

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：24403  
研究種目：基盤研究(C)（一般）  
研究期間：2017～2020  
課題番号：17K06435  
研究課題名（和文）Massive MIMO高密度ネットワークに関する研究

研究課題名（英文）Massive MIMO in Dense Networks

研究代表者

林海（Lin, Hai）

大阪府立大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：40336805

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：次世代無線通信システムにおいて、超多素子アンテナを利用したMassive MIMOとスモールセルから構成される高密度ネットワークは重要な無線アクセス技術である。本研究はMassive MIMO高密度ネットワークに適したシステムモデルを導入し、カバレージ確率に基地局密度や基地局アンテナ数をもたらす影響を考察した。また、パイロット再利用を起因としたパイロット干渉がMassive MIMOダウンリンク性能にもたらす影響も分析した。その上で、Massive MIMOダウンリンク伝送を対象に、角度域でのビームフォーミング技術に基づき、様々な通信シナリオに対して有効なプレコーディング方法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Massive MIMOと高密度ネットワークは次世代無線通信システムのコア技術である。本研究はMassive MIMO高密度ネットワーク設計の理論根拠を解明し、また現実的なシナリオと経済性を考慮したダウンリンク伝送方法を示すものである。本研究の結果により、超多素子アンテナと高密度ネットワーク両者のポテンシャルを活かせる無線システムを構築することができ、次世代超大容量無線通信システム実現に向けて重要な意義がある。

研究成果の概要（英文）：Massive MIMO and dense network consisting of a large number of small cells are two key technologies for the next generation wireless communication systems. In this research, we investigate the impact of the densities of base stations and antennas on the coverage probability of the massive MIMO dense network. We also study the downlink performance of massive MIMO with pilot contamination caused by pilot reuse among neighbor cells. Furthermore, we propose angular domain precoding methods for massive MIMO downlink transmission in various communication scenarios.

研究分野：無線通信

キーワード：Massive MIMO 無線ネットワーク

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

スマートフォン等の高性能かつ多機能な携帯無線通信端末の普及に伴い、移動通信の通信量が爆発的に増大し、また IoT に生じる大規模接続を考慮すると、膨大な通信量に対応できる無線システムの開発は急務でした。通信容量の大幅増加を達成するには、スペクトル効率とネットワーク構成から対策を考えていく必要がある。その中で、基地局やアクセスノード密度の増大即ち高密度ネットワークと超多素子アンテナを利用する Massive MIMO 技術に注目が集まり、両者の長所を生かせる Massive MIMO 高密度ネットワークは、次世代無線システムの開発に重要な研究テーマであった。しかし、Massive MIMO 高密度ネットワークにおける基地局密度や基地局におけるアンテナ数の関係性は解明されていなかった。また、Massive MIMO に適するチャンネル推定やダウンリンクプレコーディングについても性能の良い方法はなかった。

### 2. 研究の目的

Massive MIMO 高密度ネットワークにおける基地局密度と基地局におけるアンテナ数の関係性を評価し、また、Massive MIMO に適するチャンネル推定やダウンリンクプレコーディング方式について、良い方法の提案を目的としている。

### 3. 研究の方法

Massive MIMO は本質上アンテナ素子の高密度化であり、Massive MIMO 高密度ネットワークは実質上二種類の高密度化技術のトレードオフと考えることができる。高密度ネットワークに適したシステムモデルを導入し、カバレッジ確率における基地局密度や基地局におけるアンテナ数の影響を評価する。一方、超多素子アンテナを利用した Massive MIMO の高い空間分解能に着目し、角度域からチャンネル推定とダウンリンクプレコーディング方法を開発する。

### 4. 研究成果

マイクロ波帯の高密度ネットワークにおいては、ニアフィールドとファーフィールドではパスロス指数が変化し、より精度の高い Dual-slope パスロス関数を考慮する必要がある。本研究は、ダウンリンクでの信号対干渉雑音比に Dual-slope パスロスモデルやポアソン点過程を導入し、性能評価指標であるカバレッジ確率の関係式を用いて、カバレッジ確率に対する基地局密度や基地局におけるアンテナ数の影響を分析した。

