

異種無線多重 MIMO チャネル動的構成方式における 動的感度レート制御

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 の社会への浸透にともない，ネットワークトラフィックが急増している．そのために，新たな無線通信システムとして第 5 世代移動通信（5G）の普及が望まれている．5G では，容量拡大のため高周波数帯の利用と MIMO を用いる．高周波数の利用は通信範囲が狭くなることから，5G においてアンテナ数が増大することが予想されている．一方で，アンテナは無線システムごと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できない．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．したがって，単一无線システムで構成される MIMO チャネルでは容量拡大に限界がある．そこで，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無線システムで共有し，周波数帯が異なる複数の無線システムで多重の MIMO チャネルを構成することで帯域拡大を図る，異種無線多重 MIMO チャネル動的構成方式が提案されている．既提案方式では，アンテナリソースを最適な無線システムに分配後，最適なアンテナ分配を維持するために感度レートを設けている．しかし，感度レートの設定方法が確立されていない．従って，本頁では，既提案方式における動的感度レート制御方式を提案する．

1. はじめに

移動端末として，高性能携帯端末であるスマートフォンやタブレットが続々と登場し，様々なアプリケーションの利用拡大が急速に進んでいる．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，データ通信に適した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（以降，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，従来よりも高い周波数帯を利用することで，通信距離が短くなる．従って，5G サービス域を増やすため，今後，アンテナ数が格段に増加することが予想できる．また，無線通信の広帯域化技術として Multiple-Input and Multiple-Output（以降，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の増加に伴い帯域拡大が見込まれる．従って，5G における無線システムの広帯域化は MIMO とそのアンテナ数に強く依存する．

現在，アンテナは無線システム毎に固定化されており，アンテナリソースに基づく MIMO チャネルの容量拡大は単一无線システム内に限定される．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を図れるが，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．従って，複数の無線システム間でアンテナを共有し，MIMO チャネル容量がより拡大する無線システムへアンテナを割り当てることにより，複数無線システムにおける MIMO チャネル総容量を拡大することが可能である．

以上のことから，異種無線多重 MIMO チャネル動的構

¹ 関西大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Kansai University, Suita, Osaka 564-8680, Japan

² 関西大学 環境都市工学部
Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University, Suita, Osaka 564-8680, Japan

成方式 [4] 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 チャネルの総容量を拡大する異種無線多重 MIMO チャネル動的構成方式を提案している。

既提案方式では、機能の 1 つである共有アンテナ分配アルゴリズムにおいて発生する最適な共有アンテナ分配数近傍でのアンテナ振動を抑制するために感度レートを設けている。しかし、感度レートの設定方法が確立されていない。従って、本頁では、動的感度レート制御方式を提案する。

2. 関連研究

近年、多様な MIMO の研究が盛んに行われている。MIMO の容量拡大を図る研究は 2 つに分類される。以下では、2 つの分類において代表的・典型的な研究を示す。

- Massive-MIMO

従来の MIMO では、アンテナ 4~8 本で使用されている。Massive-MIMO では送信側のアンテナが大幅に増え、数十から数百のアンテナ素子を使用してデータを送信する。また、一定方向に指向性の高い電波を送るビームフォーミングという技術を組み合わせることで、一人一人に専用の電波を割り当てることができ、基地局間の干渉を抑えながら電波強度を上げ、高速通信を可能にする。しかし、Massive-MIMO ではスモールセル間の干渉が発生する。スモールセルをクラスタリングすることで干渉を減少させる、動的スモールセルクラスタリング方式が提案されている。これを基に、クラスタ間干渉を調整する手法が研究されている [5][6]。

- Distributed-MIMO

5G 環境では通信範囲が狭まることにより、アンテナが密に配置されることが想定される。Distributed-MIMO では、密に配置されているアンテナを協調制御する。複数の基地局を仮想的に 1 つの基地局として通信することで、各基地局で協調制御された電波を利用することができる。Distributed-MIMO では、評価実験が行われている [7][8][9]。

