

令和 元年 6月 20日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06358

研究課題名(和文) 5Gにおける効率的無線リソース制御法

研究課題名(英文) Radio Resource Allocation for 5G

研究代表者

三木 信彦 (Miki, Nobuhiko)

香川大学・創造工学部・教授

研究者番号：90709247

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：2020年に導入が予定されている第五世代移動通信(5G)で期待される更なる高速・大容量化を低コストで実現するため、小型基地局を多数配置して基地局密度を増大するスモールセル構成、及びミリ波等の高周波数帯を用いることによる周波数帯域幅拡大によって無線リソース量を増大することが重要である。本研究では、スモールセル構成、高周波数帯の使用による効果を最大限得ることを目的として、公平性を保ちつつ、スループットを増大可能なProportional Fairness規範に基づく無線リソース選択法を導出し、様々な環境を模擬した計算機シミュレーションによってその効果を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2020年に導入が期待される5Gにおいて期待される更なる高速・大容量化を低コストで実現するために必須のスモールセル構成、及びミリ波等の高周波数帯を使用する際に重要となる効率的な無線リソース割り当てに着目し、本研究では凸最適化問題として最適解を求め、最適解を得るアルゴリズムを導出している。更に、自立分散制御を用いることで、より実用的なアルゴリズムも導出している。これらに加え、5Gで期待される様々な評価環境を計算機シミュレーションにより模擬し、本アルゴリズムの効果を確認した。

研究成果の概要(英文)：To accommodate the continuing growth in the amount of mobile cellular traffic, 5G is expected to launch in 2020. To support such traffic with low cost, small cell deployments and employment of high frequency bands are promising. To employ both deployments effectively, radio resource allocations are important. This study employs the resource allocations by solving a convex optimization problem based on proportional fair criteria. The performance in various small cell deployment scenarios with high frequency bands are performed to show its effectiveness.

研究分野：移動通信システム

キーワード：第五世代移動通信 5G プロポーションアルフェアネス 凸最適化 スモールセル ミリ波 無線リソース割り当て

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

2020年代には2010年比で1000倍と試算される移動通信システムでのトラフィックを低コストで収容するため、第五世代移動通信(5G)が世界中で検討されている。一般的に大容量化には、基地局密度の増大、周波数利用効率の向上、周波数帯域幅の増大が必要となる。これらの中で、本研究では、小型基地局を多数配置して基地局密度を増大するスモールセル構成、及びミリ波等の高周波数帯を用いることによる周波数帯域幅拡大に着目する。

スモールセル構成は、安価な小型基地局をトラフィックの集中するエリア（主に屋内）に多数配置するネットワーク構成を示している。この小型基地局は、送信電力が通常基地局に比較して小さいことに起因してそのセル半径が小さく、接続ユーザ数が限定的であるため、その無線リソースを有効に活用できないという問題がある。この問題は、通常基地局のユーザを小型基地局へオフロードすることにより解決できる。しかしながら、小型基地局にオフロードされたユーザは、通常基地局の受信品質が小型基地局より良好であるため、通常基地局からの強い干渉を受けるといった問題が新たに生じる。これを解決するため、セル間干渉制御の適用が不可欠となる。すなわち、小型基地局へのオフロードとセル間干渉制御の併用が非常に重要となる。

また、2GHz帯といった従来移動通信で用いられてきた周波数帯では、周波数帯域幅を十分確保することが困難であるため、周波数帯域幅拡大には、更に高い周波数帯を使用する必要がある。その一つがミリ波帯であるが、このような高周波数帯では、伝搬損が非常に大きくなり、高周波数帯を用いる基地局のセル半径は相対的に小さくなる。従って、基地局、周波数帯の選択が非常に重要となる。

このような基地局、周波数帯選択において、ネットワーク全体における最適選択が非常に重要となってくる。例えば、各ユーザにとって受信品質の観点で最適な基地局を選択した場合、ユーザ数が基地局によって偏る問題がある。特に送信電力の小さい小型基地局がその偏りが顕著となる。高周波数帯の使用においても全ユーザにとって低周波数帯の方が受信品質の観点で良好であるため、各ユーザにとって最適な周波数帯を用いると高周波数帯の使用効果は得られない。

以上のように、様々な基地局、そして周波数帯が存在するなかでネットワーク全体を考慮して最適な無線リソースを用いて通信することが5Gでは非常に重要となる。

### 2. 研究の目的

本研究では、2020年代に導入が予定されている5Gにおいて、スモールセル構成、高周波数帯の使用による効果を最大限得ることを目的として、公平性を保ちつつ、スループットを増大可能なProportional Fairness (PF)規範に基づく無線リソース選択法を確立することを目的としている。

