

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420389

研究課題名(和文) 時間選択性フェージングの克服を目的としたSC-FDE方式の復調法に関する研究

研究課題名(英文) Research on robust SC-FDE transmission over time selective fading channels

研究代表者

前原 文明 (MAEHARA, Fumiaki)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：80329101

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、高速移動通信における周波数及び時間選択性フェージングといった2つの主課題を克服すべく、SC-FDE方式に対して判定帰還型伝搬路推定法(DFCE)の適用を図る方式を提案する。提案方式は、端末の移動速度から時間選択性フェージングの影響を理論的に把握するとともに、雑音と時間選択性フェージングの影響のうち支配的となる影響に対応する忘却係数によりDFCEを実行するものである。計算機シミュレーションによる特性評価の結果、提案方式により、端末の移動度にかかわらず、良好な伝送特性が得られることが明らかとなった。これにより、高速移動通信の上り回線の周波数利用効率をより一層向上させることができる。

研究成果の概要(英文)：This research proposes a single carrier transmission with frequency domain equalization (SC-FDE) employing decision feedback channel estimation to cope with both frequency selective fading and time selective fading which are two main problems in realizing high speed mobile communications systems. The feature of the proposed approach is to theoretically derive the effect of time selective fading by using the terminal speed and to provide the appropriate forgetting factor according to the actual channel condition composed of thermal noise and time selective fading. The numerical results obtained by computer simulations showed that the proposed scheme determines the appropriate forgetting factor and provides good performance regardless of terminal mobility, which further improves spectral efficiency of uplink mobile communications with various degrees of terminal mobility.

研究分野：無線信号処理

キーワード：移動通信 シングルキャリア周波数領域等化 時間選択性フェージング 判定帰還型伝搬路推定 雑音強調

1. 研究開始当初の背景

シングルキャリア周波数領域等化(SC-FDE)方式は、ピーク電力対平均電力比(PAPR)を抑圧しつつ、無線通信の高速化を図る上で問題となる周波数選択性フェージングに対して高い耐性を有することから、低コストな送信機構成が求められるアップリンク伝送への適用に向けており、既に、LTEやE-UTRAに代表される第4世代移動通信に採用されている。

SC-FDE方式を移動通信に適用する場合、端末の移動に起因して時間選択性フェージングが生じることから、それに対する耐性を可能な限り高めることが極めて重要となる。時間選択性フェージング環境下において、先頭のパイロットシンボルに基づきデータシンボルの復調を行うと、パイロットシンボルにより得られた伝搬路値と実際にデータシンボルが受ける伝搬路との差異がその受信時間差の増加に伴い大きくなり、ビット誤り率(BER)が大幅に劣化する問題がある。この問題の対策として、一次フィルタにより簡易に構成できる判定帰還型伝搬路推定法(DFCE: Decision Feedback Channel Estimation)の適用が有望であり、特にOFDM方式に対して、その優れた有効性が示されている。図1は、DFCEの動作原理を示したものである。同図に示すように、DFCEは、データシンボルにおいて、復号された信号を用いて逐次的に伝搬路推定値を更新し、伝搬路値をフェージングの時間変動に追従させるものである。ところが、DFCEをSC-FDEに対して適用すると、周波数スペクトルがOFDM方式と異なり、大きな変動を持つことから、データシンボルにおいて、電力の低いサブキャリアの伝搬路値が雑音強調の影響により大きく劣化し、判定値に誤り伝搬を引き起こす問題が生じる。この誤り伝搬は、続くデータシンボルの伝搬路値に逐次的にひずみを与えることから、フレーム内の伝送特性の劣化が深刻となる。さらに、DFCEを様々な移動度を有する端末が存在する移動通信に適用することを想定すると、その追従性は一次フィルタの忘却係数に依存することから、対象とする端末の移動度と忘却係数を適切に整合させることが重要である。

以上述べたように、SC-FDE方式の時間選択性フェージング対策として、高い実用性を有するDFCEを適用する場合、低電力サブキャリアにおいて生じる雑音強調を緩和することに加えて、端末の移動度に応じて追従性を確保することが鍵であり、これらを実現する技術を創出することは、移動通信の上り回線の通信容量をより一層向上させる上で極めて意義あるものと考えられる。