超多素子アンテナに必要な回路規模が大きく、プレコーディングの一部を位相シフトのみのアナログプレコーディングで実現するハイブリッドプレコーディングは有効なコスト削減策である。本研究は、アレー信号処理の視点から、新たにアナログプレコーディングとデジタルプレコーディングの設計法を開発し、さらにハイブリッド構造における低複雑度のチャンネル推定法を提案した。提案法はチャンネルの基本的な物理特性を活用し、非直角領域からチャンネルを推定し、プレコーディングを設計することによって、高い性能を持ち、マイクロ波とミリ波の高密度ネットワークに適応可能である。

チャンネルコヒーレント時間内に直交するパイロットの個数が限られているため、チャンネル

推定にはパイロット信号の再利用が必要となる。隣接するセル間のパイロット再利用はパイロット干渉問題を引き起こし、特に Massive MIMO 方式においては、アンテナ数を増やしても改善できないため、パイロット干渉が固有な難題とされている。パイロット干渉がある場合、基地局の密度が上がれば、カバレッジ確率の上昇に限度があり、ある一定値を超えたらカバレッジ確率が下がることとなる。上昇する理由としては、高密度になったことにより、基地局とユーザとの距離が縮まり、信号電力が大幅に増加したことが考えられる。ある一定値の閾値を超えるとカバレッジ確率が減少する理由としては、高密度化により干渉となる基地局自体も距離が縮まり、干渉も大きくなると考えられる。すなわち、基地局密度に対してカバレッジ確率が凸関数であることである。他方、周波数リユースは Massive MIMO システムにおけるパイロット干渉対策の一つとして認識されている。周波数リユースファクターを上げれば、カバレッジ確率が増加することも分析からわかった。

セルフリー Massive MIMO システムについて、本研究はアクセスポイントとユーザの両方で低分解能 ADC を有する場合、システム全体の性能を分析し、達成可能なレートの閉形式の表現を導出した。達成可能なレートを目標とした ADC の分解能ビット割り当て方式と電力制御方式を提案した。

広帯域ミリ波通信におけるアンテナアレイの規模拡大に伴い、アレイ全体に渡る電磁波の伝搬遅延は大きくなり、時間領域のサンプル周期に匹敵し、空間広帯域効果として知られる。この場合、OFDM システムの異なるサブキャリアは、同じ伝搬パスの異なる到来角を「認識」することとなる。この効果は、空間広帯域効果から生じるビームスキントと呼ばれ、従来の MIMO モデルに基づくチャネル推定やプリコーディングなどのアプローチが適用できなくなる。本研究は周波数分割複信 (FDD) 広帯域ミリ波 Massive MIMO-OFDM システムにおけるビームスキント効果を考慮した新しいチャネル推定法を提案した。

次世代セルラー IoT ネットワークは膨大な数の IoT デバイスの低電力かつ広範囲の無線接続をサポートする必要がある。しかし、このような大規模な接続によって引き起こされる深刻な同一チャネル干渉は接続の信頼性とカバレッジを低下させる。本研究は、Massive MIMO の一種と見なせる大型インテリジェント反射面 (IRS) のサポートを活用した、チャネル推定と情報伝送を含む大規模接続のフレームワークを提案した。提案したフレームワークの性能分析を行い、IRS の役割を明らかにした。大規模な IRS はエッジデバイスのパフォーマンスを向上させ、それによりカバレッジを拡大した。さらに、反射係数はチャネルの状態とシステムパラメータに応じて慎重に選択する必要があることも解明した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 8件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 R. Jia, X. Chen, C. Zhong, N. Kwan, H. Lin, Z. Zhang	4. 巻 13
2. 論文標題 Design of Non-Orthogonal Beamspace Multiple Access for Cellular Internet-of-Things	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing	6. 最初と最後の頁 538 ~ 552
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JSTSP.2019.2898331	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 該当する
1. 著者名 X. Hu, C. Zhong, X. Chen, W. Xu, H. Lin and Z. Zhang	4. 巻 67
2. 論文標題 Cell-Free Massive MIMO Systems With Low Resolution ADCs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 6844 ~ 6857
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TCOMM.2019.2927450	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 該当する
1. 著者名 F. Zhu, F. Gao, S. Jin, H. Lin, and M. Yao	4. 巻 66
2. 論文標題 Robust Downlink Beamforming for BDMA Massive MIMO System	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Trans. Communications	6. 最初と最後の頁 1496-1507
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TCOMM.2017.2787582	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 該当する
1. 著者名 B. Wang, F. Gao, S. Jin, H. Lin, and G. Y. Li	4. 巻 66
2. 論文標題 Spatial- and Frequency-Wideband Effects in Millimeter-Wave Massive MIMO Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Trans. Signal Process.	6. 最初と最後の頁 3393-3406
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TSP.2018.2831628	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 該当する

