

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2008年度～2009年度
 課題番号：20760056
 研究課題名(和文) マルチユーザー通信システムに対する最適化手法の応用
 研究課題名(英文) Application of optimization techniques to the multi-user communication systems

研究代表者

林 俊介 (HAYASHI SHUNSUKE)
 京都大学・大学院情報学研究科・助教
 研究者番号：20444482

研究成果の概要(和文)：本研究では、マルチユーザー通信システムにおいて、最適化の技術を用いたデータレート向上アルゴリズムの構築を目指してきた。具体的には、最適解がFDMA(Frequency Division Multi Access)という性質をもつための条件を解析し、その性質を利用したアルゴリズムを文献[1]にまとめた。本論文は、情報理論で世界的にもトップクラスのジャーナルであるIEEE Transactions on Information Theoryに2009年に採録され、2010年3月には、日本オペレーションズ・リサーチ学会より第5回文献賞奨励賞を授与して頂くに至った。また、マルチユーザー通信システムにおけるデータレート最適化とも深く関係する研究として、ゲーム理論と半無限計画の研究も推し進めてきた。これらの成果は文献[2,3]にまとめ、こちらもPacific Journal of Optimizationという新進気鋭のジャーナルや、SIAM Journal on Optimizationという最適化の世界で最高峰とされるジャーナルに採録されるに至った。以上の結果は、海外の学会等でも盛んに発表し、多くの科学者に興味をもってもらい、様々な議論をすることができた。

研究成果の概要(英文)：In this study, based on the optimization techniques, we have constructed algorithms for improving data rates in multi-user communication systems. Particularly, we have analyzed the conditions under which a global optimum has an FDMA property, and summarized the obtained results in the literature [1]. This articles was accepted for publication in IEEE Transactions on Information Theory in 2009. Moreover, in 2010, we have been awarded the 5-th Bunken-Shorei Prize from the Operations Research Society of Japan. We have also proceeded the studies on the game theory and the semi-infinite programming, which are deeply related to the data rate optimization in multi-user communication systems. The obtained results were summarized in [2] and [3], and accepted for publications in Pacific Journal of Optimization and SIAM Journal on Optimization, respectively. These results were presented in overseas conferences for many times, and attracted many researchers' interests.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：最適化, 数理工学

1. 研究開始当初の背景

デジタル加入者線(Digital Subscriber Line: DSL)やコグニティブ無線 (Cognitive Radio) などのマルチユーザー通信システムにおいて、動的スペクトル管理(Dynamic Spectrum Management: DSM) という通信管理方式が注目を集めている。このようなシステムでは、同じサブチャンネルに複数のユーザーがアクセスしたとき、クロストークとよばれる他のユーザーの信号による電磁干渉が発生し、その結果、十分なデータレートが得られないという問題が起こる。したがって、クロストークの影響を軽減し、すべてのユーザーが高いデータレートを得られるようなスペクトル配分を考えることが重要である。

当時は、この種の問題の準最適解を効率的に見つける解法として反復注水法(IWFA: Iterative Water Filling Algorithm) がもっともよく知られた手法であった。しかし、本手法は、クロストークが大きい場合は、収束すら保証されておらず、たとえ収束したとしても、得られた総レートは期待されたものよりかなり低い値となってしまう。そこで、我々は、最適解の FDMA (Frequency Division Multi Access) という性質に着目し、その解析を行うとともに、アルゴリズムをいくつか提案した。

2. 研究の目的

(1) まず、最適解が FDMA となるための十分条件を緩めることがあげられる。クロストーク係数がある程度低くても、伝送パワーがある程度大きければ、最適解が FDMA となることが経験的に知られているが、具体的に伝送パワーがどれくらい大きければ、最適解が FDMA となるかはまだ分かっていない。数理最適化の技術を用いて、この条件を導くことにより、問題の数学的性質がより明らかになるだけでなく、効率的なアルゴリズムの開発にも繋がっていくはずである。

(2) 最適化問題としてモデル化する際に、目的関数として総レート (全ユーザーのデータレートの総和) 以外のものを用いることも重要である。たとえば、各ユーザーのデータレートの重み付き総和である「重み付き総レ

