

## 80MHz 帯域幅 OFDM 方式における通信品質および増幅器歪みの評価

～PAPRを低減することによる通信品質向上に関する検討～

浅井 泰博<sup>†</sup> 吉澤 真吾<sup>†</sup> 郡司 崇<sup>††</sup> 齊藤 隆<sup>††</sup> 宮永 喜一<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 北海道大学 大学院情報科学研究科 〒060-0814 札幌市北区北14条西9丁目

<sup>††</sup> 三菱電機特機システム株式会社 〒141-0032 東京都品川区大崎1-15-9

E-mail: <sup>†</sup>{yasu,yosizawa}@csm.ist.hokudai.ac.jp, <sup>††</sup>{ta-gunji,ta-saito}@east1.melos.co.jp,  
<sup>†††</sup>miya@ist.hokudai.ac.jp

**あらまし** 本稿では、IEEE802.11a規格を拡張した帯域幅80MHzのOFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)方式無線通信システムにおいて、送信機の高周波部に搭載されるパワーアンプの非線形ひずみが与える影響の評価を行った。評価の方法としては、我々の研究グループが提案している帯域幅80MHzのOFDM方式無線通信システムであるHU-VHTのSimulinkモデルに、送信機のRFデバイスであるパワーアンプのブロックセットを追加し、通信システムとしての品質評価を行った。

**キーワード** 広帯域無線 LAN, RF, 通信品質

## Evaluation of Communication Quality and Amplifier Distortion in an 80-MHz Bandwidth OFDM Systems

### A Study of Improvement of Communication Quality with Decreasing PAPR

Yasuhiro ASAI<sup>†</sup>, Shingo YOSHIZAWA<sup>†</sup>, Takashi GUNJI<sup>††</sup>, Takashi SAITO<sup>††</sup>, and Yoshikazu MIYANAGA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology Hokkaido University nishi9-chome, kita-18-jou, kita-ku, sapporo-city, hokkaido 060-0814 Japan

<sup>††</sup> Mitsubishi Electric Tokki Systems Corporation 1-15-9, Osaki, Sinagawa-ku, Tokyo, 141-0032, Japan

E-mail: <sup>†</sup>{yasu,yosizawa}@csm.ist.hokudai.ac.jp, <sup>††</sup>{ta-gunji,ta-saito}@east1.melos.co.jp,  
<sup>†††</sup>miya@ist.hokudai.ac.jp

**Abstract** This study evaluates the effect of distortion which the power amplifier generates in high frequency part of the transmitter in OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) wireless communication systems with an 80-MHz bandwidth by enhancing IEEE802.11a standard. The Simulink model with an 80-MHz bandwidth proposed by our research group, i.e., Hokkaido University Very High Throughput Standard (HU-VHT std.) has been constructed and evaluated in bit errors. Furthermore, we have measured communication quality by adding the Simulink block set of the power amplifier as a communication systems.

**Key words** Wideband W-LAN, RF, Communication quality

### 1. ま え が き

近年の無線通信の研究において、構内や家庭内でのパーソナル通信における伝送速度の高速化に対する取り組みが行われている。IEEE802委員会では従来方式であるIEEE802.11a/b/gより最大伝送速度が優れた方式として、IEEE802.11n [1]の規格を

策定を行っている。IEEE802.11n規格には通常の無線LAN規格を2チャンネル分使用した、40MHzの帯域幅を持つ通信モードが存在する。さらには、IEEE802.11 VHT study group [2] ワークグループが発足し、80MHzの帯域幅の利用を想定し、さらにMIMO技術によるSDM(Space Division Multiplexing; 空間分割多重)を併用して、最低でも伝送レートがGbpsオー

ダーに達する規格を検討中である。本研究において、広帯域化 OFDM 方式として提案している HU-VHT 規格 [3] がある。OFDM フレーム、FFT 点数、サブキャリア割り当てについて考察し、SISO (Single Input Single Output) で 300Mbps、送受信アンテナを 4 本ずつ用意した  $4 \times 4$  MIMO (Multi Input Multi Output) で 1.2Gbps の最大伝送レートを達成する。

