

令和元年6月12日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06369

研究課題名(和文) 移動通信のためのネットワークMIMO-OFDMによる通信容量拡大に関する研究

研究課題名(英文) Research on system capacity enhancement using network MIMO-OFDM for mobile communications

研究代表者

前原 文明 (MAEHARA, FUMIAKI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：80329101

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、基地局間連携によりセル間干渉(ICI)を効果的に抑圧できるネットワークMIMOに対してOFDMを適用したときの問題点を明らかにするとともに、それを克服できる新たな伝送方式を創出することを目的とする。具体的には、ネットワークMIMO-OFDMが対象とする複数のユーザ間でマルチパス遅延に差異がある場合、マルチパス遅延の小さいユーザにおいて伝送効率の低下が生じる点に鑑み、ユーザへのISIの影響を一部許容し、全ユーザのシステム容量が最大となるようガードインターバル長を適切に設定する方を提案するとともに、その有効性を計算機シミュレーションにより評価する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案するネットワークMIMO-OFDMを対象としたガードインターバル長制御法により、ユーザのマルチパス遅延に差異があっても、全ユーザのシステム容量を常に最大化できることから、第5世代移動通信システム(5G)で求められる技術目標の一つである無線ネットワークの高速・大容量化に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：This research proposes a new transmission scheme to cope with problems in applying OFDM to network MIMO. Considering that network MIMO-OFDM suffers from degradation in the transmission efficiency in the presence of the difference in the multipath delay among multiple mobile terminals, the guard interval (GI) control scheme allowing some amount of inter-symbol interference (ISI) is proposed, which leads to achieving maximum system capacity. Thanks to the proposed approach, system capacity of wireless broadband networks can be further enhanced.

研究分野：無線通信ネットワーク

キーワード：ネットワークMIMO マルチユーザMIMO-OFDM マルチパス遅延 シンボル間干渉 ガードインターバル

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年の高機能携帯端末の急速な普及により、移動通信ネットワークでは、通信トラフィックが年 2 倍ペースで増加し続けている。このようなモバイルトラフィックの急激な増加に対処すべく、(a) 周波数利用効率の向上、(b) 使用周波数帯域幅の拡大、(c) 小セル化、(d) 無線 LAN オフロードといった多角的なアプローチが検討されている。中でも、セル構成の変更や他システムとの連携を必要とすることなくネットワークの通信路容量を増加させることのできる(a)の周波数利用効率の向上は根本的かつ重要な課題と考えられる。

