

通信品質改善のために自ら思索し行動する Wi-Fi アクセスポイント

研究代表者

田谷 昭仁

東京大学 生産技術研究所 助教

1 はじめに

Wi-Fi のアクセスポイント (AP : Access Point) は、家庭やオフィス、公共施設など生活空間に広く普及しており、スマートフォンやPCのみならず、見守りカメラやスマートスピーカなど IoT(Internet of Things) 端末にとっても不可欠な通信基盤となっている。Wi-Fi の通信品質は、AP の設置場所や向き、アンテナの角度などの物理的な設置条件によって大きく左右される。屋内の電波伝搬特性は専門家にとっても把握が困難であり、商業施設や企業のオフィスビルでは AP 設置の最適化のためにサイトサーベイが実施されている。しかし、一般家庭や小規模オフィスでは、専門知識を持たない利用者が最適でない設置条件のまま AP を利用していると予想される。このような状況下では、AP はその空間が持つ潜在的な電波資源を有効利用できず、大きな送信電力を要するか、電力が制限された場合には低い通信品質しか達成できない状況になる。

特に、家庭用の AP にはアンテナの向きを調整できるものが存在するにもかかわらず、非専門家にとって最適なアンテナ角度を判断するための指針は存在せず、通信工学の観点からは最適でないアンテナ配置で運用されていると考えられ、限られた資源である無線資源の有効活用の観点から重要な課題である。

一方で、無線通信の研究における従来のアプローチは、ハードウェアの設置条件やそれらから決定される電波伝搬は与えられたものとして、プロトコルや信号処理などソフトウェア処理による改善に焦点が当てられることが多い。本研究はこのような従来のアプローチとは異なり、通信機器に駆動系を搭載することで、従来は制御対象外だったハードウェアの設置条件を最適化対象と考え、通信品質の改善を目指す。

具体的には、アンテナをモーターによって駆動可能とし、機器自身が電波環境を監視しながら通信品質を改善するアンテナ角度を探索可能な機器を開発する。家庭用の Wi-Fi はオムニアンテナと呼ばれる、垂直方向には電波を送受信せず、水平方向には均等に電波を送受信する性質を持つアンテナが使用されることが多い。送受信機が同じ高さであり、電波の反射を考慮しない場合は、両者を対向させれば最大利得が得られる。しかし、送受信機が異なる高さにある場合や、室内の天井や床、壁面における電波の反射を考慮する場合は最適なアンテナ角度は単純には特定できない。そこで、提案する装置では、電波伝搬応答 (CSI: Channel State Information) と呼ばれる情報を用いて、通信環境を監視しながらアンテナ角度を最適化する。

CSI は通信に先立って取得される情報であり従来は通信にのみ用いられていたが、CSI が周囲環境の変化によって変動することから周囲のセンシングにも利用することができる。このような通信とセンシングの融合は ISAC (Integrated Sensing and Communications) と呼ばれ、注目されている。本研究では将来的な ISAC への応用を見据えて、CSI を含めたリアルタイムな通信品質・電波環境の可視化インターフェースも作成する。

2 関連研究

2-1 ビームフォーミング

ビームフォーミング[1, 2]はフェーズドアレイアンテナと呼ばれる電氣的に指向性を制御可能なアンテナを用いて、複数のアンテナ素子に位相差を持たせることで特定の方向へのみ電波を強く送信する技術であり、電波伝搬の制御として代表的なものである。主に 1 対 1 の見通し内通信における狭ビームの精密制御を対象として、ミリ波を用いる 5G 通信や屋内無線通信において広く研究されてきた。しかし、本研究のように、家庭用 Wi-Fi で一般的に用いられるオムニアンテナを物理的な角度を調整して通信品質を改善する研究はほとんどない。さらに、本研究では、後述するように、アンテナを機械的に方向制御することで偏波整合を改善することが通信品質の向上に大きく寄与することを実験的に確認している。このように、本研究はビームフォーミングとは本質的に異なるアプローチで通信品質改善を実現するものである。

2-2 移動可能/回転可能アンテナ

近年、アンテナ素子を微小に移動または回転させる移動可能アンテナ[3]、回転可能アンテナ[4, 5]が研究されている。これらはフェーズドアレイを構成するアンテナ素子を微小に移動・回転させることで、通常のビームフォーミングよりも精密な指向性制御を実現することを目的としている。アンテナを物理的に駆動するという点では本研究と類似しているが、その目的は従来のように狭域ビームを形成することであるという点が、オムニアンテナを駆動する本研究とは異なる。

2-3 NetBeam によるオムニアンテナの制御

本研究と同様、オムニアンテナをサーボモータにより回転させる研究として NetBeam [6]がある。[6]では屋内環境で実験を行い、アンテナの回転により、電力利得が得られることなどが報告されている。一方で、NetBeam は主にセルラ通信を想定した設計となっており、基地局側から移動端末を詳細に管理することが前提となっている。本研究では、セルラ通信ほどの緻密な制御を行えない Wi-Fi を対象として、後述する複数の送信機への対応や通信環境変化への対応に取り組んだ点が本研究の貢献である。

