

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：15501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18065

研究課題名(和文) 低電力高速遠距離通信を実現する複素TFI信号を用いたAFリレー伝送に関する研究

研究課題名(英文) Achievement of Low Power, High Speed, and Long Distance with Complex TFI Signal for AF Relay Transmissions

研究代表者

井田 悠太 (IDA, Yuta)

山口大学・大学院創成科学研究科・助教

研究者番号：20711229

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はAFリレー伝送の通信路推定について研究を行った。これまでに、少ないパイロット信号で通信路推定を実現できるTFI法が提案されている。TFI法は2つの時間窓を平均化することで通信路推定を実現できるので、時間窓の長さを(最大遅延)×(ホップ数)とすることで、AFリレー伝送の通信路推定を実現した。しかし、TFI法はマルチホップ環境において推定精度が劣化する。それゆえ、複素信号を組み合わせた4時間窓の平均化を可能にするTFI法を提案し、マルチホップ環境においても推定精度の向上を実現した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have proposed the channel estimation (CE) for amplify-and-forward (AF) relay transmissions. Before now, time frequency interferometry (TFI) has been proposed and achieves the CE with a small number of pilot signals by averaging the two time windows. Therefore, in the case of the time windows length for (maximum delay)×(number of hops), CE for AF relay transmission is achieved. However, TFI degrades the accuracy of CE in multi-hop environments. Therefore, we propose the TFI with complex signal and achieves the averaging for the four time windows. And then, the proposed TFI improves the accuracy of CE in multi-hop environments.

研究分野：無線通信方式

キーワード：直交周波数分割多重 4時間窓TFI 通信路推定 リレー・協調通信

1. 研究開始当初の背景

情報通信技術を用いたどこにいても格差のないサービスを実現するために、通信エリアの拡大や高品質大容量データのリアルタイム伝送の実現が要求されている。現在、移動体通信や無線LAN等で大容量通信を実現する技術として直交周波数分割多重(OFDM)方式が採用されている。さらに、中継局を経由するリレー伝送を用いた OFDM 方式も考えられている。リレー伝送は送信局と受信局の間に中継局を経由する方法で、中継局において減衰した信号電力を増幅し受信局に向け再送信することで通信の高品質化や遠距離化・通信エリアの拡大を実現でき、上記要求を満たすことが期待できる<sup>[引用]</sup>。

2. 研究の目的

リレー伝送は中継局における中継法<sup>[引用]</sup>が重要となる。主な中継法として AF(Amplify-and-forward)法と DF(Decode-and-forward)法が提案されている。DF法は中継局で振幅と位相の両方を正規化するのに対し、AF法は中継局で振幅のみを正規化する簡素な方法として知られている。しかしながら、AF法は送信局-中継局(SR)間と中継局-受信局(RD)間の通信路状態を受信局において同時推定しなければならないので、中継局における干渉や雑音等の影響で推定精度が劣化する。加えて、リレー伝送は複数の中継局を経由するマルチホップ環境を構築することで1章に記述した要求の実現に近づけることを期待できるが、通信路推定の精度が劣化すれば、要求を満たすことはできない。それゆえ、本研究はリレー伝送を用いた OFDM における通信路推定を少ないパイロット信号で実現し、かつ通信路推定の精度を向上させることで上記課題の解決を目的とする。

3. 研究の方法

一般に、通信路推定を実現するために、パケット内にパイロット信号を挿入する。そして、通信路推定の精度を向上させるために、送信局で多くのパイロット信号を挿入し、受信局で平均化を行うことが必要である。しかし、この操作はパケット長を拡張するため、通信速度の劣化と送信電力の増加という欠点がある。この問題を解決するために、時間周波数補間(TFI)法<sup>[引用]</sup>に基づくパイロット信号が提案されている。

始めに、送信局の操作について説明する。図1は送信局における TFI パイロット信号のインパルス応答を示す。従来の TFI 法によるパイロット信号は、周波数軸において  $[1, 0, 1, 0, \dots, 1, 0]$  で構成される。そして、逆高速フーリエ変換(IFFT)の後、時間軸において、図1(a)に示す様に2本のインパルス応答を出力する。ただし、 $N_g$ は遅延波による干渉を防ぐガードインターバル(GI)の長さである。一方で、提案する TFI 法<sup>[雑誌]</sup>によるパイロット信号は、虚数  $j$  を用いて周波数軸にお

