

TDD 分散アンテナ協調伝送のためのチャネル推定の一検討

安達 文幸[†] アムナート ブンカジヤイ^{††} 齋藤 智之^{††} 関 裕太^{††}

東北大学電気通信研究機構

〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号

E-mail: [†]adachi@ecei.tohoku.ac.jp, ^{††}{amnart, saito.tmm, seki.yuta}@riec.tohoku.ac.jp

あらまし 第5世代移動無線通信における高速データ伝送の実現に向けて筆者らは分散アンテナ協調伝送技術の研究開発に取り組んでいる。分散アンテナ協調伝送では送信側と受信側とでチャネル情報(CSI)を共有する必要がある。そのため、周波数分割複信(FDD)では受信側で得られたCSIを送信側にフィードバックしなければならない。一方、時分割複信(TDD)ではチャネルの相反性が成立することから、マクロセル基地局(MBS)側とユーザ端末(UE)側でそれぞれ独立にチャネル推定を行うことができるので、CSIフィードバックは不要になる。また、分散アンテナ協調伝送では受信品質情報を送信側に通知することが必要な場合も想定される。そこで本報告では、データ伝送の直前に既知パイロットを送信してチャネル推定するためのTDDフレーム構成およびパイロット信号設計について述べ、計算機シミュレーションによりチャネル推定誤差および誤り率特性を明らかにしている。

キーワード 第5世代移動通信システム, 分散アンテナ, 協調無線伝送, 時分割複信(TDD), チャネル推定

A Study on Channel Estimation for Time-Division Duplex Distributed Antenna Cooperative Transmission

Fumiyuki ADACHI[†] Amnart BOONKAJAY^{††} Tomoyuki SAITO^{††} Yuta SEKI^{††}

2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579, Japan

E-mail: [†]adachi@ecei.tohoku.ac.jp, ^{††}{amnart, saito.tmm, seki.yuta}@riec.tohoku.ac.jp

Abstract We have been studying a distributed antenna cooperative transmission as a promising technique for realizing the 5th generation (5G) high-speed mobile communications. Channel state information (CSI) is required at both transmitting and receiving sides for the distributed antenna cooperative transmission. In the case of frequency division duplex (FDD), the CSI obtained at the receiving side needs to be fed back to the transmitting side. However, in the case of time division duplex (TDD), by exploiting the channel reciprocity property, the macro-cell base station (MBS) and the user equipment (UE) conduct the channel estimation independently to obtain the CSI, resulting in no CSI feedback. It is predicted that the receiving side may have to report its received signal quality back to the transmitting side. In this paper, we introduce a new TDD frame structure, in which a known pilot signal is transmitted before the transmission of data, and the pilot signal design. The channel estimation error and bit error rate (BER) performances of distributed antenna cooperative transmission are evaluated by computer simulation.

Keyword 5G mobile communications system, distributed antenna, cooperative transmission, time-division duplex (TDD), channel estimation

1. まえがき

移動無線通信システムは第1世代から第4世代(LTE-Advanced)へと、ほぼ10年ごとの世代交代を経て発展してきた[1](図1)。今では、ほぼすべての人が移動無線通信ネットワークにつながり、様々な情報を交換でき、世界に散らばっている多様なデータにいつでもどこからでもアクセスできるようになった。移動無線通信の発展は現代社会生活に計り知れない影響を与えてきた。2020年頃の導入を目指し、現在、世界中で第5世代移動無線通信技術の研究開発が活発に展開されている[2]。

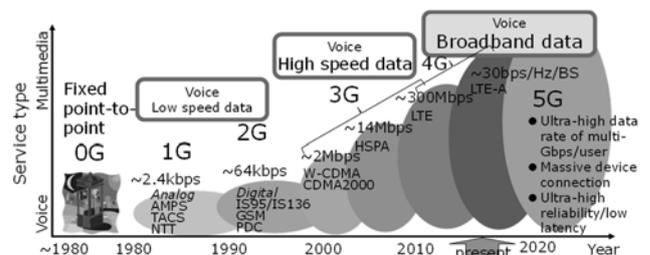


図1 移動無線通信の発展

日本では2015年9月より、第5世代移動通信システム実現に向けた総務省委託研究開発が開始された[3]。1Gbps/ユーザを越える高速データ通信が期待され、面的スペクトル利用効率の大幅な向上が求められている第5世代システム実現に向けて期待されているのが、

マクロセル内に多数のアンテナを分散配置し、それらを協調して利用する分散アンテナ協調伝送である。

分散アンテナ協調伝送では送信側と受信側とでチャネル情報 (CSI) を共有する必要がある。そのため、周波数分割複信 (FDD) では受信側で得られた CSI を送信側にフィードバックしなければならない。一方、時分割複信 (TDD) では、チャネルの相反性が成立するからマクロセル基地局 (MBS) 側とユーザ端末 (UE) 側でそれぞれ独立にチャネル推定を行うことができ、CSI フィードバックは不要になる。ところで、分散アンテナ協調伝送では受信品質情報を送信側に通知することが必要になる場合も想定される。

そこで本報告では、データ伝送の直前にパイロットを用いてチャネル推定するための TDD フレーム構成およびパイロット信号設計について述べ、計算機シミュレーションによりチャネル推定誤差および誤り率特性を明らかにしている。

2. 分散アンテナ小セルネットワークと分散アンテナ協調伝送の概要

2.1 分散アンテナ小セルネットワーク

移動無線通信の設計は、ある程度の同一周波干渉を許容して同一無線帯域を再利用することで面的スペクトル利用効率 (bps/Hz/km²) の向上を図るセルラー概念 [4] に基づいている。面的スペクトル利用効率の向上は、我々無線研究技術者にとっての永遠の課題であり、第 5 世代ではその画期的な向上が求められている。最近はこれに加え、送信電力問題 (あるいは無線エネルギー問題) が加わった。データ通信速度の高速化は送信電力 (無線エネルギー消費) の増大につながるからである。

面的スペクトル利用効率と無線エネルギー利用効率の同時向上に有望な方策は、無線セル (最大通信距離) をさらに縮小する小セル化である。小セル化により、同一無線帯域をより近くで再利用できるようになるから面的スペクトル利用効率を向上できる。より近距離の無線通信になるから更に低い送信電力で高速通信が可能となり、無線エネルギー利用効率も同時に向上できる。

ところが、単純な小セル化では、ユーザの移動によりハンドオーバーが頻繁に発生してしまう。これを避ける 2 つのアプローチがある [5], [6] (図 2)。一つは、従来のマクロセル基地局 (MBS) に超多数アンテナを集中配置する集中型 Massive MIMO の適用である [7]。集中型 Massive MIMO では極細ビームにより、従来のマクロセル内に超多数の仮想小セルを形成する。もう 1 つは、超多数のアンテナを従来のマクロセル内に分散配置させる分散型 Massive MIMO である。ユーザ端末 (UE) 毎にその近傍の分散アンテナを適応選択し通信を行う (このような無線ネットワークを筆者らは分散アンテナネットワーク (DAN) [8] と呼んできた)。これによりシャドウイングの影響を軽減できるから、集中型 Massive MIMO に比べマクロセル全体に亘って通信品質を向上できるのが特長である。

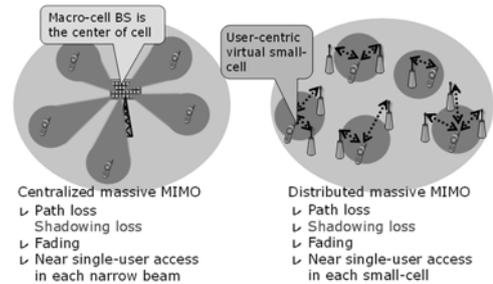


図 2 小セル化への 2 つのアプローチ

信号処理機能や無線資源管理機能をマクロセル基地局 (MBS) に集中させる (図 3)。UE 毎にその近傍の分散アンテナを適応選択して通信を行うことは LTE-Advanced における CoMP [9] の発展形と見做せる。集中型 Massive MIMO と同様にスケジューリング (ユーザ選択とアンテナ選択) を MBS で行うことで、マクロセルエリア内でのハンドオーバー問題をアンテナ選択問題に置き換えることができる。

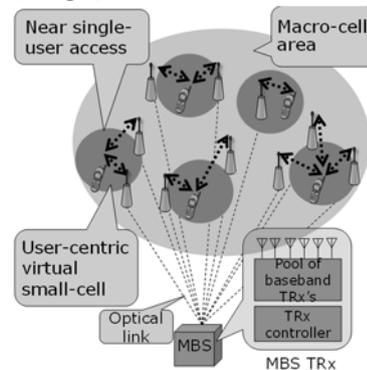


図 3 分散アンテナ小セル

2.2 分散アンテナ協調伝送

100MHz を超える広帯域チャネルを用いる第 5 世代の無線伝搬路は周波数選択性がかなり強くなる (図 4)。このため、強力なチャネル等化が必須であり、周波数領域等化 (FDE) が期待できる。チャネル等化のためには無線伝搬路の構造を表す CSI の取得が必要で、高精度なチャネル推定が要求される。送受信に同じ搬送波周波数を用いる時分割複信 (TDD) では、上りリンク (UE→MBS) と下りリンク (MBS→UE) のチャネルの相反性が成立することから、MBS 側と UE 側でそれぞれ独立にチャネル推定を行うことができるので、CSI フィードバックを不要にできる (図 5)。

そこで筆者らの研究グループは、MBS にチャネル等化機能を持たせた分散アンテナ協調伝送 (シングルユーザ STBC ダイバーシチとマルチユーザ MMSE-SVD) (図 6) を検討してきた [10, 11]。シングルユーザ STBC ダイバーシチとマルチユーザ MMSE-SVD のいずれも、UE 近傍の複数の分散アンテナを用いて同時送受信する。悪い受信状態のときには STBC ダイバーシチにより受信状態を改善しスループットを向上する。一方、良い受信状態のときには複数 UE の信号を空間多重して STBC ダイバーシチより高いスループットを狙う。

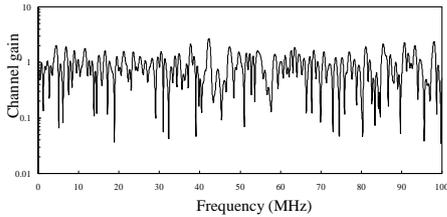


図4 周波数選択性チャンネルの伝達関数 (100ns 間隔の 16 パスで構成されたチャンネル)

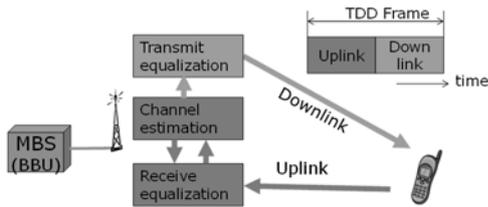


図5 TDD

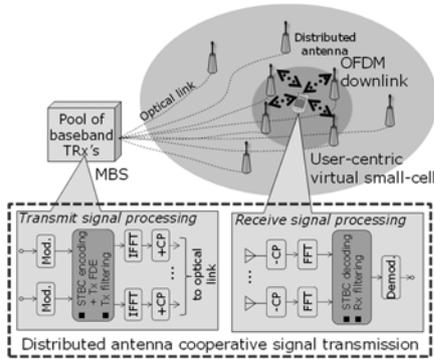


図6 分散アンテナ協調伝送(下りリンクの場合)

3. MIMO チャンネル推定

分散アンテナ協調伝送では UE アンテナと分散アンテナ間の MIMO チャンネルの CSI を必要とするが、これまで、我々は理想的な CSI を仮定してシングルユーザ STBC ダイバーシチとマルチユーザ MMSE-SVD の特性評価を行ってきた[10,11]. ところでシングルユーザ STBC ダイバーシチの下りリンクでは最大比送信 (MRT) 等化を、またマルチユーザ MMSE-SVD の下りリンクでは MMSE 送信と固有モード受信とを、それぞれ用いている. 一方、シングルユーザ STBC ダイバーシチの上りリンクでは MMSE 受信等化を、またマルチユーザ MMSE-SVD の上りリンクでは固有モード送信と MMSE 受信を、それぞれ用いている. 従って、実際には、下りリンクデータと上りリンクデータの送受信前に全ての分散アンテナと UE アンテナ間の MIMO チャンネルの CSI が必要になる.

3.1 フレーム構成

分散アンテナ協調伝送では受信側でも CSI が同時に必要である. これは上りリンクでも同じである. そこで、本報告では、TDD では上下リンクのチャンネルが相反性を有することを利用し、CSI をフィードバックする代わりに、MBS および UE でパイロットを利用したチャンネル推定を独立して行うことを提案する. このときのフレーム構成を図 7 に示す. データ送信用時間スロット (Data Time Slot: DTS) の前に、UE および MBS からパイロットを順番に送信するパイロット用時間スロット (Pilot TS: PTS) を設けることを提案する. まず各 UE よりパイロットを送信し、次に MBS がパイロットを送信する. 本報告

のフレーム構成では、上り下りリンクとも 12 個の DTS を仮定しているが、上下リンクトラフィックが非対称であれば、異なる個数の DTS を上下リンクに割り当てても良い. なお、各 PTS 長および各 DTS 長は同じで、OFDM シンボル長+CP 長に等しい.

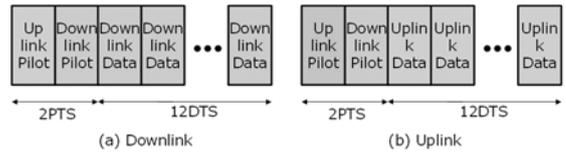


図7 フレーム構成 (2PTS+12DTS)

3.2 パイロット信号設計

パイロット設計条件をまとめると以下のようになる.

- ・設計条件 1) できるだけ多数のチャンネルの伝達関数を無歪で同時推定できなくてはならない.
- ・設計条件 2) ピーク対平均電力比 (PAPR) のできるだけ低いパイロット信号でなければならない.
- ・設計条件 3) 上りパイロット信号の送信と同時に、UE あるいは MBS へ制御信号 (例えば受信状態情報) を伝送できるパイロット構造になっていることが望ましい. 特に、UE における下り受信状態を MBS へ通知できれば、UE 受信状態に対応した下りリンク送信フィルタの適応生成が可能になる.

設計条件 1 を満たすパイロット送信法として下記のように 2 つ考えられる. いずれとも、伝搬チャンネルの遅延パスが疎であることを利用している. つまり、サブキャリア総数 $N_c \gg$ チャンネル最大遅延時間 τ_{max} サンプル (CP 長に等しい) が成立する場合である. これにより、 N_c サブキャリアから成る帯域幅のチャンネルの伝達関数を無歪で推定できる (もちろん雑音や干渉による誤差は発生). 従って、同時に $N_c/\tau_{max} (>>1)$ 個のチャンネルを無歪で推定可能である.

- ・パイロット送信法 1) 周波数分割多重 (FDM) を用いる. 図 8 のように、各アンテナから長さが τ_{max} シンボルのパイロットを、等間隔 (サブキャリア間隔は N_c/τ_{max}) に並べた τ_{max} 個のサブキャリアを用いて送信する.
- ・パイロット送信法 2) 遅延時間分割多重 (Delay-time Division Multiplexing: DTDM) を用いる. 図 9 のように、長さが N_c シンボルの時間領域パイロット系列を τ_{max} の整数倍 (送信アンテナごとに異なる) だけ循環遅延 (サイクリック時間シフト) させた系列を各アンテナから送信する. 図 9 では τ_{max} の m 倍の循環遅延を与えた場合を示した.

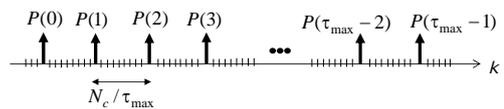


図8 パイロット送信法 1

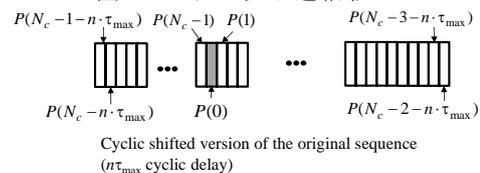


図9 パイロット送信法 2

例えば、 $N_c=1024$ サブキャリアで、 $\tau_{max}=16$ サンプルのとき、 $N_c/\tau_{max}=64$ 個のチャンネルを同時推定できる. このことより、各

UE では $N_{\text{macro}}=64$ 本の分散アンテナに対する MIMO チャネル(つまり、 $64 \times N_{\text{ue}}$ MIMO チャネル)の推定が、MBS では $U=64/N_{\text{ue}}$ 台の UE に対する MIMO チャネル(つまり、 $64 \times N_{\text{macro}}$ MIMO チャネル)の推定がそれぞれ可能である。ここで、 N_{ue} は任意の数の UE アンテナ本数である。

設計条件 2 を満たすために、時間及び周波数領域で定振幅性を有する次式のような Zadoff-Chu 系列[12]をパイロット系列として用いることができる。

$$P_i(k) = \exp\left(j \frac{k^2 i \pi}{N_p}\right), k=0,1,\dots,N_p-1 \quad (1)$$

ここで、 N_p はチャネル推定用パイロットサブキャリア総数、 k はサブキャリア番号、そして i は N_p と素な整数である。式(1)で定義される Zadoff-Chu 系列を、周波数領域に一定間隔で並べた τ_{max} 本のサブキャリアを用いて送信すれば、時間領域信号の定振幅性が保証される。

設計条件 3 は、もし推定しなければならないアンテナ数が N_c/τ_{max} 本より少なければ、満たすことができる。データ伝送用に利用可能なアンテナ当たりのサブキャリア本数 N_{data} は次式により求まる。

$$N_{\text{data}} = \begin{cases} \frac{N_c - N_{\text{ue}} \times U \times \tau_{\text{max}}}{N_{\text{ue}} \times U} \text{ subcarriers per UE} \\ \text{for uplink} \\ \frac{N_c - N_{\text{macro}} \times \tau_{\text{max}}}{N_{\text{macro}}} \text{ subcarriers for all UE} \\ \text{for downlink} \end{cases} \quad (2)$$

例えば、 $N_c=1024$, $\tau_{\text{max}}=16$, $U=16$, $N_{\text{ue}}=2$, $N_{\text{macro}}=32$ のとき、上りリンク送信(UE→MBS)では、 $N_{\text{ue}}=2$ 本のアンテナを持つ $U=16$ 台の UE が、それぞれ $N_{\text{data}}=16$ サブキャリア/アンテナを用いて MBS へデータ伝送できる。一方、下りリンク送信(MBS→UE)では、MBS は $N_{\text{macro}}=32$ 本の分散アンテナから、それぞれ $N_{\text{data}}=16$ サブキャリア/分散アンテナを用いて UE へデータ伝送できる。

ところで、チャネル推定用パイロットとデータを同時送信すると、各アンテナから送信される送信信号の PAPR が増加してしまう。この PAPR 増加は上りリンク(つまり UE 送信)のとき問題になる。これを避けるシングルキャリアパイロット構造を、 $N_c=1024$, $\tau_{\text{max}}=16$, $U=16$, $N_{\text{ue}}=2$, $N_{\text{macro}}=32$ のときについて図 10 に示す。チャネル推定とデータ受信を次の 2 ステップで行う。

- ・ステップ 1)パイロットのみを用いてチャネル推定を行う。
- ・ステップ 2)CSI 推定値を用いてパイロット+データ信号の受信等化を行ってからデータ部分だけを取り出す。

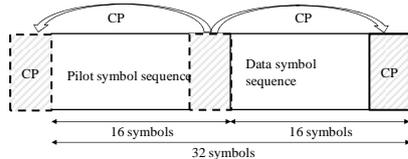


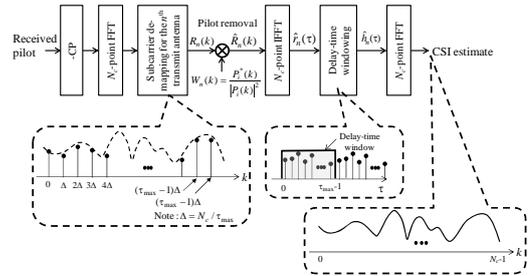
図 10 パイロット+データ同時送信のためのシングルキャリアパイロット構造

3.3 遅延時間窓関数を用いるチャネル推定

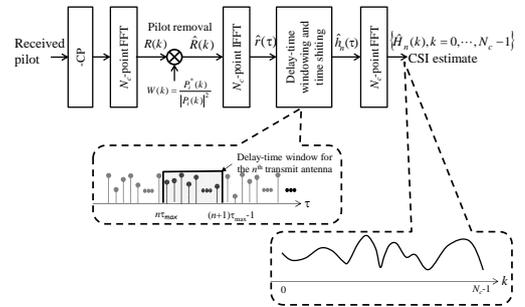
パイロット送信法 1 および 2 を用いるときのチャネル推定のブロック図を図 11 に示す。

パイロット送信法 1 では、受信パイロット信号の N_c 個のサブキャリアの中からチャネル推定の対象とする第 n 送信アンテナに対応する τ_{max} 個のサブキャリアのみを取出し、送信パイロット信号を用いて振幅と位相補正を行った後、 N_c ポイント IFFT により遅延時間領域信号へと変換する。遅延時間領域[0~最大遅延時間]の成分のみを取り出し(遅延時間窓関数処理)、 N_c ポイント FFT に入力すれば所望の CSI 推定値 $\{\hat{H}_n(k), k=0, \dots, N_c-1\}$ が得られる。

一方、パイロット送信法 2 では、受信パイロット信号の各サブキャリア成分の振幅と位相とを送信パイロット信号を用いて補正した後、 N_c ポイント IFFT により遅延時間領域信号へと変換する。受信アンテナと各送信アンテナ間のチャネルのインパルス応答が τ_{max} の整数倍だけ時間シフトして現れる。この中から、チャネル推定の対象とする第 n 送信アンテナに対応するインパルス応答のみを取出し(遅延時間窓関数処理)、送信側で与えた循環遅延に相当する遅延を取り除いて N_c ポイント FFT に入力すれば、所望の CSI 推定値 $\{\hat{H}_n(k), k=0, \dots, N_c-1\}$ を得ることができる。



(a) パイロット送信法 1



(b) パイロット送信法 2)

図 11 遅延時間窓関数を用いるチャネル推定

4. 計算機シミュレーション

4.1 シミュレーション諸元

$N_{\text{macro}}=32$ 本の分散アンテナとそれぞれが $N_{\text{ue}}=2$ 本のアンテナを持つ $U=16$ 台の UE をマクロセル内にランダムに配置した。シミュレーション諸元を表 1 に示す。下りリンクには OFDM 伝送を、上りリンクには SC 伝送を用いた。パイロット信号は Zadoff-Chu 系列であり、データ伝送には 16QAM 変調を用いた。シミュレーションでは、第 3.3 節で述べた提案チャネル推定方式を用いて 32×32 MIMO チャネルの推定を行って、最大利得を有する分散アンテナと UE アンテナの組を UE ごとに選択してシングルアンテナ(SISO)データ伝送を行った。

表 1 シミュレーション諸元

Pilot structure	Modulation	OFDM-16QAM, SC-16QAM
	No. of subcarriers	$N_c = 1024$
	CP length	$N_{cp} = 128$
Channel	Pilot sequence	Zadoff-Chu sequence
	Type of fading	$L=16$ -path block Rayleigh
	Power delay profile	Uniform
	Maximum delay time	$\tau_{max} = 16$
Network	Path-loss exponent	$\alpha = 3.5$
	Cellular model	Single macro-cell
	No. of distributed antennas (DAs)	$N_{macro} = 32$
No. of UEs and that of antennas per UE	$U=16, N_{UE}=2$	
DA/UE distribution	Random	

4.2 チャンネル推定精度

パイロットを利用したチャンネル推定の正規化平均自乗誤差 (NMSE) を次式により計算し、その分布を求めた。

$$NMSE = \frac{\sum_{k=0}^{N_c-1} |H(k) - \hat{H}(k)|^2}{\sum_{k=0}^{N_c-1} |H(k)|^2} \quad (3)$$

平均 NMSE をサブキャリア当たりの受信パイロットサブキャリアエネルギー E_s 対熱雑音電力スペクトル密度 N_0 の関数として図 12 にプロットした。SC パイロット伝送 (上りリンク) と OFDM パイロット伝送 (下りリンク) とほぼ同じチャンネル推定精度を実現できることが分かる。なお、僅かであるが、SC パイロット伝送のチャンネル推定精度が OFDM パイロット伝送のそれより優れている。これは SC パイロット伝送では周波数ダイバーシティ効果が得られるからである。また、SC パイロット伝送のチャンネル推定精度にフロアが見られるが、これは周波数選択性による符号間干渉の影響によるものである。

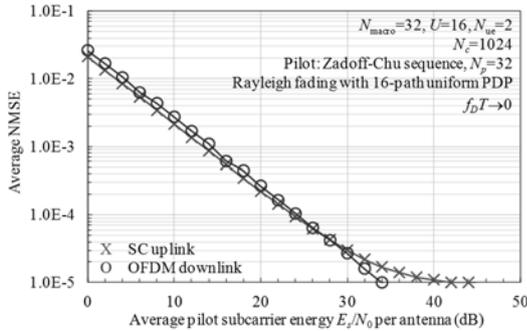
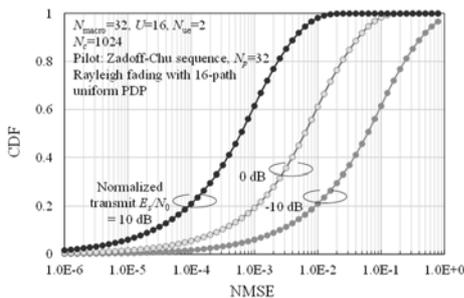
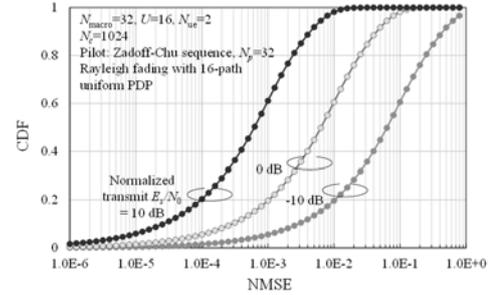


図 12 平均 NMSE 特性

正規化送信パイロットサブキャリアエネルギー E_s (マクロセル半径だけ離れた地点で受信されるパイロットサブキャリアエネルギー) 対 N_0 をパラメータとして NMSE の分布を求めた結果を図 13 に示す。上りリンク及び下りリンクともほとんど同レベルのチャンネル推定精度が得られていることが良く分かる。



(a) OFDM Downlink



(b) SC Uplink

図 13 NMSE 分布

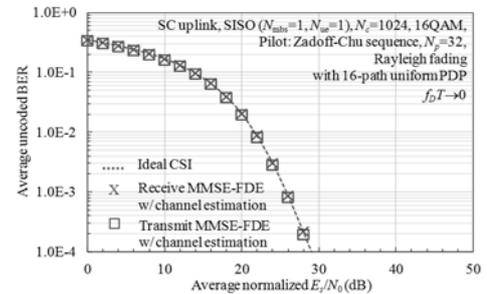
4.3 データ伝送のビット誤り率特性

計算機シミュレーションにより、分散アンテナ及び UE 配置をランダムに変え、チャンネル推定後に 12 データスロット (1024×12 シンボル) 区間で無符号化データ伝送を行い、平均ビット誤り率 (BER) を求めた。なお、パイロット送信電力はデータ送信電力と同じになるように設定した。SC 上り伝送では MMSE 受信等化を MBS 側に用いた。

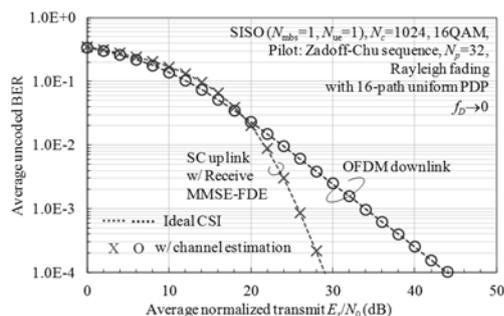
準静的フェージング環境下 ($f_d \rightarrow 0$) におけるマクロセル内平均 BER 対正規化送信 E_s/N_0 特性を示したのが図 14 である。図 14(a) には、SC 上りリンクにおける MMSE 受信等化と MMSE 送信等化による BER 特性を示した。また、図 14(b) に、SC 上りリンクと OFDM 下りリンクの BER 特性の比較を示した。比較のため、理想 CSI のときの BER 特性も示した。これらの図より、提案チャンネル推定を用いれば、理想 CSI のときと一致する BER 特性が得られることが分かる。なお、MMSE 等化における第 k サブキャリアの重みは次式で与えられる。チャンネル推定を用いる時は実際のチャンネル利得 $H(k)$ を推定値 $\hat{H}(k)$ に置き換える。また、係数 A は MMSE 送信等化に用いる電力正規化係数である (受信等化のときは不要である)。

$$W_{MMSE}(k) = A \times \frac{H^*(k)}{|H(k)|^2 + (E_s/N_0)^{-1}} \quad (4)$$

$$\text{with } A = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{N_c} \sum_{k=0}^{N_c-1} |W_{MMSE}(k)|^2}}$$



(a) SC 上りリンクにおける MMSE 受信等化と送信等化の比較



(b) SC 上りリンクと OFDM 下りリンクの BER 特性の比較

図 14 マクロセル内平均 BER 対正規化送信 E_s/N_0 特性

図 7 に示したフレーム構成を用いるとき、受信 MMSE フィルタを構成するための CSI を得たチャンネル推定時刻とデータ受信時刻とに違いがある。フェージング最大ドップラー周波数 f_D の影響が無視できなくなるほど UE 移動速度が高くなると、BER が劣化することになる。12 データスロットに亘る平均 BER に及ぼす f_D の影響を示したのが図 15 である。図 15 では、 f_D を 1 スロット時間 T で正規化した。図 15 より、12 スロット平均 BER が理想 CSI の値より増加し始めるのは、 $f_D T$ がおよそ 5×10^{-4} のときである。平均サブキャリア間隔を 75kHz、CP 長を $1.67 \mu\text{s}$ とすると、1 スロット長は $T=14.97 \mu\text{s}$ となるから、搬送波周波数が 5GHz のとき $f_D T=5 \times 10^{-4}$ は UE 移動速度 7.2 km/h に相当する。高速移動環境下においても BER の劣化をできるだけ抑えるためには、データスロット受信途中で受信 MMSE 重みを更新するなどの対策が必要になる。

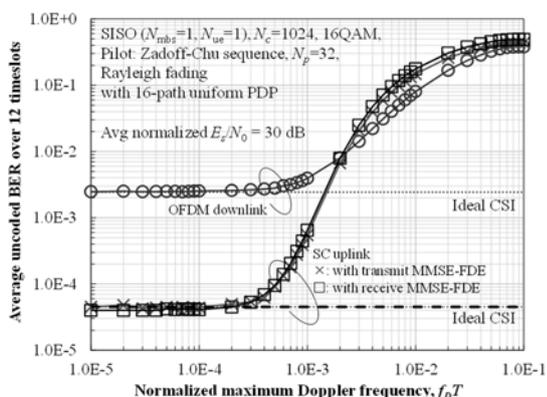


図 15 フェージング最大ドップラー周波数 f_D の影響

5. むすび

高速データ伝送を可能とする第 5 世代移動無線通信の実現に向けた分散アンテナ協調伝送では高精度なチャンネル推定技術が必要である。

時間分割複信 (TDD) であれば、上り下りリンクのチャンネルの相反性を利用することで、チャンネル状態情報 (CSI) のフィードバックをせずに、マクロセル基地局 (MBS) 側とユーザ端末 (UE) 側でそれぞれ独立にチャンネル推定を行うことができる。

本報告では、データ伝送の直前に既知パイロットを用いてチャンネル推定するための TDD フレーム構成およびパイロット信号設計について述べた。提案チャンネル推定方式は、疎なチャンネルの特徴を利用して、大規模 MIMO チャンネルの同時推定を可能とするもので、データ伝送の直前で既知パイロット信号を上りリンクと

下りリンクで伝送して、MBS と UE でそれぞれチャンネル推定する。Zadoff-Chu 系列をパイロット信号に用いれば、定振幅性を保証でき、PAPR 問題を解決できる。計算機シミュレーションにより、SC 上りリンクと OFDM 下りリンクで同等のチャンネル推定精度が得られること、また、データ伝送時と同じ送信電力のパイロットを用いれば理想 CSI のときに近い BER 特性が得られることを明らかにした。

謝 辞

本報告の一部は、総務省委託研究開発「第 5 世代移動通信システム実現に向けた研究開発～超高密度マルチバンド・マルチアクセス多層セル構成による大容量化技術の研究開発～」(#0155-0199, 2016 年 4 月)による委託を受けて実施した研究開発による成果である。

文 献

- [1] 安達, “セルラー通信技術の歴史と将来展望,” [招待講演] 信学技報, Vol. RCS2013-157, pp.85-90, Oct. 2013.
- [2] Wang, et al., “Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks,” IEEE Commun. Mag., Vol. 52, Issue 2, pp. 122-130, Feb. 2014.
- [3] 平成 27 年度における電波資源拡大のための研究開発 http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban09_02000169.html.
- [4] W.C. Jakes, Jr. (Ed.), *Microwave Mobile Communications*, Wiley, New York, 1974.
- [5] 安達, “スペクトルおよびエネルギー効率に優れた移動無線ネットワークの構築に向けた挑戦,” [特別招待講演] 信学技報, Vol. 115, No. 123, CS2015-19, p. 55, 2015 年 7 月.
- [6] A. A. M. Saleh, A. J. Rustako, and R. S. Roman, “Distributed antennas for indoor radio communications,” IEEE Trans. Commun., Vol. 35, No.12, pp. 1245-1251, Dec. 1987.
- [7] NTT ドコモ: “ドコモ 5G ホワイトペーパー: 2020 年以降の 5G 無線アクセスにおける要求条件と技術コンセプト,” Sep. 2014 (https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/whitepaper_5g/).
- [8] F. Adachi, W. Peng, T. Obara, T. Yamamoto, R. Matsukawa and M. Nakada, “Distributed antenna network for gigabit wireless access,” International Journal of Electronics and Communications (AEUE), Vol. 66, Issue 6, pp.605-612, 2012.
- [9] M. Sawahashi, et al., “Coordinated multipoint transmission/reception techniques for LTE-advanced [coordinated and distributed MIMO],” IEEE Wireless Commun., Vol. 17, Issue 3, pp.26-34, June 2010.
- [10] 安達, “無線通信技術のたゆまぬ発展,” (特別招待講演) 信学技報, vol. 115, no. 472, RCS2015-373, pp. 231-236, 2016 年 3 月.
- [11] 安達, 熊谷, 宮崎, ブンカジャイ, 関, 齋藤, “第 5 世代移動通信システム実現に向けた分散アンテナ協調信号伝送と送信電力ピーク低減,” 信学技報, vol. 116, no. 110, RCS2016-73, pp. 159-164, 2016 年 6 月.
- [12] D. C. Chu, “Polyphase codes with good periodic correlation properties,” IEEE Trans. Inf. Theory, Vol. 8, No. 4, pp. 531-532, July 1972.