

トラフィック変動に追従する動的スモールセルネットワーク における無線通信特性の評価及び改善

Evaluation and improvement of wireless communication in
dynamic small cell network for traffic fluctuation tracking

研究代表者 東京工業大学 超スマート社会卓越教育院 特任准教授 丸田 一輝^{*}
共同研究者 東京農工大学 工学研究院 准教授 中山 悠

Kazuki Maruta and Yu Nakayama

We previously conceived a new concept termed an adaptive mobile network (AMN), which can efficiently support exploding mobile traffic via a small cell base station mounted on moving objects such as a vehicle. The base station functionality can be turned on/off according to the spatio-temporal traffic demands. In this study, we investigate the wireless communication techniques to establish AMN feasibly. Here we focus on the two scenarios as the vehicle is static (parking) or moving. The key idea of the former is to activate the base station function of the vehicle by exploiting the correlation between the mobile traffic of the parked one. In the latter, we focused on the one-way movement of the vehicle traveling on the road and proposed a simplified and fast beam tracking scheme. We then proposed an enhanced technology of the null-space expansion that can stably realize the spatial multiplexing transmission/reception to multiple moving targets.

要旨

これまでに、モバイルトラフィックを効率的に収容可能な手段として、自動車などの移動体にスモールセル基地局機能を搭載し、トラフィックの時空間的な分布に追従して当該機能をオン/オフ制御するシステムコンセプトである適応的モバイルネットワークを提案した。本研究では、上記システムを実現可能とするためのネットワーク構成技術並びに無線通信技術の確立を目的とし、車両の静止(駐車)/移動シナリオにおいてそれぞれ有効な手法を提案する。前者においては駐車車両とモバイルユーザのトラフィックに相関があることを利用し、駐車車両の基地局機能を有効化するものである。後者においては道路上を走行する車両の移動の一方向性に着目し、簡易なビーム追従法を提案した。さらに複数の移動体との通信を安定的に実現可能な改善技術についても提案し、その有効性を明らかにした。

1. まえがき

爆発的に増加を続ける通信トラフィックを効率的に収容するために、基地局の通信可能エリア(セル)を狭小化(スモールセル化)し、かつ多数設置することによりシステム全体の容量を向上する手段が取られている。従来の固定的なスモールセル展開シナリオでは設置後の配置変更は想定されておらず、オフィス街や住宅街といったトラフィック要求量の時間変動が大きいエリアでは、設備の利用効率を欠いて

しまう。この課題に対し、トラフィック変動に応じて基地局が自律的かつ動的に移動する適応的モバイルネットワーク⁽¹⁾⁽²⁾を提案し、検討を進めている。これは、自動車や鉄道などの移動体に基地局機能を搭載し、トラフィックの変動に追従するように移動しないしは基地局機能のオン/オフを制御するものである。これまでに、設備コストの観点から評価を行い、スモールセル固定配置の場合と比較して所要基地局数を削減可能であることを示している。また、ユーザエクスペリエンスに直接関わる通信の観点からシステムを具体化することを目的とし、先行検討として及び基地局-ユーザ間(アクセス)の通信性能についての評価を実施した⁽³⁾⁽⁴⁾。本研究では、基地局-ネットワーク間(バックホール)区間の接続手法を含めた全体的なネットワーク構築手法を検討の対象とする(図1)。

具体的には、スモールセル基地局が自動車のような比較的高速な移動体に搭載される場合、バックホール基地局-車両もしくは車両-ユーザ(歩道に位置)間の無線接続を考えると、その通信可能時間は非常に短く困難と考えられる。このような車両を対象とした無線通信ネットワークを構築する場合に生じる特有の課題に対し、本研究では以下のアプローチにて検討を行った。

1. 静止(駐車)シナリオに限定した構成法
2. 車両の移動特性に着目した簡易ビーム追従法
3. 移動環境にロバストな空間多重伝送方式

^{*}助成決定時所属 千葉大学大学院 工学研究院 特任助教

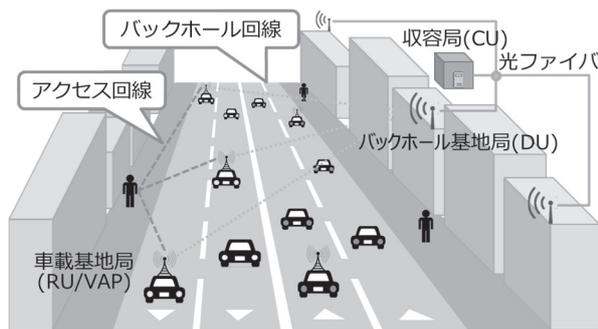


図1 車載基地局による適応的モバイルネットワーク

以下、第2章においてシステム構成を定義し、第3章において上記3項目の検討結果について報告する。最後に、第4章において本報告をまとめるとともに、今後の展望を述べる。

2. システム構成

2.1 適応的モバイルネットワーク

システム構成を図1に示す。基地局は機能が分割された集中型無線アクセスネットワーク(Centralized radio access network, C-RAN)⁽⁵⁾を前提とし、中央制御ユニット(Central Unit, CU)、分散ユニット(Distributed Unit, DU)、アンテナユニット(Radio Unit, RU)から構成される。RUは車両に搭載されることから、車載アクセスポイント(Vehicle-mounted Access point, VAP)と呼ぶ。CU-DU間は光回線にて接続される。スモールセルを形成するRUは車両を含め多数展開され得ることから、DU-RU間を無線バックホールにて構築することで柔軟なスモールセル展開が可能となる。無線バックホール回線としては周波数資源が潤沢な高周波数帯及び超多素子アレーアンテナを用いる手法が有効と考えられる⁽⁶⁾。アレーアンテナを用いたビーム形成により周波数に比例して大きくなる伝搬損失を補償し、かつ他局への与干渉を低減可能であることから周波数の空間的な再利用性も高まることが期待できる。

