

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04148

研究課題名(和文) 劣決定線形観測に基づく離散値ベクトルの再構成

研究課題名(英文) Discrete-Valued Vector Reconstruction from Underdetermined Linear Measurements

研究代表者

林 和則 (Hayashi, Kazunori)

京都大学・国際高等教育院・教授

研究者番号：50346102

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：MIMO通信の性能解析に使用されるCGMT (convex Gaussian min-max theorem)による手法を適用し、劣決定線形観測からのSOAV (sum-of-absolute-value) 最適化に基づく離散値ベクトル再構成の理論的な性能解析を行い、大システム極限におけるシンボル誤り確率や平均二乗誤差を導出することに成功した。また、SOAV最適化を拡張することで、複素の離散値ベクトルの再構成やグループスパース性を考慮した複素離散値ベクトルの再構成手法も新たに開発した。さらに、非凸の正則化項を採用することで大幅な特性改善を達成し、IoT環境での有効性を計算機実験により確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

圧縮センシングは多くの信号のもつスパース性を利用することで、その次元よりも少ない線形観測から実際に観測された信号を再構成する手法であり、すでに多くの分野で利用されている。本研究はその適用範囲をさらに拡大するものであり、信号が離散性を有する場合にも圧縮センシングと同様に信号の次元よりも少ない線形観測から未知ベクトルを再構成できるアルゴリズムを開発し、さらにその理論限界を明らかにしている点で学術的な意義がある。また、特に情報通信分野で扱われる信号は複素領域の離散性を有するため、益々重要度を高めつつある情報通信システムの性能改善に直接つながるといふ点で社会的な意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：By using the performance analysis scheme with CGMT (convex Gaussian min-max theorem) for MIMO signal detection, we have successfully derived the asymptotic theoretical performance of the signal reconstruction via SOAV (sum-of-absolute-value) optimization from underdetermined linear measurements, such as symbol error rate or mean-square-error. Moreover, we have developed the reconstruction algorithms for complex-valued discrete signals or the signals with group sparsity. Furthermore, by employing non-convex sparse regularization term, we have significantly improved the reconstruction performance of discrete and/or sparse signals, and have demonstrated the validity of the proposed approach via computer simulations of data collection from large number of IoT terminals.

研究分野：信号処理

キーワード：劣決定線形観測 スパース性 離散性 グループスパース性 非凸最適化 圧縮センシング スパースモデリング IoT

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

線形観測に基づく信号の再構成は、工学の様々な分野に現れる基本的かつ重要な問題である。具体的には、未知の n 次元ベクトル x に対し、ある既知の行列 A を用いた線形観測によって m 次元の観測ベクトル $y = Ax$ が得られたときに、 y と A から x を求める問題である。すなわちこれは未知変数が n 個、式の数が m 個の連立一次方程式であり、 $m \geq n$ であれば(殆どの場合)一意に x が定まるが、 $m < n$ (劣決定) のときには方程式を満足する x が無数に存在し、“真の解”が定まらない(数学的には方程式を満足する x は全て正しい解であるが、再構成の問題では実際に観測された x を“真の解”として特定する必要がある)。

圧縮センシング^①は、 x の成分のほとんどが 0 (スパース) であることが事前に分かっている場合に、劣決定の線形観測からその再構成を可能にする数理的枠組みである。大まかには、 x の非零要素が高々 k 個 (k -スパース) のとき、 A に対するある条件の下で、 $m \geq 2k \cdot \log(n/k)$ の観測数があれば、 $m < n$ であっても計算量的に実行可能なアルゴリズムで“真の解”を求めることが出来る、というものである。圧縮センシングは、その問題設定が基本的であることから、登場から約 10 年が経過した現在、様々な分野で応用が進められている。

我々は平成 27 年度から 3 年間の基盤研究 (C) において、離散値ベクトルの現実的な再構成法と通信システムの様々な問題への応用について検討してきた。特に、圧縮センシングの 1 ノルム最小化のアイデアを拡張した SOAV (sum-of-absolute-value) 最適化に対して、凸最適化分野の最近の手法である近接分離法や確率推論に基づく近似メッセージ伝搬法 (AMP) を適用することで、従来の手法では手出しができなかったような設定やサイズの問題に対して現実的な解法を与えることに成功した。これより、離散性を直接的に利用した信号再構成が、信号処理の新しいパラダイムを創出可能な極めて強力なアプローチであると確信するに至った。一方、再構成の限界や精度保証に関する理論解析はほとんど例がなく、また、情報通信システムなどの実際の応用問題に適用するためのアルゴリズムの開発も十分ではなかった。