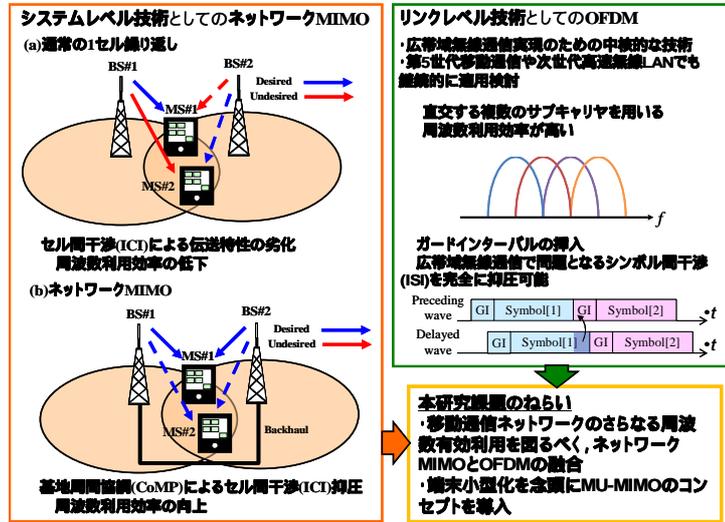


図1 本研究課題のねらい

周波数利用効率向上に資する技術として、システムレベルでは、ネットワーク MIMO が基地局間協調 (CoMP) を必要とするものの、セルエッジにおいて特に深刻となるセル間干渉を完全に抑圧できることから将来性の高いアプローチと考えられ、リンクレベルでは、OFDM が広帯域無線通信の中核的な技術として、引き続き重要と考えられる。特に、ネットワーク MIMO は、基地局が互いに連携し、複数のユーザの無線通信を互いに直交化させるものであり、基地局アンテナ数の増加やセル構成の変更を行うことなく、セル間干渉 (ICI) を抑圧できることから極めて有望である。したがって、図 1 に示すように、システムレベルとリンクレベルにネットワーク MIMO と OFDM をそれぞれ適用することにより、ICI を抑圧したまま、広帯域無線通信の実現を図ることができるものと考えられる。さらに、単一アンテナの端末で複数のユーザの同時伝送を実現できるマルチユーザ MIMO (MU-MIMO) のコンセプトをネットワーク MIMO-OFDM に取り込むことができれば、端末の小型化といった移動通信特有の要求条件を満足しつつ、周波数利用効率の高いシステムの実現が可能となる。

2. 研究の目的

本研究課題では、基地局間連携により ICI を効果的に抑圧できるネットワーク MIMO に対して、端末の小型化を図りつつ、広帯域無線通信を実現できる MU-MIMO-OFDM を適用したときの問題点を明らかにするとともに、それを克服できる新たな伝送方式を創出することを目的とする。具体的には、MU-MIMO-OFDM の適用により、図 2 に示すように、端末の位置によりマルチパス遅延に差異が生じることを明らかにするとともに、ISI が生じるユーザを一部許容して、全ユーザのシステム容量が最大となるようガードインターバル (GI) 長を適切に設定する方式を提案する。本提案方式により、ICI を抑圧できるだけでなく、通常方式において生じるオーバーヘッドを削減できることから、広帯域移動通信ネットワークの通信路容量のより一層の向上が実現できる。

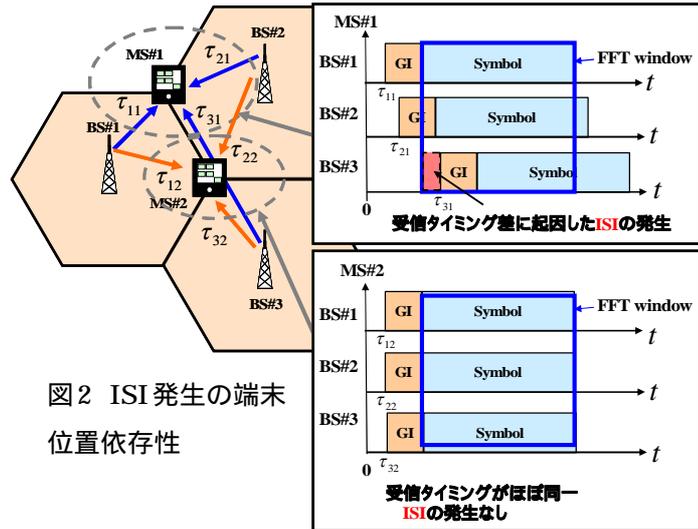


図2 ISI 発生時の端末位置依存性

3. 研究の方法

本章では、2 章の研究目的に必要な研究項目について簡潔に述べる。

(1) MU-MIMO-OFDM を適用した際の ISI の発生機構の把握

ネットワーク MIMO に MU-MIMO-OFDM を適用した際に生じる ISI 発生メカニズムを定性的に検証する。具体的には、複数セル環境を想定し、複数の基地局の送信アンテナから送信された OFDM 信号が、経路長の差に起因して、端末においてどのような受信タイミング差をもって受信されるかについて、セル内の端末位置をパラメータにとって検証する。また、本検証から、複数の基地局からの送信信号の受信タイミング差に起因して生じる ISI がセル内のどのような場所で深刻となるかについて明らかにする。