1. 著者名 B. Wang, F. Gao, S. Jin, H. Lin, G. Y. Li, S. Sun, and T. S. Rappaport	4. 巻 56
2. 論文標題 Spatial-Wideband Effect in Massive MIMO with Application in mmWave Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Commun. Mag.	6. 最初と最後の頁 134-141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/MCOM.2018.1701051	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 該当する

1. 著者名 Dai Yongyu, Dong Xiaodai, Lin Hai	4. 巻 65
2. 論文標題 Downlink Performance of Pilot-Reused HetNet With Large-Scale Antenna Arrays	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Trans. Communications	6. 最初と最後の頁 2608 ~ 2624
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCOMM.2017.2671349	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 該当する

1. 著者名 Lin Hai, Gao Feifei, Jin Shi, Li Geoffrey Ye	4. 巻 35
2. 論文標題 A New View of Multi-User Hybrid Massive MIMO: Non-Orthogonal Angle Division Multiple Access	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Journal on Selected Areas in Communications	6. 最初と最後の頁 2268 ~ 2280
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JSAC.2017.2725682	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 該当する

1. 著者名 Zhao Jianwei, Gao Feifei, Jia Weimin, Zhang Shun, Jin Shi, Lin Hai	4. 巻 16
2. 論文標題 Angle Domain Hybrid Precoding and Channel Tracking for Millimeter Wave Massive MIMO Systems	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Trans. Wireless Communications	6. 最初と最後の頁 6868 ~ 6880
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TWC.2017.2732405	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 該当する

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 G. Yu, X. Chen, C. Zhong, H. Lin, Z. Zhang
2. 発表標題 Large Intelligent Reflecting Surface Enhanced Massive Access for B5G Cellular Internet of Things
3. 学会等名 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Jia, X. Chen, D. W. K. Ng, H. Lin, and Z. Zhang
2. 発表標題 Design of BeamSpace Massive Access for Cellular Internet-of-Things
3. 学会等名 IEEE International Conference on Communications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Jian, F. Gao, S. Jin, H. Lin, and L. Xing
2. 発表標題 Wideband Channel Estimation for mmWave Massive MIMO System with Off-Grid Sparse Bayesian Learning
3. 学会等名 IEEE Global Communications Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 B. Wang, F. Gao, G. Y. Li, S. Jin, and H. Lin
2. 発表標題 Wideband Channel Estimation for mmWave Massive MIMO Systems with Beam Squint Effect
3. 学会等名 IEEE Global Communications Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 F.Zhu, F.Gao, W.Jia, S.Zhang, S.Jin, H.Lin
2. 発表標題 Angle Space Channel Tracking for Hybrid mmWave Massive MIMO systems
3. 学会等名 IEEE Global Communications Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡本有実子, 林海
2. 発表標題 Dual Slope パスロス伝搬環境を考慮したMIMO 基地局被覆確率
3. 学会等名 2017年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会
4. 発表年 2017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
---------	---------