

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04466

研究課題名（和文）第6世代移動通信に向けた無線リソース自動最適化法の研究

研究課題名（英文）Self-optimization of Resource Allocation for sixth-generation mobile communication system

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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：6Gで5Gよりも更に高速・大容量化するためには、更に周波数を広帯域化し、ネットワークを高密度化する必要がある。このような状況では、基地局・周波数帯と端末との移動通信システム全体を考慮した最適化が必須である。本研究では、プロポーショナルフェアネス規範を用いて移動通信システム全体で最適化を実現するアルゴリズムを提案した。

主な特長として(1)機械学習と凸最適化それぞれの長所を組み合わせている点、(2)5Gで規定されている基地局-基地局間、基地局-端末間のシグナリングに基づき、現実的な情報を用いた最適化アルゴリズムである点、である。計算機シミュレーションにより、提案アルゴリズムの有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

移動通信システム全体に対して凸最適化を適用することで、プロポーショナルフェアネス規範に基づく最適解を導出することは可能であるが、非現実的な仮定が含まれている。

本研究では、凸最適化の最適解を導出できる特長を用いつつ、干渉適用時の分散制御の適用、セル選択規範に与えるオフセット値の機械学習による最適化を用いることにより、現実的なアルゴリズムを実現している。

本研究は、最適解との比較を通して現実的なアルゴリズムでどの程度まで最適解に近い特性を実現できるかを明確化している点が学術的に意義があり、現実的な基地局-基地局間、基地局-端末間のシグナリングに基づき最適化を行なっている点に社会的意義があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In order to achieve higher speed and capacity with 6G than with 5G, it is necessary to further increase the frequency bandwidth and network density. Under such conditions, it is essential to optimize the entire mobile network. In this study, we proposed an algorithm that optimizes the network based on the proportional fair criteria.

The main features of the proposed algorithm are (1) it combines the advantages of both machine learning and convex optimization, and (2) it is an optimization algorithm that uses realistic information based on signaling between base stations and between base stations and terminals, as specified in 5G.

We confirm the effectiveness of the proposed algorithm based on the computer simulations.

研究分野：移動通信システム

キーワード：凸最適化 プロポーショナルフェアネス 機械学習

1. 研究開始当初の背景

本研究は 2020 年度に開始されたが、日本では 2020 年に第五世代移動通信 (5G: 5th Generation) の商用サービスが開始された直後であった。新たな世代の商用サービスが開始されると、研究開発は次世代、すなわち 6G に移行する時期である。世代が変わる場合、大幅な改善が要求されることから、6G でも 5G に対して大幅な特性の改善が必須である。このためには、更に周波数を広帯域化し、基地局数を増加しネットワークを高密度化する必要がある。

移動通信システムでは端末が参照信号受信電力といった受信品質の最も良い基地局・周波数帯と接続する (ユーザ接続) 方法が一般的である。しかし、前述のように周波数帯・基地局密度が増加すると端末が接続可能な周波数帯・基地局数が増加するため、通常ユーザ接続では、使用する周波数帯・基地局に偏りが生じ、周波数の広帯域化・ネットワークを高密度化の効果を得ることができない。言い換えると、基地局・周波数帯と端末との移動通信システム全体を考慮した最適化が必須である。

この最適化は複雑であるが、当時機械学習が急速に発展しており、この最適化も含め、機械学習の移動通信への適用が盛んに議論されていた。

2. 研究の目的

背景で述べたように、基地局・周波数帯と端末との移動通信システム全体を考慮した最適化が必須である。本研究では、ユーザ間の公平性を実現しつつ、スループットを増大できるプロポーションアルファネス規範 (PF: Proportional Fairness) 規範を用いる。PF 規範は以下の式で定義される。まず、対象とする移動通信システム内のユーザ数を N とし、第 n ユーザのスループット ζ_n を以下の式 (1) で定義する。

$$\zeta_n = \sum_{l=1}^N w_l \sum_{l=1}^L b_l(n) r_l(n) \quad (1)$$

ここで、 L はシステム内の無線リソース数であり、 w_l は第 l 無線リソースの帯域幅、 $b_l(n)$ は第 n ユーザの第 l 無線リソースにおける割り当て量、 $r_l(n)$ は第 n ユーザの第 l 無線リソースにおける実現可能な周波数利用効率である。この時、PF 規範は以下の式 (2) の F を最大化することである。

$$F = \sum_{n=1}^N \log \zeta_n \quad (2)$$

この値は凸最適化により最適な割り当て量 $b_l(n)$ を導出可能である。しかしながら、全無線リソースに対する全ユーザの周波数利用効率を用いた最適化であり、実際のシステムでは実現不可能である。本研究では、この点に着目し、現実的なシグナリングにおいて、最適解に近い特性を実現することが目的である。

