

ブロック変調信号の識別と推定に関する基礎研究

代表研究者 岡 育 生 大阪市立大学 大学院工学研究科 教授

1 まえがき

無線周波数は1つの軸に存在する有限資源であり,それぞれの用途に応じて効果的に配分する必要がある。一方,無線通信需要は確実に増大しており,無線周波数の枯渇が問題となっている。このため,従来から運用されている通信システムの干渉や妨害とならないように配慮した上で,新たな通信システムを重ねるように運用する方法が注目されており,コグニティブ無線として標準化が検討されている。

コグニティブ無線では,まず,無線環境情報を正確に認知する必要がある。これまで,変調方式の識別問題としては,2相位相変調(BPSK)と直交位相変調(QPSK)の識別,QPSKと直交振幅変調(QAM)の識別など,シンボルごとの変調方式についての識別方法が検討されてきた。しかしながら,最近では,直交周波数多重(OFDM)や符号分割多重(CDMA)のような,シンボルごとではないブロック変調を用いた方式が,移动通信,地上波デジタルテレビ放送,無線LANなどに多用されており,コグニティブ無線の実用化に向けては,これらの変調方式の識別と推定が重要である。

本研究では,刻々と時間変化する無線環境情報を把握するため,ブロック変調に適用できる変調方式の識別ならびに推定方式の基礎技術を確立することを目的とする。PSKやQAMなどのシンボルごと変調方式のみならず,ブロック変調の変調パラメータの推定方式を見出す。まず,受信信号点をクラスタリングして基底ベクトルを求める。続いて,ブロック変調の各信号点のラベル付けを行う。推定した基底ベクトルを用いてシンボル判定のシミュレーションを行ないシンボル誤り率を評価する。また,正規性検定に基づいた多値数推定方式を提案しその有効性を明らかにする。

2 基底ベクトルの推定

任意のブロック直交変調は,一般化直交変調でモデル化され,多次元空間における多次元立方体で表される信号点の回転によって表現できる[1]。一般化直交変調を推定するには,まず,受信信号の標本から送信信号点を推定する必要がある。 N 次元空間における信号点には 2^N 通りのパターンが存在する。それらは N 次元空間における立方体の頂点に位置し,送信信号の系列はこの立方体を回転させたものとなる。図1に3次元空間における受信信号の例を示す。図において,白い円が送信信号を,黒い点が雑音を付加された受信信号を表す。受信信号の標本をクラスタリングし,各クラスタの平均をとれば,送信信号点の推定値が得られるが[2],次元数 N が大きい場合には信号点数が膨大となり,事実上,計算が不可能となる。そこで本研究では図1に示す N 個の基準ベクトル h_1, h_2, h_3 のみをクラスタリングにより復元し,各基準軸の送信情報を判定す

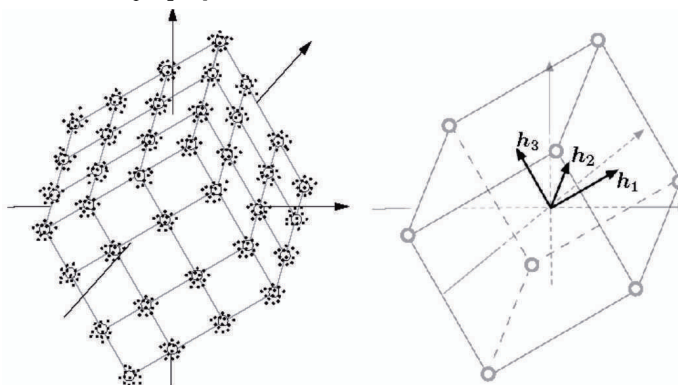
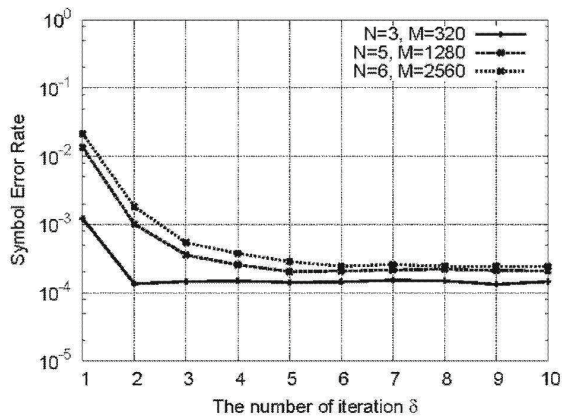
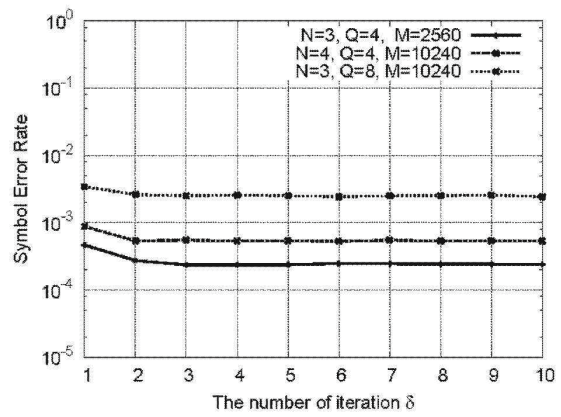


図1 受信信号点と基準ベクトル



(a) 2 値変調



(b) Q 値変調

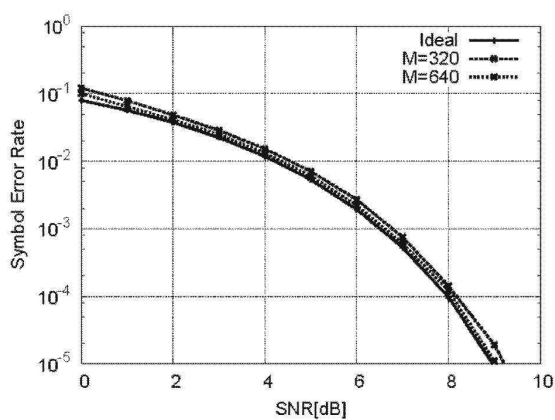
図2 初期値更新の効果

る[3], [4]. なお, 信号点のクラスタリングを用いて信号の基準ベクトルを推定する場合には, 任意の回転に対してパラメータ推定の手順ならびにその特性が不変であるため, 座標軸と基準ベクトルが一致した立方体配置を用いてパラメータ推定を行う. このようにしても推定の一般性を失わない.

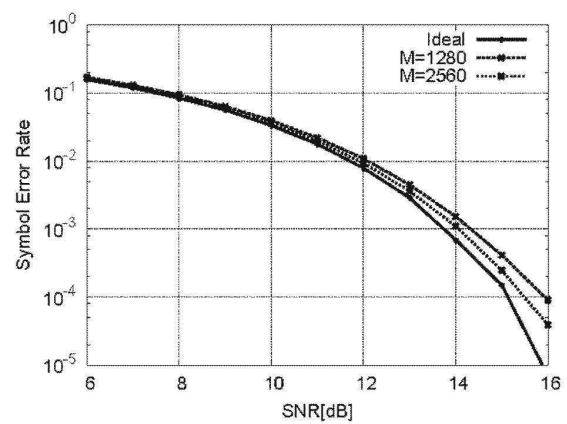
受信信号のクラスタリングには k-means 法を適用する. k-means 法ではその特性が初期値に大きく依存するため, 初期値を繰り返し変更して初期値依存を軽減する. 次に, 情報ビットの判定を行うには, クラスタリングで得られた 2^N 個の送信信号点の推定値に対し, 2 進数のラベル付けを行う必要がある. 本研究では, 信号点のラベルで各シンボルの位置関係がわかるように, 新たにグレイ符号によるラベル付け法を開発した. 実際に送信機で用いたラベル付けを, 復元した信号点のみから推定することは, 信号点の回転による自由度のため困難となる. このため, この自由度がないものと仮定することにより, 基準軸の推定誤りに起因するシンボル誤りで推定結果を評価する. 基準ベクトルが推定できれば, 受信した信号点とそれぞれの基準ベクトルの内積をとれば, 1 次元の判定変数が得られる. 2 値変調ではその符号を用いて, 多値変調の場合には等間隔のしきい値を適用してシンボル誤りを判定する.

図2にクラスタリングの初期値更新の繰り返し回数とシンボル誤り率の関係をシミュレーションで求めた結果を示す. 図中, M は受信信号の標本数を示す. 図2(a)において, 初期値更新によるシンボル誤り率の改善が見られる. 次元数 N が3では2回, 次元数 N が6では5回程度の繰り返しが有効であることがわかる. しかしながら, 図2(b)のQ値変調($Q=4, 8$)では, 3回以上繰り返してもシンボル誤り率の改善がない.

図3-6に, それぞれ3次元, 4次元, 6次元のシンボル誤り率のシミュレーション結果を示す. 信号の次元数, ならびに多値数の増加に伴い, 所望のシンボル誤り率を得るために必要な受信信号点の標本数が増加

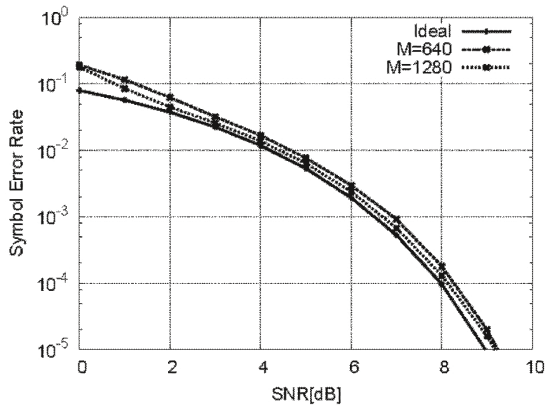


(a) 2 値変調

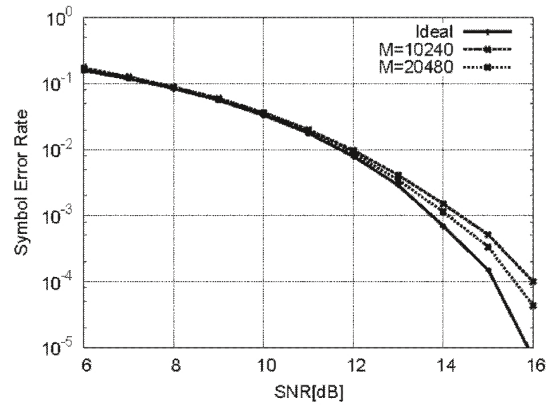


(b) 4 値変調

図3 3次元信号のシンボル誤り率



(a) 2 値変調



(b) 4 値変調

図4 4次元信号のシンボル誤り率

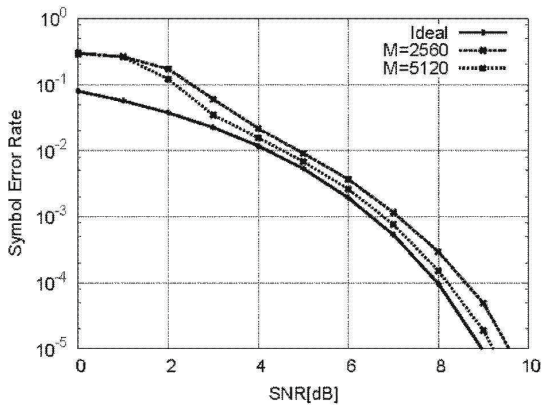


図5 6次元信号のシンボル誤り率
(2 値変調)

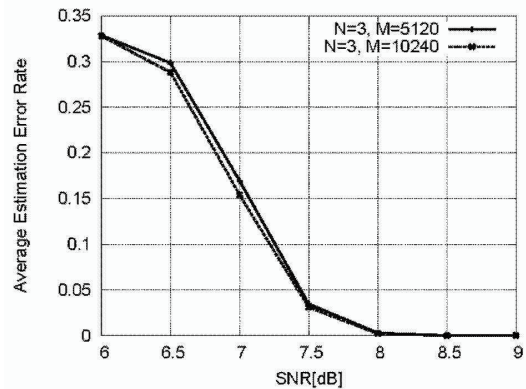


図6 多値数推定における推定誤り率

する。これは、次元数が増大するにつれクラスタリングの精度が劣化し、基底ベクトル推定の誤差が大きくなるためであると考えられる。しかしながら、十分な標本数があれば理想的な場合に近いシンボル誤り率が得られることがわかる。

3 変調多値数の推定

多値数 Q の Q 値シンボルに対する一般化直交変調方式の信号点配置は、各軸について Q 個の信号点を持つ。送信信号を生成する際にはこれらの信号点が回転するが、その回転の情報は推定した基底ベクトルが保持している。その結果、送信信号は基底ベクトルの方向に Q 個の信号点を持つ。受信信号はこれに雑音が付加されることによって基底ベクトルの方向に Q 個のクラスタを持つことになる。したがって、受信信号における基底ベクトル方向の成分に着目して多値数の推定を行うことができる。

1つの推定した基準ベクトルを考え、受信信号点との内積をとれば受信信号点は1次元データとなり、 Q 値変調に対してこれらのデータは Q 個のクラスタを形成する。最適なクラスタ数は、各クラスタが中心付近のガウス分布を形成するときであることを利用して、各クラスタに Anderson-Darling 統計量に基づくコスト関数を導入することで求めることができる [5]。ただし、Anderson-Darling 統計量に用いる累積分布関数の平均および分散はクラスタ内にあるデータから推定する必要がある。

本来の仮説検定においてはこのコスト関数が棄却域に含まれるかどうかという判定を行い、帰無仮説を棄却するか採択するかを決定する。しかし、本研究の目的は候補となる多値数の中で最良のものを発見することである。そのため、棄却域を設定するのではなく、各コスト関数の比較によって最良の値を決定する。 N

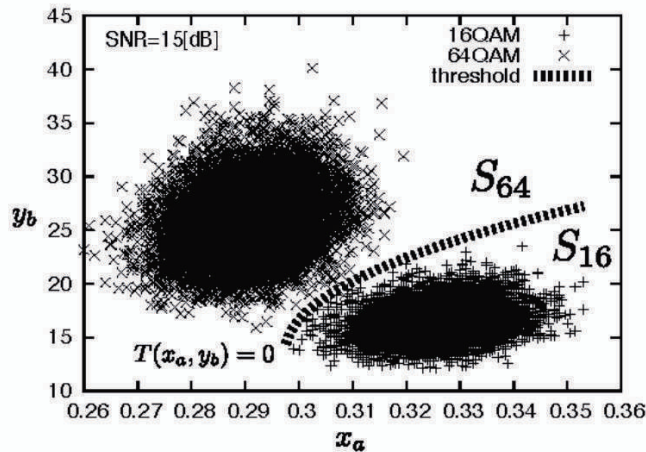


図7 振幅モーメントと余弦モーメントを用いたQAMの識別

次元のブロック直交変調において、基底ベクトルは N 本存在するため推定多値数も N 個導出される。これら N 個の多値数に対して多数決判定を行い最終的な推定多値数 Q を導出する。

多値数 Q の候補を 2 値、4 値、8 値とし、多値数の推定値が Q 以外となった回数を全推定回数で割り推定誤り率とし、さらに、多値数 2、4、8 における推定誤り率の平均をとり平均推定誤り率と定義して、多値数推定手法の評価に用いる。図 6 に平均推定誤り率のシミュレーション結果を示す。SN 比が 8.5 dB 以上では、ほぼ誤りなく推定できていることがわかる。

4 シンボルごとの直交振幅変調識別

ブロック変調の一種である OFDM の場合、ブロック変調としての識別特性と共に、各サブキャリアの変調方式の識別特性を明らかにすることも重要である。そこで、特に、識別の難易度の高い QAM を識別の対象とする。本研究では実現の容易な識別法として、受信した信号の振幅モーメントならびに位相モーメントに関係する余弦モーメント [6], [7] の 2 つの判定変数からなる識別法を開発し [8], [9]、その特性の評価を行った。図 2 に、振幅モーメント（横軸）と縦軸の余弦モーメント（縦軸）を用いる 16QAM と 64QAM の識別におけるモーメントの例を示す。ここで、 a は振幅モーメントの次数、 b は余弦モーメントにおける位相の係数を表し、信号対雑音電力比（SN 比）を 15 dB に設定している。それぞれのモーメントの値により、16QAM の領域 (S_{16}) と 64QAM (S_{64}) に分離して識別を行う。なお、信号が小さい場合には、余弦モーメントは雑音の影響が大きく受ける。このため、受信信号レベルが R より小さい場合には小信号除去とし、その受信信号を識別に用いないこととする。識別誤り率を計算機シミュレーションで求めるとともに、識別誤り率の解析式を導出した。

周波数オフセットがない場合に、振幅モーメントと余弦モーメントを用いた場合の 16QAM と 64QAM の識別誤り率の解析結果を図 8 に示す。なお、図 8 の結果は計算機シミュレーション結果と一致していることを確認している。ここで、小信号除去レベルならびに振幅モーメント次数 ($a=12$) と位相モーメント係数 ($b=12$) は最適値を用いている。図 8 の受信信号の標本数 5000 において、振幅モーメントと余弦モーメントの両方を用いる提案手法の識別誤り率は、従来の振幅モーメントあるいは余弦モーメントを単体で用いる場合より、優れた誤り率となっていることがわかる。

次に、周波数オフセットが 1 シンボルあたり 1 度の場合に、受信点シフトによる信号点の拡大を用いる提案手法と従来の振幅モーメントのみを用いた識別法の誤り率を、計算機シミュレーションを用いて求めた結果を図 9 示す。図では周波数オフセットが大きい場合でもほとんど識別特性に変化はない。図 9 より、提案手法は、周波数オフセット存在下においても振幅モーメントを用いる方法より低い識別誤り率を呈することがわかる。

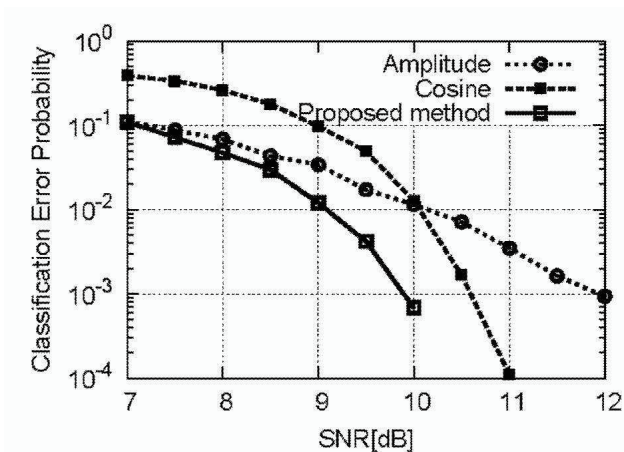


図8 周波数オフセットがないQAMの識別誤り率 (N=5000)

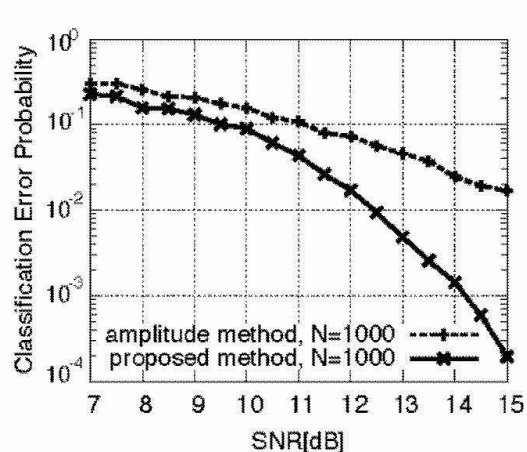


図9 周波数オフセットのあるQAMの識別誤り率 (N=1000)

6 複数信号の識別

これまで、変調方式識別の研究では二者択一の識別が主となっていたが、大信号と小信号の2つの変調波が混在する場合に、その両方の変調方式の識別について検討する。まず、振幅モーメントを用いて大信号を識別し、続いて、識別した大信号のモーメント成分を取り除いて小信号を識別する。識別誤り率を計算機シミュレーションを用いて求めた[10]。PSKとQAMが同時に存在する場合に、受信信号の振幅モーメントを用いてこれら両方の変調方式の識別を行った。その結果、2つの信号にある程度の電力差があれば識別が可能であることを示した。なお、この電力比が既知であれば識別誤り率を大きく改善することが可能である。

5 むすび

本研究では、無線周波数資源のダイナミックな有効利用を実現するため、ブロック変調の変調パラメータ推定、振幅と位相のモーメントの統合による高効率識別、ならびに、複数信号識別に関して研究を行った。その結果、受信機で搬送波情報がない場合の変調識別は困難であるが、搬送波情報がある場合、あるいは、ベースバンド信号におけるブロック直交変調については、受信機でシンボル同期とブロック同期が推定できれば、ある程度の受信信号の標本数を用いて変調パラメータの推定が可能であり識別できることがわかった。シンボルごとの変調であるQAMの識別については、周波数オフセットがある場合も含め、振幅モーメントと余弦モーメントの統合による識別法の優位性を示した。また、複数信号が同時に存在する場合においても、信号間に電力差があれば、それぞれの信号を識別できることを明らかにした。

【参考文献】

- [1] Ikuo Oka, Marc Fossorier : " A General Orthogonal Modulation Model for Software Radios," IEEE Trans. Communications., Vol.54, No.1, pp.7-12, January 2006
- [2] Tomoya Katayama, Ikuo Oka, Shingo Ata : " Modulation Identification by General Orthogonal Modulations," Proc. 2008 International Conference on Advanced Technologies for Communications, pp.12-15, October 2008
- [3] Takahiro Yamamoto, Ikuo Oka, Shingo Ata : " Error Probability of Orthogonal Modulation Estimation by Clustering," Proc. 2008 Joint Conference on Satellite Communications, pp.225-229, November 2008

- [4] Takahiro Yamamoto, Ikuo Oka, Shingo Ata : " Clustering and Labeling of Orthogonal Signals for Modulation Identification," Proc. 2008 International Symposium on Information Theory and Its Application, pp.65-69, December 2008
- [5] Takahiro Yamamoto, Ikuo Oka, Shingo Ata : " Signal Identification of Block Orthogonal Modulations, " Proc. 2010 IEEE Radio and Wireless Symposium, pp.220-223, January 2010
- [6] Masato Kita, Ikuo Oka, Shingo Ata : " QAM Classification Based on Cosine Moments Excluding Small Signals," Proc. 5th International Conference on Information Technologies and Applications, pp.98-103, June 2008
- [7] Masato Kita, Ikuo Oka, Shingo Ata : " Classification Error Probability of Cosine Moment Method with Small Signal Rejections," Proc. 2009 IEEE Radio and Wireless Symposium, pp.417-420, January 2009,
- [8] Shinji Ohara, Masato Kita, Ikuo Oka, Shingo Ata : " Modulation Classification Based on Amplitude and Cosine moments," Proc. 2009 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing, pp.158-162, August 2009
- [9] Shinji Ohara, Ikuo Oka, Shingo Ata : " Robust QAM Classification by Moments and Its Error Probability Analysis," Proc. 2011 IEEE Radio and Wireless Symposium, pp.142-145, January 2011
- [10] 王曉敏, 岡育生, 阿多信吾, “複数の信号が存在する場合の変調方式識別,” 電子情報通信学会技術研究報告 (SR2009-76), Vol. 109, No. 383, pp. 15-20, January 2010

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Robust QAM Classification by Moments and Its Error Probability Analysis	Proceedings of the 2011 IEEE Radio and Wireless Symposium	2011年1月
Pulse Interference Mitigation Techniques for QPSK and QAM using Viterbi Decoding	Proceedings of the 2010 International Symposium on Information Theory and its Applications	2010年10月
モーメントを用いた最大事後確率復号におけるビット誤り率の解析	第33回情報理論とその応用シンポジウム	2010年12月
Signal Identification of Block Orthogonal Modulations	Proceedings of the 2010 IEEE Radio and Wireless Symposium	2010年1月
パルス状干渉を考慮したビタビ復号の効果	電子情報通信学会技術研究報告 情報理論研究会	2009年5月
複数の信号が存在する場合の変調方式識別	電子情報通信学会技術研究報告 ソフト無線研究会	2010年1月
Modulation Classification Based on Amplitude and Cosine moments	Proceedings of the 2009 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing	2009年8月
振幅モーメントおよび余弦モーメントを用いた直交振幅変調の識別誤り率の解析	第32回情報理論とその応用シンポジウム予稿集	2009年12月
クラスタリングを用いたブロック直交変調の多値数推定	第32回情報理論とその応用シンポジウム予稿集	2009年12月