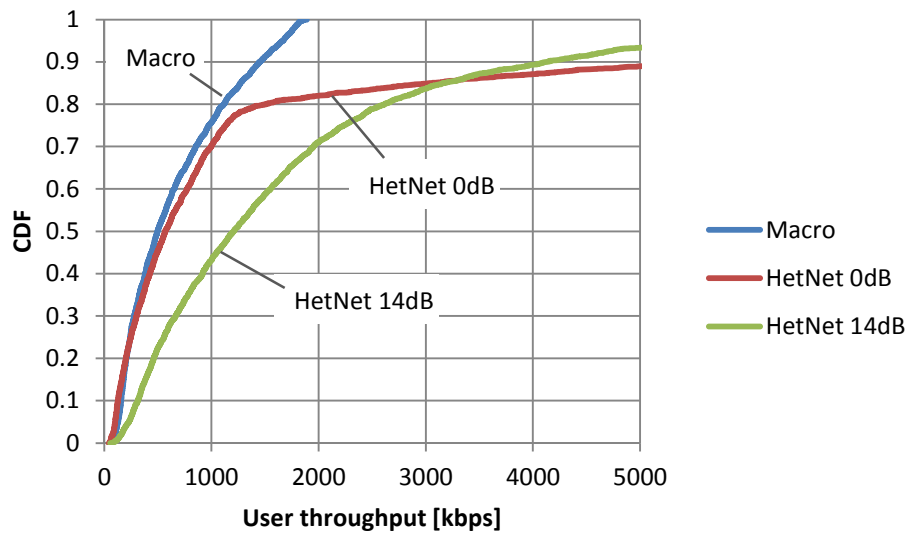


図 2.1.5-3 HetNet のユーザスループット分布 (Orthogonal)

## 2.2. スケジューリングアルゴリズムとスループット特性

前節では、マルチセル環境において、セル繰り返し数を変えた場合や HetNet を用いた場合の SINR 分布およびユーザスループット分布のシミュレーション結果を示したが、スケジューリングに関しては、単純に基地局に接続している複数のユーザで無線リソースを均等に分配していることを仮定した。本節では、まず、文献[11]をもとにして行ったシングルセル環境でのスループット解析について紹介し、PF スケジューリングがユーザスループットに与える影響を示す。また、スループットの解析結果を計算機シミュレーション結果と比較する。そして、マルチセル環境での PF スケジューリングのユーザスループット特性の検証として、システムレベルシミュレ

ーションを用いた基本特性および従来のセル間干渉制御技術である FFR を適用した場合のスループット特性について考察する。

## 2.2.1. シングルセル環境でのスループット解析

### 2.2.1.1. PF スケジューリング

PF スケジューリングには、スループットベースと SINR ベースの2つの方法がある。スループットベースの PF スケジューリングでは、次のタイムスロットでスケジューリングされるユーザ  $k^*$  は式(3)によって選択される[11]。ここで、 $R_k[n]$  はユーザ  $k$  がタイムスロット  $n$  に割り当てられた場合に得られる瞬時スループットである。また、 $\tilde{R}_k[n]$  はスロット  $n$  の直前までのユーザ  $k$  の平均スループットで、式(4)または式(5)により計算される。式(4)は時間平均（スケジューリング開始から現在までの平均）を計算する式で、式(5)は  $t_c$  時間の移動平均の計算式である。 $I_k[n]$  はスケジューリングによる割り当てを示し、式(6)で表される。SINR ベースの PF スケジューリングは、瞬時スループット  $R_k[n]$  を瞬時 SINR  $Z_k[n]$  に、平均スループット  $\tilde{R}_k[n]$  を平均 SINR  $\tilde{Z}_k[n]$  にそれぞれ置き換えたものとなる。但し、平均 SINR はスケジューリングによる割り当てとは関係なく更新できるので、SINR ベースの PF では、 $I_k[n]$  は常に 1 となる。

$$k^* = \arg \max_k R_k[n] / \tilde{R}_k[n] \quad (3)$$

$$\tilde{R}_k[n+1] = \tilde{R}_k[n] + (1/n)(R_k[n]I_k[n] - \tilde{R}_k[n]) \quad (4)$$

$$\tilde{R}_k[n+1] = \tilde{R}_k[n] + (1/t_c)(R_k[n]I_k[n] - \tilde{R}_k[n]) \quad (5)$$

$$I_k[n] = \begin{cases} 1 & \text{if } k = k^* \\ 0 & \text{if } k \neq k^* \end{cases} \quad (6)$$

### 2.2.1.2. シングルセル環境でのスループット解析方法

シングルセル環境における PF スケジューリングのスループット解析方法を以下に紹介する。以下に示すシングルセル環境での解析方法および解析結果は、文献[11]をもとにした再検証である。SINR ベースの PF スケジューリングを仮定すると、PF メトリック  $\Gamma_k$  は式(7)で表される。(シングルセルなので SINR は SNR と等しい。) ここで、十分に長い時間が経過して、平均ユーザスループットが一定値になるまで安定した状態を仮定し、タイムスロットのインデックス  $n$  を省略する。

$$\Gamma_k = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{Z_k[n]}{\tilde{Z}_k[n]} = \frac{Z_k}{\tilde{Z}_k} \quad (7)$$

一般に、ユーザスループット  $R_k$  は SINR  $Z_k$  の短調増加関数になることから、式(7)より  $R_k$  は  $\Gamma_k$  の関数として式(8)のように表され、 $\Gamma_k$  はその逆関数として式(9)のように表現できる。

$$R_k = \xi(\Gamma_k) \quad (8)$$

$$\Gamma_k = \xi^{-1}(R_k) = \zeta(R_k) \quad (9)$$

また、あるスロットでユーザ  $k$  がスケジューリングされる確率を  $P_r\{\Gamma_k > \Gamma_{k-}\}$  とした場合、 $\Gamma_{k-} = \max\{\Gamma_1, \dots, \Gamma_{k-1}, \Gamma_{k+1}, \dots, \Gamma_N\}$  と表される。ここで、 $N$  はスケジューリング対象のユーザ数である。そして、 $\Gamma_{k-}$  の cdf 分布を  $F_{k-}(t)$ 、 $\Gamma_k$  の pdf 分布を  $f_{\Gamma_k}(t)$  とした場合、ユーザ  $k$  の長区間の平均ユーザスループット  $T_k$  は式(10)で表される。

$$T_k = \int_{\zeta(0)}^{\zeta(\infty)} \xi(t) f_{\Gamma_k}(t) F_{k-}(t) dt \quad (10)$$

今、各ユーザの SINR がパスポスとシャドウイングで決まる SNR を平均値としてレイリー分布しているモデルを仮定する。この時の PF メトリック  $\bar{\Gamma}_k$  は全てのユーザで同じ値  $\bar{\Gamma}$  になるとすると、 $\Gamma_k$  の pdf 分布  $f_{\Gamma_k}(t)$  と、 $\Gamma_{k-}$  の cdf 分布  $F_{k-}(t)$  は、それぞれ式(11)および式(12)のように表される。

$$f_{\Gamma_k}(t) = \frac{1}{\bar{\Gamma}} \exp\left(-\frac{t}{\bar{\Gamma}}\right) \quad \text{for } t \geq 0 \quad (11)$$

$$F_{k-}(t) = \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\bar{\Gamma}}\right)\right)^{N-1} \quad \text{for } t \geq 0 \quad (12)$$

そして、式(10)に式(11)と式(12)を代入して式(13)が得られる。

$$T_k = \int_{\zeta(0)}^{\zeta(\infty)} \xi(t) \frac{1}{\bar{\Gamma}} \exp\left(-\frac{t}{\bar{\Gamma}}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\bar{\Gamma}}\right)\right)^{N-1} dt \quad (13)$$

ここで、SNR からスループットへの換算を式(2)と同様にシャノン式をベースとした式(14)で表すと、式(8)は式(15)のように表現することができる。

$$R_k = W \log_2 \left( 1 + \frac{Z_k}{K} \right) \quad (14)$$

$$R_k = \xi(\Gamma_k) = \frac{W}{\ln 2} \ln \left( 1 + \frac{\bar{Z}_k}{K} \Gamma_k \right) \quad (15)$$

式(15)を式(13)に代入すると、ユーザ  $k$  の長区間の平均ユーザスループットは式(16)で表される。

$$\begin{aligned} T_k &= \frac{W}{\ln 2} \int_0^{\infty} \ln \left( 1 + \frac{\bar{Z}_k}{K} t \right) e^{-t} (1 - e^{-t})^{N-1} dt \\ &= \frac{W}{\ln 2} \sum_{m=0}^{N-1} \binom{N-1}{m} (-1)^m \cdot \int_0^{\infty} \ln \left( 1 + \frac{\bar{Z}_k}{K} t \right) e^{-(m+1)t} dt \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、シングルセル環境として図 2.2.1.2-1 に示すモデルを考える。基地局を中心に半径  $D$  のセル内にユーザが一樣に分布しているとし、基地局からの距離  $D$  の位置の長区間 SNR を  $\rho$  とする。また、パスロスの距離減衰係数を  $\alpha$  とし、ユーザ  $k$  のシャドウイング変動を  $s_k$  とすると、平均 SNR  $Z_k$  は式(17)で表される。

$$\bar{Z}_k = \rho (D/d_k)^\alpha s_k \quad (17)$$

以下、詳しい近似計算を省略するが、帯域幅  $W$  で正規化したシングルセルモデルのセルスループット  $T_{cell}$  は、距離減衰係数  $\alpha=4$  の条件では、式(18)のように計算される。

$$\begin{aligned} T_{cell} &\approx N \nu_1 \sum_{m=0}^{N-1} \binom{N-1}{m} \frac{(-1)^m}{(m+1)} (B_m + \nu_3) \\ B_m &= \ln(1 + b_m) + 2b_m^{1/2} \cdot \arctan(b_m^{1/2}) \\ b_m &= (\nu_2 \rho) / (K(m+1)) \end{aligned} \quad (18)$$

ここで、 $\nu_1 = 1.4$ ,  $\nu_2 = 0.82$ ,  $\nu_3 = (\ln 10 / 20)(\sigma_s / \sqrt{2\pi})$  は近似計算の過程で得られる条件である。また、 $\sigma_s$  はシャドウイングの標準偏差である。

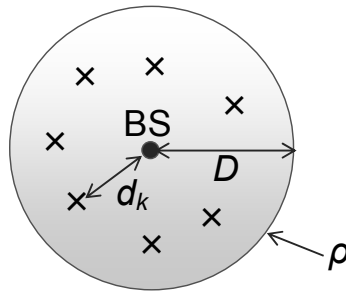


図 2.2.1.2-1 シングルセルモデル (ユーザ分布と SNR)

### 2.2.1.3. シングルセル環境でのスループット解析結果

セル内のユーザ数  $N$  を横軸として、式(18)の正規化セルスループットをプロットしたグラフを図 2.2.1.3-1 (Analysis の線) に示す。ここで、シャドウイングの標準偏差  $\sigma_s=8\text{dB}$ 、セル端での SNR  $\rho=3\text{dB}$ 、式(15)の SNR からスループットへの換算式で固定劣化を表す係数  $K=2.0$  としている。図 2.2.1.3-1 の結果から分かるように、ユーザ数に応じてセルスループットが増大しており、ユーザダイバーシチ利得が得られていることが分かる。

解析値の妥当性を検証するため、図 2.2.1.3-1 では、計算機シミュレーションの結果もプロットしている。シミュレーションでは、まず、セル内に  $N$  ユーザをランダムに一樣分布させ、各ユーザのパスロスとシャドウイングを計算する。そして、各スロットで、ユーザ毎に独立なレイリーフェージングを与えながら、式(3)を用いたユーザ選択および式(4)を用いた平均ユーザスループットの更新を行う。ユーザの再配置を 1,000 回行い、ユーザ配置毎に 10,000 スロットのスケジューリングを実施し、全ユーザの合計スループットを計算している。また、スループットベース (TP-based) と SNR ベース (SNR-based) の PF スケジューリングの両方のシミュレーション結果をプロットしており、SNR ベースでは平均 SNR はパスロスとシャドウイングから得られる値に固定している。図 2.2.1.3-1 から分かるように、計算機シミュレーションにおいても、解析値と同様なユーザダイバーシチ利得が得られている。また、スループットベースの PF の方が、SNR ベースの PF よりもセルスループットが高く、解析値に近い値となっている。この違いは、スケジューリングによる割当率によるものと考えられる。ユーザ  $k$  の基地局からの距離を  $d_k = k(D/N)$  と仮定し、シャドウイングなしの条件で、各ユーザ ( $k=1\sim 20$ ) の割当率をシミュレーションから求めた結果を図 2.2.1.3-2 に示す。スループットベースの PF では、SNR が高いほど ( $k$  が小さいほど) 割当率が高くなっている。一方、SNR ベースの PF では、割当率は、全てのユーザで約  $1/20$  と同じ値になっている。この理由は、SNR からスループットへの換算に式(14)を用いているためと考えられる。式(14)の代わりに、スループットが SNR にニアに比例する関数を用いると、スループットベースの割当率は SNR ベースと同様に一定の値となる。

図 2.2.1.3-1 では、フェージング変動とは無関係にスロット毎に順番にユーザを割り当てる Round Robin (RR) のスケジューリングアルゴリズムを用いたシミュレーション結果も合わせてプロットしている。RR スケジューリングではユーザダイバーシチ利得は得られず、セルスループットはユーザ数  $N$  によらず、ほぼ同じ値となっている。



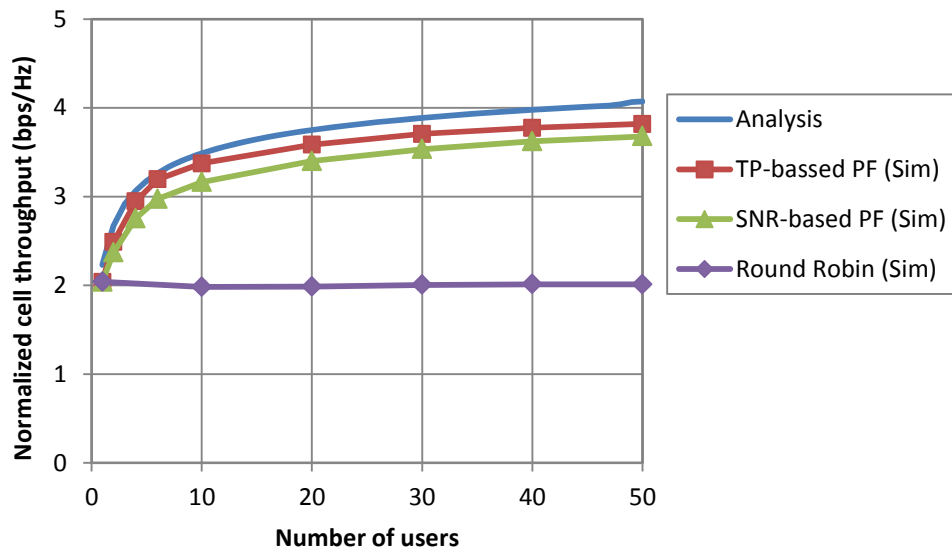


図 2.2.1.3-1 正規化セルスループット (シングルセル)

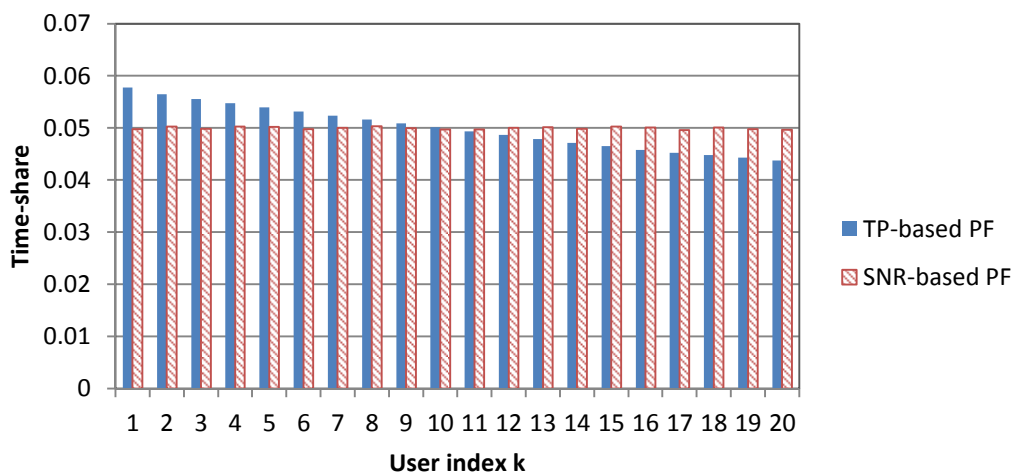


図 2.2.1.3-2 PF スケジューリングでのスロット割当率

## 2.2.2. マルチセル環境でのスループット特性

シングルセル環境では、各ユーザの SNR がレイリーフェージングによって指数分布になることを仮定してスループットを解析的に求めることができたが、マルチセル環境では SINR 分布が複雑になるため解析的に解くことができない。そのため、マルチセル環境ではシステムレベルシミュレーションによってスループットを求める必要がある。フェージング変動がない場合のシミュレーションは、2.1.3 章で紹介しているのので、ここでは、フェージング変動がある条件で PF スケジューリングを用いた場合のスループット特性について考察する。

### 2.2.2.1. システムモデル

シミュレーションモデルは2.1.1章と同じものを用いる。セル構成は、マクロセルのみの7セル×3セクタで、周波数繰り返し数は1とする。図2.2.2.1-1にスロット構成を示す。周波数領域はサブバンドに、時間領域はスロットにそれぞれ分割されており、1ブロックを1つの無線リソースとして、無線リソース毎のスケジューリングによりユーザ割り当てを行う。フェージング変動は、簡単のため無線リソース毎に独立なレイリーフェージングを仮定する。

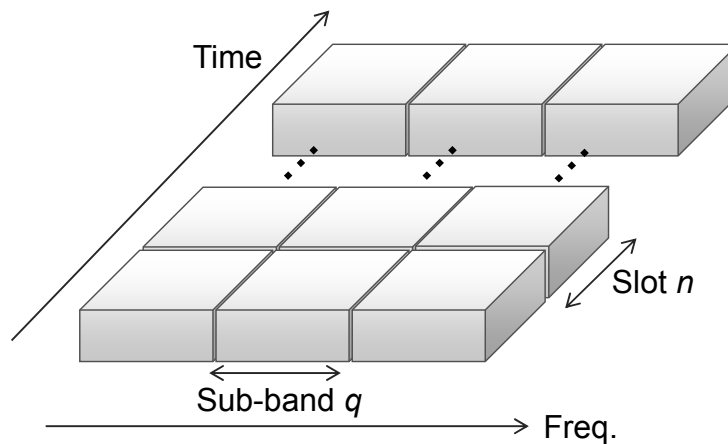


図 2.2.2.1-1 スロット構成

### 2.2.2.2. システムレベルシミュレーション結果

図2.2.2.2-1に、マルチセルモデルにおいて、スループットベースのPFスケジューリングを行った場合のシミュレーション結果を示す。サブバンド数は1としており、セクタ当りのユーザ数を横軸として、7×3セクタの正規化セルスループットの平均値をプロットしている。フェージングにはレイリーフェージングを仮定しているが、自セルの所望信号にのみフェージングを付加しており、他セル干渉にはパスロスとシャドウイングのみを考慮し、フェージングは付加していない。また、RRスケジューリングの結果も合わせて示している。図2.2.2.2-1の結果は、図2.2.1.3-1のシングルセルの結果に近い値となっており、シングルセルモデルと同様にマルチセルモデルでもユーザダイバーシチ利得が得られていることが分かる。なお、図2.2.2.2-1のマルチセルの結果と図2.2.1.3-1のシングルセルの結果が近い値になっている理由は、今回のシミュレーション条件において両者のSINR分布がたまたま近い値になっていたためである。

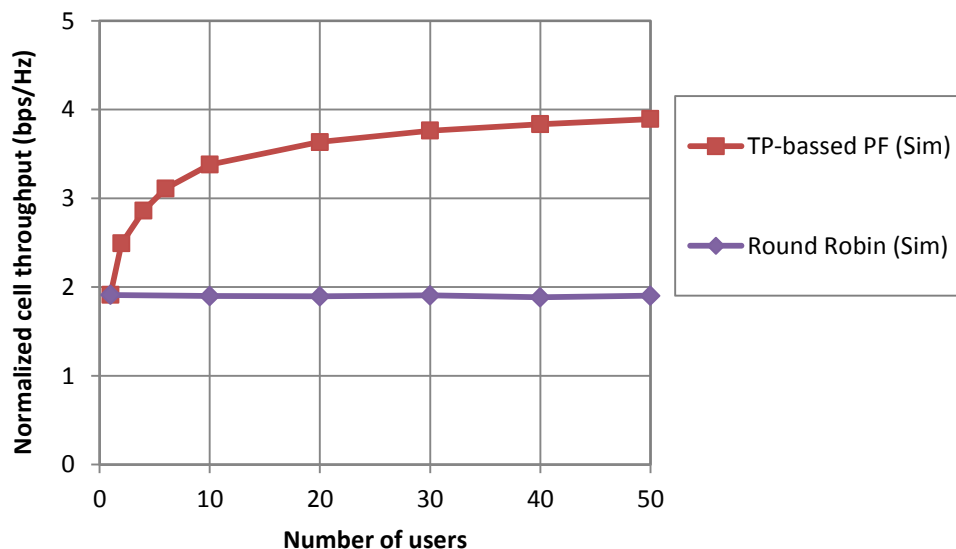


図 2.2.2.2-1 正規化セルスループット (マルチセル)

### 2.2.3. セル間干渉制御技術とスケジューリング

次に、マルチバンドでの PF スケジューリングについて考察する。無線リソース毎に独立（無相関）なフェージングを仮定している今回のシミュレーション条件では、時間方向だけで十分なスケジューリングゲインが得られるため、マルチバンドによって得られるスループットはシングルバンドと変わらない。本節では、バンド間で送信電力を意図的に変えることで、セル境界付近のユーザスループットを改善する Fractional Frequency Reuse (FFR) と呼ばれるセル間干渉制御技術において、PF スケジューリングを適用した場合のスループット特性について考察する。

#### 2.2.3.1. FFR の原理

FFR には様々な方法が提案されているが[12-17]、本論文では、Soft Frequency Reuse[12-14]と呼ばれる方法を取り上げ、この方法を単に FFR と呼ぶことにする。図 2.2.3.1-1 は FFR の原理説明図である。3 セクタ構成で 1 セル繰り返しの周波数割り当てを用いており、周波数領域は 3 バンドに分割され、1 バンドの送信電力が他の 2 バンドの送信電力より高く設定されている。但し、3 バンドを合計した総送信電力は一定としている。この時、図のように送信電力の高いバンドをセクタ毎に順番に変えることで、送信電力の高いバンドでは、所望信号レベルは高く、隣接セクタからの干渉レベルは低くなる。一方、送信電力の低いバンドでは、所望信号レベルは低く、隣接セクタからの干渉レベルは高くなる。この時、セル（セクタ）境界付近にいる「セル端ユーザ」を送信電力の高いバンドに割り当てるようにスケジューリングし、基地局に近い位置にいる「セル中心ユーザ」を送信電力の低いバンドにスケジューリングすることで、セル中心ユーザとセル端ユーザのスループットの差を減らし、セル端ユーザのスループットを改善することが期待でき

る。このように、セル間干渉を低減し、セル境界付近に位置するユーザのスループットを改善する技術は一般に「セル間干渉制御技術」と呼ばれている。

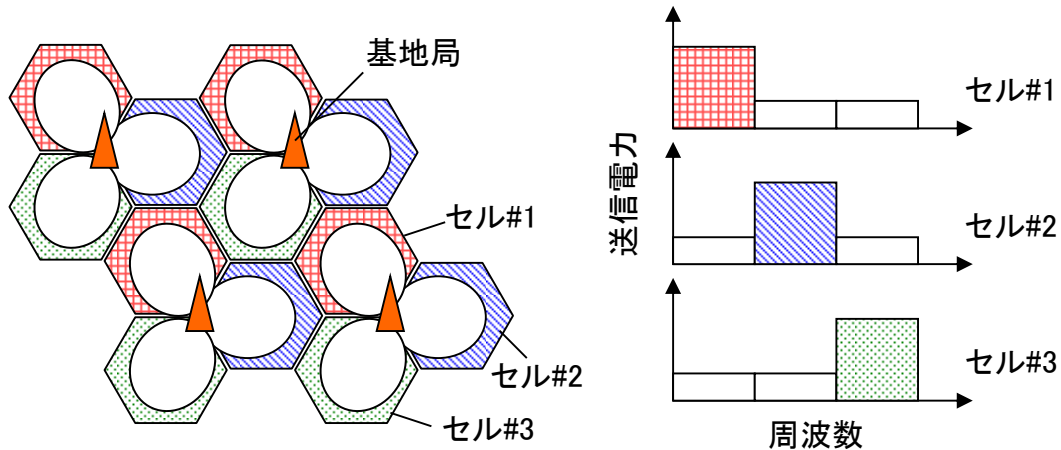


図 2.2.3.1-1 FFR の原理説明図

### 2.2.3.2. FFR でのスケジューリングの問題

FFR のスロット構成例を図 2.2.3.2-1 に示す。無線リソースの高さは送信電力を表しており、送信電力の高いサブバンドと送信電力の低いサブバンドの送信電力差を  $\Delta P$  としている。このような無線リソースに対してスケジューリングを行う場合、FFR の原理に従うと、まず、ユーザを「セル中心ユーザ」と「セル端ユーザ」に分けて、「セル中心ユーザ」の中から送信電力の低いサブバンドに割り当てるユーザをスケジューリングで選択し、「セル端ユーザ」の中から送信電力の高いサブバンドに割り当てるユーザをスケジューリングで選択する。しかし、ユーザを 2 種類に分割してからスケジューリングを行うと分割後のユーザ数が少なくなるため、図 2.2.2.2-1 で示したようにユーザダイバーシチ利得が低下してしまう問題がある。例えば、セクタ内にユーザが 30 人いる場合に、「セル中心ユーザ」と「セル端ユーザ」を 15 人ずつに分割すると、30 ユーザのユーザダイバーシチ利得が 15 ユーザのユーザダイバーシチ利得に低下してしまう。このため、FFR を適用したことによって、セル端ユーザのスループットが改善したとしても、ユーザダイバーシチ利得の低下によって全体のスループットが減少する可能性がある。また、「セル中心ユーザ」と「セル端ユーザ」を分割する場合の分割比率も課題となる。図 2.2.3.2-2 ~ 図 2.2.3.2-4 は、「セル端ユーザ」の比率を横軸として平均ユーザスループットとセル端ユーザスループットを縦軸にプロットしたもので、それぞれ  $\Delta P$  が 3dB、6dB、9dB の結果を示している。シミュレーション条件は、7セル×3セクタのセル構成で、フェージングはなしとしている。比較のため、FFR を適用しない場合 ( $\Delta P=0\text{dB}$  でユーザ分割を行わない場合) のスループットを横線で示している。結果から  $\Delta P$  によってセル端ユーザスループットが最大となるセル端ユーザの比率が異なっていることが分かる。セル端ユーザスループットの最大値を見ると、「セル端