2.2 課題及び検討のアプローチ

検討対象とするシステムは、移動体を基地局とすることから、DU-RU/VAP間のバックホール回線も無線で確立する必要があり、かつ動的であることから無線伝搬路(チャンネル)が時間的に変動する。無線通信においては時間変動するチャンネルは伝送特性の大きな劣化要因になることから、これを補償する技術が必要である。

そこで、まずに、適応的モバイルネットワークの適用対象を駐車車両に限定したシステム構成について検討を行った。飲食店・ショッピング施設等を対象とすれば、駐車車両とモバイルトラフィックには一定の相関関係があると考えられ、駐車車両をスモールセル基地局とすれば移動は無いため、安定したバックホール回線を実現できる。近年は電気自動車向けの充電設備が備わっている駐車場も増えてきていることから、電源供給の観点からも合理的である。

次に、移動環境におけるバックホール回線について検討した。高周波数帯を用いた超多素子アレーアンテナによりバックホール回線を構築する場合、対してビームを形成することが一般的であるが、移動する車載基地局に対して常にビームが向けられるように追従を行う必要がある。ビームをどのように制御するかが課題となるが、車両は道路上を走行することから、その移動性を予測することが容易であり、その特徴を利用した簡易かつ高速なビーム追従法を検討する。

最後に、上記の改善手法について検討した。複数の車載基地局が存在する場合には同時に大容量無線バックホール回線を提供する必要がある。時間ないしは周波数という異なる無線リソースを割り当てることが最も容易な手段であるが、その分伝送効率は劣化してしまう。同一時間・同一周波数にて信号を送信できれば、本来の伝送容量を維持した通信が可能であるが、同一チャネル干渉(電波干渉)が課題となる。Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)と呼ばれるアンテナ信号処理により干渉除去を実現可能である。これはある瞬間のチャンネル状態情報(Channel State Information, CSI)を用いて各アンテナにウェイトを適用するものであるが、移動環境においてはチャンネル環境が瞬時的に変化してしまうため、ストリーム間の干渉が生じてしまう。さらには、通信対象ではない移動局からの干渉も問題となる。そこで未知干渉を低減ながらもチャンネルの時変動に耐性のある空間多重方式を提案した。

3. 検討結果

3.1 固定シナリオ: 駐車車両に特化したスモールセルネットワーク

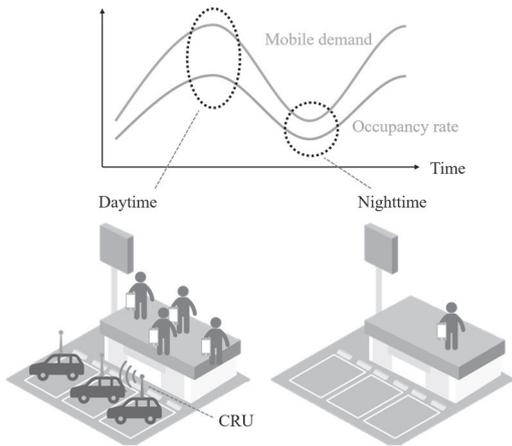


図2 モバイルトラフィックと駐車車両の関係

本検討では、RUを、より簡易な制御かつトラフィック収容効果が見込める駐車車両へ搭載することを提案する^{[1][2][3][4][5]}。ここではクラウドソース型RU(CRU)と呼ぶ。本システム構成において、システムレベルシミュレーションによりその妥当性を示す^{[2][3]}とともに、屋外伝送実験により実現可能性を明らかにする^{[4][5]}。

3.1.1 提案システム構成

提案するコンセプトは、ある地点における駐車率とモバイルトラフィック量との間にはある程度の相関がある、という一般的な想定に基づく。例えば店舗(レストラン)では、昼食等の時間帯には来店客の増加とともに駐車率が上昇し、同時に店内及び周辺におけるモバイルユーザ数が増加する(図2)。一方で深夜の閉店時等には来店客がおらず、駐車率及び周辺のモバイルトラフィックが減少する。つまり、トラフィック量と駐車率には相関があるものと考えられ、この傾向を利用する。CRUを一般車両に搭載し、駐車時に所定の条件で起動して小セルを構成し、近隣のDUに対し無線フロントホール接続を確立する。提案コンセプトについて、駐車場キャパシティ、各車両のRU搭載率等から、モバイルトラフィックを収容するためのCRU数の目標値を見積もることが可能な理論式を導出した。

3.1.2 シミュレーション評価

上記モデルにおけるパラメータと照らし合わせ、システムレベルシミュレーションを実施した。1km×1km四方を評価対象とし地上設置型RU(Ground RU)及びユーザ端末(UE)それぞれが200、一様に分布

表1 シミュレーションパラメータ

Parameters	Values
Carrier frequency	3.5 GHz
Bandwidth	20 MHz
Channel model	3D-UMi
Shadowing deviation	4 dB
Number of DU / VAP antennas	256 (16×16) / 10
VAP / UE antenna	1, Omnidirectional
VAP antenna height	1.5 m
UE antenna height	1.2 / 4.2 / 7.2 m
VAP / UE antenna gain	0 / 0 dBi
DU antenna pattern	3GPP model
VAP Transmission power	33 dBm
Receiver noise level	-92 dBm

