

知的ソフトウェア無線のための周波数弁別器を用いた 変調方式自動識別法

非会員 森岡 和行^{*a)} 非会員 アサノ デービッド^{**}

An Automatic Modulation Classifier using a Frequency Discriminator for Intelligent Software Defined Radio

Kazuyuki Morioka^{*a)}, Non-member, David Asano^{**}, Non-member

(2012年8月15日受付, 2012年12月2日再受付)

In this paper, we proposed a simple frequency discriminator based method to automatically identify PSK and M-ary FSK modulation schemes. This method is simpler than other methods based on statistical moments, neural networks and wavelet transforms. Also, this method can demodulate M-ary FSK signals using the classifier's output, resulting in a simple receiver structure. Results from a digital implementation are presented to show the validity of the proposed method.

キーワード: 変調方式自動識別, 周波数弁別器, 知的ソフトウェア無線

Keywords: automatic modulation classification, frequency discriminator, intelligent software defined radio

1. はじめに

近年, 無線通信分野においても知的信号処理に関心が高まっている。背景には, デバイス技術, 信号処理技術の進展によって, これまでハードウェアによってアナログ処理されていた無線信号処理の多くを CPU や FPGA 等を用いてデジタル処理することが可能になったことがあげられる。特に, ソフトウェア無線 (SDR: Software Defined Radio) は, 民用, 軍用ともに新たな産業への応用が期待されている技術である。ソフトウェア無線では, 無線方式や通信プロトコルを状況に応じて動的に変更することができる。究極的には, 検出した信号のみから無線方式を判別し, 適切なパラメータを推定し, リアルタイムに動的にシステムを再構築し, 環境に適した無線方式を選択できることが望ましい。

a) Correspondence to: Kazuyuki Morioka. E-mail: Kazuyuki.Morioka@gmail.com

* 信州大学大学院総合工学系研究科
〒380-8553 長野市若里 4-17-1

Department of Mathematics and System Development, The Interdisciplinary Graduate School of Science and Technology, Shinshu University

4-17-1, Wakasato, Nagano 380-8553, Japan

** 信州大学工学部情報工学科

〒380-8553 長野市若里 4-17-1

Department of Computer Science & Engineering, Shinshu University

4-17-1, Wakasato, Nagano 380-8553, Japan

本論文では, このような知的ソフトウェア無線システムを構築するための要素技術に着目する。

知的ソフトウェア無線における受信器は3つの要素から構成される。すなわち, 「検出器」, 「識別器」, 「復調器」である⁽¹⁾。検出器では, 信号の検出とノイズの削減が行われた後, 搬送波周波数やタイミングオフセット, 周波数オフセット等の検出を行う。次に識別器では, 変調方式や復調に必要な各種パラメータの識別を行い, 後段の復調器へ信号を渡す。最後に, 復調器においてデータの復調を行う。本論文では, このうち変調方式の自動識別問題を取り扱う。

変調方式識別手法は, 主に, 最尤検定による識別方法とパターン認識による識別方法に分類することができる。最尤検定による識別手法では, 受信信号の尤度を計算し閾値と比較することで, 変調方式の識別を行う⁽²⁾⁽³⁾。この手法では, 最適解を得ることができるが計算負荷が高いというデメリットがある。一方, パターン認識に基づく手法では, 受信した信号から特徴を抽出し, それらを比較することで変調方式の識別を行う。特徴の抽出には, 統計的手法を用いたもの⁽⁴⁾, ニューラルネットワークを用いたもの⁽⁵⁾, ウェーブレット変換を用いたもの⁽⁶⁾⁽⁷⁾等が報告されている。これらの手法は通常, 識別前にトレーニング期間が必要である。また, よりよい性能を得るためには, より多くの計算量を必要とする。変調方式識別手法に関する詳細なサーベイが Dobre ら⁽¹⁾によって行われている。

本論文では, 多値 FSK 信号を含めた自動識別手法を提案

する。Beidas ら⁽⁸⁾は、最尤推定に基づく FSK 信号の識別手法を提案した。また、パターン認識による FSK 信号の識別手法も提案されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。しかし、これらの手法は先に述べたように計算負荷が高いという欠点がある。アサノら⁽¹¹⁾は、周波数弁別器を用いたシンプルな 2 値の変調方式識別手法を提案した。本論文の目的は、周波数弁別器を用いた識別手法を多値 FSK 変調を含めた手法へと拡張し、その有効性を確かめることである。また、アサノらの手法を単純に拡張するのではなく、より識別精度が向上するよう工夫を行った。

