

5G 無線通信高速移動時における MIMO 空間分割多重方式の性能向上に関する検討

林彦男[†] 国吉卓^{††} 早乙女理恵^{†††} 大城史帆^{††††} 和田知久^{†††††}

[†]琉球大学理工学研究科 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1 番地

^{††, †††}株式会社マグナデザインネット 〒900-0016 沖縄県那覇市前島 3-1-15 大同生命ビル 4 階

^{††††}琉球大学情報基盤統括センター 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1 番地

^{†††††}琉球大学工学部 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1 番地

E-mail: ^{†, †††††}{k238578, wada}@ie.u-ryukyu.ac.jp, ^{††, †††}{kuniyoshi, saotome}@MagnaDesignNet.com,

^{††††}shiho@cs.u-ryukyu.ac.jp

あらまし 近年、第 5 世代移動通信システム(5G NR)の普及が進みつつあり、モバイル機器や IoT 機器からの需要の増加に対応しようとしている。その中、日本は時速 500km にもなるリニア新幹線の導入について準備を始めており、走行中のリニア新幹線で 5G 通信を利用する場面について考える必要性が出てきている。高速な移動環境下ではドップラーシフトの影響を受け通信品質の低下が起こる。本研究では高速移動環境下での 5G NR サービスを対象に 2x2MIMO 環境での通信品質の低下防止を目的とした。2 段階-遅延&ドップラープロファイラ(2StepDDP)によるチャネル推定を提案し、コンピュータシミュレーションによる性能評価を実施した。シミュレーションは 64Quadrature Amplitude Modulation (QAM), と 256QAM の二つの変調方式を用いて行われた。シミュレーションの結果は提案された 2StepDDP が 1 段階の DDP と比較してビットエラー率(BER)を改善できることを示した。

キーワード 5G, New Radio, ドップラーシフト, 遅延 & ドップラープロファイラ, DDP

Study on Performance Improvement of MIMO Space Division Multiplexing Scheme for 5G Wireless Communication in High-speed Movement

Gennan HAYASHI[†] Suguru KUNIYOSHI^{††} Rie SAOTOME^{†††} Shiho OSHIRO^{††††} and Tomohisa WADA^{†††††}

[†]Graduate School of Engineering and Science, University of the Ryukyus,

1 Senbaru, Nishihara, Okinawa, 903-0213 Japan

^{††, †††}Magna Design Net, Inc. Daido Seimei Naha Building 4F, 3-1-15 Maejima, Naha-city, Okinawa, 900-0016, Japan

^{††††}Information Technology Center, University of the Ryukyus, 1 Senbaru, Nishihara, Okinawa, 903-0213 Japan

^{†††††}Dept. of Engineering, University of the Ryukyus, 1 Senbaru, Nishihara, Okinawa, 903-0213 Japan

E-mail: ^{†, †††††}{k238578, wada}@ie.u-ryukyu.ac.jp, ^{††, †††}{kuniyoshi, saotome}@MagnaDesignNet.com,

^{††††}shiho@cs.u-ryukyu.ac.jp

Abstract In recent years, the 5th generation mobile communication system (5G NR) is becoming more popular, and it is about to meet the increasing demand from mobile devices and IoT devices. In this context, Japan has begun preparing for the introduction of a linear bullet train that will travel at speeds of up to 500 km per hour, and there is a need to consider the use of 5G communications while the vehicle is moving. In a high-speed moving environment, the Doppler shift will affect the communication quality. In this study, we proposed a channel estimation method based on 2-Step-Delay & Doppler Profiler (2StepDDP) and evaluated its performance by computer simulation. Simulations were performed using two modulation schemes, 64 Quadrature Amplitude Modulation (QAM) and 256QAM. The simulation results show that the proposed 2StepDDP can improve the bit error rate (BER) compared to the 1-step DDP.