以上のように、MIMO において多様な研究が行われている。しかし、いずれも、単一无線システム内の MIMO チャネルの大容量化または多接続性を目的とし、複数の無線システムにおける MIMO チャネル容量とする視点は考えられていない。

3. 異種無線多重 MIMO チャネル動的構成方式

3.1 MIMO チャネル特性

帯域 B 、アンテナ数 x 、チャネル行列 H とすると、

Telatar[10] による MIMO チャネル容量 C は次の通りになる。

$$C = B * \log_2 \det(I + \frac{SNR}{x} * H^H H) \quad (1)$$

チャネル行列は文献 [11] によりレイリーフェージング相関を想定して空間相関行列 R を得る。

$$E[H^H H] = x * R \quad (2)$$

従って、MIMO チャネル容量は次のようになる。

$$C = B * \log_2 \det(I + SNR * R) \quad (3)$$

さらに、空間相関行列 R は指数減衰モデルによりアンテナ間空間相関 $\rho(0 \leq \rho \leq 1)$ を用いて次のようになる。

$$R = \begin{cases} 1 & (i = j) \\ \rho^{|i-j|} & (i \neq j) \end{cases} \quad (4)$$

アンテナ間空間相関 ρ はレイリーフェージング相関に従うため、アンテナ間距離 d の関数として次のようになる。

$$\rho \cong \exp(-d^2) \quad (5)$$

空間は一定と仮定すると、アンテナ間距離 d はアンテナ数 x を用いて次のようになる。

$$d \cong \frac{1}{x} \quad (6)$$

従って、アンテナ間空間相関 ρ は次のようになる。

$$\rho(x) \cong \exp(-\frac{1}{x^2}) \quad (7)$$

以上から、MIMO チャネル容量 C のアンテナとの相関は図 1 となる。

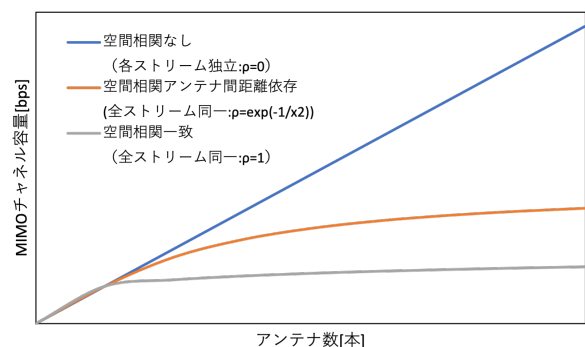


図 1 アンテナ数に対する MIMO チャネル容量

従って、一定空間においてアンテナ数を増やす場合、MIMO チャ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。すなわち、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。

3.2 異種無線多重 MIMO チャンネル動的構成方式

3.1 節では MIMO チャンネルの特性により、単一の MIMO チャンネルでは限界があることを示した。異種無線多重 MIMO チャンネル動的構成方式では、より容量拡大が見込める無線システムへアンテナを分配・割り当てることにより、複数の異種無線システムの MIMO 容量総和において拡大を図る。提案方式は次の 4 つの機能から構成される。その構成図を図 2 に示す。

- 共有アンテナ
 複数の無線システム間で相互に共有利用可能とするアンテナ集合体。
- 多重 MIMO チャンネル
 共有アンテナを割り当てられた無線システム MIMO チャンネルで構成された各無線システム MIMO チャンネルの集合。
- 共有アンテナ分配アルゴリズム
 多重 MIMO チャンネルにおいて各無線 MIMO チャンネルの総容量を最大化するアンテナ分配数を探索する。
- 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 [12] 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。これにより、アプリケーションのスループット向上を図る。