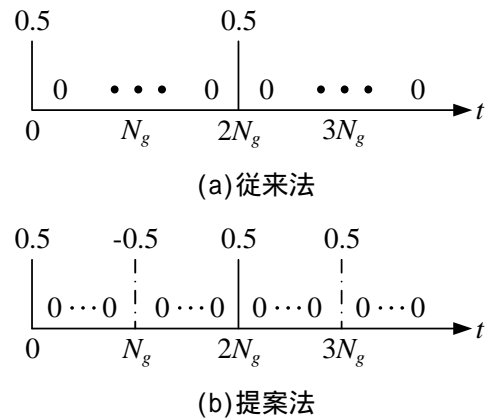


図1: 送信局における TFI パイロット信号のインパルス応答

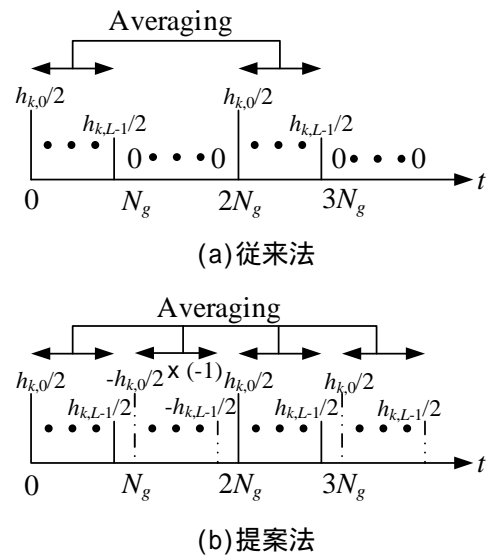


図2: 受信局における TFI パイロット信号のチャネルインパルス応答

いて  $[1, j, 1, -j, \dots, 1, j, 1, -j]$  で構成される。そして、IFFTの後、時間軸において、図1(b)に示す様に4本のインパルス応答を出力する。

次に、受信局の操作について説明する。図2は受信局における TFI パイロット信号のチャネルインパルス応答を示す。図2(a)に示す様に、従来の TFI 法では  $L$  本のチャネルインパルス応答が2つの時間窓に出力される。ただし、 $h_{k,l}$ は  $k$  番目のノードと  $l$  番目の遅延波におけるチャネルインパルス応答である。ここで、各チャネルインパルス応答に付加される雑音は正規分布に基づき独立しているので、2つの時間窓を平均化することで雑音の影響を軽減できる。TFI法は最大遅延が  $N_g$  よりも小さければシンボル間干渉(ISI)やキャリア間干渉(ICI)を防ぐことができる。そこで、[学会]では、AFリレー伝送において、ホップ数と最大遅延の積が  $N_g$  よりも小さくなると仮定し、TFI法の平均化を適用することで、雑音だけでなく中継局における干渉軽減も実現できることを示した。一方で、マルチホップ環境では、中継局における干渉が

複数存在するため通信路推定の精度がより劣化する問題がある。この問題の解決は、[学会 ]の方法では不十分である。次に、提案する TFI 法について説明する。図2(b)に示す様に、提案する TFI 法では  $L$  本のチャネルインパルス応答が4つの時間窓に出力される。その結果、提案する TFI 法は4つの時間窓を用いて雑音の影響を軽減できる。さらに、[学会 ]では、マルチホップ環境における AF リレー伝送において、通信路推定の精度の向上を示し、[学会 ]の方法よりも中継局における干渉軽減も実現できることを示した。

<引用文献>

X.Ge et.al., Energy efficiency challenges of 5G small cell networks, IEEE Commun. Mag., Vol.55, No.5, 2017, pp.184-191  
 J.N.Laneman et.al., Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior, IEEE Trans. Info. Theory, Vol.50, No.12, 2004, pp.3062-3080  
 C.Ahn, Accurate channel identification with time-frequency interferometry for OFDM, IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E90-A, no.11, 2007, pp.2641-2645

4. 研究成果

本研究は MATLAB によるシミュレーションを用いて性能を評価した。表1にシミュレーション諸元 表2に中継モデルの諸元を示す。

表1: シミュレーション諸元

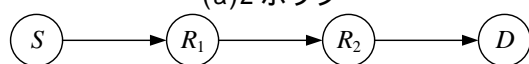
変調	QPSK
検波	コヒーレント
シンボル長	10 $\mu$ s
パイロットシンボル数	1, 2
データシンボル数	20
サブキャリア数	64
FFT サイズ	64
フェージング	レイリー
誤り訂正	畳み込み