Keywords 5th Generation mobile communication system (5G), New Radio (NR), Doppler shift, Delay & Doppler Profiler(DDP)

1. はじめに

近年、第5世代移動通信システム(5G)の普及が進みつつあり、スマートフォンなどのモバイル機器やIoT機器からの需要の増加に対応しようとしている。その一方で日本は営業最高速度が時速500kmにもなるリニア新幹線の導入について準備を始めた。スマートフォンが広く普及している現在の状況を鑑みると、走行中のリニア新幹線で5G通信を利用する場面について考える必要性が出てきている。時速500kmのような非常に高速な移動環境下では送受信する電波に対してドップラー効果が発生する。このような場面では受信するデータに欠損が出るため通信品質の低下につながる。特に周波数の高い場合や移動速度が速い場合では強くドップラーシフトの影響を受けることになる。図1は高速移動する車両の中で受信機が2方向からのダウンリンク信号を受信している様子を示している。ここで搬送波周波数を f 、ドップラーシフトによる変化量を f_d とする。この場合、受信機はTX1に向かって進行しているためTX1から受信する信号の周波数は $f+f_d$ となる。反対に受信機はTX2から遠ざかる状況であるためTX2から受信する信号の周波数は $f-f_d$ となる。このような状況では受信機は正のドップラーシフトと負のドップラーシフトの二つの変化量を持った信号を同時に受信することになる。またドップラーシフトを受けたOFDM信号ではサブキャリア間での直交性が失われ、キャリア間干渉(ICI: Inter Carrier Interference)が生じる。ICIの影響により通信品質の低下が起こるため、その改善が必要となる。

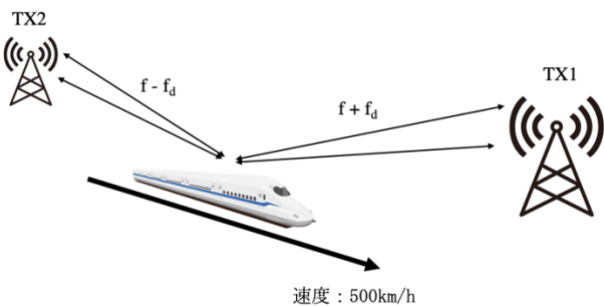


図1:シミュレーション環境イメージ

先行研究[1][2][3]ではOFDM通信における遅延&ドップラープロファイラ(DDP: Delay and Doppler Profiler)によるICIの除去が提案されている。

本研究では高速移動環境下での5G NRサービスを対象に2x2MIMO環境での通信品質の低下防止を目的とした。マルチタップチャネル等化とMIMO信号

分離を同時に行うアルゴリズムを用いて、2段階DDPによるチャネル推定を提案し、コンピュータシミュレーションによる性能評価を実施した。

本論文は以下の章で構成されている。第1章では序論、第2章では2x2MIMOにおけるOFDMシステムの構成について述べている。第3章では遅延&ドップラープロファイラ(DDP)について、第4章ではマルチタップICIキャンセル等化について説明した後、第5章で本研究の提案する手法である2StepDDPについて述べる。第6章ではコンピュータシミュレーションの概要について説明し、第7章でシミュレーション結果について、第8章でまとめについて述べる。

2. 2x2MIMO型OFDMシステム

図2.1は一般的な2送信アンテナ2受信アンテナ(2x2)からなるMIMO型OFDM通信システムの概略図を示している。伝達関数 $H_{11}, H_{12}, H_{21}, H_{22}$ はスカラーとなり、受信信号を Y_1, Y_2 、送信信号を X_1, X_2 と置くと受信信号 Y_1, Y_2 は次のように表せる。ただし n_1, n_2 はノイズ成分とする。