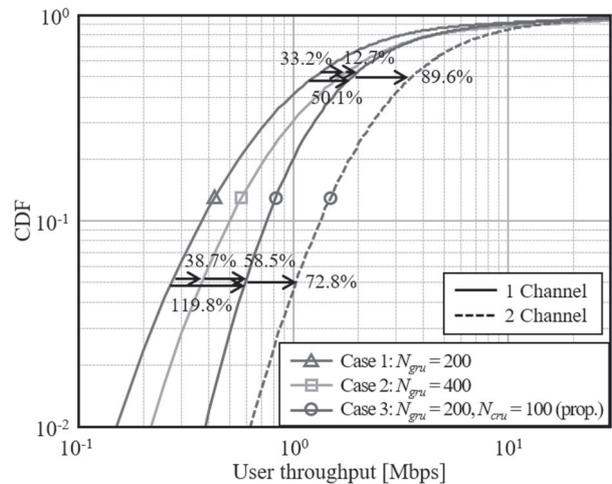
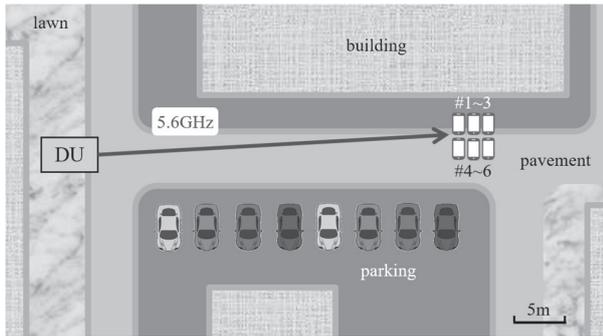


図3 ユーザスループットの累積確率分布特性

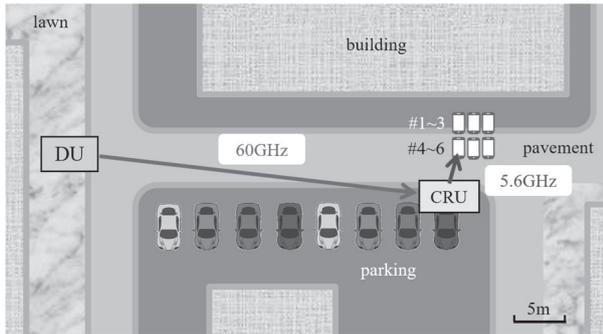
するものとする。さらに、40UEが密集する高トラフィック領域(Hotspot)を25箇所配置する。本条件において、以下3手法を比較する。

- Case 1: 小セル基地局の追加を行わない
 - Case 2: 固定基地局総数を倍にする(一様分布)
 - Case 3: 高トラフィック領域(駐車場)にRU追加
- 提案手法であるCase 3において、駐車場あたり4台がCRU機能を起動するものとする。つまりCRUの総数は100である。Case 2と比べると、RU総数は25%削減される。UEは最近傍の(C/G)RUへ接続されるものとし、複数のUEが同じRUへ収容される場合には無線リソースは分割される。無線フロントホール容量はアクセス区間に対し十分大きいものとする。表1にシミュレーション諸元を示す。

図3にシミュレーション結果としてUEスループットの累積確率分布(CDF)を示す。多数のGRUを展開するCase 2は小セル化の効果として自明であり、CDF5%値は38.7%改善する。これに対し、提案手



(a) 固定基地局を想定した従来構成



(b) 駐車車両を介した提案構成

図4 実験シナリオ

法である Case 3 ではその総数が削減されているにも関わらず有意なスループット改善効果が確認できる。Case 1 及び 2 に対する CDF5% 値の改善効果はそれぞれ 119.8%, 58.5% である。さらに利用可能なチャネル数を 2 倍にすると 72.8% 改善される。

3.1.3 実証実験

提案コンセプトの実現可能性を屋外実験によって検証した。実験では 60GHz ミリ波帯 IEEE802.11ac/ad 無線 LAN 機器である IgniteNet 社製の MetroLing を使用した。DU をアクセスポイント、CRU を中継器にて模擬し、端末は ASUS 社製の RogPhone を用いた。実験条件を図 12 に示す。2 台の CRU が駐車中の車両に取り付けられた環境を想定する。伝送レートは 4.62 Gbps (最大) から 385 Mbps (最小) の範囲内で自動的に制御される。CRU から端末へのアクセス回線は 5.6GHz 帯 IEEE802.11ac 無線 LAN を適用した。

実験シナリオを図 4、実験風景を図 5 にそれぞれ示す。従来構成 (Conv.) として、図 4(a) に示すように、固定基地局 (図中の DU) から少し離れた場所に端末が密集している環境を模擬する。提案構成 (Prop.) では、図 4(b) に示すように、駐車車両付近に中継局 (CRU) を配置し、これを介して近傍の端末群とのアクセス回線を確立する。上記構成にて測定したスループットの結果を図 6 に示す。