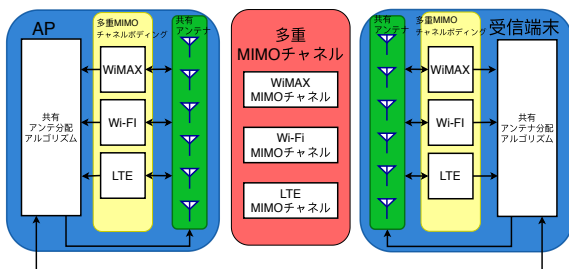


図 2 機能構成図

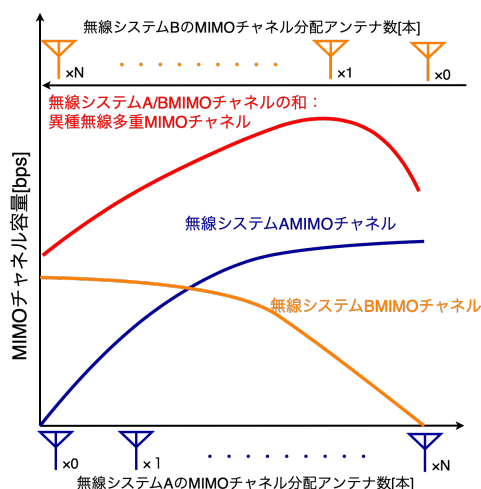


図 3 無線システム A/B の MIMO チャンネル容量および異種無線多重 MIMO チャンネル容量の共有アンテナ分配数に対する依存性

3.2.1 異種無線多重 MIMO チャンネル

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 3 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。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 チャンネル容量の和であり、この容量は共有アンテナ分配数に対して上に凸となる。すなわち、MIMO のチャンネル容量和を最大化する共有アンテナの分配数が存在する。

3.2.2 共有アンテナ分配アルゴリズム

共有アンテナ分配アルゴリズムは、3.2.1 節で示した異種無線多重 MIMO チャンネルの最適な共有アンテナ分配数を探索する。最適な共有アンテナ分配数の探索に山登り法を適用する。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。共有アンテナ分配 t 回目の無線システム A の共有アンテナ分配数を $A(t)$ 、アンテナ分配数を $X(t)$ とし、式 (8) でアンテナ分配をする。また、アンテナ分配アルゴリズムでは、探索フェーズと維持フェーズがある。共有アンテナ分配 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 $C(t)$ とし、 n をアンテナ分配で移動するアンテナ数とする。探索フェーズでは、式 (9) を用いてアンテナ分配数を決める。式 (9) で $C(t) \geq C(t-1)$ の場合では、容量増加が見込めると判断して、さらにアンテナ数を増やす。 $C(t) < C(t-1)$ の場合では、最適な共有アンテナ分配数を過ぎてしまったと判断して、アンテナ分配数を減らす。さらに、更新後の共有アンテナ数が最適だと判断して、維持フェーズに移行する。また、維持フェーズに移行した時のアンテナ数を $A(T_s)$ 、その直前のアンテナ数を $A(T_s - 1)$ として記録する。維持フェーズでは、最適アンテナ分配で発生する微小変動を無視し、無用なアンテナ分配を抑制するため、感度レート $Q_s (0 < Q_s < 1)$ を導入し、式 (10) を用いてアンテナ分配数を決める。式 (10) で $C(t) \geq Q_s C(t-1)$ の場合では、現在のアンテナ分配数が最適と判断して、維持フェーズを継続し現行の共有アンテナ分配数を維持する。 $C(t) < Q_s C(t-1)$ の場合は、MIMO チャンネル状況が変動したと想定して、探索フェーズへ移行する。以上の式 (8)(9)(10) 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。

また、探索フェーズを高速化、維持フェーズの共有アンテナ分配を安定化させるために、共有アンテナ分配周期インターバルを2つに分ける。探索フェーズにおいて、短周期で最適な共有アンテナ分配数に到達させるため、共有アンテナ分配周期インターバルを短くした短周期分配 ($S-Interval$) を設定する。維持フェーズにおいて、安定した共有アンテナ分配をするために、共有アンテナ分配周期インターバルを長くした長周期分配 ($L-Interval$) を設定する。

$$A(t+1) = A(t) + X(t) \quad (8)$$

$$X(t) = \begin{cases} n \frac{A(t)-A(t-1)}{|A(t)-A(t-1)|} & (C(t) \geq C(t-1)) \\ -n \frac{A(t)-A(t-1)}{|A(t)-A(t-1)|} & (C(t) < C(t-1)) \end{cases} \quad (9)$$

$$X(t) = \begin{cases} 0 & (C(t) \geq Q_s C(t-1)) \\ n \frac{A(T_s)-A(T_s-1)}{|A(T_s)-A(T_s-1)|} & (C(t) < Q_s C(t-1)) \end{cases} \quad (10)$$

式(8)(9)(10)に基づくアンテナ分配の手順を図4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4の共有アンテナ数 N は4本、アンテナ分配で移動するアンテナ数 n を1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.

MIMO チャンネル容量が減少するまでアンテナ移動方向に従って、1アンテナ移動する(図4グラフ(a)の矢印: 無線システム B から無線システム A へ)。

Step2.

アンテナ移動方向を逆方向に設定する(図4グラフ(b)ではアンテナ移動方向を右向きにする)。

Step3.

アンテナ移動方向に従って、1アンテナ移動(図4グラフ(c)の右矢印: 無線システム A から無線システム B へ)。

Step4.

探索フェーズから維持フェーズに移行し、アンテナ分配数の更新式を式(9)から式(10)に変更する。式(10)の下段が発生後、維持フェーズから探索フェーズに移行し、アンテナ分配数の更新式を式(10)から式(9)に変更後、Step1へ戻る。

以上の手順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し、その共有アンテナ分配数を維持する。

4. 動的感度レート制御方式

異種無線多重MIMOチャンネル動的構成方式では、最適なアンテナ分配を維持するために感度レートを設けている。

動的感度レート制御は変動するトラフィックにおいて最適なアンテナ分配を維持するとともに、アンテナ分配を必要な場合は迅速な探索フェーズへの移行を実現する。そのため、提案方式では最適アンテナ分配を維持できる最大感度レートを探索する。

提案方式では感度レートを時間推移にするために、 Q_s から $Q_s(t)$ に変更し、維持フェーズでのアンテナ分配数の更新式を式(10)を式(11)に変更する。共有アンテナ分配 t 回目における感度レートを $Q_s(t)$ とし、 l を感度レートの下げ幅とする。ただし、感度レートの初期値 $Q_s(0) = 1$ とする。感度レート $Q_s(t)$ の更新は、探索フェーズにおいて式(12)を用いる。維持フェーズでは式(13)のように感度レートの更新を行わない。探索フェーズにおいて、式(12)はチャンネル容量が減少した場合、つまり、最適な共有アンテナ分配数を探索したと判断した場合において、感度レートを l だけ下げる。それ以外では、感度レートを1に設定する。維持フェーズにおいて、式(13)のように感度レートの更新は行わず、感度レートを維持する。また、維持フェーズから探索フェーズに移行した場合でも更新が行われず、探索フェーズから1ステップで維持モードに復帰した場合は、前回の維持フェーズでの感度レートからさらに l だけ下がる。復帰しなかった場合は、最適な共有アンテナ分配数が増加したと判断して感度レートを1に戻す。

$$X(t) = \begin{cases} 0 & (C(t) \geq Q_s(t)C(t-1)) \\ n \frac{A(T_s)-A(T_s-1)}{|A(T_s)-A(T_s-1)|} & (C(t) < Q_s(t)C(t-1)) \end{cases} \quad (11)$$

$$Q_s(t+1) = \begin{cases} Q_s(t) - l & (C(t) < C(t-1)) \\ 1 & (otherwise) \end{cases} \quad (12)$$