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

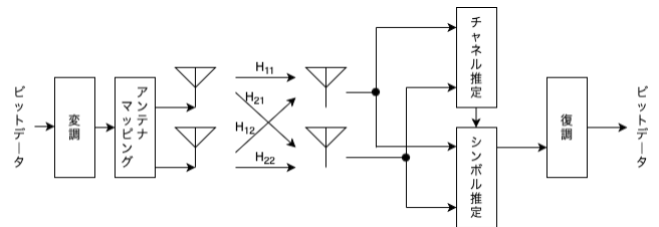


図2.1: 2x2MIMO型OFDMシステムの概略図

2.1. 2x2MIMO型OFDM通信送信部分

図2.2は本研究での2x2MIMO環境におけるOFDM通信システムの送信部分のブロック図である。まず送信部分では送信されるデータが送信シンボルに変調される。次にアンテナマッピングにおいて送信シンボルは二つの系列 $d_1(k, n), d_2(k, n)$ へと分離される。ここで k は時間方向のOFDMシンボルを表し、 n は周波数方向のサブキャリア番号を示している。送信データはそれぞれパイロット信号としてDMRS1とDMRS2を挿入される。IFFTブロックでは、各時間 k に対応するOFDMを生成するため逆高速フーリエ

変換が行われる．次にマルチパスでの遅延の影響を防ぐためにサイクリックプレフィックス(CP : *Cyclic Prefix*)を付加する．ここでは IFFT で出力された各 OFDM シンボルの先頭に，その OFDM シンボルの後部のコピーを加える．アップコンバージョンブロックでは生成された OFDM ベースバンド信号を，目的とするパスバンド信号へと変換する．生成されたパスバンド信号をパワーアンプにより増幅し送信アンテナより送信する．ここで送信アンテナは x_p 本で成り立っており，それぞれ $s_1(t)$ 信号， $s_2(t)$ 信号を送信する．

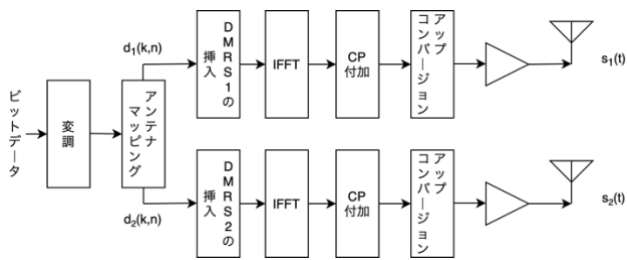


図 2.2: 2x2MIMO 型 OFDM システムの送信部分のブロック図

2.2. 2x2MIMO 型 OFDM 通信受信部分

図 2.3 は本研究における 2x2MIMO 環境の OFDM 通信システムの受信部分のブロック図である．受信アンテナは y_p 本から成り立っており，送信部から送信された信号 $s_1(t)$ ， $s_2(t)$ を電波の伝搬路を経由して $r_1(t)$ 信号， $r_2(t)$ 信号として受信する．受信したパスバンド信号はダウンコンバージョンにより OFDM ベースバンド信号に変換される．その後 CP を除去し FFT ブロックにて OFDM 復調を行う．続いて DDP ブロックでは復調した信号に含まれる復調用参照信号(DMRS)を元にチャネル伝達関数を推定する．ここで受信側のサブキャリア番号 1 を中心として，送信側のサブキャリアからの伝達関数 H_{yx} をもとに $r_1(t)$ 受信信号， $r_2(t)$ 受信信号を構成する．次に複素振幅減衰 γ_i ，OFDM 信号の遅延時間 τ_i ，ドップラー周波数ズレ α_i をそれぞれ波番号 $i=1\sim N_p$ について検知する．これらのパラメータを用いて CTF 行列生成ブロックでは伝達関数を生成する．