3 提案装置の設計と実装

3-1 ハードウェア構成

本研究では、既製品の AP では CSI の取得が困難なことから、図 1 に示す小型 PC (ASUS NUC 13 Rugged、以下 NUC) を利用した。2 本の Wi-Fi 用アンテナの外部にそれぞれ 2 個ずつサーボモータを搭載しており、仰角 θ_j と方位角 φ_j それぞれ独立に制御可能である。すなわち、制御すべきパラメータは $\theta = (\theta_1, \varphi_1, \theta_2, \varphi_2)$ の 4 変数となる。ここで、添え字 1, 2 はアンテナ番号である。サーボモータの制御は Arduino UNO R4 WiFi を用いており、NUC と USB 接続することで、NUC から制御可能である。NUC では後述する方法で CSI を取得し、そこから通信容量を計算しており、その値を監視しながら角度制御を行うことができる。アンテナの回転は 4 章で示す通り、0.2 秒程度で行うことができる。

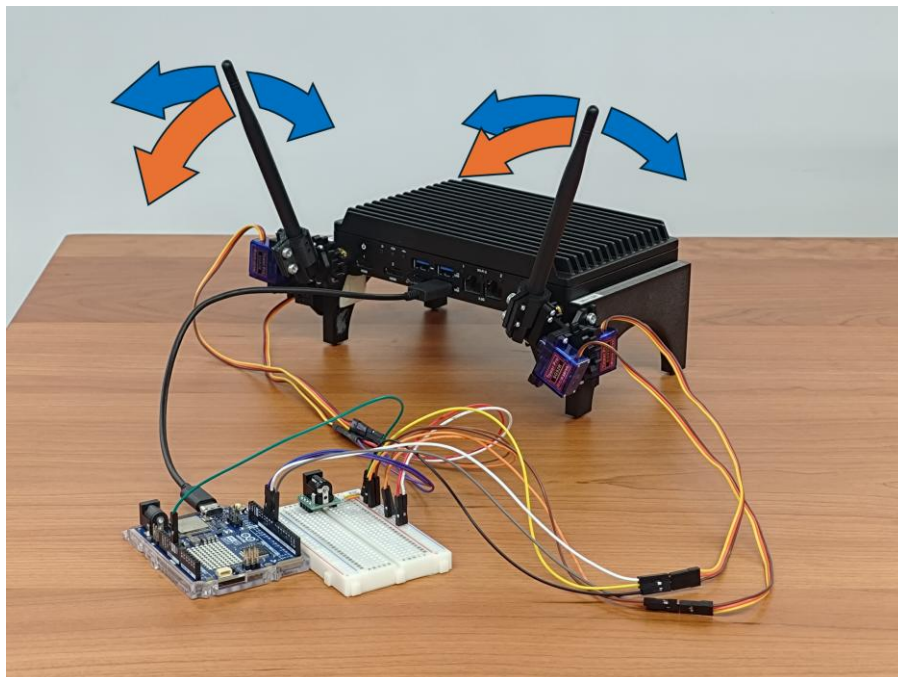


図 1. アンテナ駆動可能な Wi-Fi 機器

3-2 CSI の取得と通信容量

NUC に PicoScenes [7] をインストールして CSI を取得できるようにした。送信アンテナと受信アンテナ数をそれぞれ n_t, n_r とすると、CSI は複素行列 $H_k \in \mathbb{C}^{n_r \times n_t}$ で表される。ここで、 k はサブキャリアインデックスである。このとき、通信容量は CSI を用いて以下のように求められる [8]。

$$C(\theta) = \Delta f \sum_{k=1}^K \log_2 \det \left(I + \frac{1}{N_0 \Delta f} H_k(\theta) H_k(\theta)^H \right)$$

ここで、 Δf はサブキャリア帯域幅、 K はサブキャリア数、 N_0 はアンテナあたりの雑音電力密度を表す。なお、PicoScenes で取得される CSI は大きさが正規化されており、本来含まれている受信電力の情報が欠落している。そのため、受信信号強度 (RSSI : Received Signal Strength Indicator) の値を送受信電力とみなして CSI の正規化係数を逆算することで求めた。なお、CSI の変動により、瞬時的な通信容量の変化が大きくなることもあるため、実際に最適化に用いる通信容量は移動平均をとることで安定化を図っている。

