

氏 名	せき ひろゆき 関 宏 之
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成 2 7 年 3 月 2 5 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 通信工学専攻
学 位 論 文 題 目	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
指 導 教 員	東北大学教授 安達 文幸
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 安達 文幸 東北大学教授 陳 強 東北大学教授 末松 憲治

論 文 内 容 要 旨

移動通信は第 1 世代から第 4 世代へと進化し、広帯域データ通信サービスが主流になりつつある。また、近年のデータトラフィックの増加に対応するため、マクロセルとスモールセルの混在や複数周波数帯を用いるマルチバンド化が進むなど、無線セル構成が複雑になっている。このような条件では、従来の受信電界強度や受信信号品質 (SINR) を指標とした制御では、複雑化するセル間干渉を克服するには限界がある。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を対象に、ユーザが複数の無線リソース (無線セルや周波数バンド) 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制御を行うセル間干渉制御技術が必要になるとの考えに基づき、その実現に有効なツールとして、ユーザスループットを高速に計算する「Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件を用いたスループット計算手法」を提案している。本手法は、これまで送信電力やアンテナ指向性などの無線パラメータを調整した後の特性評価にしか使われていなかったユーザスループット解析を、無線パラメータの最適制御に適用することを可能にしている。そして、本論文では、提案する「KKT 条件を用いたスループット計算手法」の有効性を検証するために、本手法のセル間干渉制御技術への適用例に関する一連の研究成果をまとめている。従来のセル間干渉制御は、Fractional Frequency Reuse (FFR) に代表されるように、セル境界における 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ったが、本研究では、ユーザスループットを指標としてセルラシステムにおける無線パラメータの最適制御を行うセル間干渉制御技術について検討している。最適化する無線パラメータとしては、基地局毎の、設置位置、送信電力、周波数割り当て、アンテナ指向性などが考えられるが、本研究では、セル設計段階および通信システムの運用中にこれらの無線パラメータの最適化を行う方法を、データトラフィックの増加に対応する広帯域移動通信向けのセル間干渉制御技術として検討を行っている。研究の成果を各章毎にまとめると以下のようになる。

第 1 章は緒論であり、既に述べたような研究の背景と目的について述べている。

第 2 章では、広帯域移動通信のデータ伝送で一般的に利用されている Proportional Fairness (PF) スケジュー

ーリングに着目し、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を明らかにしている。従来、複数の無線リソースが利用可能な場合、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用いられていた。例えば、FFR のように送信電力の異なる複数の無線リソース（周波数バンド）を用いる場合、セルの境界付近に存在する「セル端ユーザ」と基地局に比較的近い位置に存在する「セル中心ユーザ」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、無線リソース毎にスケジューリングを行う方法が一般的であった。第2章では、周波数バンド間に送信電力差があるシングルセルモデルの検証結果から、予め各周波数バンドに割り当てるユーザを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、周波数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している。このように、第2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 PF スケジューリングでスループットが決まるのではなく、PF 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当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、第3章では、ユーザ毎の無線リソースの割当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の提案を行っている。

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い、「KKT 条件を用いたスループット計算手法」を提案している。第3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ている。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ている。提案手法では、KKT 条件を用いることで、PF Utility の最大化問題を次式のように定式化している。

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

ここで、 $p_{k,m}$ はユーザ k が無線リソース m にスケジューリングされる割合（ユーザ割当率）で、 $R_{k,m}$ はユーザ k を無線リソース m に割り当てた場合に得られる瞬時スループットである。また、 N_k はユーザ数、 N_m は無線リソース数、 μ_m は無線リソース m におけるユーザ割当率の合計が 1 となる制約条件の Lagrange 乗数である。提案手法では、この導出式を注水定理アルゴリズムによって解いており、従来のシステムレベルシミュレーションを用いたスループット計算よりも収束が速く、 N_k が 30 の場合に、スループット計算の実行時間を 75 分の 1 程度に短縮することができる。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と考えられる。

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」について検討している。「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ージを最大化する設計とは異なり、調整する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。第4章では、平均ユーザスループット、セル端ユーザスループット、PF Utility、Fairness の4つ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ている。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」によって、スループットの計算時間を短縮することはできるが、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、本研究では、貪欲法 (Greedy Algorithm) をベースにした探索アルゴリズムによって、近似解を求め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ーリング」について検討している。「集中制御型三次元ビームスイッチング」では、集中制御局を用いて PF Utility を評価指標としたパラメータ探索を行うことで、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い、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ている。「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倍以上のゲインが得られることを示している。「C-RAN 型基地局におけるベースバンドプーリング」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、PF Utility を評価指標としたパラメータ探索によって、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している。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を約 1.2 倍に、セル端ユーザスループットを約 2.2 倍に向上できることを確認するとともに、ベースバンドプーリングの効果として、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ている。

第5章は本論文の結論である。以上のように、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を示すことで、その有効性を明らかにしている。

論文審査結果の要旨

移動通信は第1世代から第4世代へと進化し、広帯域データ通信サービスが主流になりつつある。また、近年のデータトラフィックの増加に対応するため、マクロセルとスモールセルの混在や複数周波数帯を用いるマルチバンド化が進むなど、無線セル構成が複雑になっている。このような条件では、従来の受信電界強度や受信信号品質を指標とした制御では、複雑化するセル間干渉を克服するには限界がある。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を対象に、ユーザが複数の無線リソース(無線セルや周波数バンド)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制御を行うセル間干渉制御技術が必要になるとの考えに基づき、その実現に有効なツールとして、スループットを高速に計算する「Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件を用いたスループット計算手法」を提案している。本手法は、これまで送信電力やアンテナ指向性などの無線パラメータを調整した後の特性評価にしか使われていなかったスループット解析を、無線パラメータの最適制御に適用することを可能にしている。本論文は、提案する「KKT 条件を用いたスループット計算手法」と、本手法のセル間干渉制御技術への適用に関する一連の研究成果をまとめたもので、全編5章からなる。

第1章は緒論であり、本研究の背景及び目的を述べている。

第2章では、移動通信で一般的な Proportional Fairness (PF) スケジューリングに着目し、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を明らかにしている。従来、複数の無線リソースが利用可能な場合、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用いられていた。本章では、バンド間に送信電力差があるシングルセルモデルの検証結果から、予め各バンド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、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した。このことは、PF スケジューリングの解析によって、複数の無線リソースへのユーザ割当率と同時に各ユーザのスループットを計算できることを示唆しており、無線セル構成が複雑化する広帯域移動通信に適用するセル間干渉制御技術の開発に繋がる大きな成果である。

第3章では、第2章の考察に基づき、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」を提案している。提案法は、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示している。提案法は、将来の広帯域移動通信において、スループットを指標とした無線パラメータの最適制御技術の実用化に寄与する重要な成果である。

第4章では、第3章で提案したスループット計算手法の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、③Centralized-Radio Access Network (C-RAN) 型基地局におけるベースバンドプーリング)について検討を行っている。①では提案したスループット計算手法を利用して、セル設計段階で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、②と③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。これは、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た実用的に優れた成果である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、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適用したときの有効性を明らかにしたものであり、無線通信工学の発展に寄与するところが少ない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。