ト」などが簡単な例として思い浮かぶが、その他にもデータレートの相乗平均や調和平均を用いることも考えられる。

(3) 半無限計画問題や錐最適化問題といったクラスの問題に対するアルゴリズムの開発も本研究と大変深い関係がある。たとえば、スペクトルが連続的に分布していることを考えれば、本来解くべき問題は無限次元の変数をもつ問題であるため、双対問題が半無限計画問題になることが分かる。また、パラメータにノイズが含まれるような最適化問題を取り扱う枠組みとしてロバスト最適化という技法が知られているが、この種の問題は錐最適化問題として定式化できることが知られている。

3. 研究の方法

(1) 本研究を推進していく上で欠かせないのがコンピューターシミュレーションである。実際、周波数トーンやユーザーの数が少ない低次元の問題は、既存の最適化ツールで解くことができるので、その結果より多次元の問題に対する解の性質をある程度予想することが可能である。

(2) 動的スペクトル管理(DSM)の研究は欧米では盛んに行われているものの、日本ではまだ十分なされておらず、海外の研究者との積極的な交流および共同研究が不可欠である。

(3) 通信システムに対する応用研究という一つの軸に対して、錐最適化や半無限計画といったより高度な最適化問題に対するアルゴリズムの開発研究をもう一つの軸として行っていく必要がある。両者は一見異なる研究のように思えるが、スペクトルが連続性をもつ場合は半無限計画問題として定式化できるし、パラメータに不確定性を含むような問題は錐最適化問題に帰着されることが知られている。したがって、より現実的なモデルを構築し、それを解くにあたって、錐最適化や半無限計画は非常に強力な数学的ツールとなりうる。

(4) 研究が当初の計画通りに進まないときは、モデルの再構築を検討する必要も出てく

る可能性がある。実際、総レート最大化問題など、DSMにおける殆どの問題が非凹最大化であるため、正確な解を得ることは非常に困難である。また、十分満足行く結論が得られた場合も、新しいモデルを提案し、それに対して数理解析に基づいたアルゴリズムを開発していくことは非常に意義深いことである。

4. 研究成果

(1) まず、マルチユーザー通信システムにおける総レート最大化問題の解析に関して、より理論的に洗練された成果を残せたことが挙げられる。具体的には、研究開始当初に得られていた最適解がFDMAとなるための条件をさらに緩めることができた。また、研究開始当初は、その条件は最適解にある仮定を設けたものであったが、最適解がFDMAという性質をもつために、その最適解がある仮定を満たすことを課すのは、ある意味ナンセンスなことであった。しかし、その後の研究により、その仮定を満たすための条件を、問題そのものに含まれるパラメータを用いて記述することに成功した。また、総レート最大化問題の大域的最適解を求めることがNP困難であることも示した。これらの結果は、下記文献[1]にまとめ、情報理論で世界的にもトップクラスのジャーナルであるIEEE Transactions on Information Theoryに2009年に採録された。また、当該論文に対して、2010年3月には、日本オペレーションズ・リサーチ学会より第5回文献賞奨励賞を授与して頂くに至った。

(2) ゲームにおいて、各プレイヤーの得られる利得関数の情報に不確実性が含まれるとき、起こり得る均衡状態のひとつがロバストNash均衡である。下記文献[2]では、このような問題に対して、ロバストNash均衡解の存在性と一意性を議論した。また、不確実性集合がユークリッドノルムやフロベニウスノルムを使って記述されるときに、二次錐相補性問題という計算機で解くことのできるクラスの問題に帰着できることを示した。当該論文は直接マルチユーザー通信システムを対象としたものではないが、マルチユーザー通信システムはゲーム理論と深い関係があることが知られている。実際、各ユーザーをゲームのプレイヤー、および得られるデータレートを利得と見なすことにより、問題をゲームとして捉えることができる。

(3) 当初の研究目的として、半無限計画問題や錐最適化問題といったクラスの問題に対するアルゴリズムの開発を挙げたが、その成果として挙げられるのが文献[3]である。本論

文では、二次錐という錐を含む半無限計画問題に対して、陽的交換法を提案し、アルゴリズムが有限回の反復で任意の精度の解を導出することを理論的に示すことができた。さらに、具体的な数値実験を通して、提案したアルゴリズムの効能を確かめることができた。

(4) 下記雑誌論文3件のみならず、学会発表を2年間にわたって盛んに行った。特に海外での発表を積極的にを行い、多くの研究者の方々から興味をもって頂いたり、有用なコメントを頂いたりした。この経験を今後の研究にも活かして行きたい所存である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

[3] Shunsuke Hayashi and Soon-Yi Wu, An explicit algorithm for linear semi-infinite programming problem with second-order cone constraints, SIAM Journal on Optimization 20 (2009), pp. 1527-1546.