ユーザ」を割り当てるサブバンドの送信電力が高いほど ( $\Delta P$  が大きいほど)、「セル端ユーザ」の比率を高くすれば良いことが分かる。図 2.2.3.2-5～図 2.2.3.2-7 に、フェージングありの場合のシミュレーション結果を示す。ユーザダイバーシチ利得が得られるため、フェージングなしの時よりもスループットは向上している。しかしながら、FFR なしの特性と比較すると、セル端ユーザスループットが最大となる時に平均ユーザスループットが劣化するなど、FFR の効果はあまり得られていない。これは、ユーザ分割によってユーザダイバーシチ利得が低下した影響とも考えられる。この問題については、次節でさらに考察する。

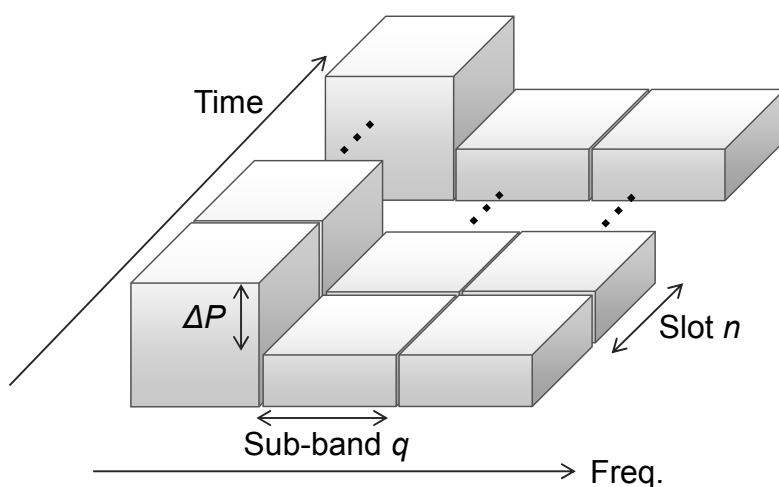


図 2.2.3.2-1 FFR のスロット構成

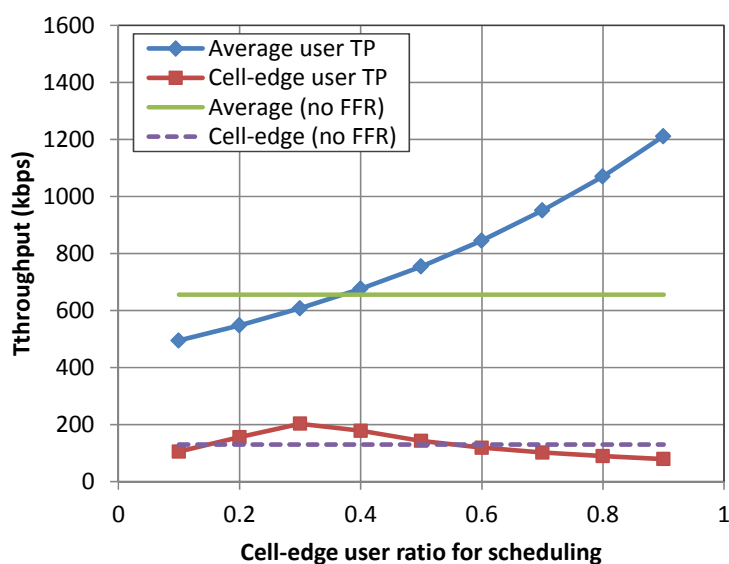


図 2.2.3.2-2 ユーザ分割と FFR スループット ( $\Delta P=3\text{dB}$ 、フェージングなし)

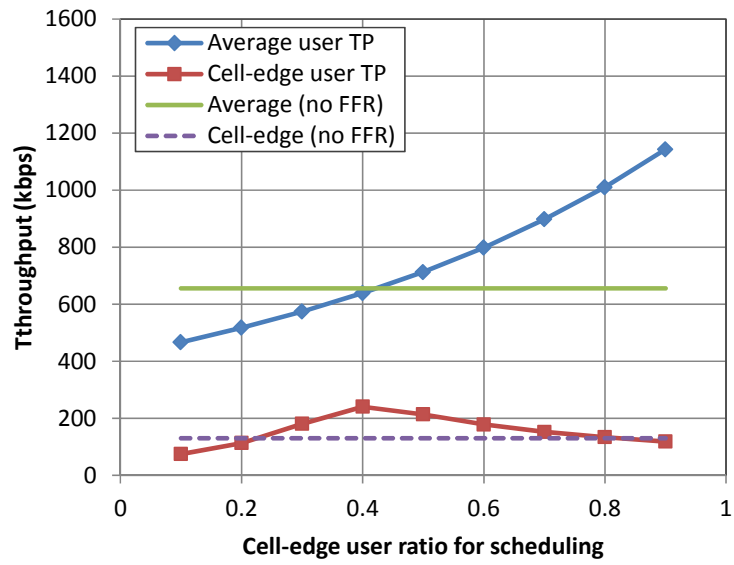


図 2.2.3.2-3 ユーザ分割と FFR スループット ( $\Delta P=6\text{dB}$ 、フェージングなし)

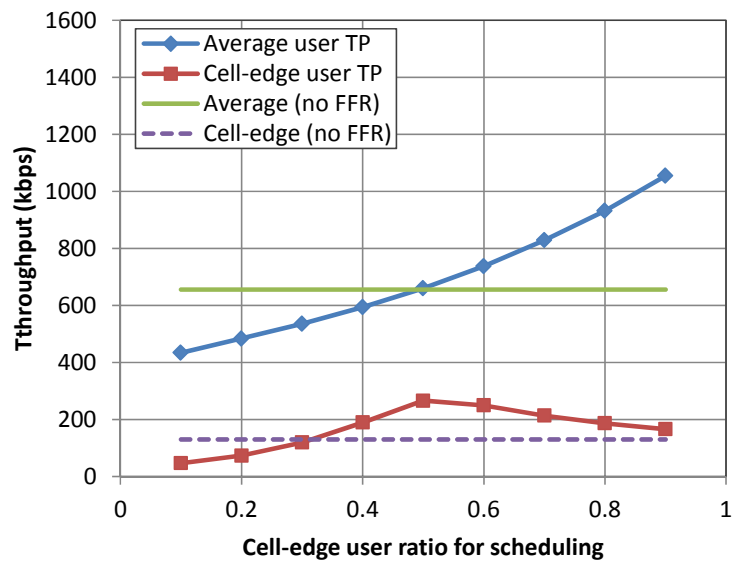


図 2.2.3.2-4 ユーザ分割と FFR スループット ( $\Delta P=9\text{dB}$ 、フェージングなし)

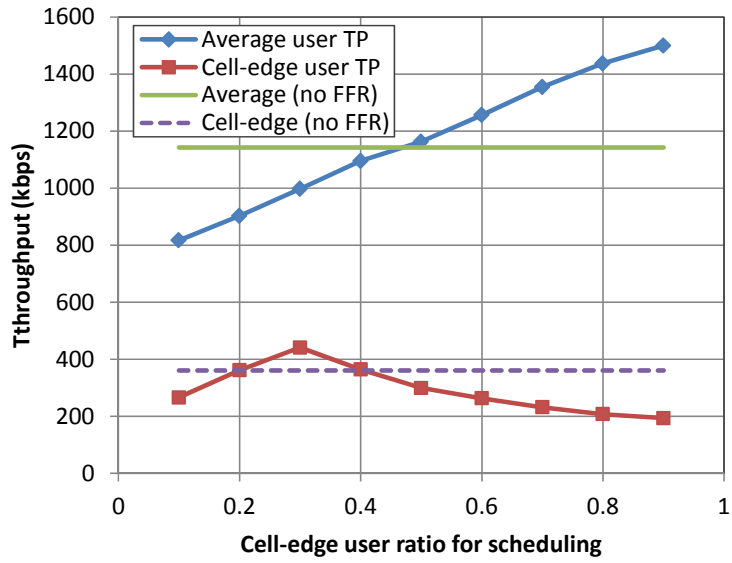


図 2.2.3.2-5 ユーザ分割と FFR スループット ( $\Delta P=3\text{dB}$ 、フェージングあり)

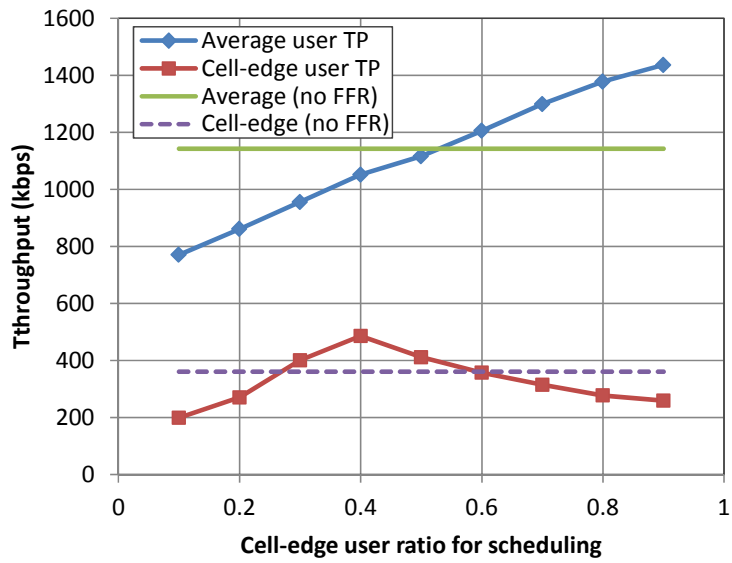


図 2.2.3.2-6 ユーザ分割と FFR スループット ( $\Delta P=6\text{dB}$ 、フェージングあり)

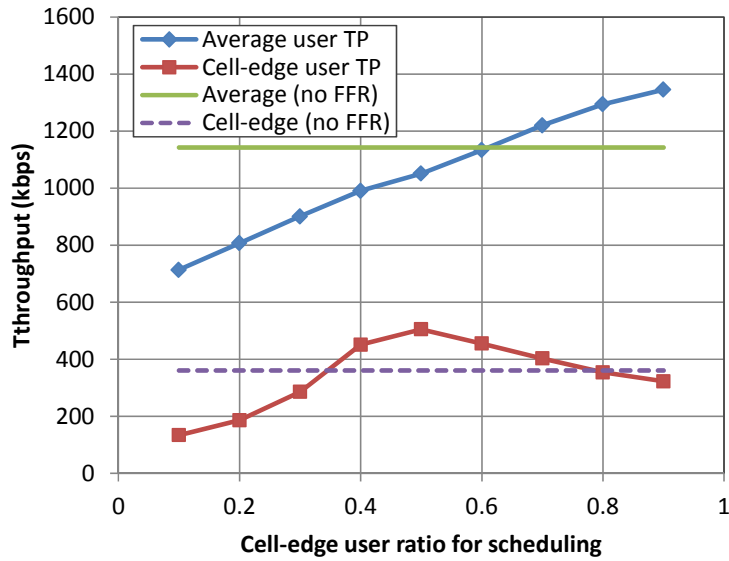


図 2.2.3.2-7 ユーザ分割と FFR スループット ( $\Delta P=9\text{dB}$ 、フェージングあり)

## 2.3. PF スケジューリングとユーザ割り当ての解析

前節で考察したように、FFR は送信電力の高い無線リソースにセル端ユーザを割り当てることで、セル端ユーザのスループット改善を図る方式であるが、ユーザを分割することによるユーザダイバーシチ利得の低下が課題であった。本節では、バンド間に送信電力差がある場合の PF スケジューリングの解析から、各バンドに対して予め割り当てるユーザを決めておかなくても、スループットベースの PF スケジューリングを実施することで、バンド間で最適なユーザ割り当てが自動的に行われることを示す。そして、FFR のシミュレーションにおいて、セル端ユーザの割り当てを予め行わない方法で、良好なスループット特性が得られることを示す。

### 2.3.1.1. ユーザ分割を行わない FFR の従来例

FFR において、ユーザ分割をせずに全ユーザを対象として PF スケジューリングを行う方法に言及している文献がいくつか存在する。文献[20]では、式(19)のように、セル端ユーザ用の帯域で得られるスループット  $R_k[n]_{\text{cell-edge}}$  がセル中心ユーザ用の帯域で得られるスループット  $R_k[n]_{\text{cell-center}}$  の 2 倍以上になるかどうかをスケジューリング毎に判定し、ユーザをどちらの帯域に割り当てるかを決めている。これにより、予め固定的なユーザ分割を行わずに、ユーザダイバーシチ利得の低下を防いでいる。

$$R_k[n]_{\text{cell-edge}} > 2 \cdot R_k[n]_{\text{cell-center}} \quad (19)$$

文献[21-23]では、「周波数強調係数を用いたスケジューリング方式」によって、スケジューリ



ングの前にユーザ分割を行わない方法を提案している。そのために式(20)のような周波数強調係数  $F$  を定義して PF メトリックに乘算することで、パスロス  $PL$  が大きいユーザがセル端ユーザ用の帯域に多くスケジューリングされるようにしている。

$$F(k, f) = \max\left(1, \{PL(k) - PL_{REF}\}^\alpha\right) \quad (20)$$

このように、文献[20-23]では、予めユーザ分割を行わない方法が提案されているが、式(19)の判定式や式(20)の「周波数強調係数」の導入も同時に提案されている。本論文では、このような特殊な判定式や係数を導入しなくても、SINR が異なる無線リソースの間で全ユーザを対象としたスループットベースの PF スケジューリングを実行するだけで、ユーザ分割が自動的に行われ、その結果としてユーザダイバーシチ利得の低下を抑えたスケジューリングが実施可能であることを示す。

### 2.3.1.2. バンド間に電力差があるモデルでの考察

PF スケジューリングによって自動的にユーザが分割されることを確認するため、バンド間に送信電力差がある場合のシングルセルモデルを用いたシミュレーションを実施した。図 2.3.1.2-1 に確認用に想定した無線リソースの構成を示す。帯域幅の等しい 2 バンド構成で、片側のバンドの SNR が常に 6dB 高くなっており、10 ユーザの各バンドの SNR は表 2.3.1.2.1 のように仮定する。フェージングなしの条件で PF スケジューリングを行った場合の各ユーザのバンド毎の割当率の計算結果を図 2.3.1.2-2 に示す。SNR が低い Index 1~6 のユーザは全て送信電力の高いバンド（高送信電力バンド）に割り当てられており、SNR の高い Index 8~10 のユーザは全て送信電力の低いバンド（低送信電力バンド）に割り当てられている。Index 7 のユーザは両方のバンドに割り当てられるが、高送信電力バンドに割り当てられる率の方が高い状態となっている。PF スケジューリングはバンド毎に 10 ユーザの中から PF メトリックが最大となるユーザを選択しているだけなのだが、結果として PF スケジューリングによって無線リソース間でユーザの分割が行われていることが確認できる。この時、PF メトリック計算の分母となる平均ユーザスループットは、2 バンド共通で平均化を行うことに注意が必要である。バンド毎に独立に PF メトリック（PF メトリックの分母）を計算した場合はユーザの分割は行われない。

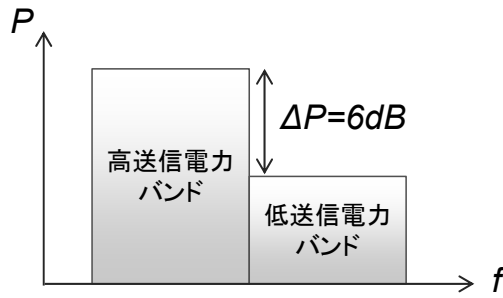


図 2.3.1.2-1 無線リソースの構成 (シングルセルモデル)

表 2.3.1.2.1 ユーザ毎の SNR (シングルセルモデル)

User index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
高送信電力バンド	0dB	3dB	6dB	9dB	12dB	15dB	18dB	21dB	24dB	27dB
低送信電力バンド	-6dB	-3dB	0dB	3dB	6dB	9dB	12dB	15dB	18dB	21dB

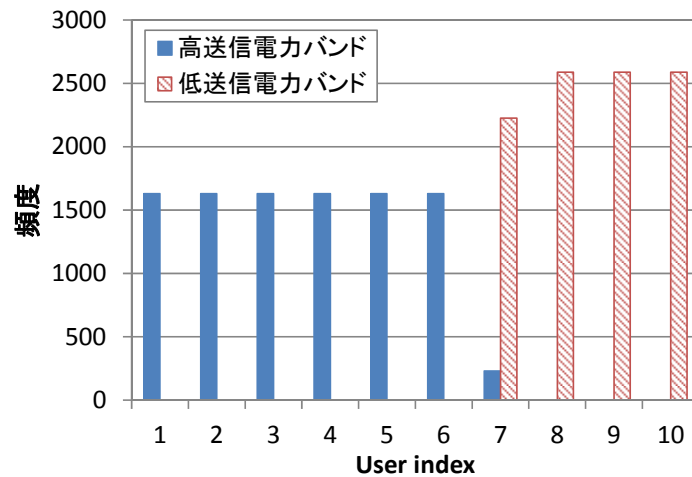


図 2.3.1.2-2 各ユーザのバンド毎の割当率 (フェーディングなし)

PF スケジューリングによって自動的にユーザが分割される理由として、SNR とスループットの換算に式(2)のシャノン式を用いていることが考えられる。図 2.3.1.2-3 は、各ユーザが各バンドに割り当てられた場合に得られるスループットを、式(2)を用いて計算した結果である。ここで、 $W=1$  とし、 $N_{user}$  はスケジューリングが安定した状態を想定し、高送信電力バンドは  $N_{user}=6.2$ 、低送信電力バンドは  $N_{user}=3.8$  とした。このユーザ比率は、図 2.3.1.2-2 で得られた割当率を参考に設定した値である。図 2.3.1.2-3 の結果を見ると、SNR の高い上位 4 ユーザは、高送信電力バンドよりも低送信電力バンドを用いた場合のスループットが高くなっており、高送信電力バンドを多くのユーザ ( $N_{user}=6.2$ ) でシェアするよりも、低送信電力バンドを少ないユーザ ( $N_{user}=3.8$ ) でシェアした方が高いスループットが得られることを示している。このような結果になるのは、

SNR とスループットが式(2)のシャノン式の関係となっているためであり、逆に言うと、図 2.3.1.2-3 のようにスループット特性が交差しなければ、スケジューリングによるユーザの分割は起こらないと考えられる。

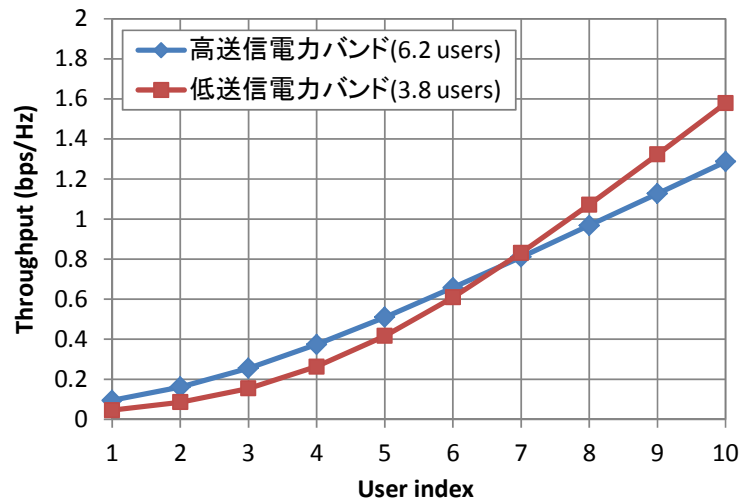


図 2.3.1.2-3 ユーザ分配を想定したスループット

図 2.3.1.2-3 の結果を、PF メトリックで分析すると、表 2.3.1.2.2 および表 2.3.1.2.3 のようになる。表 2.3.1.2.2 は、高送信電力バンドにスケジューリングするための PF メトリックで、各ユーザが高送信電力バンドに割り当てられていると仮定した場合と、低送信電力バンドに割り当てられていると仮定した場合の PF メトリックの値をそれぞれ示している。簡易分析のため、ユーザが割り当てられていると仮定したバンドに関わらず、高送信電力バンドのユーザ数を 6.2、低送信電力バンドのユーザ数を 3.8 に固定して計算している。表 2.3.1.2.2 を見ると、Index 1～6 のユーザが低送信電力バンドに割り当てられていると仮定した場合、高送信電力バンドの PF メトリックが Index 7～10 のユーザの PF メトリックより大きいことから、Index 1～6 のユーザは、高送信電力バンドにスケジューリングされることが予想される。また、表 2.3.1.2.3 を見ると、Index 7～10 のユーザが高送信電力バンドに割り当てられていると仮定した場合、低送信電力バンドの PF メトリックが Index 1～6 のユーザの PF メトリックより大きいことから、Index 7～10 のユーザは低送信電力バンドにスケジューリングされることが予想される。

図 2.3.1.2-4 は、バンド毎に独立なレイリーフェージングを付加した場合の各ユーザのバンド毎の割り当て率を計算した結果である。フェージング変動がある場合は、フェージングなしのようにユーザが明確に分割されることはないが、SNR の低い (Index の小さい) ユーザは高送信電力バンドの割り当て率が高くなっており、SNR が高い (Index の大きい) ユーザは低送信電力バンドの割り当て率が高くなっている。

表 2.3.1.2.2 PF メトリックの簡易分析 (高送信電力バンドの PF メトリック)

User index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
高送信電力 → 高送信電力	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	<b>6.2</b>	<b>6.2</b>	<b>6.2</b>	<b>6.2</b>
低送信電力 → 高送信電力	<b>13.02</b>	<b>11.76</b>	<b>10.27</b>	<b>8.81</b>	<b>7.59</b>	<b>6.69</b>	6.05	5.6	5.28	5.05

高送信電力→高送信電力：高送信電力バンドに割り当てられていると仮定した場合に高送信電力バンドに割り当てるための PF メトリック

低送信電力→高送信電力：低送信電力バンドに割り当てられていると仮定した場合に高送信電力バンドに割り当てるための PF メトリック

表 2.3.1.2.3 PF メトリックの簡易分析 (低送信電力バンドの PF メトリック)

User index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
低送信電力 → 低送信電力	<b>3.8</b>	<b>3.8</b>	<b>3.8</b>	<b>3.8</b>	<b>3.8</b>	<b>3.8</b>	3.8	3.8	3.8	3.8
高送信電力 → 低送信電力	1.81	2.00	2.29	2.68	3.1	3.52	<b>3.90</b>	<b>4.21</b>	<b>4.46</b>	<b>4.66</b>

低送信電力→低送信電力：低送信電力バンドに割り当てられていると仮定した場合に低送信電力バンドに割り当てるための PF メトリック

高送信電力→低送信電力：高送信電力バンドに割り当てられていると仮定した場合に低送信電力バンドに割り当てるための PF メトリック

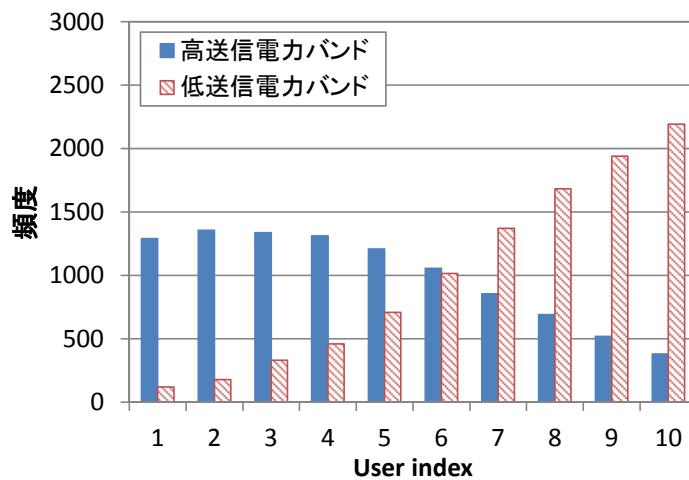


図 2.3.1.2-4 各ユーザのバンド毎の割当率 (フェージングあり)

### 2.3.1.3. PF スケジューリング前にユーザ分割を行わない場合の FFR 特性

2.2.3.2 章では、セル内のユーザを「セル中心ユーザ」と「セル端ユーザ」に予め分割した後、PF スケジューリングを行う場合の FFR のスループット特性を示したが、ここでは、予めユーザ分割をせずに PF スケジューリングを行った場合のスループット特性を示す。図 2.3.1.3-1 と図 2.3.1.3-2 はフェージングなしの場合の特性比較で、図 2.3.1.3-1 は平均ユーザスループット、図 2.3.1.3-2 はセル端ユーザスループットの比較である。ΔP=3, 6, 9dB の場合において、FFR なし、

FFR ありでユーザ分割を行った場合、FFR ありでユーザ分割を行わない場合のスループットをそれぞれ示している。ユーザ分割ありの場合は、複数の分割比率のシミュレーションを実施し、セル端スループットがユーザ分割なしのセル端スループットと同等かそれ以下となるように調整している。フェージングなしの場合は、ユーザ分割ありとなしの特性はほぼ同じで、FFR なしと比べて、平均ユーザスループットとセル端ユーザスループットの両方に改善が見られる。ユーザ分割ありとユーザ分割なしで特性がほぼ同じとなっている理由は、図 2.3.1.2-2 で示したように、フェージングなしの場合はスケジューリングによって割り当てられるバンドが明確に分割されるためであり、結果としてスケジューリング前にユーザ分割を行った場合と同じ特性になったと考えられる。

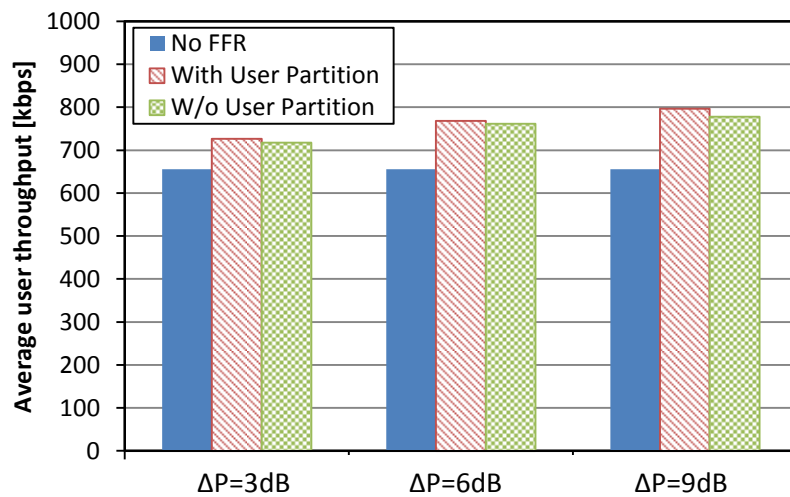


図 2.3.1.3-1 平均ユーザスループットの比較 (フェージングなし)