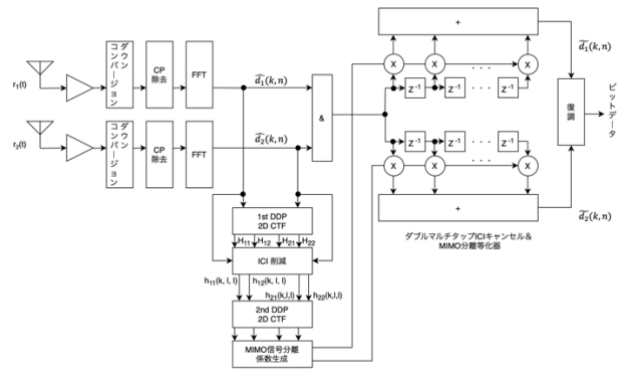


図 2.3: 2x2MIMO 環境の OFDM 通信システムの受信部分のブロック図

2.3. DMRS 信号

図 2.4 は受信側のチャネル推定に用いられる復調用参照信号(DMRS : *DeModulation Reference Signal*)の構成例を示している．5G NR において DMRS の構成方法は様々なパターンがある．挿入する DMRS シンボルを増やすと送信できるデータキャリアが減少するがチャネル推定の精度を上昇させることができる．今回の研究では高速移動環境下であることと 2x2MIMO 環境というチャネル推定が厳しい条件であることを考慮し，図 2.4 のようにシンボル番号 3,6,9,12 に DMRS が挿入されていると想定した．

2x2MIMO では アンテナ 1 とアンテナ 2 にそれぞれ DMRS1, DMRS2 が割り当てられ交互に配置される．アンテナ 1 からデータが送信される場合は DMRS1 の箇所でパイロット信号が送信され，DMRS2 の箇所で 0 が送信される．反対にアンテナ 2 からデータが送信される場合は DMRS1 の箇所で 0, DMRS2 の箇所でパイロット信号が挿入される．これにより DMRS を用いることでそれぞれの送信アンテナからのチャネル伝達関数を計測することができる．

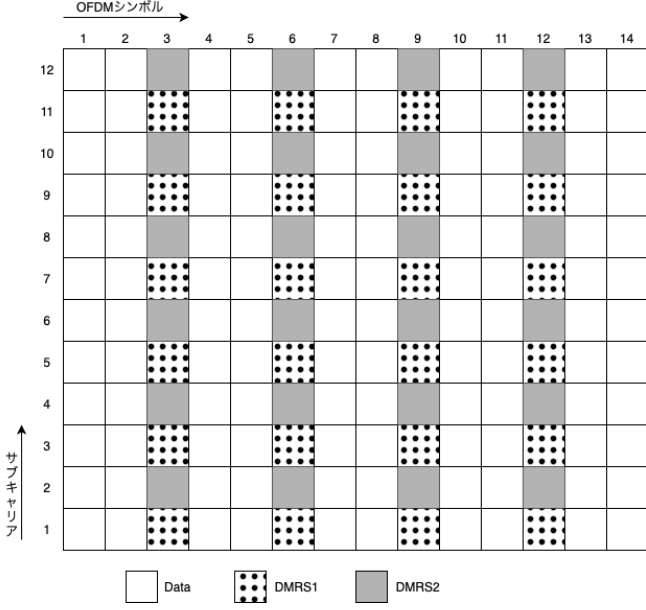


図 2.4: 5G NR における 1 スロット内の DMRS の構成例

3. DDP を用いたチャンネル推定

先行研究[4][5][6]では 5G NR 通信において遅延 & ドップラープロファイラー (DDP : Delay and Doppler Profiler) の適用による ICI の除去が提案されている。

DDP では受信信号の DMRS より、複素振幅減衰 γ_i , OFDM 信号の遅延時間 τ_i , ドップラー周波数ズレ α_i の 3 つのパラメータを評価関数(2)が最小となるように推定する。推定に使用される DMRS 自体も ICI の影響を受けているが、単に DDP を適用した場合はその影響を考えず、DMRS が受けた伝送路の影響のみを考える。

$$E(k) = \sum_{l=P}^{|P|} |CTF_{yx}(k, l) - h_{yx}(k, l)|^2 + \sum_{l=P}^{|P|} |CTF_{yx}(k-3, l) - h_{yx}(k-3, l)|^2 \quad (2)$$

図 3.1 は DDP によるチャンネル推定の模式図であり、図 3.2 は DDP によるチャンネル推定の詳細ブロック図である。

DDP では k 番目のシンボルで測定された $CTF(k)$ と $k-3$ 番目のシンボルで測定された $CTF(k-3)$ についてそれぞれ遅延プロファイルを求める。その後、複素振幅減衰 γ_i , 遅延時間 τ_i , ドップラーシフト量 α_i のパラメータを大まかな一次検出とニュートン法による詳細検出を行うことで N_p 組のパスのパラメータを検