## (2) システム容量最大化を目指したガードインターバル長制御法の提案と基本特性評価

(1)で検証した ISI 発生メカニズムを踏まえ、それを克服する伝送方式の提案を行うとともに、その有効性を計算機シミュレーションにより評価する。具体的には、ネットワーク MIMO-OFDM が対象とする複数のユーザ間でマルチパス遅延に差異が生じる場合、マルチパス遅延が最も大きいユーザを基準に GI 長の設定を行う通常方式では、マルチパス遅延の小さいユーザにおいて伝送効率の低下が生じることから、ユーザへの ISI の影響を一部許容し、全ユーザのシステム容量が最大となるよう GI 長を適切に設定する方式を提案するとともに、その有効性を全ユーザの中でマルチパス遅延が最も大きいユーザを基準に GI 長の設定を行う通常方式と比較対象にとって、計算機シミュレーションにより評価する。

図3は、提案方式の概念を示したものである。同図に示すように、提案方式は、基地局側において、全ユーザ端末の CSI から GI 長を変化させたときの SINR を相関演算により算出するとともに、それをシステム容量に写像し、最大のシステム容量を達成する GI 長を決定するものである。

図4は、提案方式のシステム構成を示したものである。同図に示すように、基地局送信側では、ユーザ端末からフィードバックされた伝搬路値(CSI)により ISI の影響を受けた信号をユーザ端末毎に仮想的に生成し、それと元の信号との相関演算を行うことにより、システム容量を決定づける SINR を算定する。更に、全体のシステム容量が最大となる GI 長を決定し、それを全ユーザ端末に通知する。MU-MIMO-OFDM 伝送については、プレコーディングされた送信信号を IFFT 処理により時間領域 OFDM 信号に変換した後、基地局送信側で決定した GI 長を付加し、基地局の各送信アンテナから送信する。