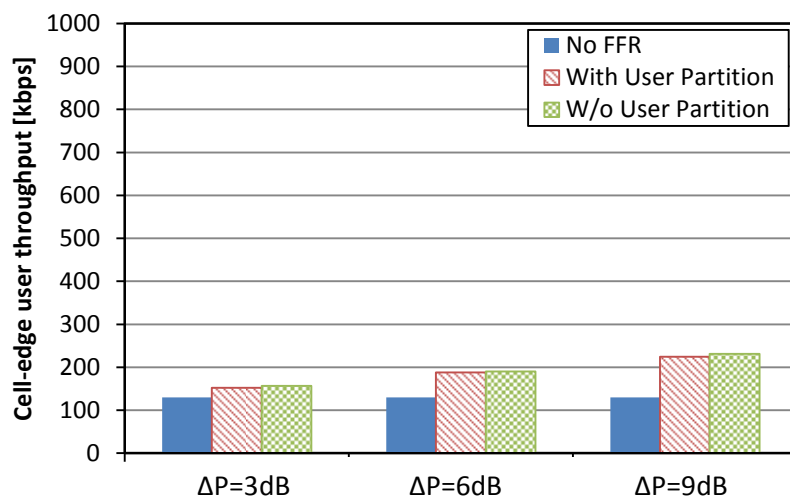


図 2.3.1.3-2 セル端ユーザスループットの比較 (フェージングなし)

図 2.3.1.3-3 と図 2.3.1.3-4 は、フェージングありの場合のスループット特性比較である。フェージングを入れることで、ユーザダイバーシチ利得が得られ、フェージングなしの場合に比べてスループットが大幅に向上している。但し、ユーザ分割ありのセル端ユーザスループットが、ユーザ分割なしのセル端ユーザスループットを超えないように調整しているにもかかわらず、平均ユーザスループットがユーザ分割なしの場合や FFR なしの場合よりも低くなっている。これは、ユーザ分割によってユーザダイバーシチ利得が低下したためと考えられる。フェージングありの場合は、図 2.3.1.2-4 のように、フェージング変動によって送信電力の高いバンドと低いバンドのどちらかに割り当てられるべきかが変わるため、ユーザ分割がユーザダイバーシチ利得の低下に繋がったものと考えられる。

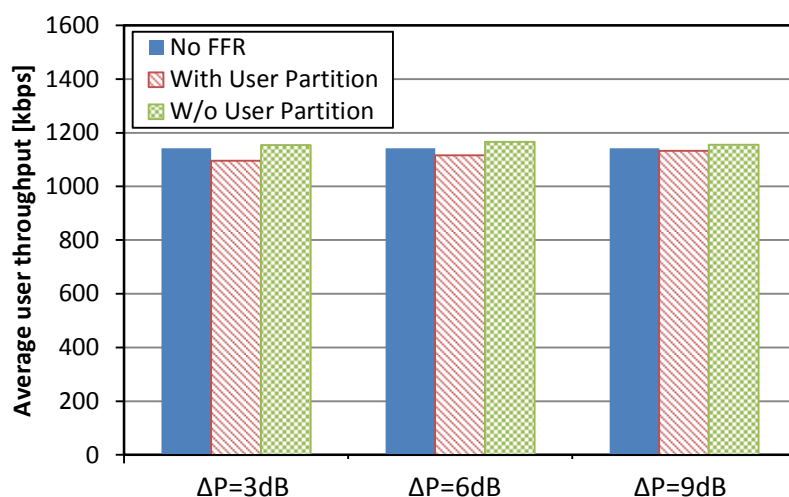


図 2.3.1.3-3 平均ユーザスループットの比較 (フェージングあり)

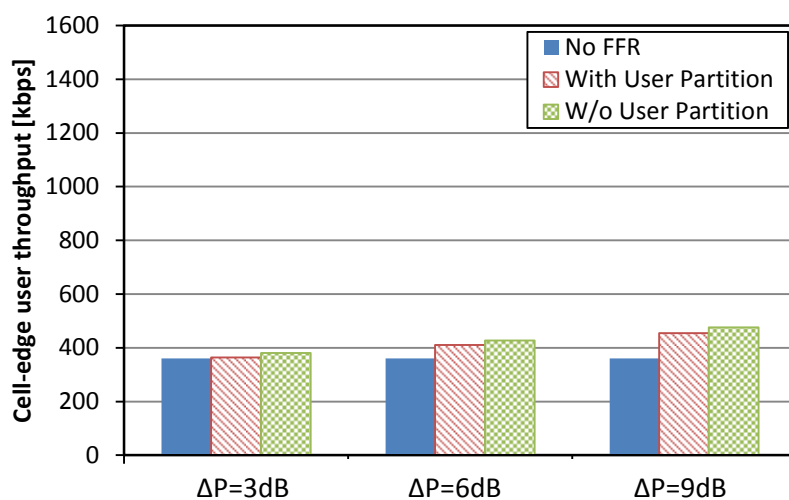


図 2.3.1.3-4 セル端ユーザスループットの比較 (フェージングあり)

## 2.4. 第2章のまとめ

本章では、セル間干渉の基本的な考察として、最初に、従来のマクロセルや今後普及が見込まれる HetNet のセル構成における受信 SINR の定量的な分析を行い、次に、シングルセルおよびマルチセル環境において PF スケジューリングを実施した場合のスループットの基本特性の解析を行い、最後に、従来のセル間干渉制御技術の代表例である FFR のスループット特性の解析を行った。これらの解析の過程で、FFR のように送信電力の異なる複数の無線リソースが存在する場合に、「セル端ユーザ」と「セル中心ユーザ」のようにユーザを予め分割して、分割したユーザをそれぞれの無線リソースに割り当てる処理を行わなくても、スループットベースの PF スケジューリングを実施するだけで、「セル端ユーザ」と「セル中心ユーザ」の分割を含んだ最適なユーザ割り当てが自動的に行われることを示した。

このように、本章では、スループットベースの PF スケジューリングと無線リソースへのユーザ割り当ての関係を明らかにしており、このことは、ユーザ割り当て後のスケジューリングでスループットが決まるのではなく、スケジューリングによって最適なユーザ割り当てが決まること、すなわち、PF スケジューリングの解析によって、無線リソース毎のユーザ割り当て率とユーザスループットが計算できることを示唆している。この考察をもとに、次章では、ユーザ毎の無線リソースの割り当て率を計算することで PF スケジューリング適用時のユーザスループットを高速に計算する手法を提案する。

### 第3章 KKT 条件を用いたスループット計算手法の提案

本章では、最初に、PF スケジューリングに関するいくつかの文献を紹介し、PF メトリックと PF Utility と呼ばれる指標の関係について解説する。そして、PF スケジューリングを行った場合のセル内のユーザスループットを計算する「KKT 条件を用いたスループット計算手法」を提案する。この手法は、各ユーザのスループットの対数の総和として計算される PF Utility の最大化問題を解くことで、各ユーザのスループットを算出するものである。提案法はフェージングなしの条件での計算手法であるため、無線パラメータの制御をフェージングに追従するような速度で行う必要のないセル間干渉制御に適用することができる。また、提案法は、SINR の異なる複数の無線リソースが混在する無線通信システムにおいて、それぞれの無線リソースにおけるユーザ毎の割当率を計算できるため、割当率が閾値以上となるユーザのみを対象としてスケジューリングをしたり、ユーザ割り当てが行われなかった無線リソースを停止したりするなど、無線リソースを有効利用するための制御にも活用することができる。

#### 3.1. PF スケジューリングに関する文献

Proportional Fairness (PF) は、Asynchronous Transfer Mode (ATM) において Max-Min Fairness に代わる帯域割り当て方法として Kelly によって提案された[24]。ユーザ  $s$  の伝送速度  $x_s$  の関数である Utility  $U_s(x_s)$  を定義し、全ユーザの Utility の総和が最大となるように帯域割り当てを決定することで、Fairness を満たしながらスループットを向上させる。そして、 $U_s(x_s) = \log x_s$  の場合を Proportional Fair としている。PF の移動通信への適用は Qualcomm 社によって提案され[25]、cdma2000 の高速パケット伝送技術である High Data Rate (HDR) に用いられた。3GPP へは Nortel 社によって提案され[26]、PF メトリック  $\Gamma_k$  を式(21)のように規定している。 $\alpha$  と  $\beta$  の値によって Fairness の調整が可能で、 $\alpha=0$ ,  $\beta=1$  の時が Round Robin、 $\alpha=1$ ,  $\beta=1$  の時が PF、 $\alpha=1$ ,  $\beta=0$  の時が Max C/I のスケジューリングアルゴリズムに相当する。式(21)で  $\alpha$  と  $\beta$  の2種類のパラメータを用いるのは説明を容易にするためである。例えば、式(22)のように、PF メトリック全体を  $1/\alpha$  乗してもスケジューリングの順位は変わらないため、片方の係数だけでも Fairness の調整は可能である。

$$\Gamma_k = \frac{(R_k[n])^\alpha}{(\tilde{R}_k[n])^\beta} \quad (21)$$

$$\Gamma_k = \left\{ \frac{(R_k[n])^\alpha}{(\tilde{R}_k[n])^\beta} \right\}^{\frac{1}{\alpha}} = \frac{R_k[n]}{(\tilde{R}_k[n])^{\frac{\beta}{\alpha}}} = \frac{R_k[n]}{(\tilde{R}_k[n])^\gamma} \quad (22)$$



マルチキャリアで PF スケジューリングをする際には、PF メトリックの分母である平均ユーザスループットを全てのマルチキャリア間で平均して求めることで、システムの Fairness が保てる事が文献[27]で示されている。このことは、2.3.1.2 節でも触れており、FFR を適用する際に PF メトリックの分母を無線リソース間で平均しない場合は、PF スケジューリングによってセル端ユーザとセル中心ユーザに分割されないことを示している。

### 3.2. PF メトリックと PF Utility の関係

「PF メトリックが最大のユーザを選択するスケジューリング」と「スケジューリング後の PF Utility が最大となるユーザを選択するスケジューリング」が等価であることは文献[28]に詳しい。以下にその証明を示しておく。

まず、PF Utility  $U$  は、式(23)で定義される。

$$U[n] = \sum_{k=1}^{N_k} \log(\tilde{R}_k[n]) \quad (23)$$

今、PF Utility の変化量  $\Delta U$  を式(24)のように定義した場合、 $U$  の最大化は  $\Delta U$  が最大となるユーザを選択することに等しい。

$$\Delta U = U[n+1] - U[n] = \sum_{k=1}^{N_k} (\log(\tilde{R}_k[n+1]) - \log(\tilde{R}_k[n])) \quad (24)$$

スループットの平均時間が十分長ければ平均スループットの変化量は十分小さくなると仮定できるため、式(24)の  $\log(\tilde{R}_k[n+1])$  は 1 次のテーラー級数展開の近似式から式(25)のように表せる。

$$\log(\tilde{R}_k[n+1]) \approx \log(\tilde{R}_k[n]) + \frac{\tilde{R}_k[n+1] - \tilde{R}_k[n]}{\tilde{R}_k[n]} \quad (25)$$

そして、式(25)とスループットの平均式である式(4)を式(24)に代入すると、 $\Delta U$  は式(26)のように計算される。

$$\Delta U \approx -\frac{N_k}{n} + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{N_k} \frac{R_k[n] I_k[n]}{\tilde{R}_k[n]} = -\frac{N_k}{n} + \frac{1}{n} \frac{R_k[n]}{\tilde{R}_k[n]} \quad (26)$$

定数項は影響しないため、PF メトリック  $R_k[n]/\tilde{R}_k[n]$  が最大となるユーザを選択するスケジューリングは、 $\Delta U$  が最大となるユーザを選択することと等価であることが分かる。

### 3.2.1. KKT 条件を用いたスループット計算手法

従来のシステムレベルシミュレーションでは、PF メトリックが最大となるユーザをスロット毎に計算しながら、数千～数万スロットの区間データを累積することで、各ユーザのスループットを計算していた。この方法は、ユーザの移動やフェージングなどによって SINR が複雑に変動する場合でもスループットを計算できるメリットがある。本節では、このような長区間のスケジューリング計算を行わずに、SINR の変動のない Static な条件下で、各無線リソースにおけるユーザの割当率を計算するアルゴリズムを用いて、PF スケジューリングを想定したユーザスループットを計算する手法を提案する。この計算手法を用いることで、無線リソース毎のパラメータの最適値を高速に計算することなどが可能になる。

#### 3.2.1.1. KKT 条件による関係式の導出

前節の証明から、PF スケジューリングを想定した条件では、PF Utility の最大化問題を解くことによって各ユーザのスループットを計算できることが分かった。ここで、最大化問題を解く手法として、Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件[29]を用いる。変数が  $n$  個、不等式制約が  $m$  本の最大化問題は式(27)で表される。

$$\begin{aligned}
 & \max f(x_1, \dots, x_n) \\
 & \text{s.t. } g_1(x_1, \dots, x_n) \geq 0 \\
 & \quad \vdots \\
 & \quad g_m(x_1, \dots, x_n) \geq 0
 \end{aligned} \tag{27}$$

$f$  が凸関数である場合、KKT 条件は式(28)で表される。すなわち、 $\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_n$  が関数  $f$  の極大解であれば、式(28)の制約条件を満たす  $\hat{\lambda}_1, \dots, \hat{\lambda}_m$  が存在する。 $\hat{\lambda}$  は Lagrange 乗数と呼ばれる。

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial f}{\partial x_1}(\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_n) + \hat{\lambda}_1 \frac{\partial g_1}{\partial x_1}(\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_n) \cdots + \hat{\lambda}_m \frac{\partial g_m}{\partial x_1}(\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_n) = 0 \\
 & \quad \vdots \\
 & \frac{\partial f}{\partial x_n}(\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_n) + \hat{\lambda}_1 \frac{\partial g_1}{\partial x_n}(\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_n) \cdots + \hat{\lambda}_m \frac{\partial g_m}{\partial x_n}(\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_n) = 0 \\
 & \hat{\lambda}_1 g_1(\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_n) = 0 \\
 & \quad \vdots \\
 & \hat{\lambda}_m g_m(\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_n) = 0 \\
 & \hat{\lambda}_1 \geq 0, \dots, \hat{\lambda}_m \geq 0
 \end{aligned} \tag{28}$$

KKT 条件を用いて PF Utility の最大化問題を解いて行く[30]。今、ユーザ  $k$  のスループット  $T_k$  は、無線リソース  $m$  への割当率  $p_{k,m}$  と無線リソース  $m$  で得られるデータレート  $R_{k,m}$  を使って表されるとした場合、PF Utility  $U$  は式(29)のようになる。ここで、 $N_k$  はユーザ数、 $N_m$  は無線リソース数である。

$$U = \sum_{k=1}^{N_k} \log(T_k) = \sum_{k=1}^{N_k} \log\left(\sum_{m=1}^{N_m} p_{k,m} R_{k,m}\right) \quad (29)$$

Full buffer を仮定しているため、無線リソース  $m$  における全ユーザの割当率の合計は 1 になる。また、割当率は 0 以上であることから、式(30)と式(31)の制約条件が得られる。

$$p_{k,m} \geq 0 \quad (k=1, \dots, N_k \quad m=1, \dots, N_m) \quad (30)$$

$$\sum_{k=1}^{N_k} p_{k,m} = 1 \quad (m=1, \dots, N_m) \quad (31)$$

式(30)の制約条件の Lagrange 乗数を  $\lambda_{k,m}$ 、式(31)の制約条件の Lagrange 乗数を  $\mu_m$  で表した場合、式(28)の KKT 条件は、式(32)と式(33)の等式と、式(34)と式(35)の不等式となる。

$$\frac{R_{k,m}}{T_k} + \lambda_{k,m} - \mu_m = 0 \quad (32)$$

$$p_{k,m} \cdot \lambda_{k,m} = 0 \quad (33)$$

$$\lambda_{k,m} \geq 0 \quad (34)$$

$$\mu_m \geq 0 \quad (35)$$

式(32)と式(33)から式(36)が得られる。

$$p_{k,m} \left( \mu_m - \frac{R_{k,m}}{T_k} \right) = 0 \quad (36)$$

式(30)と式(36)から、 $p_{k,m} > 0$  の時に  $\mu_m - \frac{R_{k,m}}{T_k} = 0$  となることから、 $p_{k,m}$  は式(37)で表される。

$$p_{k,m} = \frac{1}{\mu_m} - \frac{1}{R_{k,m}} \sum_{i=1, i \neq m}^{N_m} p_{k,i} \cdot R_{k,i} \quad (37)$$

また、 $P_{k,m} = 0$ の時、 $\mu_m - \frac{R_{k,m}}{T_k} > 0$ となることを考慮すると、 $P_{k,m}$ は式(38)のように表せる。

$$P_{k,m} = \max \left\{ 0, \frac{1}{\mu_m} - \frac{1}{R_{k,m}} \sum_{i=1, i \neq m}^{N_m} p_{k,i} \cdot R_{k,i} \right\} \quad (m = 1, \dots, N_m) \quad (38)$$

最後に、式(31)と式(38)を組み合わせて式(39)が導出される。

$$\sum_{k=1}^{N_k} \max \left\{ 0, \frac{1}{\mu_m} - \frac{1}{R_{k,m}} \sum_{i=1, i \neq m}^{N_m} p_{k,i} \cdot R_{k,i} \right\} = 1 \quad (m = 1, \dots, N_m) \quad (39)$$

### 3.2.1.2. 注水定理による導出式の解法

式(39)は、注水定理を用いて解くことができる。今、無線リソース  $m$  毎に図 3.2.1.2-1 のような水槽を仮定する。水槽はユーザ数  $N_k$  の領域に分かれており、ユーザ  $k$  の領域の水槽の底面の高さ（地上高）を  $\frac{1}{R_{k,m}} \sum_{i=1, i \neq m}^{N_m} p_{k,i} \cdot R_{k,i}$  とする。また、水槽に注がれる水の高さ（地上高）は全てのユーザの領域で等しく  $1/\mu_m$  とする。この時、各ユーザの領域における水の高さ（水槽の底面からの高さ）がユーザの割当率  $p_{k,m}$  となる。したがって、水槽に注ぐ水の総量は、式(31)の条件から 1 となる。

上記の注水定理を用いてユーザの割当率  $p_{k,m}$  を求めるアルゴリズムは以下となる。

- ①  $p_{k,m}$  の初期値を  $1/N_k$  とする。
- ② ユーザ毎の水槽の底面の高さを計算する。
- ③ ユーザを水槽の底面の高さが低い順番に並び替える。
- ④ 水槽に総量 1 の水を注ぎ  $p_{k,m}$  を計算する。
- ⑤ ②～④を繰り返すことで  $p_{k,m}$  の値を更新する。

ユーザを水槽の底面の高さが低い順に並び替える理由は、総量 1 の水を注ぎ終わった後の水の高さ  $1/\mu_m$  を簡単に計算できるようにするためである。水槽の底面の高さが低いユーザの順番に水を注ぐことで総量 1 の水を注ぎ終えた時点での水の高さ  $1/\mu_m$  が簡単に求まる。この時、水槽の底面が水の高さよりも高いユーザの割当率  $p_{k,m}$  は 0 となる。

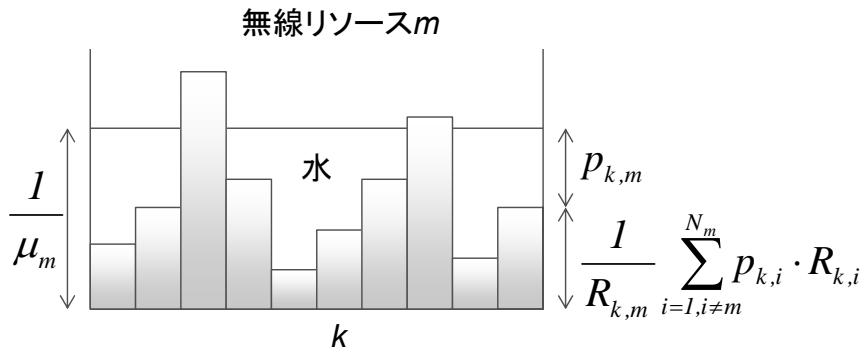


図 3.2.1.2-1 注水定理の説明図

### 3.2.1.3. 注水定理計算の収束特性

2.2.3.2 章で行ったフェージングなしでの FFR のスループット計算を用いて、注水定理計算の収束特性を調べた。図 3.2.1.3-1 は、注水定理の繰り返し数を横軸にして、平均ユーザスループットの計算結果を縦軸にプロットしたものである。また、図 3.2.1.3-2 は、縦軸にセル端ユーザスループットをプロットしたものである。これらのシミュレーション結果では、繰り返し数 10 回程度でほぼ収束していることが分かる。なお、収束後の計算結果は、従来のシステムレベルシミュレーション (SLS) によるスループット計算結果と同じになる。

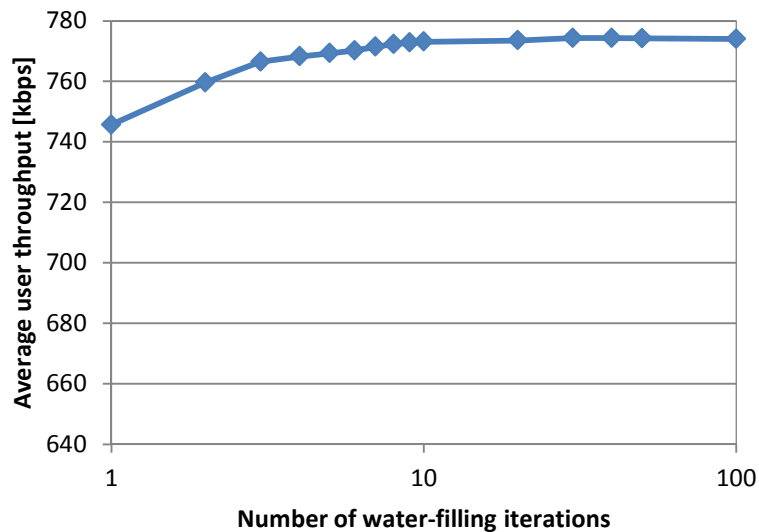


図 3.2.1.3-1 注水定理計算の収束特性 (平均ユーザスループット)

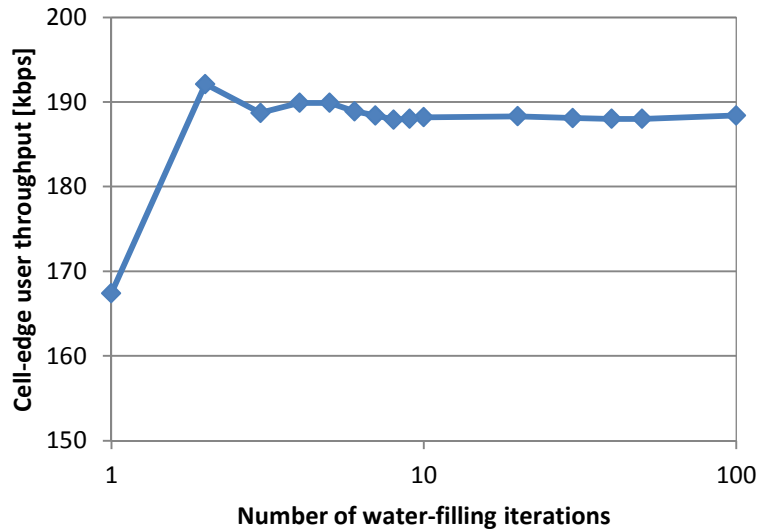


図 3.2.1.3-2 注水定理計算の収束特性（セル端ユーザスループット）

SLS の収束特性についても同じ条件で調査し、注水定理を用いる提案手法との比較を行った。図 3.2.1.3-3 と図 3.2.1.3-4 は、SLS の計算スロット数を横軸にして、平均ユーザスループットおよびセル端ユーザスループットの収束特性をそれぞれプロットしたものである。SLS では、完全に結果が収束するには 10,000 スロット程度の計算が必要となっている。ここで、注水定理の繰り返し数とスループット計算の実行時間の関係を図 3.2.1.3-5 に、SLS の計算スロット数とスループット計算の実行時間の関係を図 3.2.1.3-6 にそれぞれ示す。注水定理を用いる提案手法では繰り返し数 10 回の計算時間は 2 秒程度、SLS の計算時間は 10,000 スロットで 150 秒程度となっている。このように、提案手法は、SLS に比べて短い時間で十分収束したスループットの計算結果が得られることが分かる。なお、PF メトリックを用いる SLS の計算時間はユーザ数に比例するが、提案手法では注水定理計算にユーザ数のソートを含んでいるため、ユーザ数が多い場合は計算時間も増加する。したがって、今回のシミュレーション条件であるセクタ当たり 30 ユーザの場合、提案手法のスループット計算の実行時間は SLS の 75 分の 1 程度に短縮されていると言える。

但し、提案手法であっても、ユーザが利用できる無線リソースを全く絞り込まずに、シミュレーションモデル内の全ての無線リソースを利用できると仮定して計算を実行した場合は、ユーザ割当率が 0 になるだけの演算を大量に行うことになるため、計算時間が無駄に増大してしまうことも考えられる。

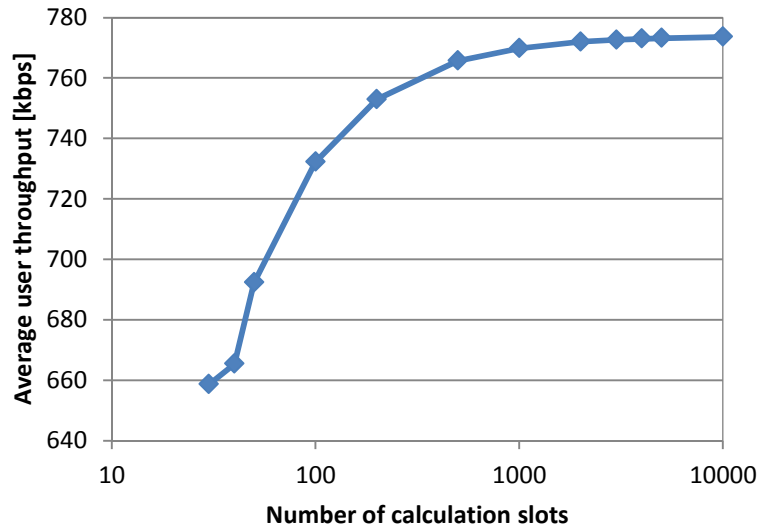


図 3.2.1.3-3 SLS の収束特性 (平均ユーザスループット)

