

共有アンテナを用いた 異種無線多重 MIMO チャンネル動的構成方式の基本評価

奥本 裕介¹ 滝沢 泰久²

概要: 近年, スマートフォンなどにおける多様なアプリケーションの利用拡大, および IoT の社会への浸透に伴い, ネットワークトラフィックが急増している. そのために, 無線システムはさらなる容量拡大が求められる. 容量拡大を図る技術として MIMO が中核技術として活用されている. また, 新たな無線通信システムとして第 5 世代移動通信 (5G) においても MIMO は容量拡大のための中核技術である. 5G 環境では従来よりも高周波数帯を利用し通信する. 帯域拡大を図れるが, 通信範囲が狭くなことから, 現在の無線通信環境よりも基地局が急増する. 一方で, アンテナは無線システム毎に固定化されており, アンテナリソースを他の無線システムと共有利用することは出来ない. MIMO ではアンテナ数に比例して帯域拡大が見込まれるが, アンテナ数が増加するごとにその容量拡大は鈍化する. 従って, 単一无線システムで構成される MIMO チャンネルでは容量拡大に限界がある. しかし, アンテナリソースを他の無線システムと共有利用し, 適宜, アンテナ数を割り当てを決めることにより, 複数の無線システムの MIMO チャンネルにおいてその総容量拡大が見込める. 以上のことから本論では, 5G 環境において増加する多数のアンテナリソースを複数の異種無線システム間で共有し, 随時, 必要に応じてアンテナをそれぞれの無線システムに分配して, 多重の MIMO チャンネルの総容量を拡大する異種無線多 MIMO 動的構成方式を提案する. さらに, 多重の MIMO チャンネルを仮想の単一 MIMO チャンネルに構成・集約することにより, アプリケーションのスループット向上を図るシステム構成方式を示す.

Fundamental Evaluation on Dynamic Configuration for Multiplex MIMO channel of Heterogeneous Wireless System using Shared Antennas

YUSUKE OKUMOTO¹ YASUHISA TAKIZAWA²

1. はじめに

移動端末として, スマートフォンと呼ばれる高性能な携帯端末やタッチパネルによる入出力操作を可能とするタブレット PC が続々と登場し, 様々なアプリケーションが利用されるようになった. これに伴い無線ネットワーク内には多様なコンテンツが増え, 使用するデータの量やユーザ数も年々増加している. また, IoT (Internet of Things) の社会への浸透により, ネットワークに内包するデバイス

数, トラフィックは今後さらに増加すると予想される. このような無線通信の利用状況から無線通信において周波数帯域の広帯域化が求められる [1]. しかしながら, 周波数帯域は既存の無線システムに割り当てられているため, 周波数不足の問題が顕在化している.

これら多様な無線システムの利用拡大と周波数不足の背景から, 近年では新たな無線通信システムとして第 5 世代移動通信 (以下, 5G: 5th Generation) [2] が実装に向けて動き出している. 5G では使用する周波数を従来の周波数帯に加えて高周波数帯も利用する. これにより, 高速・大容量, 多接続, 低遅延化を実現する. しかしながら, 従来よりも高周波数帯を利用することで, 通信距離が短くなる. よって今後, 基地局が増え, アンテナ数が格段に増加

¹ 関西大学大学院理工学研究科
Graduate School of Engineering, Kansai University

² 関西大学環境都市工学部
Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University

することが予想できる。また、現在では、無線通信の広帯域化技術として Multiple-Input and Multiple-Output（以下、MIMO）[3] が採用されている。MIMO は送信機と受信機の双方で複数のアンテナを使い通信ストリームを増やすことで空間を多重化し、帯域拡大を図る。理論的にはアンテナ数に比例して帯域拡大が見込まれる。MIMO を利用する上で、アンテナ数が重要な要因になる。

一方、アンテナは無線システム毎に固定化されており、単一の無線システムに多くのアンテナリソースを割り当てることでスループットを向上させるに留まる。また、MIMO においてアンテナ数を増やすことにより帯域拡大が図れるが、アンテナ数の増加に従い空間分割の特性効果が低下して、帯域拡大が鈍化する。

以上のことから、本稿では、5G 環境の多数のアンテナリソースの有効活用により更なる容量拡大を図るため、アンテナを異種無線システム間で共有して、それぞれの無線システム状況に応じて適切にアンテナを分配し、多重の MIMO チャンネルの総容量を拡大する異種無線多重 MIMO 動的構成方式を提案する。さらに、構成された異種無線システムの MIMO チャンネルを集約して仮想の単一 MIMO チャンネルとし、アプリケーションのスループットの向上を図る。