3-3 公平性を考慮した通信容量の最適化

送信機が 1 台の時は通信品質の指標として通信容量 $C(\theta)$ を最大化するアンテナ角度の組 θ を求める問題として、最適化問題を定式化した。送信機が複数存在するときは、送信機ごとに通信容量の偏りが大きくなることを防ぐため、Proportional Fairness と呼ばれる公平性の指標を採用した。公平性を考慮する指標を用いず、単純な通信容量の合計を最大化する場合、複数ある送信機のうち、特定の端末の通信容量を犠牲にしてほかの端末との通信容量を増加させることが最適解になることが起こりうる。これは実運用上、利用者にとって良い通信品質とは言えないため、利用者間の公平性を考慮する必要がある。Proportional Fairness による最適化は以下の式を最大化する問題として定式化される [9]。

$$F_S(\theta) := \sum_{i \in S} \log C_i(\theta)$$

ここで、 S, i はそれぞれアクティブな送信機の集合と送信機のインデックスである。

屋内環境における電波伝搬は直接波だけでなく、複数の反射波が重なりあうマルチパスと呼ばれる伝搬になり、解析的に最適なアンテナ角度を決定することが難しい。そこで、提案装置では、ブラックボックス最適化の一種であるベイズ最適化 [10] を用いてアンテナ角度の最適化を行う。ベイズ最適化はガウス過程回帰を応用し、過去のサンプル点から最適化対象の式の予測と探索が十分でない領域の判断を同時に行い、次に探索する点を決定する方式で、少ない探索回数で最適化を行うことができる。一般に次の探索点の計算に時間がかかる欠点があるが、提案装置ではハードウェアの駆動に比べて無視できる程度の計算時間であるため、本装置には適していると判断した。

3-4 アクティブな送信機の変化への対応

送信機が複数台存在したとしても、すべての端末が恒久的に通信し続けることはまれである。ここでは、それぞれの送信機がデータの送信を行う期間 (アクティブ) と送信を行わない期間 (非アクティブ) を非同期に切り替える状況を想定する。アンテナの最適な角度は通信している送信機ごとに異なるため、アクティブな機器の組み合わせごとに最適化を管理する必要がある。そこで提案手法では、アクティブな送信機の組み合わせごとに、最適化の途中経過を保存しておくことで、並行して異なる最適化を行えるようにした。すなわち、現在のアクティブな送信機を検知後、その組み合わせ S に対応する最適化の状況 $\mathcal{O}[S]$ を取得し、次に探索するアンテナ角度を計算し、モーターを駆動する。通信容量を測定後、組み合わせ S に対する探索結果 $\mathcal{O}[S]$ として記録する。アクティブな組み合わせの変化を検知した場合、新しい組み合わせ S' に対する最適化の経過 $\mathcal{O}[S']$ のみを更新するため、元の組み合わせ S に対する最適化の状況 $\mathcal{O}[S]$ は維持され、再度、組み合わせ S に戻った際に問題なく、最適化経過が復元される。この方式では、最適化完了後も最適なアンテナ角度がそれぞれの組み合わせごとに保存されるため、送信機のアクティブ・非アクティブ状態が切り替わった際に最適なアンテナ角度が即座に設定される。

3-5 通信環境変化への対応

送信機のアクティブ・非アクティブの変化とは異なり、送信機自体の移動や人の移動による通信環境変化については、元の通信環境に戻る保証がないため、過去の最適化結果を保存しておくのは非効率である。そ

ここで、通信環境変化を検知した際は、最適化状況をリセットする仕組みを導入した。CSI を使う通信端末位置推定や人の位置推定の研究も存在するが、これらは訓練データセットを用いる機械学習手法であるか、電波伝搬の物理モデルの逆問題を解くものであり、計算量が大きくなる傾向にある。そのため、このような環境が変化したかどうかのみ判断すればよい本研究においてはこれらの手法は過剰である。そこで、本研究では、最適なアンテナ角度に対する通信容量を保存しておき、その容量が変化した場合に通信環境が変化すると判定することとした。実験では、変化の判定の閾値は 5%とし、5%以上の通信容量の変化を検出した際に、最適化状況をリセットしてやり直すように設定した。ただし、人の移動による見通し通信の一時的な遮蔽など、瞬時的な変動だけでは、元の状態に戻る可能性もあるため、そのような場合は最適化をやり直さず、通信容量の差が閾値を継続的に超えた場合にのみ最適化をやり直すこととした。一連の動作を Algorithm 1 に示す。

Algorithm 1 Concurrent antenna orientation optimization for multiple STA combinations

```

1: while optimization is running do
2:   Observe the current active STA combination  $S$ 
3:   if  $S = \emptyset$  then Wait  $T_{\text{wait}}$  and continue
4:    $\theta \leftarrow \mathcal{O}[S].\text{suggest}()$ 
5:   Move antennas to  $\theta$  and wait  $T_{\text{wait}}$ 
6:   if any STA in  $S$  is inactive then continue
7:   for all  $i \in S$  do
8:     Calculate average channel capacity  $\bar{C}_i(\theta)$ 
9:   end for
10:  if not  $\mathcal{O}[S].\text{is\_converged}()$  then
11:    Calculate the objective value  $F_S(\theta)$  by (2)
12:     $\mathcal{O}[S].\text{report}(\theta, F_S(\theta))$ 
13:    if converged at this round then
14:      Store the best antenna orientation  $\theta_S^{\text{best}}$ 
15:       $C_{S,i}^{\text{best}} \leftarrow \bar{C}_i(\theta_S^{\text{best}})$  ( $\forall i \in S$ )
16:    end if
17:  else
18:    if environment change is detected then
19:       $\mathcal{O}[S].\text{reset}()$ 
20:    end if
21:  end if
22: end while