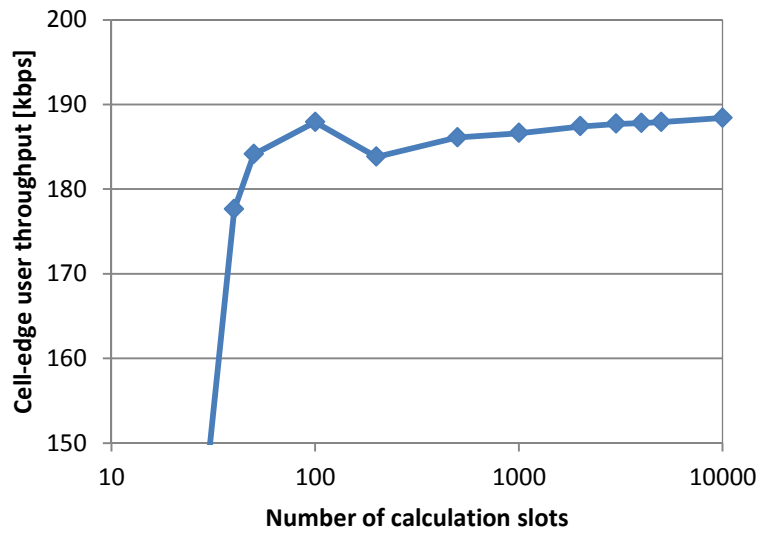


図 3.2.1.3-4 SLS の収束特性 (セル端ユーザスループット)

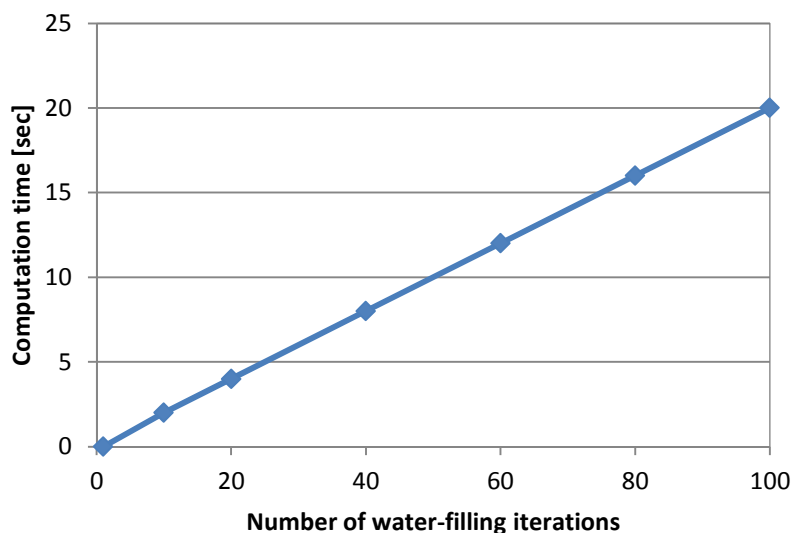


図 3.2.1.3-5 注水定理の繰り返し数とスループット計算時間の関係

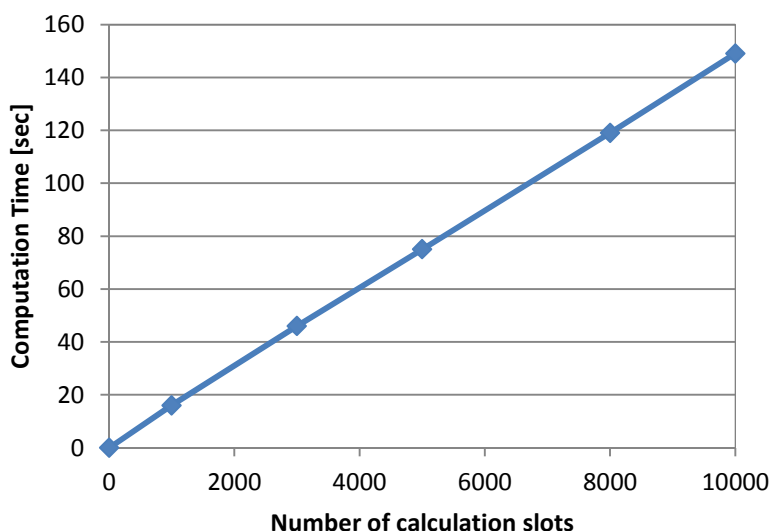


図 3.2.1.3-6 SLS の計算スロット数とスループット計算時間の関係

#### 3.2.1.4. KKT によるスループット計算手法の考察

前節で示したように、従来のシステムレベルシミュレーションは、その収束特性から、正確な計算結果を得るには、ある程度長いスロット数の区間で計算する必要があった。一方、提案する「KKT 条件を用いたスループット計算手法」は、その解法に注水定理による繰り返し演算が必要になるが、演算の収束が速いため、繰り返し回数を 10 程度にしておけば、正確な計算結果を得ることができた。但し、提案手法が使えるのは、フェージングなしの条件に限られるため、その活用方法について考察する必要がある。

提案手法は、フェージングを考慮しないため、フェージングに追従するような高速な制御には



活用できない。但し、フェージングに追従しない低速な制御として、基地局を設置する際の置局設計や、ユーザ分布やトラフィックのゆっくりとした変動に応じて無線リソースのパラメータを制御する目的に提案手法を活用することができる。この場合、多くのパラメータの組み合わせの中から最適な組み合わせを見つけ出すことが必要であり、そのためには一つのパラメータの組み合わせにおいて、スループットを高速に計算する必要がある。また、FFR の例で見たように高いユーザダイバーシチ利得を得るには、スケジューリング対象のユーザ数を絞り込まない方が良いが、無線リソースやユーザの数が増えると、スケジューリングのための計算量が膨大なものになってしまうため、スケジューリングの処理量を削減する目的で、無線リソースへのユーザ割当率を予め計算しておき、割当率の高いユーザに絞ってスケジューリングを行う方法も有効になると考えられる。そのため、提案手法を用いて、あるユーザが割り当てられる（割当率が高くなる）無線リソースを予め絞り込んでおくことによって、スケジューリングの処理量を削減する方法も有効と考えられる。また、提案する「KKT 条件を用いたスループット計算手法」は、セル設計段階だけでなく、システム運用中に定期的に無線リソース毎のパラメータ制御を行う「セル間干渉制御技術」にも活用できると考えられる。

### 3.3. 第3章のまとめ

本章では、まず、PF スケジューリングの文献をもとに、PF スケジューリングが PF Utility の最大化問題を解くことと等価であることを確認した。そして、PF Utility が無線リソース毎のユーザ割当率と瞬時スループットによって計算されることから、PF Utility の最大化問題を解くことで、PF スケジューリング後の無線リソース毎のユーザ割当率およびユーザスループットを算出する「KKT 条件を用いたスループット計算手法」を提案した。提案手法では、PF Utility の最大化問題を KKT 条件で定式化し、その導出式を注水定理アルゴリズムで解く方法であり、従来のシステムレベルシミュレーションよりも収束が速く、セクタあたり 30 ユーザの場合にスループット計算の実行時間を 75 分の 1 程度に短縮できることを示した。また、提案手法の活用として、フェージングに追従する必要のない比較的低速の制御周期を想定した「セル間干渉制御技術」や、無線リソース毎のユーザ割当率を予め計算しておくことでスケジューリングの処理量を削減する技術への適用の可能性についても考察した。

次章では、提案手法の 3 つの適用例(①スループットを指標としたスモールセル設計、②集中制御型三次元ビームスイッチング、③C-RAN 型基地局におけるベースバンドプーリング)について検討を行い、提案手法およびその適用例の有効性を検証する。

## 第4章 スループットを指標としたセル間干渉制御への適用

前章では、PF スケジューリングで得られるユーザ割当率およびスループットを高速に計算する「KKT 条件を用いたスループット計算手法」を提案した。本章では、その適用例として、セル設計段階やシステム運用中に、PF Utility が最大となるように無線パラメータの決定や更新を行う「セル間干渉制御技術」について検討する。具体的には、「スループットを指標としたスモールセル設計」、バンド毎にアンテナの指向性を切り替える「集中制御型三次元ビームスイッチング」、集中型ベースバンド局と複数のリモート局を用いた「Centralized-Radio Access Network (C-RAN) 型基地局におけるベースバンドプーリング」の適用例から提案手法の有効性を検証する。これらのスループットを指標としたセル間干渉制御技術は、セル構成や周波数割り当てが複雑になり、データ通信がサービスの中心となる第5世代移動通信を始めとする広帯域移動通信において必要な技術と考えられる。

### 4.1. 適用例1：スループットを指標としたスモールセル設計

従来のマクロセルでは、ユーザがどこにいても所要の SINR を満たす(カバレッジを確保する)ことを目標として、受信 SINR を指標としたセル設計が行われている。しかしながら、モバイル通信の主流は、音声通話からデータ通信に変わってきており、データ通信のトラフィックも増加していることから、今後は、スループットを指標としたセル設計が行われるようになると予想される。本節では、第3章で提案した「KKT 条件を用いたスループット計算手法」を活用したスループットベースのセル設計手法について解説する。

#### 4.1.1. スループットを指標としたセル設計の必要性

スモールセルや HetNet などの新しいセル構成では、受信 SINR に変わってスループットを指標としたセル設計が必要となる。それには、以下の2つの理由が考えられる。1つ目の理由は、共有チャネルを用いるデータ通信では、ユーザ分布やトラフィックに応じて得られる通信速度が変わるためである。すなわち、受信 SINR だけでなく、ロードバランスを考慮しないと正しいセル設計はできない。2つ目の理由は、第4世代以降のセルラシステムでは、ユーザが通信品質の異なる複数の無線リソースを利用する無線通信方式が採用されることから、受信 SINR だけではユーザが得られる通信速度(スループット)を正しく予測できないためである。複数の無線リソースを利用する技術には、前章で説明した FFR などのセル間干渉制御技術や、Carrier Aggregation (CA) と呼ばれる複数の周波数バンドの信号を送受信する技術、Coordinated Multi-Point transmission (CoMP) と呼ばれる隣接する複数の基地局が同一のユーザに対して協調してデータを送信する技術などがある。このような技術を用いる場合、無線リソース毎のユーザの割当率が分からなければ、通信速度を正しく予測できないため、正しいセル設計が困難になる。

#### 4.1.2. スループットを指標としたセル設計

スループットを指標としたセル設計[31-33]の流れを図 4.1.2-1 に示す。事前準備として、既存基地局の設置位置と無線パラメータに加えて、新たに増設する基地局の、設置候補位置、周波数割り当て、送信電力、アンテナ指向性など、最適化するパラメータを決定する。そして、最適化するパラメータの探索パターンを決定する。最適化するパラメータが複数ある場合、全ての探索の組み合わせは各パラメータのパターン数を全て乗算した膨大な数になる。したがって、探索パターンを効果的に削減する探索アルゴリズムも決めておく必要がある。また、探索を開始する時点でのパラメータの初期値も決めておく。さらに、無線リソース毎に、割り当てを行う対象ユーザである「スケジューリング対象候補」を予め絞っておくことも計算量の削減に効果がある。探索パターンとスケジューリング対象候補については以降で詳しく考察する。

次に、事前準備で決めたパラメータの組み合わせ回数分のスループット計算を行う。スループットを計算するには、伝搬モデルとユーザ分布（ユーザの位置情報）が必要になる。実際のセル設計では、地形や建物の影響を考慮したレイトレースなどの伝搬計算を伝搬モデルとして用いたり、基地局の通信状況や GPS による端末の測位情報、あるいは実地調査に基づいた人の分布や移動経路をユーザ分布として用いたりする方法が考えられる。但し、本論文は、セル間干渉制御技術の検証を目的としているため、伝搬モデルとユーザ分布には標準化等で使われるシミュレーションモデル（表 2.1.1.1 参照）を用いることとする。

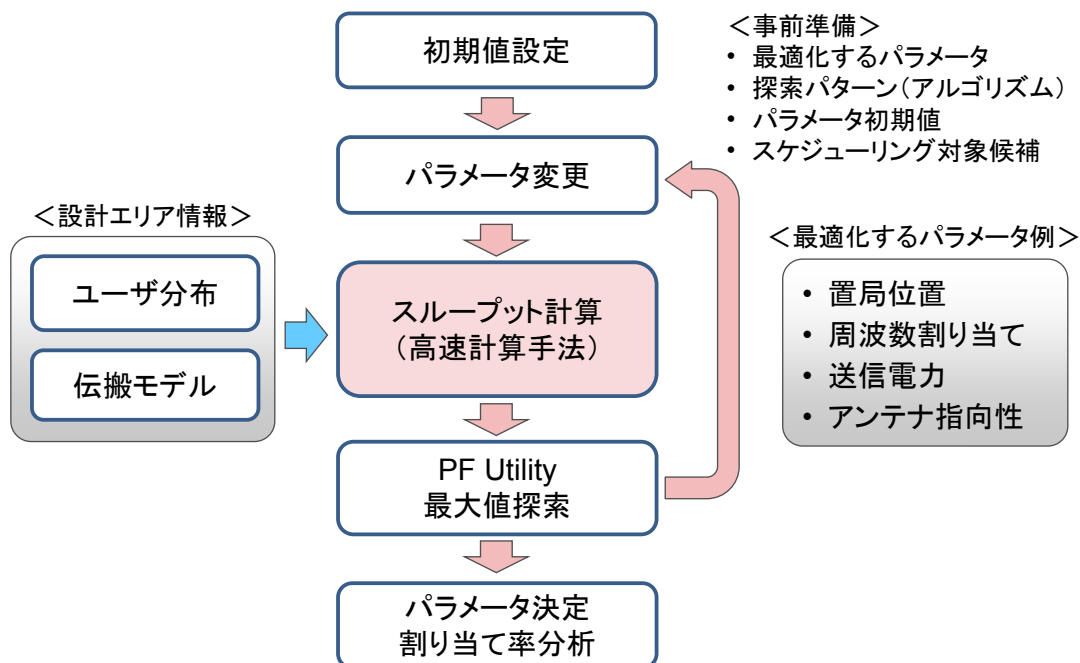


図 4.1.2-1 スループットを指標とするセル設計の流れ

事前準備が終わったら、探索パターンの数だけスループット計算を繰り返す。この時、1回のスループット計算の時間を短くできれば、セル設計に要する時間も短縮できるし、最適化の探索パターン数や最適化するパラメータの数を増やすことでより最適に近いセル設計が可能になる。したがって、前章で提案したスループットの高速計算手法が有効になる。計算時間には、対象とする基地局数やユーザ数など様々な条件が影響するので、最終的には、トータルの計算時間が実用的な範囲に収まるように、探索パターンや探索アルゴリズム、スケジューリング対象候補ユーザを決定する。

予め決めた全ての探索パターンを計算し終わった後に、PF Utility が最大となるパラメータを、この探索での最適パターンとして決定する。ここで、探索パターンを削減しているため、厳密には最適解は得られない。但し、以降に示すシミュレーション結果からも、特性改善が見られることから、ある程度最適に近いパラメータは得られていると考えられる。また、長い計算時間をかけても得られる改善量が僅かな場合は、実用的な計算時間で得られたパラメータでもセル設計としては十分と考えることもできる。

#### 4.1.3. 探索パターンの削減方法

最適化するパラメータの探索パターンの削減方法について考察する。今、セル設計を行うエリア内に、 $N$  個の基地局があり、1つの基地局には  $M$  個のバンドがあるとする。これらの基地局のバンド毎に最適なチルト角（アンテナの垂直方向の指向性）を決める場合を考える。チルト角の調整ステップを  $P$  通りとした場合、全ての組み合わせを探索するには、 $P^{MN}$  回 ( $P$  の  $M \times N$  乗回) の探索数となる。これは、組み合わせ最適化の問題であり、全ての組み合わせを探索するのは、組み合わせが指数関数になるため現実的ではない。本論文では貪欲法 (Greedy algorithm) による局所探索を行うことで、探索パターンを削減することを基本とする。具体的には、ある1つのバンドに対してチルト角を  $P$  通り変更して、評価指標が最も大きくなるチルト角を選択する。このチルト角は決定したものと、次のバンドのチルト角の最適化を順々に行っていく。これにより、探索する組み合わせ数は、 $P \times M \times N$  回に削減される。この方法では、保存状態（評価指標）は1つであり、この状態が必ず増加するようにパラメータを変更して行く。評価指標には、PF Utility、平均スループット、セル端ユーザスループット、Fairnessなどが考えられるが、これらについては次節で考察する。貪欲法では、パラメータを1つずつしか調整しないため、複数のパラメータが相互に関係する場合などでは最適解は得られず、近似解しか得られない。得られた近似解で十分であるかの判断は難しいが、設計エリア内の評価指標がある程度大きい値に増加していれば、得られた近似解を採用するメリットは十分にあると言える。

貪欲法の改良として、貪欲法を複数回繰り返したり、貪欲法の探索の順番をランダムに変更したりする方法が考えられる。また、貪欲法でパラメータを決定した後に、基地局 A と基地局 B のパラメータを入れ替えるなど、2つ以上のパラメータを同時に変更する探索を行うことで、評価指標がさらに改善しないかを調べる方法も考えられる。

探索パターンの別の例として、新たに増設する基地局の設置位置を決める方法について考察す

る。設置位置を決めるには、設置候補位置の情報が必要である。基地局を設置できる場所は、ビルの屋上や鉄塔などに限られるため、現地調査を行い、基地局が設置可能な候補位置を抽出する。この際、候補位置を多く抽出して、その中から最適な設置場所を探索する。今、設計エリア内の基地局の設置候補位置を  $K$  箇所抽出したとする。ここに、 $N$  個の基地局を設置するには、貪欲法では  $\sum_{i=0}^{N-1} (K - i)$  回の探索が必要になる。また、一つの基地局を設置する毎にチルト角を  $P$  通りの中から調整するとした場合の探索回数は、 $P \cdot \sum_{i=0}^{N-1} (K - i)$  回となる。

1 回の探索で行うスループット計算の計算時間は、設計エリア内に配置するユーザ数によっても増大する。ユーザが受信信号電力の最も大きい基地局のバンドだけと通信すると仮定した場合は計算時間が最も短く済むが、ユーザが複数のバンドと通信する CA を想定する場合や、ユーザが複数の基地局と通信する CoMP を想定する場合には、その分計算時間が必要になる。このように、ユーザが周辺の複数の基地局や複数の無線リソースと通信する可能性がある場合には、設計エリア内の全てのユーザを無線リソースの割り当て候補（スケジューリング対象候補）にすることは、計算時間がかかり過ぎて非効率である。そのため、無線リソース毎に通信する可能性のあるユーザ（スケジューリング対象候補）を予め絞り込むと良い。具体的には、受信信号電力や SINR に閾値を設けて、明らかにその無線リソースを利用しないと予想されるユーザをスケジューリング対象候補から除外するようにする。

#### 4.1.4. パターン探索における評価指標

ここでは、最適パラメータ探索のための評価指標について考察する。第3章で提案した「KKT条件を用いたスループット計算手法」は、PF スケジューリングを想定しているため、PF Utility を評価指標として最大化問題を解いていた。したがって、セル設計においても、図 4.1.2-1 に記載しているように、PF Utility を評価指標として最適なパラメータを探索する方法が良いと考えられる。但し、セル設計の評価指標としては、PF Utility 以外の指標を用いることも可能である。そこで、本節では、セル設計のシミュレーション例を示しながら、評価指標の違いによる計算結果について考察を行う。以下に示す4つの評価指標について比較を行った。

- ① PF Utility
- ② 平均スループット
- ③ セル端ユーザスループット（5% CDF で定義）
- ④ Fairness

Fairness は式(40)で定義され[34]、全ユーザのスループットが等しい場合に Fairness は最大値である 1 になる。

$$F[n] = \left( \sum_{k=1}^{N_k} \tilde{R}_k[n] \right)^2 / \left( N_k \sum_{k=1}^{N_k} \tilde{R}_k[n]^2 \right) \quad (40)$$

以下にセル設計のシミュレーション例を示す。シミュレーション条件は表 2.1.1.1 とほぼ同じだがマクロセルのみが対象のため、表 4.1.4.1 に改めてシミュレーション条件を記載する。7 セル (21 セクタ) のマクロセル構成で、各基地局のバンド数は 3 としている。バンド毎のチルト角  $\theta_{3dB}$  を調整パラメータとし、初期値  $15^\circ$  に対して、11, 13, 15, 17 の 4 パターンの範囲内で最適化を行う。各バンドの送信電力は全て同じで、ユーザ数はセクタ当り 10 としている。パターン探索には貪欲法を用い、21 セクタ  $\times$  3 バンド  $\times$  4 パターンの合計 252 回の探索 (スループット計算) を行う。この探索を 2 回繰り返して、評価指標が最大となるパラメータを決定する。スループット計算には、前章で説明した「KKT 条件を用いたスループット計算手法」を用いており、フェージングは考慮していない。但し、評価指標が最大となるパラメータ (バンド毎のチルト角) を決定した後、バンド毎に独立な Flat Rayleigh fading を加えて、システムレベルシミュレーションによるスループット計算を実施している。今回は簡単のために、Flat Rayleigh fading を用いているが、マルチパスフェージングモデルを用いることも可能である。

表 4.1.4.1 シミュレーション条件

Parameters	Settings
Cell layout	7 cell sites, 3 sectors / site
Inter-site distance (ISD)	500 m (3GPP case1)
Transmission bandwidth	10 MHz
Transmission power	46 dBm
Antenna gain	14 dBi
Antenna Pattern (Horizontal)	$A_H(\varphi) = -\min \left[ 12 \left( \frac{\varphi}{\varphi_{3dB}} \right)^2, A_m \right]$ $\varphi_{3dB} = 70 \text{ degrees}, \quad A_m = 25 \text{ dB}$
Antenna Pattern (Vertical)	$A_V(\theta) = -\min \left[ 12 \left( \frac{\theta - \theta_{etilt}}{\theta_{3dB}} \right)^2, SLA_v \right]$ $\theta_{3dB} = 10, \quad SLA_v = 20 \text{ dB}$
Combining method in 3D antenna pattern	$A(\varphi, \theta) = -\min \{ - [A_H(\varphi) + A_V(\theta)], A_m \}$
Antenna tilt angle	15 degrees (3GPP case1)
Shadowing standard deviation	8 dB

Shadowing correlation	0.5 (site), 1.0 (sector)
UE distribution	10 or 30 UEs / sector Uniform distribution (4 drops)
Minimum distance	Macro-UE 35 m
Penetration loss	20 dB
Other losses	9 dB (Noise figure, Cable loss, etc.)
Carrier frequency	2 GHz
Number of antennas	Tx: 2, Rx: 2
Pathloss	$128.1 + 37.6\log(d)$ [dB] d: Distance in kilometers
Fading model	None or flat Rayleigh fading
Traffic model	Full buffer
Scheduling	Throughput-based Proportional Fairness

表 4.1.4.2 に評価指標毎のシミュレーション結果をまとめて示す。また、表 4.1.4.3 に比較手法として、最適化を行う前の初期状態（3 バンドのチルト角は全て  $15^\circ$ ）のスループット特性と、チルト角を固定した FFR のスループット特性をそれぞれ示す。チルト角を固定した FFR では、図 2.2.3.1-1 に示すセル端ユーザ用バンドのチルト角を  $13^\circ$  に、それ以外のバンドのチルト角を  $17^\circ$  に固定している。但し、送信電力は全てのバンドで同じとしている。表 4.1.4.2 で、「最適化時」と記載している結果は、フェージングを考慮しない条件で求めたスループットの値であり、全ての探索を終了した後の値である。当然ではあるが、いずれの場合でも評価指標にした数値（太字で記載）が最大になるように制御されている。「最適化後」と記載している結果は、探索終了後のパラメータを採用した後に、フェージングを考慮したシステムレベルシミュレーションを実施した結果である。PF Utility を評価指標にした場合は、平均ユーザスループット、セル端ユーザスループットの両方が良好な値になっている。平均スループットを指標とした場合は、平均ユーザスループットの結果が良く、セル端ユーザスループットを評価指標にした場合は、セル端ユーザスループットが良い結果となっている。一方、Fairness を評価指標にした場合は、平均ユーザスループットもセル端ユーザスループットもあまり良くない結果になっている。図 4.1.4-1 に、それぞれの評価指標によって得られた最適化後のスループットの累積分布を示す。この結果から、Fairness を評価指標とした場合、スループットが非常に高いユーザのスループットが特に低下していることが分かる。すなわち、ユーザ間のスループットの差を小さくすることで Fairness を向上しており、その結果として、平均ユーザスループットとセル端ユーザスループットの両方が劣化したものと考えられる。

表 4.1.4.2 評価指標毎のシミュレーション結果

評価指標	最適化時の PF Utility	最適化時の平均ユーザスループット (kbps)	最適化時のセル端ユーザスループット (kbps)	最適化時の Fairness	最適化後の平均ユーザスループット (kbps)	最適化後のセル端ユーザスループット (kbps)
PF Utility	<b>5.208</b>	2397.8	342.8	0.585	3075.9	631.2
平均スループット	5.131	<b>2524.1</b>	251.2	0.496	3091.2	497.8
セル端ユーザスループット	5.055	2043.7	<b>415.2</b>	0.556	2724.6	633.0
Fairness	5.085	2004.6	303.4	<b>0.669</b>	2712.5	567.8

表 4.1.4.3 比較手法のスループット特性

比較手法	PF Utility (fading なし)	平均ユーザスループット (kbps) (fading なし)	セル端ユーザスループット (kbps) (fading なし)	Fairness (fading なし)	平均ユーザスループット (kbps) (fading あり)	セル端ユーザスループット (kbps) (fading あり)
初期状態 15°	4.981	1899.1	328.1	0.565	2896.5	748.3
固定 FFR 13°, 17°	5.291	2497.9	575.1	0.551	3195.7	982.9

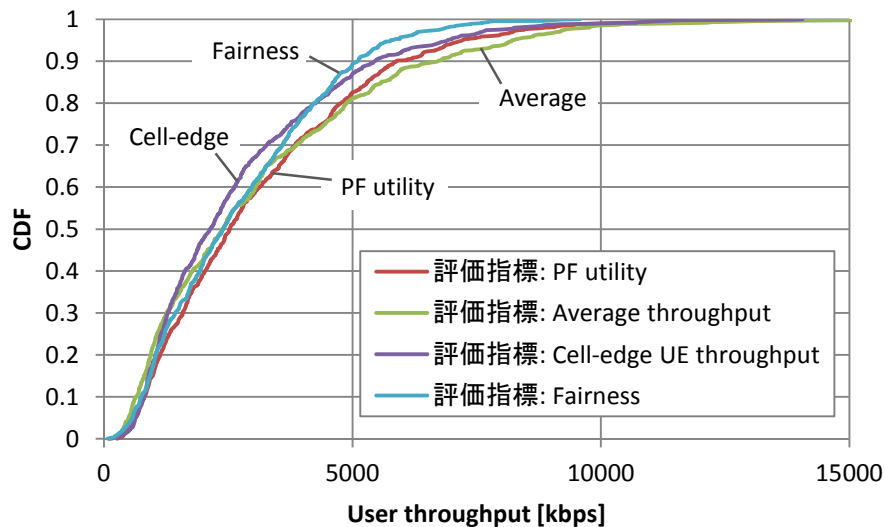


図 4.1.4-1 評価指標毎のスループットの累積分布

表 4.1.4.2 の結果を表 4.1.4.3 と比較すると、PF Utility を評価指標とした貪欲法によるパターン探索によって、初期状態に比べて、セル端ユーザスループットが若干下がっているものの、平均ユーザスループットが大きく向上していることが分かる。但し、FFR の原理に基づいてチルト角を設定する固定 FFR に比べると、PF Utility を評価指標とした場合の値が若干小さいことから、貪欲法では必ずしも最適解が得られていないことも分かる。