本論文の構成は次のようになっている。まず第 2 章において、システムモデルを示す。次に、第 3 章において、本論文で提案する周波数弁別器を用いた変調方式識別法を示す。第 4 章において、シミュレーション結果を示し、本手法の有効性を示す。最後に、第 5 章において結論を述べる。

2. システムモデル

本論文で扱う変調方式自動識別のブロックダイアグラムを Fig. 1 に示す。送信データは PSK または FSK で変調され、AWGN チャネルを通して受信器で受信される。受信器では、変調方式が自動的に識別され、適切な復調器で復調が行われる。識別を行うための受信信号観測区間を T_{idt} とする。 T_{idt} 区間には、 N_{idt} シンボルが含まれる。すなわち、 $T_{idt} = N_{idt} \times T_{sym}$ が成り立つ。ここで、 T_{sym} は 1 シンボルの継続時間である。識別器では、与えられた変調方式(本論文では、PSK と M 値 FSK とする)から、どの変調方式が使われているのかを特定する。

受信信号 $r(t)$, $0 \leq t \leq T_{idt}$ は以下のように表すことができる。

$$r(t) = s(t) + n(t), \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $n(t)$ は加法的白色ガウス雑音である。また、送信信号 $s(t)$ は次のように表すことができる。

$$s(t) = A \cos[2\pi f_c t + \phi(t)], \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 A , f_c , $\phi(t)$ はそれぞれ信号の振幅、搬送波周波数、位相を表している。

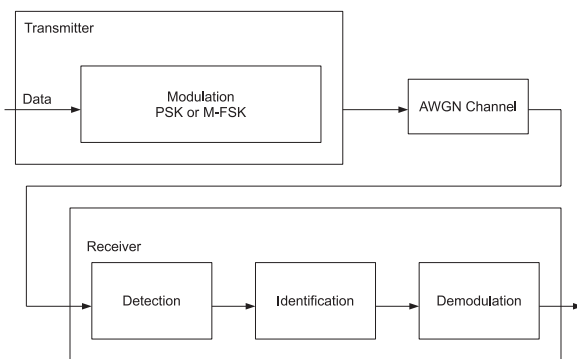


Fig. 1. Intelligent Software Defined Radio

M 値 PSK 信号の場合、 $\phi(t)$ は、

$$\phi(t) = \sum_k a_k u(t - kT_{sym})\pi, \dots \dots \dots (3)$$

$$a_k \in \left\{ \frac{2}{M}(m-1), m = 1, 2, \dots, M \right\},$$

となる。ここで、 a_k は k 番目のデータシンボル、 $u(t)$ はパルス波形であり、以下のように表すことができる。

$$u(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq T_{sym} \\ 0 & t < 0, t > T_{sym}. \end{cases} \dots \dots \dots (4)$$

M 値 FSK 信号の場合、 $\phi(t)$ は、

$$\phi(t) = \sum_k b_k g(t - kT_{sym})\Delta f, \dots \dots \dots (5)$$

$$b_k \in \left\{ \pm m, m = 1, 2, \dots, \frac{M}{2} \right\},$$

となる。ここで、 Δf は周波数偏差、 b_k は k 番目のデータシンボル、 $g(t)$ はパルス波形であり、以下のように表すことができる。

$$g(t) = \begin{cases} t/T_{sym} & 0 \leq t \leq T_{sym} \\ 0 & t < 0, t > T_{sym} \end{cases} \dots \dots \dots (6)$$

また、識別器の性能を評価するために、以下で定義される平均識別率を用いる。

$$P_c = \frac{1}{N_{mod}} \sum_{m=1}^{N_{mod}} P_c(m). \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 $P_c(m)$ は、 m 番目の変調方式の識別率であり、 N_{mod} は、識別を行う変調方式の数を表している。さらに、平均識別誤り率は、 P_e を用いて以下のように表すことができる。

$$P_e = 1 - P_c. \dots \dots \dots (8)$$

3. 周波数弁別器を用いた識別手法

〈3・1〉 多値変調への拡張 アサノらは、周波数弁別器を用いたシンプルな識別器を提案した⁽¹¹⁾。周波数弁別器を用いた識別手法は、他の手法に比べて計算量と実装の容易さの点で優れている。本節では、周波数弁別器を用いた識別手法の説明を行うとともに、多値 FSK 信号を含めた場合に拡張する。