2. 関連技術

2.1 5G

5G とは現在規格の検討が進められている次世代通信システムだ。5G に求められるのは主に 3 つだ。以下ではその説明をする [4]。

- 大容量化

近年、移動端末はその数を急激に増加させ、生活の一部に組み込まれつつある。移動端末の代表例であるスマートフォンでは、画質の向上、ダウンロード速度の向上など、さらに使い勝手を良く便利にしたいというニーズがある。そのために必要なのが大容量化だ。

- 多接続

近年の社会では IoT（Internet of Things）[5] という言葉が浸透してきており、ネットワークに接続されている端末数が増加している。今後さらにネットワークに接続される端末の数は増加すると予想される。そのため、1 度につなぐことができる端末の数を格段に増加することが求められる。

- 低遅延・高速化

前述の 2 つのことから AR・VR、自動運転、ドローンなどの最新技術をサービスに組み込むことが可能になり、サービスの多様化が見込まれる。用途によっては 4G では実現できないほど

通信のタイムラグを減らす必要がある。このため、ネットワークのさらなる高速化・低遅延が望まれる。

上記で挙げた大容量化、低遅延・高速化を実現するためには周波数帯域幅を広げることが有効である。表 1 に 4G と 5G での使用周波数帯を示す。これより、5G では従来の 4G よりも高い周波数を使うことがわかる。高い周波数の電波は、直進性が高く到達距離が短いという特性がある。したがって、従来の基地局に比べると基地局のセル半径が小さくならざるをえない（図 1）。セル半径の小さい小セルを高密度に配置することで、通信可能な端末数と帯域を増やすことができる [7]。

表 1 4G, 5G での使用周波数帯

通信システム	使用周波数帯
4G	3.6GHz 以下
5G	6GHz 未満 28GHz 帯

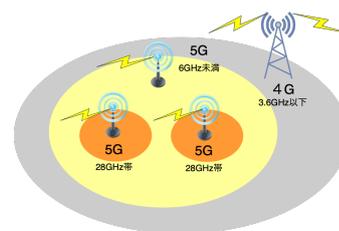


図 1 5G の通信範囲 [6]

2.2 MIMO

MIMO では複数のアンテナを使用することで送受信の広帯域を実現する [8]。複数のアンテナで同時に異なるデータを送信、受信時に合成することで擬似的に広帯域を実現し、通信の高速化を図っている。伝送路を増加させることで、空間の多重化を行っている（図 2）。理論上はアンテナが 2 本ならば 2 倍に、3 本ならば 3 倍に帯域幅が増えたのと同じ効果が得られる。しかし、実際には、アンテナ数が過度に増加すると、空間多重化において分割された空間の空間特性の相違が減少し、容量拡大は鈍化する（図 3）。

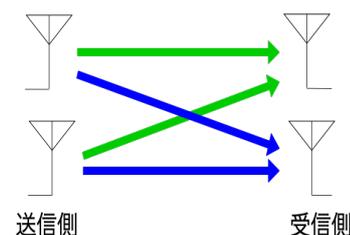


図 2 Multiple-Input and Multiple-Output(MIMO)

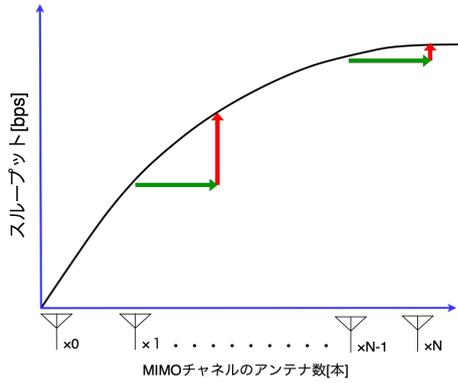


図 3 MIMO での通信容量拡大の様子

3. 提案方式

図 4 に提案方式の機能構成図を示す。

- 共有アンテナ
アンテナが無線システムに固定されずに使えるようになる。
- 多重 MIMO チャンネル
複数の無線システムで MIMO チャンネルを構成し、これらの和になる。
- 共有アンテナ分配アルゴリズム
多重 MIMO でのチャンネル容量が最大になる共有アンテナ分配数を探索する機能だ。
- 仮想単一 MIMO チャンネル構成方式
複合無線アクセスネットワーク [9] を用いて、多重の MIMO チャンネルを仮想の単一 MIMO チャンネルに構成・集約することにより、アプリケーションのスループット向上を図る。

