

# オートエンコーダを用いた OFDM 通信システムの性能評価

唐真 孝生<sup>†</sup> 和田 知久<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 琉球大学理工学研究科 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原 1 番地

<sup>††</sup> 琉球大学工学部工学科知能情報コース 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原 1 番地

E-mail: <sup>†</sup>{e085741,wada}@ie.u-ryukyu.ac.jp

**あらまし** 本研究は 2022 年 5 月 12 日のスマート無線研究会で発表した「オートエンコーダを用いた OFDM 通信システムの一検討」[1] の後続研究である。今回は通常の信号処理ブロックを用いた OFDM 通信システムと、オートエンコーダを用いたシステムとの性能比較を行った。IEEE 802.11a 規格に準拠し、変調は 4,16,64、伝送路として加法性ランダムノイズと 2 波及び 4 波マルチパスを想定、シンボル間干渉がないことを前提とした。マルチパスの振幅に応じて、その性能をシミュレーションにより評価、その内容を報告する。

**キーワード** オートエンコーダ,OFDM, マルチパス,IEEE 802.11a

## Performance comparisons of OFDM communication system with autoencoder

Takao TOUMA<sup>†</sup> and Tomohisa WADA<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Engineering and Science, University of the Ryukyu, 1, Sembaru, Nakagami Gun Nishihara Cho, Okinawa Ken, 903-0213 Japan

<sup>††</sup> The Department of Information Engineering, University of the Ryukyu, 1, Sembaru, Nakagami Gun Nishihara Cho, Okinawa Ken, 903-0213 Japan

E-mail: <sup>†</sup>{e085741,wada}@ie.u-ryukyu.ac.jp

**Abstract** This paper is a follow-up to "A study of OFDM communication system with autoencoder" [1] presented at Technical Committee on Smart Radio on May 12, 2022. In this paper, we compared the performance of an OFDM communication system using an ordinary signal processing block with that of a system using autoencoders. The system conforms to the IEEE 802.11a standard, assumes 4, 16, and 64 symbols, additive random noise and 2- and 4-wave multipaths as transmission paths, and no inter-symbol interference. The performance is evaluated by simulation depending on the amplitude of the multipath.

**Key words** Autoencoder, OFDM, Multipath, IEEE 802.11a

### 1. ま え が き

本研究は 2022 年 5 月 12 日のスマート無線研究会で発表した「オートエンコーダを用いた OFDM 通信システムの一検討」[1] の後続研究である。今回は通常の信号処理ブロックを用いた OFDM 通信システムと、オートエンコーダを用いたシステムとの性能比較を行った。

オートエンコーダはディープニューラルネットのアルゴリズムの一種で、入力データと、出力データの値が一致するという特性を持つ。その際、オートエンコーダ内部では情報の次元圧縮により、入力データに含まれるノイズを削減して出力に伝えられる。

ここで OFDM 通信方式の大まかな動作を考えてみる。まず、入力された情報はデジタル信号へと変調処理を行い、逆フーリエ変換で OFDM 信号へと変換、送信を行う。信号が受信側

に到達後、フーリエ変換と復調処理、エラー訂正が行われ、元の情報に復元し、出力する。この「入力と出力の値が一致する」という振る舞いは、オートエンコーダと共通するものであり、オートエンコーダを通信システムへ応用できることを示唆している。

オートエンコーダによるデジタル通信システムの利点として、変調やエラー訂正など、個別ブロック毎に機能の設計をする必要がなく、end-to-end をニューラルネットで実現できる。また従来の通信方式と比べ、より効率的でノイズに対してロバストな通信を学習する可能性も考えられる。

本研究では IEEE 802.11a 規格に準拠したオートエンコーダ OFDM 通信システムを、従来の OFDM 通信方式と比較し、性能評価を行った。伝送路として加法性ランダムノイズと 2 波及び 4 波マルチパスを想定、シンボル間干渉がないことを前提とする。マルチパスの振幅に応じて、その性能をシミュレーション

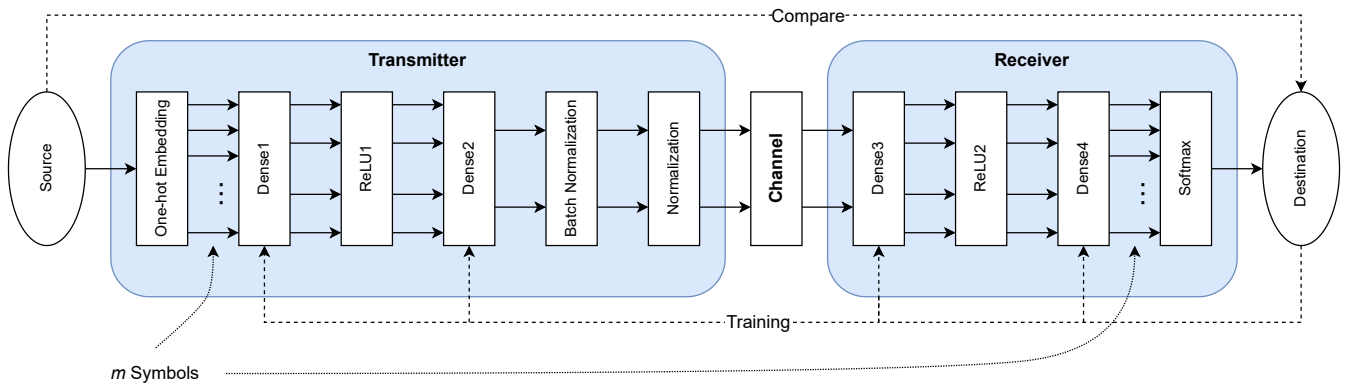


図1 オートエンコーダ通信システム

ンにより評価、以上の内容を報告する。

本稿の流れとして、初めにオートエンコーダによる OFDM 通信システムの概要について説明し、その性能を通常の信号処理ブロックを用いた OFDM 通信システムと比較し、評価を行う。次にオートエンコーダ受信部の全結合層のサイズを変え、通信性能の向上を図る。そして、伝送路上の 2 波マルチパスを 4 波に増やし、通常の通信システムとの性能をマルチパス振幅の違う複数の環境で比較、最後にまとめとする。

## 2. オートエンコーダ OFDM 通信システム

### 2.1 通信システムの構成

デジタル通信システム全体 (end-to-end) を一つのオートエンコーダとして捉えてみる。図 1 はオートエンコーダ通信システムのイメージである。システムは送信部、チャンネル部、受信部の 3 つに大きく分けられる。送信部、受信部はそれぞれ通信処理を行うための NN(ニューラルネットワーク) で構成されている。チャンネル部は実際の伝送路を想定しており、デジタル信号にノイズの付加や歪みなどの処理が行われる。

このシステムで  $n$  ビットのデータを送る場合を考える。送信部に入力された  $n$  ビットのデータは、表現可能な長さ  $m=2^n$  の one-hot ベクトルに変換される。この  $m$  が、この通信システムで使用するコンスタレーションのシンボル数となる。one-hot ベクトルは送信部のニューラルネットワークを通過し複素信号に変換、出力の平均パワーを 1 に正規化した上で送信される。信号が伝搬する過程で、伝送路上のノイズが混じったり信号が歪んだりすることで、送信された信号とは波形が変動した状態で受信部に到達する。受信された信号は、受信部のニューラルネットワークを通過し、元のデータへと復元される。ただし、ニューラルネットワークが出力する値は、全ての取りうる値に対する確率的なものであるため、その中で最も確率の高い値を元のデータとして推測する、という形を取る。

これら一連の処理を、オートエンコーダデジタル通信モデルとして作成し、学習を行う。学習が行われるのは図 1 の送信部、受信部にある 'Dense layer' (全結合層) に当たる部分であり、ニューラルネットワークは内部のパラメータであるウェイトやバイアスを自動で調整していく。その過程で送信部ではコンスタレーションを、受信部ではデータの復調を学習していく

ことで、ノイズや歪みに対しロバストな通信システムを構築する。そして学習が完了したモデルを並列に複数並べることで、複数のサブキャリアを持つオートエンコーダ OFDM 通信モデル (図 2) として構築する。

システムの性能評価は、出力された値と入力した値を比較し、SER(シンボルエラー率)で行う。

### 2.2 IEEE 802.11a について

本研究のオートエンコーダ通信システム (以下 AE) は、実際の無線 LAN での利用を想定して、IEEE 802.11a の規格に準拠する。802.11a の仕様を表 1 に示す。

サブキャリア数は 52 本であるが、FFT のインデックスの 0 と、ガードインターバルである 27~38 までの合計 12 個を未使用としているため、FFT 長は 64 本となる。ガードインターバル長 11 点を考慮して、ノイズやマルチパスはこの 64 点に対して印加する。

表 1 IEEE 802.11a の仕様

FFT 長	64
サブキャリア数	52(パイロット 4 サブキャリアを含む)
変調方式	BPSK(今回は検証せず),QPSK,16QAM,64QAM,OFDM
ガードインターバル	800ns
シンボル長	4000ns(FFT symbol 3200ns + 800ns)

### 2.3 オートエンコーダ通信システムの仕様

AE の仕様は IEEE 802.11a の規格に準じ、サブキャリア数を 52、FFT 長を 64 としている。コンスタレーションのシンボル数は 4,16,64 で、それぞれ QPSK,16QAM,64QAM に対応している。伝送路として加法性ランダムノイズと、主波と 1 つの遅延波の 2 波マルチパス環境を想定し、対処を行うこととする。また 5. 章では 4 波マルチパス環境を想定した検証を行う。

### 2.4 従来型の通信システムとの比較

本研究では AE との比較として、従来の通信方式で実装したモデルも作成し、通信性能の比較を行う。仕様は表 1 に準じる。以降、従来の通信方式による通信モデルを従来型と表記する。

### 2.5 AE によるコンスタレーションの生成

AE では通信システムの学習の過程で、コンスタレーションが生成される。それは一般的な通信システムで使用されている QPSK や 16QAM とは異なる、AE 自身が生成した独自のコン

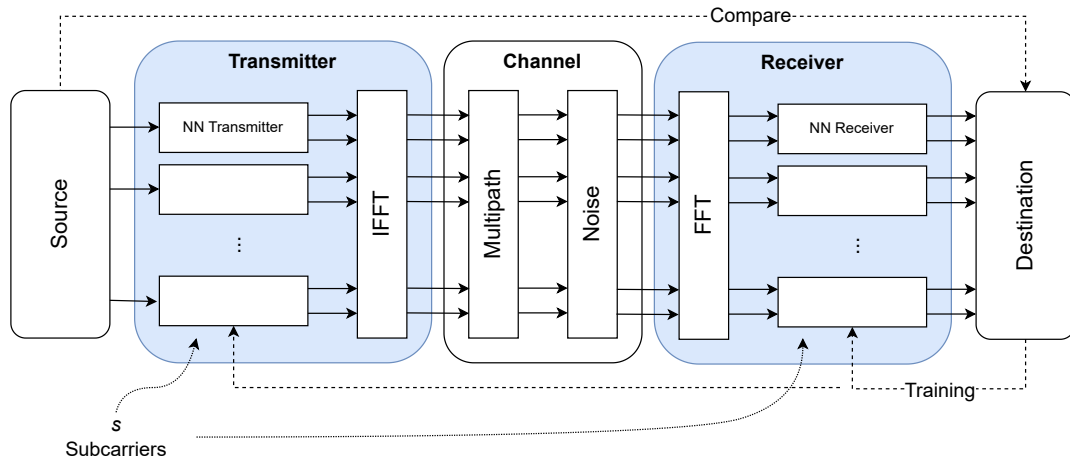


図2 並列 OFDM オートエンコーダ通信システム

スタレーションであり、従来の変調方式よりも高いエラー耐性を持つ可能性がある。

学習済みの AE が生成したコンスタレーションをプロットし、その様子を確認する。サブキャリア数は 52、FFT 長は 64 の OFDM 通信 (図 2) で、伝送路として SNR は 100dB、マルチパス振幅は  $r=0.0$  とした。生成されたコンスタレーションは以下の通り、図 3 は 4 点、図 4 は 16 点、図 5 は 64 点のものである。

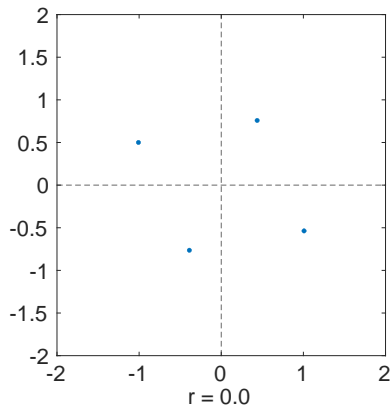


図3 4点コンスタレーション

それぞれのシンボルが等距離で並んでおり、各コンスタレーション共、うまく学習できているように見える。

### 3. シンボル数の違いによる通信性能の比較

#### 3.1 AE と従来型の比較について

これから示す AE と従来型の比較について、若干フェアではない部分があることをことわっておきたい。

従来の通信方式では、信号の受信時にパイロット信号を利用したチャンネル推定を行わなければならない、そのパイロット信号もまたノイズによる影響を受けることになる。AE による通信では、予めチャンネルが決まった状態で学習を行っているため、既に学習によるチャンネル推定がされていると考えられる。

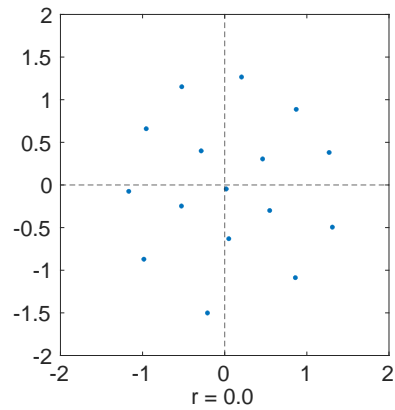


図4 16点コンスタレーション

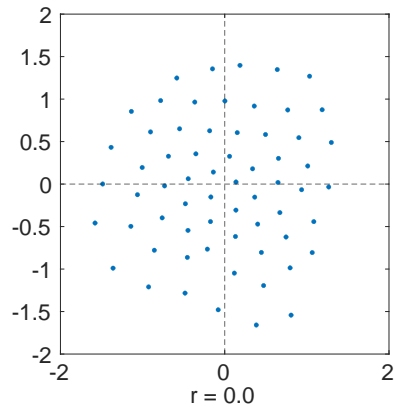


図5 64点コンスタレーション

その分、SER が AE に若干有利に働くと考えられ、比較においてはその点を考慮する必要がある。

また、図の X 軸から下にはみ出した値について、シミュレーション上の SER は実際には 0 が記録されたが、片対数グラフに 0 を含めることはできないことから、見やすさのため 0 の部分に極めて小さい値 ( $1e-20$ ) を挿入している。以降の図において、下にはみ出した値は 0 が記録されたものとする。

### 3.2 AE のマルチパス環境下シミュレーション

各シンボル数のマルチパス環境下での SER を、シミュレーションによって検証した。マルチパスは主波と 1 つの遅延波の 2 波マルチパス環境を想定、遅延は 12Tap、振幅  $r$  は 0.0~1.0 まで 0.1 刻みで変化させ、それぞれ対処を行うこととする。

### 3.3 シミュレーション結果

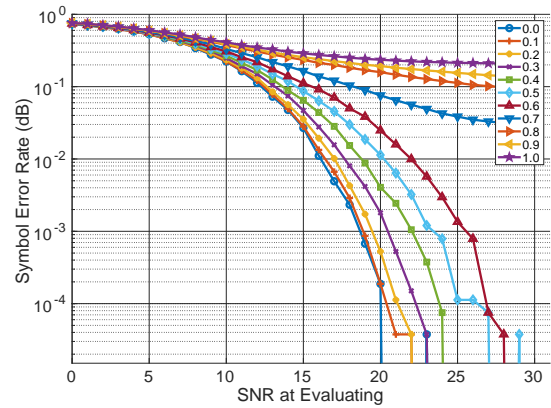


図 8 AE 通信システムの SER(m=16)

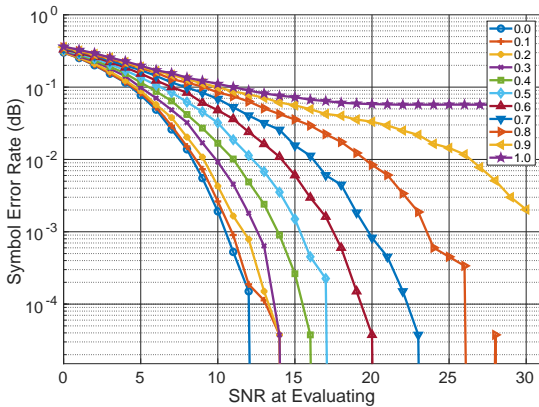


図 6 AE 通信システムの SER(m=4)

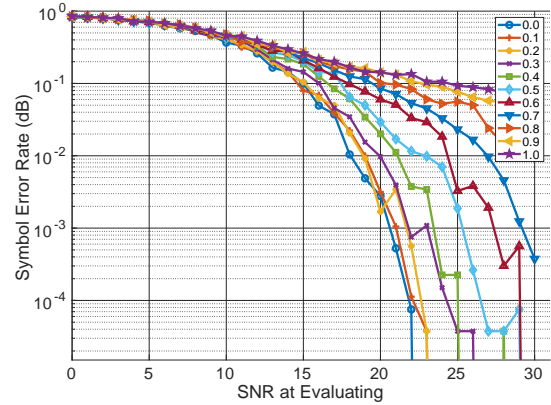


図 9 従来型通信システムの SER(m=16)

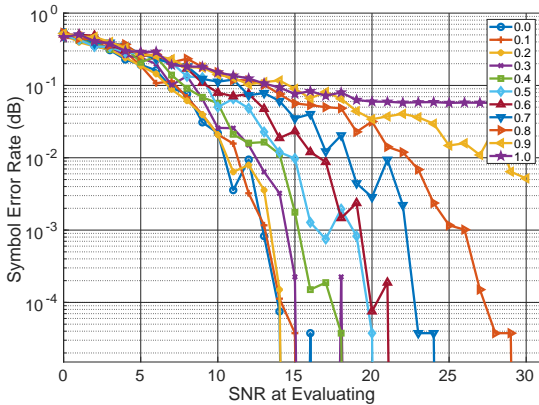


図 7 従来型通信システムの SER(m=4)

まず 4 シンボルの SER について、AE を図 6 に、従来型を図 7 に示す。AE は従来型と同等か僅かに良い性能を見せている。

次に 16 シンボルの SER について、AE を図 8 に、従来型を図 9 に示す。 $r=0.7$  以降において、AE と従来型とで SER に開きがでている。

そして 64 シンボルの SER について、AE を図 10 に、従来型を図 11 に示す。従来型は SNR が 40dB の時、 $r=0.7$  までの SER

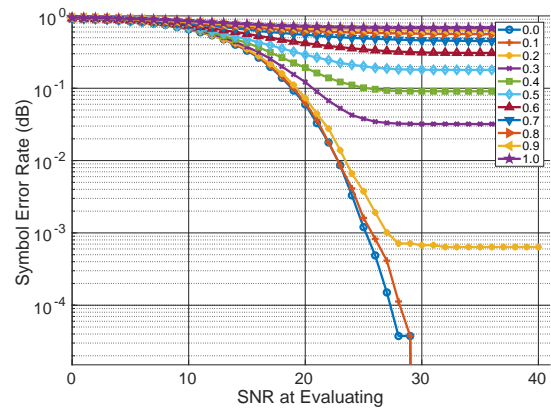


図 10 AE 通信システムの SER(m=64)

を0にできているが、AEでは $r=0.1$ までとなっている。

シンボル数が増加すると、マルチパス振幅が大きい場合にSERを下げられなくなっているものの、概ねどのシンボル数でもSERを低下させられている。また、AEの性能について、シンボル数4の場合は従来型と互角と言っているいいSERとなったが、シンボル数16,64においては従来型と差がつく結果となった。

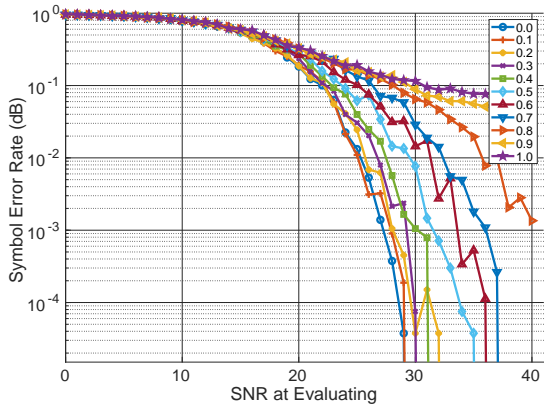


図 11 従来型通信システムの SER(m=64)

#### 4. 受信部における全結合層のウェイト数による通信性能の比較

##### 4.1 受信部の学習について

AEの受信部には‘Dense layer’(全結合層)が2つ存在する。この層がデジタル通信における信号の特徴量を学習し、受信信号の復調処理を行っている。

一般的にニューラルネットワークのウェイトや層の数は少ないほどよく、増やしすぎると処理速度が遅くなったり、過学習を引き起こしたりする [12]。

ただしパラメータの調整だけでは精度が向上しない場合に、ウェイトや層の数を増やすことで、精度が上がることもある。

本モデルの全結合層“Dense3”は図12のように4つのウェイトで構成されており、この数を4から8、さらに16に増やすことで、通信性能が変化するか検証を行った。

##### 4.2 シミュレーション結果

まず4シンボルのSERについて、ウェイト数8を図13に、16を図14に示す。ウェイト数8,16共ほぼ同等の性能を見せている。

次に16シンボルのSERについて、ウェイト数8を図15に、16を図16に示す。 $r=0.7$ において、ウェイト数8よりも16の方がSERが悪化している。

そして64シンボルのSERについて、ウェイト数8を図17に、16を図18に示す。ウェイト数8は、 $r=0.0\sim 0.2$ まではSERを0にできているのに対し、ウェイト数16は全く0にすることができていない。

ウェイト数8において、シンボル数64、 $r=0.2$ でSNR30dBの時にSERを0にすることができた。この場合でもSERは従来

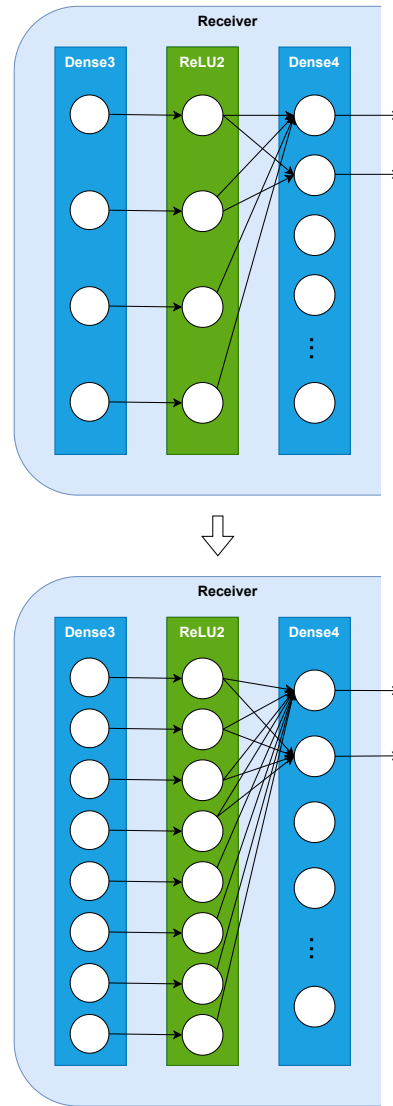


図 12 受信部“Dense3”レイヤのウェイト数の変更

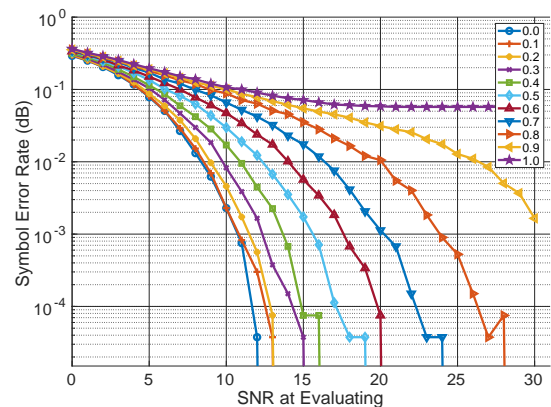


図 13 ウェイト数8の SER(m=4)

型より高かったが、それでも従来型との差は若干ではあるが詰めることができた。

ウェイト数 16 の場合、ウェイト数 8 と比較してシンボル数 4,16 の SER はあまり変わらず、シンボル数 64 においてはむしろ悪化した。ウェイト数を増やしすぎたことで過学習を起こしたと思われる。

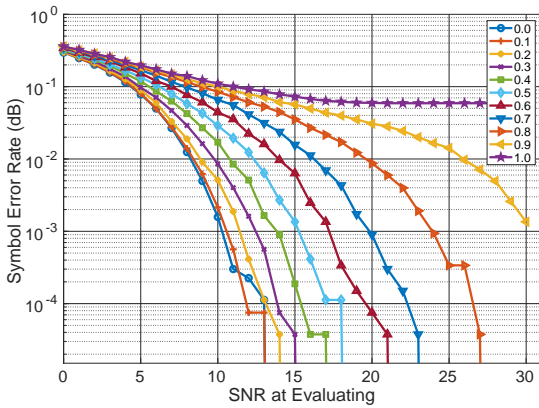


図 14 ウェイト数 16 の SER(m=4)

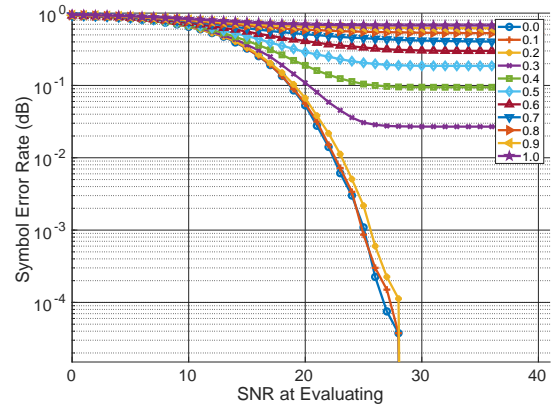


図 17 ウェイト数 8 の SER(m=64)

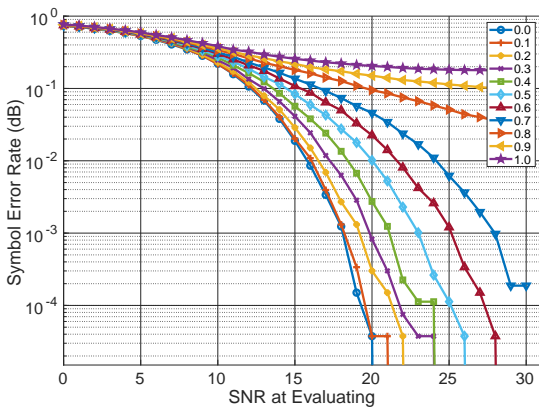


図 15 ウェイト数 8 の SER(m=16)

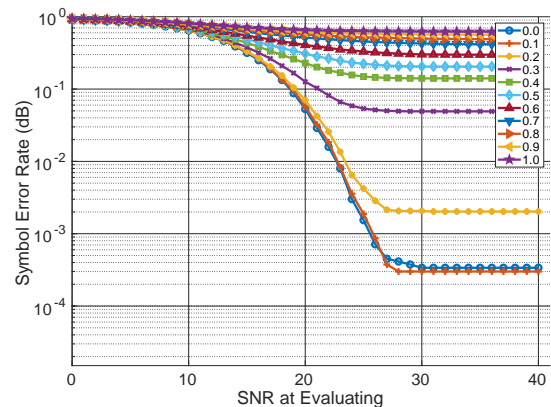


図 18 ウェイト数 16 の SER(m=64)

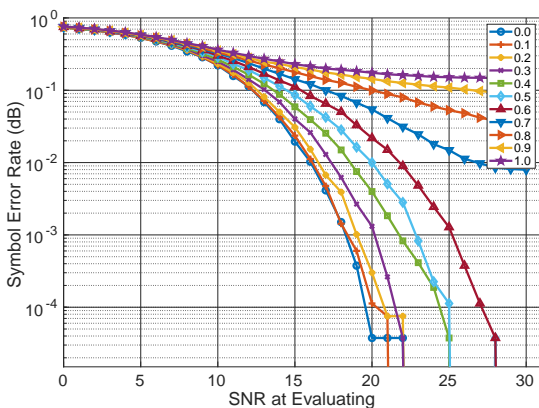


図 16 ウェイト数 16 の SER(m=16)

表 2 “Dense3”のウェイト数による SER の比較 (r=0.2)

	Conventional	4 weights	8 weights	16 weights
4 symbols(10dB)	0.0097	<b>0.0042</b>	0.0045	0.0051
16 symbols(20dB)	0.0016	0.0005	<b>0.0003</b>	<b>0.0003</b>
64 symbols(30dB)	<b>0.0000</b>	0.0006	<b>0.0000</b>	0.0020

“Dense3”のウェイト数による SER を比較したものを表 2 に示す。横軸は従来型と各ウェイト数を変更した AE、縦軸はシンボル数 (SNRdB) を表す。特にウェイト数 64 の時に差が顕著な、マルチパス振幅  $r=0.2$  で比べることとした。また、値が一番良かった項目は太字で示している。

4 シンボルの時は、初期のウェイト数 4 が僅かに良く、16 シンボルではウェイト数 8 と 16 が初期のものより僅かに良い。そして 64 シンボルの時、従来型とウェイト数 8 のものが SER

を 0 にすることができている。

以上の結果から、本モデルの“Dense3”においてウェイト数は 8 が適当であると考えられる。次章の 4 波マルチパスの検証はウェイト数 8 のモデルで行うこととする。

## 5. 4 波マルチパスに対する通信性能の比較

### 5.1 2 波マルチパス環境との違い

表 3 4 波マルチパス環境下の振幅と遅延

	amplitude	delay(Tap)
1st wave	1.0	0
2nd wave	$(2+r)/3$	4
3rd wave	$(1+2r)/3$	8
4th wave	$r$	12

4 波マルチパス環境において、AE と従来型の通信システムがどの程度の通信性能を持つか検証した。各マルチパスの振幅と遅延を表 3 に示す。横軸は振幅と遅延、縦軸は各マルチパス波を表す。

### 5.2 シミュレーション結果

まず 4 シンボルの SER について、AE を図 19 に、従来型を図 20 に示す。AE は従来型に対し、全体的に良い性能を見せている。しかし、 $r=0.9\sim 1.0$  では SER をほとんど下げられていない。ただしこれは従来型も同様であると言える。

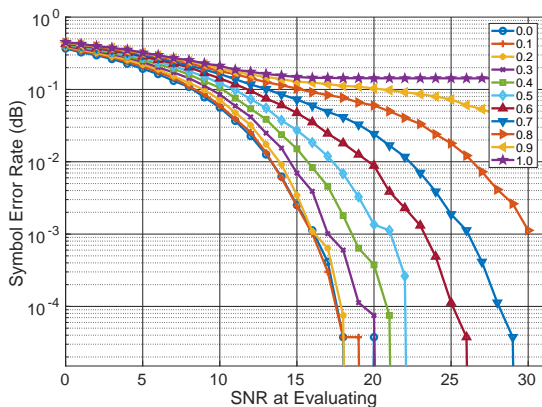


図 19 4 波マルチパス環境下の AE の SER(m=4)

次に 16 シンボルの SER について、AE を図 21 に、従来型を図 22 に示す。従来型が  $r=0.5$  までの SER を大きく低下させられているのに対し、AE はほとんどの振幅において SER をあまり低下させられていない。

そして 64 シンボルの SER について、AE を図 23 に、従来型を図 24 に示す。従来型は SNR=40dB の時、 $r=0.5$  までの SER を 0 にできているが、AE は SER の低下がほとんど見られなかった。

従来型では、シンボル数 4 では SER を改善できており、16、においてもある程度の改善が見られる。AE は、シンボル数 4 では SER を改善できているものの、16,64 についてはほとんど低下させることができていなかった。

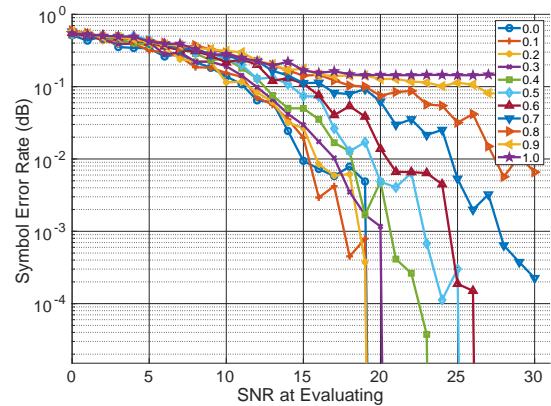


図 20 4 波マルチパス環境下の従来型の SER(m=4)

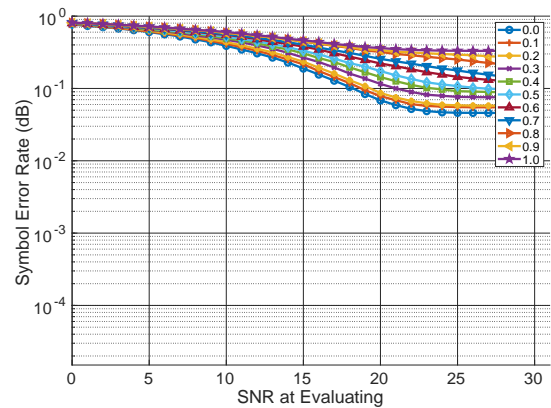


図 21 4 波マルチパス環境下の AE の SER(m=16)

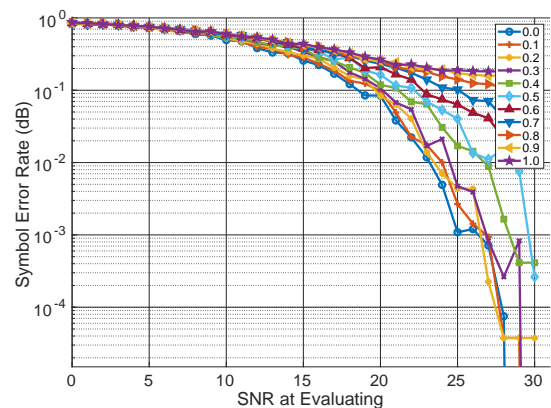


図 22 4 波マルチパス環境下の従来型の SER(m=16)