表2: 中継モデルの諸元

中継モデル	2 ホップ	3 ホップ
各リンクの遅延波数	7	5
受信機における最大遅延	14	15
GI 長	16	16

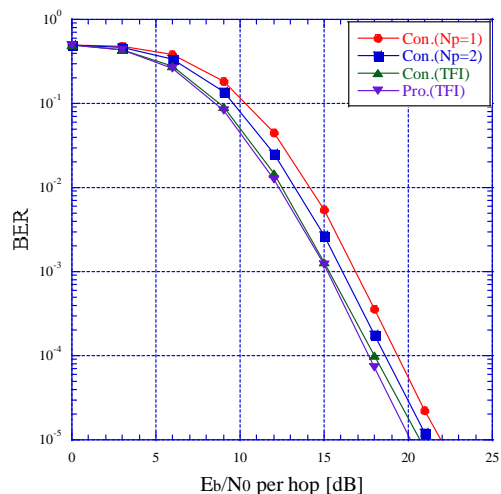


(a) 2 ホップ

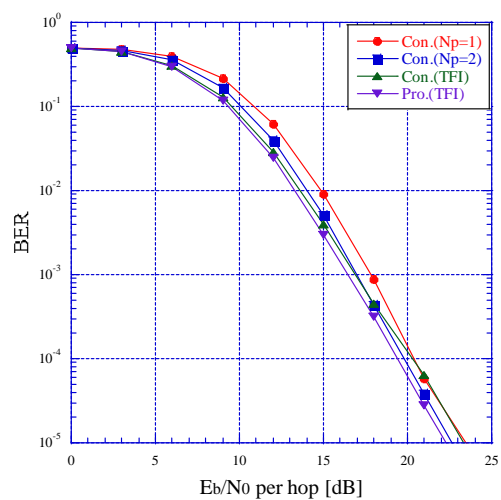


(b) 3 ホップ

図3: 中継モデル



(a) 2 ホップ



(b) 3 ホップ

図4: BER vs.  $E_b/N_0$  per hop

加えて、図3は中継モデルを示す。図3に示す様に、本シミュレーションでは、中継局が1つの2ホップと2つの3ホップのモデルについて評価した。また、以降で示す図4と図5の凡例について、“Con.(Np=1)”は従来の直交パイロットを1シンボル使用した方法，“Con.(Np=2)”は従来の直交パイロットを2シンボル使用し雑音を平均化した方法，“Con.(TFI)”は[学会発表 ]で示した2時間窓で平均化を行える2時間窓 TFI パイロットを1シンボル使用した方法，“Pro.(TFI)”は[学会発表 ]で示した4つの時間窓で平均化を行える4時間窓 TFI パイロットを1シンボル使用した方法である。

図4は1ホップ当たりの1ビット当たりの信号電力に対する雑音電力費 ( $E_b/N_0$ ) に対するビット誤り率(BER)特性を示す。始めに、図4(a)の2ホップのケースを示す。BERが  $1 \times 10^{-5}$  において、Np=2の直交パイロットはNp=1の直交パイロットと比較し約1dBの利得を示した。この理由は、複数のパイロットシンボルを平均化することで、雑音を含む干渉を軽減できるからである。次に、2時間窓 TFI

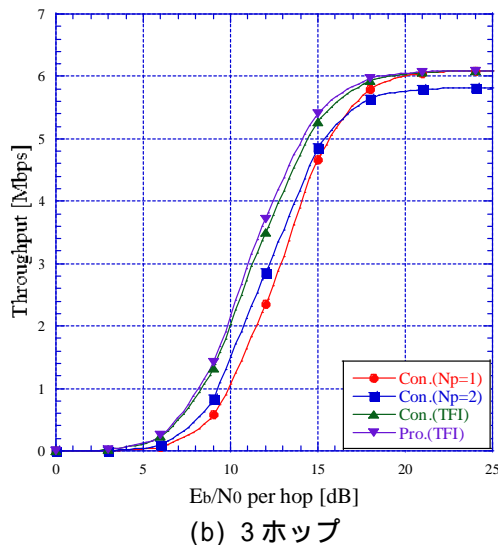
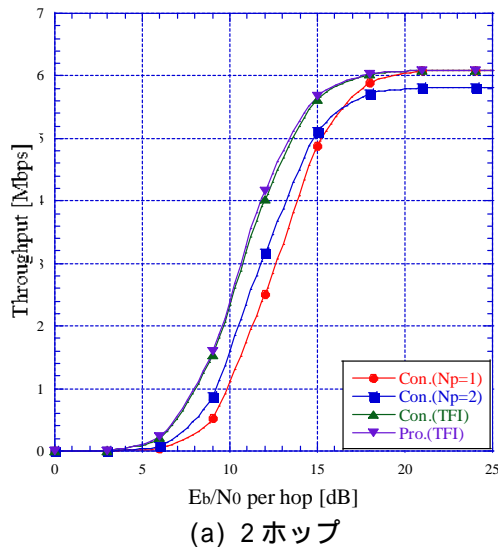