2. 研究の目的

本研究課題では、高速無線通信を実現する際に問題となる周波数選択性フェージングを効果的に抑圧できるSC-FDE方式を採

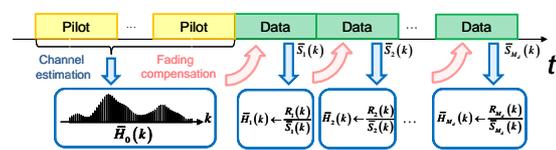


図1 DFCEの基本的な動作原理

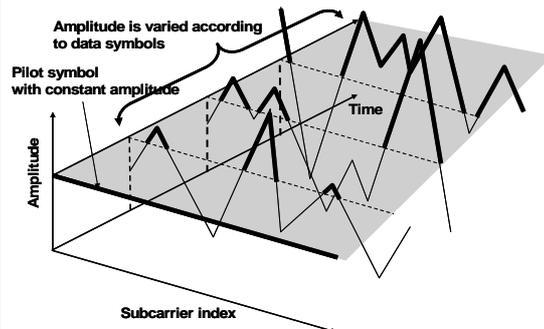


図2 SC-FDEの周波数スペクトル

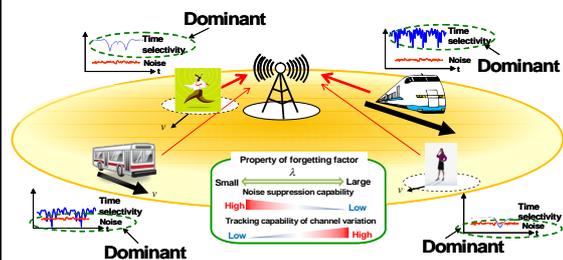


図3 本研究課題が想定するシステムモデル

り上げ、移動通信特有の時間選択性フェージングに対しても強固な耐性を有するSC-FDE復調方式を確立することを目的とする。具体的には、OFDM方式の時間選択性フェージング対策として有効なDFCEを採り上げ、SC-FDE方式にDFCEを適用した際に問題となる低電力サブキャリアにおける雑音強調の問題を閾値により抽出された高電力サブキャリアのみをその対象とすることにより解決を図る。また、端末の移動度に応じたDFCEの追従性を確保すべく、端末の移動速度が既知となることを前提に、端末が受ける時間選択性フェージングの影響を理論的に把握するとともに、雑音と時間選択性フェージングのうち支配的となる影響に適した忘却係数によりDFCEを動作させる。さらに、提案方式の有効性を、端末の移動度にかかわらず忘却係数を一定とする通常のDFCEを比較対象として、計算機シミュレーションにより評価する。

3. 研究の方法

本章では、2章の研究目的に必要な検討項目について簡潔に述べる。

(1)SC-FDE方式にDFCEを適用したときの伝送特性評価

図2は、SC-FDEの周波数スペクトルを示したものである。同図に示すように、各

SC-FDE の周波数スペクトルは、各シンボルの情報源に依存することから、シンボルによって異なり、極めて電力の低い信号がシンボル毎に異なるサブキャリアにおいて発生することがわかる。ここでは、周波数スペクトルの観点から、OFDM 方式とは異なる特徴を有する SC-FDE 方式に対して DFCE を適用した場合の問題点を把握すべく、BER 特性を計算機シミュレーションにより取得・評価する。これにより、SC-FDE 方式に DFCE を適用した際に生じる低電力サブキャリアに起因した雑音強調の問題を定量的に明らかにできる。

(2)SC-FDE 方式に DFCE を適用したときの雑音強調抑圧法の検討

SC-FDE 方式に DFCE を適用した際に生じる、低電力サブキャリアに起因した雑音強調の問題を克服すべく、閾値 P_{TH} により電力の高いサブキャリアのみを抽出し、抽出されたサブキャリアに対して、DFCE を適用する方式を提案する。さらに、その有効性を BER の観点から検証する。