一方、受信するユーザ端末側では、通知された長さの GI を受信信号から除去した後、FFT 処理を行うことにより送信データを復調する。

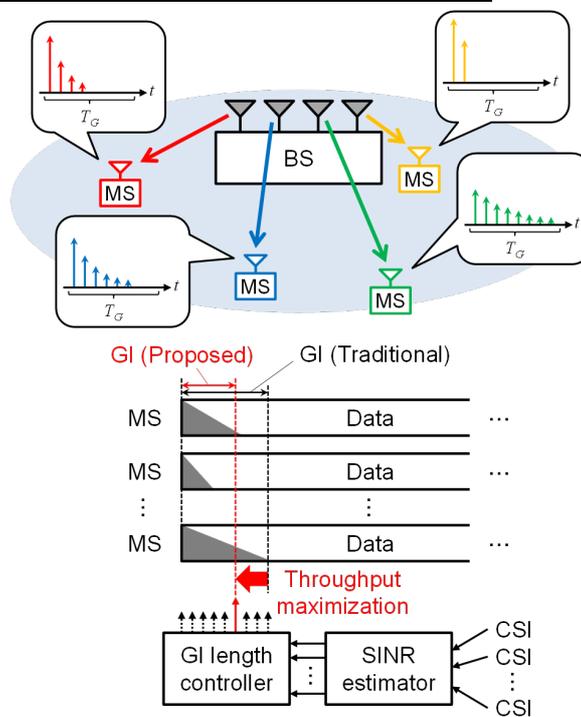


図3 提案方式の概念

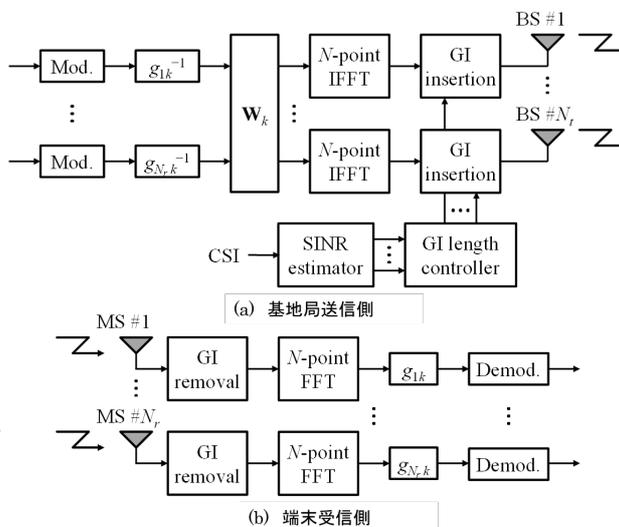


図4 提案方式のシステム構成

### (3) 提案方式のシステムレベル評価

提案方式が周波数有効利用の観点から、どの程度貢献できるかを定量的に明確にすべく、(2)において行ったリンクレベルの特性評価からもう一段発展させ、その有効性をシステムレベルで評価する。具体的には、複数セルにおいて、端末が一様に分布することを想定したときの通信路容量を取得するとともに、その有効性を通常方式と比較対象にとって検証する。とりわけ、ユーザ間でマルチパス遅延の分散が大きい場合に提案方式の有効性が顕著となることが予想されることから、マルチパス遅延分散を決定づける、無線ゾーン半径をパラメータにとって、通信路容量の観点から明確化する。

## 4. 研究成果

本章では、3章の研究の方法に記載した各研究項目の成果について簡潔に述べる。

### (1) ネットワーク MIMO に MU-MIMO-OFDM を適用した際に生じる ISI の発生機構の把握

図5は、3セルが CoMP により協調された環境を想定したときの基地局から同時送信された OFDM 信号の到来時間差の様子を示したものである。同図より、3 協調セルの中心部分は到来時間差が小さく抑えられるものの、それ以外の部分では、到来時間差が大きくなるのがわか

る．このようなネットワーク MIMO のシナリオにおいて，MU-MIMO-OFDM を適用すると，通常，マルチパス遅延の最も大きいユーザに合わせて GI 長を設定することから，マルチパス遅延の小さいユーザにおいて，実効的にオーバーヘッドが増加し，伝送効率が低下する問題が生じるものと考えられる．

### (2) 提案方式の基本特性評価

ここでは，提案するシステム容量最大化を目指したガードインターバル長制御法の有効性を，GI 長を全ユーザ端末の最大マルチパス遅延に合わせて ISI の影響を完全に抑圧する通常方式と比較対象にとって，システム容量の観点から計算機シミュレーションにより検証する．具体的には，同時伝送する複数のユーザ端末間でマルチパス遅延に差異が生じる場合について，提案方式の有効性をリンクレベルで評価する．表 1 は，計算機シミュレーションの諸元を示したものである．同表において， $T_{sam}$  は OFDM 信号のサンプリング周期であり，伝搬路モデルとして，最大遅延時間が  $32T_{sam}$  の指数関数近似モデルを想定する．なお，各ユーザ端末の遅延スプレッド  $\tau_{rms}$  は，次式のような確率密度関数に従い，ユーザ端末間で差異を有するものとする．

$$p(\tau_{rms}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma\tau_{rms}} \exp\left(-\frac{(\ln\tau_{rms} - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

ただし， $\mu$  と  $\sigma$  は，それぞれ  $\ln\tau_{rms}$  の平均値と標準偏差である．

図 6 は，提案方式の平均 CNR 対システム容量特性を示したものである．同図より，MIMO のアンテナ規模に関わらず，提案方式のシステム容量特性は，GI 長を  $T_G=32T_{sam}$  に設定して ISI を完全に抑圧できる通常方式と比較して良好となり，特に平均 CNR=25 dB において，提案方式により，システム容量特性が向上することがわかる．これは，提案方式がシステム容量の観点から GI 長を制御でき，結果として時間利用効率が向上するためである．また，遅延スプレッド  $\tau_{rms}$  の分散が小さくなるほど，GI 長を短縮できることから，提案方式のシステム容量特性が高まることわかる．

### (3) 提案方式のシステムレベル評価

CoMP が MU-MIMO-OFDM に適用され，ゾーン半径が大きくなると，マルチパス遅延の差異だけでなく，伝搬遅延時間の差異も影響を与えることから，このような現実的な環境を想定した提案方式の有効性評価は極めて重要なものと考えられる．本節では，比較的ゾーン半径が大きい MU-MIMO-OFDM に CoMP が適用された場合の提案方式の適用効果を，最大マルチパス遅延に合わせて GI 長を設定する通常方式と比較対象にとってシステムレベルで評価する．