図5: スループット vs.  $E_b/N_0$  per hop

は  $N_p=2$  の直交パイロットと比較し約 0.5dB の利得を示した。この理由は、ヌル信号を含むことから1パケット当たりの雑音電力を軽減できるからである。さらに、4時間窓 TFI は2時間窓 TFI と比較し約 0.5dB の利得を示した。この理由は、時間窓の平均処理が増えたことで雑音電力を含む干渉をより軽減できるからである。次に、図4(b)の3ホップのケースを示す。2ホップの場合と同様に、 $N_p=2$  の直交パイロットは  $N_p=1$  の直交パイロットと比較し約 1dB の利得を示した。しかし、2時間窓 TFI は  $N_p=2$  の直交パイロットと比較し約 1dB 劣化し、 $N_p=1$  の場合と比較しほぼ同等の特性を示した。これは、2時間窓による平均化は2つの中継局における干渉の軽減には不十分であることを意味する。一方で、4時間窓 TFI は2時間窓 TFI と比較し約 1.5dB の利得を示し、 $N_p=2$  の直交パイロットとの比較も約 0.5dB の利得を示した。それゆえ、4時間窓 TFI は3ホップのケースにおいても有効であることを示した。

図5は1ホップ当たりの  $E_b/N_0$  に対するス

ループット特性を示す。図5(a)と5(b)の2ホップと3ホップのケースにおいて、 $E_b/N_0$  per hop が 17dB 以下では、 $N_p=2$  の直交パイロットは  $N_p=1$  の直交パイロットと比較し約 1dB の利得を示した。これは BER 特性で述べた理由と同じである。しかし、17dB 以上では、 $N_p=1$  の直交パイロットが良い特性を示し、さらに、最大スループットは約 5%向上した。この理由はパケットサイズを1シンボル分少なくできるためである。加えて、2時間窓と4時間窓の TFI は  $N_p=2$  の直交パイロットと比較し、 $E_b/N_0$  per hop が 17dB 以下で約 1.5dB の利得を示した。さらに、4時間窓 TFI は2時間窓 TFI と比較し約 0.5dB の利得を示した。これらも BER 特性で述べた理由と同じである。さらに、2時間窓と4時間窓 TFI の最大スループットは  $N_p=1$  の直交パイロットとパケット長が同じであるため同等の特性を示した。

## 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2件)

Yuta Ida, Takahiro Matsumoto, Shinya Matsufuji, Packet splitting and adaptive modulation based on CSI of time domain for decode-and-forward cooperative OFDM systems in different channel model, International Journal of Communication Systems, 査読有, Vol.31, No.5, 2018, pp.1-17  
DOI:10.1002/dac.3451

Yuta Ida, Chang-Jun Ahn, Takahiro Matsumoto, Shinya Matsufuji, Four time windows averaging channel estimation with real and imaginary TFI pilot signals for OFDM, IEICE Communications Express, 査読有, Vol.6, No.5, 2017, pp.590-595  
DOI:10.1587/comex.2017XBL0108

[学会発表](計8件)

Yuta Ida, Takahiro Matsumoto, Shinya Matsufuji, Compensation of deteriorated CSI allocation based on decision direct and Turbo equalization for MUDiv/OFDMA, Proc. of NOLTA2017, 2017, pp.209-212

Naoya Murokawa, Yuta Ida, Takahiro Matsumoto, Shinya Matsufuji, Iterative equalization based on estimated variance and threshold for massive MIMO with spatial modulation, Proc. of NOLTA2017, 2017, pp.538-541  
室川直哉, 井田悠太, 松元隆博, 松藤信哉, 非対称 SM-MIMO における推定分散値と閾値に基づく逐次等化の評価, 信会技報, CQ基礎講座ワークショップ, No.P2-4, 2017, p.1

Yuta Ida, Takahiro Matsumoto, Shinya Matsufuji, Three hop AF relay transmissions for OFDM applying real and imaginary TFI pilot signals, Proc. of IWSDA'17, 2017, pp.145-148

井田悠太, 植田真帆, 松元隆博, 松藤信哉, MUDiv/OFDMA における直接判定法とターボ等化を用いた劣化 CSI 割当の補償, 信学総大, 2017, p.205

室川直哉, 井田悠太, 松元隆博, 松藤信哉, 空間変調を用いた Massive MIMO における推定分散値と閾値を用いた逐次等化, 信学総大, 2017, p.206

Yuta Ida, Kota Imafuku, Takahiro Matsumoto, Shinya Matsufuji, Performance evaluation for AF relay TFI-OFDM systems, Proc. of ISPACS2015, 2015, pp.548-551

井田悠太, 今福航太, 松元隆博, 松藤信哉, AF リレーTFI-OFDM システムの性能評価, 信学ソ大, 2015, p.131

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://web.cc.yamaguchi-u.ac.jp/~y.ida/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

井田 悠太 (IDA, Yuta)

山口大学・大学院創成科学研究科・助教

研究者番号：20711229