以前の研究 [3]~[5] では、高速な OFDM 通信は、ベースバンド上でのみの BER (Bit Error Rate) 特性評価、もしくはスループット評価されているものがほとんどであった。そこで今回は、実際の通信環境に近づけるために、RF 回路の中で最も影響が大きいと考えられる、パワーアンプを送受信機間に加えて評価を行う。また、パーソナル通信における通信品質の向上、さらには通信品質の向上を狙うため、PAPR (Peak to Average Power Ratio) も評価の対象とする。

## 2. HU-VHT 規格

### 2.1 HU-VHT 規格

本章ではまず、HU-VHT 規格のスループットの見積りについて説明する。ガードインターバル、FFT 点数、サブキャリアの割り当てなどの方式の通信特性を決定するパラメータは下記の表 1 のようになっている。

表 1 OFDM 方式における主要パラメータ

$K$	DFT 点数
$F_b$	信号帯域幅 (MHz)
$F_n$	帯域制限幅 (MHz)
$T_g$	ガードインターバル長 ( $\mu\text{s}$ )
$T_d$	DFT 窓長 ( $\mu\text{s}$ )
$N_b$	誤り訂正符号が付加された 1 サブキャリアあたりのビット数
$R$	誤り訂正符号の符号化率

上記パラメータを用いて伝送レートの計算式を表すことができる。伝送レートを Dbps とすると以下のように与えられる。

$$D(K, F_b, F_n, T_g, N_b, R) = K \left(1 - \frac{F_n}{F_b}\right) \cdot N_b \cdot R \cdot \frac{F_b}{K + F_b \cdot T_g} \quad (1)$$

IEEE802.11a 規格を参考にして、帯域制限幅を  $F_n = 4 \times 10^6$  (Hz)、ガードインターバル長を  $T_g = 0.8$  ( $\mu\text{s}$ )、多値変調レベルを 64QAM すなわち  $N_b = 6$  (bit)、符号化率を  $R = 3/4$  と最大の伝送レートの条件に合わせてパラメータを固定にする。この時の FFT 点数と信号帯域幅による伝送レートの関係を示す SISO の場合を図 1 に、 $4 \times 4$  MIMO の場合を図 2 に示す。

このグラフが示すように 80 MHz 帯域の広帯域化 OFDM においては、FFT 点数によって伝送速度が大きく異なる。選択する FFT 点数は許容できる送受信機処理のレイテンシや OFDM 変復調回路の規模に依存して決められる。FFT ポイント数を増やすことは、ハードウェアの規模が肥大化し、コストに見合わなくなってしまうので、HU-VHT 規格においては、FFT 点数は 512 ポイントを採用している。これらの理由から、広帯域化 OFDM 通信方式が通信容量において優位にあるのは明らかであるが、藤田、鬼沢らの研究 [3], [4] のように、信号帯域幅の拡大により、インターリーブ効果が増大し、ある伝送速度を達

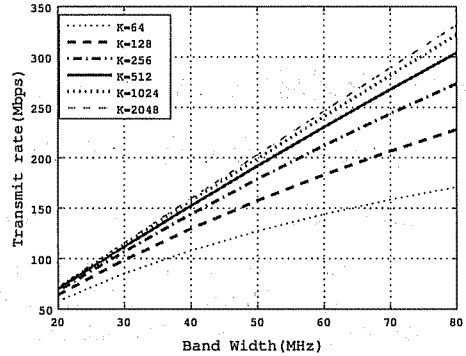


図 1 伝送レート見積り SISO

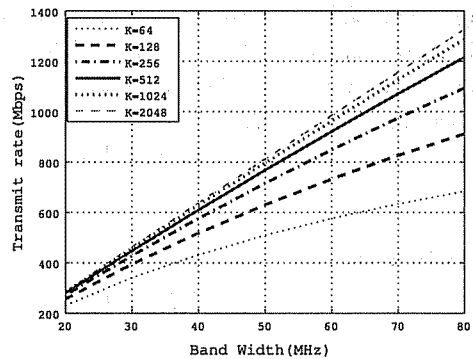


図 2 伝送レート見積り  $4 \times 4$  MIMO

成する信号対干渉電力費が小さくなり、結果として最大スループットが向上する。今回シミュレーションに使用した HU-VHT 規格も同様に、IEEE802.11a 規格の伝送方式を 4 チャンネル分使用する場合と比較して、約 1.4 倍の最大伝送レートをベースバンド上のシミュレーションで示す。