図 7 と表 2 は，本特性評価で想定する，MU-MIMO-OFDM に基づく CoMP システムと計算機シミュレーションの諸元をそれぞれ示したものである．同図において，半径  $R$  の協調セル内で，単一のアンテナを

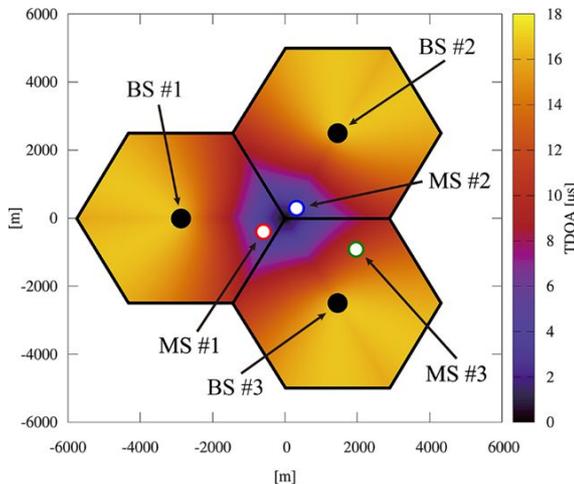


図5 基地局から同時送信された信号の到来時間差の様子

計算機シミュレーションの諸元を示したものである．同表において， $T_{sam}$  は OFDM 信号のサンプリング周期であり，伝搬路モデルとして，最大遅延時間が  $32T_{sam}$  の指数関数近似モデルを想定する．なお，各ユーザ端末の遅延スプレッド  $\tau_{rms}$  は，次式のような確率密度関数に従い，ユーザ端末間で差異を有するものとする．

表1 シミュレーションの諸元

Number of sub-carriers $N$	128
Guard interval length $T_G$	$1T_{sam} \sim 32T_{sam}$
Precoding scheme	Zero forcing (ZF) / Linear precoding (LP)
Number of BS antenna elements $N_t$	8
Number of MSs $N_r$	8
Channel model	33-ray exponentially decaying Rayleigh fading
Channel estimation	Perfect

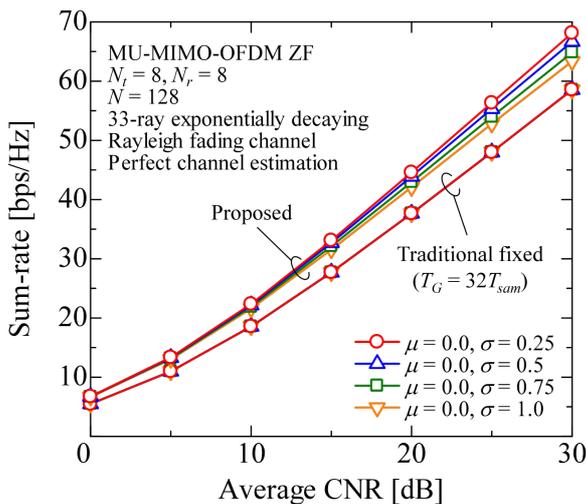


図6 提案方式の平均CNR対システム容量特性

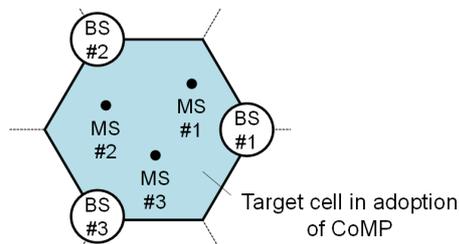


図7 本特性評価で想定するCoMPが適用された無線ゾーン

具備した3基地局が一様に分布するユーザ端末に対して、3送信ストリームの協調送信を行うことを想定する。

図8は、提案方式のシステム容量の累積確率分布を示したものである。同図より、提案方式により、システム容量特性が通常方式と比較して良好となり、セル半径Rが大きくなる程、その効果が顕著となることわかる。これは、セル半径の拡大に伴い、最大マルチパス遅延をベースとした通常方式ではオーバーヘッドが増加するものの、提案方式では、GI長をシステム容量が最大となるように常に設定できることから、実効的にオーバーヘッドを削減できることに起因した結果である。

