

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18069

研究課題名(和文) OFDM信号移動受信環境下における受信特性の改善

研究課題名(英文) Improving of Reception Characteristic under Mobile Reception of OFDM

研究代表者

中村 聡 (NAKAMURA, AKIRA)

東京理科大学・基礎工学部電子応用工学科・助教

研究者番号：40736774

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではOFDM信号を移動受信した際のICI(Inter-Carrier Interference: キャリア間干渉)キャンセラについて検討を行った。

ICIキャンセラを用いる場合、高精度な伝送路推定が必要となる。検討では繰り返し処理を適用し伝送路推定精度の向上を図り、推定精度の向上が可能であることを明らかにした。また、誤り訂正符号を用いた場合のLLR(Log Likelihood Ratio: 対数尤度比)の計算法についても検討を行いつつICIの干渉分布についても解析を行った。LLRを計算する際、雑音電力だけでなく干渉電力も考慮することにより受信特性の改善が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, the compensation scheme of ICI(Inter-Carrier Interference) under the mobile reception of OFDM is discussed.

When the ICI canceller is performed, it is necessary to estimate the channel. The accuracy of estimation is deteriorated by ICI. Thus, the channel estimation scheme using iterative detection is proposed. It is shown that the proposed estimation scheme can improve the accuracy of estimation by computer simulations. Also, the distribution of ICI is analyzed. When the high-order modulation scheme is used in sub-carrier modulation, the distribution of interference power of ICI is close to the Gaussian distribution. In addition, the calculation scheme of LLR(Log Likelihood Ratio) is proposed under the case that ECC(Error Correction Code) is adopted for improving reception characteristics. In the LLR calculation scheme, the interference power of ICI is considered. As the results, the proposed LLR calculation scheme can improve reception characteristics.

研究分野：通信工学

キーワード：OFDM 移動受信 ICI ECC

1. 研究開始当初の背景

次世代のモバイル通信方式や地上波 4K/8K 放送には、OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplex: 直交周波数分割多重)変調方式が採用されている。単一アンテナ(SISO: Single Input Single Output,送受信アンテナ共に一つ)システムにおいて、直接波と遅延波が存在しているマルチパス環境下、OFDM 変調された信号を移動受信した場合、ドップラー効果により周波数偏移が発生する。受信機に到達する各パスの周波数偏移は異なり、周波数変移の影響を受けた各パスが合成され受信されるため、OFDM 信号の直交性が崩れ ICI (Inter-Carrier Interference: キャリア間干渉)が発生する。発生した ICI が原因となり著しく受信特性が劣化する。ICI キャンセラを用いることにより受信特性を改善することが可能である。

しかし、ICI の補償を行うためには伝送路(伝達関数: マルチパスによる影響)の推定が必要不可欠となる。ICI の影響が大きい受信環境下では、伝送路を正確に推定することは困難となり伝送路推定精度の向上が必要となる。

さらに、現在使用されているシステムでは、受信特性を改善するために誤り訂正符号が組み込まれている。誤り訂正符号として Turbo 符号や LDPC(Low Density Parity Check: 低密度パリティ検査)、畳み込み符号などが用いられている。Turbo 符号や LDPC 符号では、ビットに対応する信号と受信機において発生する雑音電力を用いて対数尤度比(LLR: Log Likelihood Ratio, ビットが 0 および 1 である確率)を算出し、送信信号を復号する必要がある。しかし、ICI が発生している場合、対数尤度比を計算する際、ICI の干渉成分も考慮しなければならない。

そのため、本研究では、伝送路推定方式および誤り訂正符号を適用した場合の ICI キャンセラについて基礎検討を行った。

2. 研究の目的

本研究では、『OFDM 信号移動受信環境下における受信特性の改善』を目的とし研究を遂行した。本研究において、伝達関数の推定精度の向上を図りつつ、誤り訂正符号に適用したキャンセラを確立することにより、受信特性の改善を図った。本研究により有効性が示されることによって、OFDM 変調方式を採用している次世代モバイル通信方式の携帯電話及び次世代の地上波スーパーハイビジョン放送(地上波 4K/8K 放送)の受信機などへの搭載が期待される。このため、OFDM 信号の移動受信環境下において受信特性の改善が可能であることを示し、ICI キャンセラの確立を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、伝送路推定方式や誤り訂正符号を考慮した様々な方式を検討し、コンピュータシミュレーションにより評価を行った。