## 4.2. 適用例 2：集中制御型三次元ビームスイッチング

FFR などの従来のセル間干渉制御技術は、セル端ユーザのスループットを向上することが主目的であり、そのためセル平均のスループットが犠牲になることがあった。本節では、第 3 章で提案した「KKT 条件を用いたスループット計算手法」のシステム運用中のセル間干渉制御への適用例として、集中制御局を用いてバンド毎にアンテナの指向性を切り替える「集中制御型三次元ビームスイッチング」について検討する[35]。この方法は、セル間干渉を考慮しながらアンテナの指向性を制御することで、セル端ユーザスループットとともに、平均ユーザスループットの大幅な向上を目指している。以下に、「集中制御型三次元ビームスイッチング」について詳しく説明する。

### 4.2.1. 集中制御型三次元ビームスイッチング検討の背景

データトラフィックの増加に対応するため、今後の移動通信では、通信システムの大容量化が求められている。大容量化には大きく 3 つの方法がある。一つ目は「周波数利用効率の向上」で、これには多値変調などの新しい変復調技術や MIMO の多重数の増加などの方法が考えられる。二つ目は「広帯域化」であり、これは移動通信に割り当てる周波数帯域幅を増やすことを意味する。現在は UHF 帯の周波数が移動通信に使われているが、今後は SHF 帯や EHF 帯などの高い周波数が移動通信でも使われるようになると予想される。三つ目は「小セル化」であり、ユーザの密度が高く、多くのトラフィックが発生するエリアの大容量化には、最も簡単で確実な方法である。しかしながら、単に ISD を小さくして基地局の設置密度を上げて、セル間干渉が熱雑音よりも支配的な干渉リミテッドな状態になると SINR は向上しなくなる。このことは、ISD=1,732m の 1 セル繰り返しの SINR 分布 (図 2.1.2-2) と、ISD=500m の 1 セル繰り返しの SINR 分布 (図 2.1.2-3) を比較すると分かる。また、小セル化によって基地局のカバーエリアが狭くなった分だけ単位面積当りの容量は増大するが、セル境界ではスループットが低いエリアが必ず発生する問題もある。そのため、小セル化が進む今後も、セル間干渉制御技術は重要な役割を担うと考えられる。

FFR などの従来のセル間干渉制御技術については、本論文でも解説しているが、セル端ユーザスループットは改善するものの、平均ユーザスループットの向上はあまり見込めない。今後、小セル化を進めるにあたっては、セル境界でのスループットの低下を解消すると同時に、平均的なスループットを向上させることで大容量化を実現することが求められる。本論文では、そのための新しいセル間干渉制御技術として、幅の狭い三次元指向性ビームを用いることで、セル端ユーザスループットだけでなく、平均スループットの大幅な向上を目指している。

#### 4.2.2. 集中制御型三次元ビームスイッチングの概要

集中制御型三次元ビームスイッチング（以降、提案 ICIC）では、バンド毎にそれぞれ独立の指向性を持つビームを割り当てる。アンテナの指向性は、集中制御によってセル間干渉を考慮して決定される。一般的に用いられるビームフォーミングやビームスイッチングと呼ばれる方法は、個々のユーザの受信電力または受信 SINR が高くなるようにアンテナの指向性を決定するが、このようなユーザ個別の制御では、他セルへの影響も同時に変わってしまうため、セル間干渉を制御することはできない。提案 ICIC は、ユーザ個別の制御ではなく、集中制御によりバンド毎にアンテナの指向性を決定することで、セル間干渉の制御を可能にする。提案 ICIC では、幅の狭いビームを固定的に用いることになるが、バンド毎の複数のビームを用いることで、セクタエリア内のカバレッジを確保する。さらに、提案 ICIC では、幅の狭いビームを用いる特徴を生かして、1つのバンドに複数のビームを割り当てる方法も検討する。これにより、従来の FFR の課題であった平均スループットを大幅に向上させると同時にセル端ユーザスループットを向上させることを目指す。なお、1つのバンドに複数のビームを割り当てる場合、割り当てたビーム間でも干渉が発生する。そのため、本論文では、割り当てるビーム数は最大2とし、最適化の評価基準である PF Utility が改善しない場合（逆に劣化している場合）は、複数のビーム割り当てを行わないことにしている。

LTE-Advanced では、2.1.4 節で説明したように、HetNet のスモールセル構成が用いられる。HetNet では、制御情報（C-plane）をマクロセルから送信し、データ情報（U-plane）をスモールセルから送信する C/U 分離（C-plane/U-plane split）と呼ばれる送信方法も検討されている。提案 ICIC では、幅の狭いビームをスモールセルに置き換え、データ情報を幅の狭いビームから送信し、制御情報を従来のセクタアンテナから送信する C/U 分離の送信方法を想定している。

提案 ICIC では、集中制御に必要な情報を集中制御局で収集する。収集するのは各端末における受信電力値であり、端末周辺の基地局のバンド毎・ビーム毎の受信電力が必要となる。集中制御局では、収集した受信電力情報をもとに、式(1)を用いてアンテナの指向性を変更した場合の各端末の受信 SINR を計算する。そして、計算した SINR を式(2)に代入することで、スケジューリング割り当てが行われた場合の瞬時スループットを計算する。さらに、第3章で提案した「KKT 条件を用いたスループット計算手法」を用いて、各ユーザが得られるスループットを計算する。集中制御の対象となる全ての基地局のバンド毎のアンテナ指向性は、4.1.2 節で説明した「スループットを指標としたセル設計」と同じ手法を用いて、評価指標が最大となるパターンを探索する。アンテナ指向性はユーザ分布によって最適なパターンが変化するため、提案 ICIC ではアンテナ指向性を定期的にアップデートするように、通信システムの運用中の最適化が必要になる。

集中制御局で、受信電力情報を収集するには3つの方法が考えられる。1つ目は、各端末が測定した下りリンクの受信電力値を上りリンクの伝送チャネルを用いて基地局にフィードバックする方法である。この方法は最も確実な方法であるが、フィードバックする情報量が多い場合やフィードバックの周期が短い場合に、上りリンクの伝送帯域を多く消費してしまう問題がある。

この方法は、上りリンクと下りリンクで異なる周波数を使う Frequency Division Duplex (FDD) 方式において適用する方法である。2つ目は、基地局が端末からの上りリンクの受信電力を測定することで下りリンクの受信電力を推定する方法である。この方法は、上りリンクと下りリンクで同じ周波数を使う Time Division Duplex (TDD) 方式を用いる場合に有効な方法である。3つ目は、端末の測位情報をもとに、基地局と端末の間の伝搬損失を伝搬シミュレーションによって計算して求める方法である。測位には、端末に搭載される Global Positioning System (GPS) を用いる方法や、基地局での各種測位技術を使う方法が考えられる。伝搬シミュレーションには、地形や建物の三次元的な情報をもとに、レイトレースなどを用いて計算する方法がある。この方法は、受信電力の推定精度に課題があるが、ユーザ分布に対応した大まかな無線パラメータ制御が目的であれば十分に活用できる方法と考えられる。なお、本論文では、セル間干渉制御技術の方式的な検討を行うため、受信電力情報は理想的に得られることを仮定している。但し、提案 ICIC の実用性検討の一つとして、受信電力をフィードバックする基地局を制限した場合の特性についても考察している。

#### 4.2.3. シミュレーションモデル

提案 ICIC の効果を検証するためのシミュレーションモデルについて説明する。図 4.2.3-1 に提案 ICIC のシステム構成を示す。7セル×3セクタの合計 21セクタのセル構成で、Wrap around のセルモデルを用いている。そのため、21セルが全て集中制御されており、集中制御対象セルと非対象セルの境界が存在しない理想的な条件となっている。制御非対象セルが存在した場合の影響については、提案 ICIC の実用性検討の項目として考察を行う。図 4.2.3-1 は、ユーザ端末で測定した情報をフィードバックする例を示している。ユーザは周辺の基地局の受信電力を測定し、接続する基地局にフィードバックする。フィードバックされた受信電力情報は、ネットワークを介して集中制御局に集められる。図 4.2.3-2 に三次元ビームスイッチングの構成を示す。提案 ICIC では、バンド毎に複数のビームが用意され、スイッチによって切り替えられるため、ユーザは全てのバンドの全てのビームの受信電力を測定してフィードバックする。そのため、同一バンドの異なるビームから直交したリファレンス信号が送信されることを仮定している。リファレンス信号を直交させるには、周波数、時間、直交コードなどで多重する方法があるが、ここでは受信電力は理想的に推定できることを仮定する。

表 4.2.3.1 に、提案 ICIC の効果検証に用いたシミュレーション条件を示す。通常のセクタアンテナでは水平方向に半値幅  $70^\circ$  程度のビームを用いるが、提案 ICIC では水平方向に半値幅が  $70^\circ$  以下のビームを用いる。表 4.2.3.1 にアンテナパターンの式を記載しており、水平方向のビームの半値幅は  $\varphi_{3dB}$  で表され、垂直方向ビームの半値幅は  $\theta_{3dB}$  で表される。ここで、 $\varphi_{3dB}$  はパラメータで  $10\sim 70^\circ$  の範囲で可変とし、 $\theta_{3dB}$  は  $10^\circ$  に固定している。

水平方向のビームの向きは、セクタの正面を  $0^\circ$  とした角度  $\varphi_{azimuth}$  で表される。また、垂直方向のビーム角度 (チルト角) は、地面と水平の角度を  $0^\circ$  とし、水平から下向きに増加する角度  $\theta_{tilt}$  で表される。提案 ICIC では、水平方向に 9 ステップ、垂直方向に 4 ステップの合計 36 種

類の指向性パターンを仮定する。具体的には、 $\varphi_{azimuth}$ は $-53.3, -40, -26.7, -13.3, 0, 13.3, 26.7, 40, 53.3^\circ$ の9ステップ、 $\theta_{tilt}$ は $11, 13, 15, 17^\circ$ の4ステップとした。 $\varphi_{azimuth}$ は、 $-60\sim+60^\circ$ のセクタ全体をカバーするためのパラメータ例である。 $\theta_{tilt}$ は、ISD=500mの推奨値 $15^\circ$ (文献[2]より)を含めた4ステップとしている。指向性のパターン数が多いほどきめ細かい制御ができるが、各ビームから送信するリファレンス信号の増加、端末で測定する情報の増加、端末からのフィードバック量の増加、組み合わせパターン探索数の増加などを考慮すると、ステップ数をあまり多く設定することはできない。なお、本論文では、制御するビームのゲイン(最大ゲインおよびサイドローブレベル)を水平方向のビーム幅 $\varphi_{3dB}$ に依存せずと同じ値としている。これは、水平方向のビーム幅 $\varphi_{3dB}$ を全ての基地局、全てのバンドで共通のパラメータとしているため、今回のように干渉リミテッドなシミュレーション条件ではビームのゲインをビーム幅に応じて調整しても結果が大きく変わらないためである。また、ビーム幅に応じてゲインを調整してしまうと、ビーム幅だけの影響を判断できないこともビームの最大ゲインを固定にした理由である。

マルチパスモデルは、基地局のビーム幅の影響を考察するため、基地局アンテナでの水平方向の角度分布のみを考慮するモデルを用いた。文献[36]から、基地局アンテナにおけるマルチパスの角度分布をラプラス分布と仮定し、その角度広がり標準偏差 $5^\circ$ とした。そのため、基地局から放射され端末に到達するマルチパスの数を5とし、それぞれの基地局からの放射角度をラプラス分布で生成した。この時、基地局と端末の組み合わせ毎に独立な5パスの放射角を設定した。また、5パスの電力は全て等しいとし、総送信電力を5等分してから、パス毎の電力にアンテナの指向性利得を乗算した。

アンテナ指向性の最適化は、各ユーザからフィードバックされる受信電力情報をもとに行うためフェージング変動は考慮されない。但し、最適化後のスループット特性の計算では、フェージングを考慮したシステムレベルシミュレーションを用いている。本論文では、集中制御によるアンテナ指向性制御の効果を検証することが目的であるため、システムレベルシミュレーションに用いるフェージングには、バンド毎、タイムスロット毎、パス毎に独立なRayleigh fadingを仮定しており、時間領域や周波数領域の選択性フェージングは考慮していない。

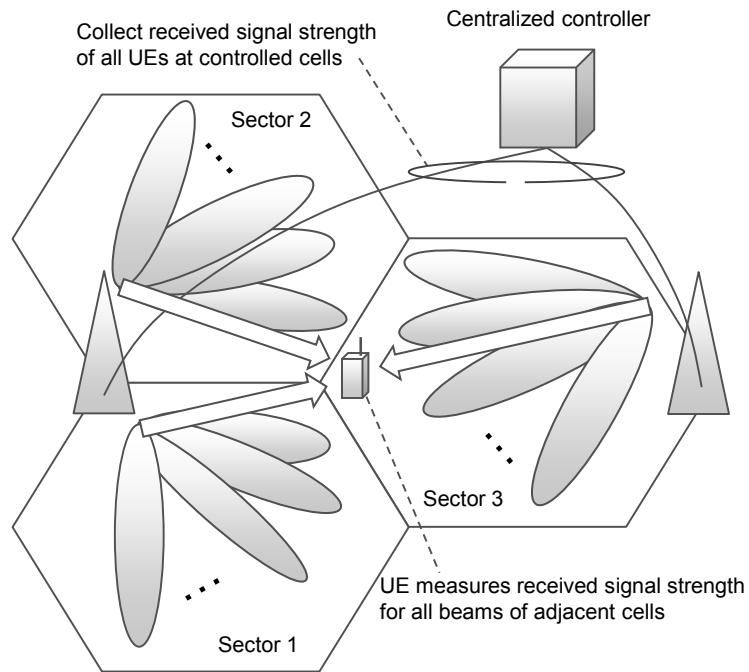


図 4.2.3-1 提案 ICIC のシステム構成

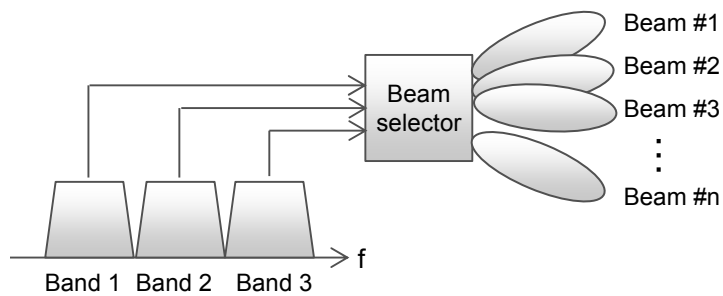


図 4.2.3-2 三次元ビームスイッチングの構成

表 4.2.3.1 シミュレーション条件

Parameters	Settings
Cell layout	3 sectors × 7 cell sites
Inter-site distance (ISD)	500 m
System bandwidth	10 MHz
Transmission power	46 dBm
Antenna gain	BS: 14 dBi, UE: 0 dBi
Shadowing standard deviation	8 dB
Shadowing correlation	0.5 (site), 1.0 (sector) Correlation distance: 50 m

UE distribution	10, 30 UEs/sector Uniform distribution (8 drops)
Minimum UE distance from BS	35 m
BS antenna pattern (horizontal)	$A_H(\varphi) = -\min \left[ 12 \left( \frac{\varphi - \varphi_{azimuth}}{\varphi_{3dB}} \right)^2, A_m \right]$ $A_m = 25 \text{ dB}$
BS antenna pattern (vertical)	$A_V(\theta) = -\min \left[ 12 \left( \frac{\theta - \theta_{tilt}}{\theta_{3dB}} \right)^2, SLA_v \right]$ $\theta_{3dB} = 10 \text{ deg.}, \quad SLA_v = 20 \text{ dB}$
BS antenna pattern (3D)	$A(\varphi, \theta) = -\min \{ -[A_H(\varphi) + A_V(\theta)], A_m \}$
UE antenna pattern	Omni directional
Antenna height	BS: 32 m, UE: 1.5 m
Penetration loss	20 dB
Noise figure	9 dB
Pathloss	$128.1 + 37.6 \log(d)$ $d: \text{Distance in kilometers}$
Multi-path angle spread at BS (horizontal)	Laplace distribution (5 paths), Standard deviation: 5 degrees
Fading model	Flat Rayleigh fading (Independent for each band)
Traffic model	Full buffer
Scheduling	Throughput-based PF

#### 4.2.4. アンテナ指向性の探索アルゴリズム

提案 ICIC の最適化アルゴリズムは、4.1 章で説明した「スループットを指標としたスモールセル設計」と同じである。ここで、提案 ICIC の処理の流れを図 4.2.4-1 を用いて説明する。最初の処理では、バンド毎のアンテナ指向性の初期値を設定する。前述したように、水平方向の角度  $\varphi_{azimuth}$  は  $-53.3, -40, -26.7, -13.3, 0, 13.3, 26.7, 40, 53.3^\circ$  の 9 ステップから、チルト角  $\theta_{tilt}$  は  $11, 13, 15, 17^\circ$  の 4 ステップから選択され、三次元の指向性が決められる。 $\theta_{tilt}$  の初期値は  $15^\circ$  とし、 $\varphi_{azimuth}$  の初期値は、各基地局に割り当てられる複数のビームがセクタ全体を均等にカバーするように決定した。本論文で用いた  $\varphi_{azimuth}$  の初期値を表 4.2.4.1 にまとめる。1 つのバンドに 2 つのビームを割り当てる場合は、2 ビーム目の初期値を用いる。なお、初期値設定後に最適化探索を行うため、初期値の選び方はさほど重要ではない。2 番目の処理では、最適化探索においてアンテナ指向性を変更する基地局とバンドを決定する。ここで、探索対象となるバンド数は、基地局当りのバンド数を  $N_{band}$  とした場合、 $N_{band} \times 21$  となる。3 番目の処理では、探索対象のバン

ドのアンテナ指向性を変更する。1つのバンドに1つのビームを割り当てる場合（「1多重時」と呼ぶ）変更ステップ数は36であり、1つのバンドに2つのビームを割り当てる場合「2多重時」の変更ステップ数は72となる。4番目の処理では、第3章で提案した「KKT条件を用いたスループット計算手法」を用いて、スケジューリング後のユーザスループットを計算する。5番目の処理では、最適化の評価指標であるPF Utilityが最大となるアンテナ指向性の組み合わせを保持する。そして、(a)のループを「1多重時」に36回、「2多重時」に72回繰り返し、(b)のループを $N_{band} \times 21$ 回繰り返すことで、PF Utilityが最大となるパラメータ（全制御対象の基地局のバンド毎のアンテナ指向性）を決定する。

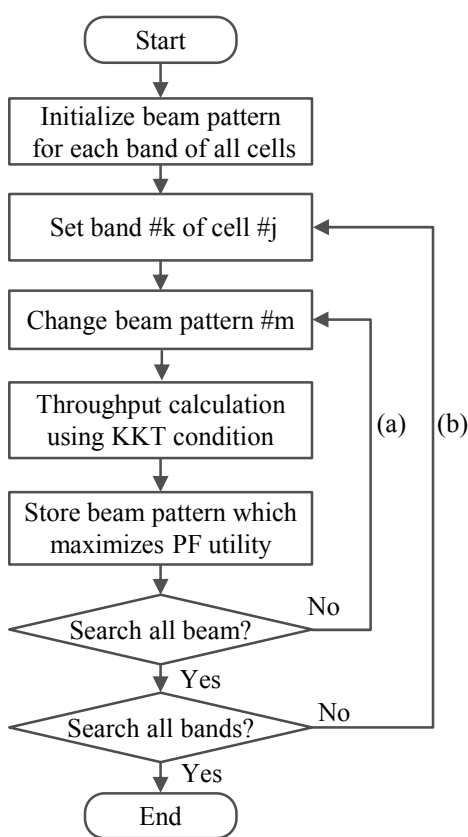


図 4.2.4-1 提案 ICIC の探索アルゴリズム

表 4.2.4.1 水平方向の角度 $\phi_{azimuth}$ の初期値

バンド数	1 ビーム目の初期値 (°)	2 ビーム目の初期値 (°)
1	0	26.7
2	-26.7, 26.7	0, 53.3
3	-26.7, 0, 40	26.7, 53.3, -26.7
4	-40, -13.3, 13.3, 40	-13.3, 13.3, 40, -53.3
5	-40, -26.7, 0, 26.7, 40	-13.3, 0, 26.7, 53.3, -53.3
6	-53.3, -26.7, -13.3, 13.3, 26.7, 53.3	-26.7, 0, 13.3, 40, 53.3, -40
7	-53.3, -26.7, -13.3, 0, 13.3, 40, 53.3	-26.7, 0, 13.3, 26.7, 40, -53.3, -40

左からバンド#0、バンド#1、バンド#2の順の初期値を表す。

2多重時は、まず図 4.2.4-1 の処理フローを用いて、各バンドに必ず2つのビームを多重した場合の最適パターンを選択する。その後、図 4.2.4-2 の追加処理フローを用いて、各バンドに割り当てられるビーム数を1に減らすかどうかを決定する。図 4.2.4-2 の2番目の処理でバンドに割り当てられた2つのビームのどちらかを OFF にし、3番目の処理で2多重を1多重に減らした場合の PF Utility を計算する。そして、4番目の処理で、2多重の場合、1多重目のビームを残した場合、2多重目のビームを残した場合の3パターンの中から PF Utility が最も大きくなるパターン決定する。ビームの半値幅が大きい場合はビーム間干渉も大きくなるため、追加処理フローの結果、1多重が選択されることが多くなる。

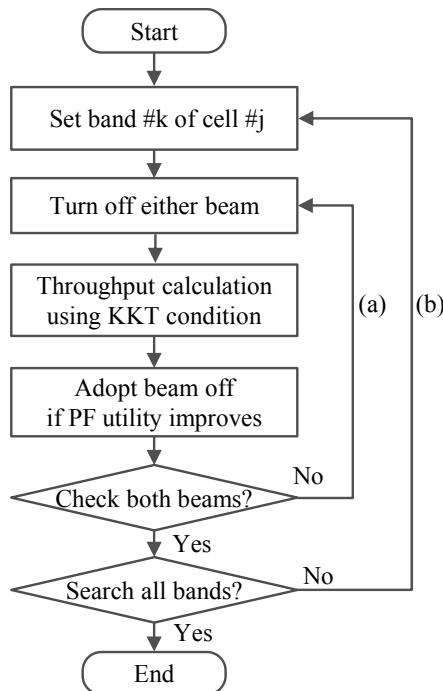


図 4.2.4-2 2多重時の追加処理フロー



#### 4.2.5. シミュレーション結果と考察

前節で説明した処理フローは探索アルゴリズムの一例ではあるが、本論文ではこの探索アルゴリズムを用いたシミュレーションによって、提案 ICIC の効果検証を実施した。以下では、提案 ICIC の基本特性として、「FFR との比較」、「バンド数の影響」、「ビーム幅の影響」、「角度広がり の影響」についてそれぞれ考察する。さらに、提案 ICIC の実用性検証として、「受信電力の測定 閾値の影響」、「端末移動の影響」、「制御非対象基地局の影響」についてもそれぞれ考察を行う。

##### 4.2.5.1. 基本特性：FFR との比較

図 4.2.5.1-1 にセクタ当り 10 ユーザの場合の、マクロセル、FFR、提案 ICIC（1 多重）、提案 ICIC（2 多重）のスループット特性をプロットする。横軸は平均ユーザスループットで、縦軸は 5%CDF で定義したセル端ユーザスループットである。また、図 4.2.5.1-2 にセクタ当り 30 ユーザの場合のスループット特性を示す。マクロセルでは、 $\varphi_{azimuth}=0^\circ$ 、 $\varphi_{3dB}=70^\circ$ 、 $\theta_{tilt}=15^\circ$  にパラメータを固定しており、全てのバンドで同じ値を用いているため、2.2.3 節で説明したようにバンド数を変えてもスループット特性は変わらない。但し、提案 ICIC に合わせてバンド数は 4 で計算している。提案 ICIC のバンド数は、少ないバンド数で十分な特性が得られるパラメータとして 4 にした。また、提案 ICIC では $\varphi_{3dB}=30^\circ$  とし、 $\varphi_{azimuth}$  と  $\theta_{tilt}$  は集中制御局でのパターン探索によって値を決定する。なお、提案 ICIC で設定するパラメータについては次節で詳しく考察する。FFR のバンド数は、図 2.2.3.1-1 で説明した構成を用いるため 3 としている。FFR では、 $\varphi_{azimuth}=0^\circ$ 、 $\varphi_{3dB}=70^\circ$  に固定しており、チルト角は、セル端ユーザを割り当てるバンドで $\theta_{tilt}=13^\circ$ 、それ以外のバンドで $\theta_{tilt}=17^\circ$  としている。また、セル端ユーザを割り当てるバンドとそれ以外のバンドの電力差は 9dB としている。なお、基地局アンテナでのマルチパスの角度広がり の標準偏差は  $5^\circ$  としている。

シミュレーション結果から、提案 ICIC では、FFR と比べても平均ユーザスループットとセル端ユーザスループットの両方でゲインが得られていることが分かる。また、1つのバンドに最大 2 ビームを割り当てる 2 多重を用いることで、さらに大きなゲインが得られている。具体的には、セクタ当り 10UE の場合、提案 ICIC（1 多重）では、マクロセルに対して、平均ユーザスループットで約 1.5 倍、セル端ユーザスループットで約 2.6 倍のゲインが得られており、提案 ICIC（2 多重）では、マクロセルに対して、平均ユーザスループットで約 2.1 倍、セル端ユーザスループットで約 3.3 倍のゲインになっている。セクタ当り 30UE の場合は、提案 ICIC（1 多重）では、マクロセルに対して、平均ユーザスループットで約 1.4 倍、セル端ユーザスループットで約 2.2 倍のゲインが得られており、提案 ICIC（2 多重）では、マクロセルに対して、平均ユーザスループットで約 2.2 倍、セル端ユーザスループットで約 3.1 倍のゲインとなっている。