以上、本提案方式により、ネットワークMIMO-OFDMのシステム容量がより一層向上できることが明らかとなったことから、本研究が移動通信ネットワークのさらなる高速・大容量化に貢献できるものと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

菅沼 碩文, 齋藤 周平, 丸小 倫己, 前原 文明, MU-MIMO-OFDMにおける理論システム容量を用いたガードインターバル長制御法, 電子情報通信学会論文誌 B, 査読有, Vol.J102-B, No. 8, 2019年

DOI:10.14923/transcomj.2018JBP3050

〔学会発表〕(計5件)

H. Suganuma, S. Saito, T. Maruko, F. Maehara, Inter-symbol interference suppression scheme employing periodic signals in coded network MIMO-OFDM systems, Proc. 2017 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS2017), 査読有, 2017年, pp. 42-44

H. Suganuma, T. Maruko, F. Maehara, Inter-symbol interference suppression scheme employing periodic signals in network MIMO-OFDM systems, Proc. 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2016), 査読有, 2016年, pp. 276-277

菅沼 碩文, 齋藤 周平, 丸小 倫己, 前原 文明, MU-MIMO-OFDMにおけるISIを許容した伝送効率向上に関する一検討, 電子情報通信学会総合大会, 2018年, B-5-40

水谷 亮太, 新保 薫子, 蛭間 信博, 菅沼 碩文, 前原 文明, 電力正規化からみたMU-MIMOとスケジューリング技術の結合特性, 電子情報通信学会総合大会, 2018年, B-5-41

菅沼 碩文, 齋藤 周平, 丸小 倫己, 前原 文明, ネットワークMIMO-OFDMにおけるシンボル間干渉抑圧に関する検討, 映像情報メディア学会技術報告, 2016年, BCT2016-62

## 6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 前原 文明

ローマ字氏名: (MAEHARA, Fumiaki)

所属研究機関名: 早稲田大学

部局名: 理工学術院

職名: 教授

研究者番号(8桁): 80329101

(2)研究協力者

該当なし

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、研究者個人に帰属されます。

表2 シミュレーションの諸元

Number of sub-carriers $N$	256
Total bandwidth $B (= 1 / T_{sam})$	3.84 [MHz]
Sub-carrier bandwidth $B_{sc}$	15 [kHz]
Transmit power	12 [W]
Precoding scheme	Zero forcing (ZF) / Linear precoding (LP)
Number of BS antenna elements $N_t$	3
Number of MSs $N_r$	3
Path loss model	$L = d^{-3.5}$ ( $d$ in m)
Channel model	16-ray exponentially decaying Rayleigh fading
Delay spread $\tau_{rms}$	$4.0T_{sam}$
Channel estimation	Perfect
Thermal noise density	-174 [dBm/Hz]
Noise figure	10 [dB]

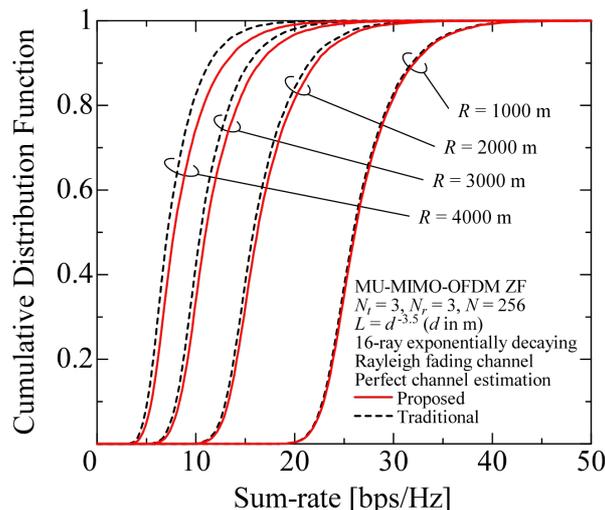


図8 提案方式のシステム容量の累積確率分布