出する。

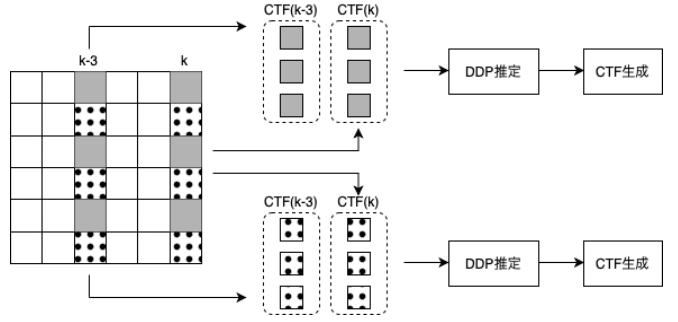


図 3.1: DDP によるチャンネル推定の模式図

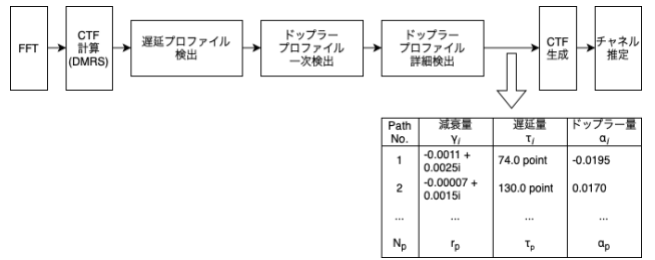


図 3.2: DDP によるチャンネル推定の詳細ブロック図

4. マルチタップ ICI キャンセル等化

先行研究[7]では 2x2MIMO 信号分離と ICI キャンセル演算を同じ行列で取り扱うことを提案している。

2x2MIMO のマルチタップ等化の適用について考えると次のようになる。例として Numcol=3 の場合を考える。ここで受信シンボルベクトルを $\widehat{\mathbf{D}}_n$, 送信シンボルベクトルを \mathbf{D}_n , ノイズ成分を \mathbf{W}_n , チャンネル伝達関数を \mathbf{H}_{yx} とする。ただしここで \mathbf{H}_{yx} はスカラーではなく式(6)のように表現される。

$$\widehat{\mathbf{D}}_n = [\widehat{d}_n(k, l-1), \widehat{d}_n(k, l), \widehat{d}_n(k, l+1)]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{D}_n = [d_n(k, l-1), d_n(k, l), d_n(k, l+1)]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{W}_n = [w_n(k, l-1), w_n(k, l), w_n(k, l+1)]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{H}_{yx} = \begin{bmatrix} h_{yx}(k, l-1, l-1) & h_{yx}(k, l-1, l) & h_{yx}(k, l-1, l+1) \\ h_{yx}(k, l, l-1) & h_{yx}(k, l, l) & h_{yx}(k, l, l+1) \\ h_{yx}(k, l+1, l-1) & h_{yx}(k, l+1, l) & h_{yx}(k, l+1, l+1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで $\widehat{\mathbf{D}}_n$, \mathbf{D}_n , \mathbf{H}_{yx} , \mathbf{W}_n の関係を示すと、

$$\widehat{\mathbf{D}}_1 = \mathbf{H}_{11}\mathbf{D}_1 + \mathbf{H}_{12}\mathbf{D}_2 + \mathbf{W}_1 \quad (7)$$

$$\widehat{\mathbf{D}}_2 = \mathbf{H}_{21}\mathbf{D}_1 + \mathbf{H}_{22}\mathbf{D}_2 + \mathbf{W}_2 \quad (8)$$

(7), (8) を合成すると次式(9)となる。ただしノイズ成分 \mathbf{W}_n は十分に小さいものとして近似する。

$$\begin{bmatrix} \widehat{D}_1 \\ \widehat{D}_2 \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

ここでは 2 次元行列で示された伝達関数 H_{yx} を $y=1 \sim y_p$, $x=1 \sim x_p$ の範囲で拡張し, $[H_{11}, H_{12}, H_{21}, H_{22}]$ の拡張 2 次元伝達関数行列として生成する.