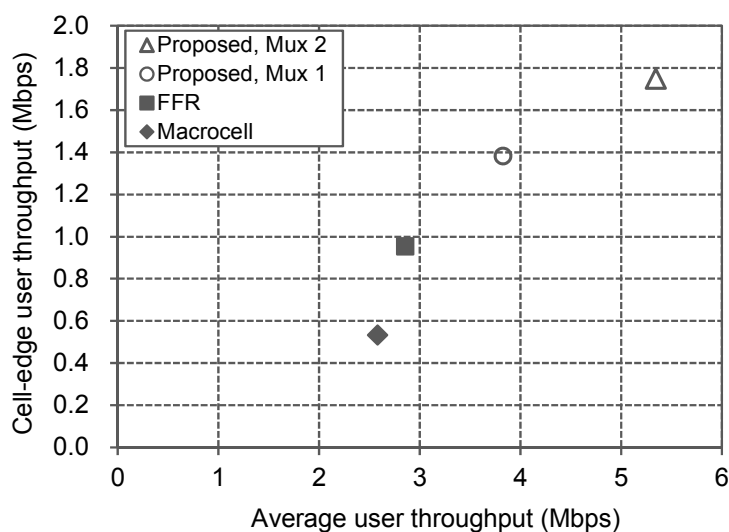


図 4.2.5.1-1 スループット特性比較 (10UE/セクタ)

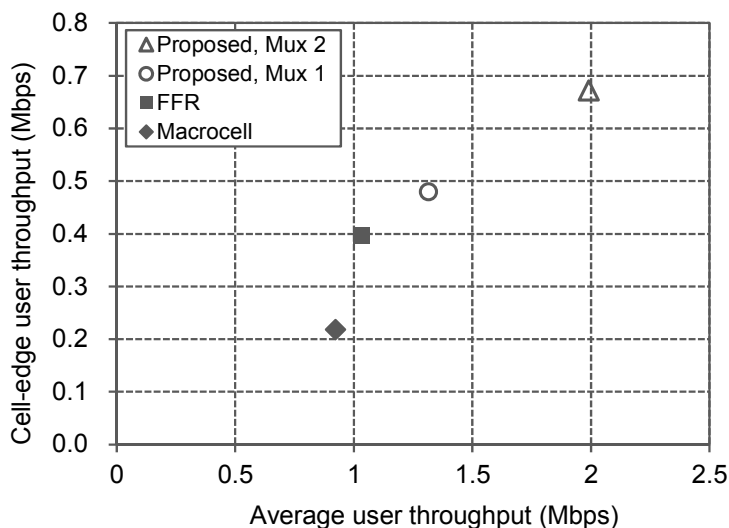


図 4.2.5.1-2 スループット特性比較 (30UE/セクタ)

#### 4.2.5.2. 基本特性：バンド数の影響

提案 ICIC において、バンド数を変えた場合のスループット特性を評価した。図 4.2.5.2-1 に平均ユーザスループットを、図 4.2.5.2-2 にセル端ユーザスループットの結果を示す。セクタ当たり 10 ユーザで、マルチパスの角度広がり標準偏差  $5^\circ$  としている。水平方向のビーム幅は  $10^\circ$  と  $30^\circ$  の 2 種類で、それぞれ 1 つのバンドに割り当てるビーム数が 1 の場合 (1 多重) と最大 2 の場合 (2 多重) をプロットしている。シミュレーション結果では、バンド数が増えるに従い、平均ユーザスループットとセル端ユーザスループットの両方が向上している。これは、水平方向のビーム幅が狭いため、バンド数が多いほどビームの数が増えて、 $120^\circ$  のセクタエリア全体をカバーできるようになるためである。セクタ内を十分カバーできるようになると、スループット特性も飽和している。シミュレーション結果から、ある程度高いスループット特性を得るために

は、ビーム幅が  $30^\circ$  の場合は 4 以上、ビーム幅が  $10^\circ$  の場合は 5 以上のバンド数が必要になることが分かる。バンド数を多くすると、集中制御に必要なフィードバック情報量や最適化の探索回数が増加するため、ある程度の特徴が得られるバンド数に留めておくことが実際には必要になる。以上の結果から、本論文では提案 ICIC のバンド数は 4 を基準とする。

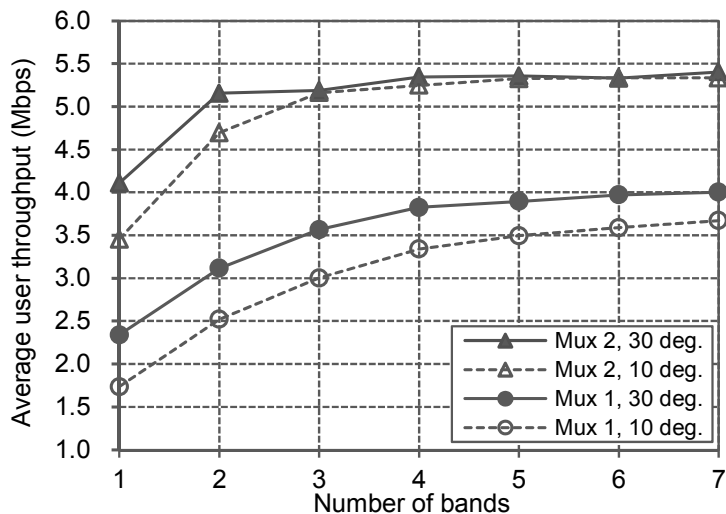


図 4.2.5.2-1 バンド数の影響 (平均ユーザスループット)

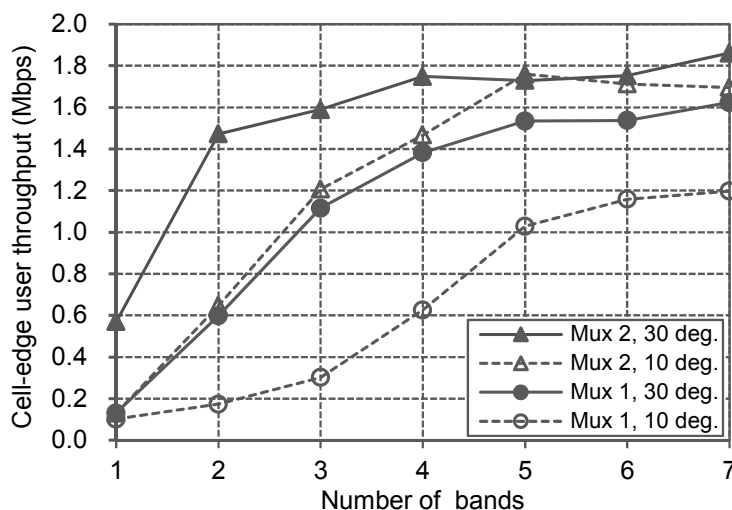


図 4.2.5.2-2 バンド数の影響 (セル端ユーザスループット)

#### 4.2.5.3. 基本特性：ビーム幅の影響

提案 ICIC において、ビーム幅を変えた場合のスループット特性を評価した。図 4.2.5.3-1 に平均ユーザスループットを、図 4.2.5.3-2 にセル端ユーザスループットの結果を示す。セクタ当たり 10 ユーザで、バンド数は 4 としている。マルチパスの角度広がり標準偏差  $5^\circ$  と  $20^\circ$  の 2 種類を計算しており、それぞれ 1 つのバンドに割り当てるビーム数が 1 の場合 (1 多重) と最大 2

の場合（2多重）をプロットしている。シミュレーション結果から、1多重の場合はバンド幅 30° のスループットが最も良くなっており、2多重の場合はバンド幅 20° のスループットが最も良くなっていることが分かる。但し、ビーム幅が 20° より狭くなると、バンド数 4 ではカバレッジが不足するため、スループット特性が急に悪くなっていることから、システムの安定動作を考慮して、本論文ではビーム幅 30° を基準とする。

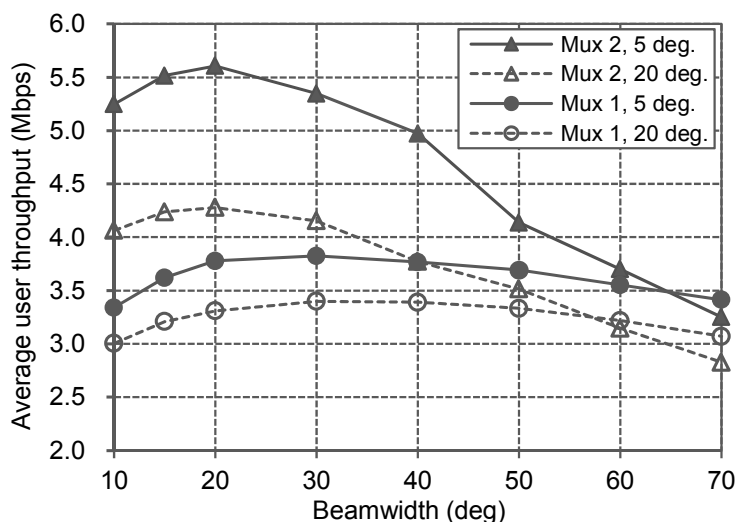


図 4.2.5.3-1 ビーム幅の影響（平均ユーザスループット）

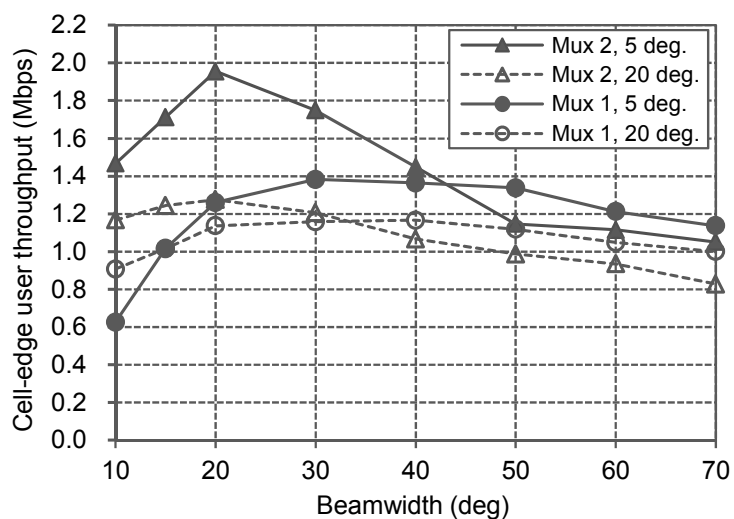


図 4.2.5.3-2 ビーム幅の影響（セル端ユーザスループット）

#### 4.2.5.4. 基本特性：角度広がりの影響

提案 ICIC において、角度広がりを変えた場合のスループット特性を評価した。図 4.2.5.4-1 に平均ユーザスループットを、図 4.2.5.4-2 にセル端ユーザスループットの結果を示す。セクタ当たり 10 ユーザで、バンド数は 4、ビーム幅は 30° としており、それぞれ 1 つのバンドに割り当て

るビーム数が1の場合（1多重）と最大2の場合（2多重）をプロットしている。比較のため、FFR の特性も合わせてプロットしている。シミュレーション結果から、角度広がりが大きくなるに従い、提案 ICIC の平均ユーザスループット、セル端ユーザスループットともに徐々に低下している。角度広がりを大きくした場合のスループット特性は、1多重よりも2多重の方が速く低下しており、角度広がりが  $30^\circ$  以上では2多重の特性と1多重の特性差が無くなっている。これは、角度広がりによって1つのバンドに割り当てた2つのビーム間の干渉が大きくなるため、角度広がりが大きくなるにつれて2多重によって PF Utility が向上することが無くなり、図 4.2.4-2 に示した追加アルゴリズムによって1多重が選択されるためである。このように提案 ICIC のスループット特性は角度広がりに応じて徐々に低下しているが、FFR のスループット特性も同様に低下している。このことは、角度広がりによらずに、提案 ICIC を適用するメリットがあることを意味している。但し、2多重による高い効果を得るためには、角度広がりが  $20^\circ$  以下の環境で利用すべきである。文献[36]では、4~6階建てのビルが立ち並ぶ屋外エリアでの角度広がりの実測結果が示されており、アンテナ高が 32m の場合に角度広がりの実測結果（中央値）が  $5^\circ$ 、アンテナ高が 20m の場合に角度広がりの実測結果（中央値）が  $10^\circ$  との結果が紹介されている。したがって、角度広がりが  $20^\circ$  以下となる環境への本技術の適用は十分期待できると言える。

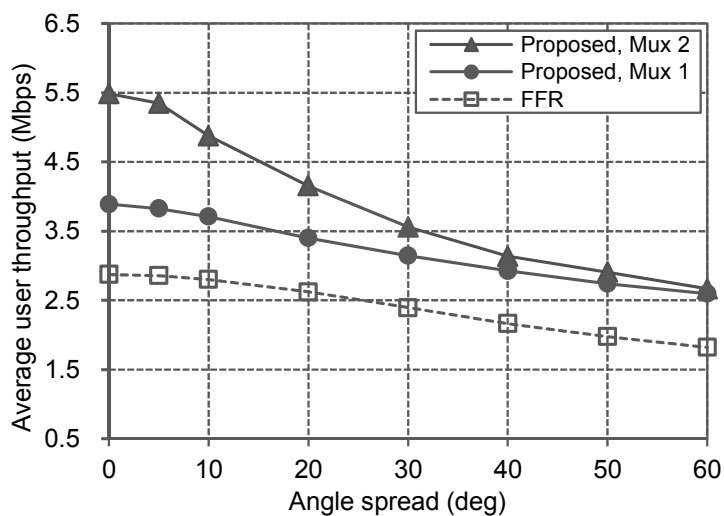


図 4.2.5.4-1 角度広がりの影響（平均ユーザスループット）

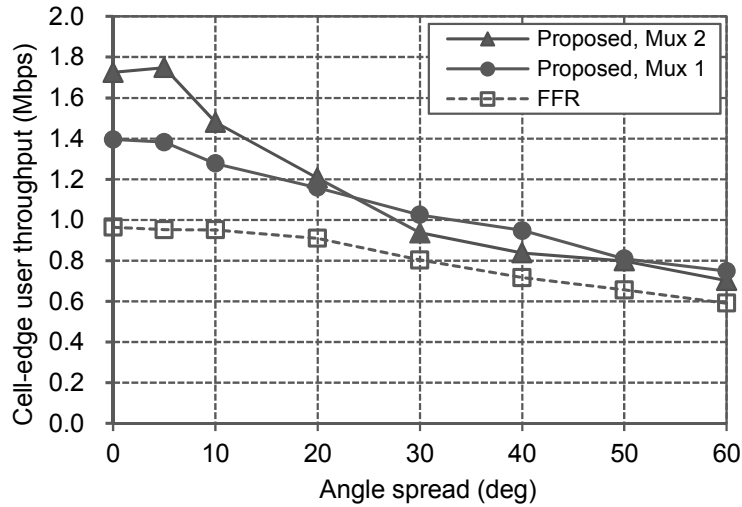


図 4.2.5.4-2 角度広がりの影響 (セル端ユーザスループット)

#### 4.2.5.5. 実用性検証：受信電力の測定閾値の影響

これまでのシミュレーションでは、端末が全ての基地局 (21 セクタ分) の受信電力を理想的に測定し、集中制御局に通知できることを仮定していた。実際には、端末が測定するのは、測定精度を確保するため、受信電力が閾値以上の基地局に制限されるであろう。また、閾値を高くして受信信号を測定する基地局数を減らすことができれば、端末の処理量やフィードバック伝送量、集中制御局での演算量の削減にもつながる。そこで、本節では、実用性検証の1つ目として、「受信電力の測定閾値」の影響について考察する。端末は、各基地局のセクタアンテナ ( $\varphi_{azimuth}=0^\circ$ 、 $\varphi_{3dB}=70^\circ$ 、 $\theta_{tilt}=15^\circ$  に固定) から送信されるリファレンス信号の平均受信電力を測定し、熱雑音レベルとの比である SNR を計算する。この SNR が「受信電力の測定閾値」以上の場合のみ、その基地局のバンド毎・ビーム毎の受信電力を測定しフィードバックする。

提案 ICIC において、受信電力の測定閾値を変えた場合のスループット特性を評価した。図 4.2.5.5-1 に平均ユーザスループット、図 4.2.5.5-2 にセル端ユーザスループットの結果を示す。セクタ当り 10 ユーザで、バンド数は 4、ビーム幅は  $30^\circ$ 、角度広がり標準偏差は  $5^\circ$  としており、それぞれ 1つのバンドに割り当てるビーム数が 1の場合 (1多重) と最大 2の場合 (2多重) をプロットしている。比較のために FFR の特性も示しているが、受信電力の測定閾値は FFR には適用されないパラメータなので点線の直線で表している。シミュレーション結果から、受信電力の測定閾値を 3dB 以下にすれば、提案 ICIC の特性が大きく劣化しないことが分かる。SNR が 3dB のレベルであれば、受信電力を高い精度で測定することが可能であり、測定精度としては問題ない。なお、シミュレーション結果を分析したところ、閾値が 3dB の場合は平均 5.8 局の受信電力が測定されており、閾値が 0dB の場合は平均 7.5 局の受信電力が測定されていた。今回用いたのは 21 セクタ (21 局) のモデルなので、端末周辺の信号レベルの高い基地局の受信電力を測定できれば、十分な特性が得られていることが分かる。

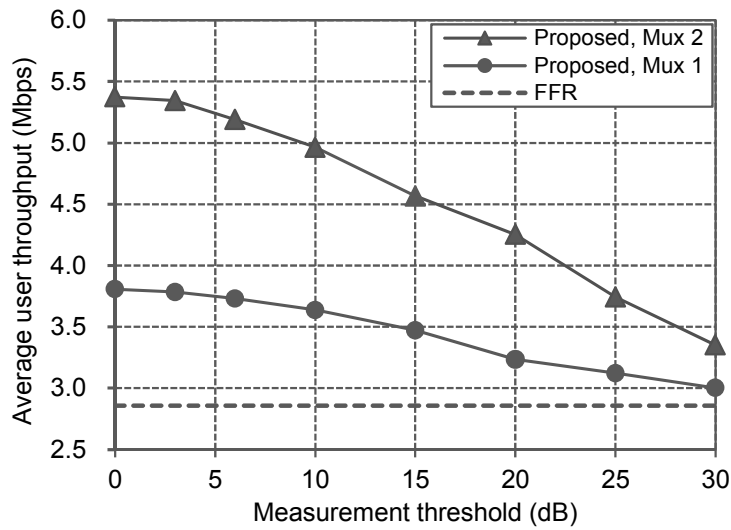


図 4.2.5.5-1 受信電力の測定閾値の影響 (平均ユーザスループット)

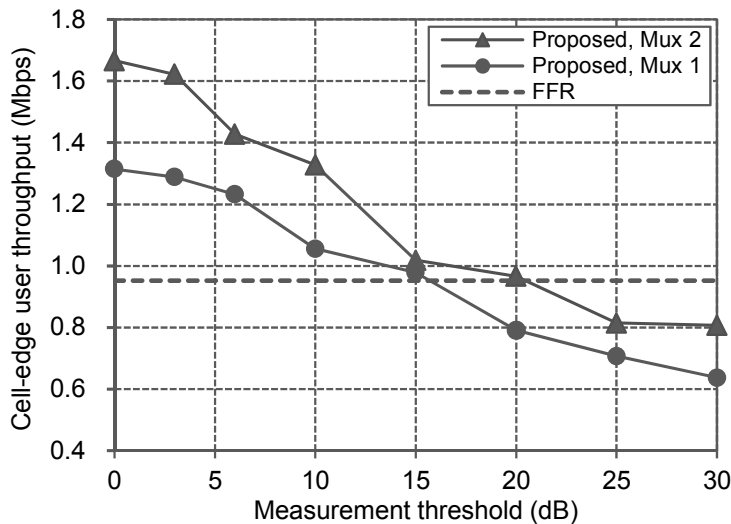


図 4.2.5.5-2 受信電力の測定閾値の影響 (セル端ユーザスループット)

#### 4.2.5.6. 実用性検証：端末移動の影響

これまでのシミュレーションは、端末の移動は考慮せずに、端末の分布をランダムに8回配置を変更して(8 drops)スループット特性を評価している。本節では、アンテナ指向性を最適化した後に端末が移動した場合のスループットの変化を調べることで、アンテナ指向性の更新周期について考察する。ここでは、アンテナ指向性の最適化後、全ての端末が一定の速度で直線的に移動するモデルを用いた。Wrap around を用いているため、端末が直線的に移動しても常に7セル(21 セクタ)のシミュレーション領域内を移動させている。端末が移動することで、端末と基地局間のパスロスとシャドウイングを変化させているが、シャドウイングは、文献[37]を参考にして、相関距離を50mとするモデルを用いてシャドウイング変動の値を計算した。移動速度は、一般的な歩行速度と言われている時速3.6kmを仮定し、システムレベルシミュレーションによ

って、タイムスロット毎に端末位置（パスロスとシャドウイング）を変えながら移動開始からの平均スループット特性を取得した。また、端末は全ての受信電力の最も大きい基地局と接続するものとし、ハンドオーバーは瞬時に理想的に行われることを仮定した。

提案 ICIC において、端末を移動させた場合のスループット特性を評価した。図 4.2.5.6-1 に平均ユーザスループットを、図 4.2.5.6-2 にセル端ユーザスループットの結果を示す。セクタ当り 10 ユーザ（初期状態）で、バンド数は 4、ビーム幅は  $30^\circ$ 、角度広がり標準偏差は  $5^\circ$ 、受信電力の測定閾値は 0dB としている。また、1つのバンドに割り当てるビーム数が 1 の場合（1多重）と最大 2 の場合（2多重）をプロットしている。比較のため、マクロセルと FFR の特性も示している。シミュレーション結果から、提案 ICIC の特性は端末の移動に伴い徐々に低下していることが分かる。特にセル端ユーザスループットが速く低下している。一方で、マクロセルと FFR のスループット特性は端末の移動に依存せず比較的安定している。これは、提案 ICIC が半値幅  $30^\circ$  の狭いビームを用いているためと考えられる。特に、集中制御によってセル間干渉を低減できていたユーザが移動した影響により、セル端ユーザスループットが速く低下したと考えられ、20m 以上移動した時点で FFR の特性よりも劣化している。平均ユーザスループットでは、セクタよりも狭いビームを用いる効果と 2 多重の効果により、移動距離が 95m になっても、FFR の特性よりも悪くなることはない。但し、セル端ユーザスループットでも、マクロセルよりも劣化することはなかった。端末の移動速度を時速 3.6km（秒速 1m）と仮定した場合、セル端ユーザスループットを FFR よりも良い特性に保つには 20 秒毎にビームパターンを更新する必要があり、平均ユーザスループットの改善を目的とするならば、遅くとも 60 秒毎にビームパターンを更新する必要があると言える。以上は、全てのユーザが歩行速度で常に移動している場合の考察であり、実際には対象とする環境に応じて、ビームパターンの更新周期を検討する必要がある。また、歩行速度以上の高速移動のユーザに対しては、データチャネルを狭いビームから送信するのではなく、従来のセクタアンテナから送信する方法も考えられる。

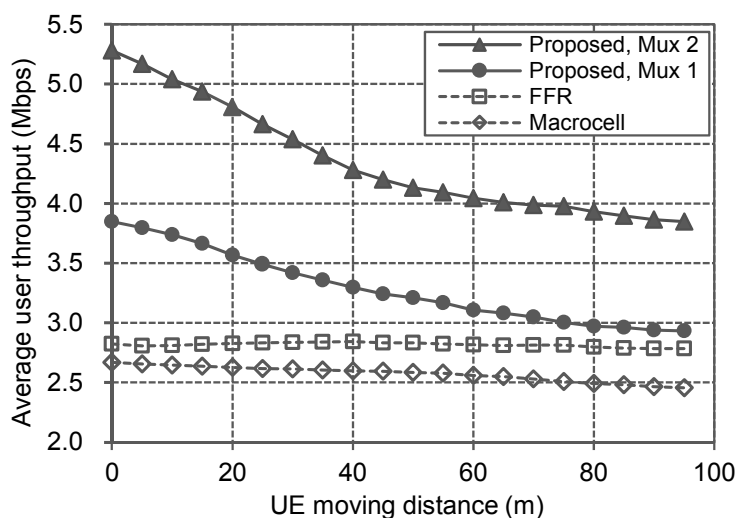


図 4.2.5.6-1 端末移動の影響（平均ユーザスループット）



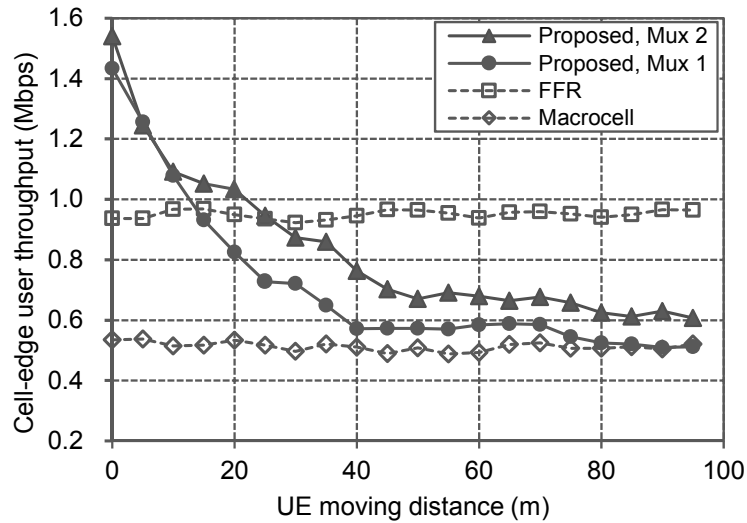


図 4.2.5.6-2 端末移動の影響（セル端ユーザスループット）

#### 4.2.5.7. 実用性検証：制御非対象基地局の影響

最後に集中制御局の制御対象とならない基地局（制御非対象基地局）が存在した場合の影響について考察する。これまでのシミュレーションは、21 セクタの Wrap around を用いておりセル間干渉をおよぼす全ての基地局が集中制御局の制御対象となっている。実際には、集中制御局が制御できる基地局数が限られるため、制御対象エリアの境界（外側）には、制御非対象基地局が存在する。また、制御対象エリア内であっても、提案 ICIC の機能を持たない基地局が設置されている場合も考えられる。集中制御の対象基地局と非対象基地局が混在する状況においては、制御対象基地局が制御非対象基地局から強い干渉を受ける場合と、逆に制御対象基地局が制御非対象基地局に強い干渉を与える場合が考えられる。この場合、集中制御局は、制御非対象基地局に隣接する制御対象基地局に対して、制御非対象基地局への干渉が大きくなるようなアンテナ指向性を設定する必要がある。また、制御対象基地局と制御非対象基地局の間で、LTE で規定されている自律制御型の干渉制御[13-14]を適用する方法も考えられる。この場合は、自律制御により推奨されるパラメータと集中制御によって設定されるパラメータの間で整合をとるなどの工夫が必要になる。本論文では、このような制御対象基地局と制御非対象基地局の混在方式を検討対象とせず、制御対象基地局と制御非対象基地局が混在した場合のスループット特性への影響のみをシミュレーションによって確認することとする。