### 3. 研究の方法

無線リソース割り当てには、システムスループットの増大とユーザ間の公平性を実現可能なPF規範を用いる方法が広く用いられている。特に、瞬時フェージング変動を補償し、効率的な無線リソース割り当てが実現できるため、基地局内のユーザ間の割り当て、すなわちスケジューリングに主に用いられている。更に、このPF規範を接続基地局の選択に用いるGeneralized PF規範が提案され、負荷分散を考慮した接続となることが知られている。Generalized PFとは、ユーザスループットの対数和を最大化するように基地局の選択を行う方法である。各ユーザが複数の基地局への接続を許容することで、凸最適化問題として最適化を解析的に導出することが可能となる。これによって、負荷分散を考慮した接続となることが知られている。

本研究では、PF規範を用いて、5Gで重要となる様々な基地局、そして周波数帯が存在するなかでネットワーク全体を考慮して最適な無線リソースを用いて通信する割り当てを明確化する。

### 4. 研究成果

本研究では、任意の周波数帯数  $L$ 、基地局数  $M$ 、ユーザ数  $N$  のシステムを対象とする。セル間干渉制御を適用するため、第  $l$  周波数帯は  $L_l$  サブバンドに分割され、各サブバンドで異なる送信電力で送信される（この送信電力差によって干渉制御を実現する）。サブバンド幅を  $w_l$  とする。図1に3周波数帯 ( $L=3$ )、さらに各周波数帯を4, 3, 2サブバンドに分割する場合を示す。



図1. システムモデル

基地局数は4である。図中の色を用いて、各サブバンドでの送信の有無（灰色が送信、白色が無送信）を示している。これにより、各周波数帯、各基地局で異なる干渉制御を適用可能となる。このとき、第  $n$  ユーザの第  $l$  周波数帯、第  $p$  サブバンドを用いて第  $m$  基地局と通信した際に実現可能な周波数利用効率を  $r_{mlr}(n)$ 、割り当てを  $b_{mlr}(n)$  とする。ここで、 $b_{mlr}(n) > 0$  の場合、第  $n$  ユーザは第  $m$  基地局と第  $l$  周波数帯、第  $p$  サブバンドを用いて通信していることを示して

いる。したがって、ユーザスループットの対数和を最大化する割り当て  $b_{ml}(n)$ 、干渉制御（すなわちサブバンド幅  $w_{ll}$ ）を求めることで、PF 規範を用いた基地局接続・セル間干渉制御の同時最適化を行うことができる。

本研究では、(1)同時最適化アルゴリズムの提案、(2)提案最適化アルゴリズムを用いた評価、および、(3)自立分散アルゴリズムへの拡張を行った。以下順に説明を行う。

### (1) 同時最適化アルゴリズムの提案

まず、1 周波数帯を用いる場合（すなわち  $L=1$ ）を対象として、PF 規範を用いた基地局接続・セル間干渉制御の同時最適化を実現するアルゴリズムを確立した。具体的には、繰り返し処理を用いることによって、凸最適化問題の Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件のすべてを満足するアルゴリズムを確立した。図 2 に提案繰り返しアルゴリズムを用いた場合の収束特性の一例を示す。図において、 $\Delta\mu$  が 0 となると KKT 条件を満足することを意味している。図に示すように、繰り返し数の増大に伴い、 $\Delta\mu$  が 0 に漸近するとともに、目的関数（ユーザスループットの対数和）も増大している。また、全ての  $\Delta\mu$  が 0 に等しくなる（その場合 KKT 条件を満足し、凸最適化の解となる）と目的関数も最大値を示しており、本繰り返しアルゴリズムが正しく動作していることが示されている。

次に、複数周波数帯を用いる場合（すなわち  $L \geq 2$ ）にアルゴリズムを拡張する。図 3 にアルゴリズム概要を示している。図に示すように、各基地局における注水定理に基づく無線リソース割り当てと各周波数帯における周波数幅（サブバンド幅）制御を繰り返し適用することによって、複数周波数帯において最適解を求めることができる。ここで、低周波数帯での割り当てが変更されると高周波数帯の割り当てに影響することから、それぞれ個別に更新する形としている。図では  $L=2$  の場合について示しているが、 $L \geq 2$  への拡張は容易に行うことができる。また周波数帯数が増加するとアルゴリズムの収束に時間がかかる、収束速度の向上についても検討を行い、速度向上を確認している。