4. 研究成果

(1) 繰り返し復調型 ICI キャンセラの受信特性改善

移動受信における k 番目の OFDM 信号の FFT 後の出力は以下に行列およびベクトルで表される。

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{D}(k) + \mathbf{W}(k) \quad (1)$$

(1)式における $\mathbf{X}(k)$ は受信ベクトル、 $\mathbf{H}(k)$ は伝送路行列、 $\mathbf{D}(k)$ は送信ベクトルを表す。また、 $\mathbf{W}(k)$ は雑音ベクトルを表す。ICI の主要な干渉成分は隣接するサブキャリアで伝送されるシンボルであり主要な干渉成分のみ除去することで受信特性を改善することができる。しかし主要な成分のみの行列を用いて復調した場合、離れているサブキャリアの影響が考慮されていないため、受信特性が劣化する。そこで、図 1 のように仮復調されたシンボルと伝達関数を用いて干渉除去を行うことにより受信特性の改善を図る。

繰り返し復調型 ICI キャンセラでは仮復調・リマッピング・干渉除去を繰り返すことにより受信特性の改善が図られている。本検討ではリマッピングを行わず仮復調されたシンボルをそのまま干渉除去に用いることにより特性の改善を図る。

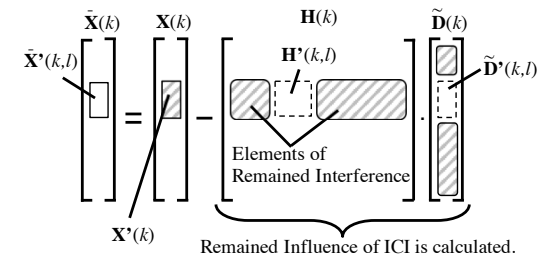


図 1. 干渉除去の概要

本検討では表 1 に示すシミュレーションパラメータおよび表 2 に示したパスパラメータを用いて評価を行った。

表 1. シミュレーションパラメータ(1)

Num. of Sub-carriers, N	1729
Carrier Frequency, f_c	2.53GHz
Interval of Sub-carriers, f_0	10.94kHz
Modulation Scheme of Sub-carriers	256QAM
Length of Guard Interval, GI	1/8
Num. of Adjacent Sub-carriers, N_{AS}	3 sub-carriers

*WiMAX 用パラメータ

表 2. マルチパスパラメータ(1)

i -th Path	DUR[dB]	Delay Time[μs]	NFO-
1	-	0.00	0.072
2	7.29	1.06	0.045
3	12.2	4.29	-0.064

*1: Normalized Frequency Offset

図2にSNR(Signal to Noise Ratio: 信号電力対雑音電力比)に対するBER(Bit Error Rate: ビット誤り率)特性を示す。

図2より干渉除去の際リマッピングを行わず仮復調されたシンボルを用いることによりリマッピングした際に発生していたエラーフロアを改善することができ、受信特性の改善が可能であることを明らかにした。これは、元の送信信号点ではなく異なった信号点にリマッピングされることによるリマッピング誤差を低減させることができるため、受信特性の改善が可能となる。

