

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：62603

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560490

研究課題名(和文) 通信路容量と確率測度の最適化

研究課題名(英文) Communication channel capacity and optimization of probability measure

研究代表者

池田 思朗 (Ikeda, Shiro)

統計数理研究所・数理・推論研究・准教授

研究者番号：30336101

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：通信路容量は情報伝達の能力を示す重要な量である。入出力として連続値をとる通信路では、通信路容量は、適当な制約の下における確率測度の最適化問題の解として定義される。また、最適値を与える入力確率分布は、最適変調方式の分布を与える。実際に用いられている無線通信などの通信路も連続値をとるため、本研究では、現実的に重要な瞬間最大電力を制約として考えた上で最適化問題を解き、最適変調方式を計算した。この結果、実際の変調方式を設計するための理論的な指針を与えることができた。さらに、通信路容量と双対な関係にあるレート歪関数の問題にも研究を広げ、新たな特徴を持つレート歪関数の例を示すことに成功した。

研究成果の概要(英文)：Communication channel capacity is an important quantity in communication theory. When the input and output of a channel are continuous, capacity is defined as the supremum of the mutual information over the input probability measure under proper constraints. And the input probability distribution which attains the optimum gives the optimal modulation. Because the channel of the mobile communication is continuous, we have considered realistic peak power constraints, and solved the optimization problem in order to reveal the distribution of the optimal modulation. Our results provide a theoretical guide for the modulation design in communication system. We also extended our results for the analysis of the rate-distortion function, which is defined as the dual of the channel capacity optimization problem, and showed an example of the function with a new type of characteristic.

研究分野：情報理論

キーワード：通信路容量 変調方式 レート歪関数

1. 研究開始当初の背景

雑音のある通信路を介した通信において、一回の送信あたりに送ることのできる情報量の上限が通信路容量である。通信路の入出力が連続値をとる場合、通信路容量は適当な制約の下での確率測度の最適化問題の最適値として定義される。最適値となる通信路容量を達成する入力確率分布は、通信に用いる最適な変調方式を与えるものである。しかし、通信路容量の議論と変調方式の議論は通信工学の分野では十分には結び付けられていなかった。

2. 研究の目的

情報理論の基礎となる通信路容量に関する主な理論では、通信路への入力に対し、平均電力制約など理想的な条件下で通信路容量を考えてきた。しかし、実際のデジタル通信では平均電力だけではなく、瞬間最大電力など他の制約を考える必要がある。そうした制約の下では、たとえ入力として連続値が許容されていても、通信路容量を達成する送信分布が有限個の孤立点からなる離散分布となることが示されていた。離散分布は連続分布よりも工学的に実現が容易であることから、こうした結果は理論的にも実用上にも重要である。

こうした研究結果は申請当時、国内ではあまり知られていなかった。池田はすでに特定領域計画研究の中で、神経細胞の通信路容量を求める研究を行っており、こうした研究を深く理解していた。

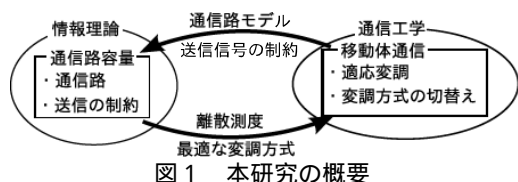


図1に本研究の概要を示す。本研究の目的は、こうした理論的結果をデジタル通信の変調方式の設計と結びつけ、効率の良い通信方式を実現するための理論的基盤を築くことにある。

デジタル通信、特に携帯端末などの移動体の通信では、低い消費電力で多くの情報を効率良く伝達することが以前にも増して求められている。通信路は移動体の位置や速度によって時々刻々と変化し、周波数帯や気候によっても大きく性質を変える。携帯端末で用いられている適応変調方式は、通信路の状態を適切に把握し、状態に応じて複数の変調方式を適切に切り替える技術であり、すでに実用化されている。しかし、方式の設計では数値実験を通じて決定される部分が大きく、情報理論からのさらなる寄与が求められる。

本研究では、現実に即した通信路と制約について通信路容量の理論を展開し、その結果を適応変調の設計といった問題を通して、通

信工学への応用につなげることを考える。本研究では、現実的な通信路に対して実際に必要とされる制約を考え、通信路容量の値、そしてそれを実現する送信分布に関する理論を構築する。そして、そこで得られた理論的研究の結果を最適な変調方式の設計に生かす。特に、最適な適応変調方式に向けた理論的知見の確立を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、確率測度の最適化の観点から情報理論の通信路容量に関する理論的側面を研究し、通信工学の適応変調方式の設計に関する応用を目指す。理論的な面に関しては、情報幾何と最適化理論からの観点を中心に研究を進める。