提案 ICIC において、端末を移動させた場合のスループット特性を評価した。図 4.2.5.7-1 に平均ユーザスループットを、図 4.2.5.7-2 にセル端ユーザスループットの結果を示す。セクタ当たり 10 ユーザで、バンド数は 4、ビーム幅は 30°、角度広がり標準偏差は 5°、受信電力の測定閾値は 0dB としている。また、1つのバンドに割り当てるビーム数が 1 の場合（1多重）と最大 2 の場合（2多重）をプロットしている。シミュレーションでは 7 セル（21 セクタ）の基地局を評価モデルとしているが、7 セルの中から制御非対象となる基地局をランダムに選び、制御非対象基地局の数を増やした時のスループット特性を評価した。制御非対象の基地局は従来の半値

幅  $70^\circ$  のセクタアンテナを持つマクロセルの基地局を仮定した。シミュレーション結果には、制御対象基地局と制御非対象基地局の両方のスループット特性をプロットしている。制御非対象基地局は常に1多重であるため、制御非対象基地局（2多重）の特性は制御対象基地局を2多重にした場合の特性である。シミュレーション結果から、制御非対象基地局が混在した場合でも、制御対象基地局のスループット特性には大きく影響しないことが分かる。制御非対象基地局の数を増やした場合でも制御対象基地局の特性が劣化せずむしろ向上しているのは、制御非対象基地局を増やした分だけ制御対象基地局の数が減るため、アンテナ指向性を集中制御する際の自由度が上がったためと考えられる。一方、制御非対象基地局の特性は、制御対象基地局に2多重を適用した場合にやや劣化が見られることから、先に述べたように制御対象基地局が制御非対象基地局に強い干渉を与えないように配慮した制御が必要になることが分かる。

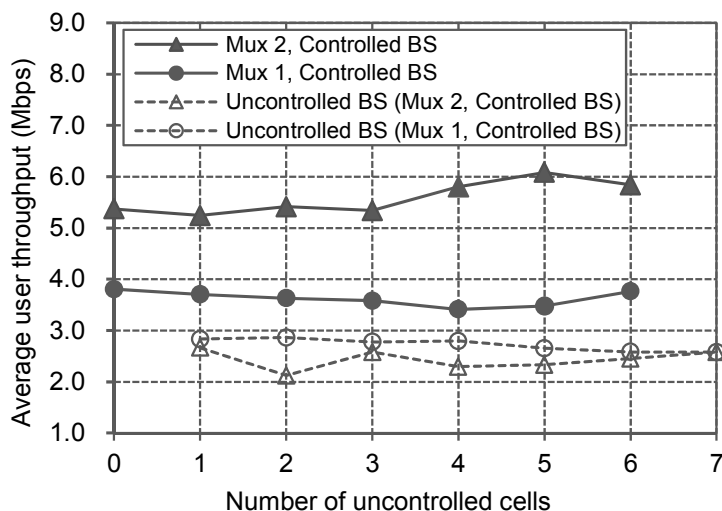


図 4.2.5.7-1 制御非対象基地局の影響（平均ユーザスループット）

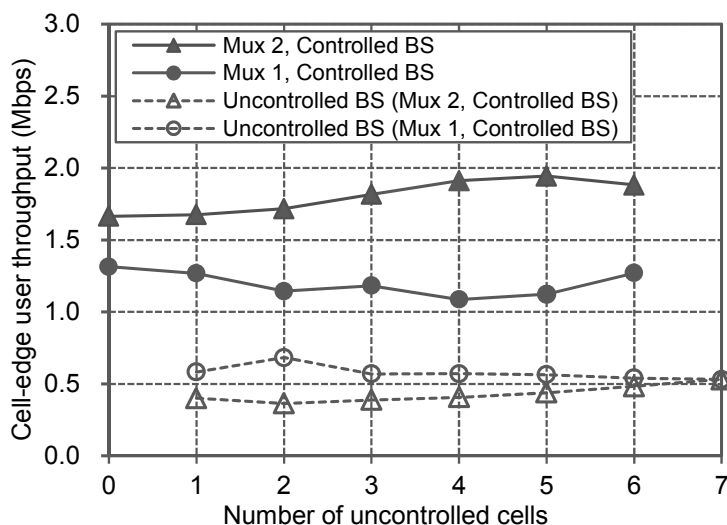


図 4.2.5.7-2 制御非対象基地局の影響（セル端ユーザスループット）

#### 4.2.6. 提案 ICIC のまとめ

提案 ICIC は、集中制御局を用いることで、基地局の複数のバンドに対して、セル間干渉を考慮したアンテナ指向性を割り当てることにより、従来の FFR のようなセル端ユーザスループットを重点的に改善するのではなく、セル端ユーザスループットに加えて平均ユーザスループットを大幅に向上する技術である。提案 ICIC では、集中制御局において最適なアンテナ指向性パターンを決定するため、各端末における周辺基地局からのバンド毎、ビーム毎の受信電力の情報を用いる。また、第 3 章で提案した、ユーザスループットを高速に計算する「KKT 条件を用いたスループット計算手法」を用い、貪欲法をベースにした探索アルゴリズムを用いてアンテナ指向性の組み合わせを決定する。

シミュレーションにより、「バンド数の影響」、「ビーム幅の影響」「角度広がり」の影響」を調査し、提案 ICIC の基本特性を取得した。提案 ICIC の代表的なパラメータとしては、セクタ当たり 4 バンド、1 つのバンドに対して水平方向の半値幅  $30^\circ$ 、垂直方向の半値幅  $10^\circ$  の指向性ビームを用いることとした。そして、1 つのバンドに最大 2 つのビームを割り当てることで、スループット特性の大幅な向上を実現できることを確認した。結果として、提案 ICIC は、マクロセルに対して、平均ユーザスループットで 2 倍以上、セル端ユーザスループットで 3 倍以上のゲインが得られることを示した。実用性検討では、「受信電力の測定閾値の影響」、「端末移動の影響」、「制御非対象基地局の影響」を調査し、特に提案 ICIC では、端末移動の影響により、セル端ユーザスループットのゲインが劣化しやすいことを確認した。したがって、提案 ICIC を実際に適用する場合は、使用環境での端末の移動速度に応じて、ビームパターンの更新周期を設定したり、ビーム幅を大きく設定したりするなどの制御が必要になる。なお、提案 ICIC は集中制御を用いることから、集中制御局に多くの情報を集約して制御することが必要になる。そのため、基地局のベースバンド処理機能が一か所に集中して設置される、Centralized-Radio Access Network (C-RAN) 型の基地局を用いる方法が実用的と考えられる。

### 4.3. 適用例 3 : C-RAN 型基地局におけるベースバンドプーリング

第 3 章で提案した「KKT 条件を用いたスループット計算手法」のシステム運用中のもう一つの適用例として、CA に対応した LTE-Advanced 基地局システムにおける Component Carrier (CC) 選択とベースバンドプーリング (Baseband pooling) について考察する[30]。以降では、この適用例を「提案 Pooling」と呼ぶことにする。

#### 4.3.1. 提案 Pooling の概要

提案 Pooling では、複数のベースバンド信号処理部 (Base Band Unit: BBU) を集約した基地局装置である Centralized-Base Band Unit (C-BBU) を用いる。BBU は、Remote Radio Head (RRH)

と呼ばれる送受信機と光ファイバーを使った高速回線を経由して接続される。C-BBU は、複数の RRH と接続することで、複数の基地局を集約した大規模基地局装置として動作する。この時、ユーザの分布によっては、全ての RRH を同時に稼働させる必要がないことから、任意の BBU と任意の RRH を接続できる構成にして、RRH の数よりも少ない BBU リソースを C-BBU 装置に実装して運用する方法が考えられる。これが、Baseband pooling と呼ばれる方法である。提案 Pooling では、「スループットを指標としたスモールセル設計」と同じ手法を用いて、RRH 毎の端末の割当率を計算することで、稼働させる RRH を選択する。すなわちセル間干渉を考慮したスループット分析によって稼働する RRH を選択する。本論文では、提案 Pooling と、従来方式として受信電力に応じて稼働する RRH を選択する方法との特性比較を行い、提案 Pooling の効果を検証する。

#### 4.3.2. シミュレーションモデル

図 4.3.2-1 に示すように、セル構成は 7 セル (21 セクタ) で、各セクタに 4 台の RRH をランダムに配置する。(以下のシミュレーションでは RRH がセクタ当たり 4 台の場合と 10 台の場合で評価を行う。) セルの中心に 1 台の C-BBU を設置し、3 セクタ分のマクロ基地局と 12 台の RRH を接続する。なお、このモデルでは、セル中心から離れた場所に設置されるスモールセルのことを RRH と呼んでいる。図 4.3.2-2 に示すように、マクロ基地局および RRH には 2 つの CC に対応する周波数バンド ( $f_1$ ,  $f_2$ ) が実装されており、各バンドには 2 本の送信アンテナが実装されている。また、本適用例でも下りリンクのみを検討対象とする。マクロ基地局と RRH の各 CC は、C-BBU においてスイッチを介して任意の BBU と接続できるものとする。ここで、マクロ基地局と RRH の全ての CC の合計数よりも、少ない数の BBU が C-BBU に実装されるものとする。図 4.3.2-3 に、マクロ基地局および RRH に対する CC 割り当てと、UE に対する CC アサインの様子を示す。BBU の数が CC の数より少ないことから、本論文では、マクロ基地局および RRH のどの CC を稼働するかを決定することを「CC 割り当て : CC allocation」と呼ぶ。また、UE は CA に対応しており、 $f_1$  と  $f_2$  のどちらか 1 つの CC を使って通信することもできるし、両方の CC を同時に使って通信することもできる。この時、マクロ基地局と RRH 間で CA を行うことも可能とする。UE は接続する C-BBU が制御する全ての CC と通信することができ、実際にどの CC を使うかは C-BBU のスケジューラが決定し UE に通知する。本論文では、このことを「CC アサイン : CC assignment」と呼ぶ。

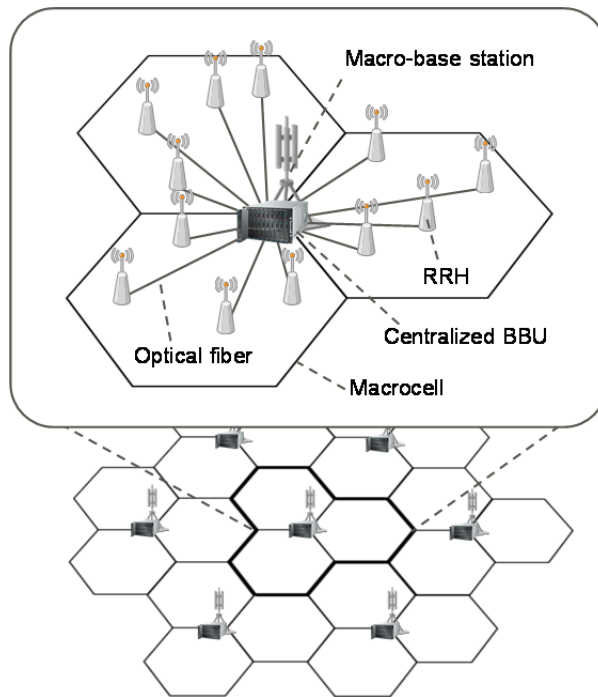


図 4.3.2-1 HetNet と C-BBU を用いたセル構成

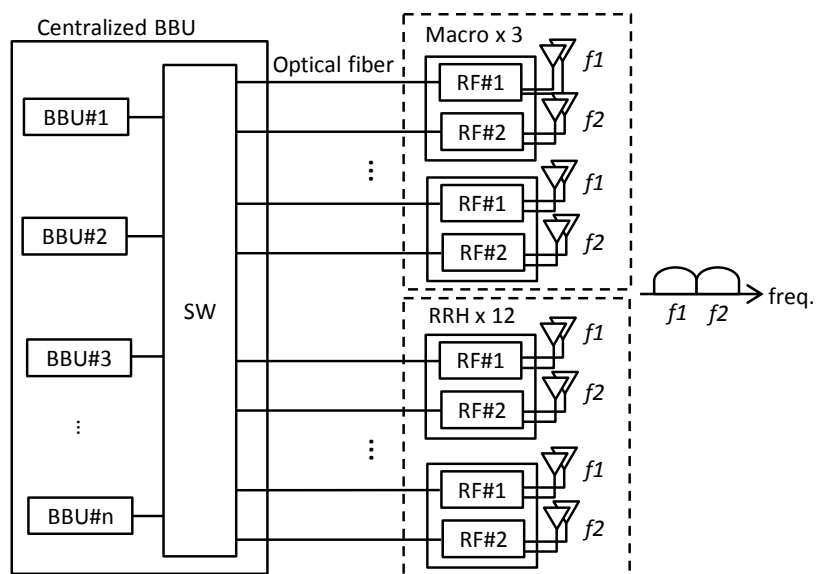


図 4.3.2-2 C-BBU とマクロ基地局および RRH の接続

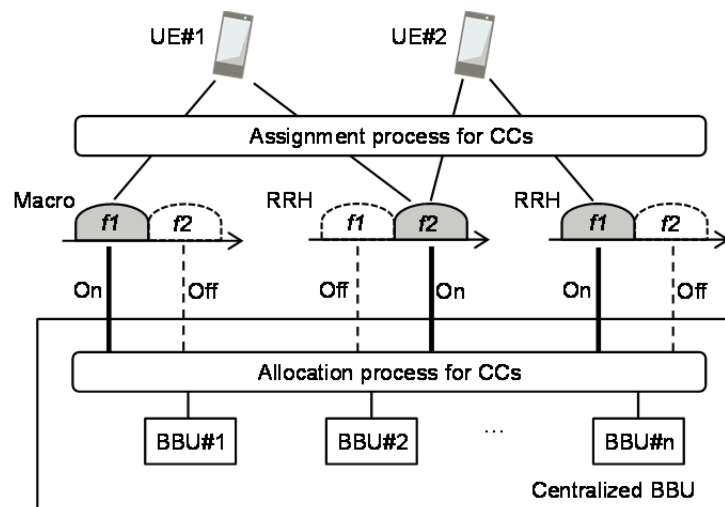


図 4.3.2-3 CC 割り当てと CC アサインの様子

表 4.3.2.1 に、提案 Pooling の評価に用いたシミュレーション条件を示す。マクロ基地局の送信電力は 46dBm、RRH の送信電力は 30dBm としている。RRH はセクタ内にランダムに配置されるが、RRH を設置するための最短距離（マクロとの距離、隣接 RRH との距離、UE との距離）が規定されている。提案 Pooling では、スループットを指標とした最適値探索によって、「CC 割り当て」と「CC アサイン」を同時に決定する。そして、決定した「CC 割り当て」と「CC アサイン」の条件を用いて、システムレベルシミュレーションによりスループット特性を評価する。なお、「CC 割り当て」と「CC アサイン」の決定は、フェージングなしの条件で行い、その後のシステムレベルシミュレーションではフェージングモデルとして EPA 5Hz のマルチパスフェージングモデルを用いる。

表 4.3.2.1 シミュレーション条件

Parameters	Settings
Cell layout	3 sectors × 7 sites 4 RRHs or 10 RRHs /sector.
Inter-site distance (ISD)	500 m
Component carriers	5 MHz × 2 CCs
Transmission power/CC	Macro: 46 dBm RRH: 30 dBm
Antenna gain	Macro: 14 dBi RRH: 5 dBi
Shadowing standard deviation	Macro: 8 dB RRH: 10 dB
Shadowing correlation	Macro: 0.5 (site), 1.0 (sector) RRH: 0.5, CC: 1.0
UE distribution	10, 20, 30, 50 UEs/sector Uniform distribution (4 drops)

Minimum distance	Macro-RRH 75 m RRH-RRH 40 m Macro-UE 35 m RRH-UE 10 m
Penetration loss	20 dB
Antenna tilt angle	Macro: 15 degree RRH: none
Carrier frequency	2 GHz
Number of antennas	Tx: 2, Rx: 2
Pathloss	Macro: $128.1 + 37.6\log(d)$ Pico: $140.7 + 36.7\log(d)$ d: Distance in kilometers
Fading model	Extended Pedestrian A ( $f_d = 5.55$ Hz)
Traffic model	Full buffer
Scheduling	Joint PF scheduling across CCs

#### 4.3.3. CC 割り当てと CC アサインの最適値探索アルゴリズム

「CC 割り当て」と「CC アサイン」の最適値探索を行うためのスループット計算には、第3章で説明した「KKT 条件を用いたスループットの計算手法」を用いる。提案 Pooling では、セクタ内に4台のRRHを設置する場合、C-BBUにはマクロ基地局3セクタ分と12台のRRHが接続するため、合計30個のCCが存在する。したがって、スループット計算手法において、 $N_m$ 個の無線リソースを30個のCCに置き換えて計算すれば良い。

次に今回用いた最適値探索のアルゴリズムについて説明する。最初にC-BBUに実装されているBBUの数を設定する。そして、初期状態としてBBUと同じ数のCCをランダムに選択してONにし、残りのCCをOFFにする。ここで、マクロ基地局のCC割り当てについては最適化の対象とせずに固定とする。本論文ではマクロ基地局はf1のCCを常にONにし、f2のCCを常にOFFにする。これにより、RRHではf2のCCがONになりやすくなるが、RRH間の干渉が大きくマクロとの干渉が小さいRRHではf1のCCがONになることも十分考えられる。

初期状態が決まったら、以下に示す3つの探索アルゴリズムを順番に適用する。

- ① 交換探索：ONのCCとOFFのCCを入れ替える
- ② OFF探索：ONのCCをOFFにする
- ③ ON探索：OFFのCCをONにする

例えば、C-BBUに実装されるBBUが12台で、RRHが12台（CCが24個）の場合、ONの状態のCCは12個でOFFの状態のCCは12個となる。この場合、①の交換探索の組み合わせは $12 \times 12$ の144通り存在し、②のOFF探索はON状態のCCの数と同じ12通りとなる。③のON探索は②でOFFとなるCCが発生し、BBUリソースが余っている場合のみ実施される。提案 Pooling

では、①～③の処理を 20 回繰り返しながら、評価指標である PF Utility が最も大きくなる CC の ON/OFF パターンを探索する。表 4.3.3.1 に、全ての組み合わせを探索する Exhaustive search と提案 Pooling の探索回数の比較を示す。Exhaustive search の探索数は、24 個の中から、0 個を選ぶ組み合わせ、1 個を選ぶ組み合わせ、・・・24 個を選ぶ組み合わせの合計値であり、二項定理から 2 の 24 乗通りの組み合わせになる。提案 Pooling の組み合わせ数は、交換探索の 144 通りと OFF 探索の 12 通りの探索を 20 回繰り返した回数となる。このように、提案 Pooling の探索数は実用的な回数に抑えられていることが分かる。

表 4.3.3.1 探索回数の比較

Search method	Number of search procedures
Exhaustive search ( $N_{CC} = 24$ )	$2^{24} = 16,777,216$
Proposed search algorithm ( $N_{CC\_ON} = 12, N_{CC\_OFF} = 12,$ Number of iterations = 20)	$(12 \times 12 + 12) \times 20 = 3,120$

探索終了後に得られた CC の ON/OFF 状態が「CC 割り当て」となる。また、その CC 割り当ての状態で行うスループット計算手法で得られる各ユーザの無線リソース割当率  $p_{k,m}$  をもとに「CC アサイン」を以下のように求める。

- $p_{k,m} > 0$  の場合、CC#m は UE#k にアサインする。
- $p_{k,m} > 0$  となる同じ周波数の CC が複数ある場合、 $p_{k,m}$  の値が最も大きい CC#m を UE#k にアサインする。
- CC#m の  $p_{k,m}$  が全て 0 の場合、CC#m の受信電力が最も大きい UE にアサインする。

「CC 割り当て」と「CC アサイン」が決まったら、システムレベルシミュレーションによって各ユーザのスループットを計算する。

#### 4.3.4. シミュレーション結果と考察

提案 Pooling によって「CC 割り当て」と「CC アサイン」を行う方法と、受信電力に基づいて「CC 割り当て」と「CC アサイン」を行う方法のスループット特性とベースバンド Pooling の効果をシミュレーションによって比較した。受信電力に基づく方法は、以下の手順で行うとした。

- ① 全ての RRH と UE の組み合わせの中から、受信電力が最も大きい RRH と UE の組み合わせを選択する。
- ② ①で選択された RRH に CC(f2)を割り当て、①で選択された UE に CC(f2)をアサインする。
- ③ ①において RRH の受信電力がマクロ基地局の受信電力よりも大きい場合、RRH に CC(f1)を割り当て、UE に CC(f1)をアサインする。



上記①～③は、C-BBU 装置に用意された BBU リソースが無くなるまで繰り返される。この割り当て方法は一例ではあるが、本論文では受信電力に基づく場合の比較方法として採用した。

図 4.3.4-1 に、セクタ当りの RRH 数が 10 で、セクタ当りの UE 数が 30 の場合のシミュレーション結果を示す。図中の PF based は提案 Pooling を意味する。図 4.3.4-2 はセクタ当りの UE 数が 20 の場合の結果である。Average は平均ユーザスループット、Median は 50%CDF のユーザスループット、Celledge は 5%CDF のセル端ユーザスループットをそれぞれ意味している。横軸の Resource usage rate は C-BBU 装置内で稼働している BBU の比率を表している。C-BBU は 3 セクタ分の RRH をコントロールするので、RRH 数がセクタ当り 10 の場合、合計 60CC が C-BBU に接続されている。例えば、C-BBU 装置内の BBU 数が 30 の場合で、30 全ての BBU が稼働している時の Resource usage rate は 0.5 と計算される。シミュレーションでは、BBU 数を 0, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48 と変えている (10RRH/セクタの場合)。但し、干渉条件によっては全ての BBU が稼働しないため、BBU 数が多くても実際の稼働数が減って Resource usage rate のプロット位置が小さい方にずれている。図 4.3.4-1 の結果から、Resource usage rate が 0.3 の場合で比較すると、提案 Pooling のスループット特性は、受信電力に基づく方法に対して、平均ユーザスループットで 22%、Median スループットで 53%、セル端ユーザスループットで 115%向上している。また、BBU プーリングでは、平均ユーザスループット 3,000kbps で評価した場合 25%、Median ユーザスループット 2,000kbps で評価した場合 45%、セル端ユーザスループット 500kbps で評価した場合 60%、BBU リソースを削減する効果が得られている。

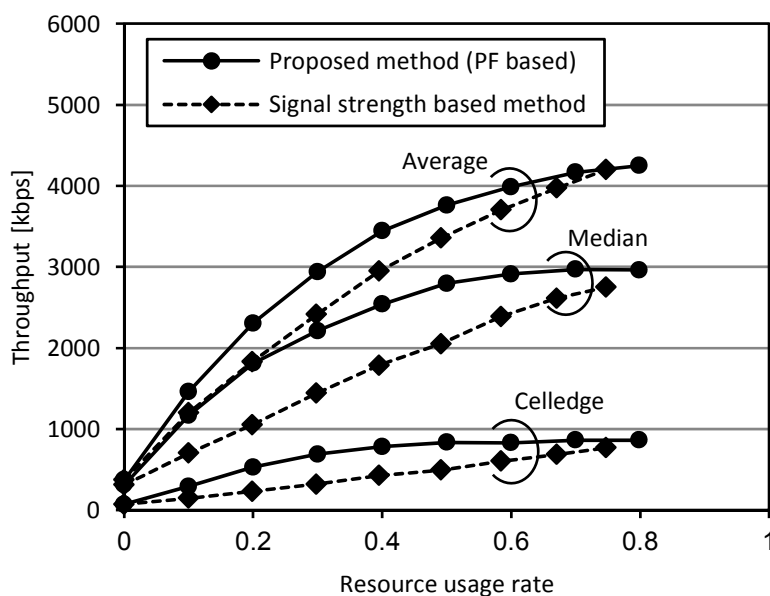


図 4.3.4-1 スループット特性比較(10 RRHs/sector、30 UEs/sector)

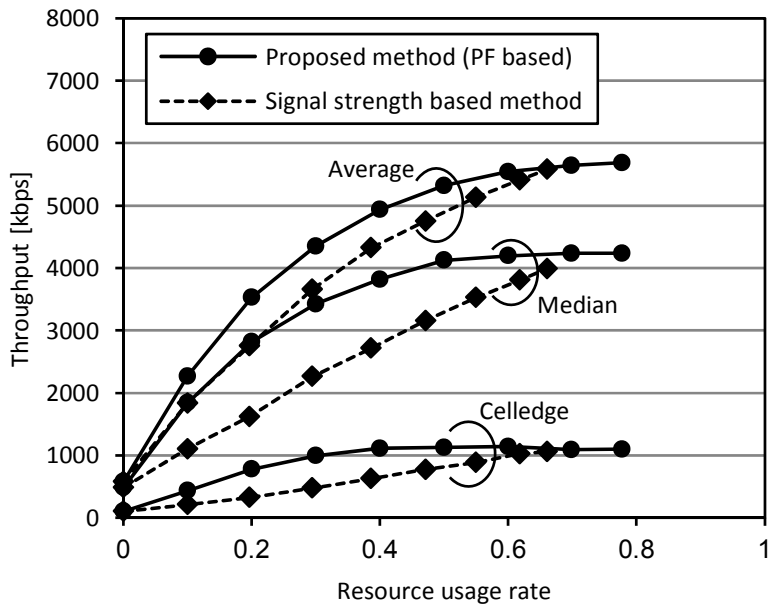


図 4.3.4-2 スループット特性比較(10 RRHs/sector、20 UEs/sector)

図 4.3.4-3 に、提案 Pooling と受信電力に基づく方法の PF Utility の比較結果を示す。PF Utility はシミュレーション後の全ユーザのスループットの値を式(29)に代入して求めている。結果から、Resource usage rate が低い場合に、提案 Pooling の PF utility が、受信電力に基づく方法に比べて大きくなっていることが分かる。提案 Pooling は SINR を考慮しているため、セル間干渉を低減し、ユーザのロードバランスに配慮した設計になっていることがこの要因と考えられる。このことを確認するため、各方式における CC 毎の Resource usage rate と CC 毎の平均アサイン UE 数を分析した。表 4.3.4.1 に Resource usage rate が 0.3 の場合の結果を、表 4.3.4.2 に Resource usage rate が 0.8 の場合の結果をまとめた。CC(f1)はマクロ基地局で使われているため、RRH では全般に CC(f2)の割当率が高くなっている。また、Resource usage rate が 0.3 場合、受信電力に基づく方法では、CC(f2)を優先的に割り当てるアルゴリズムのため、CC(f2)のアサイン UE 数が特に大きくなっており、ロードバランスがうまく取れていないことが U。