2. 研究の目的

以上の背景より、圧縮センシングのアイデアに基づく SOAV 最適化による離散値ベクトル再構成について、その理論的な性能限界を明らかにすることを本研究の目的とする。さらに、離散値ベクトルが多く現れ、また社会的なニーズも大きい情報通信システムへの適用を考慮し、複素の離散値ベクトルの再構成アルゴリズムの開発や、MIMO (multi-input multi-output) 通信や IoT (internet of things) 環境に適した再構成アルゴリズムの開発、性能改善についても検討する。

3. 研究の方法

(1) SOAV 最適化による信号再構成の理論性能解析

上述のように凸最適化を利用した離散値ベクトル再構成の理論性能解析は、特定のアルゴリズムを想定した場合を除いて、これまでほとんどなされていなかった。我々は線形観測からの離散値ベクトル再構成問題と無線通信の MIMO 信号検出問題の類似性に着目し、2018 年に Hassibi らのグループによって提案された MIMO 信号検出性能の理論解析のアプローチを利用して、離散値ベクトル再構成の理論性能解析を行うことを検討した。このアプローチでは未知変数の有界性を利用するため、SOAV 最適化において未知ベクトルの各成分の取りうる範囲を Box 制約によって制限した Box-SOAV 最適化について考察した(実際の通信の信号も有界であるため、これによって実用上一般性を失わない)。さらに、CGMT(Convex Gaussian Min-max Theorem)と呼ばれる定理を利用して、線形観測における観測行列に関するある条件の下で Box-SOAV 最適化で得られる推定値の漸近的な誤差や誤り率特性を評価した。

(2) スパース性およびグループスパース性をもつ複素離散信号再構成アルゴリズムの開発

我々がこれまでに開発した SOAV 最適化に基づく離散値信号再構成アルゴリズムは、そこで採用した最適化手法の制約のために、実数信号のみが利用可能なアルゴリズムであった。このため、情報通信システムへの適用を考えると、QPSK や 16QAM など、実部と虚部が独立なベースバンド変調方式の信号には適用可能であるが、8PSK や APSK などには適用できないという制限があった。そこで、複素数の信号に対して、複素数領域の離散性を直接的に利用可能なアルゴリズムを新たに開発した。また、OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) などのブロック伝送方式を採用した IoT 環境では、非アクティブ端末は全てのサブキャリアの送信信号が同時に 0 になるという性質があり、これは送信信号ベクトル(未知ベクトル)のグループスパース性と呼ばれる性質と解釈されるため、複素ベクトルの再構成アルゴリズム開発の知見を利用して、グループスパース性をもつ複素離散信号再構成のアルゴリズムを開発した。さらに、これらの信号検出法では最適化問題中のパラメータを各シンボルの生起確率の情報に基づいて決定

する必要があり、これまでその確率を一樣であることを仮定していたが、一度推定値が得られるとその結果を用いてより適切な生起確率を求めることができる。このアイデアに基づいてパラメータを更新しながら再構成を行う繰り返しアルゴリズムを開発した。

(3) 非凸スパース正則化関数を利用した離散値信号再構成アルゴリズムの開発

SOAV 最適化に基づく離散値信号再構成アルゴリズムやそれを複素領域に拡張したアルゴリズム、及びグループスパース性を導入したアルゴリズムでは、離散正則化項に凸の正則化関数（特に L_1 正則化関数）を利用してきた。凸の正則関数を利用すると凸最適化アルゴリズムを利用することで最適解が得られる保証がある一方で、例えば-1 と 1 の2値の信号を送信する際に-1 と 1 の間の値には全て同じペナルティを与えてしまう（つまり-1 や 1 に値を誘導する効果がない）という問題がある。一方、一般の非凸の正則化関数を考えると最適化問題を解くためのアルゴリズムの実装が困難になるため、形式的な近接作用素が容易に計算可能な非凸正則化関数として L_0 ノルム、 $L_{1/2}$ ノルム、 $L_{2/3}$ ノルム、 L_1 - L_2 差分の4通りを考え、ADMM (Alternating Direction Method of Multipliers)に基づく凸最適化アルゴリズムを利用してこの最適化問題を解く手法を開発した。更にグループスパース正則化項に対しても、これらの非凸正則化関数を適用することも検討した。