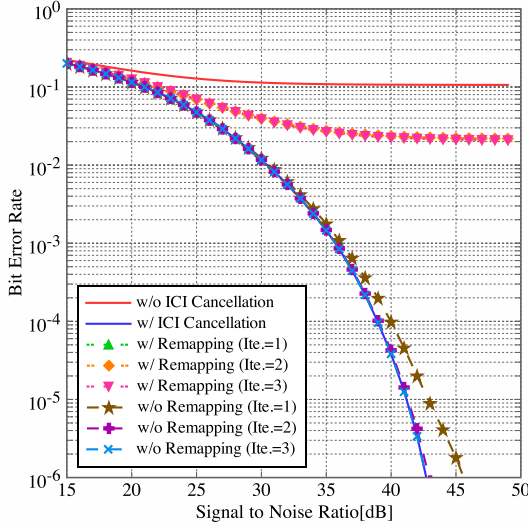


図2. SNRに対するBER特性

(2) 伝送路推定精度の向上

OFDM変調を用いた通信方式は、伝達関数を推定するために、受信機側で既知信号となるパイロットシンボルが挿入されている。通常、伝達関数の推定はパイロットシンボルを用いて行われる。しかし、パイロットシンボルもICIの影響を受けるため、伝送路推定精度が低下する。そこで、仮伝送路推定値を用いて送信されたデータシンボルを仮復調しパイロットシンボルからデータシンボルの干渉を除去することで、伝送路推定精度の向上を図った。

OFDM信号移動受信環境下における伝送路推定方式のブロック図を図3に示す。

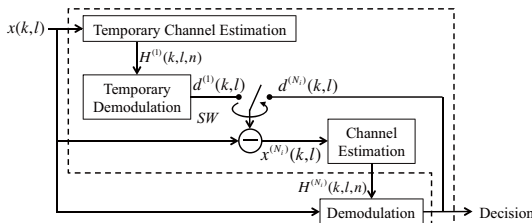


図3. 繰り返し推定方式

図3における“Temporary Channel Estimation”では、(2)式のように受信シンボル $x(k,l)$ とレプリカ受信シンボル $\hat{x}(k,l)$ の差が

最小となるよう伝達関数 $\hat{h}(k,l,n)$ の推定が行われる。

$$E(k) = \sum_{P_k} |x(k,l) - \hat{x}(k,l)|^2 + \sum_{P_k} |x(k-1,l) - \hat{x}(k-1,l)|^2 = \sum_{P_k} |x(k,l) - \hat{h}(k,l,l)d(k,l)|^2 + \sum_{P_{k-1}} |x(k-1,l) - \hat{h}(k-1,l,l)d(k-1,l)|^2 \quad (2)$$

ここで、 Σ_n は、パイロットサブキャリアが挿入されているサブキャリアのみの加算を表す。 $d(k,l)$ は k 番目の OFDM 信号における l 番目のサブキャリアの送信シンボルを表す。 $x(k,l)$ はFFT後の受信信号を表す。また、 $\hat{h}(k,l,n)$ において $k = n$ の場合は、 l 番目のサブキャリアの歪みを表し、 $k \neq n$ の場合は、 k 番目の OFDM 信号における l 番目のサブキャリアが n 番目のサブキャリア与える干渉を表す。

(2)式を用いて伝送路推定を行った場合、伝達関数を構成する振幅 r 、遅延時間 τ 、正規化周波数オフセット α の各パラメータが推定される。ここで、 i はパス番号を表す。“Temporary Demodulation”では、仮推定された伝達関数を用いて繰り返し復調型 ICI キャンセラにより送信シンボルの仮復調が行われ、仮復調シンボル $d^{(1)}(k,l)$ が得られる。仮復調シンボル $d^{(1)}(k,l)$ と仮推定された伝達関数を用いて干渉を除去した受信シンボルを生成する。干渉除去は以下のように行われる。

$$x^{(N_i)}(k,l) = x(k,l)$$

$$- \sum_{\substack{n=0 \\ n \neq P_n}}^{N-1} h^{(N_i)}(k,l,n) d^{(N_i)}(k,n) \quad (3)$$

ここで、 N_i は繰り返し回数を表し、 N はサブキャリア数を表す。 $d^{(N_i)}(k,n)$ と $h^{(N_i)}(k,l,n)$ はそれぞれ N_i 回繰り返し推定した際の復調シンボルおよび推定された伝達関数を表す。また、 $n \neq P_n$ は $d^{(N_i)}(k,n)$ がデータシンボルの場合加算が行われる。干渉除去が行われた受信シンボル $x^{(N_i)}(k,l)$ を用いて伝送路推定が再度行われる。干渉除去された受信シンボルを用いることで伝送路推定精度の向上を図る。さらに、仮伝送路推定・仮復調・干渉除去を複数繰り返すことでさらなる伝送路推定精度の向上を図る。

本検討では伝送路推定方式は表1に示したWiMAXのパラメータに加え表3に示すシミュレーションパラメータを用いてコンピュータシミュレーションによる評価を行った。

表 3. シミュレーションパラメータ(2)

Modulation Scheme of Sub-carriers		64QAM
Num. of Adjacent Sub-carriers, N_{AS}		5 sub-carriers
Pilot Design	Time Domain	3 symbols
	Frequency Domain	3 sub-carriers

表 4. マルチパスパラメータ(2)

i -th Path	DUR[dB]	Delay Time[μs]	NFO
1	-	0.00	0.072
2	4.27	0.96	0.051
3	8.62	2.32	-0.056

図 4 および図 5 に SNR に対する RMSE(Root Mean Square Error)および BER をそれぞれ示す. ここで, RMSE は以下の式で定義される.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{l=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} |h(k, l, n) - \hat{h}(k, l, n)|^2}{\sum_{l=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} |h(k, l, n)|^2}} \quad (4)$$

(4)式において, $h(k, l, n)$ は実際の伝達関数, $\hat{h}(k, l, n)$ は推定された伝達関数を表す.

図 4 より繰り返し推定を行うことにより伝送路推定精度の改善が可能である. また, 図 5 より BER 特性も繰り返し推定を行うことによりエラーフロアを改善することが可能であることを明らかにした.

(3) 誤り訂正符号を適用した場合の ICI キャンセラ

実際の通信システムでは受信機側におけるビット誤りを低減させるため, 誤り訂正符号が用いられている. そこで, 本研究では誤り訂正符号を適用した場合の ICI キャンセラについて検討および評価を行った.

図 6 に誤り訂正符号を適用した場合の ICI キャンセラのブロック図を示す. 本 ICI キャンセラは繰り返し処理の内部に誤り訂正符号(畳み込み符号)の復号および再符号化を行うことにより干渉除去性能の向上を図った.

誤り訂正符号を適用した ICI キャンセラの特性をコンピュータシミュレーションにより評価した. 評価では, 表 5 および表 6 に示すパラメータを用いた. 図 7 に SNR に対する BER 特性を示す. 図中における“Conv.”は繰り返し処理の中に畳み込み符号の復号および再符号化を行わない場合の特性, “Prop.”は繰り返し処理の中に畳み込み符号の復号および再符号化を行い ICI の干渉成分除去の精度向上を図った場合の特性を示す. また, “Iter.=x”は繰り返し処理回数を表す.

図 7 より繰り返し処理に誤り訂正符号(畳み込み符号)の復号および再符号化を適用することにより ICI の干渉成分除去精度に影響を及ぼすマッピングの精度を向上させることができ受信特性の改善が可能であることを示した.