Fig. 2 に周波数弁別器を用いた識別器を示す。入力信号が定包絡線変調された信号の場合、弁別器の出力は $\phi(t)$ となることが知られている。そこで、より識別精度を高めるために、まず弁別器への入力の前には、リミッタによってノイズによる包絡線のゆがみを取り除いている。

式 (3), (5) に表されるように、 $\phi(t)$ は各々の変調方式に固有のものであるため、弁別器の出力を観察することで変調方式を識別することができる。位相変調の場合、 $\phi(t)$ は中心周波数においてほぼ一定である。そのため、弁別器の出力は、通常はゼロであり、シンボル境界において、位相が変化する場合にパルスを生じる。PSK の場合の弁別器の出

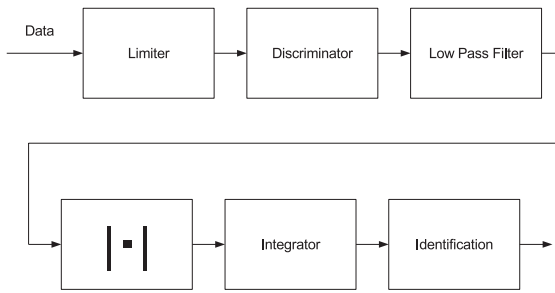


Fig. 2. An Automatic Modulation Classifier using a Frequency Discriminator

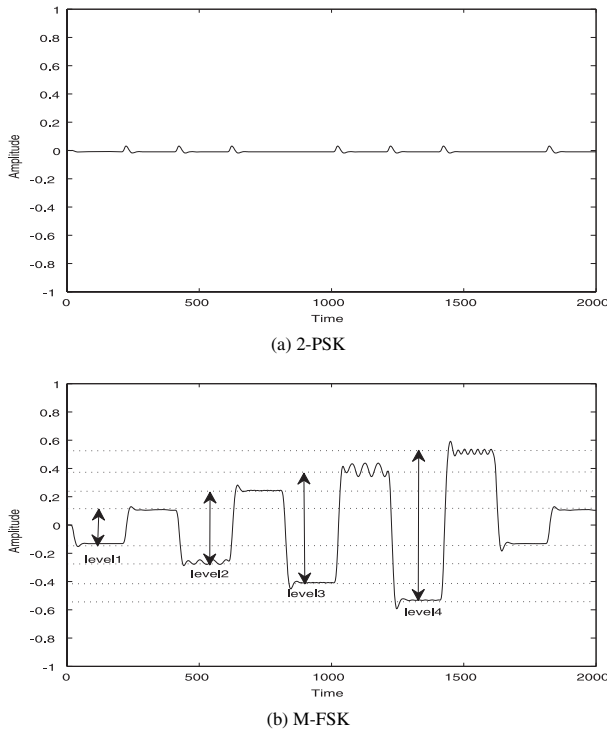


Fig. 3. Output of Frequency Discriminator

力を Fig. 3(a) に示す。

一方、周波数変調の場合、 $\phi(t)$ はシンボルに応じて定期的に変化している。そのため、弁別器の出力はゼロでない値をとり、PSK の場合と容易に識別が可能である。多値 FSK 信号の場合の弁別器の出力を Fig. 3(b) に示す。Fig. 3(b) から分かるように、多値 FSK 信号の場合の弁別器の出力レベルは、送信シンボルによって異なるため、それを利用して多値 FSK 変調方式を識別することができる。

次に、変調方式を識別するために、弁別器の出力を観測区間 T_{idt} にわたって積分し、その結果を閾値と比較する。ここで、弁別器の出力値は正負両方の値を取るため、弁別器の出力の絶対値の積分を行う。よって、積分器の出力は以下のように表すことができる。

$$V_{idt} = \int_0^{T_{idt}} |V_{dis}(t)| dt \dots \dots \dots (9)$$

ここで、 $V_{dis}(t)$ は、弁別器の出力をローパスフィルタに通したものである。この値は PSK の場合よりも FSK の場合

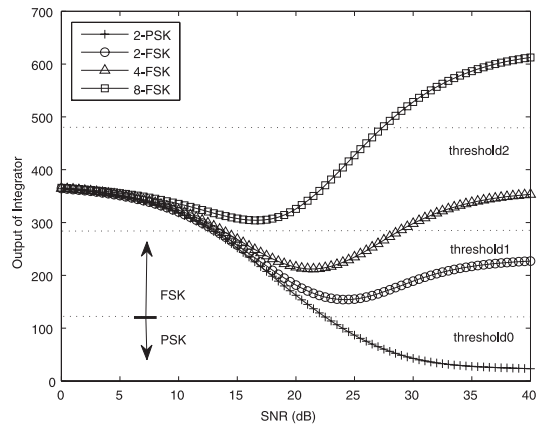


Fig. 4. Average value of integrator output, V_{idt}

の方が大きくなる。そのため、積分器の出力 V_{idt} が閾値よりも大きい場合、FSK 信号を受信したと判断し、 V_{idt} が閾値よりも小さい場合、PSK 信号を受信したと判断する。

閾値を決定するために、 V_{idt} の平均値を評価する。Fig. 4 に、 N_{idt} が 10 シンボルの場合の識別区間 T_{idt} における積分器出力の平均値 (1,000,000 回分) を示す。図より、PSK と FSK を識別するためには、閾値を「threshold0」に設定すればよいことが分かる。

同様に、多値 FSK 信号の変調レベルを識別するためには、Fig. 4 より、「threshold1」と「threshold2」に閾値を設定すればよいことが分かる。ここで、本論文では、閾値を 40 dB における N_{idt} の平均値を用いて、各変調方式における中間の値となるように設定した (Fig. 4)。この手法ではさらなる最適化が可能である。例えば、受信 SNR を観測し、SNR ごとに閾値を変化させる手法が考えられる。この場合、受信器はより複雑な構成となるため、今回は最も単純な手法で閾値を評価した。閾値の最適化に関しては今後の課題とする。

拡張されたアルゴリズムは次のようになる。まず、積分器の出力 V_{idt} が「threshold0」以下であれば 2-PSK と判断する。次に、 V_{idt} が「threshold0」よりも大きく、「threshold1」以下であれば 2-FSK と判断する。そして、 V_{idt} が「threshold1」よりも大きく、「threshold2」以下であれば 4-FSK と判断する。最後に、 V_{idt} が「threshold2」よりも大きければ 8-FSK と判断する。Fig. 5 に 2-PSK, 2-FSK, 4-FSK, 8-FSK を識別するためのアルゴリズムを示す。

(3-2) 提案アルゴリズム 前節では、文献⁽⁴⁾の手法を単純な方法で多値 FSK を含む場合へと拡張した。しかし、Fig. 4 は T_{idt} 区間における積分器の出力の「平均値」を表している。つまり、平均値を閾値として用いているため、その区間内に含まれるシンボルによっては積分器出力の実現値が閾値を下回ってしまい、正確に識別できない場合もあり得る。例えば、8-FSK の変調方式が用いられた場合、識別区間内に 8-FSK に特徴的なシンボルが含まれていなければ、識別器において 8-FSK とは判断されない。

そこで性能を改善するために、本論文では 2 段階の識別

アルゴリズムを提案する。まずはじめに、既存手法と同様に「threshold0」を用いて、PSK系かFSK系かを判別する。次に、FSK系だった場合には各々のシンボル区間 T_{sym} における積分器の出力を利用して、その多値数を識別する。シンボル区間 T_{sym} における積分器の出力は以下のように表すことができる。

$$V_{sym}(i) = \int_{iT_{sym}}^{(i+1)T_{sym}} |V_{dis}(t)| dt, \dots \dots \dots (10)$$

$$i = 0, 1, \dots, N_{idt} - 1.$$

この値を用いて、Fig.3に示したようなシンボルレベルを推定することができる。もし、8-FSKに特徴的なレベルである「level3」もしくは、「level4」のシンボルが観測区間に1つでも存在すれば8-FSKと判断する。「level3」、「level4」が1つも存在せず、「level2」が少なくとも1つ存在すれば、4-FSKと判断する。最後に、観測区間内のすべてのシンボルが「level1」の場合には2-FSKと判断する。ここでも、従来手法と同様に、閾値は、40dBにおける、 V_{sym} の平均値を用いて、各レベルの間中となるように設定した。

Fig.6に2-PSK, 2-FSK, 4-FSK, 8-FSKを識別するためのアルゴリズムを示す。

〈3・3〉 識別率の限界 本節では、ノイズがない場合を仮定して、多値FSKにおける識別誤り率の限界値についての考察を行う。Fig.6のアルゴリズムに基づいて識別を行う場合、もし、識別区間の間に、8-FSKに特徴的なシンボル、すなわちFig.3における「level3」、「level4」の信号

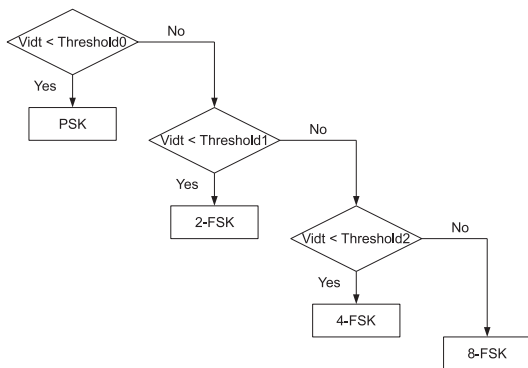


Fig.5. Identification algorithm (extension of Asano⁽¹¹⁾)

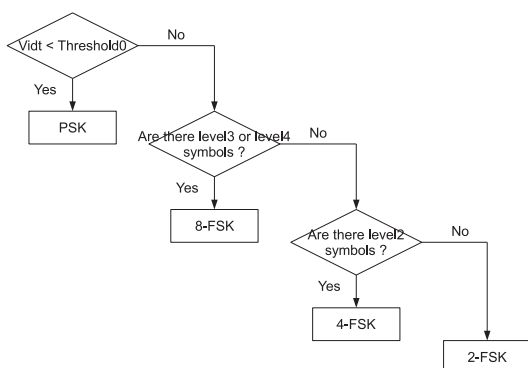


Fig.6. Proposed identification algorithm

が1つもなければ、8-FSKの信号を2-FSK, または4-FSKと誤判定してしまう。これは、避けられない誤りであるが、判定に用いるシンボル数 N_{idt} の値を適切に設定することで、識別誤り率を十分に小さくすることが可能である。

例えば、判定シンボル数が10シンボルの場合、「level3」、「level4」の信号を含まないシンボルの組み合わせは、 8^{10} パターン中、 4^{10} パターンである。したがって、8-FSK信号を2-FSK, または4-FSKと誤判定する確率は、 $\frac{4^{10}}{8^{10}} \approx 10^{-3}$ である。これは、 $N_{idt} = 10$ の場合における、8-FSKの識別誤り率の限界値である。同様に、 $N_{idt} = 10$ の場合の4-FSKの識別誤り率の限界値は $\frac{2^{10}}{4^{10}} \approx 10^{-3}$ となる。

また、 $N_{idt} = 20$ の場合、8-FSKに対する識別誤り率の限界値は、 $\frac{4^{20}}{8^{20}} \approx 10^{-6}$ となり、4-FSKに対する識別誤り率の限界値は、 $\frac{2^{20}}{4^{20}} \approx 10^{-6}$ となる。

一般的に、8-FSKに対する識別誤り率の限界値は $\frac{4^{N_{idt}}}{8^{N_{idt}}}$ となり、4-FSKに対する識別誤り率の限界値は $\frac{2^{N_{idt}}}{4^{N_{idt}}}$ となる。約分を行うと、8-FSK, 4-FSK 両方とも限界値は、 $\frac{1}{2^{N_{idt}}}$ となる。

以上のように、 N_{idt} を20にとれば、判定誤りを 10^{-6} に抑えることができ、実用的にも十分と考えられる。次節において、コンピュータシミュレーションにより、ノイズの存在下においても本アルゴリズムが有効に機能することを確認する。

4. シミュレーション結果

性能評価を行うために、提案システムをコンピュータ上に実装し、誤り率の逆数×100回以上の試行回数でのモンテカルロシミュレーションで評価を行った。本論文では、2-PSK, 2-FSK, 4-FSK, および8-FSKの識別を行った。識別に用いたシンボル数 N_{idt} は、10シンボル、15シンボル、および20シンボルである。Fig.7に $N_{idt} = 10$ の場合の識別誤り率を、またFig.8に $N_{idt} = 10$ の場合のシンボル誤り率を示した。参考のためにグラフ中には、〈3・3〉節で考察した識別誤り率の限界値 $\frac{1}{2^{N_{idt}}}$ の値も示した。

Fig.7より、2-PSKと2-FSKの識別誤り率は25dB付近で急激に小さくなっていることが分かる。これは、識別ア

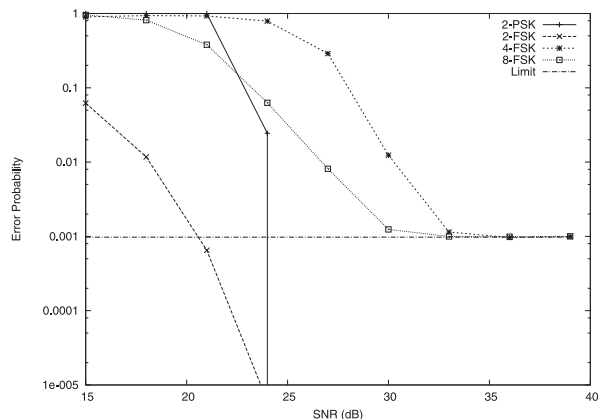


Fig.7. Probability of Decision Error ($N_{idt} = 10$)

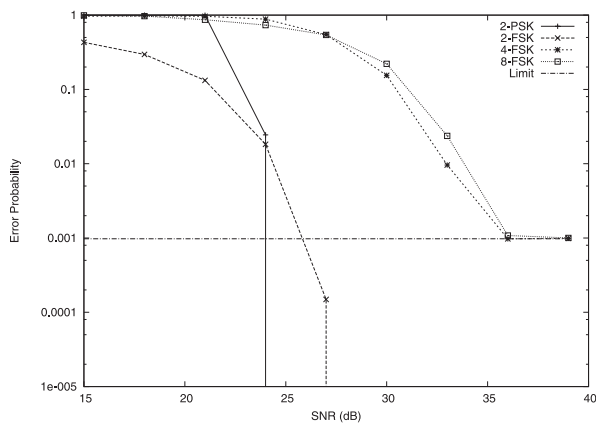


Fig. 8. Probability of Symbol Error ($N_{idt} = 10$)

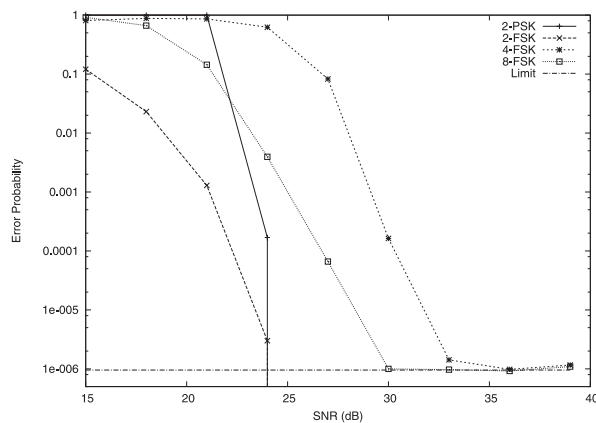


Fig. 11. Probability of Decision Error ($N_{idt} = 20$)

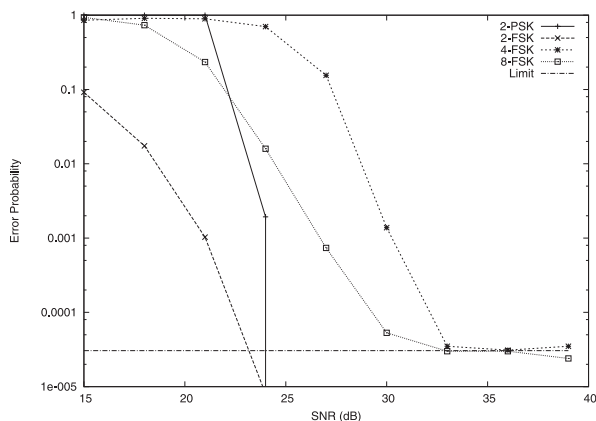


Fig. 9. Probability of Decision Error ($N_{idt} = 15$)