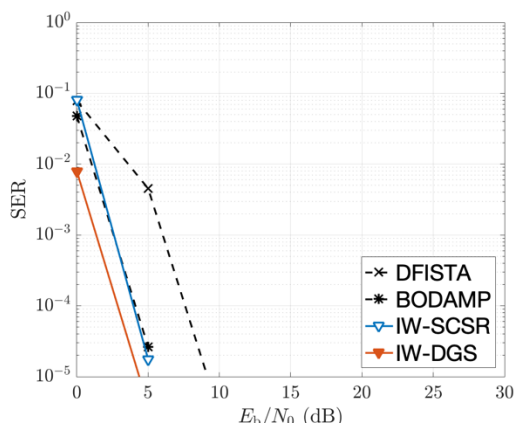
4. 研究成果

(1) SOAV 最適化による信号再構成の理論性能解析

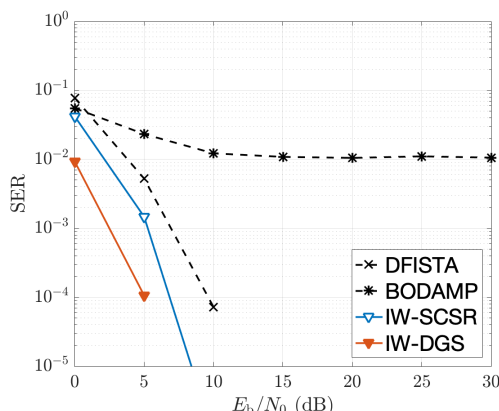
SOAV 最適化および Box-SOAV 最適化による離散値信号再構成性能を数値実験により評価し、その結果を理論解析結果と比較した。その結果、SOAV 最適化と Box-SOAM 最適化による再構成性能はほぼ同一と言ってよく、また再構成の問題サイズが十分に大きい場合には CGMT に基づく理論解析結果から予想される理論的な性能と数値結果が近いことが確認された。理論解析では Box-SOAM 最適化によって得られる推定値の漸近分布を導出しており、その結果を用いて硬判定値を得る際の量子化の最適化を実現した。これにより、素朴な量子化によって判定する場合に比較して特性を改善可能であることを明らかにした。

(2) スパース性およびグループスパース性をもつ複素離散信号再構成アルゴリズムの開発

複素領域のアルゴリズムの開発により、これまで扱うことが出来なかった実部と虚部が独立でない変調方式の信号を扱えるようになったことは勿論メリットであるが、もう一つ想定していなかった大きなメリットが得られることが明らかとなった。IoT 端末からの信号伝送と通常の MIMO 信号伝送の最も大きな違いの一つは、IoT の通信の場合には、多くの送信端末が非アクティブになるという性質である。非アクティブの端末は信号 0 を送信していると解釈することが出来るが、この場合、信号の実部が 0 であると（つまり非アクティブであると）、かならず虚部も 0 になるという性質がある。複素領域の信号検出アルゴリズムを利用するとこの性質を効果的に利用することができ、非アクティブ端末が存在する場合に大幅な特性改善が得られることがわかった。また、IoT 環境で同時にアクティブになる端末が少ない場合には、グループスパース性を利用することで、さらに特性を改善可能であることを計算機実験により確認した。例として、図1(a), (b)に提案法を利用したときの大システムおよび小システムにおけるSER (Symbol Error Rate) 特性を示す(SER は小さいほど特性が良いことを意味する)。これより、実数領域のアルゴリズム (DFISTA, BODAMP) に比べて、複素領域のアルゴリズム (IW-SCSR) は良好な特性を達成していることが分かる。さらにこの条件ではグループスパース性を利用したアルゴリズム (IW-DGS) によりさらなる特性改善が得られている。