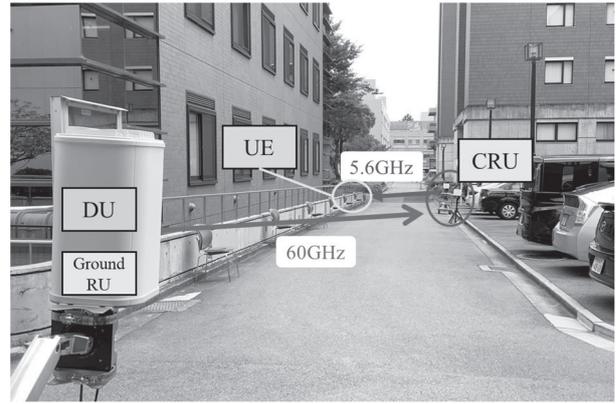


図5 実験風景

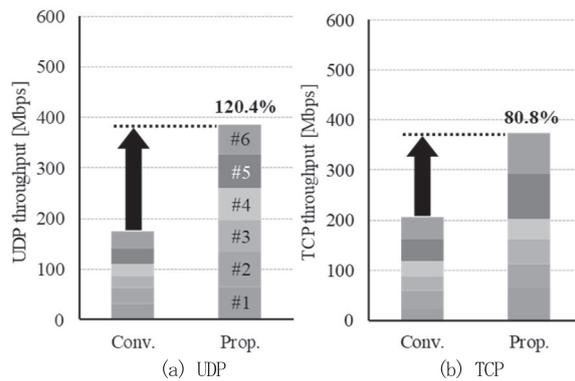


図6 スループット特性 (#は図4の端末番号に対応)

プットの結果を図 6 に示す。トランスポート層プロトコルとして再送制御等を行わない UDP、再送制御等により信頼性を確保する TCP を用いた場合において測定を行った。いずれの場合においても大きなスループット改善が確認でき、その効果は UDP において 120.4%、TCP において 80.8% となった。DU-CRU 間のバックホール回線は 60GHz 帯ミリ波であることから容量が十分であり、この場合中継を介したとしても高トラフィック領域にアクセスポイントを配置することでシステム全体の通信容量を向上させることが可能である。以上から、駐車シナリオにおける提案システムの有効性が実験的検証からも示された。

3.2 動的シナリオ：車両の移動特性を考慮した簡易ビーム追従方式

移動する車両を対象とした無線バックホールの構築も重要な課題である。無線アクセス区間よりも通信距離が大きいことから多素子アレーアンテナを用いたビームフォーミングが有効と考えられる (図 7)。ここでは、道路環境を想定したときの無線バックホール区間を対象とし、高速移動する VAP に対しビームを追従するための簡易な手法を提案する [6][7][8]。

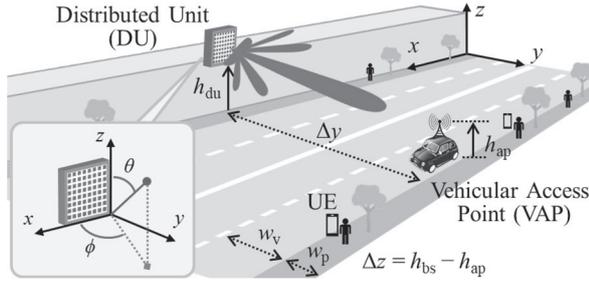


図7 移動する車載基地局へのビーム追従

3.2.1 伝搬モデル及び提案方式

DU – VAP 間の伝搬モデルとして、見通し (Line-of-sight, LoS) 環境を想定する。DU は平面アレー、VAP はリニアアレー構成とする。このとき、VAP の第 j アンテナ及び DU の第 i アンテナ間のチャネル係数は以下の式で与えられる。

$$h_{ij} = \frac{\lambda}{4\pi d_{ij}} \exp\left(-\frac{j2\pi d_{ij}}{\lambda}\right) \quad (1)$$

d_{ij} は VAP の第 j アンテナ及び DU の第 i アンテナ間の直線距離、 λ は波長である。これに対し、DU は位相制御によりビームフォーミングを行う。DU の第 i アンテナ素子に与える位相は以下として与えられる。

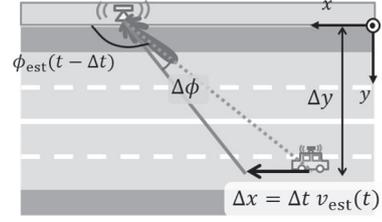
$$w_i = \exp\left(-\frac{j2\pi l}{\lambda} \{(m_t - 1) \cos \phi \sin \theta + (n_t - 1) \cos \theta\}\right) \quad (2)$$

l はアンテナ素子間隔であり、本検討では半波長とする。 m_t 及び n_t はそれぞれ平面アレーアンテナの行方向及び列方向のインデックスである (図 8)。方位角 ϕ 及び天頂角 θ を推定することにより、所望の VAP 方向へのビーム形成により受信利得を獲得する。直線道路において車両は一方方向に移動することから、この特徴を考慮した簡易ビーム追従法を提案する。DU は走査範囲の開始点にてビームを形成しておき、車両が当該ビーム内に達した時点からビーム追従を開始する。推定速度 v_{est} をある初期値から開始し、更新時間間隔 Δt ごとに以下の式に基づいて推定方向を変化させる。

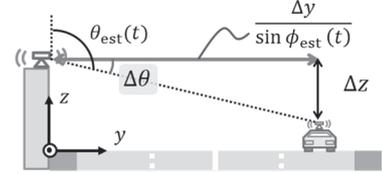
$$\phi_{est}(t) = \phi_{est}(t - \Delta t) - \tan^{-1}\left(\frac{\Delta t v_{est}}{\Delta y}\right) \quad (3)$$

$$\theta_{est}(t) = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta z \sin \phi_{est}(t)}{\Delta y}\right) + 90^\circ \quad (4)$$