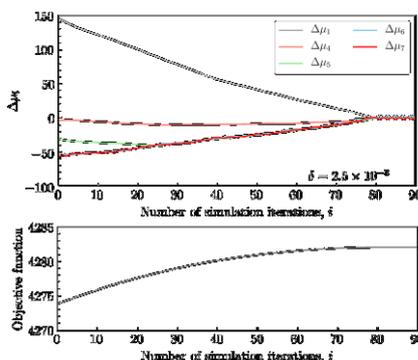


図 2. 収束特性

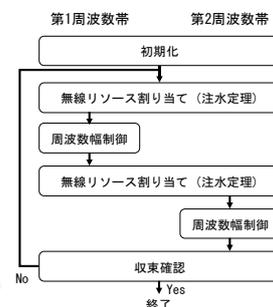


図 3. アルゴリズム概要

### (2) 様々な環境における特性評価

本アルゴリズムを適用した際の特性評価結果について示す。まず、1 周波数帯を用いる場合（すなわち  $L=1$ ）を対象として、通常基地局と小型基地局が存在する Small Cell 環境において、通常基地局と小型基地局間、通常基地局間、小型基地局間といった 3 種類のセル間干渉制御を適用した際の効果を評価した。図 4 に小型基地局 ( $M_p$ ) が通常基地局 ( $M_m$ ) の 2, 8 倍の存在する場合の収束後の目的関数値を示す。図よりわかるように、小型基地局間干渉制御(A)の効果は小さく、干渉制御なしからの改善は小さい。一方、通常基地局間干渉制御(B)、通常基地局と小型基地局間干渉制御(C)は条件によってその効果が異なるものの一定の効果が得られている。また両干渉制御を併用する (B+C) することによって更に改善が得られる。最後にすべてを併用する (A+B+C) ことによる改善効果は少ないことがわかる。

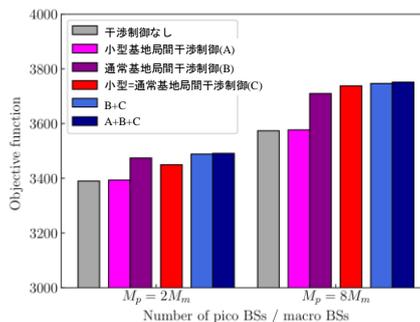


図 4. 1 周波数帯を用いる場合

次に、Small Cell 環境において複数周波数帯を用いた場合を対象として、様々な条件で評価を行った。その一例として、3 周波数帯を用いた場合の特性を図 5 に示す。通常基地局は 2GHz 帯において 10MHz の帯域幅を用いると仮定した。小型基地局は 2 種類に分類し、4GHz 帯、30GHz 帯を用いると仮定し、帯域幅は 20MHz、及びパラメータとした。ここでは、収束後の各基地局への接続ユーザ数のみを示す。30GHz 帯を用いる小型基

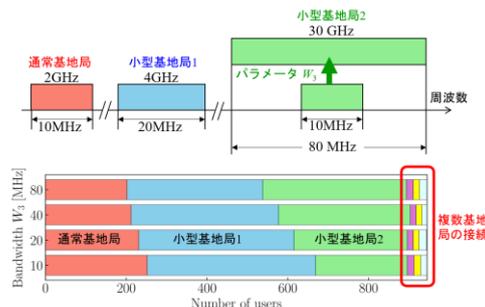


図 5. 3 周波数帯を用いる場合

地局の帯域幅の増大に伴い、その他の基地局から当該小型基地局へオフロードが適切に行われている。

### (3) 自律制御アルゴリズムへの拡張

(1)で示したアルゴリズムは、全ての基地局の情報を集中局に集めて制御を行う場合に相当する。しかしながら、各基地局は自律分散的に制御されることが望ましい。そこで、基地局の境界領域に在圏するユーザは複数の基地局への接続を許容し、各基地局での割り当て量をバックホールで通知するという条件において、自立分散制御を適用した場合の特性を評価した。ここで、複数の基地局への接続の許容は協調送信に対応する技術である。この場合、複数基地局の接続を許容することで、集中制御とほぼ同等の特性を実現可能であることを計算機シミュレーションにより確認した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Nobuhiko Miki, and Yusaku Kanehira, “Joint optimization for user association and inter-cell interference coordination based on proportional fair criteria in small cell deployments,” *IEICE Trans. Commun.*, (To appear).