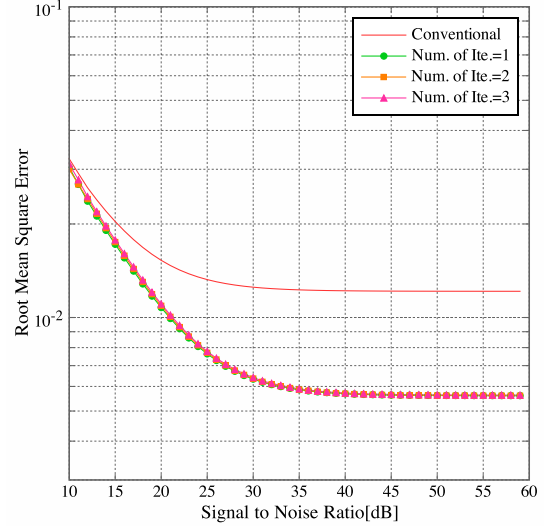


図 4. SNR に対する RMSE 特性

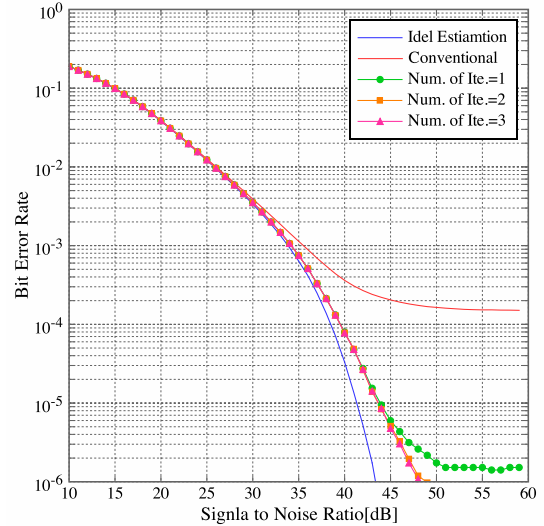


図 5. SNR に対する BER 特性

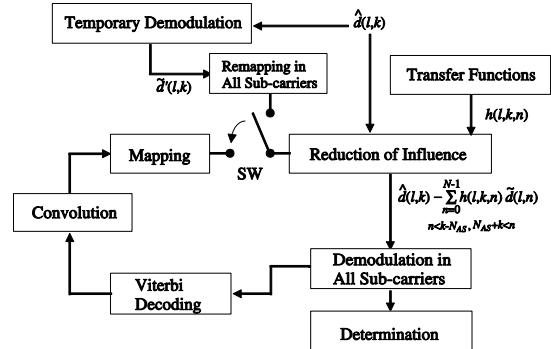


図 6. 誤り訂正符号を適用した ICI キャンセラの構成図

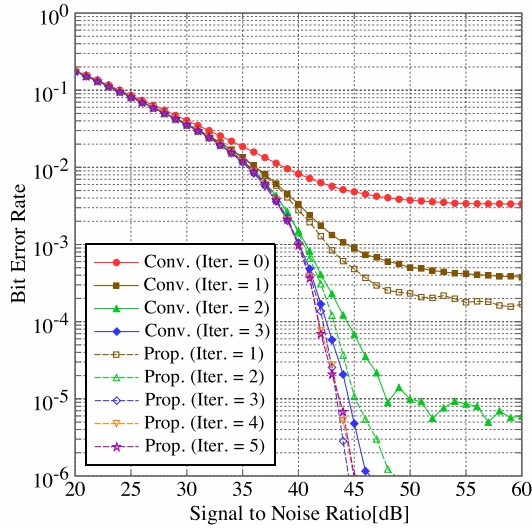
表 5. シミュレーションパラメータ(3)

Num. of Sub-carriers, N	5617
Carrier Frequency, f_c	581.14 MHz
Interval of Sub-carriers, f_0	0.992 kHz
Modulation Scheme of Sub-carriers	64QAM
Length of Guard Interval, GI	1/8
Num. of Adjacent Sub-carriers, N_{AS}	10 sub-carriers
Channel Estimation	Ideal
Error Correction Code	RS-CC

*ISDB-T 用パラメータ

表 6. マルチパスパラメータ(3)

i -th Path	DUR[dB]	Delay Time[μs]	NFO
1	-	0.00	0.12
2	4.27	0.96	0.085
3	8.62	3.70	-0.092

図 7. SNR に対する BER 特性
(誤り訂正符号適用型 ICI キャンセラ)

Turbo 符号などで符号化された信号を復号する際, LLR の計算が必要となる. ICI が発生した場合の LLR の計算方法についても検討を行った.

ICI を考慮しない場合 LLR は以下の式で計算される.

$$\begin{aligned}
 LLR_i &= \log \left\{ \frac{P(r_i|x_i = +1)}{P(r_i|x_i = -1)} \right\} \\
 &= \ln \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_N^2}} \exp \left\{ -\frac{(r_i - 1)^2}{2\sigma_N^2} \right\}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_N^2}} \exp \left\{ -\frac{(r_i + 1)^2}{2\sigma_N^2} \right\}} \\
 &= \frac{-(r_i - 1)^2 + (r_i + 1)^2}{2\sigma_N^2} = \frac{2r_i}{\sigma_N^2} \quad (5)
 \end{aligned}$$

$P(r_i|x_i = +1)$ および $P(r_i|x_i = -1)$ は, 受信シンボルにおけるビット情報が 0 もしくは 1 の確率を表す. r_i は i 番目のビットに対応する受信シンボル, σ_N^2 はガウス分布に従う雑音電力を表す. ICI を考慮した場合の LLR は,

$$\begin{aligned}
 LLR_i &= \log \left\{ \frac{P(r_i|x_i = +1)}{P(r_i|x_i = -1)} \right\} \\
 &= \frac{2r_i}{\sigma_N^2 + \sigma_I^2} \quad (6)
 \end{aligned}$$

となり, σ_I^2 は干渉電力を表し, σ_I^2 は以下のように得られる.

$$\sigma_I^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{\substack{n=0 \\ k \neq n}}^{N-1} |H(l, k, n)|^2 \quad (7)$$

また, 演算量軽減型 ICI キャンセラでは干渉電力は次のように計算される.

$$\tilde{\sigma}_I^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{\substack{n=0 \\ n \leq k^-, \\ k^+ \leq n}}^{N-1} |H(l, k, n)|^2 \quad (8)$$

ここで, k^- と k^+ はそれぞれ $n - N_{AS}$ と $n + N_{AS}$ を表す. このように ICI の干渉電力を考慮することにより受信特性の改善を図る.

本検討では表 1 に示した WiMAX のパラメータに加え表 7 に示すシミュレーションパラメータを用いてコンピュータシミュレーションによる受信特性評価を行った. また, マルチパスは表 4 に示したパラメータを用いた.

表 7. シミュレーションパラメータ(4)

Modulation Scheme of Sub-carriers		256QAM
Num. of Adjacent Sub-carriers, N_{AS}		5 sub-carriers
Turbo Code	Code Rate	1/3, 1/2
	Num. of Iterations	30 Times
	Decode	Max-Log-MAP
Channel Estimation		Ideal

図 8 および図 9 にそれぞれターボ符号の符号化率を 1/3 および 1/2 に設定した場合の SNR に対する BER 特性を示す. 図中における “w/o Can.” および “w/ Can.” は ICI キャンセラを用いていない場合および ICI キャンセラを用いた場合の特性を示す. “w/ Comp.” は演算量軽減型 ICI キャンセラを用いた場合の特性を示す. また “IP” は LLR の計算の際干渉電力を考慮した場合の特性を表す.

図 8 および図 9 より LLR 計算時に干渉電力を考慮することにより受信と育成の改善が可能であることを明らかにした.

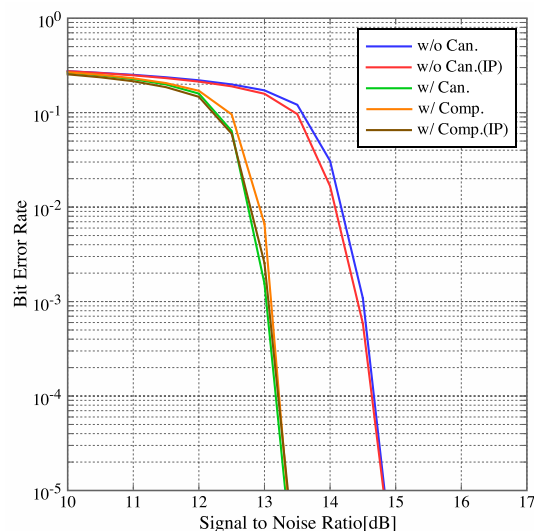


図 8. SNR に対する BER(Rate=1/3)

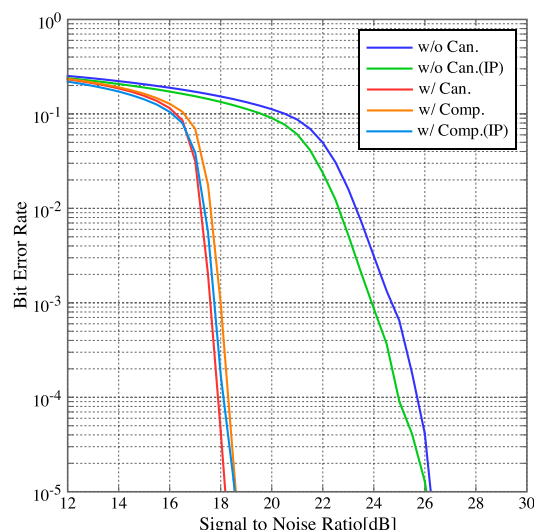


図 9. SNR に対する BER(Rate=1/2)