このとき、DU から対向する壁面までの道路法線方向の距離 Δy 及び DU と VAP の高低差 Δz はそれぞれ既知とし $\Delta y = 15.5$ m, $\Delta z = 8.0$ m である。これ



(a) 上面図



(b) 正面図

図8 角度パラメータと位置・速度情報の関連

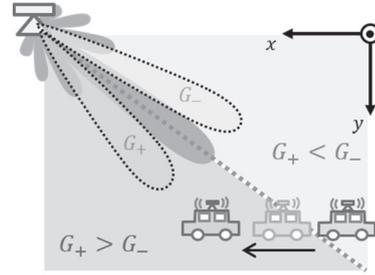


図9 ビーム利得に基づく追従速度の補正

を利用し天頂角 θ_{est} は ϕ_{est} に対して一意に求まる (図 8(b))。追従パラメータの更新時間間隔 $\Delta t = 10$ msec とする。次に、信号強度ないしは SNR ($G(t)$) を観測しながら、これが前時刻のもの ($G(t - \Delta t)$) よりも低下した場合に推定速度の補正を行う。その概念を図 9 に示す。まず形成しているビームに対し、 $\pm \Delta \phi$ の方向に 2 パターンの探索用ビームを形成し SNR を測定する。それぞれ G_+ 及び G_- とする。いずれかのビームにおいてより強い受信レベルを観測したかによって、以下に基づいて推定速度を更新する。

$$v_{est}(t) = v_{est}(t - \Delta t) + \text{sgn}\left(\log \frac{G_+}{G_-}\right) \frac{\alpha G(t)}{G(t - \Delta t)} \quad (5)$$

このとき、+ の指向性利得 G_+ がより強いレベルであればビーム追従が遅れていることになるため推定速度を v_{est} 上げ、反対に G_- が大きければ v_{est} を抑制する制御を行う。受信強度が劣化した際に、2 パターンの探索を行うのみでよいため高速な追従が可能である。また受信強度の比を速度補正の重みとして用いることで VAP の実際の移動速度の変化に柔軟に対応可能である。 α はその敏感さを制御するパラメータであり、ここでは $\alpha = 3$ とした。

表2 シミュレーションパラメータ

Parameters	Values
Carrier frequency	28 GHz
Bandwidth	400 MHz
Channel model	Free Space
Number of DU / VAP antennas	256 (16×16) / 10
Height of DU / VAP antenna	10 / 2 m
DU / VAP antenna gain	8 / 0 dBi
DU antenna pattern	3GPP model
DU Transmission power	40 dBm
Feeder loss	3 dB
Receiver noise level	-80 dBm
Street width	22 m

3.2.2 シミュレーション評価

シミュレーションパラメータを表2に示す。第5世代移動通信システム(5G)においても採用されることとなったミリ波帯として28 GHz帯を想定する。酸素吸収による減衰も考慮する。図7に示す環境において、DUは $h_{du} = 10$ mの高さに壁面に設置されるものとし、観測対象とする道路60 mの中間に位置するものとする。片側2車線道路を模擬し、車道幅 $w_r = 3.0$ m、歩道幅 $w_p = 5.0$ mとする。対抗する車線を走行する高さ $h_{vu} = 2$ mのVAPへのビーム追従特性を評価する。その指標として本評価では下りリンクの受信SNRを用いる。DUは半波長間隔の16×16の平面アレーを備える。VAPには10素子のアレーアンテナを直線状に配置し、最大比合成受信を行うものとする。

このときの車両速度は $0 < x \leq 30$ [m]において60 km/h、 $30 < x \leq 60$ [m]において45 km/hと変化する。初期値として $\phi_{est} = 140^\circ$ 、 $v_{est} = 30$ km/hとし、観測する受信SNRが30 dBを越えた時点で追従を開始する。また $\Delta\phi = 7^\circ$ とする。ここでは隣接するDUやVAPからの同一チャンネル干渉は考慮しない。時刻に対するSNRの変動を図10に示す。理想的にビーム形成を行った場合⁽⁶⁾の特性には劣るものの、アレー利得を維持するようにビーム形成の方向を制御できていることがわかる。また車両速度の変化にも追従できていることも確認できる。このとき、追従を行う範囲は $140^\circ - 40^\circ$ の 100° 幅であり、直線距離にしておよそ40 mとなる。比較方式として予め用意された候補からビーム方向を探索する手法⁽⁷⁾の性能もプロットしているが、方向が限定されていることから必ずしも最適なビーム形成ができていないことが