(3)端末移動環境下における DFCE の追従性の評価

図 3 は、提案方式が想定するシステムモデルを示したものである。同図において、特に、LTE に代表される、端末の移動性の高い移動通信システムのアップリンク伝送への適用を考えると、周波数選択性フェージングに加えて、時間選択性フェージングへの対策が必須となる。そこで、時間選択性フェージングが SC-FDE 方式の BER 特性に与える影響を計算機シミュレーションにより評価する。具体的には、フェージングの時間変動に対する DFCE の追従性が忘却係数に依存することに鑑み、比較的大きい時間選択性フェージングが与えられた環境下における SC-FDE 方式の BER 特性を、DFCE を適用しない場合、すなわちフレームの先頭に配置されたパイロットシンボルの伝搬路推定値に基づき復調した場合及び DFCE を適用する場合(忘却係数 $\lambda=0.2, 0.8$) について取得・評価する。なお、判定値の誤り伝搬を抑圧すべく、各種特性に誤り訂正の適用を図るものとする。

(4)端末の移動度に応じた DFCE の検討

(3)の検討より、端末移動に起因したフェージングの時間変動に対して、DFCE の追従性を向上させるべく、端末の移動速度が既知となることを前提に、移動速度から時間選択性フェージングの影響を理論的に把握するとともに、雑音と時間選択性フェージングのうち支配的となる影響に適した忘却係数により DFCE を行う方式を提案する。さらに、提案方式の有効性について、BER の観点から検証する。具体的には、時間選択性フェージングに起因したひずみ電力を理論的に算

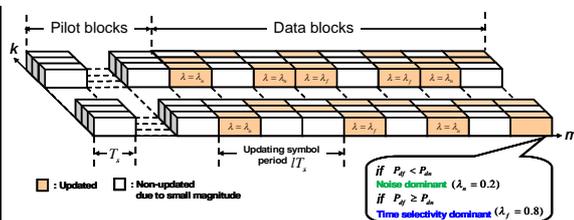


図 4 提案方式における忘却係数制御の様子

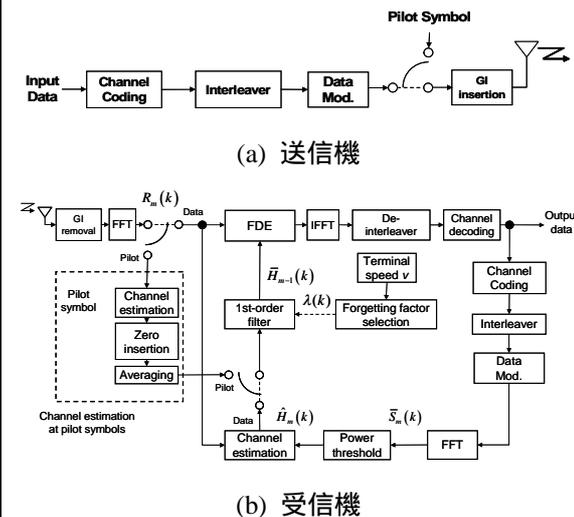


図 5 提案方式のシステム構成

出するとともに、算出されたひずみ電力と雑音電力と比較することにより、支配的となる伝搬路の影響の把握を行う。なお、提案方式には、雑音強調の抑圧を目的として、(1)及び(2)で検討した、電力の高いサブキャリアのみに DFCE を行う方式を適用するものとする。また、提案方式では、基地局、すなわち受信側で端末の移動速度情報が必要となるが、これは、センサー技術の今後の進展により、スマートフォンのような小型端末でも十分に実現できるものと考えられる。

図 4 は、提案方式において、各サブキャリア信号が伝送される様子を示したものである。同図において、SC-FDE に DFCE を適用する場合、伝搬路推定における雑音強調の影響を抑圧すべく、閾値 P_{TH} を超える電力を有するサブキャリアのみを DFCE の対象とすることから、伝搬路の更新が必ずしも一定周期で実行されないことがわかる。したがって、提案方式では、この伝搬路の更新周期を考慮して、時間選択性フェージングの影響を理論的に算定する。ここで、時間選択性フェージングに起因したひずみ電力は P_{df} は、端末の移動速度をパラメータとして、次式のように与えられる。

$$P_{df} = 1 - \left\{ J_0 \left(2\pi \frac{v}{\lambda_c} l T_s \right) \right\}^2 \quad (1)$$