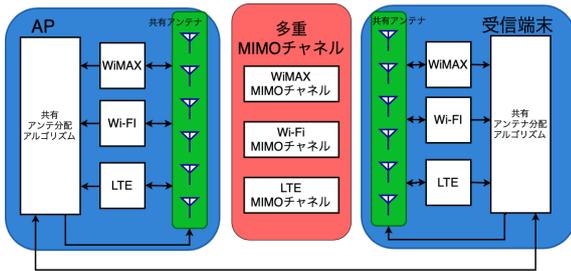


図 4 機能構成図

提案方式の機能は、図 5 の流れで行われる。アンテナによる空間分割効果によるチャンネル容量拡大のメトリックとして、無線システムからスループットを取得し、共有アンテナ分配アルゴリズムで評価し、共有アンテナ分配のスケジューリングを行い切り替えを行う。

3.1 共有アンテナ

従来の通信で、アンテナは無線システムで固定されている。5G 環境の多数のアンテナを無線システムで適時必要

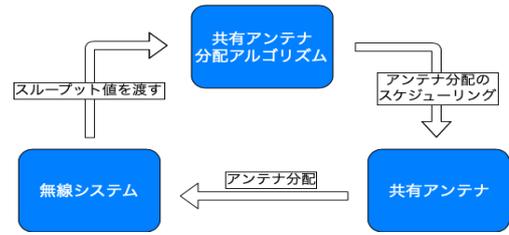


図 5 共有アンテナ分配モジュール

に応じて分配し、異種無線システムの MIMO チャンネル総容量の拡大を図るため、無線システム間でアンテナを共有する (図 6)。

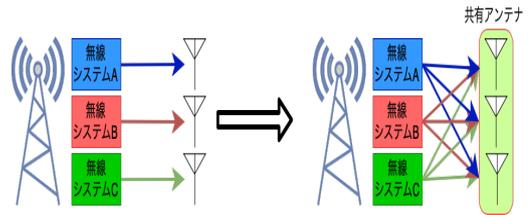


図 6 共有アンテナ

3.2 多重 MIMO チャンネル

MIMO チャンネル容量はシャノンの定理 [10] に基づいて次ように定式化できる。

$$C = x * B \log_2 \left(1 + \frac{SNR}{x} \right) \quad (x > 0) \quad (1)$$

C は MIMO チャンネル容量、 x は MIMO アンテナ数、 B は帯域幅、 SNR は SN 比である。式 (2) に MIMO チャンネル容量の MIMO アンテナ数 x に関する導関数を示す。

$$\frac{dC}{dx} = B \log_2 \frac{1 + \frac{SNR}{x}}{e^{\frac{SNR}{x+SNR}}} \quad (2)$$

式 (2) は $x \geq 0$ において常に 0 以上であることから MIMO チャンネル容量は MIMO アンテナ数に対して単調増加となる (図 7)。さらに式 (1) の 2 次導関数は次のようになる。

$$\frac{d^2C}{dx^2} = -\frac{BSNR^2}{x(x+SNR)^2 \log 2} \quad (3)$$

式 (3) は $x \geq 0$ で常に 0 以下であるので MIMO チャンネル容量増加はアンテナ数に対して単調減少である (図 8)。すなわち、MIMO チャンネル容量はアンテナ数に対して上に凸の単調増加となる。アンテナ数の増加に伴いチャンネル容量の増加量が減衰する理由は、1 アンテナ数に割り当てられる出力が低下するためである。また、実環境においては、MIMO チャンネルでは、アンテナ数が過度に増加すると、空間多重化において分割された空間の空間特性の相違が減少し、容量拡大が鈍化する。式 (2)(3) および空間分割の特性から過度なアンテナ数を無線システムへ割り当てても大き

な容量拡大は期待できない。従って、異種無線多重 MIMO チャンネルでは、異種無線システム間において、アンテナ数に対して相対的に容量拡大が見込める無線システムへ共有アンテナを分配し、複数の無線システムの MIMO チャンネルの総容量において拡大を図る。

図 9 に共有アンテナ分配に基づく無線システム A および B の MIMO チャンネル容量，多重 MIMO チャンネル容量を示す。x 軸は無線システム A への共有アンテナ割り当て数，y 軸は MIMO チャンネルの容量を示す。共有アンテナ数は N 本と一定として，右に行くほど無線システム A に割り当てるアンテナ数が増え，逆に無線システム B に割り当てるアンテナ数が減少する。x 軸において右へ向かうほど