3. 研究の方法

本研究の目的で示した PF 規範に基づく最適化を現実的な手法で実現するためには、背景で述べたユーザ接続を現実的な手法で行う必要が重要である。具体的には主に以下の 2 種類の検討を行った。ここでは、簡単化のため、基地局のみを無線リソースとして定義し、基地局数を L と定義する。また、第 l 基地局の参照信号受信電力を $\Gamma_l(n)$ と定義する。

(1) マクロ基地局と小型基地局それぞれ最適な 1 局づつと接続するユーザ接続

この方法では、各ユーザは、全マクロ基地局のうち参照信号受信電力が最大の基地局 1 局、全小型基地局からも同様に 1 局の合計 2 局と接続する。すなわち、以下の式より第 n ユーザの接続マクロ基地局 $l^{\text{Ma}}(n)$ 、接続小型基地局 $l^{\text{LP}}(n)$ をそれぞれ決定する。

$$l^{\text{Ma}}(n) = \operatorname{argmax}_{l \in L_{\text{Ma}}} \Gamma_l(n), \quad l^{\text{LP}}(n) = \operatorname{argmax}_{l \in L_{\text{LP}}} \Gamma_l(n) \quad (3)$$

ここで、 L_{Ma} 、 L_{LP} は基地局のうち、マクロ基地局の集合、小型基地局の集合を表す。この上で、実際のユーザの接続はスケジューリングによって実行する。

(2) 基地局毎に固有のオフセットを定義し、この値を機械学習によって最適化

この方法では、ユーザは全セルの中で参照信号受信電力(+オフセット値)が最大の基地局1局と接続する。すなわち、以下の式より、第 n ユーザの接続基地局 $l(n)$ を決定する。

$$l(n) = \operatorname{argmax}_{l \in L} \Gamma'_l(n), \quad \Gamma'_l(n) = \begin{cases} \Gamma_l(n) & (l \in L_{Ma}) \\ \Gamma_l(n) + \gamma(n) & (l \in L_{LP}) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $\gamma(n)$ は小型基地局のみに与えられるユーザ毎のオフセットである。しかしながら、この値を最適化するの是非常に困難である。そこで、本研究では、機械学習を用いて最適化した。具体的には、現在のオフセットで得られた場合のユーザスループットを取得し、スループットの対数話(PF規範値)を求めた。その上で、PF規範値を最大化できる $\gamma(n)$ の組み合わせを最適化したオフセット値とした。

上記の説明は基本的な説明である点、周波数帯が複数ある場合など文献によって異なる点に注意が必要であり、詳細は各文献に記載している。

4. 研究成果

以下の成果を得ることができた。

(1) ユーザ接続とセル間干渉制御同時最適化

2GHz以下の低周波数帯は伝搬損も小さくエリア構築には重要な周波数帯であるが、周波数帯域幅の確保が困難である。したがって、6Gにおいても重要な周波数帯であり、有効な活用が必須である。そこで、小型基地局を2GHz帯で運用する場合について検討を行った。

この場合、面的なエリア構築を行なっているマクロ基地局に送信電力の小さい安価な小型基地局を重畳する構成となる。このような条件では、マクロ基地局が協調して一部の帯域の送信を停止するセル間干渉制御の適用が必須である。また、セル間干渉制御の無線リソース量に応じて、最適なユーザ接続が異なる。したがって、ユーザ接続とセル間干渉制御の同時最適化が必須となる。また、セル間干渉制御について、更にシステム全体で制御を行う集中制御局(CCU: Centralized Control Unit)の場合と現実的な分散制御局(DCU: Decentralized Control Unit)についての評価した。図1がこの時のユーザ・基地局の配置を示し、図2がその時のユーザスループットの累積分布特性を示している。図2においてNetworkは式(3)に基づいてユーザ接続を実施した場合、Userは式(4)に基づいてユーザ選択を用いるものの、機械学習は適用せず、小型基地局で共通の値を用いた場合を示している。またIdealとして、理想的に $r_l(n)$ が全て得られた場合の理想的な特性を示す。図よりわかるように、提案する現実的なDCU+Networkを用いることでIdealとほぼ同等の特性が得られ、提案構成が有効であることを示した。