[学会発表] (計 18 件)

- ① 田淵翔也, 數本崇晃, 金平勇作, 三木信彦, “プロポーショナルフェアネス規範に基づくユーザ接続・セル間干渉制御同時最適化適用時における複数ピコ基地局が存在する場合の特性評価,” 電子情報通信学会 無線通信システム研究会, 2019年2月(大阪).
- ② Nobuhiko Miki, and Yusaku Kanehira, “Investigation on distributed optimization of user association and inter-cell interference coordination based on proportional fair criteria,” *IEEE Consumer Communications & Networking Conference 2019 (CCNC 2019)*, 国際学会, 査読有
- ③ Takaaki Kazumoto, Yusaku Kanehira, and Nobuhiko Miki, “Joint optimization of user association and resource allocation employing inter-cell interference for multiple frequency bands,” *The 2018 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS 2018)*, 国際学会, 査読有
- ④ Nobuhiko Miki, “User association and radio resource allocation combined with multiple frequency bands and ICIC in small cell deployments,” *The 2018 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS 2018)*, 国際学会, 査読有
- ⑤ 田淵翔也, 數本崇晃, 金平勇作, 三木信彦, “プロポーショナルフェアネス規範に基づく複数ピコ基地局が存在する場合の特性評価,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, 2019年9月(金沢).
- ⑥ 松本拓也, 數本崇晃, 金平勇作, 三木信彦, “プロポーショナルフェアネス規範に基づく複数周波数を用いる場合の制御法に関する一検討,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, 2019年9月(金沢).
- ⑦ 三木信彦, 數本崇晃, 金平勇作, “プロポーショナルフェアネス規範に基づくセル選択・干渉制御を用いた場合の複数周波数帯・スモールセル環境における特性評価,” 電子情報通信学会 無線通信システム研究会, 2018年7月(北海道).
- ⑧ 數本崇晃, 金平勇作, 三木信彦, “プロポーショナルフェアネス規範に基づく複数周波数帯を用いる場合の干渉制御法の検討,” 電子情報通信学会 無線通信システム研究会, 2018年4月(山口).
- ⑨ 三木信彦, 金平勇作, “スモールセルにおけるプロポーショナルフェアネス規範を用いたセル間干渉制御法の一検討,” 電子情報通信学会 無線通信システム研究会, 2018年3月(神奈川).
- ⑩ 金平勇作, 三木信彦, “ヘテロジニアスネットワークにおける干渉制御を用いる場合のセル選択に関する特性評価,” 電子情報通信学会 無線通信システム研究会, 2017年12月(広島).
- ⑪ Nobuhiko Miki, Yusaku Kanehira, and Hiroaki Tokoshima, “Investigation on joint optimization for user association and inter-cell interference coordination based on proportional fair criteria,” *2017 11th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, 国際学会, 査読有
- ⑫ Yusaku Kanehira, and Nobuhiko Miki, “Performance evaluation of inter-cell interference coordination with multiple interference pattern based on proportional fair criteria,” *2017 20th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, 国際学会, 査読有
- ⑬ 金平勇作, 三木信彦, “ヘテロジニアスネットワークにおける干渉制御を用いる場合のセル選択に関する一検討,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2017年9月(東京).
- ⑭ 金平勇作, 三木信彦, “プロポーショナルフェアネス規範に基づく干渉制御パターンの影響に関する特性評価,” 電子情報通信学会 無線通信システム研究会, 2017年4月(香川).
- ⑮ 金平勇作, 三木信彦, “プロポーショナルフェアネス規範に基づく干渉制御の制御パターンの影響,” 電子情報通信学会 総合大会, 2017年3月(名古屋).

- ⑯ 金平勇作, 三木信彦, “プロポーショナルフェアネス規範に基づくフラクショナル周波数繰り返しを用いる干渉制御の特性評価,”電子情報通信学会 無線通信システム研究会, 2016年10月(神奈川県).
- ⑰ 金平勇作, 三木信彦, “プロポーショナルフェアネス規範に基づくフラクショナル周波数繰り返しを用いる干渉制御に関する一検討,”電子情報通信学会 ソサエティ大会, 2016年9月(北海道).
- ⑱ 三木信彦, “プロポーショナルフェアネス規範に基づく平均受信品質が異なる無線リソース割り当て法に関する検討,” 電子情報通信学会 無線通信システム研究会, 2016年5月(東京).

## 6. 研究組織

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。