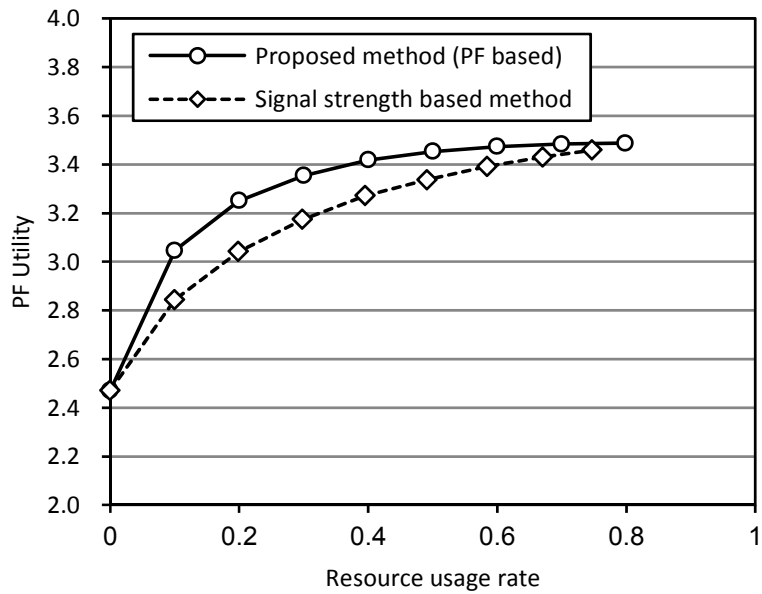


図 4.3.4-3 PF Utility の比較(10 RRHs/sector、30 UEs/sector)

表 4.3.4.1 CC 毎の割り当て率の分析 (Resource usage rate: 0.3)

Method	Resource usage rate			Average number of UEs/CC	
	CC(f1,f2)	CC(f1)	CC(f2)	CC(f1)	CC(f2)
Proposed (PF based)	0.30	0.10	0.50	3.23	5.96
Signal strength based	0.30	0.26	0.33	2.38	9.00

表 4.3.4.2 CC 毎の割り当て率の分析 (Resource usage rate: 0.8)

Method	Resource usage rate			Average number of UEs/CC	
	CC(f1,f2)	CC(f1)	CC(f2)	CC(f1)	CC(f2)
Proposed (PF based)	0.80	0.71	0.89	1.79	3.37
Signal strength based	0.79	0.64	0.94	1.79	3.18

図 4.3.4-4 に、セクタ当り 4RRH およびセクタ当り 10UE を配置した場合のシミュレーション結果を示す。C-BBU 装置には全部で 24 の CC が接続され、BBU 数を 0, 3, 6, 9, 12, 15 の条件でそれぞれプロットしている。セクタ当り 10RRH の場合に比べると 4RRH では提案 Pooling の効果がやや小さくなっている。これは、セクタ当りの RRH が減ることで、RRH 間や RRH とマクロ基地局間で生じるセル間干渉が減ったためと考えられる。

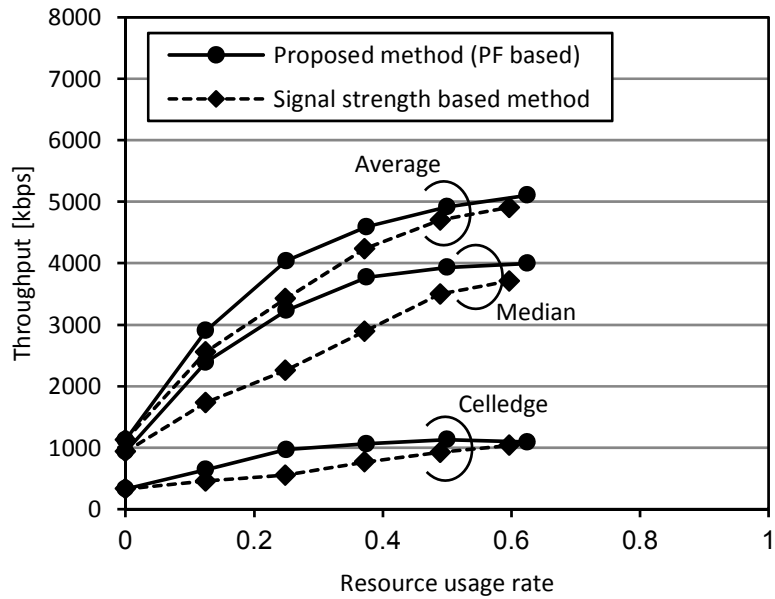


図 4.3.4-4 スループット特性比較(4 RRHs/sector、10 UEs/sector)

最後に、C-BBUが制御するエリアによるスループット特性の違いについて考察する。図 4.3.4-5では、C-BBUが3セクタ内のRRHを制御する場合(3 cell poolingと記載)と1セクタ内のRRHを制御する場合(1 cell poolingと記載)の特性比較を行った。ここでは、Poolingの効果を検証するため、セクタ#1のユーザ数を10、セクタ#2のユーザ数を30、セクタ#3のユーザ数を50と、偏りを持たせてながら周期的にユーザを配置している。シミュレーション結果では、それほど大きな差ではなかったが、予想通りC-BBUの制御エリアが広いほどスループット特性およびプーリングの効果が大きくなっていることが分かる。

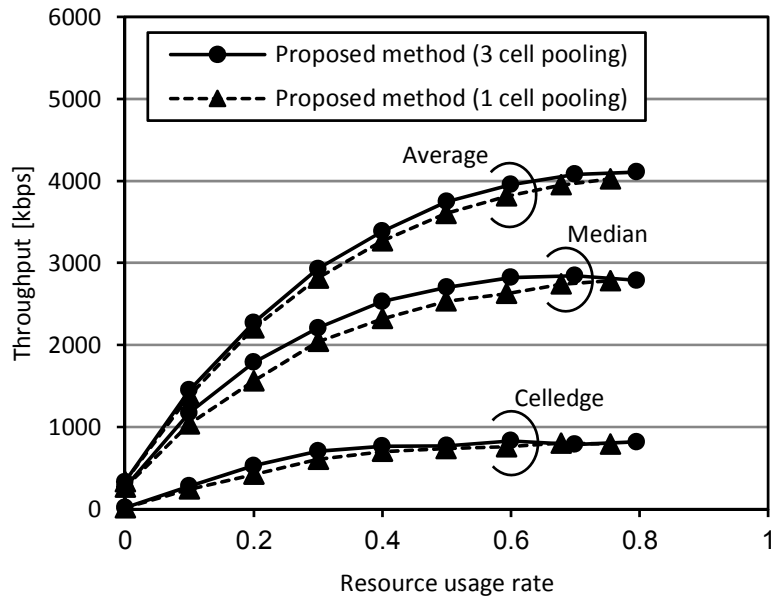


図 4.3.4-5 制御エリアの影響(10 RRHs/sector、10/30/50 UEs/sector)

#### 4.3.5. 提案 Pooling のまとめ

第3章で提案した「KKT 条件を用いたスループット計算手法」のシステム運用中の適用例として、C-RAN 型の LTE-Advanced 基地局におけるベースバンドプーリングについて検討した。ここでは、マクロセルとピコセルの HetNet 構成に加えて、端末が複数のバンドと同時送信を行う CA 機能を有することも想定しており、「KKT 条件を用いたスループット計算手法」は CA を用いるシステムにも適用可能であることを示した。本検討では、2 CC のシステムを仮定し、スモールセル (RRH) 毎に CC(f1)と CC(f2)のどちらを割り当てるか、あるいは両方割り当てるかを定める際に、4.1 章の「スループットを指標としたスモールセル設計手法」を用いた。

シミュレーション結果から、比較手法である受信電力に基づく CC 割り当てに比べて、平均ユーザスループットで約 1.2 倍、セル端ユーザスループットで約 2.2 倍向上することを確認した。ベースバンドプーリングの効果では、平均ユーザスループットを一定にした場合には約 25% のベースバンドリソースを削減でき、セル端ユーザスループットを一定にした場合には約 60% のベースバンドリソースを削減できることを確認した。

また、提案手法を用いることで、無線リソース毎に各ユーザの割り当て率を計算することができる。C-RAN 型基地局では、このユーザ割り当て率の計算結果をもとに、無線リソース毎にスケジューリング対象のユーザを制限 (「CC アサイン」に相当) することで、スケジューリングの演算量を削減することができる。特に、本検討のように、多くの CC を利用して CA 機能を用いる複雑なシステムでは、ユーザ割り当て率を予め計算できる本手法は有効である。

#### 4.4. 第4章のまとめ

本章では、第3章で提案した PF スケジューリングを想定した「KKT 条件を用いたスループット計算手法」の3つの適用例について検討を行い、スループットを指標とした「セル間干渉制御技術」の有効性および実用性を確認した。

第1の適用例では、今後の移動通信システムでは、従来の SINR ベースのセル設計に代わり、スループットを指標としたスモールセル設計が重要になるとの考察から、PF Utility が最大となるように無線パラメータの調整を行うことで、スモールセルの置局位置や送信電力、アンテナ指向性などの無線パラメータを最適化する手法を検討した。また、調整する膨大な無線パラメータの組み合わせの中から、貪欲法を用いることで、実用的な探索回数で、近似解を求める方法について検討した。

第2の適用例では、セル端ユーザスループットだけでなく、平均ユーザスループットも大幅に向上できるセル間干渉制御技術として、「集中制御型三次元ビームスイッチング」について検討した。この方法では、集中制御局を用いることで、基地局の複数のバンドに対して、セル間干渉を考慮したアンテナ指向性の最適パラメータ選択を行う。パラメータのパターン探索では、第1の適用例と同様の方法を用いている。シミュレーション結果から、「集中制御型三次元ビームスイッチング」を用いることで、従来のマクロセルに対して、平均ユーザスループットで2倍以上、セル端ユーザスループットで3倍以上のゲインが得られることを確認した。また、基本特性に加えて、実用性の検討も行い、端末の移動によってセル端ユーザスループットが劣化しやすい傾向があることを確認し、アンテナ指向性の更新周期について考察した。

第3の適用例では、「KKT 条件を用いたスループット計算手法」において無線リソース毎のユーザ割当率が求まるメリットを活用した「C-RAN 型基地局におけるベースバンドプリーング」について検討した。この方法では、ユーザ割当率をもとに決定した「CC 割り当て」により、稼働させる CC と稼働させない CC を決定することで、ベースバンドプリーングを実施する。また、ユーザ割当率をもとに決定した「CC アサイン」により、ユーザが接続する CC を絞り込むことで、スケジューリングの処理量削減が可能であることを示した。シミュレーション結果から、「C-RAN 型基地局におけるベースバンドプリーング」は、従来の受信電力に基づく CC 割り当て方法に比べて、平均ユーザスループットで約 1.2 倍に、セル端ユーザスループットで約 2.2 倍に向上することを確認した。また、ベースバンドプリーングの効果では、平均ユーザスループットを一定にした場合に約 25%、セル端ユーザスループットを一定にした場合に約 60%のベースバンドリソースを削減できることを確認した。

以上のように、第1の適用例では「KKT 条件を用いたスループット計算手法」を利用して、セル設計段階でのスループットを指標とした無線パラメータの最適化が可能なこと、第2および第3の適用例ではシステム運用中に無線パラメータの最適制御が可能なこと、をそれぞれ明らかにした。本章で紹介したスループットを指標としたセル間干渉制御技術は、セル構成や周波数割り当てが複雑になり、データ通信がサービスの中心となる第5世代移動通信を始めとする広帯域移動通信において有効となる技術と考えられる。

## 第5章 結論

本論文は、データトラフィックの増加に対応するために、セルラ移動通信システムの大容量化を実現する上で重要となるセル間干渉制御技術に関する研究成果をまとめたものである。従来のセル間干渉制御技術は、Fractional Frequency Reuse (FFR) に代表されるように、セル境界における受信信号品質 (SINR) を向上することで、セル端ユーザスループットを向上させる技術である。本研究では、今後セル構成が複雑化する第5世代移動通信を始めとする広帯域移動通信を対象とし、ユーザが複数の無線リソースを利用した結果として得られるスループットを指標とした無線パラメータの最適制御が重要になるとの考察に基づき、セルラ移動通信システムにおいてユーザスループットを決定する「スケジューリングと無線リソースへのユーザ割当率の関係」について考察した。そして、セルラ移動通信システムで一般的な Proportional Fairness (PF) スケジューリングを想定した場合のユーザスループットを高速に計算する手法を提案し、提案手法をセル設計段階およびシステム運用中に適用するセル間干渉制御技術について検討を行った。本研究の成果を各章毎にまとめると以下のようなになる。

第2章では、セル間干渉の基本的な考察として、従来のマクロセルや今後普及が見込まれるヘテロジニアスネットワーク (HetNet) における SINR とスループット分布について定量的な分析を行った。また、シングルセルおよびマルチセル環境において PF スケジューリングを実施した場合のスループットの基本特性および FFR を適用した場合のスループット特性の解析を行った。従来、FFR のように送信電力の異なる複数の無線リソースが存在する場合、各無線リソースにどのユーザを割り当てるかを予め決めた後に、そのユーザ間でスケジューリングを行う方法が一般的であったが、本章では、予め無線リソースに割り当てるユーザを決めておかなくても、スループットベースの PF スケジューリングを実施することで、無線リソース間で最適なユーザ割り当てが自動的に行われることを示した。この考察から、送信電力が異なる複数の無線リソースが存在するような複雑なセル構成においても、PF スケジューリングの解析により、無線リソース毎のユーザ割当率とユーザスループットを計算できることを確認した。

第3章では、第2章の考察に基づき、スループットベースの PF スケジューリングを想定した場合に、無線リソース毎のユーザ割当率とユーザスループットを高速に計算する手法について検討を行った。本章では、まず、PF スケジューリングの文献をもとに、PF スケジューリングが PF Utility の最大化問題を解くことと等価であることを確認した。そして、PF Utility が無線リソース毎のユーザ割当率と瞬時スループットにより求まることから、PF Utility の最大化問題を解くことで、PF スケジューリング後の無線リソース毎のユーザ割当率およびユーザスループットを算出する手法を考案した。提案手法は、PF Utility の最大化問題を KKT 条件で定式化し、その導出式を注水定理アルゴリズムで解く方法であり、従来のシステムレベルシミュレーションよりも収束が速く、セクタ当り 30 ユーザの場合、スループット計算の実行時間を 75 分の 1 程度に短縮できることを確認した。提案手法は、送信電力の異なる複数の無線リソースが存在し、端末がそれら複数の無線リソースを同時に利用するような複雑なセル構成においても適用することが可能である。なお、提案手法はフェージングなしの条件を前提とした計算方法であるが、一般的

なセル間干渉制御における無線パラメータの制御周期はそれほど速くなく、フェージングにまで追従する必要がないことから、提案手法をセル間干渉制御技術に適用することは十分可能である。

第4章では、第3章で提案した「KKT条件を用いたスループット計算手法」を用いた無線パラメータの最適化の適用例として、まず、「スループットを指標としたスモールセル設計」について検討した。「スループットを指標としたセル設計」とは、従来の受信電界強度や SINR の所要値を満たすカバレッジを最大化する設計とは異なり、調整したい無線パラメータのパターン探索を行いながら、PFスケジューリング後のユーザスループットから計算される評価指標を最大化する設計手法である。本章では、いくつかの評価指標を比較した結果、PF Utility を評価指標として用いる方法が、平均ユーザスループットとセル端ユーザスループットの両方を向上させる観点で最も優れていることを確認した。また、「スループットを指標としたセル設計」では、最適な無線パラメータの組み合わせを探索するための処理時間が課題となる。「KKT条件を用いたスループット計算手法」により、スループットの計算時間を短縮できるが、それでも調整する無線パラメータの全ての組み合わせを探索することは現実的ではない。そこで、本論文では、貪欲法をベースにした探索アルゴリズムにより、近似解を得る方法を用いている。また、第4章では、「KKT条件を用いたスループット計算手法」の適用例として、「集中制御型三次元ビームスイッチング」と「C-RAN型基地局におけるベースバンドプリーング」について考察した。「集中制御型三次元ビームスイッチング」では、集中制御局を用いることで、基地局の複数のバンドに対して、セル間干渉を考慮したアンテナ指向性制御を行うことで、セル端ユーザスループットだけでなく、平均ユーザスループットを大幅に向上できることを示した。「集中制御型三次元ビームスイッチング」では、マクロセルに対して、平均ユーザスループットで2倍以上、セル端ユーザスループットで3倍以上のゲインを得ることができた。「C-RAN型基地局におけるベースバンドプリーング」では、マクロセルとスモールセルの HetNet 構成において Carrier Aggregation (CA) を行うことを想定し、スモールセルにおける Component Carrier (CC) の割り当てと CC へのユーザ割り当てを同時に決定する。これにより、受信電力に基づく CC 割り当て方法に比べて、平均ユーザスループットで約 1.2 倍に、セル端ユーザスループットで約 2.2 倍に向上できることを確認するとともに、ベースバンドプリーングの効果としては、平均ユーザスループットを一定にした場合に約 25%、セル端ユーザスループットを一定にした場合に約 60%のベースバンドリソースを削減する効果を確認した。

以上のように、本論文は、第5世代移動通信を始めとする広帯域移動通信の実現に向けて、スループットを指標とした無線パラメータの最適制御を可能にする「KKT条件を用いたスループット計算手法」を提案し、セル間干渉制御技術への適用例においてその有効性を明らかにした。



## 謝辞

本論文を作成するにあたり、丁寧かつ熱心なご指導を賜りました、指導教員である東北大学大学院工学研究科安達文幸教授に心より感謝申し上げます。また、博士論文の審査において貴重なアドバイスを賜りました、東北大学大学院工学研究科陳強教授、並びに東北大学電気通信研究所末松憲治教授に心より感謝申し上げます。本研究を進めるにあたり、安達研究室の皆様にはゼミを通じて活発なご議論を頂きました。ここに感謝の意を表します。

そして、今回、東北大学大学院博士課程後期3年の過程において研究を行う機会を与えて下さいました株式会社富士通研究所、並びに研究に関して熱心にご議論を頂いた富士通研究所の皆様にも心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] 3GPP TR 25.814 (V7.1.0), “Physical layer aspects for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) (Release 7),” Sept. 2006.
- [2] 3GPP TR 36.814 (V9.0.0), “Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9),” Mar. 2010.
- [3] Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2013–2018, June. 2014.
- [4] 関, 箕輪, “モバイルアクセスシステムの技術動向,” 雑誌FUJITSU, vol.63, no.6, pp.681-688, 2012年11月.
- [5] A.Damjanovic, J. Montojo, Y. Wei, T. Ji, T. Luo, M. Vajapeyam, T. Yoo, O. Song, and D. Malladi, “A survey on 3GPP heterogeneous networks,” IEEE Wireless Commun. Mag., pp.10–21, June 2011.
- [6] W. Lei, W. Hai, Y. Yinghui, and Z. Fei, “Heterogeneous network in LTE-advanced system,” Proc. IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS), pp. 156–160, Nov. 2010.
- [7] F. Sallabi, A. Lakas, K. Shuaib, and M. Boulmalf, “WCDMA downlink simulator with efficient wrap-around technique,” Proc. IEEE and IFIP Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), pp.472-476, Mar. 2005.
- [8] 3GPP, TS 36.213 (V9.3.0), “Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); Physical layer procedures (Release 9),” Sept. 2010.
- [9] 森本, 三木, 奥村, “LTE-Advanced ヘテロロジーニアスネットワークにおける Cell Range Expansion を適用したときの上下リンクスループット特性評価,” 信学技報, RCS2012-129, pp.25-30, Oct. 2012.
- [10] 関, 小林, 木村, “増大するモバイルトラフィックを収容する次世代ワイヤレスネットワーク技術,” MWE2011 ワークショップ, WS14-04, 2011年12月.
- [11] J.G. Choi and S. Bahk, “Cell-Throughput Analysis of the Proportional Fair Scheduler in the Single-Cell Environment,” IEEE Trans. VT, vol.56, no.2, Mar. 2007.
- [12] Huawei, R1-050507, “Soft frequency reuse scheme for UTRAN LTE,” 3GPP RAN WG1#41, Athens, Greece, May 2005.
- [13] D. Kimura, Y. Harada, and H. Seki, “De-centralized dynamic ICIC using X2 interfaces for downlink LTE system,” Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring), May 2011.
- [14] 木村, 関, “セル間干渉制御 (ICIC) 技術,” 雑誌FUJITSU, vol.62, no.4, pp.455-460, 2011年7月.
- [15] Siemens, R1-060135, “Interference mitigation by partial frequency reuse,” 3GPP RAN WG1#42, London, UK, January 2006.
- [16] A. Simonsson, “Frequency reuse and intercell interference coordination in E-UTRA,” Vehicular Technology Conference, pp.3091-3095, April 2007.
- [17] C. Boudreau, J. Panicker, N. Guo, R. Chang, N. Wang and S. Vrzic, “Interference coordination and cancellation for 4G networks,” Communications Magazine, IEEE, vol.47, no.4, pp.74-81, April

2009.

- [18] S. H. Ali, and V. C. M. Leung, "Dynamic frequency allocation in fractional frequency reused OFDMA networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.9, no.8, pp.4286-4295, Aug. 2009.
- [19] M. Rahman, and H. Yanikomeroglu, "Enhancing cell-edge performance: a downlink dynamic interference avoidance scheme with inter-cell coordination," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.9, no.4, pp.1414-1425, April 2010.
- [20] C. Sankaran, F. Wang, and A. Ghosh, "Performance of frequency selective scheduling and fractional frequency reuse schemes for WIMAX," in *proc. IEEE VTC2009-Spring*, April 2009.
- [21] 羽嶋, 樋口, "上りリンク SC-FDMA における他セル干渉の影響を考慮したプロポーショナルフェア型スケジューリング法の一検討," 2008 信学総大, B-5-48, Mar. 2008.
- [22] 新, 平田, 樋口, "上りリンク直交 FDMA アクセスにおける他セル干渉の影響を考慮したプロポーショナルフェア型スケジューリング法の特性評価," 2009 信学総大, B-5-28, Mar. 2009.
- [23] 平田, 樋口, "下りリンク OFDMA における他セル干渉の影響を考慮したプロポーショナルフェア型スケジューリング法の特性評価," 2009 信学会東京支部学生会研究発表会, 講演番号:89, 2009.
- [24] P. Kelly, "Changing and rate control for elastic traffic," *Eur. Trans. Telecommun.*, vol.8, pp.33-37, 1997.
- [25] A. Jalali, R. Padovani, and R. Pankaj, "Data throughput of CDMA-HDR a high efficiency-high data rate personal communication wireless system," in *Proc. IEEE VTC2000-Spring*, May 2000.
- [26] Nortel Networks, "Nortel Networks' reference simulation methodology for the performance evaluation of OFDM/WCDMA in UTRAN," R1-030785, 3GPP TSG RAN WG1#33, August 2003.
- [27] Y. Wang, K. Pedersen, T. Sorensen, and P. Mogensen, "Carrier load balancing and packet scheduling for multi-carrier systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.9, pp.1780-1789, May 2010.
- [28] H. Kushner and P. Whiting, "Convergence of proportional-fair sharing algorithms under general conditions," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.3, pp.1250-1259, July 2004.
- [29] S. Boyd and L. Vandenberghe, "Convex optimization," Cambridge University Press, 2004.
- [30] H. Seki, T. Kobayashi, and D. Kimura, "Selection of component carriers using centralized baseband pooling for LTE-advanced heterogeneous networks," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E96-B, no.6, pp.1288-1296, June 2013.
- [31] 関, "超高速ブロードバンドサービスを提供するヘテロジニアスネットワーク," 2012 信学総大, BP-2-6, Mar. 2012.
- [32] 関, 小林, 木村, "LTE/LTE-Advanced ヘテロジニアスネットワークにおけるスモールセル設計手法," 信学技報, RCS2013-25, pp.19-24, May 2013.
- [33] 大山, 関, "LTE-Advanced ヘテロジニアスネットワークにおける協調送信を考慮したスモールセル設計手法," 信学技報, SR2014-80, pp.123-129, Oct. 2014.
- [34] M. H. Ahmed, H. Yanikomeroglu and S. Mahmoud, "Fairness enhancement of link adaptation

- techniques in wireless access networks,” Proc. IEEE VTC2003-Fall, vol.3, pp.1554-1557, Oct. 2003.
- [35] H. Seki and F. Adachi, “Centralized inter-cell interference coordination using multi-band 3D beam-switching in cellular networks,” IEICE Trans. Commun., conditional acceptance.
- [36] K. I. Pedersen, P. E. Mogensen, and B. H. Fleury, “A stochastic model of the temporal and azimuthal dispersion seen at the base station in outdoor propagation environments,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol.49, no.2, pp.437-447, Mar. 2000.
- [37] IEEE 802.16m-08/004r4, “IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document (EMD),” Nov. 2008.

## 発表論文等

### ジャーナル論文

- [1] H. Seki and F. Adachi, "Centralized inter-cell interference coordination using multi-band 3D beam-switching in cellular networks," IEICE Trans. Commun., conditional acceptance.
- [2] H. Seki, T. Kobayashi, and D. Kimura, "Selection of component carriers using centralized baseband pooling for LTE-advanced heterogeneous networks," IEICE Trans. Commun., vol.E96-B, no.6, pp.1288-1296, June 2013.

### 国際学会

- [3] D. Kimura, Y. Harada, and H. Seki, "De-centralized dynamic ICIC using X2 interfaces for downlink LTE system," Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring), May 2011.

### 研究会

- [4] 大山哲平, 関 宏之, "LTE-Advanced ヘテロジニアスネットワークにおける協調送信を考慮したスモールセル設計手法," 信学技報, SR2014-80, pp.123-129, Oct. 2014.
- [5] 関 宏之, 小林崇春, 木村 大, "LTE/LTE-Advanced ヘテロジニアスネットワークにおけるスモールセル設計手法," 信学技報, RCS2013-25, pp.19-24, May 2013.

### 全国大会

- [6] 関 宏之, "超高速ブロードバンドサービスを提供するヘテロジニアスネットワーク," 2012 信学総大, BP-2-6, Mar. 2012.

### ワークショップ

- [7] 関 宏之, 小林崇春, 木村 大, "増大するモバイルトラフィックを収容する次世代ワイヤレスネットワーク技術," MWE2011 ワークショップ, WS14-04, 2011 年 12 月.

### 技術雑誌

- [8] 関 宏之, 箕輪守彦, "モバイルアクセスシステムの技術動向," 雑誌 FUJITSU, vol.63, no.6, pp.681-688, 2012 年 11 月.
- [9] 木村 大, 関 宏之, "セル間干渉制御 (ICIC) 技術," 雑誌 FUJITSU, vol.62, no.4, pp.455-460, 2011 年 7 月.

### 関連特許

- [10] 「無線通信システム、通信制御方法、制御装置及び無線端末」, 出願番号: JP2012/069327, 公開番号, WO2014/020661.

以上