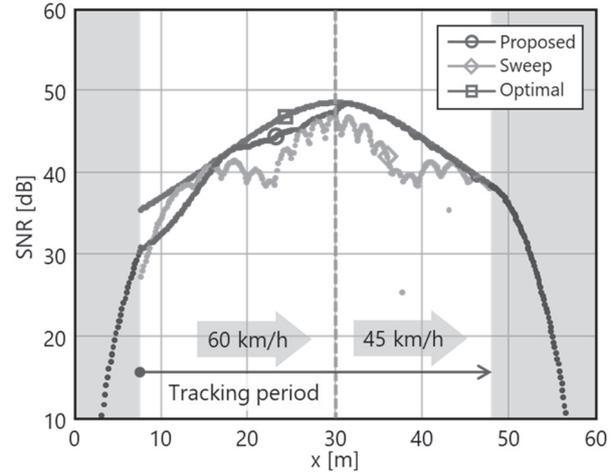


図10 受信SNRの遷移

確認できる。

以上より、無線バックホール区間の簡易ビーム追従法を提案し、により明らかにした。

3.3 大容量化: 超多素子アンテナを用いたモビリティ耐性のある空間多重伝送

前検討項目では、DUから1台のVAPに対するビーム追従法に対する提案技術であった。実環境では、複数のVAPが存在し、これらが同時に通信を試みることになる。このとき、同一時間・同一周波数を用いてバックホール通信を行うと、互いに干渉となるため、伝送性能が著しく劣化することが課題となる。加えて、通信対象ではないVAP等が存在する場合には、それらも干渉源となるため、同時に抑圧する必要がある。複数アンテナを用い、複数のユーザに対して空間多重伝送を行う手法はマルチユーザMIMOと呼ばれる。これは、基地局-端末間のチャンネル状態を事前に取得し(CSI)、これを用いて干渉となる成分をキャンセルするようなウェイトを送信(受信)信号に適用することにより実現される。しかしながら、CSIを取得したタイミングと実際の送信(受信)タイミングが異なる場合、端末が移動したことによりチャンネル状態も変化してしまうため、当該ウェイトを適用したとしても干渉信号はキャンセルされず、伝送性能の劣化につながる。

これまでに、移動環境であってもマルチユーザMIMO伝送を実現可能な手法としてヌル空間拡張法を提案し、その有効性を明らかにしている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。これは、過去の複数のCSIを取得し、それらの干渉チャンネルに対してキャンセルされるようなウェイトを生成することで、ヌル空間が拡張され、将来のチャネ

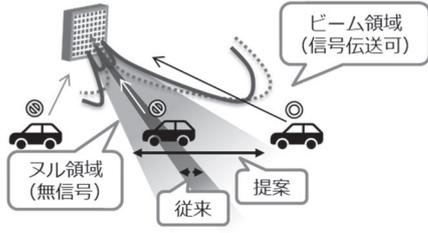


図 11 ヌル空間拡張の概念

ルに対しても干渉抑圧効果が得られるというものである(図 11). 本検討ではこれを応用し, 未知の干渉も同時に抑圧可能とする改善手法を提案する^{[9][10][11]}. VAP から DU への上り回線を対象とし, チャネル時変動環境下かつ同一チャネル干渉信号が存在する場合においても高い通信性能を保つことを明らかにする.

3.3.1 提案方式

受信ウェイト生成手法として送受信間で既知である参照信号(パイロット)の相関を用いて干渉抑圧を行う Sample Matrix Inversion(SMI)法を用いる^[12]. 受信ウェイト \mathbf{W} は各アンテナでの受信参照信号 \mathbf{Y} の自己相関, 及び受信参照信号 \mathbf{Y} と送信参照信号 \mathbf{X} との相互相関を用いて求められる.

$$\mathbf{W}_{\text{conv}} = \left(\mathbf{Y}^{(n)} \mathbf{Y}^{(n)H} \right)^{-1} \mathbf{Y}^{(n)} \mathbf{X}^{(n)H} \quad (6)$$

n は受信フレームの番号である. SMI 法では送信データの先頭に付加した参照信号によってウェイトを算出するため, データ部のチャネルが変動した場合性能が劣化する. そこで提案方式ではデータ先頭部分に付加された参照信号に加えて, 過去の参照信号も利用することによりチャネル変動の補償を行う.

$\mathbf{W}_{\text{prop}} =$

$$\left(\sum_{q=0}^{Q-1} \mathbf{Y}^{(n-q)} \mathbf{Y}^{(n-q)H} \right)^{-1} \sum_{q=0}^{Q-1} \mathbf{Y}^{(n-q)} \mathbf{X}^{(n-q)H} \quad (7)$$

これは, n 時点における受信信号から, 過去 Q 個の参照信号までを遡って保存しておき, ウェイト算出の際にはそれらを単に重ね合わせることによりヌル空間拡張が実現されることを意味する. 図 12 に提案方式の概要を示す. 過去に求めた相関行列の和を新たな相関行列として定義し, ウェイトを算出する.

3.3.2 シミュレーション評価

シミュレーション諸元を表 3 に示す. 干渉レベルとして信号対干渉電力比(Signal-to-Interference

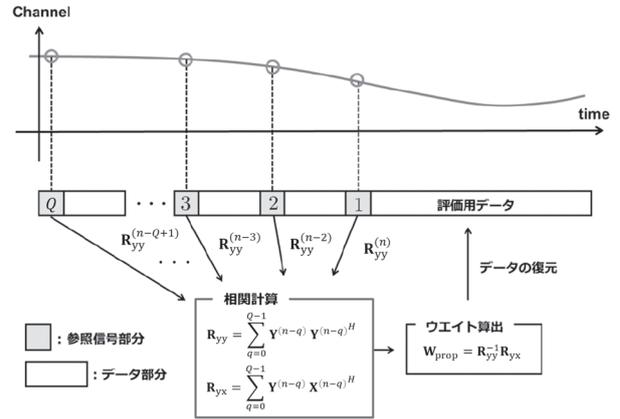


図 12 提案方式の概念

表 3 シミュレーションパラメータ

Parameters	Values
Carrier frequency	28 GHz
Channel model	Rician Fading ($k=10$)
Number of DU / VAP antennas	100 (10×10) / 1
Number of desired VAPs	8
Number of interfering VAPs	2
Reference signal interval	0.833 ms
Input SIR	0 dB
Input SNR	30 dB