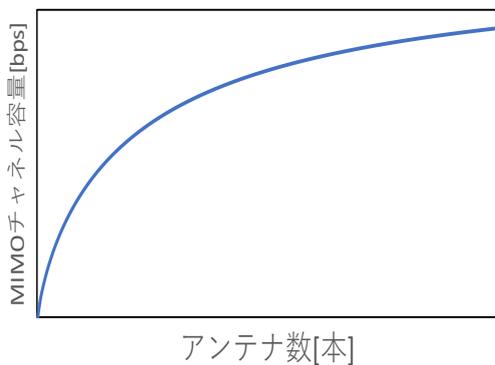


図 7 MIMO におけるアンテナ数とチャンネル容量

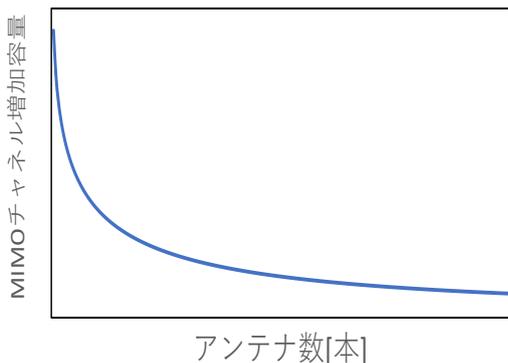


図 8 式 (2) のグラフ (B=20, SNR=100)

ど無線システム A への共有アンテナ分配数が増え，一方，無線システム B への共有アンテナ分配数が減少する。従って，無線システム A の MIMO チャンネル容量は x 軸に対して上に凸で単調増加し，一方，無線システム B は上に凸で単調減少する。異種無線多重 MIMO チャンネル容量はこれら個々の無線システムの MIMO チャンネルの和であり，この容量は共有アンテナ分配数に対して上に凸となる。

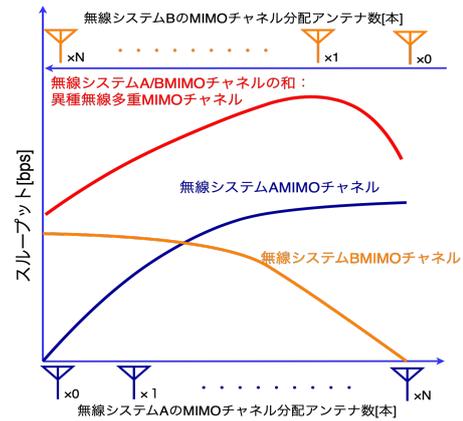


図 9 無線システム A/B の MIMO チャンネル容量および異種無線多重 MIMO チャンネル容量の共有アンテナ分配数に対する依存性

3.3 共有アンテナ分配アルゴリズム

図 9 を基に，異種無線多重 MIMO のチャンネル容量を最大化する共有アンテナ割り当てを探索する共有アンテナ分配アルゴリズムについて説明する。図 9 より，右に行くほど無線システム A のチャンネル容量は単調増加し，B 無線システムのチャンネル容量は単調減少する。多重 MIMO チャンネルのチャンネル容量はこれらの和になるので，上に凸関数になると考えられ，最適な共有アンテナ分配数が存在する。最適な共有アンテナ分配数の探索に最急降下法 [11] を適用する。提案手法では最急降下法を用いて，共有アンテナ分配においてチャンネル容量が上昇する方向を選択して最適解を探索する。共有アンテナ切り替え t 回目の無線システム A の共有アンテナ分配数を $A(t)$ ，共有アンテナ切り替え t 回目における無線システム A,B の MIMO チャンネル総容量を $C(t)$ とする。式 (4) に動的な共有アンテナ分配のアンテナ更新を定式化した。

式 (4) を繰り返すことで容量を最大化する最適な共有アンテナ分配数を探索する。図 9 のように，上に凸関数になると考えられるので，局所解に囚われることもない。

$$A(t+1) = \begin{cases} A(t) + 1 & (C(t) \geq C(t-1)) \\ A(t) - 1 & (C(t) < C(t-1)) \end{cases} \quad (4)$$

提案手法での共有アンテナ分配方式をまとめると，チャンネル容量の高い MIMO チャンネルからチャンネル容量の低い MIMO チャンネルへ共有アンテナを分配し，これを繰り返すことで最適な共有アンテナ分配を実現する。