$$Q_s(t+1) = Q_s(t) \quad (13)$$

感度レートの更新を図4を用いて具体的に説明する。図4グラフ(a)のStep1でMIMOチャンネル容量が減少した場合、最適な共有アンテナを探索したと判断してStep2,3を経てStep4の維持フェーズに移行する。このタイミングで、式(12)より、感度レートは $Q_s(t) - l$ になる(図4グラフ(c)の4)。その後、維持フェーズでは式(13)により、感度レートの更新は行われず、そのため、感度レートが $Q_s(t) - l$ では式(11)による最適な共有アンテナ分配数近傍でのアンテナ振動を抑制できない場合がある。その場合、感度レートを $Q_s(t) - l$ で維持したまま、図4グラフ(c)のように、探索フェーズに移行し、A無線システムからB無線システムに共有アンテナが分配される。しかし、A無線システムに3本、B無線システムに1本の組み合わせが最適だとするならば、図4グラフ(d)のように再度、A無線システムに共有アンテナが分配される。この場合は、式(12)により、感度レートが $Q_s(t) - 2l$ で維持モードに移行する。

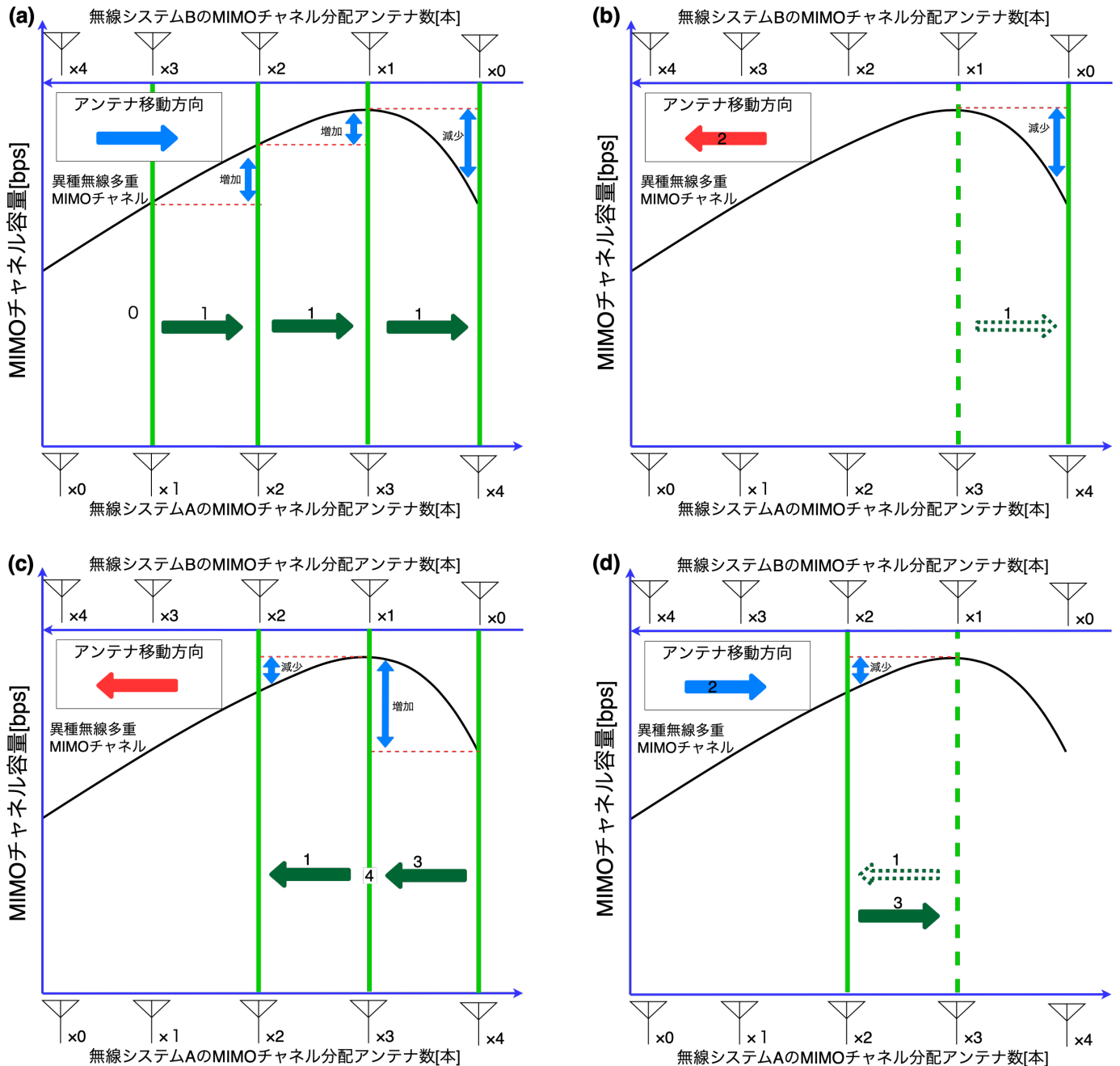


図 4 動的な共有アンテナ分配機能

以上の手順で、アンテナ振動を抑制できるまで、感度レートを徐々に下げていく。

5. シミュレーション評価

5.1 評価条件

図 5 のようにネットワークが構成される。表 1, 2 にシミュレーション条件を示す。基地局と受信端末は共有アンテナを 4 本装備し、無線システムに IEEE802.11n(11n), IEEE802.11ac(11ac) を用いる。CBR でトラフィックを発生させる。シナリオでは基地局と受信端末を距離 5m に固定した場合で、提案方式が有効であるかを検証する。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

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 (14) で算出する。

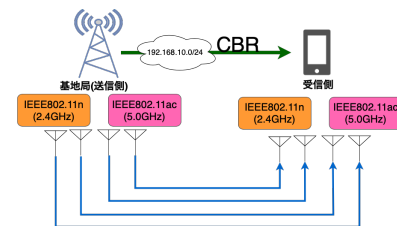


図 5 シナリオ構成

$$\text{期間スループット [bps]} = \frac{\text{受信データ量 [bit]}}{\text{Interval [sec]}} \quad (14)$$

表 1 シミュレーション諸元