(a) 受信アンテナ数：60, IoT 端末数：80, アクティブ端末数：10

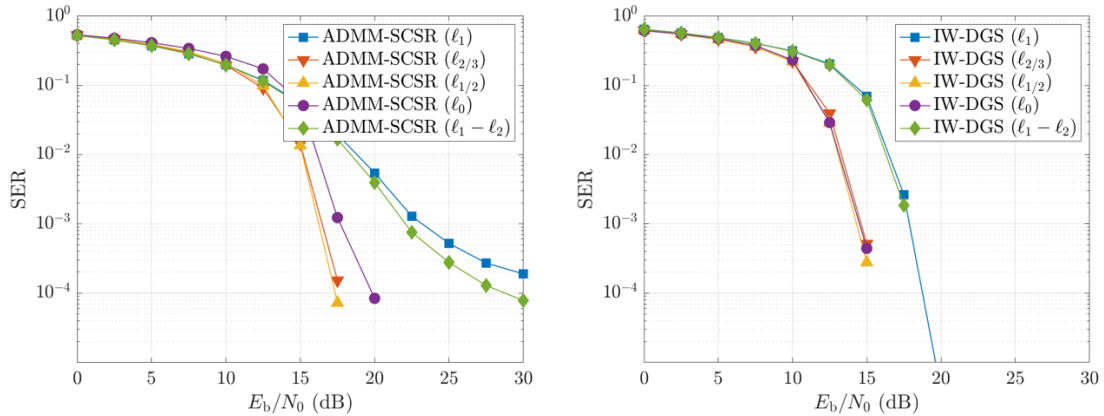


(b) 受信アンテナ数：6, IoT 端末数：8, アクティブ端末数：1

図 1. : MU-MIMO SC-CP 受信信号に対して実数領域の提案方式 (DFISTA, BODAMP), 複素領域の提案法 (IW-SCSR), 及びグループスパース性を利用した提案法 (IW-DGS) を用いたときの SER 特性

(3) 非凸スパース正則化関数を利用した離散値信号再構成アルゴリズムの開発

非凸正則化関数を利用したアルゴリズムを IoT 環境におけるデータ収集問題に適用したときの特性を計算機実験により評価した。その結果、グループスパース性やパラメータ更新を伴う繰り返し検出を利用しない場合は、 $L_{1/2}$ ノルムおよび $L_{2/3}$ ノルムによって大幅な特性改善が得られることが分かった。また、グループスパース性やパラメータ更新を伴う繰り返し検出を利用する場合は、 L_0 ノルム、 $L_{1/2}$ ノルムおよび $L_{2/3}$ ノルムによる離散正則化によって大きな特性改善が得られた。一方、離散正則化項への非凸正則化関数の導入とは異なり、グループスパース項に非凸スパース正則化関数を導入した場合には、特性の改善が見られず、上で述べた特性改善は離散正則化項に特有の性質であることが示唆された。特性例として、図 2(a), (b) にグループスパース性やパラメータ更新を伴う繰り返し検出を利用しない場合と利用する場合の SER 特性を示す。これより、凸の正則化関数を利用する場合 (l_1 と記載, 図中青色の線) に比べて非凸の正則関数を利用することで大幅な特性改善が得られていることが分かる。



(a) グループスパース性やパラメータ更新を伴う繰り返し検出を利用しない場合

(b) グループスパース性やパラメータ更新を伴う繰り返し検出を利用する場合

図 2. : OFDM 方式の過負荷信号に対して非凸離散正則化を用いて信号検出をしたときの, E_b/N_0 に対する SER 特性 (受信アンテナ数: 6, IoT 端末数: 8, アクティブ端末数: 7)

<引用文献>

① E. J. Candes and T. Tao, "Decoding by linear programming," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 51, no. 12, pp. 4203-4215, Dec. 2005.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 A. Nakai-Kasai and K. Hayashi	4. 巻 vol. 7, no. 1
2. 論文標題 Diffusion LMS based on Message Passing Algorithm	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 47022-47033
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2019.2909775	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 R. Hayakawa and K. Hayashi	4. 巻 vol. 22, no. 10
2. 論文標題 Discreteness-Aware Decoding for Overloaded Non-Orthogonal STBCs via Convex Optimization	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Communications Letters	6. 最初と最後の頁 2080-2083
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LCOMM.2018.2866446	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 -
1. 著者名 R. Hayakawa and K. Hayashi	4. 巻 vol. 66, no. 24
2. 論文標題 Discreteness-Aware Approximate Message Passing for Discrete-Valued Vector Reconstruction	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Signal Processing	6. 最初と最後の頁 6443-6457
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TSP.2018.2877170	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 -
1. 著者名 R. Hayakawa and K. Hayashi	4. 巻 vol. 6, no. 1
2. 論文標題 Reconstruction of Complex Discrete-Valued Vector via Convex Optimization with Sparse Regularizers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 66499-66512
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2018.2878886	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hayakawa Ryo, Nakai-Kasai Ayano, Hayashi Kazunori	4. 巻 9
2. 論文標題 Discreteness and group sparsity aware detection for uplink overloaded MU-MIMO systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 APSIPA Transactions on Signal and Information Processing	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/ATSIP.2020.19	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hayakawa Ryo, Hayashi Kazunori	4. 巻 68
2. 論文標題 Asymptotic Performance of Discrete-Valued Vector Reconstruction via Box-Constrained Optimization With Sum of L1 Regularizers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Signal Processing	6. 最初と最後の頁 4320 ~ 4335
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TSP.2020.3011282	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 -