ただし、 $J_0(x)$ は第 1 種 0 次ベッセル関数であり、 l はシンボルの更新間隔、 v と λ_c はそれぞれ端末の移動速度と電波の波長である。

一方、雑音電力は、MMSE のシステムパラメータであるので、新たに取得する必要は生じない。提案方式では、式(1)により与えられる時間選択性フェージングに起因したひずみ電力と雑音電力を定量的に把握することにより、伝搬路において支配的となる影響を決定できることから、端末の移動度に応じた忘却係数に基づく DFCE を実現できる。結局、DFCE に与える忘却係数は、算出されたひずみ電力 P_{df} と雑音電力 P_{dn} に対して、次式のように決定する。

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_n, & \text{if } P_{dn} > P_{df} \\ \lambda_f, & \text{if } P_{dn} \leq P_{df} \end{cases} \quad (2)$$

ただし、 λ_n 及び λ_f は、それぞれ雑音が支配的な環境及び時間選択性フェージングが支配的な伝搬環境に適した忘却係数である。

図 5 は、提案方式のシステム構成を示したものである。送信機では、送信データに対して、誤り訂正符号化・インタリーブを施した後、データ変調を行う。次に、変調された送信信号に対して、符号間干渉回避のためのガードインターバルを付加し、送信する。受信機では、受信信号からガードインターバルを除去した後、FFT 処理により周波数領域信号に変換する。次に、パイロットシンボルを受信する場合には、周波数領域 LS(Least Square)伝搬路推定により、伝搬路推定値 $H_p(k)$ を取得する。一方、データシンボルを受信する場合には、前のシンボルにより得られた伝搬路推定値により、MMSE 規範に基づく周波数領域等化を行う。SC 信号では、時間領域上に送信データが存在することから、周波数領域等化後の信号 $S_m(k)$ を IFFT 処理により、時間領域信号に変換するとともに、それに対してデインタリーブ・誤り訂正復号を施すことにより、送信データを再生する。

DFCE では、データシンボルにおいて、伝搬路推定を継続すべく、復調された復号データを用いて、当該シンボルの伝搬路推定を行うとともに、前のシンボルの伝搬路推定値と併せて、推定値の更新を行う。提案方式では、推定値を更新する際に、伝搬路において支配的となる影響に対応した忘却係数を適用できることから、端末の移動度にかかわらず、DFCE を常に良好に動作させることができる。

4. 研究成果

本章では、3 章の研究の方法に記載した各検討項目の成果について簡潔に述べる。

まず、本研究課題の伝送特性評価の前提となるシステム諸元について説明する。表 1 はシミュレーション諸元を示したものである。同表に示すように、FFT サイズ $N=64$ に設定し、伝搬路モデルとして、各パスの振幅と位相がそれぞれレイリー分布と一様分布に従う 16 波指数関数減衰モデルを想

表 1 特性評価の諸元

Modulation	QPSK, 16QAM/SC-FDE
FEC	Convolutional coding/Viterbi decoding (R=1/2, K=7)
FFT size	64
Guard Interval T_G	$16 T_{sam}$
Frame length T_F	50 (Pilot blocks $M_p = 2$, Data blocks $M_d = 48$)
Packet length	$1.0 T_F$
Equalization	MMSE
Channel model	16-ray exponentially decaying Rayleigh fading channel
Delay spread τ_{rms}	$4.0 T_{sam}$
Channel estimation	LS with time domain zero insertion
Threshold power level P_{th}	-7.0 dB
Forgetting factors	0.2, 0.8

定する。なお、遅延波の最大遅延時間は、ガードインターバル長 T_G を超えず、シンボル間干渉(ISI)は生じないものとする。特性評価では、時間選択性フェージングをシンボル間の伝搬路変動として与えるものとし、シンボル内の伝搬路の変動は考慮しないものとする。DFCE について、サブキャリア抽出のための閾値は、 $P_{TH}=-7$ dB に設定し、提案方式で用いる、雑音及び時間選択性フェージングに整合する忘却係数は、それぞれ $\lambda=0.2$ 及び 0.8 に設定している。

(1)SC-FDE 方式に DFCE を適用したときの伝送特性評価

図 6 は、SC-FDE 方式に DFCE を適用したとき(w/ DFCE)の BER 特性を、DFCE を適用しない場合(w/o DFCE)を比較対象にとって示したものである。なお、同図において、 $f_D T_s$ は、1 シンボルあたりのフェージングの時間変動、すなわち端末の移動度を示している。同図に示すように、端末の移動度が大きい場合には、w/ DFCE の BER 特性が w/o DFCE よりも良好となるものの、端末の移動度が比較的小さい場合には、w/ DFCE の BER 特性が大幅に劣化することがわかる。これは、SC-FDE 特有の周波数スペクトルの高い変動性から、電力の小さいサブキャリアを伝搬路推定する際に、雑音強調の影響が深刻となり、判定値に誤り伝搬が生じることに起因した結果である。

(2)SC-FDE 方式に DFCE を適用したときの雑音強調抑圧法の検討

図 7 は、SC-FDE 方式に DFCE を適用したときに問題となる雑音強調を克服すべく、高電力サブキャリアのみに対して DFCE を施したときの BER 特性を DFCE を適用しない場合(w/o DFCE)を比較対象にとって示したものである。ここで、高電力サブキャリアを抽出するための閾値 P_{TH} は 1 シンボルの平均電力に設定している。同図より、高電力サブキャリアを DFCE の対象とすることにより、端末の移動度にかかわらず、w/o DFCE よりも良好な BER 特性が得られることがわかる。また、(1)の検討結果と比較すると、高電力サブキャリアのみを DFCE の対象とすることにより、低 $f_D T_s$ における DFCE 適用による BER 特性の劣化が効果的

に克服できることがわかる。これは、雑音強調の影響の小さい高電力サブキャリアのみを伝搬路推定の対象とすることにより、データシンボルにおける誤り伝搬の影響を緩和できたことに起因した結果である。以上の結果から、以降の検討では、高電力サブキャリアのみを対象として DFCE を動作させるものとする。

(3) 端末移動環境下における DFCE の追従性の評価

図 8 は、SC-FDE 方式に DFCE を適用したときのパケット誤り率 (PER) 特性を、DFCE の伝搬路への追従性を決定づける忘却係数 λ をパラメータとして示したものである。同図において低 CNR 領域、すなわち雑音が支配的な環境下と高 CNR 領域、すなわち時間選択性フェージングの影響が支配的な環境下の PER 特性に着目すると、PER 特性が良好となる λ が異なることがわかる。これは、伝搬環境によって適切な λ が異なることを示唆しており、伝搬路における支配的な影響を把握できれば、DFCE の忘却係数を適切に設定でき、端末の移動性にかかわらず DFCE の追従性を高めることができるものと考えられる。

(4) 端末の移動度に応じた DFCE の検討

図 9 は、(3) の検討結果を踏まえて、端末の受ける伝搬環境に応じて適切な忘却係数を与える提案方式の BER 特性を端末の移動度にかかわらず忘却係数を一定とする通常の DFCE を比較対象として示したものである。なお、端末の移動性として、 $f_D T_F = 1 \times 10^{-4}$ と 2×10^{-2} といった 2 種類の伝搬路変動を想定する。また、参考までに、DFCE を適用せず、パイロットシンボルによる伝搬路推定のみで復調を行った場合の特性も併せて示している。図 9(a) に示すように、 $f_D T_F = 1 \times 10^{-4}$ のような、時間選択性フェージングの影響が小さく、雑音の影響が支配的となる環境では、 $\lambda = 0.2$ の通常方式の PER 特性が $\lambda = 0.8$ の特性と比較して良好となることがわかる。これは、雑音の影響が支配的であるために、雑音軽減効果の高い $\lambda = 0.2$ による DFCE がより高い精度の伝搬路推定を実現できるためである。また、このような場合では、提案方式の PER 特性が $\lambda = 0.2$ の通常方式の特性にしたがうことがわかる。これは、提案方式が、移動速度情報を用いて伝搬路の特性を把握し、概ね $\lambda = 0.2$ として DFCE を実行できることに起因した結果である。一方、図 9(b) に示すように、 $f_D T_F = 2 \times 10^{-2}$ のような、伝搬路変動の大きい場合には、高 CNR において $\lambda = 0.2$ の通常方式の PER 特性が大幅に劣化し、 $\lambda = 0.8$ の通常方式の特性が $\lambda = 0.2$ の特性と比較して良好となることがわかる。これは、時間選択性フェージングの影響が雑音の影響よりも顕著となるためである。提案方式は、低 CNR においては、 $\lambda = 0.2$ の特性にしたがい、高 CNR になると