```

3-6 リアルタイムな通信品質可視化

提案装置は WebUI (Web User Interface) によるリアルタイムの通信品質可視化機能とアンテナ角度制御インターフェースを実装している。WebUI を図 2 に示す。WebUI はブラウザ上で動作し、提案装置と同一ネットワーク内の端末から OS に依存せず操作することができる。これは、研究者のみならず、非専門家のユーザが利用することで、電波伝搬についての興味を誘発し、知識を深める効果を意図した設計である。ユーザが WebUI 上で実際にアンテナを回転させ、通信品質の変化を確認したり、最適化の経過を観察したりすることができる。WebUI では RSSI と通信容量の時系列データ、リアルタイム CSI を表示しており、アンテナが回転することで、RSSI や通信容量の増減や、CSI の形状変化を観察することが可能である。右下にアンテナ制御インターフェースが配置され、アンテナの角度を自由に操作することができる。また、図 3 には最適化途中に探索したアンテナ角度と RSSI のヒートマップを示している。実験開始前は多峰的な結果が得られると予想していたが、本実験により単峰的な結果が得られた。このことはブラックボックス最適化ではなく、より簡易なアルゴリズムによる最適化が可能であることを示唆しており、その開発は今後の課題に含まれる。

本提案装置とこの WebUI は国際会議 IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC) にてデモンストレーション発表を行い、高い評価を受け、Best Demo Award-Runner Up を受賞した。



図 2. 通信品質のリアルタイム可視化とアンテナ制御の WebUI

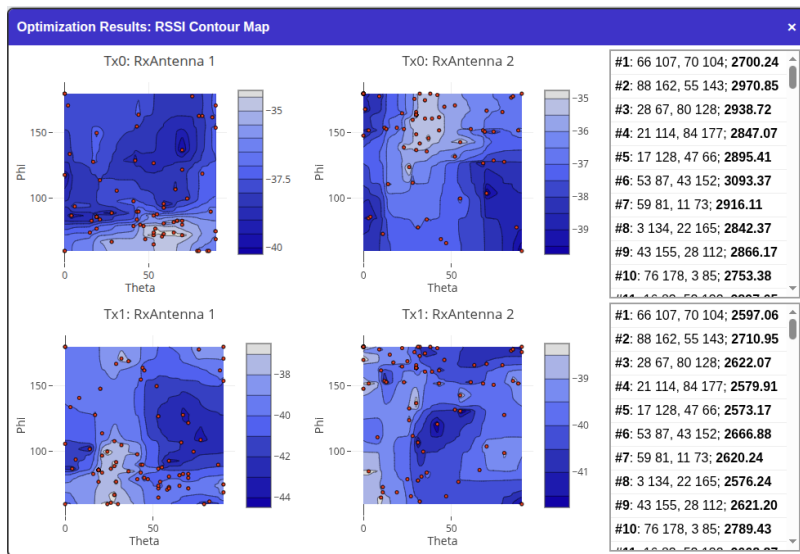


図 3. アンテナ角度に対する RSSI のヒートマップ

4 実験結果

4-1 単一リンクによる基礎実験と偏波角度の影響

まず、提案装置と送信機を対向して設置した状態でアンテナ角度の最適化を行った。送受信機間の距離は 2.0m として見通し内通信を行った。キャリア周波数は 5GHz 帯、帯域は 160MHz として CSI を 0.1 秒間隔で取得した。ベイズ最適化は 100 回の試行で打ち切った。得られた結果を図 4 に示す。図 4(a)、(c)は送信機のアンテナの設定であり、図 4(b)、(d)がそれぞれに対応する最適化結果として得られた受信機である提案装置のアンテナ角度である。最適なアンテナ角度は送信機とほぼ平行な結果となった。これは偏波の影響が考えられる。電波には偏波と呼ばれる向きが存在し、その向きを合わせることで受信できる電力が大きくなる。

この実験においては、近距離で見通し内通信を行っていることから、偏波の向きを合わせることで受信電力が大きくなり、通信容量が最大化されるという物理現象から説明可能な結果が得られた。このことから、物理モデルを使用しないベイズ最適化であっても、十分な最適化結果が得られることを示している。

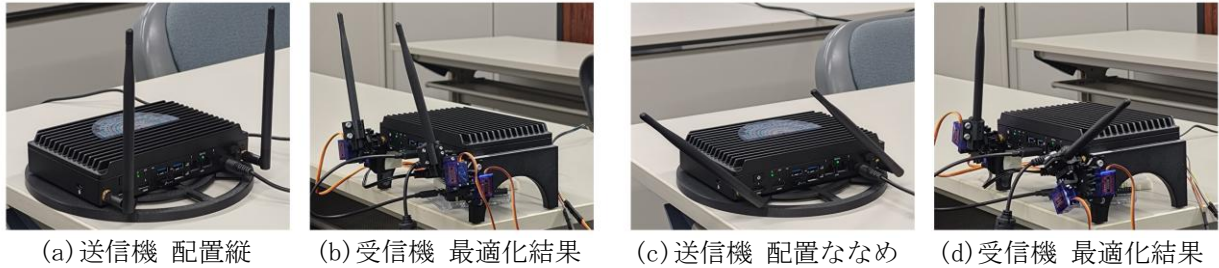


図 4. 送受信機を対向した場合のアンテナ角度最適化結果

4-2 複数リンクでの動的環境の実験

(1) 実験環境

複数送信機がアクティブ・非アクティブ状態を切り替えながら通信を行う環境で、提案装置の有効性を確認するための実験を行った。実験環境を図 5 に示す。提案装置は受信機 (RX) として、1.7m の高さの脚立の上に配置し、2 台の送信機 (TX A、TX B) を高さ 0.7m の机の上に配置した。TX A は提案装置と同じく ASUS NUC 13 Rugged であり外部オムニアンテナを搭載している。TX B は Intel NUC 12 Pro Kit を使用しており、アンテナは筐体内部に搭載されている。提案装置のアンテナは方位角 (60~180°) および仰角 (0~90°) の範囲で独立して制御した。TX から PicoScenes により 0.1 秒間隔で CSI 計測フレームを送信することで、ストリーミング送信を模擬した。アンテナの角度変更後、CSI が安定化するまでの待機時間を 2.0 秒として、チャンネル容量の平均時間窓は 1.0 秒とした。RX が 2.0 秒間フレームを受信しなかった場合に対応する TX が非アクティブになったと判断した。アクティブな送信機の組み合わせは TX A のみ (S_A)、TX B のみ (S_B)、TX A と TX B 両方 ($S_{A,B}$) がアクティブの 3 通りあり、それぞれ並行して最適化が実行される。アクティブ・非アクティブの切り替えは手動で行った。ベイズ最適化の繰り返し回数は前述の基礎実験の結果を参考に 50 回で打ち切ることとした。

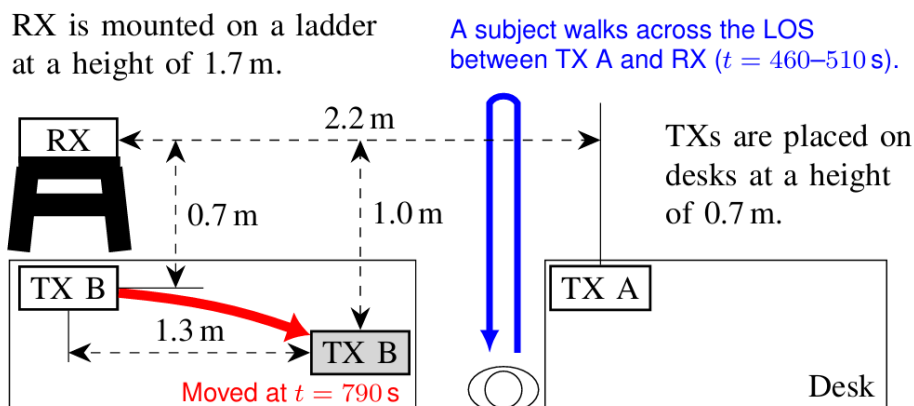


図 5. 送受信機の配置 (鳥観図)

(2) 送信機のアクティブ・非アクティブ切り替えに対する基本動作の確認

TX A と TX B が両方アクティブな状態 ($S_{A,B}$) で実験を開始した。実験時の通信容量の時間変化を図 6 に示す。2 台の送信機との通信容量が実線で示されており、縦の橙の実線が最適化が完了した時刻、縦の点線が最適化のリセットが発生した時刻を表している。ベイズ最適化により、2 台の送信機の公平性を最大化する