設定項目	シナリオ 1
共有アンテナ数 N [本]	4
無線システム	IEEE802.11n, 11ac (表 2)
送信電力 [dbm]	50
シミュレーション時間 [sec]	300
パケット送信開始時間 [sec]	0
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(固定ビットレート)
トラフィック [Mbps]	5, 10, ..., 100
n	1
l	0.001
S-Interval[sec]	0.5
L-Interval[sec]	3.0

表 2 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

5.2 動的感度レート制御の評価

IEEE802.11n(11n) と IEEE.802.11ac(11ac) において 4 本の共有アンテナを用いる場合、事前計測により 11n に 3 アンテナ、11ac に 1 アンテナを分配したケースで最大容量 75Mbps となる。この最適アンテナ分配を指標として、提案方式の動的感度レート制御の有用性を検証する。図 6 は 100Mbps までのトラフィックにおいて、次の 4 ケースをスループットを比較する。

- 提案方式
感度レート $Q_s(0) = 1.0$, 下げ幅 $l = 0.001$ に設定する。
- 最適アンテナ分配
前述の最大容量となる 11n へ 3 アンテナ、11ac に 1 アンテナを固定分配する。
- 固定感度レート
感度レート Q_s を常に 0.999 とする。
- 最適な感度レート
感度レート Q_s を常に 0.998 とする。

図 6 より、感度レート $Q_s = 0.999$ では、他よりスループットが低いことから、アンテナ分配振動を抑制する機能が十分に機能していないことがわかる。次に、予め計測した中で、既提案方式と同等のスループットを計測し、かつ最も感度レートが高かったのが $Q_s = 0.998$ だったことより、最適な感度レートと判断した。提案方式は最適な感度レートを発見し、高いスループットを発揮しているように見える。次に各ケースの詳細な共有アンテナ分配、スループットの変動を示す。

図 7 はトラフィック 75Mbps において、固定感度レート、最適な感度レート、提案方式の各ケースでの、共有アンテナの無線システム 11n への分配数の変動を示す。図 8 はトラフィック 75Mbps において、固定感度レート、最適な感