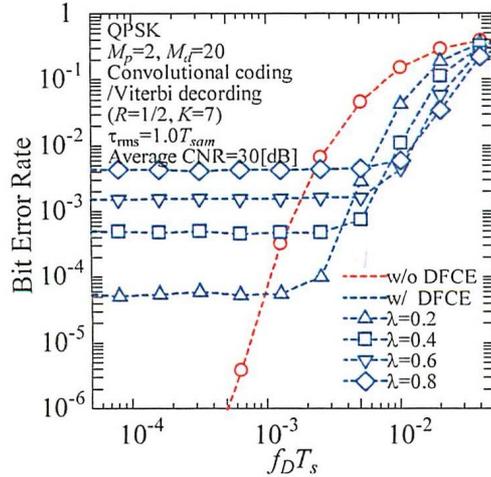


図 6 SC-FDE 方式に DFCE を適用したときの BER 特性

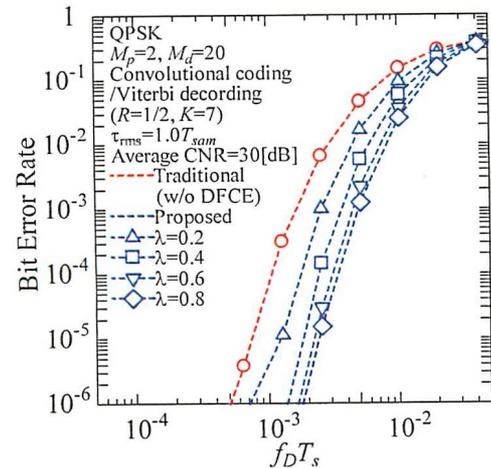


図 7 高電力サブキャリアに DFCE を適用したときの BER 特性

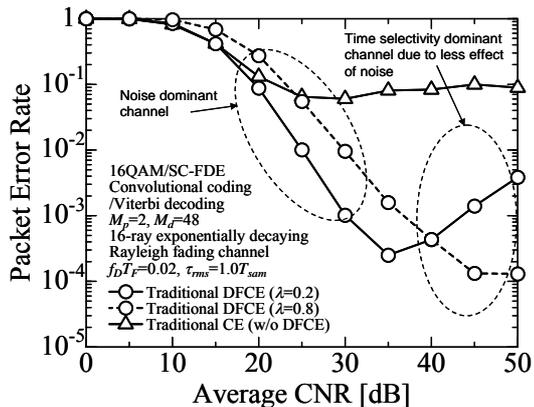
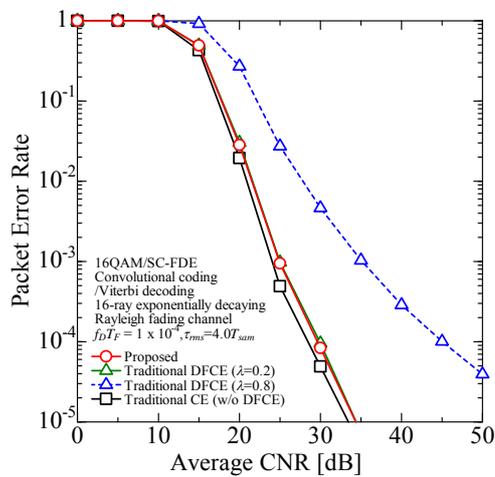
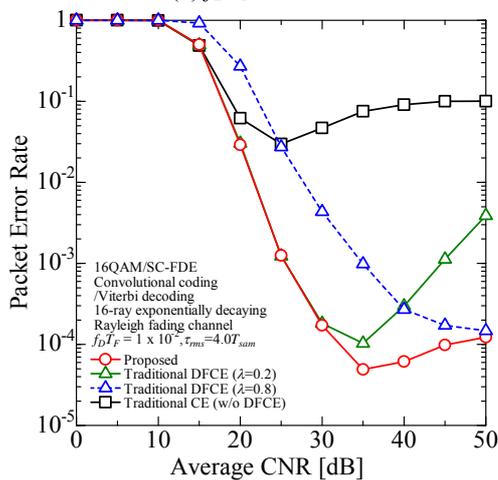