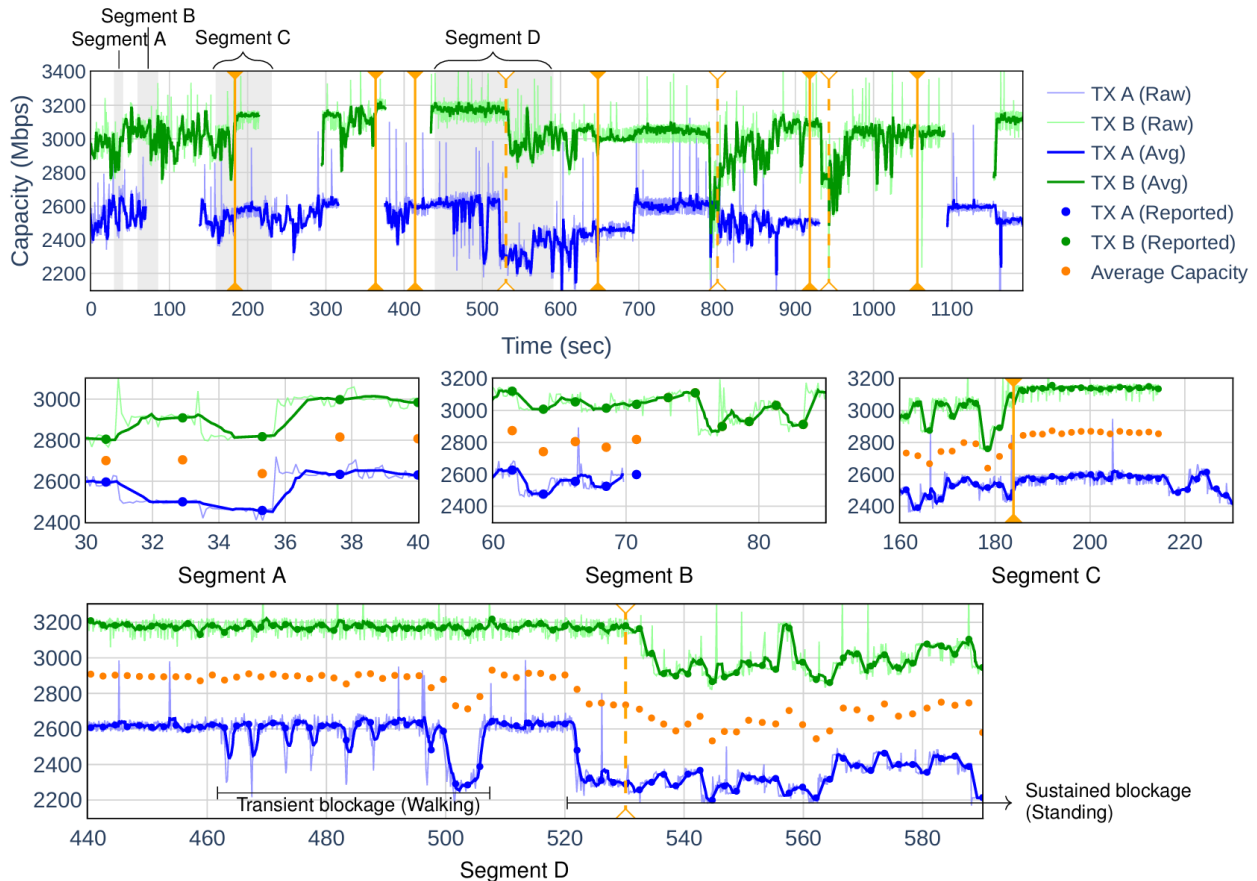


図 6. 通信容量の時間変化

アンテナ角度の探索が行われており、最初は通信容量が安定しない。これはアンテナ角度探索により、多数の角度で通信容量を確認しているためである。Segment A には時刻 30 秒～40 秒の通信容量を拡大した図を示している。薄い実線が瞬時通信容量を表し、濃い実線が移動平均を表す。アンテナの探索と通信容量の測定は 2.0 秒おきに行われるため、図からも約 2 秒間隔で通信容量が変動していることがわかる。また、瞬時通信容量はアンテナの角度による変化を反映できており、約 0.2 秒でアンテナの駆動が完了していることがわかる。

時刻 70 秒程度で、TX A を非アクティブとした。この時点で $S_{A,B}$ の最適化 $O[S_{A,B}]$ は停止され、 S_B に対応する最適化の情報 $O[S_B]$ が呼び出され、TX B 単独向けの最適化が行われる。その後、時刻 140 秒程度で TX A が再びアクティブになり、一時保存されていた $S_{A,B}$ に対する最適化 $O[S_{A,B}]$ が再開された。この最適化は時刻 183 秒付近で完了し、その後アンテナは最適な角度に維持されるため、Segment C に示す通り、通信容量は高い値で安定している。TX B が非アクティブになった際には、TX A 単独向けの最適化 $O[S_A]$ が行われた。この一連の状態遷移において、アクティブな送信機の組み合わせが変更されても、対応する最適化経過が保持され、再度の変更により、一度観測した組み合わせに戻った際に最適化経過が期待通り復元されることを確認した。

(3) 一時的な遮蔽に対する頑健性

実環境においては、人が通信経路を横切って移動することで、一時的な遮蔽が発生する。遮蔽されている瞬間は電波が減衰し、一時的に通信容量が減少する。しかし、その後見通しが回復すると通信容量も元の状態に戻るため、このような場合は、最適化をやり直さず探索結果を維持することが望ましい。実験では時刻 460 秒付近から 510 秒付近で図 5 の青い矢印に沿って TX A との見通し通信を遮蔽するように被験者が往復移動した。その様子は図 6 の Segment D に示されており、短時間の通信容量の低下が観測されている。設計の意図通り、瞬時的な通信容量の変動では最適化をやり直さず、最適なアンテナ角度が維持されることを確認した。