HU-VHT 規格の各種パラメータを表 2 に、各伝送モードに関しては表 3 に示す。 $4 \times 4$  MIMO の場合にはこの伝送レートの 4 倍のレートとなる。

表 2 HU-VHT 規格各種パラメータ

信号帯域幅	80MHz
サンプリング周期	12.5 $\mu\text{s}$
サブキャリア数 (FFT 点数)	512
データサブキャリア数	480
パイロットサブキャリア数	20
サブキャリア間隔	0.1563 MHz
FFT/IFFT 周期	6.4 $\mu\text{s}$
プリアンブル長	16 $\mu\text{s}$
データシンボルのガードインターバル長	0.8 $\mu\text{s}$
ロングプリアンブルのガードインターバル長	1.6 $\mu\text{s}$
シンボル長	7.2 $\mu\text{s}$
ショートシンボル長	2.0 $\mu\text{s}$
ロングシンボル長	14.4 $\mu\text{s}$

表 3 HU-VHT 規格 SISO 伝送モード

Mode	伝送レート (Mbps)	符号化率	変調方式	BPSC	DBPS
1	66.6	1/2	QPSK	2	480
2	133.3	1/2	16QAM	4	960
3	200	1/2	64QAM	6	1440
4	300	3/4	64QAM	6	2160

### 2.2 シミュレーション条件

HU-VHT 規格と従来方式のモデルとのパワーアンプ接続時の線形領域での BER 特性を比較するためにまず、IEEE802.11a、IEEE802.11n(4×4MIMO)、HU-VHT 規格 SISO、HU-VHT 規格 4×4MIMO の Simulink モデルにパワーアンプのブロックセットを追加し、擬似的な RF 環境を設定し、各モードにおける BER 特性を検討する。シミュレーション条件としては、表 2.2 のように行った。また、非線形領域での特性をわかりやすくするために、MIMO のパスは今回の実験では、IEEE802.11n、HU-VHT 規格の双方に条件の良いものを使用している。

表 4 シミュレーション条件

規格名	IEEE802.11a	IEEE802.11n	HU-VHT 規格
帯域幅	20MHz		80MHz
FFT 点数	64		512
ストリーム数	1stream	4 stream	1 or 4 stream
遅延スプレッド	50ns		
SISO チャンネルモデル	HIPERLAN2 model A		
MIMO チャンネルモデル	無相関レイラー		
ドップラー周波数	50Hz		
Iteration	2000packet		
OFDM シンボル数	8		
変調方式	QPSK, 16QAM, 64QAM		
符号化率	R=1/2,2/3,3/4	R=1/2,3/4,5/6	R=1/2,3/4
復号法	軟判定 Viterbi 復号		
MIMO データ信号検出法	—	MMSE	

### 2.3 計算機シミュレーション

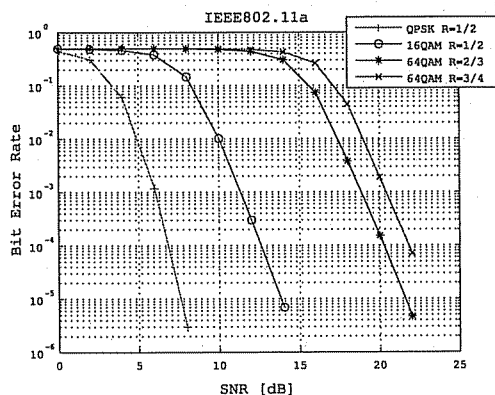


図 3 IEEE802.11a BER 特性

図 3 の IEEE802.11a と図 4 の HU-VHT 規格の SISO は同

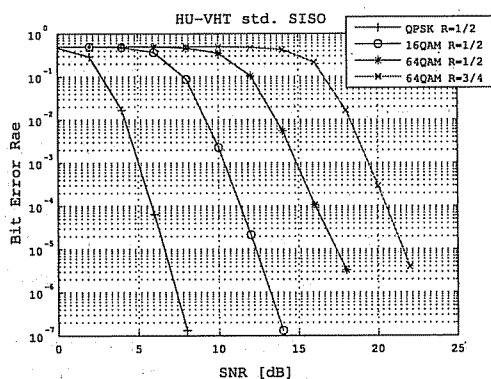


図 4 HU-VHT 規格 SISO BER 特性

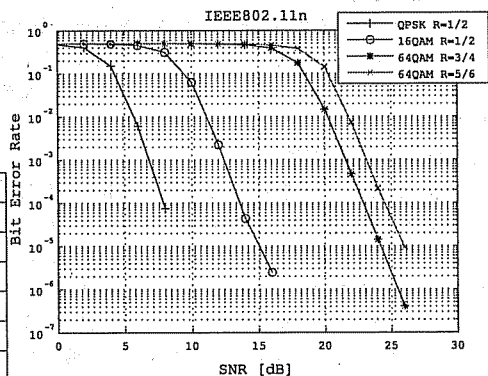


図 5 IEEE802.11n BER 特性

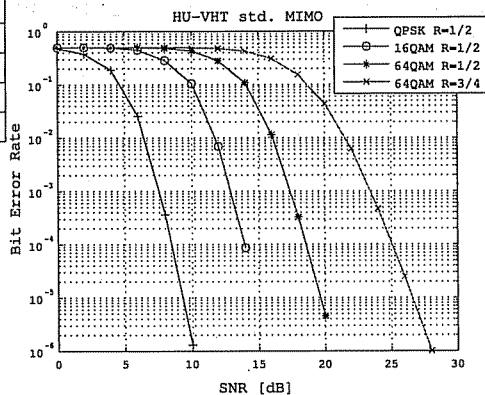


図 6 HU-VHT 規格 MIMO BER 特性

様の BER 特性を示しており、パケット長が長くなると、ドップラー遅延の影響を受けやすくなったことを考慮すれば、線形領域での検証ではあるが、このビットエラー特性は概ね良好であるといえる。図 5 の IEEE802.11n と図 6 の HU-VHT 規格の MIMO では、64QAM、符号化率 3/4 の伝送モードで比較すると、約 1 dB 程度 IEEE802.11n の方がエラーレートが  $10^{-3}$  の時の SNR の値が低かった。HU-VHT 規格は符号器やインターリーブの構成が最適化されていないので、まだ改善の

余地があるとする。

### 3. 通信システムを構成する上での問題点

#### 3.1 パワーアンプの非線形歪み

一般に OFDM 通信方式は、サブキャリアの正弦波が重ね合わせた時に生じる高いピークが原因で、PAPR が高くなる事が知られている。この点においては、HU-VHT 規格は従来の無線 LAN 規格よりも広い帯域幅を有するので、より多くの異なる周波数の正弦波が存在することにより、PAPR が高くなることが考えられる。

このような OFDM 方式の送受信機を通信システムの中に組み込むにあたって問題であるのは、パワーアンプに通した時に歪みが生じることである。アンプが非線形領域で動作している時に、出力限界を超えたピークが入ると、出力限界を超えた部分の波形はクリッピングされ、平たくなる。その時、波形に角がたった部分が発生し、復調時、FFT された時にスペクトラムに広がりを生むこととなり、正しく復調されなくなり、エラーの原因となる。

#### 3.2 PAPR の改善手法

データ部の PAPR の低減手法としては PTS(部分系列伝送)、APPR(適応ピーク低減方式) [6] 等が上げられる。しかしながら、このいずれの手法もプリアンブルを付加される前に行われる操作であり、仮にプリアンブルの PAPR が高ければ、その効果は減ってしまうこととなる。また、データ部は、スクランブル操作にかけることにより比較的電力の集中を防いでいるので、定性的に PAPR がプリアンブル部より低いといえる。

文献 [7] では、遺伝的アルゴリズムを用いてロングプリアンブルを決定し、PAPR を低減し、非線形領域における BER 特性の改善を行っている。遺伝的アルゴリズムとは選択・交叉・突然変異の 3 種類の遺伝的操作を使用する。これらにより適度の低い解は淘汰され、適度の高い解のみが残るため、確率的探索により近似解を求める手法として処理を行うことが可能になるが、今回の実験では、遺伝的アルゴリズムを使用せずに、ランダムな組み合わせを多く発生させて選択する、遺伝的アルゴリズムの簡易版を使用した。

IEEE802.11a のロングプリアンブルを 4 倍に拡張して作られた、PAPR が 17.83dB であるロングプリアンブルのパワースペクトラムを図 7 に、遺伝的アルゴリズムの簡易版を用い、PAPR が 5.26dB であるロングプリアンブルのパワースペクトラムを図 8 に示す。ピーク値に明らかな違いがでることが、この 2 つの図から読み取ることができる。また、データ部の PAPR はロングプリアンブルに対して低い 0.088dB であり、相対的にプリアンブル部の PAPR が高いといえる。

### 4. シミュレーションによる非線形歪み評価

#### 4.1 パワーアンプパラメータ

HU-VHT 規格は無線 LAN としての適用を重視しており、端末局送信機の高周波部に搭載されるパワーアンプは、消費電力の観点から、数 W クラスの出力が可能なものを用いることが一般的である。今回、端末局に 1W のアンプを使用すると仮定

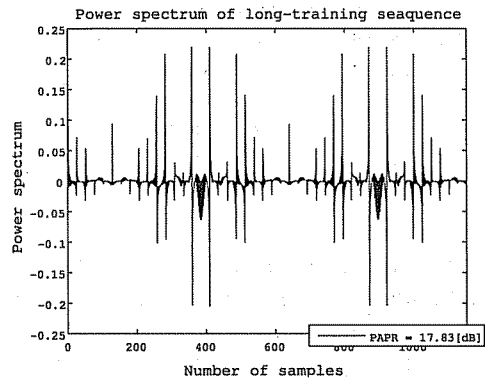


図 7 PAPR が 17.83dB であるロングプリアンブルのパワースペクトラム

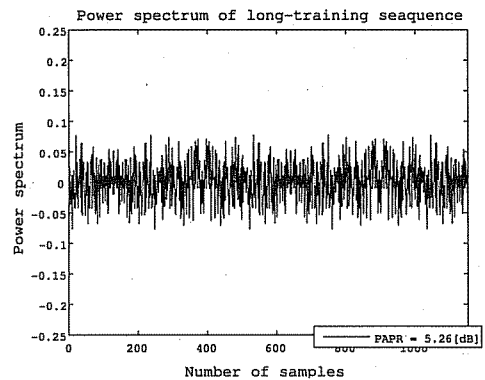


図 8 PAPR が 5.26dB であるロングプリアンブルのパワースペクトラム

して、図 9 の構成で実験を行った。実験結果から得られた非線形歪み特性を、Simulink モデルに反映している。実験結果より得られた、アンプのパラメータは以下の表 5 のようになった。

また、今回はパワーアンプのみの評価であるが、送信機全体では図 10 のような回路構成になる。



図 9 実験風景

#### 4.2 Simulink モデル

送信機のパワーアンプに限定し、RF デバイスの非線形歪み

表 5 アンパパラメータ

P1dB(1dB 利得圧縮点)	30dBm(1W)
利得	20dB
中心周波数	2.4GHz

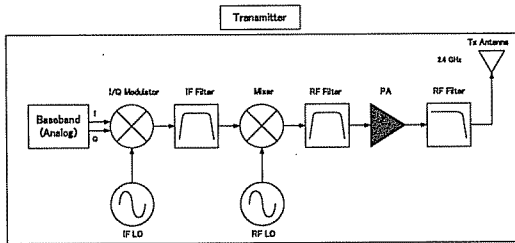


図 10 送信機回路図

を想定したシミュレーションを行うため、Matlab の Simulink を使用した。ベースバンド信号は、M-file で記述したブロックを製作している。図 11 に SISO モデルを、図 12 に MIMO モデルをそれぞれ示す。

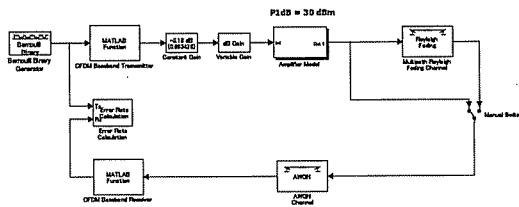


図 11 Simulink モデル SISO

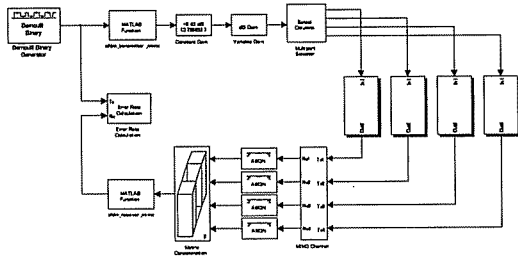


図 12 Simulink モデル 4x4 MIMO

### 4.3 計算機シミュレーション

これらの Simulink モデルを用いて、HU-VHT 規格におけるパワーアンプの非線形歪み評価を行った。初めに、各伝送モードがエラーフリーになる SNR を導き出し、この値から 2dB 増加させた SNR をシミュレーションの初期値とする。その後、パワーアンプの入力レベルを増加させ、パワーアンプの非線形領域での通話品質判定を行った。図 13 に HU-VHT 規格における SISO 非線形歪み特性を、図 14 に MIMO 非線形歪み特性をそれぞれ示す。

次に、PAPR が通話品質に与える影響を確認するため、3.2 章で説明した 2 種類のロングプリアンブルを用意し、HU-VHT 規格の SISO モデルにおいてその特性を比較した。

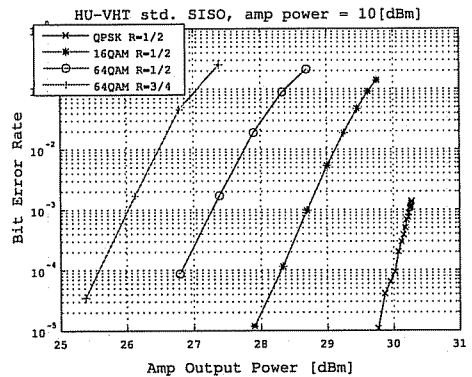


図 13 HU-VHT 規格 SISO 非線形歪み特性

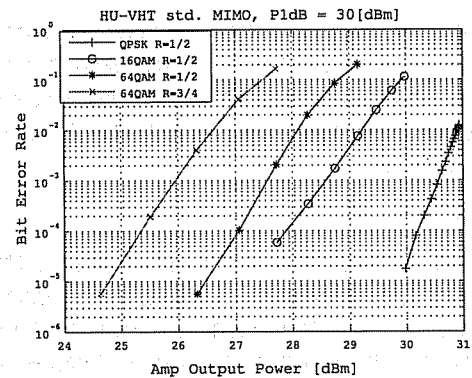


図 14 HU-VHT 規格 MIMO 非線形歪み特性

PAPR が 17.83dB の時のプリアンブルをプリアンブル A、5.26dB の時のプリアンブルをプリアンブル B とする。双方とも固定する SNR は、最大伝送レートの低い変調方式より順に、8dB、14dB、20dB、24dB としている。図 15 に変調方式 QPSK、16QAM の場合の比較結果を、図 16 に 64QAM の場合の結果をそれぞれ示す。

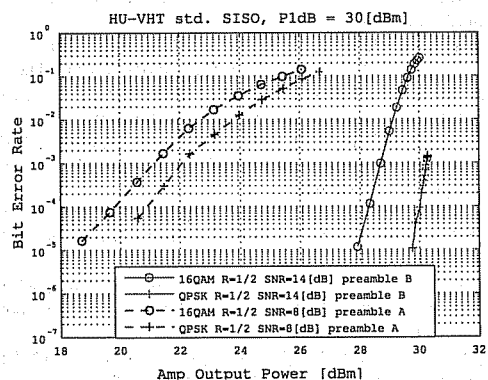


図 15 PAPR の非線形特性に対する影響 1

図 16 の結果から、通信品質が保たれるエラーレートを  $10^{-3}$  とした場合、変調方式が 16QAM、符号化率が 3/4 のモードで

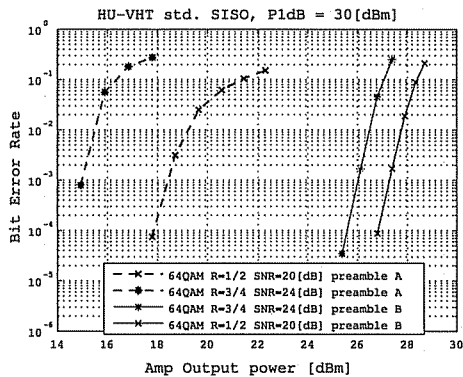


図 16 PAPR の非線形特性に対する影響 2

は、プリアンブルが異なるとパワーアンプの出力レベルで約 10dB 程度違いがでることがわかる。これは、改良したプリアンブルが、IEEE802.11a を拡張したプリアンブルに比べ、通信距離が約 3 倍となり、PAPR によって通信距離に大きく違いがでることがわかる。

## 5. まとめ

本稿では、広帯域化 OFDM 方式と従来方式間の線形領域における BER 特性の違いを確認し、広帯域化 OFDM 方式の非線形領域でのアンプ出力対 BER 特性、ならびに PAPR が通信品質に与える影響について報告した。80MHz 帯域を使った広帯域化 OFDM 方式の RF デバイスを通して行った研究事例は少なく、今回の評価は広帯域化 OFDM 方式の実現に寄与するものと考えられる。また、80MHz 帯域の広帯域化 OFDM 方式において PAPR が通話品質に与える影響も明らかにすることができたので、今後データ部の PAPR 低減についても検討していきたい。

## 文 献

- [1] IEEE P802.11n/D1.0, "Draft Amendment to Wireless LAN Media Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Enhancements for Higher Throughput," Mar.2006
- [2] [http://www.ieee802.org/11/Reports/vht\\_update.htm](http://www.ieee802.org/11/Reports/vht_update.htm)
- [3] 吉澤 真吾, 菅原 浩二, 宮永 喜一, 他, "80MHz 帯域 OFDM 方式無線システムの検討と OFDM 変復調回路の設計", 信学技報, SIS2005-6, Vol.105 .No.111, pp.31-36, Jun.2005.
- [4] 藤田 隆史, 鬼沢 武, 堀 哲, 阪田 徹, 守倉 正博, "広帯域無線 LAN システムの無線伝送方式に関する検討", 信学技報, RCS2002-161, pp.89-94, Aug.2002.
- [5] 藤田 隆史, 鬼沢 武, 堀 哲, 阪田 徹, 守倉 正博, 他, "CAMA/CA を用いた広帯域無線 LAN のスループットによるシステム評価", 信学技報, RSC2002-168, pp.13-18, Oct.2002.
- [6] 菅原 浩二, 宮永 喜一, "適応ピークレベル制御及び部分系列伝送を用いた OFDM 信号のピーク抑圧方式" 信学技報, SIS2005-76, pp.23-28, Mar.2006.
- [7] 坂口 祐介, 長尾 勇平, 黒崎 正行, 尾知 博, "GA を用いた次世代 MIMO 無線 LAN システムのプリアンブル生成法", 信学技報, SIS2006-19, pp.37-42, Jun.2006.