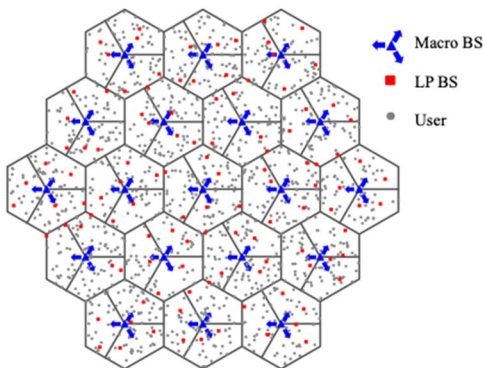


図1. ユーザ分布

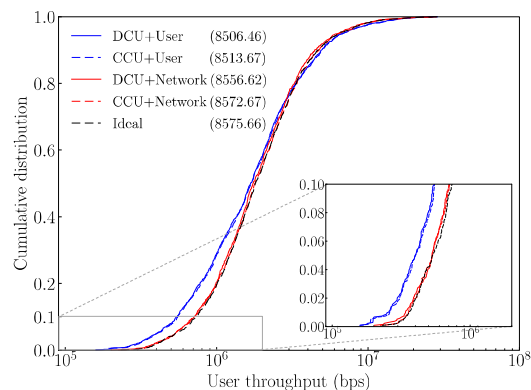


図2. ユーザスループットの累積分布

(2) 基地局固有オフセットの機械学習による最適化

(1)の評価で示したように、小型基地局で共通のオフセットを用いたユーザ接続を用いた場合、その特性は大きく劣化する可能性がある。しかしながら、この最適化は実際のシステムでは非常に困難である。そこで、機械学習を適用することでこの最適化を実現した。図3に示すように、基地局は接続ユーザのスループットを取得し制御局へ通知する。制御局は全ユーザのスループットを得ることができるので、ここでPF規範値を出力とするニューラルネットワークを構築し、現在のオフセットに対する値とPF規範値を用いて学習させる。この関数を用いて、最適な基地局固有のオフセット値を算出する。

図4に計算機シミュレーション結果を示す。Maximizedと記載している特性は非現実的ではあるが、全てのオフセットの組み合わせを試行し、PF規範値が最大の場合の特性であり、Estimatedは今回のニューラルネットワークで推定した場合の特性である。図から分かるようにほぼ同等の特性であり、提案構成が有効であることを示している。

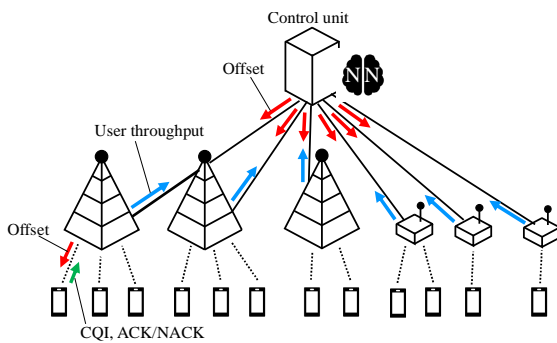


図3. システム構成

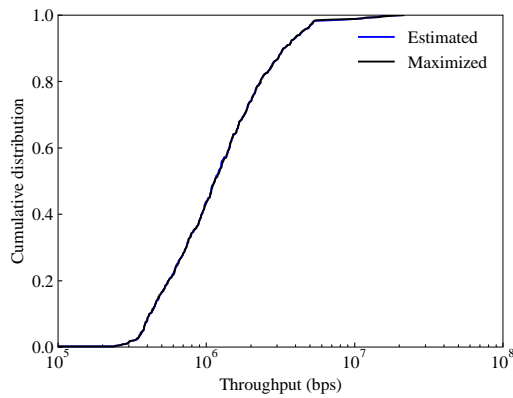


図4. ユーザスループットの累積分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 松本 拓也、三木 信彦	4. 巻 J107-B
2. 論文標題 プロポーショナルフェアネス規範に基づく無線リソース割り当て・セル間干渉制御の分散同時最適化	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌B 通信	6. 最初と最後の頁 200 ~ 208
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14923/transcomj.2023GWP0014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 日下祐喜, 三木信彦
2. 発表標題 セルレンジ拡張におけるPF metricのNeural Networkを用いた近似法
3. 学会等名 電子情報通信学会無線通信システム研究会
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 Ryuya Sembo; Nobuhiko Miki
2. 発表標題 Performance Evaluation of Neural Network-based Offset Optimization in Cell Range Expansion for Multiple Frequency Bands
3. 学会等名 2021 IEEE VTS 17th Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS), 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三木信彦, 田淵翔也, 牧野一生
2. 発表標題 無線リソース割り当てにおける最適化アルゴリズムの検討
3. 学会等名 無線通信システム研究会
4. 発表年 2020年 ~ 2021年

1. 発表者名 三木信彦
2. 発表標題 6Gに向けた無線スケジューリングと基地局間協調技術の基礎
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 S. Tabuchi, I. Makino and N. Miki
2. 発表標題 Combined Usage of Convex Optimization and Neural Network for Resource Allocation
3. 学会等名 International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS) (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Mitsuto Sato, Yuki Kusaka, Nobuhiko Miki
2. 発表標題 Investigation on Offset Optimization for Cell Range Expansion Using Neural Networks in Conjunction with Convex Optimization
3. 学会等名 2023 VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS) (国際学会)
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 Mitsuto Sato, Yuki Kusaka, Nobuhiko Miki
2. 発表標題 Impact of Biased User Distribution on Offset Values Using Neural Network
3. 学会等名 2023 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 佐藤光斗, 日下祐喜, 三木信彦
2. 発表標題 セルレンジ拡張におけるNeural Networkを用いるオフセット最適化に関する特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会無線通信システム研究会
4. 発表年 2023年～2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織			
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)		備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関