図 8 DFCE の忘却係数が BER 特性に与える影響

$\lambda = 0.8$ の特性に近づくことがわかる。また、図 10 は、提案方式の時間選択性フェージングに対する効果を明確にすべく、平均 CNR = 30dB を対象として、提案方式の $f_D T_F$ 対 PER 特性を忘却係数を一定とした通常方式を比較対象として示したものである。同図より、平均 CNR にかかわらず提案方式の特性は、高 $f_D T_F$ では概ね、 $\lambda = 0.2$ の通常方式の特性に



(a) $f_D T_F = 1 \times 10^{-4}$



(b) $f_D T_F = 2 \times 10^{-2}$

図9 平均 CNR 対 BER 特性

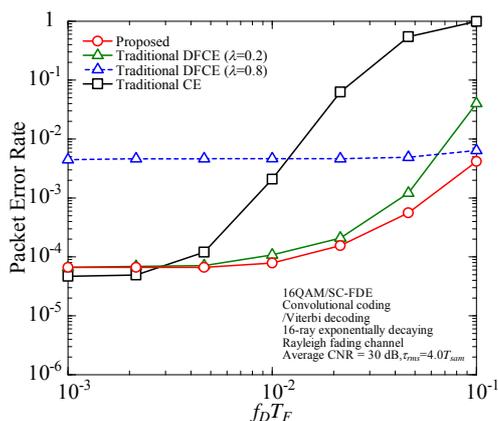


図10 $f_D T_F$ 対 BER 特性

したが、高 $f_D T_F$ では $\lambda=0.8$ の通常方式の特性にしたがうことがわかる。これは、提案方式が、伝搬路の支配的な影響を判断し、その影響に応じた忘却係数で DFCE を実行できることに起因した結果である。

以上の結果から、本提案方式により、各端末の移動度を DFCE の忘却係数に反映でき、移動度にかかわらず良好な伝送特性を保持できることから、様々な移動度を有する

端末が存在する移動通信ネットワークの上り回線の周波数利用効率をより一層向上させることができるものと考えられる。

この他、もう一方の主課題である周波数選択性フェージングに関連して、ガードインターバルを超えるマルチパス遅延に起因したシンボル間干渉の対策技術を FDE の観点から SC-FDE と同一の機構を有する OFDM 方式に対して検討した。OFDM 方式の受信側の信号処理は、SC-FDE のベースになるものであることから、ここで得られた知見は今後の SC-FDE 方式の検討に大いに活かされるものと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

(1) 中村 瞬, 前原文明, 理論ビット誤り率を用いた MIMO-OFDM シンボル間干渉抑圧法, 電子情報通信学会論文誌 B, 査読有, Vol. J98-B, No. 11, 2015 年, pp. 1233-1237

〔学会発表〕(計4件)

(1) 中村 瞬, 前原文明, 理論ビット誤り率を用いた MIMO-OFDM シンボル間干渉抑圧に関する検討, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 115, no. 55, WBS2015-7, pp. 33-36, 2015 年 5 月 28 日, 東京都市大学

(2) H. Mihara, E. Maehara, Decision feedback channel estimation scheme using terminal speed for single-carrier frequency-domain equalization, Proc. 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC2015-Spring), pp. 1-5, 2015 年 5 月 13 日, Glasgow, Scotland UK

(3) 三原寛高, 前原文明, SC-FDE における端末移動性を考慮した判定帰還型伝搬路推定法に関する一検討, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 115, no. 2, RCS2015-2, pp. 7-12, 2015 年 4 月 16 日, 湯布院・湯布郷館

(4) 三原寛高, 長田 弦, 竹淵翔矢, 前原文明, SC-FDE への判定帰還型伝搬路推定法の適用に関する検討, 電子情報通信学会総合大会, B-5-53, 2014 年 3 月 21 日, 新潟大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

前原 文明 (MAEHARA, Fumiaki)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 80329101

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし