

無線送信機識別のための非線形性初期推定誤差の評価

7308002

青木 慧

1. はじめに

無線通信環境には、盗聴や不正利用への対策などのセキュリティ面で課題解決が求められている。セキュリティ対策の1つとして無線送信機識別(Specific Emitter Identification: SEI)がある。SEIとは、無線送信機から送信された信号特性を測定することで、対象となる無線送信機を識別するという考えである。SEIの考えは、コグニティブ無線やネットワーク侵入者の発見などのコミュニケーション分野にも適用することができる。

SEIの中でも注目したのは、送信機のRFフロントエンド非線形性が、ハードウェアの形状や製造バラつきによって個体差が生じることを利用した無線送信機識別の研究である[1]。本稿では、[1]で用いられているRFフロントエンド非線形の非線形係数を推定するアルゴリズムでの初期推定精度を、シンボル数や E_b/N_0 を変化させ、数値解析を用いて評価する。

2. 解析手法

無線送信機識別の流れを次の図1に示す。16QAMで変調した固定パターン信号にRFフロントエンド非線形の影響を与え、受信した信号から非線形性を推定することで無線送信機の識別を行う。

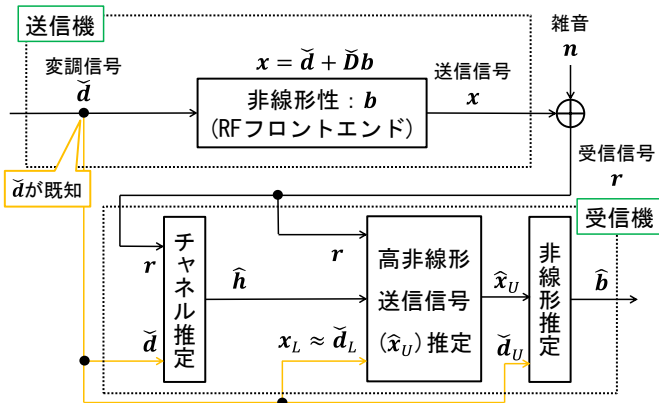


図1: 無線送信機識別の流れ

2.1. 非線形モデル 非線形システムへの入力信号を $\tilde{\mathbf{d}}$ 、出力信号を \mathbf{x} 、非線形係数を \mathbf{b} 、 $\tilde{\mathbf{D}}$ は $\tilde{\mathbf{d}}$ の要素により構成される行列とすると、次の(1)式が成り立つ。

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

非線形性を示す値が α で、シンボルごとの $\tilde{\mathbf{d}}_i$ 、 x_i に対して次の(2)式が成り立つ。

$$\alpha_i = |x_i/\tilde{d}_i| \quad (2)$$

この非線形性は振幅ごとに異なる。16QAM信号点の非線形性を示した次の図2のように、 α は3種類存在する。よって本稿では、内側の4つの信号点を \mathbf{d}_L 、 \mathbf{x}_L 、外側の12の信号点を \mathbf{d}_U 、 \mathbf{x}_U として非線形性を分割して考える。

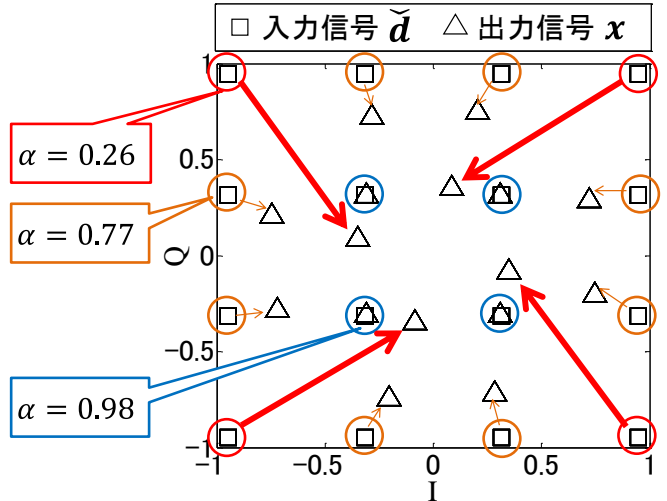


図2: 16QAM信号点の非線形性(送信機モデル1)

2.2. 通信路 屋内でのチャネルモデルを想定し、遅延波の影響はチャネル応答ベクトル \mathbf{h} で、雑音 \mathbf{n} の影響は E_b/N_0 に従い発生させ、 \mathbf{X} を先行波と1シンボル遅れた遅延波からなる送信信号行列とすると、通信路の影響は次の(3)式で表される。

$$\mathbf{r} = \mathbf{X}\mathbf{h} + \mathbf{n} \quad (3)$$

(3)式は \mathbf{X} と \mathbf{h} で表しているが、次の(4)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} で表すこともできる。

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (4)$$

2.3. チャネル推定 チャネル推定のために、拡張チャネル応答ベクトル $\mathbf{h}_{LA} = [\alpha_L \mathbf{h}^T \quad \alpha_U \mathbf{h}^T]^T$ 、 $\mathbf{X}\mathbf{h} = \mathbf{D}_{LA} \mathbf{h}_{LA}$ を満たす \mathbf{D}_{LA} を考える。 \mathbf{D}_{LA} は $\tilde{\mathbf{d}}$ から構成される行列である。雑音の影響が無視できる時、 $\hat{\mathbf{h}}_{LA} = \mathbf{D}_{LA}^+ \mathbf{r}$ 。低い非線形性を $\alpha_L \approx 1$ とした時、 $\hat{\mathbf{h}}$ が推定できる。

2.4. 非線形係数の推定 非線形性に対応した $\mathbf{H} = [\mathbf{H}_L \quad \mathbf{H}_U]$ を考えたと、(4)式は次の(5)式で表される。

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

$\alpha_L \approx 1$ より(2)式から $\mathbf{x}_L \approx \tilde{\mathbf{d}}_L$ と近似できるので、非線形性の高い送信信号 $\hat{\mathbf{x}}_U$ は、受信信号 \mathbf{r} と推定チャネル応答行列 $\hat{\mathbf{H}} = [\hat{\mathbf{H}}_L \ \hat{\mathbf{H}}_U]$ 、非線形性の低い変調信号 $\tilde{\mathbf{d}}_L$ を用いて、(5)式より次の(6)式で推定できる。

$$\hat{\mathbf{x}}_U = \hat{\mathbf{H}}_U(\mathbf{r} - \hat{\mathbf{H}}_L \tilde{\mathbf{d}}_L) \quad (6)$$

よって、非線形係数 $\hat{\mathbf{b}}$ が(7)式から推定できる。

$$\hat{\mathbf{b}} = \tilde{\mathbf{D}}_U^+(\hat{\mathbf{x}}_U - \tilde{\mathbf{d}}_U) \quad (7)$$

2.5. 評価方法 推定した非線形係数と真値との誤差の評価には正規化平均二乗誤差(Normalized Mean Squared Error: NMSE)を用いて評価し、無線送信機の識別は非線形係数 b_3 の実部と虚部を図示して行う。NMSEの計算式は次の(8)式で示す。

$$NMSE \text{ of } \mathbf{b} \equiv 10 \log_{10} \left(E \left[\frac{\|\hat{\mathbf{b}} - \mathbf{b}\|^2}{\|\mathbf{b}\|^2} \right] \right) [dB] \quad (8)$$

3. 解析結果

本稿では、表1に示す送信機モデルを用い、数値解析の諸元を表2に示す。

表1：使用した送信機モデル

非線形係数	送信機モデル1	送信機モデル2
b_3	-0.0735-0.0114i	-0.0910+0.1580i
b_5	-0.0986+0.0590i	0.2503+0.0286i
b_7	-0.0547-0.0055i	0.0155+0.0025i

表2：数値解析の諸元

試行回数	100[回]
変調方式	16QAM
固定パターン信号長	16×2^n [symbol]
遅延波数	1[波]
遅延波の遅延時間	1[symbol]
チャネル応答ベクトル \mathbf{h}	$\begin{bmatrix} 0.9969 \\ 0.0628 \end{bmatrix}$ (固定)
識別に利用した非線形係数	b_3

解析結果は送信機モデル1における非線形係数 b_3 のNMSEを図3、 E_b/N_0 が15[dB]、シンボル数が256[symbol]の非線形係数 b_3 を図4に示す。図3より、NMSEは E_b/N_0 、シンボル数により改善された。図4より、系統誤差は内側の信号点の非線形性を無視してチャネル応答ベクトルを推定したことが原因である。送信機モデル2の場合は非線形性が強いモデルなの

で、系統誤差が大きくなっている。しかし、系統誤差が生じて2つの非線形係数は識別が可能であることが分かる。

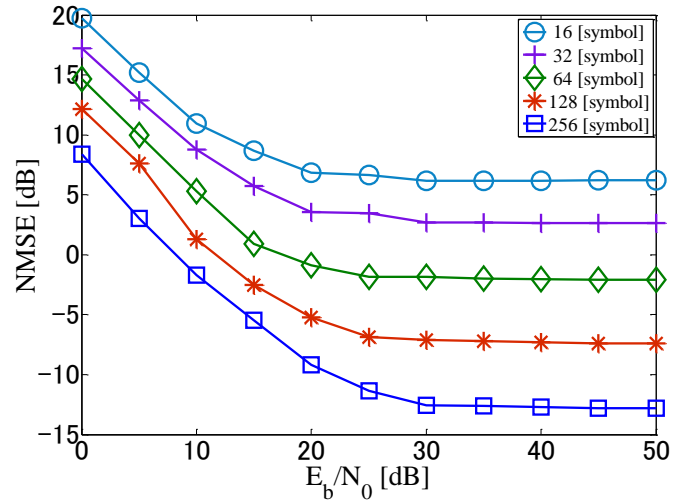


図3：非線形係数 b_3 のNMSE(送信機モデル1)

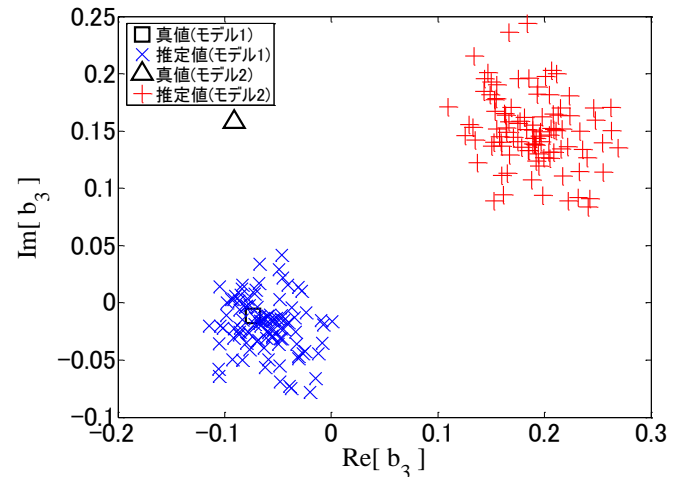


図4：非線形係数 b_3 ($E_b/N_0 = 15$ [dB], 256[symbol])

4. まとめ

RF フロントエンド非線形係数の初期推定精度のパラメータ依存性を数値解析により評価した。送信機モデルの非線形レベルが低いと、系統誤差が小さくなり、シンボル数と E_b/N_0 が高いほど識別しやすい。

参考文献

- [1] M.-W. Liu and J. F. Doherty, "Nonlinearity Estimation for Specific Emitter Identification in Multipath Channels", IEEE Trans. Inf. Forensics Security, vol. 6, no. 3, pp. 1076-1085, Sept. 2011.