power Ratio, SIR)で定義し, 本評価では同レベルである 0dB とする. 受信機雑音の指標である信号対雑音電力比(Signal-to-Noise power Ratio, SNR)は単一素子間において 30dB とした. 8 台の通信対象である VAP は空間多重伝送を行い, 同時に 2 台の通信対象外である VAP に対しては干渉抑圧のみを行う. 図 13 に, 時間遷移に対する干渉抑圧適用後の信号対干渉雑音電力比(Signal-to-Interference-plus-Noise power Ratio, SINR)特性を示す. 参照信号数 Q は事前評価により性能が最大となる 6 とした. 図 13 において, NSE は従来のヌル空間拡張であり, 未知の干渉を抑圧する機能が無い. SMI は(6)式によるものであり, NSE は従来のヌル空間拡張⁽⁸⁾, そして AR⁽¹⁰⁾及び FIT⁽¹¹⁾は将来のチャネル状態を予測する手法である. 提案方式が最も高い SINR を示しており, これに応じて高いスループット性能を実現可能である. 図 14 に, VAP の移動速度に対する SINR 性能を示す. 速度が高くなるに従い SINR は低下の傾向にあるが, 提案方式が常に優位にあることが確認できる. これは高速環境においても安定した無線バックホール回線を確立可能であることを意味する.

以上から, 高速移動環境における複数 VAP の空間多重伝送を実現可能とするヌル空間拡張方式の有効

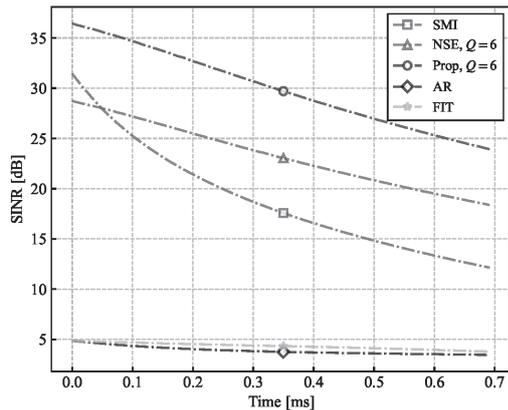


図13 SINRの時間遷移

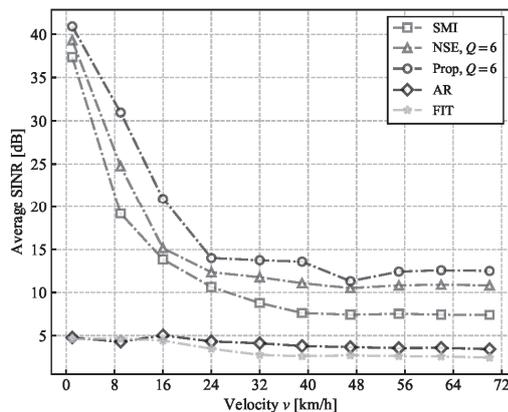


図14 移動速度に対するSINR特性

性を確認することができた。この他、希望信号に対するチャンネルにのみ将来の変動予測を適用することでさらに性能改善を図る手法^[10]、移動速度に応じたヌル拡張次元の最適割り当て手法^[11]、そして無線通信の主流である変調方式直交周波数分割多重 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 方式を考慮した際における SMI のサブキャリアグループ化による性能改善^[12]、CSI 推定制度の改善手法^[13]、等を提案した。

4. まとめ

本研究では、車載基地局から成る適応的モバイルネットワークにおいて、無線バックホールを含めた構成法について検討を行った。駐車車両を活用した静止環境におけるシナリオや、移動環境における効率的・効果的な無線バックホール伝送方式について提案を行い、それぞれ有効性を確認した。後者においては、実環境(実際の道路形状・交差点等)に即した機能拡張が課題として残存しており、継続して検討を進める。

冒頭にも述べたように、提案する適応的モバイル



図15 自動運転車



図16 60GHz帯ミリ波無線伝送システム

ネットワークは時間・空間的に変動するモバイルトラフィックに追従するように基地局機能をオン/オフする、ないしは自律的に高トラフィック領域へ移動することにより実現される。本コンセプトの真の実現のためには、車両の自動運転等も検討対象となる。研究代表者の現所属である東京工業大学 超スマート社会卓越教育院では、自動運転可能な電気自動車(図15)並びに高速大容量通信を可能とするミリ波無線システム(図16)を導入しており、両者を統合させた研究開発が可能である。例えば、車両外部から得られた情報を、無線通信を介して取得し、自動運転を高精度化するというトピックが活発化しつつある。これには本研究にて取り組んだ通信技術のみならず、制御技術、画像認識等、多岐に渡る分野横断的な視点が必要となる。これまで得られた研究成果をもとに、本研究開発フィールドを活用しながらさらに研究を発展させていく予定である。

最後に、本助成をいただいたことにより多くの研究成果を創出することができました。改めまして厚く御礼申し上げます。ここで得られた研究成果は確実に今後につながって行くものと考えております。

発表論文

- [1] 中山悠, 久野大介, 西尾理志, 丸田一輝, 桑野茂, 吉本直人, “駐車車両搭載クラウドソース基地局によるスマートシティ向け適応的C-RAN,” 2019年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-15-13, 2019年9月.
- [2] 丸田一輝, 中山悠, 久野大介, 西尾理志, 桑野茂, 吉本直人, “駐車車両搭載クラウドソース基地局による適応的 C-RAN のシステムレベルシミュレーションによる特性評価,” 2019年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-5-36, 2019年9月.
- [3] Y. Nakayama, K. Maruta, “Adaptive C-RAN Architecture for Smart City with Crowdsourced Radio Units Mounted on Parked Vehicles,” Proc. IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall), Honolulu, Hawaii, USA, September 2019.
- [4] Y. Nakayama, D. Hisano, T. Nishio, K. Maruta, “Experimental Results on Crowdsourced Radio Units Mounted on Parked Vehicles,” Proc. IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall), Honolulu, Hawaii, USA, September 2019.
- [5] Y. Nakayama, T. Nishio, D. Hisano, K. Maruta, “Small Cells Enabled by Crowdsourced Radio Units Mounted on Parked Vehicles for Smart City,” IEEE Access, vol. 8, pp. 17986-17998, January 2020.
- [6] 丸田一輝, 中山悠, 田中健, 安永遼真, 菅宣理, 本田一暁, 久野大介, 安昌俊, “ビークルセルネットワークの無線フロントホールにおけるビーム追従法,” 情報処理学会全国大会, IF-04, 2019年3月.
- [7] 丸田一輝, 久野大介, 中山悠, “車載基地局向け無線バックホールのためのビーム追従法,” 電子情報通信学会 革新的無線通信技術に関する横断型研究会(MIKA), 2020年10月.
- [8] K. Maruta, D. Hisano, Y. Nakayama, “Fast Beam Tracking Algorithm for Wireless Backhaul in Adaptive Vehicular Cell Networks,” Proc. The 39th IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE 2021), Virtual, January 2021. [ICCE 2021 Excellent Paper Award]
- [9] K. Arai, K. Maruta, C-J. Ahn, “Uplink Null-Space Expansion for Multiuser Massive MIMO in Time-Varying Channels Under Unknown Interference,” IEEE Access, Vol. 8, pp. 224292-224305, December 2020.
- [10] K. Arai, K. Maruta, C-J. Ahn, “Prediction-Aided Precoding for Multiuser Massive MIMO Null-Space Expansion,” IEICE Communications Express. [Accepted]
- [11] N. Funaki, K. Maruta, C-J. Ahn, “Mobility-Aware Null-Space Expansion for Multiuser Massive MIMO,” IEICE Communications Express. [Accepted]
- [12] K. Shima, S. Kojima, K. Ito, K. Maruta, C-J. Ahn, “Adaptive Subcarrier Grouping for MMSE-SMI Adaptive Array Interference Suppression,” IEEE Access, Vol. 9, pp. 18361-18372, February 2021.
- [13] 丸田一輝, 井田悠太, 安昌俊, “OFDM 櫛型パイロットにおける繰り返し IDFT/DFT による CSI 補間,” 2020年電子情報通信学会総合大会, B-5-22, 2020年3月.

参考文献

- (1) Y. Nakayama, T. Tsutsumi, K. Maruta, K. Sezaki, “ABSORB: Autonomous Base Station with Optical Reflex Backhaul to Adapt to Fluctuating Demand,” Proc. IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2017), Atlanta, GA, pp.235-243, May 2017.
- (2) K. Honda, R. Yasunaga, Y. Nakayama, K. Maruta, T. Tsutsumi, “Dynamic Mobile Network Architecture Organized by Drivers Decision Making,” Proc. 2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Bologna, Italy, September 2018.
- (3) K. Maruta, Y. Nakayama, K. Honda, D. Hisano, C-J. Ahn, “V2P Connectivity on Higher Frequency Band and CoMP Based Coverage Expansion,” Proc. 2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Bologna, Italy, September 2018.
- (4) 丸田一輝, 中山悠, 本田一暁, 久野大介, 安昌俊, “適応的モバイルネットワークにおける高周波数帯車載スモールセル基地局の歩車間通信特性,” 信学技報, vol. 118, no. 254, RCS2018-167, pp. 89-94, 2018年10月.
- (5) Y. Nakayama, D. Hisano, K. Maruta, “Adaptive C-RAN Architecture with Moving Nodes Towards Beyond 5G Era,” IEEE Network, Volume 34, Issue 4, pp. 249 - 255, July/August 2020.
- (6) K. Maruta, T. Iwakuni, A. Ohta, T. Arai, Y. Shirato, S. Kurosaki, M. Iizuka, “First Eigenmode Transmission by High Efficient CSI Estimation for Multiuser Massive MIMO using Millimeter Wave Bands,” Sensors, Vol. 16, No. 7: 1051, July 2016.
- (7) N. Nonaka, K. Muraoka, T. Okuyama, S. Suyama, Y. Okumura, T. Asai, and Y. Matsumura, “28 ghz-band experimental trial at 283 km/h using the shinkansen for 5g evolution,” in 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring), May 2020, pp. 1-5.
- (8) T. Iwakuni, K. Maruta, A. Ohta, Y. Shirato, T. Arai, M. Iizuka, “Null-Space Expansion for Multiuser Massive MIMO Inter-User Interference Suppression in Time Varying Channels,” IEICE Transactions on Communications, Vol.E100-B, No.5, pp.865-873, May 2017.
- (9) T. Iwakuni, K. Maruta, A. Ohta, Y. Shirato, T. Arai, M. Iizuka, “Experimental Verification of Null-Space Expansion for Multiuser Massive MIMO via Channel State Information Measurement,” IEICE Transactions on Communications, Vol.E101-B, No.3, pp.877-884, March 2018.
- (10) K. E. Baddour and N. C. Beaulieu, “Autoregressive modeling for fading channel simulation,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 4, no. 4, pp. 1650-1662, Jul. 2005.
- (11) W. Peng, M. Zou, and T. Jiang, “Channel prediction in time-varying massive MIMO environments,” IEEE Access, vol. 5, pp. 239382-23946, 2017.