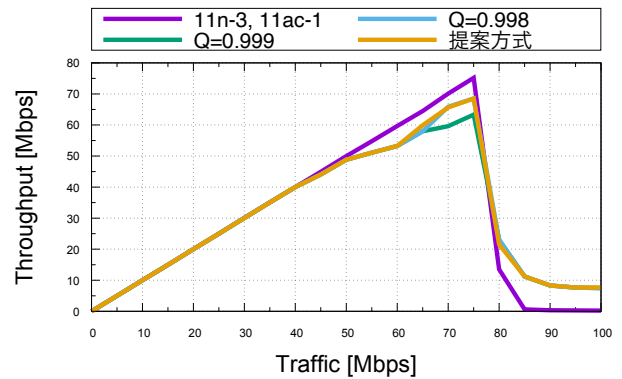


図 6 各ケースのスループット推移

度レート、提案方式の各ケースでの、スループット変動を示す。図 7 より、最適な感度レートでは、最適な共有アンテナ分配を探索後、アンテナ振動が 1 度発生しますが、その後は最適な共有アンテナ分配を維持している。また、図 8 より、アンテナ振動が発生したタイミングで一時的にスループットは低下するが、再度、最適な共有アンテナ分配数を探索し、その後、75Mbps のスループットを計測している。固定感度レートでは、図 7 より、最適な共有アンテナ分配を探索後、105sec, 135sec, 240sec, 265sec, 285sec のタイミングでアンテナ振動が発生しており、図 8 でも同様のタイミングでスループットが低下している。図 6 より分かるように、固定感度レートでは、シミュレーション全体のスループットに大きく影響を与えている。

提案方式では、図 7 より、最適な共有アンテナ分配を探索後、105sec のタイミングでアンテナ振動が発生し、図 8 でも同様のタイミングでスループットが低下している。しかし、その後はアンテナ振動が発生しておらず、75Mbps を計測している。

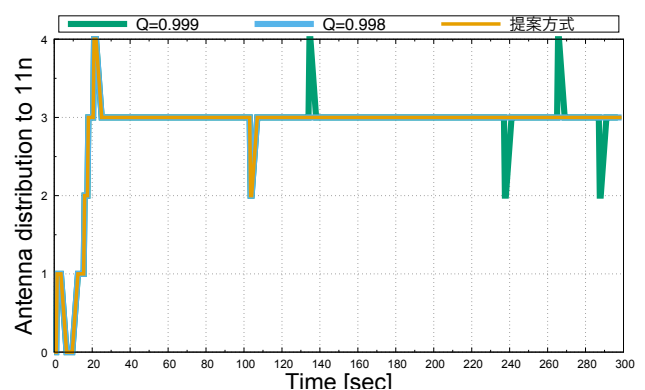


図 7 75Mbps における各ケースの共有アンテナ分配推移

図 9 はトラフィック 75Mbps において、提案方式での共有アンテナの無線システム 11n への分配数と感度レートの推移を示す。図 9 より、105sec でアンテナ振動が発生し、感度レートを $l = 0.001$ だけ下げていることがわかる。図 7 より、感度レートが $Q_s = 0.999$ ならば、105sec 以降もア

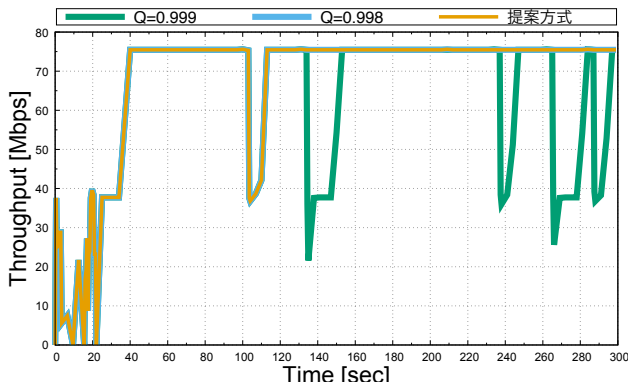


図 8 75Mbps における各ケースのスループット推移

アンテナ振動が発生している。提案方式では、105sec でアンテナ振動が発生後、さらに感度レートが $l = 0.001$ だけ下がることにより、感度レートが常に $Q_s = 0.998$ の場合と同様に、その後のアンテナ振動を抑制している。