(4) 継続的な環境変化への適応

その後、時刻 520 秒付近で被験者は TX A との見通し通信を遮蔽する位置に停止した。そのため、TX A との通信容量が 300 Mbps 程度減少している。継続的な通信容量の変化を検知したことで最適化 $\mathcal{O}[S_{A,B}]$ が再実行される。TX B に対しては通信容量が大きくなるようアンテナ角度が最適化されていたが、改めて探索が始まることで、通信容量が減少している。その後、時刻 650 秒付近で最適化が完了しているが、公平性を考慮する最適化が実行されたため、通信状況の悪い TX A をより優先するような配置が最適な結果として得られた。時刻 690 秒に被験者は見通し通信を遮蔽しない位置に移動したため、TX A の通信容量が向上した。この時の通信容量の変化が閾値の 5%を超えなかったため、最適化のリセットは発生しなかった。

続いて、時刻 790 秒で TX B を図 5 の灰色で示す位置に移動した。送信機の移動後、TX B に対する通信容量が 400 Mbps 程度低下している。継続的な通信容量の変化を検知したため、提案装置は最適化を時刻 800 秒からやり直し、もとの通信容量と同程度の水準まで回復した。なお、その後 TX A が時刻 940 秒付近で非アクティブになると、最適化のデータとして $\mathcal{O}[S_B]$ が参照されるが、ここには TX B 移動前の最適なアンテナ配置が格納されているため、通信環境の変化を検知することになり、 $\mathcal{O}[S_B]$ はこのタイミングでリセットされて再度最適化が開始されている。

ベイズ最適化はアクティブな送信機のそれぞれの組み合わせにつき、100 秒程度で十分効果の高い最適化を実施できており、日常利用には問題ない時間であると考えられる。

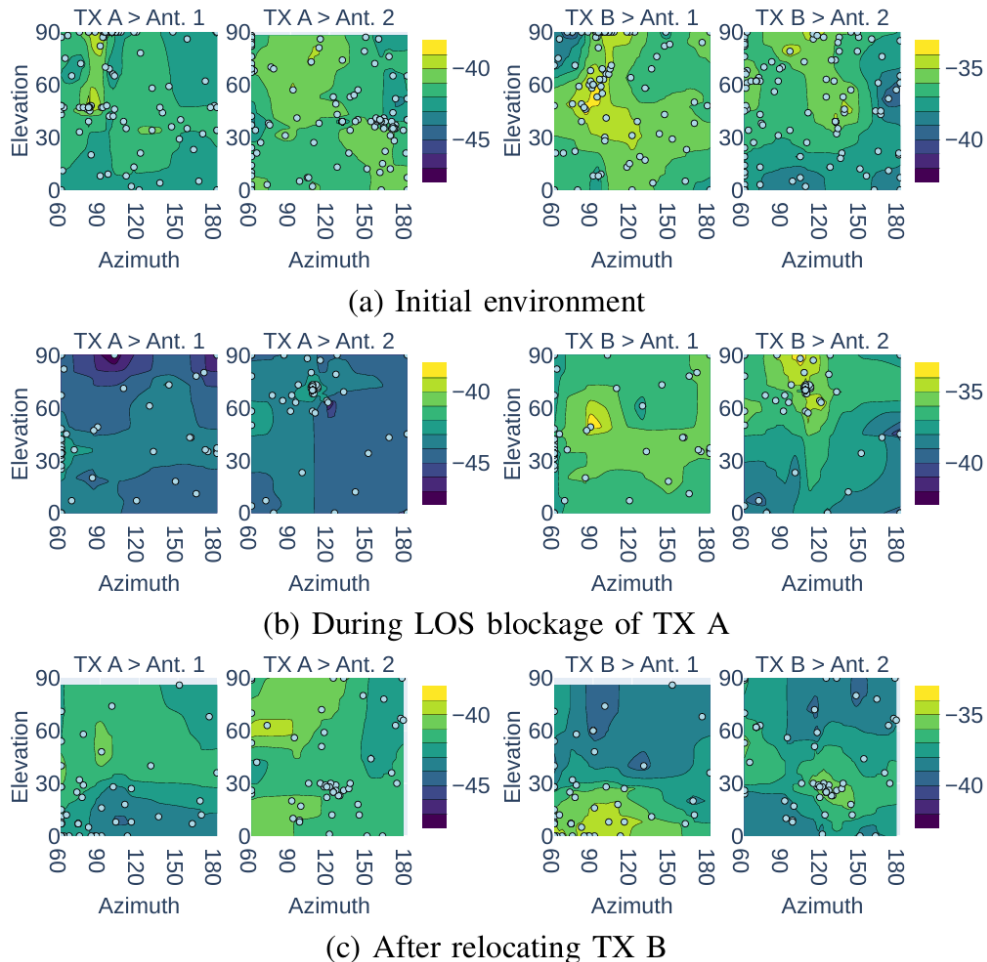


図 7. アンテナ角度と RSSI の関係

(5) アンテナ角度と RSSI の関係

図 7 には実験途中で発生した最適化によって得られた、アンテナ角度と RSSI の関係を示している。上段から順に、(a)初期配置、(b)被験者による TX A 遮蔽時、(c)TX B を移動後の図であり、2 台の送信機から 2