[2] Ryoichi Nishimura, Shunsuke Hayashi, and Masao Fukushima, Robust Nash equilibria in N-person non-cooperative games: Uniqueness and reformulation, Pacific Journal of Optimization 5 (2009), pp. 237-259.

[1] Shunsuke Hayashi and Zhi-Quan Luo, Spectrum management for interference-limited multiuser communication systems, IEEE Transactions on Information Theory 55 (2009), pp. 1153-1175.

[学会発表] (計13件)

Ryoichi Nishimura, Shunsuke Hayashi, and Masao Fukushima, 'Semidefinite Complementarity Reformulation for Robust Nash Equilibrium Problems', The 20th International Symposium of Mathematical Programming (ISMP), Chicago, USA, August 25, 2009.

Shunsuke Hayashi, Soon-Yi Wu, and Liping Zhang, 'Explicit Exchange Method for Convex Semi-Infinite Programming Problems with Second-Order Cone Constraints', The 23rd European Conference on Operational

Research (EURO2009), Bonn, Germany, July 6, 2009.

Ryoichi Nishimura, Shunsuke Hayashi, and Masao Fukushima, ``SDP reformulation for robust LPs and SOCPs based on nonconvex QP duality'', 7th EUROPT Workshop, Remagen, Germany, July 2, 2009.

Shunsuke Hayashi and Soon-Yi Wu, ``Explicit exchange algorithm for linear semi-infinite programming problems with second-order cone constraints'', The 4th Sino-Japan Optimization Meeting (SJOM2008), National Center for Theoretical Sciences, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, August 28, 2008.

Shunsuke Hayashi, ``FDMA based optimality analyses and algorithms for dynamic spectrum management'', SIAM Conference on Optimization, Boston, USA, May 10, 2008.

西村亮一, 林 俊介, 福島雅夫, ``ロバスト Nash 均衡問題の半正定値相補性問題への変換'', RIMS 研究集会「21 世紀の数理計画: アルゴリズムとモデリング」, 京都大学数理解析研究所, 2009 年 7 月 24 日

西村亮一, 林 俊介, 福島雅夫, ``ある構造をもつロバスト最適化問題に対する半正定値計画変換'', SCOPE@つくば ~ 未来を担う若手研究者の集い 2009 ~, 筑波大学, 2009 年 5 月 30 日

西村亮一, 林 俊介, 福島雅夫, ``非凸二次計画問題の強双対性を用いたロバスト最適化問題に対する半正定値計画変換'', 研究集会『最適化: モデリングとアルゴリズム』, 統計数理研究所, 2009 年 3 月 26 日

張 艾玲, 林 俊介, ``CDT 制約をもつ二次分数計画問題に対する一般化ニュートン法'', 日本オペレーションズ・リサーチ学会 (2008 年秋季研究発表会), 札幌コンベンションセンター, 2008 年 9 月 11 日

林 俊介, Zhi-Quan Luo, ``DSM 通信に対する FDMA 最適性とそれに基づいた解法'', RIMS 研究集会「21 世紀の数理計画: 最適化モデルとアルゴリズム」, 京都大学数理解析研究所, 2008 年 7 月 24 日

林 俊介, ``DSM 通信に対する最適化理論の適用'', 日本オペレーションズ・リサーチ学会 (計算と最適化・未来を担う研究者の集い),

筑波大学, 2008 年 5 月 31 日

林 俊介, ``DSM 通信における重みつき総レートの最大化'', 2008 年度第 4 回情報学若手コロキウム, 京都大学, 2008 年 5 月 29 日

林 俊介, Soon-Yi Wu, ``二次錐制約をもつ半無限計画問題に対する解法'', 第 52 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI'08), 京都情報大学院大学京都駅前校, 2008 年 5 月 18 日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

受賞

2010 年 3 月 日本オペレーションズ・リサーチ学会 第 5 回文献賞奨励賞

2008 年 6 月 日本オペレーションズ・リサーチ学会「計算と最適化・未来を担う研究者の集い」最優秀発表賞

<http://www.orsj.or.jp/whatisor/award.html>

ホームページ等

<http://www-optima.amp.i.kyoto-u.ac.jp/~hayashi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 俊介 (HAYASHI SHUNSUKE)

京都大学・大学院情報学研究科・助教

研究者番号: 20444482

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: