

ベースバンドにおける非線形性制御による

送信機識別性能の向上

7312601 青木 慧

1. はじめに

昨今、スマートフォンやタブレットなどの無線通信端末の使用増大に伴い、無線通信におけるセキュリティ対策がより重要視されている。無線通信は電波を利用するために、盗聴やなりすましなどの不正な利用が有線通信よりも行いやすく、無線通信の大きなデメリットの一つとされている。例えば、無線 LAN にアクセスするユーザーを制限する方法として、主に MAC アドレスフィルタリングが簡易な方法として用いられている。しかし、MAC アドレスが盗聴可能であり、かつ暗号化されていないという理由から送信機識別に用いる信号として不十分であるといった問題がある [1]。そこで、代替方法の一つとして送信機で生じる特徴量を利用した送信機識別の研究が報告されている [2, 3, 4, 5]。

送信機識別の特徴量としては、送信機のアナログ回路で生じる非線形性が注目されている。しかし、この非線形性は送信機識別における特徴量としては小さく、実用的な雑音環境下では十分な識別精度が得られないという問題点がある。また、送受信機でアナログ信号を生成する際に発生する非線形歪みはアナログ回路を利用する限り完全に除去することが難しいのだが、プレディストーションなどの方法で非線形性の影響がより軽減できるようにする研究が行われている [6]。

そこで、本論文では、ベースバンド信号へ故意に非線形歪みを生じさせ、制御することにより、実用的な雑音環境下においても識別精度を向上させることをコンピュータシミュレーションで確認した。また、様々な歪みモデルを用いることで非線形歪みの推定方法への影響を評価し、歪ませた信号に対する補正方法についても提案する。

2. 非線形性による識別精度の評価方法

2.1. 非線形性による送信機識別の概要

非線形歪みを用いた送信機識別の概要を図 1 に示す。信号発生器により生成した入力信号 \tilde{d} へ故意に非線形歪みを生じ

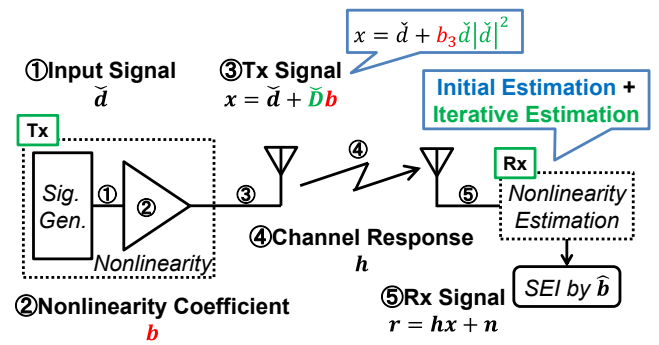


図1 送信機識別の流れ

させる。そして、アンテナから送信された送信信号 x は、遅延波や雑音などの影響を受けて受信信号 r として受信される。入力信号 \tilde{d} は送受信機で既知の信号であり、送信機で生じさせた非線形性 b を受信機で推定する際に利用される。非線形性 b は既知である入力信号 \tilde{d} と受信信号 r の関係から推定することができる。最後に、推定した非線形性 b を用いて送信機を識別する。 (\cdot) , $(\hat{\cdot})$, $(\cdot)^*$, $(\cdot)^T$, $(\cdot)^+$, $E[\cdot]$, $\|\cdot\|$ はそれぞれ既知, 推定, 共役, 転置, 疑似逆行列, 期待値, $2\cdot$ ノルム演算子を表している。

2.1.1. 非線形性モデル

送信機で生じさせる非線形歪みの影響をモデル化して(1)式に示す。非線形システムへの入力信号を \tilde{d} , 出力信号を x , 非線形歪みのパラメータである非線形係数を b とする。 \tilde{D} は \tilde{d} の要素により構成される行列である。 \tilde{d} が非線形歪みのある信号 x の線形部分を表し、 Db が多項式の非線形部分を表している。

$$x = \tilde{d} + \tilde{D}b. \quad (1)$$

(1)式を成分で表すと、(2)式で表される。 P は信号長(シンボル数), M は非線形係数の最大次数を表している。

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \check{d}_1 \\ \check{d}_2 \\ \vdots \\ \check{d}_P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \check{d}_1^2 \check{d}_1^* & \dots & \check{d}_1^{\frac{M+1}{2}} (\check{d}_1^*)^{\frac{M-1}{2}} \\ \check{d}_2^2 \check{d}_2^* & \dots & \check{d}_2^{\frac{M+1}{2}} (\check{d}_2^*)^{\frac{M-1}{2}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \check{d}_P^2 \check{d}_P^* & \dots & \check{d}_P^{\frac{M+1}{2}} (\check{d}_P^*)^{\frac{M-1}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_3 \\ b_5 \\ \vdots \\ b_M \end{bmatrix}. \quad (2)$$

非線形歪みの影響を示す値として、シンボルごとの出力信号 x_i と入力信号 d_i との比をとった値 α_i を用いる。

$$\alpha_i = x_i / \check{d}_i \quad (i = 1, 2, \dots, P). \quad (3)$$

シンボルごとの非線形性度合い α_i によって、信号点は非線形性の低い信号点と高い信号点に分割して考えることができる。非線形性の低い信号点と高い信号点に関する記号をそれぞれ $(\cdot)_L$, $(\cdot)_U$ と表すことにする。

2.1.2. チャネルモデル

通信路での影響は、 \mathbf{X} を先行波と遅延波からなる送信信号行列、 \mathbf{h} をチャネル応答ベクトル、 \mathbf{n} を雑音とすると次の(4)式で表すことができる。

$$\mathbf{r} = \mathbf{X}\mathbf{h} + \mathbf{n}. \quad (4)$$

(4)式は \mathbf{X} と \mathbf{h} を用いて受信信号 \mathbf{r} を表現しているが、次の(5)式のようにチャネル応答行列 \mathbf{H} と送信信号ベクトル \mathbf{x} でも表すこともできる。

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}. \quad (5)$$

2.1.3. 初期推定

送信機識別に用いる非線形係数を初期推定と反復推定の2段階で推定する。はじめに、初期推定では、受信信号 \mathbf{r} と送受信機間で既知である信号 $\check{\mathbf{d}}$ の関係を利用しておおまかに非線形係数 \mathbf{b} を推定する。図2に初期推定と反復推定のフローチャートを示す。初期推定の流れとしては、非線形性の影響の低い信号部分 $\check{\mathbf{d}}_L$ を利用してチャネル応答 \mathbf{h} を推定し、今度は非線形性の影響の高い送信信号部分 \mathbf{x}_U を推定する。そして、推定した非線形性の影響の高い送信信号部分 $\hat{\mathbf{x}}_U$ を用いて非線形係数 \mathbf{b} を推定する。なお、推定する際に雑音 \mathbf{n} による影響は無視する。

チャネル応答 \mathbf{h} を推定するために、まず非線形性度合い α によって高低2つに分割した拡張チャネル応答ベクトル \mathbf{h}_{LA} を考える。

$$\mathbf{h}_{LA} = [\alpha_L \mathbf{h}^T \quad \alpha_U \mathbf{h}^T]^T. \quad (6)$$

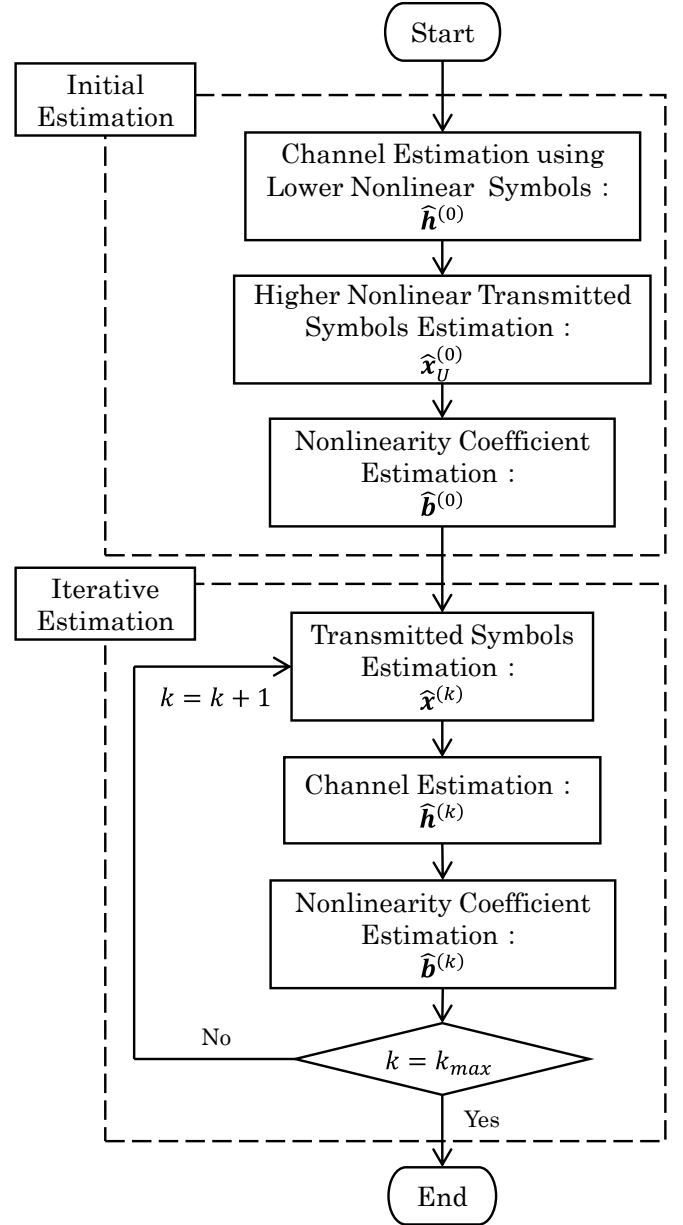


図2 初期推定と反復推定のフローチャート

そして、 $\mathbf{X}\mathbf{h} \cong \mathbf{D}_{LA}\mathbf{h}_{LA}$ を満たす拡張入力信号行列 \mathbf{D}_{LA} を考える。 \mathbf{D}_{LA} は $\check{\mathbf{d}}$ から構成される行列である [2]。雑音の影響が無視できるとき、次の(7)式が成り立つ。非線形性の低い信号部分の非線形性度合いを $\alpha_L \approx 1$ とすると、 $\hat{\mathbf{h}}_{LA}$ からチャネル応答の初期推定値 $\hat{\mathbf{h}}^{(0)}$ が求まる [2]。

$$\hat{\mathbf{h}}_{LA} = \mathbf{D}_{LA}^+ \mathbf{r}. \quad (7)$$

高非線形性送信信号 \mathbf{x}_U を推定するために、非線形性度合い α によって高低2つに分割したチャネル応答行列 $\mathbf{H} = [\mathbf{H}_L \quad \mathbf{H}_U]$ を考えると、(5)式は(8)式で表すことができる。 \mathbf{x}_L ,

\mathbf{x}_U は非線形性の低い信号部分と高い信号部分に対応する送信信号である。

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}_U \mathbf{x}_U + \mathbf{H}_L \mathbf{x}_L + \mathbf{n}. \quad (8)$$

$\alpha_L \approx \mathbf{1}$ より(3)式から $\mathbf{x}_L \approx \tilde{\mathbf{d}}_L$ と近似できるので、高非線形送信信号 \mathbf{x}_U は、受信信号 \mathbf{r} と推定チャネル応答行列 $\hat{\mathbf{H}}^{(0)} = [\hat{\mathbf{H}}_L^{(0)} \quad \hat{\mathbf{H}}_U^{(0)}]$, 送受信機で既知である非線形性の低い入力信号 $\tilde{\mathbf{d}}_L$ を用いて(8)式より(9)式で推定できる。

$$\hat{\mathbf{x}}_U^{(0)} = \hat{\mathbf{H}}_U^{(0)+} (\mathbf{r} - \hat{\mathbf{H}}_L^{(0)} \tilde{\mathbf{d}}_L). \quad (9)$$

非線形係数 \mathbf{b} は、(1)式に対して非線形性の高い部分のみを考えると(10)式から推定できる。

$$\hat{\mathbf{b}}^{(0)} = \check{\mathbf{D}}_U^+ (\hat{\mathbf{x}}_U - \tilde{\mathbf{d}}_U). \quad (10)$$

2.1.4. 反復推定

反復推定では、初期推定で求めた非線形係数 $\hat{\mathbf{b}}^{(0)}$ を用いて送信信号 $\hat{\mathbf{x}}$, チャネル応答 $\hat{\mathbf{h}}$, 非線形係数 $\hat{\mathbf{b}}$ を繰り返し推定することで推定誤差を小さくしていく。

まず、推定した非線形係数 $\hat{\mathbf{b}}^{(k-1)}$ を用いて既知信号 $\tilde{\mathbf{d}}$ から送信信号 $\hat{\mathbf{x}}^{(k)}$ を推定する。

$$\hat{\mathbf{x}}^{(k)} = \tilde{\mathbf{d}} + \check{\mathbf{D}} \hat{\mathbf{b}}^{(k-1)}. \quad (11)$$

推定した送信信号 $\hat{\mathbf{x}}^{(k)}$ と受信信号 \mathbf{r} から(4)式を用いてチャネル応答を推定する。

$$\hat{\mathbf{h}}^{(k)} = \mathbf{X}^{(k)+} \mathbf{r}. \quad (12)$$

推定したチャネル応答 $\hat{\mathbf{h}}^{(k)}$ を用いて非線形係数を推定する。

$$\hat{\mathbf{b}}^{(k)} = \check{\mathbf{D}}^+ (\hat{\mathbf{H}}^{(k)+} \mathbf{r} - \tilde{\mathbf{d}}). \quad (13)$$

2.1.5. 歪み補正

本研究では、推定にロングトレーニング信号を用いているので、送信機識別を行った後に影響を与えないために歪み補正をする必要がある。そこで、送信機で発生させた信号を受信機側で推定した非線形性を利用して元に戻す作業（歪み補正）を行う。歪み補正によって、非線形性制御を行った信号を後の処理で使用する際に影響を減らすことが可能となる。非線形歪みのある受信信号は(5)式から(1)式を用いて(14)式のように表すことができる。

$$\mathbf{r} = \mathbf{H} \tilde{\mathbf{d}} + \mathbf{H} \check{\mathbf{D}} \mathbf{b} + \mathbf{n}. \quad (14)$$

歪み補正の方法としては、次の(15)式で表される。

$$\mathbf{r} - \hat{\mathbf{H}}^{(k)} \check{\mathbf{D}} \hat{\mathbf{b}}^{(k)} = \mathbf{H} \tilde{\mathbf{d}} + \mathbf{n}. \quad (15)$$

2.2. 非線形性推定誤差の評価方法

異なる送信機に対する推定した非線形係数の識別能力を表す指標として、正規化平均二乗誤差(Normalized Mean Squared Error: NMSE)を用いる。NMSEの計算式を(16)式で示す。

$$NMSE \text{ of } \mathbf{b} \equiv 10 \log_{10} \left(E \left[\frac{\|\hat{\mathbf{b}}^{(k)} - \mathbf{b}\|^2}{\|\mathbf{b}\|^2} \right] \right) [dB]. \quad (16)$$

送信機側で故意に非線形性を生じさせることによる信号への影響を表す指標として、エラーベクトル振幅(Error Vector Magnitude: EVM)を用いる。この指標は、ロングトレーニング信号とチャネル応答について使用している。 \mathbf{S}_{meas} を推定した値、 \mathbf{S}_{ideal} を真値とするとEVMの計算式を(17)式で示すことができる。

$$EVM \equiv 10 \log_{10} \left(\frac{E[\|\mathbf{S}_{meas} - \mathbf{S}_{ideal}\|^2]}{E[\|\mathbf{S}_{ideal}\|^2]} \right) [dB]. \quad (17)$$

3. シミュレーション概要

本論文では、非線形係数やチャネル応答など表1、表2に示すパラメータを用いてシミュレーションを行う。非線形係数を推定する際に必要な既知信号としてIEEE802.11a/g [7]に準拠したロングトレーニング信号を用いる。送信機モデル1で用いた非線形係数は文献 [2]のCannモデルにより得られた非線形係数で、これはRFフロントエンド非線形性のようなアナログ回路で生じてしまう非線形歪みをパラメータ化した値である。送信機モデル2以降には、送信機モデル1の非線形係数を複素振幅は変化させず、位相を 45° ずつ変化させた値を用いている。また、非線形係数は b_3 , b_5 , b_7 と次元を増やすことでより現実的な非線形歪みを表すことができるが、本論文では b_3 のみを用いた。非線形性増倍率は非線形性制御により非線形歪みをどの程度大きくするかのパラメータであり、本論文では64倍まで設定している。試行回数は100回としてNMSEやEVMを求めている。通信路の影響は屋内チャネルモデルを想定し、遅延波数を1波とし時間的に変化しないものとする。非線形性により既知信号(ロングトレーニング信号)の64種の異なる信号点を、52点の非線形性の低い部分と12点の非線形性の高い部分に分割して考えた。非線形係数を推定する際の反復推定で推定を繰り返す回数は300回とした。

表1 シミュレーションパラメータ

The number of trials	100
Primary modulation	16QAM
Secondary modulation	OFDM
WLAN specification	802.11a/g
The number of subcarriers	52
Known signal	Long training sequence
The number of signal [symbols]	161
The number of headers [headers]	16
Symbol rate [M symbols/sec]	20.125
Output power [dBm]	25
The number of delay waves [waves]	1
Time between primary and secondary wave [symbols]	1
Channel response vector \mathbf{h}	$\begin{bmatrix} 0.9969 \\ 0.0628 \end{bmatrix}$
E_b/N_0 [dB]	-10, 0, 10, 20, 30
Multiplication factor of nonlinearity	1, 2, 4, 8, 16, 32, 64
The number of iterations k_{max}	300

表2 送信機モデルにおける非線形係数

Transmitter Model	Nonlinearity coefficient b_3
1	-0.0735-0.0114i
2	-0.0439-0.0600i
3	0.0114-0.0735i
4	0.0600-0.0439i
5	0.0735+0.0114i
6	0.0439+0.0600i
7	-0.0114+0.0735i
8	-0.0600+0.0439i

4. 結果

各送信機モデルにおける NMSE の反復回数依存性の結果から E_b/N_0 が 10 dB における送信機モデル 1 の結果を図 3 に、送信機モデル 2 の結果を図 4 に示す。他の送信機モデルにおいては送信機モデル 2 と同様の結果を得た。図 3、図 4 より、初期推定によって推定した非線形係数と真値との誤差は反復して推定を繰り返すことで収束していく。また、非線形性増倍率を高めることにより、基本的に NMSE は改善することが

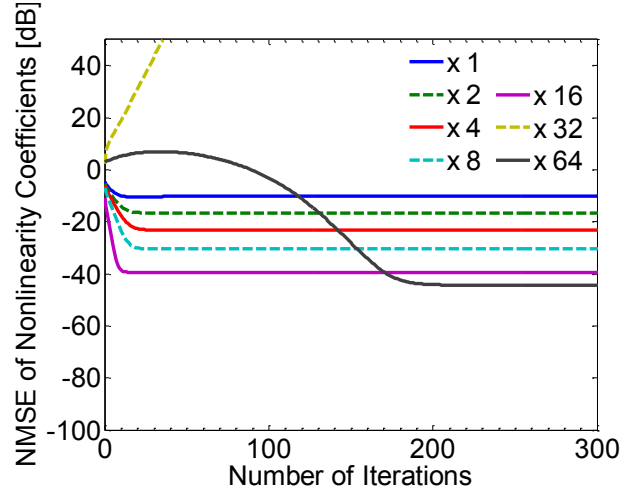


図3 E_b/N_0 が 10dB 時の異なる非線形性増倍率における非線形係数の NMSE (送信機モデル 1)

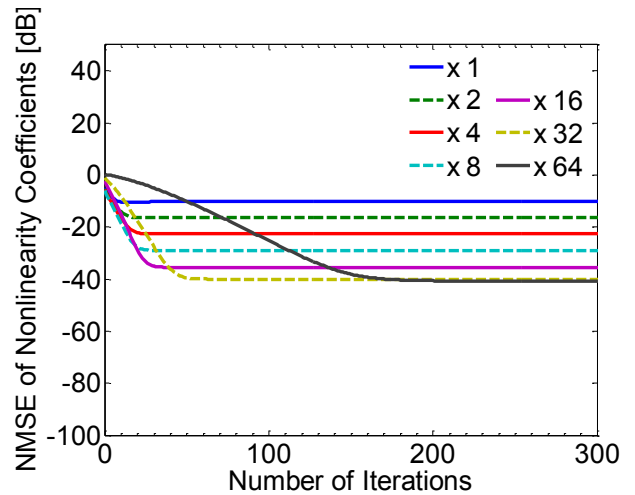
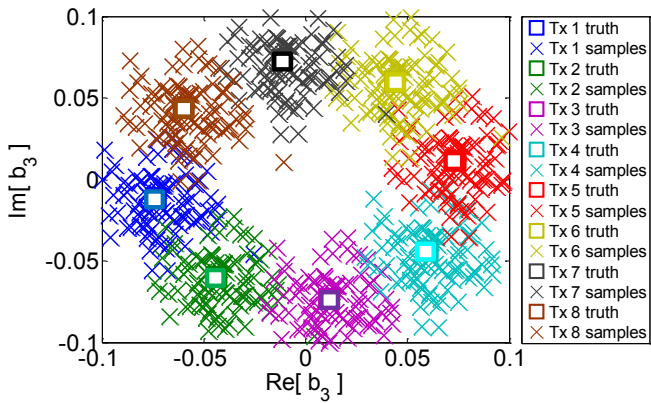


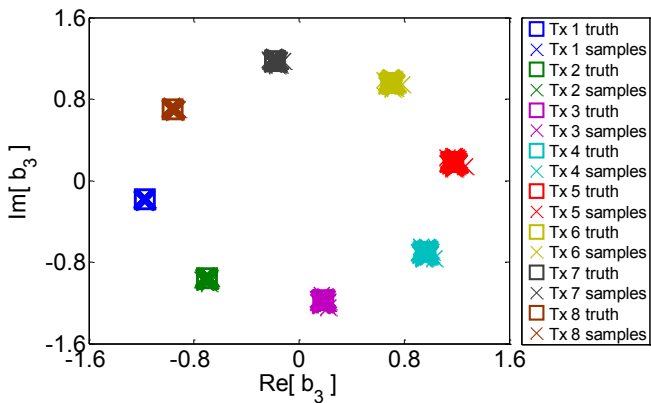
図4 E_b/N_0 が 10dB 時の異なる非線形性増倍率における非線形係数の NMSE (送信機モデル 2)

分かる。しかし、送信機モデル 1 の場合には、非線形性増倍率が 32 倍のときだけ NMSE が収束していない。これは、初期推定時における非線形係数の推定誤差が原因で反復推定時のチャネル応答が正しく推定できていないため、非線形係数の推定結果が正しく推定できていないことが考えられる。

E_b/N_0 が 10dB で非線形性増倍率が 1 倍時の非線形係数 \hat{b}_3 の推定結果を図 5(a) に、16 倍時の結果を図 5(b) に示す。非線形性増倍率 1 倍時の結果は、従来の方法である RF フロント非線形性と同等の非線形歪みを与えたときの結果を意味している。推定誤差に対して非線形係数の大きさが小さいた



(a)



(b)

図5 E_b/N_0 が 10dB 時の異なる送信機モデルにおける非線形係数 b_3 の推定結果 (a) 非線形性増倍率 1 倍時, (b) 16 倍時

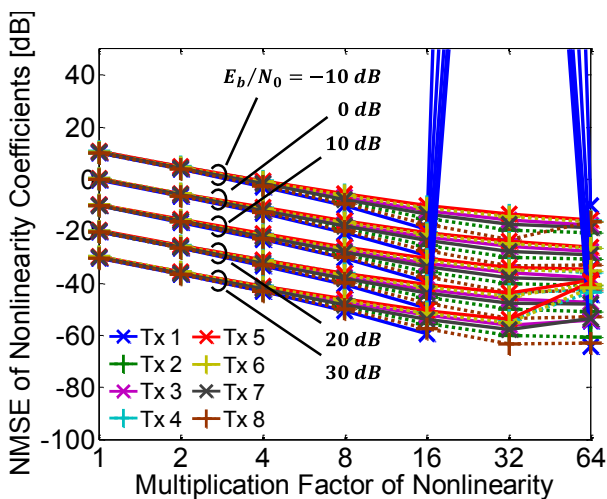
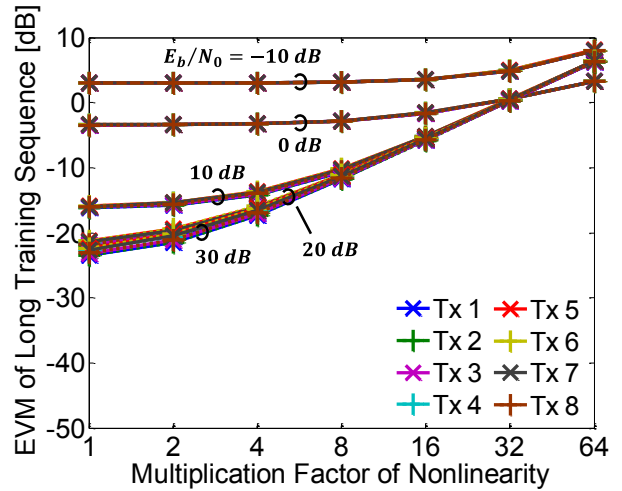
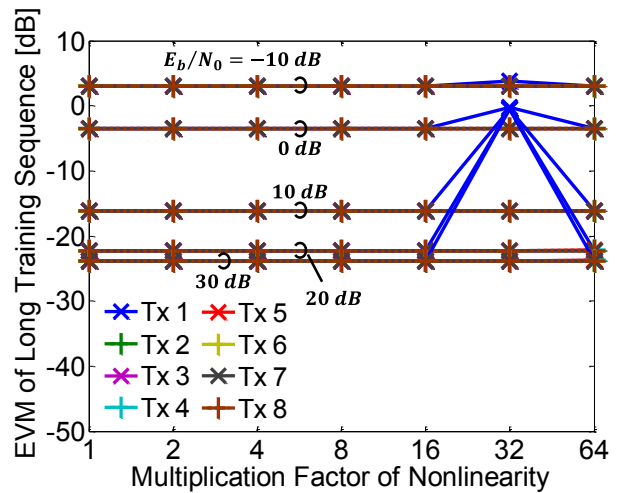


図6 異なる E_b/N_0 における非線形性増倍率と非線形係数の NMSE との関係



(a)



(b)

図7 異なる E_b/N_0 におけるロングトレーニング信号の EVM (a) 歪み補正なし, (b) 歪み補正あり

め、送信機を識別することが難しいことが分かる。提案方法である非線形性制御を行った非線形性増倍率 16 倍時の結果から、各送信機モデルにおける非線形係数の推定誤差が改善されて十分な識別精度が得られていることが分かる。ただ、非線形性を強めたことで各送信機モデルにおける推定した非線形係数のばらつきは異なっている。

図 6 には、異なる E_b/N_0 における非線形性増倍率と非線形係数の NMSE との関係を示す。非線形性増倍率を高くしていくと基本的に NMSE が改善されていることが分かる。また、実用的な雑音環境である E_b/N_0 が 0dB においても NMSE は 0dB を下回ることができ、非線形性制御によって十分な送信

機識別精度が得られたことが分かる。そして、各 E_b/N_0 において非線形性増倍率が32倍時の送信機モデル1の場合においてNMSEが急激に高くなっていることも見て取れる。この原因は図3の結果からも分かる通り反復推定によって推定結果が悪化していることである。ゆえに、送信機識別を行う際には、送信機モデルにおける非線形係数の設定に際しても十分に考慮を重ねる必要が生じることが分かった。

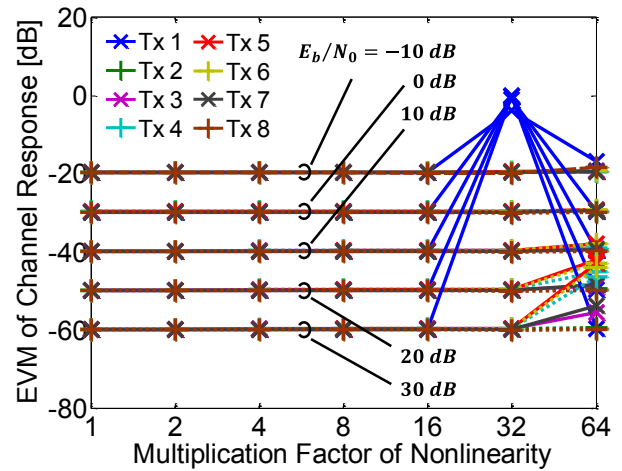
次に、非線形性増倍率と既知信号として用いたロングトレーニング信号のEVMの関係を歪み補正を行わなかった場合を図7(a)に、歪み補正を行った場合を図7(b)に示す。非線形性増倍率を高めていくと通常の場合には、EVMが増加してしまい、後の処理に影響を与えてしまう危険性がある。しかし、提案した歪み補正を行うことにより、非線形性増倍率を高めてもEVMは変化しないという結果を得ることができた。しかし、非線形性増倍率が32倍時の送信機モデル1の場合は例外である。

そして、非線形性増倍率とチャネル応答のEVMの関係を先行波部分に対応する結果を図8(a)に、遅延波部分に対応する結果を図8(b)に示す。非線形性増倍率を高めても全体的にEVMはあまり変化しないが、64倍まで高めると若干EVMが悪化するケースがある。しかし、非線形性制御によって非線形係数を用いたチャネル応答の推定に大きく影響は与えていないことが分かった。よって、ロングトレーニング信号の機能の一つであるチャネル応答の推定に関しては補完することができる。

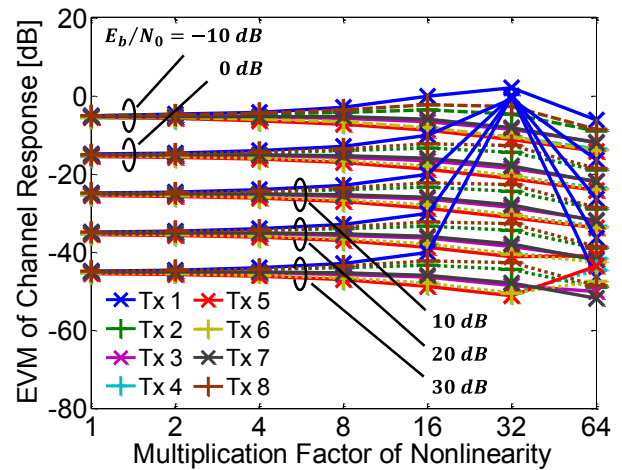
5. まとめ

本論文では、送信機側でベースバンド信号を故意に歪ませ、受信機側で歪ませた非線形性を推定することにより送信機識別精度を向上させる方法を提案した。従来の方法での識別精度は、実用的な雑音環境下において十分ではなかったが、本提案方法では、推定誤差に影響されない程度に各送信機の非線形係数間の距離を確保することで十分な識別精度を得た。

また、様々な歪みモデルを用いたことで、非線形性制御で扱う非線形係数を設定する自由度についても言及できた。しかし、特定の送信機モデルと非線形性増倍率においては結果が悪化してしまう結果も同時に分かった。



(a)



(b)

図8 異なる E_b/N_0 におけるチャネル応答のEVM (a) 先行波部分, (b) 遅延波部分

非線形性を故意に歪ませることによってロングトレーニング信号に与える影響についてもEVMを用いて評価した。歪み補正の処理を受信機側で行うことによって、非線形性制御による影響を小さくできることが示された。このことで、本論文ではプリアンプル部分にのみ非線形歪みをかけていたが、データ部分にも非線形歪みを与えることで物理的な秘話方式への応用が考えられるようになった。しかし、ロングトレーニング信号に必要なキャリア周波数オフセット検出能力への影響の評価や、送信機モデルにおける影響についての詳細な評価が今後の課題である。

文献

- [1] S. Puangprongpitag and A. Suwannasa, "A Design of Egress NAC using an Authentication Visa Checking mechanism to Protect against MAC Address Spoofing Attacks," Proc. 8th ECTI, Khon Kaen, Thailand, DOI: 10.1109/ECTICON.2011.5947832, pp. 300-303, May 2011.
- [2] M.-W. Liu and F. Doherty, "Nonlinearity Estimation for Specific Emitter Identification in Multipath Channels," *IEEE Trans. Inf. Forensics and Security*, vol. 6, no. 3, pp. 1076-1085, Sept. 2011.
- [3] K. A. Remley, C. A. Grosvenor, R. T. Johnk, D. R. Novotny, P. D. Hale, M. D. McKinley, A. Karygiannis, and E. Antonakakis, "Electromagnetic Signatures of WLAN Cards and Network Security," Proc. 5th Signal Processing and Information Technology, Athens, Greece, DOI: 10.1109/ISSPIT.2005.1577145, pp. 484-488, Dec. 2005.
- [4] K. Kim, C. M. Spooner, I. Akbar, and J. H. Reed, "Specific Emitter Identification for Cognitive Radio with Application to IEEE 802.11," Proc. GLOBECOM, New Orleans, USA, DOI: 10.1109/GLOCOM.2008.ECP.404, pp. 1-5, Nov. 2008.
- [5] C. Song, Y. Zhan, and L. Guo, "Specific Emitter Identification Based on Intrinsic Time-scale Decomposition," Proc. 6th WiCOM, Chengdu, China, DOI: 10.1109/WICOM.2010.5600772, pp. 1-4, Sept. 2010.
- [6] K. Wesolowski and J. Pchmara, "Efficient algorithm for adjustment of adaptive predistorter in OFDM transmitter," Proc. IEEE VTC 2000, pp. 2491-2496, Sept. 2000.
- [7] IEEE Std. 802.11-2012, *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, IEEE, New York, 2012.

本研究に対する学会発表など

- (A) 査読付き論文
なし
- (B) 査読付き小論文
Satoshi Aoki, ○Yohtaro Umeda, ○Yusuke Kozawa, and ○Osamu Takyu : 「Improvement in Specific Emitter Identification by Nonlinearity Control in Baseband」, Proceedings of the 10th IEEE Vehicular Technology Society Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS), pp. 31-35 (計 5 頁), 2013 年 8 月 22 日
- (C) 査読なし論文
青木慧, ○榎田洋太郎, ○小澤佑介, ○田久修 : 「ベースバンドにおける非線形性制御による送信機識別性能の向上」, 信学技報, vol. 112, no. 444, SR2012-90, pp. 39-44 (計 6 頁), 2013 年 2 月 27 日
- (D) 学会大会等の口頭発表・ポスター発表
青木慧, ○榎田洋太郎 : 「固定パターン信号に対する無線送信機識別のための非線形推定誤差の評価」, 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, B-17-191, 2012 年 3 月 3 日