ここで $[H_{11}, H_{12}, H_{21}, H_{22}]$ について一般化すると, 行列のサイズは $2\text{NumCol} * 2\text{NumCol}$ の拡大行列となる.

式(9)を変形すると, 次式(10)が導出できる.

$$\begin{bmatrix} \widetilde{D}_1 \\ \widetilde{D}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \widehat{D}_1 \\ \widehat{D}_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

ここで \widetilde{D}_1 , \widetilde{D}_2 中の $\widetilde{d}_1(k, l)$ 及び $\widetilde{d}_2(k, l)$ はそれぞれ送信信号 $d_1(k, l)$, $d_2(k, l)$ の推定値となる. $[H_{11}, H_{12}, H_{21}, H_{22}]^{-1}$ は 2×2 行列の逆行列の公式より求めることができ, マルチタップチャネル等化と MIMO 信号分離を同時に演算することができるようになる.

5. 2step DDP を用いたチャネル推定

本研究ではドップラーシフトの影響を受けた受信信号に対し 2 段階-遅延&ドップラープロファイラー (2Step-DDP : Delay and Doppler Profiler) を適応することでその影響を補償することを試みた. 図 5 は本研究における 2×2 MIMO に対応する 2Step DDP のブロック図を示している. DDP を単に適用した場合には, パラメータの推定に用いられる DMRS 自体が受けた ICI の影響は無視されることとなる. そのため DMRS の ICI の影響が含まれた状態で γ_i , τ_i , α_i が推定されることとなり, 最終的なドップラーシフトの補償に影響を与えることが考えられる. よって今回は 1 回目の DDP の適用で DMRS 自体の ICI の影響を削減し, 2 回目の DDP の適用で受信データの ICI の推定を行う, 2StepDDP の性能を調査する.

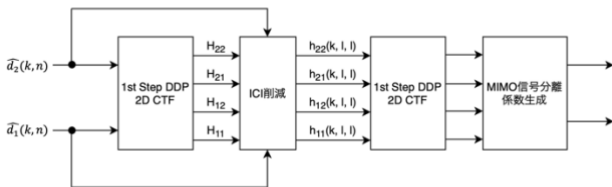


図 5: 2StepDDP のブロック図

6. コンピュータシミュレーション

6.1. シミュレーション条件

本研究ではコンピュータシミュレーションを用いて 2×2 MIMO 空間多重環境における高速移動時の提案アルゴリズムの性能評価を実施した. 表 1 は 2×2 MIMO 環境におけるシミュレーションのパラメータであり, 図 6 は 2×2 MIMO 環境におけるシミュレーションの概略図を表している.

今回のシミュレーションでは二つの基地局の距離を 300m と設定し, 高速で移動する受信機がその基地局のエリア内で走行する状況を想定した.

受信機の初期位置は前方基地局より 50m の位置にある. それぞれの基地局には二つの送信アンテナが, 受信機には二つの受信アンテナが備っているものとする. 2×2 MIMO 環境を想定し, 搬送波周波数は 3.9GHz, サブキャリア間隔は 30kHz である. 経路 1 のグループは受信機の前方の基地局から送信される信号であり, 振幅利得は 1.0, ドップラーシフト量は正となる. 一方経路 2 のグループは受信機の後方の基地局から送信される信号であり, 振幅利得は 0.5, ドップラーシフト量は負となる. 受信機は前方と後方の基地局から合計 4 パスの信号の合成波を二つの受信アンテナでそれぞれ受信する. 今回のシミュレーションではノイズ成分として加算性白色ガウス雑音とドップラーシフトによる ICI の影響を加え, 1 段階 DDP と 2 段階 DDP によるチャネル推定の性能を比較調査した.

ここで numcol はマルチタップ ICI キャンセル等化のタップ数であり, numcol=1 は補正なしの状態で風が大きくなるほど補正が強くなることを示す.

表 1. 2×2 MIMO 環境のシミュレーションパラメータ

| パラメータ | 値 |
|--|--------------------------|
| パスバンド周波数 | 3.9GHz |
| サブキャリア間隔 | 30kHz |
| サブキャリア数 | 3276 |
| 帯域幅 | 100MHz |
| サンプリング周波数 | 122.88MHz |
| FFTsize | 4096 |
| 受信機 の速度 | 500km/h |
| 変調方式 | 64QAM, 256QAM |
| 経路グループ 1 $L_{11}(t), L_{21}(t), L_{12}(t), L_{22}(t)$ | 距離 = ~50m 振幅利得 = 1.0 |
| 経路グループ 2 $L_{21}(t), L_{22}(t), L_{12}(t), L_{11}(t)$ | 距離 = ~250m 振幅利得 = 0.5 |
| マルチタップ ICI キャンセル等化のタップ数 (numcol) | 1, 11, 21, 31, 41, 51 |

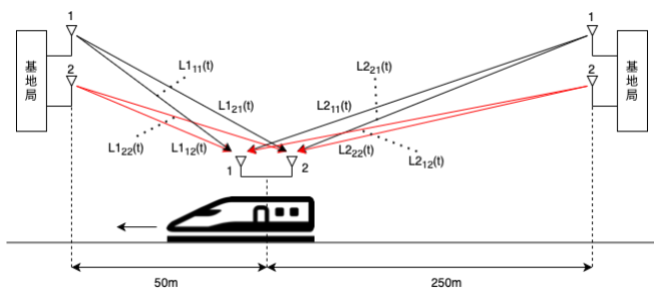


図 6: 2x2MIMO 環境のシミュレーション概略図

6.2. 評価指標

シミュレーション結果を評価するため、評価指標としてビットエラー率(BER : Bit Error Rate)を以下のように定義した。BER は送信されたビットデータが受信側で異なるビットデータとして判定された割合である。BER は値が低いほど通信品質が高いことを示している。

$$BER = \frac{\text{誤判定されたビット数}}{\text{送信された総ビット数}}$$

7. シミュレーション結果

以下の結果では縦軸に BER, 横軸に適用した NumCol を示し, 10 単位ごとに結果を比較した。

図 7.1 と図 7.2 は受信機の速度が 500km/h における 64QAM と 256QAM の 1 段階 DDP (1stepDDP) と 2 段階 DDP (2stepDDP) のシミュレーション結果を示している。Numcol=1 以外の全ての条件において 2StepDDP を用いることにより 1StepDDP よりも BER 値が低くなったことがわかった。2StepDDP の 64QAM では numcol が 11 や 21 の場合が特に BER 値の下り幅が大きく 31, 41, 51 では横ばいという結果となった。256QAM では numcol が 11, 21, 31 の場合に BER 値の下り幅が大きく, 41, 51 では横ばいとなった。

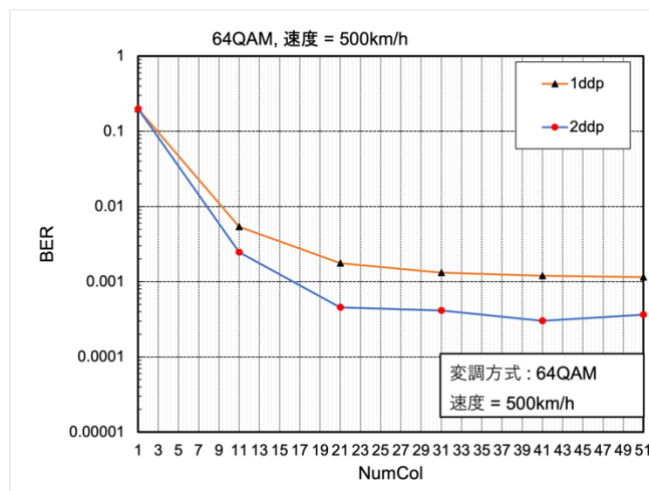


図 7.1: 500km/h, 64QAM における BER

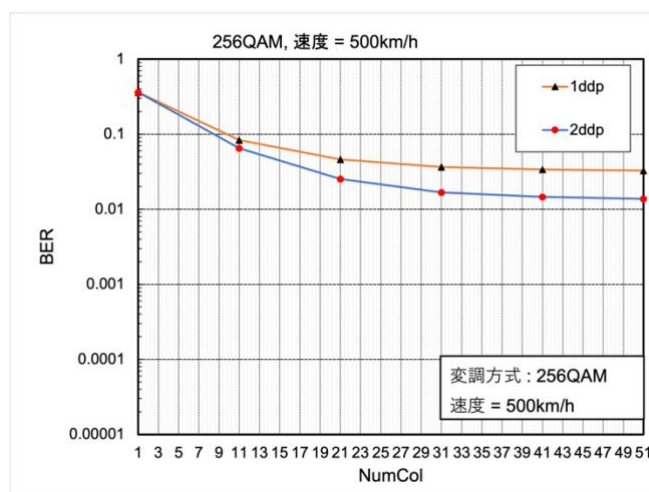


図 7.2: 500km/h, 256QAM における BER

8. まとめ

本研究では 2x2MIMO-第 5 世代移動通信システム (5G NR) モデルにおいてドップラーシフトを補償するため, 2 段階遅延 & ドップラープロファイラー (2StepDDP) をベースとしたチャネル推定方式のキャリア間干渉 (ICI) キャンセラーの性能について比較と調査を行なった。シミュレーションは 500km/h の環境において 64QAM と 256QAM の二つの変調方式で行われた。シミュレーション結果では 2StepDDP の性能が 1StepDDP よりも良かったことが確認できた。

BER が 1E-3 よりも少なければエラー訂正が可能であると仮定すると 64QAM では 2StepDDP を用いることにより十分に通信可能な状態まで改善したと考え

られる．256QAM では ICI の影響を完全に除去できなかったが 1StepDDP の結果と比較すると BER 値を半減できた．以上の結果より 2 段階-遅延&ドップラープロファイラによるチャネル推定の性能が有効であること示すことができた．

文 献

- [1] 中村充, 伊丹誠, 伊藤紘二, Hamid Aghvami, “OFDM 受信における遅延プロファイルとドップラープロファイルの推定によるキャリア間干渉の除去”, 映像情報メディア学会誌, 第 56 巻, 第 12 号, pp.1951-1958, 2002
- [2] 中村充, 藤井雅弘, 伊丹誠, 伊藤紘二, “OFDM 移動受信における MMSE 型 ICI キャンセラに関する一検討”, 映像情報メディア学会誌, 第 58 巻, 第 1 号, pp.83-90, 2004.
- [3] 山崎暁人, 中村充, 藤井雅弘, 伊丹誠, 伊藤紘二, 太田弘毅, “OFDM ICI キャンセラの特性改善に関する一検討”, 映像情報メディア学会誌, 第 59 巻, 第 1 号, pp.95-101, 2005.
- [4] Suguru Kuniyoshi, Shiho Oshiro, Gennan Hayashi, and Tomohisa Wada, “Channel Transfer Function estimation based on Delay and Doppler Profiler for 5G System Receiver targeting 500km/h linear motor car,” IJICSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.23, No.5, pp.121-127, May 2023.
- [5] Suguru Kuniyoshi, Rie Saotome, Shiho Oshiro and Tomohisa Wada, “An ICI Canceling 5G System Receiver for 500km/h Linear Motor Car,” IJICSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.23, No.6, pp27-34, June 2023.
- [6] Gennan Hayashi, Yuusuke Oshiro, Shiho Oshiro, Tomohisa Wada, “Intelligent mobile channel estimation and Inter Carrier Interference Cancellation for 5G services in Indian Shinkansen “Bullet Train””, Second International Conference on Computer Vision and Machine Intelligence (CVMI-2023), December 2023.
- [7] Suguru Kuniyoshi, Rie Saotome, Shiho Oshiro, Tomohisa Wada, “A 2x2 MIMO spatial multiplexing 5G signal reception in a 500 km/h high-speed vehicle using an augmented channel matrix generated by a Delay and Doppler Profiler”, IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.23, No.10, pp1-10, October 2023.