通信路容量を達成する最適な入力分布が多く通信路と制約の下で離散測度となることは、いくつかの文献には示されている。こうした結果は応用の面では重要な結果である。会議や論文誌を通じて発表し、こうした結果を広く理解されるよう努力する。また、移動体で用いられる適応変調方式への定量的な提言をするため、研究分担者と実際の通信路のモデル、そしてシステムで必要となる制約に関して議論を重ね、現実に即した理論の構築を目指す。研究会などを通じて口頭発表し、誌面での発表も行なう。

4. 研究成果

実際の通信システムで消費電力を抑えるためには、平均出力よりも瞬間出力を制約することの方が重要である。そこで、加法的正規雑音の通信路において、瞬間出力制約の下で通信路容量を求めた。通信路容量を達成する入力の分布は離散分布となり、適応変調方式で用いられている変調方式と類似している。通信路容量と実際に用いられている変調方式で達成できるスループットとを比較することにより、適応変調において変調方式を切り替えるタイミングを適切に設定すれば、通信路容量に迫るスループットを達成できることが数値的に示された。

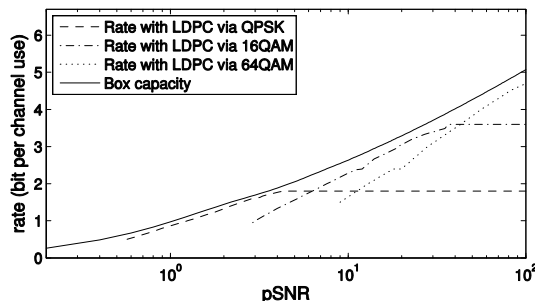


図2 瞬間出力制約下での通信路容量と適応変調で用いられる変調方式で達成できるスループット

この結果は、学会発表や紙面を通じて発表した。招待講演を依頼されていることからもわかるように、現在では情報理論や通信理論の学会でもその重要性が理解されるように

なった。

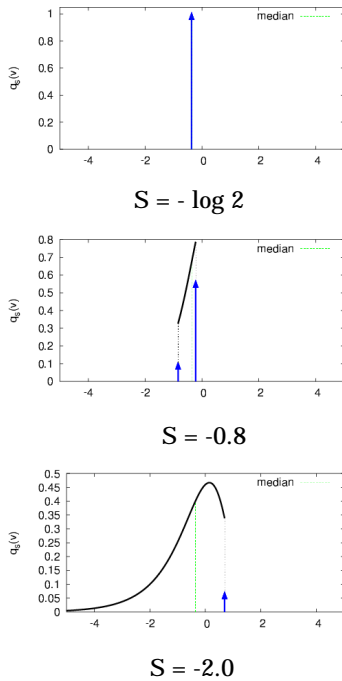


図3 最適な出力分布の変化

(Watanabe, Ikeda ISIT 2013)

されるサポートが変化することを示した。この新たな特徴を持つレート歪関数の結果については、国内の情報理論の研究会である第35回情報理論とその応用シンポジウム(SITA)(2012年)で発表を行い、口頭発表を行った筆頭著者の渡辺一帆氏はSITA奨励賞を受賞した。

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 8 件)

K. Watanabe and S. Ikeda, Entropic risk minimization for nonparametric estimation of mixing distributions, *Machine Learning*, 査読有, Vol.99, 2014, pp.119-136, DOI: 10.1007/s10994-014-5467-7

川田渡, 林和則, 金子めぐみ, 島本拓実, 酒井英昭, アレーアンテナと自己干渉波キャンセラを用いた無線パケット衝突検出法, *信学技報*, 査読無, RCS2013-113, 2013, pp.89-94

K. Watanabe and S. Ikeda, Rate-distortion function for gamma sources under absolute-log distortion measure, *Proceedings of the 2013 IEEE International Symposium on Information Theory*, 査読有, 2013, pp. 2557-2561, DOI: 10.1109/ISIT.2013.6620688

川田渡, 林和則, 金子めぐみ, 島本拓実,

酒井英昭, 自己干渉波キャンセラを用いた無線パケット衝突検出法, *信学技報*, 査読無, RRRC2013-02, 2013, pp.1-6
山浦寛史, 金子めぐみ, 林和則, 酒井英昭, 離散階層変調方式を用いたマルチユーザ環境のための無線中継伝送法, *信学技報*, 査読無, RCS2012-117, 2013, pp.213-218

渡辺一帆, 池田思朗, Rate-distortion function for gamma sources under absolute-log distortion, 第35回情報理論とその応用シンポジウム予稿集, 査読無, 2012, pp.425-430

池田思朗, 竹内純一, Bregman 情報量を損失としたベイズリスクに関する考察, 第35回情報理論とその応用シンポジウム予稿集, 査読無, 2012, pp.263-268