本の受信アンテナへの受信電力をそれぞれ4つの図に分けて描いている。白いマーカーがベイズ最適化によって探索し、RSSIを実測した角度であり、実測値をもとにRSSIの予測を等高線図で示している。色の明るい箇所が、受信電力の大きいアンテナ角度を表している。図7からアンテナの角度によって3~5dB程度の差が発生しており、アンテナ角度調整による電力利得が得られることがわかる。また、2台の送信機TX AとTX Bに対する最適なアンテナ角度が異なることから、単純なRSSIの最大化だけではない、通信容量の公平性を考慮した最適化が必要ながわかる。

5 まとめと将来展望

本研究では、Wi-FiのAPが周囲の電波環境に応じて、自身のアンテナ角度をサーボモータにより制御し、自律的に最適化する装置およびリアルタイムな通信品質を可視化するWebUIを開発した。基礎実験では、送受信機を対向させてベイズ最適化を行い、偏波の影響を考慮したアンテナ角度の最適化が可能であることを確認した。さらに、複数の送信機が存在する環境で実験を行い、アクティブな送信機の組み合わせが変化する状況では、それぞれの組み合わせに対して異なる最適化を並行して行えることを確認した。また、人の移動による見通し通信の遮蔽や送信機の移動に際して、瞬時的な電波伝搬環境の変化と継続的な変化を適切に識別し、最適化をリセットするかどうかを正しく判定できていることを確認した。

本研究は近年注目されるフィジカルAIと親和性が高い。フィジカルAIはロボットがセンサを通じて実世界を認識し、AIによる高度な信号処理の結果、ロボットの身体を賢く駆動させるシステムである。本研究では、従来は物理的なアクチュエータを持たなかったAPにアンテナを駆動するモーターを搭載することで身体性を持たせ、CSIをもとにベイズ最適化により通信品質を向上することを達成しており、フィジカルAIを通信機器に応用したものと位置づけられる。

今後の課題として、RSSIのヒートマップの単峰性を考慮した最適化アルゴリズムの考案のほか、CSIを用いた周囲環境センシングを利用して、遮蔽の予測などを含めた通信品質向上が挙げられる。また、アンテナ角度制御によるCSIセンシング自体の性能向上が可能か否かも検証すべき項目である。このようなフィジカルAIによるISACの推進が本研究の発展の方向性として考えられる。

【参考文献】

1. I. Uchendu and J. R. Kelly, "Survey of beam steering techniques available for millimeter wave applications," *Progress in electromagnetics research B*, vol. 68, pp. 35–54, 2016.
2. S. Kutty and D. Sen, "Beamforming for millimeter wave communications: An inclusive survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 18, no. 2, pp. 949–973, 2016.
3. L. Zhu, W. Ma, B. Ning, and R. Zhang, "Movable-antenna enhanced multiuser communication via antenna position optimization," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 23, no. 7, pp. 7214–7229, 2024.
4. B. Zheng, T. Ma, C. You, J. Tang, R. Schober, and R. Zhang, "Rotatable antenna enabled wireless communication and sensing: Opportunities and challenges," *IEEE Wireless Commun.*, pp. 1–8, 2025.
5. B. Zheng, Q. Wu, T. Ma, and R. Zhang, "Rotatable antenna-enabled wireless communication: Modeling and optimization," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 74, pp. 6825–6842, 2026.
6. C. Bocanegra, K. Alemdar, S. Garcia, C. Singhal, and K. R. Chowdhury, "NetBeam: Networked and distributed 3-D beamforming for multi-user heterogeneous traffic," in *2019 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, Newark, NJ, USA, Nov. 2019, pp. 1–10.
7. Z. Jiang, T. H. Luan, X. Ren, D. Lv, H. Hao, J. Wang, K. Zhao, W. Xi, Y. Xu, R. Li, "Eliminating the barriers: Demystifying Wi-Fi baseband design and introducing the PicoScenes Wi-Fi sensing platform," in *IEEE Internet of Things J.*, vol. 9, no. 6, pp. 4476–4496, Mar., 2022, doi: 10.1109/JIOT.2021.3104666.

8. A. Goldsmith, S. A. Jafar, N. Jindal, and S. Vishwanath, "Capacity limits of MIMO channels," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 21, no. 5, pp. 684–702, 2003.
9. H. Shi, R. V. Prasad, E. Onur, and I. Niemegeers, "Fairness in wireless networks: Issues, measures and challenges," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 16, no. 1, pp. 5–24, 2014.
10. B. Shahriari, K. Swersky, Z. Wang, R. P. Adams and N. de Freitas, "Taking the human out of the loop: A review of Bayesian optimization," in Proc. of the IEEE, vol. 104, no. 1, pp. 148–175, Jan. 2016, doi: 10.1109/JPROC.2015.2494218.

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
A Mechanical Wi-Fi Antenna Device for Automatic Orientation Tuning with Bayesian Optimization	IEEE Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)	2026 年 1 月