図 10 を用いて具体的な共有アンテナ分配の動作を説明する。ここで示す図 10 の共有アンテナ数は 4 本とする。

Step0 . 初期の共有アンテナ分配を設定 (無線システム A1 本，無線システム B3 本)。

Step1 . 共有アンテナ分配を適当に (図 10 の左グラフの左端の緑矢印：無線システム B から無線システム A へ)1 アンテナ移動する。

Step2-1 . チャンネル容量が増加する場合，同じ方向へ (図 10 では左グラフの左から 2 番目，3 番

目の緑矢印：無線システム B から無線システム A へ) 1 アンテナ移動する。

Step2-2. チャンネル容量が減少する場合は、アンテナの移動方向を反転させる (図 10 では左グラフの赤矢印：無線システム A から無線システム B)。

以上のように Step2-1 または Step2-2 の動作を繰り返すことで動的にチャンネル容量が最大になる場合の共有アンテナ分配数を探索する。

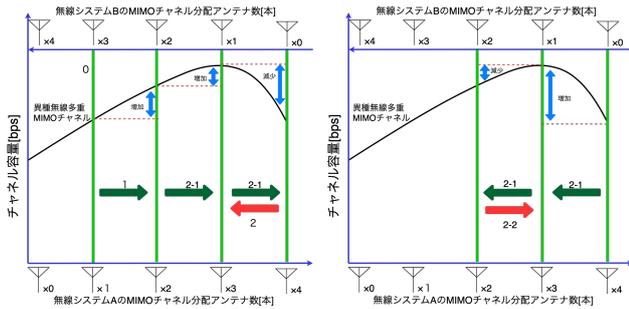


図 10 動的な共有アンテナ分配機能

3.4 仮想単一 MIMO チャンネル構成方式

仮想単一 MIMO チャンネルはアプリケーションのスループットを拡大するために、共有アンテナ分配により最適に構成された複数の MIMO チャンネルを IP レイヤと MAC レイヤ間で集約して、IP レイヤ以上において仮想的な単一 MIMO チャンネルとして構成する。複数の無線システムの MIMO チャンネルを集約する仮想チャンネルボンディング (Virtual Channel Bonding) レイヤを IP レイヤと Mac レイヤ (I/F) の間において構成する (図 11)。

仮想チャンネルボンディングレイヤによる実装構造とパケットの流れを図 12, 13 を用いて説明する。

図 12 には送信側、受信側があり、送信側には複数の無線 I/F が装備されており、また仮想チャンネルボンディングレイヤもそれらの I/F を管理する仮想 I/F なので IP アドレスが割り当てられる。同様に受信側にも複数の無線 I/F が装備され、仮想チャンネルボンディングレイヤにも IP アドレスが装備されている。ここで、送信側から受信側にパケットが送信される。

- (1) アプリケーション層で送信先 IP アドレス 192.168.10.2 へのパケットが発生すると、送信元 IP アドレスを仮想チャンネルボンディングレイヤの 192.168.10.1 として下位レイヤにパケットを渡す。IP 層にパケットが到達すると IP ヘッダを付与し、送信元 IP アドレス 192.168.10.1 である仮想チャンネルボンディングレイヤにパケットを渡す。
- (2) 仮想チャンネルボンディングレイヤでは共有

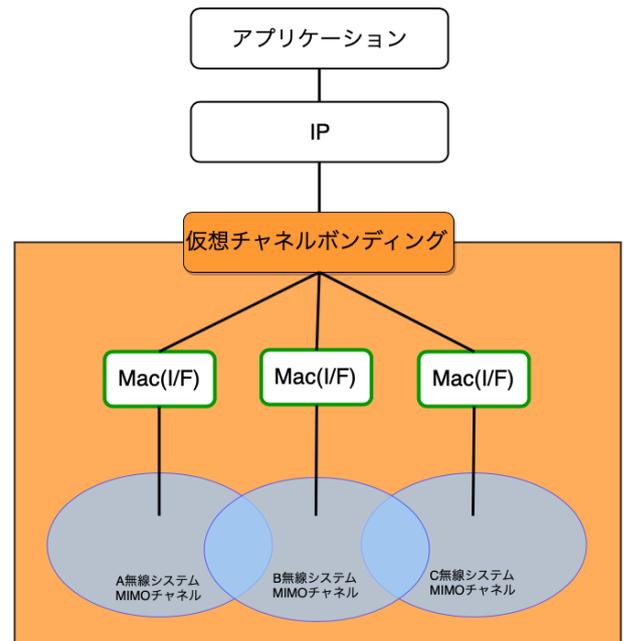


図 11 仮想チャンネルボンディングによる複合無線システムの隠蔽

アンテナ分配アルゴリズムに基づき、複数の無線 I/F の中から送信元 I/F (I/F1, I/F3) を決定する。そして、送信元アドレスとして I/F1, I/F3 の IP アドレスを指定し、送信先アドレスとして、受信側の I/F1, I/F3 の IP アドレスを指定した仮想チャンネルボンディングヘッダを生成し、パケットに付与する (図 13)。その後、仮想チャンネルボンディングヘッダを含んだパケットを分配先 I/F にパケットを渡す。

- (3) 仮想チャンネルボンディングヘッダを含んだパケットを受け取った I/F は、受信側に送信する。
- (4) 受信側の I/F がパケットを受信すると、仮想チャンネルボンディングレイヤにパケットを渡す。
- (5) 仮想チャンネルボンディングレイヤでは、仮想チャンネルボンディングヘッダを送信先 IP アドレスが、自身の管理する I/F の IP アドレスと一致しているならば、仮想チャンネルボンディングヘッダを取り、パケットを結合し IP レイヤにパケットを渡す。
- (6) IP レイヤは IP ヘッダの送信先 IP アドレスが仮想チャンネルボンディングレイヤに割り当てられている IP アドレスと一致しているため、上位レイヤにパケットを渡す。最終的に受信側のアプリケーションにパケットが到着する。

以上より、アプリケーションレイヤからは複数の無線システムを隠蔽し、パケットの送受信を可能とする。

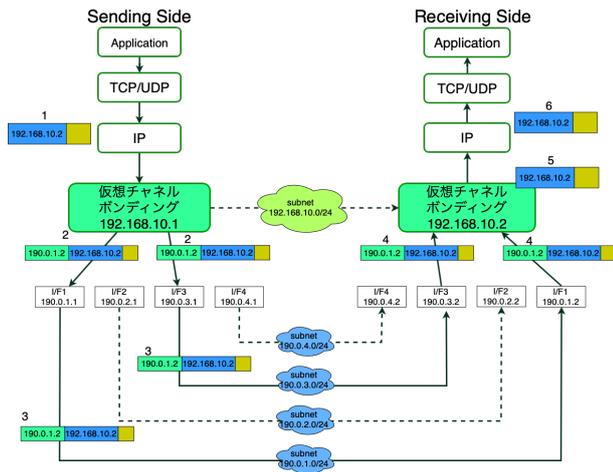


図 12 実装構造



図 13 パケット構成

4. 基本性能評価

4.1 評価条件

シミュレーションを用いて評価する。シナリオでは、図 14 のようにネットワークが構成される。以下にシミュレーション条件を示す。

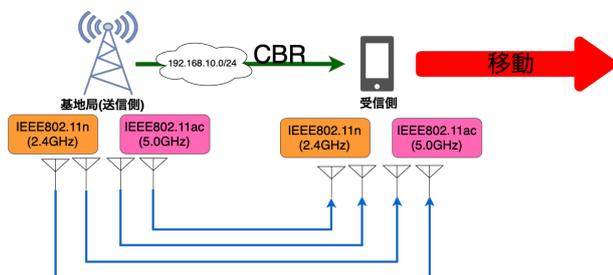


図 14 シナリオ構成

- 送信側，受信側は共有アンテナを 4 本もつ。
- 送信側，受信側は共に IEEE802.11n (以降，11n) と IEEE802.11ac (以降，11ac) を装備する。また，無線システムは表 3 の周波数帯を利用する。
- シミュレーション時間は基本的に 3000[sec] とし，パケット送信はシミュレーション開始から終了まで行われる。
- パケット送信には CBR (固定ビットレート) を用いて送信する。また，そのトラフィックは 5Mbps 刻みで 5~100Mbps 発生させる。
- 受信側で指定した時間周期で共有アンテナ分配機能が作動し，共有アンテナ分配の割り当てを 1 本動かす。また，共有アンテナ分配機能に入力するスループット値は，共有アンテナ分配時間

周期のインターバルで受信したデータ量の平均スループットを式 (5) で算出する。

- 受信側は固定し，送信側を移動させる。200sec 毎に受信側を送信端末から 10m ずつ離す。

まず，基地局と受信端末を距離 10m に固定した場合での動的な共有アンテナ分配が最適であるか検証し，次に上の条件で端末を移動させた場合で最適な共有アンテナ分配がなされているか確認する。移動させることで，11ac アンテナの通信範囲を出て，11n アンテナのみの通信になった場合で共有アンテナ分配を確認する。

表 2 シミュレーション諸元

設定項目	設定値
共有アンテナ数	4[本]
無線システム	IEEE802.11n, 11ac
送信電力	50[dbm]
シミュレーション時間	3000[sec]
パケット送信開始時間	0[sec]
パケット送信終了時間	シミュレーション終了まで
アプリケーション	CBR
トラフィック	5, 10, ..., 100[Mbps]
インターバル	10[sec]
移動距離	0~150[m]

表 3 無線システムの利用周波数

通信システム	使用周波数	最大通信範囲
IEEE802.11n	2.4GHz	150m 以上
IEEE802.11ac	5.0GHz	約 50m

$$\text{期間スループット [bps]} = \frac{\text{受信データ量 [bit]}}{\text{インターバル [sec]}} \quad (5)$$

4.2 固定時におけるスループット

受信側を送信側から 10m 離れた位置に固定した場合で，提案手法と共有アンテナ数を無線システムに固定分配した場合でのスループットを比較したのが図 15 になる。トラフィックが 75, 80Mbps の時に着目してみる。トラフィック 75Mbps では，前もって測定してある最適なアンテナ分配数は 11n に 3 本，11ac に 1 本となる。図 15 では提案手法は最適なアンテナ数を探索できていないかのように思える。ここで，図 16 をみる。これは，トラフィックが 75Mbps の場合でのスループットとアンテナ分配数の推移を示す。図 16 から分かるように，共有アンテナは 11n アンテナ 3 本を中心にアンテナ切り替えを行っており，測されたスループットにより最適分配中心に振動している。従って，トラフィック 75Mbps の場合で最適な共有アンテナ分配数は探索できていると考える。この共有のアンテナ分配の振動によるスループットの低下分が図 15 での提案手法と共有アンテナを最適分配に固定した場合でのスルー

プットの差となる。次に、トラフィック 80Mbps での最適な共有アンテナ分配数は 11n に 2 本, 11ac には 2 本となる。図 17 にトラフィックが 80Mbps の場合でのスループットと共有アンテナ分配数の推移を示す。図 17 から分かるように、共有アンテナは 11n アンテナ 2 本を中心にアンテナ切り替えを行なっているので、トラフィック 80Mbps の場合でも最適な共有アンテナ分配は行えている。以上の 2 点から、共有アンテナ分配において振動する場合があるが、端末を固定した場合での最適な共有アンテナ分配は行えていると考える。

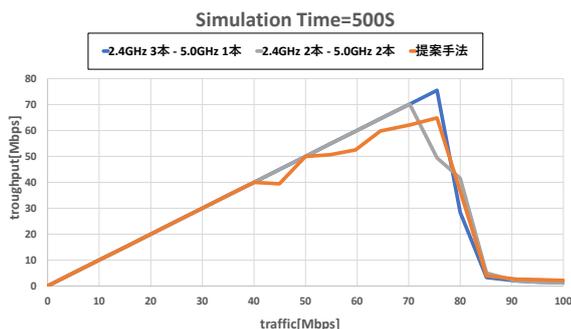


図 15 提案方式スループットとアンテナを固定したスループットの比較

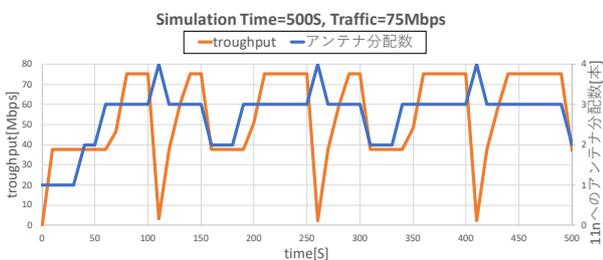


図 16 トラフィック = 75Mbps におけるスループットと共有アンテナ分配数

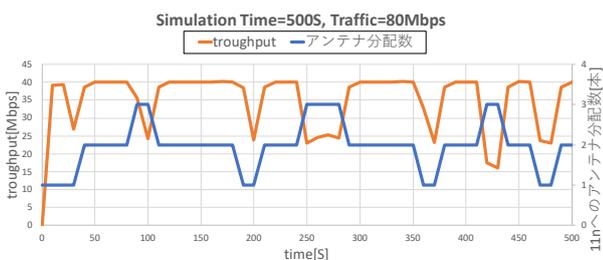


図 17 トラフィック = 80Mbps におけるスループットと共有アンテナ分配数

4.3 移動時のスループット

次に、受信側を移動させ、11ac の通信範囲を出た場合、11n のみの通信で最適な共有アンテナ分配が行えているかを見る。トラフィックが大きすぎるとパケットロスが起き、正確に共有アンテナの通信距離が図れないため、トラフィックは低く設定する。トラフィック 5Mbps (図 18) の場合で確認する。トラフィック 5Mbps の場合では、50m 付近まではどの共有アンテナ分配でも同じようなスループットが得られる。それ以降は、11n に 4 本のアンテナを分配している。ここで、トラフィック 5Mbps で使用する共有アンテナを固定した場合でのそれぞれのスループットを計測し図 19 に示す。図 19 から、各固定アンテナ分配において 5Mbps トラフィックに対して容量超過が発生する。

- 11n × 1 本, 11ac × 3 本において約 10m 地点以降
- 11n × 2 本, 11ac × 2 本において約 38m 地点以降
- 11n × 3 本, 11ac × 1 本において約 44m 地点以降
- 11ac × 4 本において 54m 地点以降 (通信不可)

図 19 より提案手法では、50m 付近以降では、容量超過を起こしていない 11n に共有アンテナを 4 本分配している場合が多く距離に応じた最適な共有アンテナ分配が確認できる。以上より、提案方式は、固定時と同様に共有アンテナ分配で振動する場合があるが、受信側を移動させた場合における MIMO チャネルの容量変動に対して適切に共有アンテナ分配ができていると考えられる。

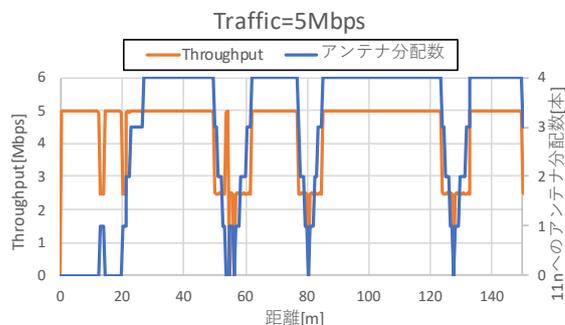


図 18 受信側を移動させた場合でのスループットと共有アンテナ分配数 (トラフィック = 5Mbps)

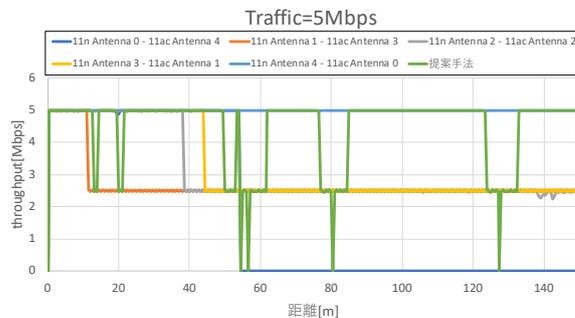


図 19 受信側を移動させた場合でのアンテナ別スループット (トラフィック = 5Mbps)

5. まとめ

本稿では、異種無線システム間でアンテナを共有して構成される多重 MIMO チャンネル総容量は各無線システムへの共有アンテナ分配数に対して上に凸であることを示した。また、多重 MIMO チャンネル総容量を拡大するため、示した多重 MIMO チャンネル特性に基づいて、最適に共有アンテナを異種無線システム間で分配する異種無線多重 MIMO 動的構成方式を提案した。さらに、提案方式の基本性能評価として、位置固定時のスループット、移動時のスループットの評価から、提案方式は、共有アンテナ分配において振動する可能性があるものの、多重 MIMO チャンネルの総容量拡大によりアプリケーションスループット拡大を可能とすることを示した。

今後は、共有アンテナ分配における振動を抑制するとともに、複数の移動ノードとの通信における有用性を検証する予定である。

参考文献

- [1] 総務省:平成 29 年版情報通信白書 データ流通量の爆発的拡大, 入手先 <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h29/html/nc121210.html/> (2017).
- [2] National Instruments:第 5 世代移動通信 (5G) の動向, 入手先 ftp://ftp.ni.com/pub/branches/japan/ekit/5g_ekit.pdf/ (2015).
- [3] 今川隆司, 池下貴大, 筒井弘, :MIMO-OFDM 無線通信における信号分離のためのパイプライン型逆行列演算回路のアーキテクチャ検討, 情報処理学会, Volume 2017-EMB-46, Issue 20, pp.1-4 (2017).
- [4] TIME&SPACE:次世代通信システム「5G」で、私たちの生活は、う変わるの?, 入手先 <https://time-space.kddi.com/digicul-column/digicul-joho/20160222/>.
- [5] 境野哲, “IoT への期待と課題 ~IoT システム開発者・利用者の心得~, ” 情報科学技術協会, 情報の科学と技術, Vol.67 No.11 pp560-565 (2017).
- [6] au:支える技術:au 5G, 入手先 <https://www.au.com/mobile/area/5g/gijyutsu/>.
- [7] Wireless Wire News:5G・ネットワーク, 入手先 <https://wirelesswire.jp/category/5g/>.
- [8] CableFree:MIMO Radio Technology: 入手先 <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/mimo-radio-technology/>.
- [9] 野田健太郎, 安達直世, 滝沢泰久: 移動通信環境における複合無線アクセスネットワーク制御方式, 情報処理学会論文誌, Vol.56, No.2, pp.448-459, (2015).
- [10] C.E.Shannon:A mathematical theory of communication, Bell Syst.Tech.J., vol.27, pp.379-423, 623-656, July-Oct(1948).
- [11] 尾関孝史: 非線形関数における最急降下法の振る舞い, 福山大学工学部紀要, Issue 26, pp.113-123, 2002.