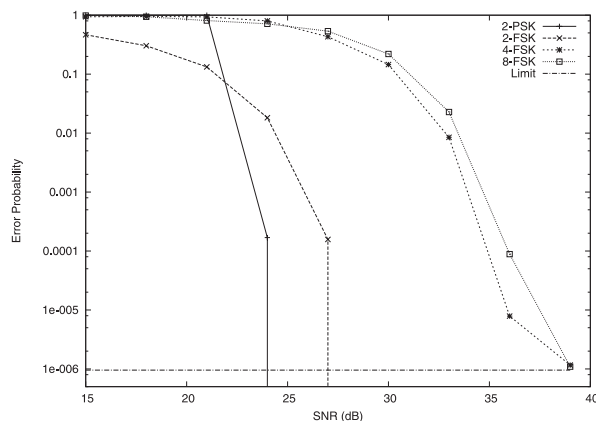


Fig. 12. Probability of Symbol Error ($N_{idt} = 20$)

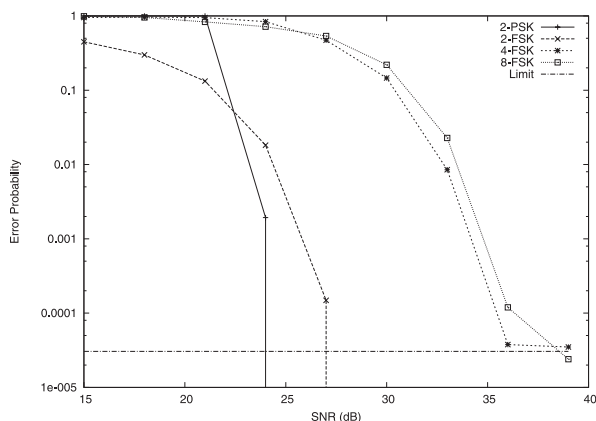


Fig. 10. Probability of Symbol Error ($N_{idt} = 15$)

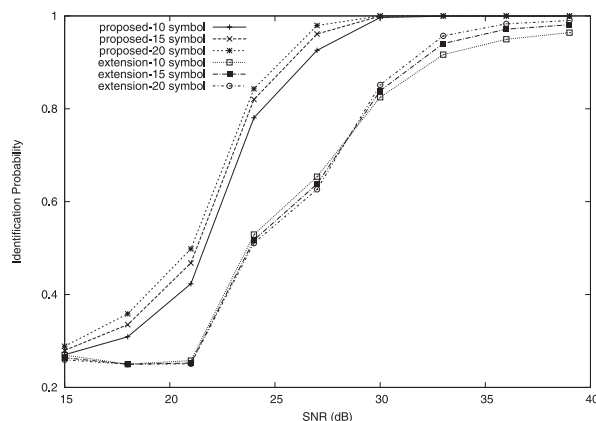


Fig. 13. Average Probability of Identification P_c

ルゴリズムにおける第1段階においてPSK系とFSK系を正常に識別できていることを示している。一方、4-FSKと8-FSKの識別誤り率は、SNRが35 dB付近で約 10^{-3} に収束している。同様に、4-FSKと8-FSKのシンボル誤り率も識別誤りの結果として約 10^{-3} に収束している。〈3.3〉節で考察したように、 $N_{idt} = 10$ の場合の識別誤り率の限界値は約 10^{-3} であるので、この結果は、SNRが35 dB付近で正常に4-FSKと8-FSKを識別できていることを示している。

同様に、Fig. 9に $N_{idt} = 15$ の場合の識別誤り率を、Fig. 10に $N_{idt} = 15$ の場合のシンボル誤り率を示した。また、Fig. 11

に $N_{idt} = 20$ の場合の識別誤り率を、Fig. 12に $N_{idt} = 20$ の場合のシンボル誤り率を示した。いずれの場合も、誤り率が限界値に収束するSNRは約35 dBであることが分かる。また、 $N_{idt} = 20$ の場合、SNRが約35 dBにおいて、識別誤り率は約 10^{-6} と非常に小さな値に抑えられていることが分かる。これは、本論文で提案した手法が有効であることを示している。

次に、Fig. 13に、式(7)で定義される平均識別率 P_c を示した。ここでは、文献(11)を単純に拡張した場合と本論文で提案したアルゴリズムの比較を行っている。Fig. 13より、

単純な拡張アルゴリズムよりも本論文で提案したアルゴリズムの方が早く限界値に収束している様子が分かる。また、本論文で提案したアルゴリズムでは、シンボルごとの積分器の出力をそのまま復調にも用いることができるため、受信器をよりシンプルに構成することができる。

最後に、どのような識別アルゴリズムであれ、 N_{idt} を大きくすれば、識別遅延を犠牲にすることで、よりよい性能を得ることができる。例えば、文献⁽⁶⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾においてはそれぞれ、50, 100, 200 シンボルが使われている。提案手法では、識別シンボル数 $N_{idt} = 20$ と他の手法に比べて小さな値で、識別誤り率を 10^{-6} に抑えることができた。

5. おわりに

本論文では、周波数弁別器を用いたシンプルな識別手法を多値信号の場合へと拡張し、2段階での識別アルゴリズムを提案することで、既存手法を単純に拡張した場合に比べて性能を向上することができた。本手法では、統計的手法、ニューラルネットワークによる手法、ウェーブレット変換を用いた手法に比べて、シンプルな手法で識別を行うことが可能である。また、本手法では M 値 FSK 信号を識別器の出力を用いて同時に復調を行うことが可能である。そのため、受信器の構成をより簡単にすることが可能である。性能評価の結果、本論文で提案した手法では、小さな識別遅延で有効に PSK 信号と多値 FSK 信号を識別できることが分かった。今後の課題として、多値 PSK 信号や他の変調方式を含めた識別への拡張があげられる。また、閾値の自動的な最適化や同じ条件下での他手法との詳細な性能比較も今後の課題である。

文 献

- (1) O. Dobre, A. Abdi, Y. Bar-Ness, and W. Su: "A Survey of Automatic Modulation Classification Techniques: Classical Approaches and New Trends", *IET Communications*, Vol.1, No.2, pp.137-156 (2007)
- (2) J. Sills: "Maximum-likelihood modulation classification for PSK/QAM", *IEEE Military Communications Conference Proceedings*, Vol.1 (1999)
- (3) W. Wei and J. Mendel: "A new maximum-likelihood method for modulation classification", *Conference Record of the Twenty-Ninth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Vol.2 (1995)
- (4) S. Soliman and S. Hsue: "Signal classification using statistical moments", *IEEE Trans. on Communications*, Vol.40, No.5, pp.908-916 (1992)
- (5) A. Nandi and E. Azzouz: "Algorithms for automatic modulation recognition of communication signals", *IEEE Trans. on Communications*, Vol.46, No.4, pp.431-436 (1998)
- (6) L. Hong and K.C. Ho: "Identification of digital modulation types using the wavelet transform", *IEEE Military Communications Conference Proceedings*, Vol.1, pp.427-431 (1999)
- (7) K. Ho, W. Prokopiw, and Y. Chan: "Modulation identification of digital signals by the wavelet transform", *IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation*, Vol.147, No.4, pp.169-176 (2000)
- (8) B. Beidas and C. Weber: "Asynchronous classification of MFSK signals using the higher order correlation domain", *IEEE Trans. on Communications*, Vol.46, No.4, pp.480-493 (1998)
- (9) A.V. Rosti and V. Koivunen: "Classification of MFSK modulated signals using the mean of complex envelope", *Proc. EUSIPCO*, Vol.1, pp.581-584 (2000)
- (10) P. Prakasam and M. Madheswaran: "M-ary Shift Keying Modulation Scheme Identification Algorithm Using Wavelet Transform and Higher Order Statistical Moment", *Journal of Applied Science*, Vol.8, No.1 (2008)
- (11) D. Asano and M. Ohara: "Automatic Modulation Identification Using a Frequency Discriminator", *IEICE Trans. on Communications*, Vol.E91-B, No.2, pp.575-578 (2008)

森岡和行 (非会員) 2005年北海道大学経済学部卒業, 2009年信州大学大学院工学系研究科修了。現在, 同大学大学院総合工学系研究科博士課程在籍中。主としてデジタル無線通信に関する研究に従事。2011年9月より独立行政法人情報通信研究機構技術員。IEEE, 電子情報通信学会各学生会員。



アサノ デービッド (非会員) 1994年トロント大学電子情報工学研究科博士課程修了 (Ph.D.). 1994年郵政省通信総合研究所 (STA フェロー)。1996年4月信州大学工学部情報工学科講師。現在, 同准教授。主としてデジタル無線通信や情報システムに関する研究に従事。IEEE Senior Member, 電子情報通信学会各学生会員。