K. Watanabe and S. Ikeda, Convex formulation for nonparametric estimation of mixing distribution, *Proceedings of 5th WITMSE*, 査読有, 2012, pp.36-39

〔学会発表〕(計 18 件)

池田思朗, 通信路容量と測度の最適化, 第37回情報理論とその応用シンポジウム, 2014年12月9~11日, 宇奈月ニューオータニホテル(富山県・黒部市)

K. Hayashi, M. Sakai, T. Kamenosono, and M. Kaneko, Compressed sensing based channel estimation for uplink OFDMA systems, *APSIPA ASC 2014*, 2014年12月9~12日, Siem Reap (Cambodia)

S. Ikeda, Optimization of probability measure and information geometry, 機械学習における情報幾何学的視点, 2014年12月3~5日, 理化学研究所(埼玉県・和光市)

福本浩之, 林和則, Faster-Than-Nyquist 信号伝送のためのオーバーラップ処理を用いた周波数領域等化, 2014信号処理シンポジウム, 2014年11月12~14日, ビナリオ嵯峨嵐山(京都府・京都市)

林和則, 池田思朗, 田中利幸, ピーク電力制約下の達成可能レートとその適応変調符号化への応用, 電子情報通信学会CQ研究会(招待講演), 2014年9月11~12日, 河北総合センター(宮城県・石巻市)
S. Ikeda, K. Hayashi, and T. Tanaka, Channel capacity and achievable rates of peak power limited AWGNC, and their applications to adaptive modulation and coding, 2014 ISITA, 2014年10月26~29日, Melbourne (Australia)

S. Ikeda, Optimization of probability measures and information geometry, 2nd International Workshop on Information Geometry and Affine

Differential Geometry (招待講演), 2014年4月11~12日, 上海(中国)
川田渡, 林和則, 金子めぐみ, 島本拓実, 酒井英昭, アレーアンテナと自己干渉波キャンセラを用いた無線パケット衝突検出法, 電子情報通信学会 RCS 研究会, 2013年12月18~20日, 高松市文化芸術ホール(香川県・高松市)

W. Kawata, K. Hayashi, M. Kaneko, T. Shimamoto, and H. Sakai, Wireless packet collision detection using self-interference canceller, 2013 APSIPA Annual Summit and Conference, 2013年10月29日~11月1日, Kaohsiung (Taiwan)

S. Ikeda, Optimization of probability measure and its applications in information theory, 6th WITMSE (招待講演), 2013年8月26~29日, 東京大学(東京都・文京区)

K. Watanabe and S. Ikeda, Rate-distortion function for gamma sources under absolute-log distortion measure, 2013 IEEE ISIT, 2013年7月7~12日, Istanbul (Turkey)

川田渡, 林和則, 金子めぐみ, 島本拓実, 酒井英昭, 自己干渉波キャンセラを用いた無線パケット衝突検出法, 電子情報通信学会 RRRC 研究会, 2013年5月16~17日, 京都大学(京都府・京都市)

山浦寛史, 金子めぐみ, 林和則, 酒井英昭, 離散階層変調方式を用いたマルチユーザ環境のための無線中継伝送法, 電子情報通信学会 RCS 研究会, 2013年1月31日~2月1日, ビューポートくれ(広島県・呉市)

渡辺一帆, 池田思朗, Rate-distortion function for gamma sources under absolute-log distortion, 第35回情報理論とその応用シンポジウム, 2012年12月11~14日, 別府湾ロイヤルホテル(福岡県・速見郡日出町)

池田思朗, 竹内純一, Bregman 情報量を損失としたベイズリスクに関する考察, 第35回情報理論とその応用シンポジウム, 2012年12月11~14日, 別府湾ロイヤルホテル(福岡県・速見郡日出町)

S. Ikeda and J. Manton, Channel capacity of a spiking neuron, 10th International Neural Coding Workshop, 2012年9月2~7日, Prague (Czech Republic)

K. Watanabe and S. Ikeda, Convex formulation for nonparametric estimation of mixing distribution, 5th WITMSE, 2012年8月27~30日, Amsterdam (Netherlands)

H. Yamaura, M. Kaneko, K. Hayashi, and H. Sakai, Superposition coding scheme for wireless relay systems with

adaptive modulation and coding, IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium, 2012年4月23~24日, 京都大学(京都府・京都市)

〔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〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池田 思朗 (IKEDA, Shiro)
統計数理研究所・数理・推論研究系・准教授
研究者番号: 30336101

(2) 研究分担者

林 和則 (HAYASHI, Kazunori)
京都大学・情報学研究科・准教授
研究者番号: 50346102