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)

[学会発表] (計 12 件)

- ① Akira NAKAMURA, Kohei OHNO, Makoto ITAMI, “Improving of Channel Estimation Scheme in Mobile Reception of OFDM”, IEEE International Conference on Consumer Electronics 2016, 2016.1.8, ラスベガス(アメリカ)
- ② Kota AOKI, Akira NAKAMURA, Makoto ITAMI, “A Study on ICI Canceller using Iterative Detection in ISDB-T”, IEEE International Conference on Consumer Electronics 2016, 2016.1.10, ラスベガス(アメリカ)
- ③ 大坪弘明, 中村聡, 伊丹誠, “移動受信環境下における偏波 MIMO-超多値 OFDM の特性改善に関する研究”, 映像情報メディア学会・放送技術研究会, 2016.2.18, かん

ぼの宿小樽(北海道)

- ④ 中村聡, 大野光平, 伊丹誠, “OFDM 伝送における繰り返し復調型 ICI キャンセラ”, 電子情報通信学会・総合大会, 2016.3.17, 九州大学伊都キャンパス(福岡県)
- ⑤ 青木孝太, 中村聡, 伊丹誠, “地上デジタル放送における誤り訂正符号を用いた繰り返し復調型 ICI キャンセラ”, 映像情報メディア学会・冬季大会, 2016.12.21, 東京理科大学・森戸記念館(東京都)
- ⑥ 大坪弘明, 中村聡, 伊丹誠, “移動受信環境下における誤り訂正符号を用いた偏波 MIMO-超多値 OFDM の特性評価”, 映像情報メディア学会・冬季大会, 2016.12.21, 東京理科大学・森戸記念館(東京都)
- ⑦ Hiroaki OTSUBO, Akira NAKAMURA, Makoto ITAMI, “Improving Performance of Dual-Polarized MIMO and Ultra-Multilevel OFDM under Mobile Reception”, IEEE International Conference on Consumer Electronics 2017, 2017.1.8, ラスベガス(アメリカ)
- ⑧ 大坪弘明, 中村聡, 伊丹誠, “移動受信環境下における偏波 MIMO-超多値 OFDM の特性改善”, 映像情報メディア学会・コンシューマエレクトロニクス研究会, 2017.2.20, 北海道大学(北海道)
- ⑨ 大坪弘明, 中村聡, 伊丹誠, “NU-QAM を用いた偏波 MIMO-超多値 OFDM の移動受信特性の評価”, 映像情報メディア学会・放送技術研究会, 2017.2.23, かんぼの宿知多美浜(愛知県)
- ⑩ Hiroaki OTSUBO, Akira NAKAMURA, Makoto ITAMI, “Performance Evaluation of Dual-Polarized MIMO Ultra-Multilevel OFDM using NU-QAM under Mobile Reception”, IEEE International Conference on Consumer Electronics 2018, 2018.1.12, ラスベガス(アメリカ)
- ⑪ Akira NAKAMURA, Makoto ITAMI, “A study on LLR Calculation Scheme under Mobile Reception of OFDM”, IEEE International Conference on Consumer Electronics 2018, 2018.1.13, ラスベガス(アメリカ)
- ⑫ 大坪弘明, 中村聡, 伊丹誠, “移動受信環境下における MMSE 型偏波 MIMO-ICI キャンセラの特性評価”, 映像情報メディア学会・放送技術研究会, 2018.2.22, かんぼの宿知富山(富山県)

6. 研究組織

(1)研究代表者

中村 聡 (NAKAMURA, Akira)
東京理科大学・基礎工学部・
電子応用工学科・助教
研究者番号：40736774