1. 著者名 NAKAI-KASAI Ayano, HAYASHI Kazunori	4. 巻 E104.B
2. 論文標題 An Acceleration Method of Sparse Diffusion LMS based on Message Propagation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 141 ~ 148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transcom.2020EBT0001	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21件(うち招待講演 0件/うち国際学会 9件)

1. 発表者名 R. Hayakawa, K. Hayashi
2. 発表標題 Performance Analysis of Discrete-Valued Vector Reconstruction based on Box-Constrained Sum of L1 Regularizers
3. 学会等名 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Hayakawa, K. Hayashi
2. 発表標題 Discrete-Valued Vector Reconstruction by Optimization with Sum of Sparse Regularizers,
3. 学会等名 European Signal Processing Conference (EUSIPCO2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 早川 諒, 林 和則
2. 発表標題 非凸最適化に基づく離散値ベクトル再構成アルゴリズム
3. 学会等名 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Hayashi, A. Nakai, R. Hayakawa
2. 発表標題 An Overloaded SC-CP IoT Signal Detection Method via Sparse Complex Discrete-Valued Vector Reconstruction
3. 学会等名 2019 APSIPA Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Hayashi, K. Shiohara, T. Sasaki
2. 発表標題 Differentiable Programming based Step Size Optimization for LMS and NLMS Algorithms
3. 学会等名 2019 APSIPA Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中井彩乃, 林 和則
2. 発表標題 合意伝搬法を用いたスパース拡散LMSアルゴリズム
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 2020年

1. 発表者名 早川 諒, 中井彩乃, 林 和則
2. 発表標題 離散性とグループスパース性を利用した上りリンク過負荷MU-MIMO OFDM信号検出法に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Nakai, K. Hayashi
2. 発表標題 An Adaptive Combination Rule for Diffusion LMS based on Consensus Propagation
3. 学会等名 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Hayakawa, K. Hayashi
2. 発表標題 Distributed Approximate Message Passing with Summation Propagation
3. 学会等名 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 早川 諒, 林 和則
2. 発表標題 過負荷非直交STBCのための凸最適化を用いた復号法
3. 学会等名 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 早川 諒, 林 和則
2. 発表標題 スパース正則化を用いた凸最適化に基づく複素離散値ベクトル再構成
3. 学会等名 電子情報通信学会第33回 信号処理シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Hayashi, A. Nakai, R. Hayakawa, S. Ha
2. 発表標題 Uplink Overloaded MU-MIMO OFDM Signal Detection Methods using Convex Optimization
3. 学会等名 APSIPA Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 早川 諒, 林 和則
2. 発表標題 スパース正則化項の和を用いた複素離散値ベクトル再構成
3. 学会等名 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中井彩乃, 早川 諒, 林 和則
2. 発表標題 凸最適化を用いた上りリンク過負荷MU-MIMO SC-CP信号検出法
3. 学会等名 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中井彩乃, 林 和則
2. 発表標題 スパース拡散LMSアルゴリズムのメッセージ伝搬に基づく高速化手法
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 2019年

1. 発表者名 中井彩乃, 早川 諒, 林 和則
2. 発表標題 離散性とグループスパース性を利用したIoT環境のための上りリンク過負荷MU-MIMO OFDM/SC-CP信号検出法
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林 和則, 早川 諒, 中井彩乃
2. 発表標題 信号の離散性を利用した過負荷信号処理
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 2019年

1. 発表者名 林 和則, 早川 諒, 中井彩乃
2. 発表標題 離散性とスパース性を利用した無線通信のための過負荷信号処理
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 2020年

1. 発表者名 K. Hayashi, A. Nakai, A. Hirayama, H. Honda, T. Sasaki, H. Yasukawa, R. Hayakawa
2. 発表標題 An Overloaded IoT Signal Detection Method using Non-convex Sparse Regularizers
3. 学会等名 APSIPA Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Nakai-Kasai and K. Hayashi
2. 発表標題 Optimal Combination Weight for Sparse Diffusion Least-Mean-Square based on Consensus Propagation
3. 学会等名 APSIPA Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中井彩乃, 平山敦也, 本多弘樹, 佐々木哲也, 安川秀希, 早川 諒, 林 和則
2. 発表標題 非凸スパース正則化とグループスパース性を用いた過負荷MU-MIMO OFDM/SC-CP信号検出法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会
4. 発表年 2020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
---------	---------