以上により、提案方式ではアンテナ振動が発生するたびに感度レートを下げることで、その後のアンテナ振動を抑制し、最適な感度レートを探索したと考えられる。

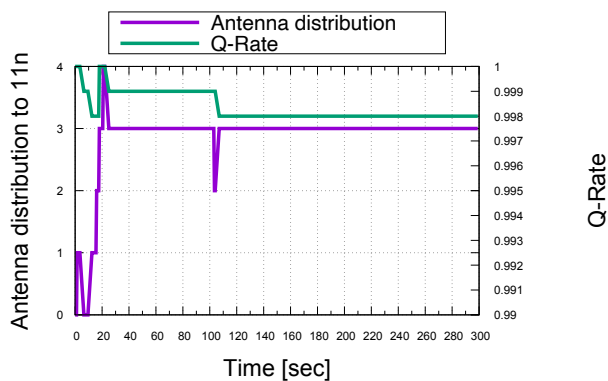


図 9 75Mbps におけるアンテナ分配と感度レート推移

6. まとめ

本稿では、異種無線多重 MIMO チャネル動的構成方式において用いられる感度レート Q_s の動的感度レート制御方式を提案した。提案した動的感度レート制御方式は、最適な感度レート探索の過程で、一時的にアンテナ振動が発生するが、その度に感度レートを下げ、最適アンテナ分配を維持できる最大感度レートを発見して、アンテナ振動を抑制することができる。

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 (2017), 入手先 (<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h29/html/nc121210.html/>).
- [2] 総務省：平成 30 年版情報通信白書 5G の特徴 (2018), 入手先 (<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/>

- ja/h30/html/nd133420.html).
- [3] 今川隆司, 池下貴大, 筒井弘, 宮永善一: 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行列演算回路のアーキテクチャ検討, 信学技報, Vol.117, No.273, pp.105-108 (2017).
- [4] 奥本裕介, 滝沢康久: 共有アンテナを用いた異種無線多重 MIMO チャネル動的構成方式, 情報処理学会論文誌, Vol.61, No.10, pp.1629-1638 (2020).
- [5] Hao, W. and Muta, O.: Performance Evaluation of Centralized Massive MIMO Heterogeneous Network Using Dynamic Small-cell Base Station Clustering, 研究報告オーディオビジュアル複合情報処理 (AVM), Vol.2017-AVM-99, No.17, pp.1-5 (2017).
- [6] Yamaguchi, S., Watanabe, H., Yoshioka, H., Morimoto, Y., Nakamizo, H., Tsutsumi, K., Shinjo, S., Uchida, S., Okazaki, A., Fukasawa, T. and Yoneda, N.: Development of 28GHz band Massive MIMO Antenna RF Frontend Module for 5G, 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, pp.629-630 (2018).
- [7] Sezgin, I.C., Eriksson, T., Gustavsson, J. and Fager, C.: Evaluation of Distributed MIMO Communication Using a Low-Complexity Sigma-Delta-over-Fiber Testbed, IMS, pp.754-757 (2019).
- [8] Valenzuela-Valdes, J.F., Guerrero, A.L., Heredia, J.D.S., Gonzalez, A.M. and Hallbjorner, P.: Measuring Distributed MIMO System in Reverberation Chamber, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol.12, pp.1586-1589 (2013).
- [9] Faisal, K.N., Sarkar, Z.L., Sultana, R. and Mukhtadir, S.: Security analysis of co-located and distributed MIMO interference networks with linear receivers, 2016 2nd International Conference on Electrical, Computer & Telecommunication Engineering (2016).
- [10] E.Telatar.: Capacity of multi-antenna Gaussian channels, European Trans. Telecommun., vol.10, No.6, pp.585-595 (1999).
- [11] 小川恭孝, 大鐘武雄, 西村寿彦: MIMO による超高速化, 電子情報通信学会通信ソサイアティマガジン, No.11, pp.32-38, (2009).
- [12] 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).