

論文 OFDM受信機におけるADCの非線形性の影響の 軽減手法に関する検討*

A Study on the Mitigation of the Influence of ADC Nonlinearity in an OFDM Receiver

澤田 学

Manabu SAWADA

岡田 啓

Hiraku OKADA

山里 敬也

Takaya YAMAZATO

片山 正昭

Masaaki KATAYAMA

An orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) scheme, with highly spectrum efficiency and robustness against frequency selective fading, is applied to IEEE802.11a/g for high-speed wireless local area network (LAN) systems and digital terrestrial television broadcasting (DTTB) systems. Since the OFDM signal has large fluctuation in its amplitude, large dynamic range and high linearity are required for its transmitter and receiver. In the receiver, the Bit Error Rate (BER) performance is degraded by analog-to-digital converter (ADC) nonlinearity.

We propose a new scheme to mitigate the influence of ADC nonlinearity in an OFDM receiver. In the proposed receiver, the weight for the soft Viterbi decoder is controlled based on the ADC output amplitude. We evaluate the BER performance for the proposed receiver when the control errors occur in the AGC amplifier. As a result, the effect of the proposed receiver on the BER performance is shown.

Key words : OFDM, ADC, nonlinearity, AGC

1. はじめに

直交周波数分割多重 (OFDM) 方式は、多数のサブキャリア周波数に情報を分割し、それらを多重化して伝送する方式である。このOFDM方式は、周波数利用効率が高く、マルチパスフェージング耐性に優れた方式の一つであり、高速無線LANシステムであるIEEE802.11a/gや地上波デジタル放送等で採用されている¹⁾³⁾

OFDM信号はサブキャリア毎の振幅や位相関係により、振幅変動が大きくピーク電力対平均電力比 (PAPR) の大きな信号となる。このようなピーク振幅が発生する信号を送信する場合、送信機の電力増幅器の非線形特性により、非線形歪みといった問題が発生し、帯域外輻射電力の増加や、受信品質劣化が発生する。

非線形歪みは送信増幅器だけでなく、受信機におけるADC (Analog-to-Digital Converter) においても発生する。一般にADCの入力範囲はハードウェアの制約により有限固定の値をもつため、受信機ではADCの前段にAGC (自動利得制御) アンプを搭載し、伝搬路において減衰した信号をADCの入力範囲内に納まるように、AGCアンプで受信信号を増幅した後にADCへ入力する構成が一般的である。このAGCの制御が適切に行われない場合、ADCの非線形性による二つの問題が発生する。これらは、ADCの量子化誤差の問題とADC入力でのクリッピングの問題である。⁴⁾⁵⁾ 前者

はAGCアンプの出力が小さすぎてADCで十分な分解能を確保できない場合に生じ、後者はAGCアンプの出力がADC入力フルスケールレンジよりも大きくなった場合に生じる。我々はこれまでに、これらの問題について検討し、ADCの入力振幅レベルには最適値が存在することを示してきた。⁶⁾⁸⁾

一般にAGCアンプは比較的長い時定数を持ち、信号の平均電力を所定の値とするように動作する。ところがOFDM信号の場合は、PAPRが大きいため、シングルキャリア信号の場合と比べ、適切なAGCの増幅率の決定は困難である。このため、OFDM受信機においてADCの入力振幅が適切に制御できない場合が、シングルキャリアのそれに比べて増加すると考えられる。

本論文では、OFDM受信機におけるADCの入力が最適に制御されなかった場合に生じる特性劣化を軽減する受信機を提案する。更に、AGCの制御ミスが原因でADCの入力が最適に制御されなかった場合のビット誤り率 (BER) 特性を評価し、提案受信機の有効性を明らかにする。

2. システムモデル

Fig. 1に、等価低域系におけるシステムモデルを示す。送信機において、送信バイナリビット列 $\{i_n\}$ は、符号化器で誤り訂正符号化される。符号化器の出力 $\{b_n\}$ は、インターリーブ処理された後に、 2^U QAMの

*SITA 2005「第28回情報理論とその応用シンポジウム」より、一部加筆修正して転載

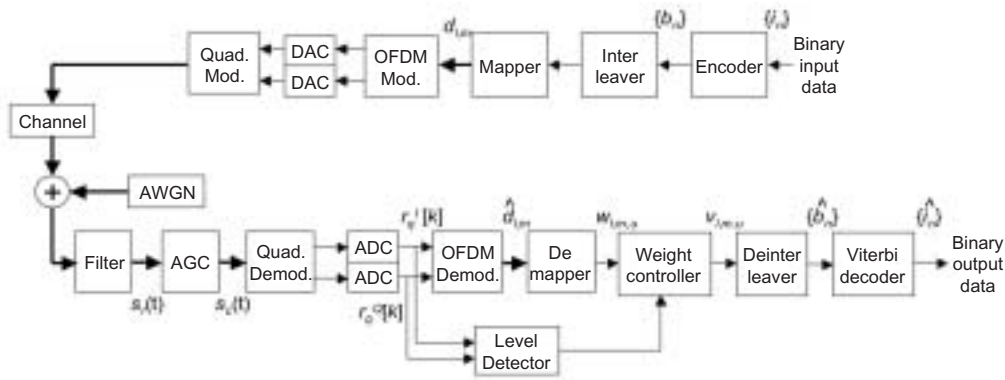


Fig. 1 System model

シンボル点にマッピングされる. なお本論文では, 誤り訂正符号として符号化率 $R = 1/2$, 拘束長 $K = 7$ の畳み込み符号を, サブキャリア変調として QPSK を用いることとし, インターリーブは L_i OFDM シンボルにまたがるビットインターリーブを採用する. 出力された 2^U QAM シンボルは, OFDM 変調器に入力された後に直交変調器に入力され, 出力として N 本のサブキャリアの OFDM 信号を得る.

送信信号は, インパルス応答が $h(\tau)$ である伝搬路を通過した後に, 両側スペクトル密度 N_0 の白色ガウス雑音が付加される. 受信機において, 受信信号はインパルス応答が $f(\tau)$ である理想矩形フィルタで帯域制限される. このフィルタ出力は

$$s_r(t) = f(t) * h(t) * \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} d_{l,m} \exp\{j2\pi \frac{m}{T}(t-lT)\} \cdot p(t-lT) + n(t) \quad (1)$$

で表される. ここで, $d_{l,m}$ は, l 番目の OFDM シンボルにおける m 番目のサブキャリアに対する 2^U QAM シンボルを示している. また T は OFDM シンボル時間を表しており, $*$ は畳み込み演算を示す. 更に, $p(t)$ は, 以下に示すパルス波形を示す.

$$p(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

また, $n(t)$ は AWGN 信号が受信フィルタにより帯域制限された信号となり, 平均 0, 分散 σ_n^2 をもつランダム変数として取り扱う.

受信フィルタ出力 $s_r(t)$ は, AGC において振幅制御される. このとき AGC 出力 $s_c(t)$ は,

$$s_c(t) = g(t) \cdot s_r(t) \quad (3)$$

で表される. ここで, $g(t)$ は AGC の振幅ゲインである.

AGC 出力は直交復調され, その出力はベースバンド Ich 及び Qch の ADC にてサンプリング及び量子化される. サンプリング間隔を T_s とした場合の k 番目のサンプルに対する ADC 出力サンプル $r_q^I[k]$ 及び $r_q^Q[k]$ は, それぞれ

$$r_q^I[k] = q(\Re[s_c(kT_s)]) \quad (4)$$

$$r_q^Q[k] = q(\Im[s_c(kT_s)]) \quad (5)$$

で表される. ここで $q(x)$ は, ADC の入出力を示す関数であり, 以下で表される.

$$q(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 1 \\ \lfloor \frac{x}{\Delta_q} \rfloor \Delta_q + \frac{\Delta_q}{2} & -1 \leq x < 1 \\ -1 & x < -1 \end{cases} \quad (6)$$

但し, $\lfloor x \rfloor$ は x を超えない最大の整数とし, Δ_q は量子化幅を示す. 式(6)では, ADC のフルスケールレンジ (FSR) は ± 1 であるので, Mbit ADC の量子化幅は

$$\Delta_q = \frac{2}{2^M - 1} \quad (7)$$

となる. Fig. 2 に $M=3$ の時の $q(x)$ の例を示す.

ADC 出力サンプル $r_q^I[k]$, $r_q^Q[k]$ は, OFDM 復調器に入力される. OFDM 復調器は, l 番目の OFDM シンボルにおける m 番目のサブキャリアに対して, 受信シンボル $\hat{d}_{l,m}$ を出力する. デマッパでは $\hat{d}_{l,m}$ をもとに, この l 番目の OFDM シンボルにおける m 番目のサブキャリアに含まれる u 番目のビットに対してソフトビタビ

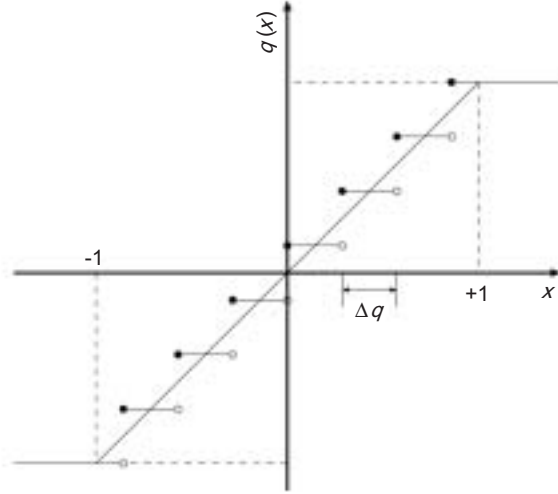


Fig. 2 $q(x)$ for $M=3$

復号器で用いるビットの軟判定値 $\{w_{l,m,u}\}$ ($m = -N/2, -N/2+1, \dots, N/2+1, u = 1, 2, \dots, U$) を算出する. 本論文ではサブキャリア変調としてQPSKを用いるため, この軟判定値を

$$w_{l,m,u} = \begin{cases} \Re[\hat{d}_{l,m}] & u = 1 \\ \Im[\hat{d}_{l,m}] & u = 2 \end{cases} \quad (8)$$

とする.

従来型受信機では, この軟判定値をデインターリーブした後に復号器に入力し, 出力として受信バイナリビット列 $\{\hat{b}_n\}$ を得る.

これに対し, 提案型受信機では, ADCの出力レベルを監視するためのレベル検出部と, 検出されたレベルに基づきソフトビタビ復号器の入力を制御する重み制御部が追加されている. 具体的には, まずレベル検出部は, l 番目のOFDMシンボルに対してADC出力サンプルを用いて以下の値を算出する.

$$C_c[l] = \sum_{k=0}^{k_s-1} e_c[k + lk_s] \quad (9)$$

$$C_s[l] = \sum_{k=0}^{k_s-1} e_s[k + lk_s] \quad (10)$$

ここで, k_s はOFDMシンボルに含まれるサンプル数である. また, $e_c[k]$ 及び $e_s[k]$ は,

$$e_c[k] = \begin{cases} 1 & |r_q^I[k]| = 1 \text{ or } |r_q^Q[k]| = 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

$$e_s[k] = \begin{cases} 1 & |r_q^I[k]| < a_s \text{ and } |r_q^Q[k]| < a_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

であり, a_s はあらかじめ設定したスレッショルド値を示す. すなわち, $C_c[l]$ は, l 番目のOFDMシンボルに対応する k_s 個の複素数サンプルのうち, Ich, Qch 各々のADCの少なくとも一方でクリッピングを起こした回数を示す. 一方, $C_s[l]$ は, 両方のADCの入力が a_s 以下となった回数である.

次に重み制御部は, これらの値をもとに, 入力された軟判定値 $\{w_{l,m,u}\}$ に対して重み制御を行う. 具体的には上述した l 番目のOFDM信号に含まれるすべての $\{w_{l,m,u}\}$ に対して以下の処理を行う.

$$v_{l,m,u} = \begin{cases} \gamma_c \cdot w_{l,m,u} & C_c[l] \geq th_c \\ \gamma_s \cdot w_{l,m,u} & C_s[l] \geq th_s \\ w_{l,m,u} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

ここで, $th_c, th_s, \gamma_c, \gamma_s$ はあらかじめ与えられた定数である. 重み制御された軟判定値 $\{v_{l,m,u}\}$ は, デインターリーブされた後に, 復号器に入力され, 出力として受信バイナリビット列 $\{\hat{b}_n\}$ が得られる.

式(13)は, OFDMシンボルに対応する複素数サンプルのうちで, クリッピングが生じたものが一定数 th_c 以上であるか, 逆に過小なものが一定数 th_s 以上であるときには, 復号器への入力にそれぞれ重み γ_c, γ_s を与えることを意味する. また, ここで $\gamma_c = \gamma_s = 1$ とすると, 提案受信機は従来型受信機と同じ動作をする.

3. 数値例

提案システムの有効性を評価するために, 受信ビット誤り率特性を計算機シミュレーションにより算出する. 検討諸元をTable 1に示す.

Table 1 Simulation parameters

Interleave size (L_i)	5
Subcarrier modulation	QPSK
Number of subcarriers (N)	64
IFFT/FFT Size	256
Number of oversamples	4
Number of samples for a symbol duration (k_s)	256
Channel	ideal
Synchronization	ideal
Number of quantization bits (M)	8

3.1 ADC入力に対するBER特性

AGCの制御ミス時の特性を評価するにあたり、まずはじめに、AGCを固定ゲインアンプとした場合($g(t) = \alpha$)のゲイン α に対するBER 特性をFig. 3に示す。図は、送信情報1ビットのエネルギーに対する雑音電力密度比である $E_b/N_0 = 6\text{dB}$ 、量子化ビット数 $M = 8$ に対する特性である。

結果から、先述したようにADCへの入力が過大となる α の値が大きな領域と、過小となる α の値が小さな領域において特性劣化が見られる。そして、これらの間に最適値が存在する。Fig. 3では、 α は0.1近傍を中心として10dB程度の最適範囲をもつことが分かる。

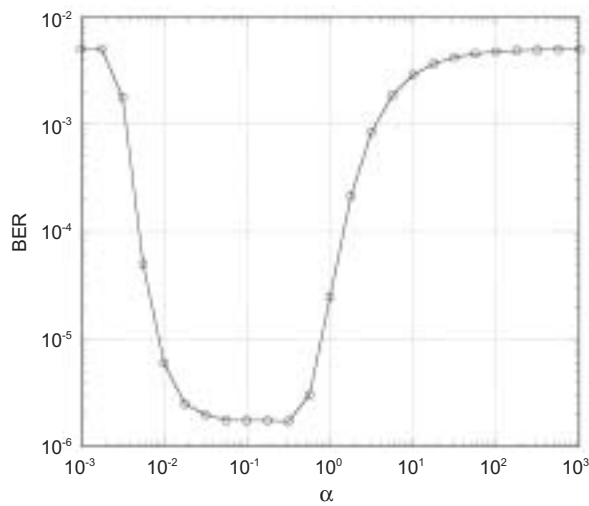


Fig. 3 BER performance of QPSK/OFDM signal ($E_b/N_0 = 6\text{dB}$, $M = 8$)

3.2 AGCの制御ミスモデル

AGCが振幅状態の検出をミスし、最適なゲインを選択できなかった場合、ADCへの入力が過小や過大となるケースが存在する。この場合、前節で示した、ADCへの入力振幅過小や過大時の特性劣化が発生する。

本論文では、この影響を見積もるために、Fig. 4に示すように、OFDMシンボル(T)単位でランダムにAGCのゲインが変動する場合について検討する。すなわち、AGCのゲインは確率 $1 - p_e$ で β 、確率 p_e で βR_p となる。

3.3 AGCの制御ミス発生時のBER 特性

Fig. 5からFig. 7にAGCにおいて振幅過大の制御ミスが発生した場合の特性を示す。図で、横軸には γ_c を、縦軸にはBERを示す。これらは、 $E_b/N_0 = 6\text{dB}$ 、

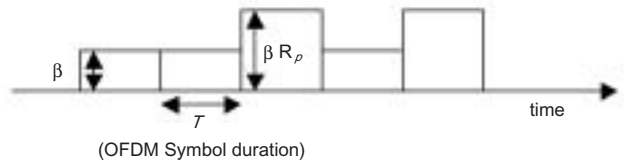


Fig. 4 Gain model of the AGC amplifier ($R_p > 1$)

$\beta = 0.1$, $M = 8$ に対する特性であり、クリップを許すサンプル数 th_c をパラメータに示している。それぞれ、Fig. 5は、 $R_p = 10$, $p_e = 0.5$ 、Fig. 6は $R_p = 10$, $p_e = 0.1$ 、Fig. 7は $R_p = 100$, $p_e = 0.1$ の場合を示している。なお先に述べたように、 $\gamma_c = 1$ の場合は、常に重み制御をかけないこととなり、従来型受信機の特性を示している。

すべての結果から、適切に th_c 及び γ_c を選択することにより従来型受信機に対する提案受信機の特性改善が見られることが分かる。Fig. 5からFig. 7において、 γ_c の最適値は、0.1近傍に存在する。

更に、Fig. 5及びFig. 6では、 th_c が192及び256の場合、特性改善が見られない。これは、 $\beta = 0.1$ かつ $R_p = 10$ の場合に、OFDMシンボルあたりのクリップ数が192を超える場合が存在しないためと考えられる。同様にFig. 7において、 th_c が256の場合に特性改善が見られない理由もこのためであると考えられる。 th_c としては、Fig. 5からFig. 7では64が最適値を示すことが分かる。またFig. 7で th_c が64から192で特性差がないことから、ある程度小さな th_c を設定することが有効であることも分かる。

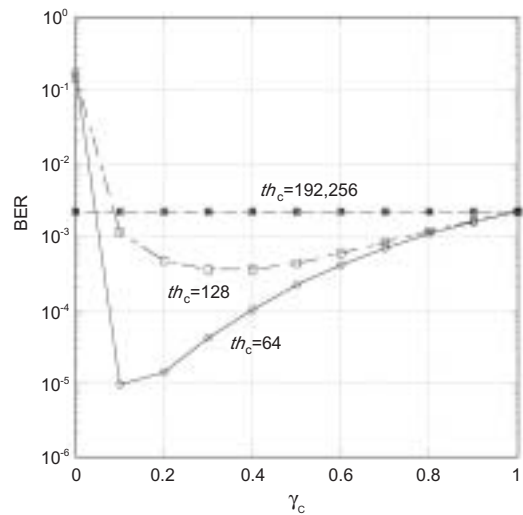


Fig. 5 BER performance ($\beta = 0.1$, $R_p = 10$, $p_e = 0.5$)

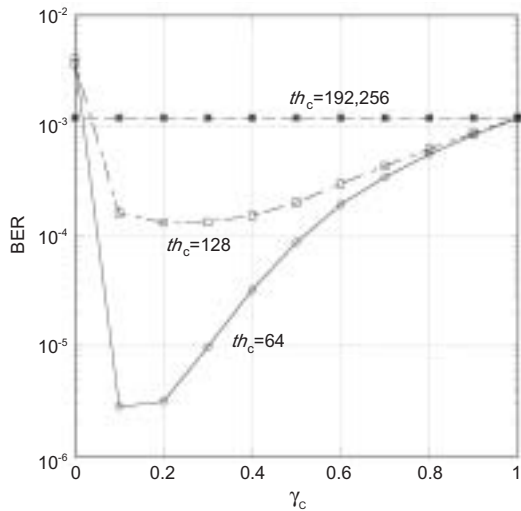


Fig. 6 BER performance ($\beta = 0.1, R_p = 10, p_e = 0.1$)

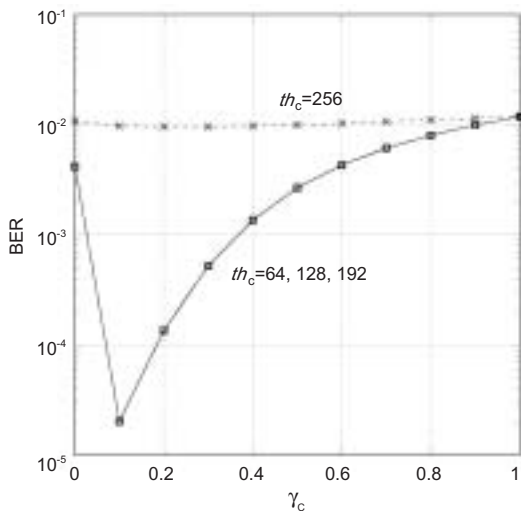


Fig. 7 BER performance ($\beta = 0.1, R_p = 100, p_e = 0.1$)

4. まとめ

本論文では、OFDM受信機におけるADCの入力が最適に制御されなかった場合に生じる特性劣化を軽減する受信機を提案した。提案受信機はADCの出力レベルを検出し、検出したレベルをもとに、ソフトビタビ復号器の入力となる軟判定値を制御することで、ADCにおいて誤ったサンプリングが生じた場合にも、ADC以降のデジタル信号処理で特性劣化を補償できることを特徴とする。

計算機シミュレーションによりAGCの制御ミスが原因でADCの入力が最適に制御されなかった場合のBER特性を評価した結果、適切にレベルの検出及び軟判定値の制御値を選択することにより、従来型受信機に比べてBERが2桁程度改善する可能性を示した。

今後は、チャンネルが時間的に変動するモデルに対してAGCを行った場合に、AGCが追従できない状況下における提案受信機による特性改善効果を確認する。

<参考文献>

- 1) IEEE801.11a: "High speed physical layer (PHY) in 5GHz band" (1999)
- 2) IEEE801.11g: "High speed physical layer (PHY) extension to IEEE 802.11b" (2003)
- 3) ARIB STD-B31: "Transmission system for digital terrestrial television broadcasting" (2001)
- 4) J. C. de M. Garcia and A. G. Armada: "Effects of Bandpass Sigma-Delta Modulation on OFDM signals," IEEE Trans. Consumer Electronics, Vol.45, No.2 (1999), pp.318-326.
- 5) A. Moschitta and D. Petri: "Wideband Communication System Sensitivity to Overloading Quantization Noise," IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, Vol.52, No.4 (2003), pp.1302-1307.
- 6) M. Sawada, H. Okada, T. Yamazato and M. Katayama: "Effect of ADC Input Amplitude on the Degradation of BER Performance in OFDM System," Proc. Commun. Conf. IEICE 2004, B-5-80.
- 7) M. Sawada, H. Okada, T. Yamazato and M. Katayama: "Influence of the Signal Level at ADC-input on the Performance of an OFDM Receiver," The 27th Symposium on Information Theory and Its Applications (2004), pp.403-406.
- 8) M. Sawada, H. Okada, T. Yamazato and M. Katayama: "Influence of the Nonlinearity of the ADC in an OFDM Receiver," The 10th International OFDM-Workshop (2005), pp.220-224.

<著者>



澤田 学
(さわだ まなぶ)
基礎研究所
無線通信システムの研究開発に
従事



岡田 啓
(おかだ ひらく)
名古屋大学大学院工学研究科
電子情報システム専攻 助手
工学博士
パケット無線通信, マルチメディア
アトラヒック, 符号分割多元接続
方式, マルチホップネットワーク
の教育・研究に従事



山里 敬也
(やまざと たかや)
名古屋大学
エコトピア科学研究所 助教授
工学博士
衛星通信, 移動体通信, スペクト
ル拡散変調方式及び符号化変調方
式の教育・研究に従事



片山 正昭
(かたやま まさあき)
名古屋大学
エコトピア科学研究所 教授
工学博士
ソフトウェア無線通信システム,
高信頼性無線通信システム, 電力
線通信システム, 移動体通信シス
テム及び衛星通信システムの教
育・研究に従事