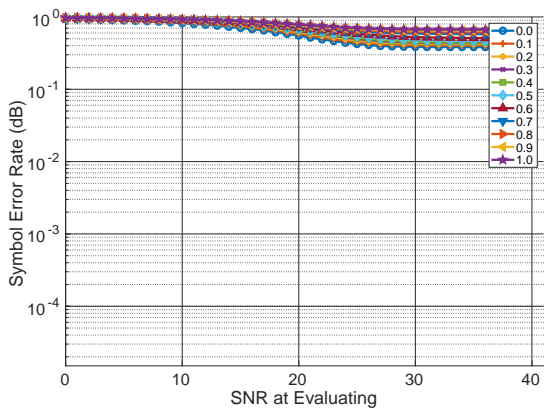


図 23 4 波マルチパス環境下の AE の SER(m=64)

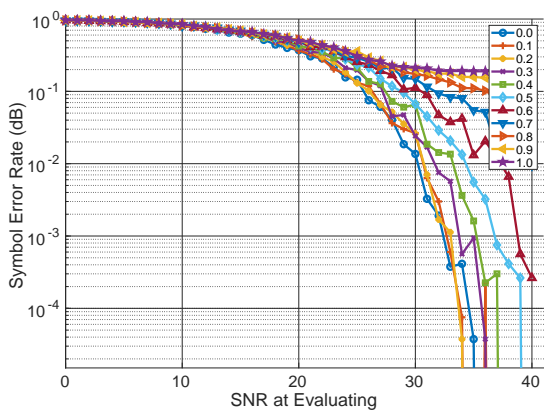


図 24 4 波マルチパス環境下の従来型の SER(m=64)

## 6. ま と め

本研究ではオートエンコーダによる OFDM 対応のデジタル通信システムを、従来の通信システムと比較し、性能評価を行った。2 波マルチパスの場合、シンボル数 4,16 では従来型と同等の性能を得ることができたが、64 について従来型に及ばなかった。次にオートエンコーダの受信部の全結合層”Dense3”のサイズを 4 から 8,16 に変化させ性能評価を行った。サイズが 8 の場合に全体的な性能向上が確認でき、従来型との比較においても、シンボル数 64 は性能の差が縮まり、4,16 については通常の上回ったことを確認した。4 波マルチパス環境での性能については、シンボル数 4 の場合は、通常のものと同等の性能を確認できたが、16,64 においては通信に十分な精度は見込めなかった。

今後の課題として、モデルの構築や学習データを工夫することで、シンボル数 64 のものにおいても通常のものと同等かそれ以上の性能を出せる余地は存在する。また、4 波マルチパス環境においても、シンボル数 4 以外はうまく等化できていなかったことから、等化性能のさらなる向上を図る必要がある。

## 文 献

[1] 唐真孝生 and 和田知久. オートエンコーダを用いた OFDM 通信

システムの一検討. 信学技報. 2022.5, vol. 122, no. 12, SR2022-6, pp. 27-33.

- [2] T. O’ Shea and J. Hoydis, ”An Introduction to Deep Learning for the Physical Layer;” in IEEE Trans. Cognitive Communications and Networking, vol. 3, no. 4, pp. 563-575, Dec. 2017, doi: 10.1109/TCCN.2017.2758370.
- [3] A. Felix, S. Cammerer, S. Dörner, J. Hoydis and S. Ten Brink, ”OFDM-Autoencoder for End-to-End Learning of Communications Systems,” 2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/SPAWC.2018.8445920.
- [4] F. A. Aoudia and J. Hoydis, ”End-to-End Learning of Communications Systems Without a Channel Model,” 2018 52nd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, 2018, pp. 298-303, doi: 10.1109/ACSSC.2018.8645416.
- [5] トリケップス企画部, デジタル放送/移動通信のための OFDM 変調技術, トリケップス, 東京, 2000.3.
- [6] 島村徹也 and トリケップス企画部, デジタル通信システムのための MATLAB プログラム事例解説, トリケップス, 東京, 2000.7.
- [7] Chollet François and クイープ and 巢籠悠輔, Python と Keras によるディープラーニング, マイナビ出版, 東京, 2018.5.
- [8] 斎藤康毅, Python で学ぶディープラーニングの理論と実装, オライリー・ジャパン, オーム社 (発売), 東京, 2016.9.
- [9] Géron Aurélien and 長尾高弘 and 下田倫大, Scikit - learn と TensorFlow による実践機械学習, オライリー・ジャパン, オーム社 (発売), 東京, 2018.4.
- [10] 阪田史郎, 無線 LAN, オーム社, 東京, 2004.6.
- [11] 守倉正博, そこが知りたい最新技術高速無線 LAN802.11n 入門, インプレス R&D, インプレスコミュニケーションズ (発売), 東京, 2007.9.
- [12] Gulli, Antonio Gulli, Sujit Pal 著 ; 大串正矢, 久保隆宏, 中山光樹 訳, 直感 deep learning : Python × Keras でアイデアを形にするレシピ, オライリー・ジャパン ; 東京 : オーム社, 東京, 2018.8.