

電波識別装置の識別性能評価

電子科

アールエフネットワーク株式会社

静岡大学大学院総合科学技術研究科工学専攻電気電子工学コース

杉森正康 山田浩文 増田康利 松田 稔

田内正治

犬塚 博

Test of Identifying Performance of Modulation Method for Radio Frequency

Masayasu SUGIMORI, Hirofumi YAMADA, Yasutoshi MASUDA, Minoru MATSUDA, Masaharu TANAI
and Hiroshi INUZUKA

The radio communication wave identification equipment which we are developing is an equipment to identify the type of various radio communication waves (under testing signals) which fly around in the space on real-time. This time, to evaluate the developed equipment, we establish the reproducible method to evaluate it and bring in a new indicator to quantify the identification performance. Furthermore, we use the judgement condition which becomes clearly through applying non-linear spectrum analysis to under testing signals by simulation as a part of identification algorithm of the equipment, and we evaluate it according to above evaluation method. As a result, we confirm that the equipment has high identification performance.

Keywords : Radio communication wave identification, Identification performance, Non-linear spectrum analysis, Identification algorithm.

キーワード：電波識別、識別性能、非線形スペクトル解析、識別アルゴリズム。

1 はじめに

近年のパソコン、スマートフォン、タブレット端末等の普及に伴い、日常空間には様々な電波が飛び交っている。特にISMバンドと呼ばれる2.4GHz帯は、無線LANやBluetooth等の通信に用いられる電波が混在するため、それらが干渉して互いの通信を妨害し合うことが多い。このような通信障害が発生した場合、原因究明のためには、空間中に飛び交う電波の通信方式を把握できることが望ましいが、容易ではない。

我々が共同で開発中の「電波識別装置」(写真1)は、空間を飛び交う様々な電波(被試験信号)を受信し、独自のアルゴリズムに従って解析、演算し、その電波を使用している通信方式をリアルタイムで識別する。識別結果の表示例を図1に示す。

この中で、浜松工業技術支援センターは、開発した電波識別装置の識別性能の評価を行った。そのためには、電波識別装置に何らかの被試験信号を入力し、出力される識別結果が正しいか否かを調べる必要がある。被試験信号を簡便に得る手段としては、実際に無線通信機器が発する電波を用いる方法がある。しかし、無線LANのように、仕様上は複数の通信方式が定義され、実際の通信ではどの方式が使われるかが不明な

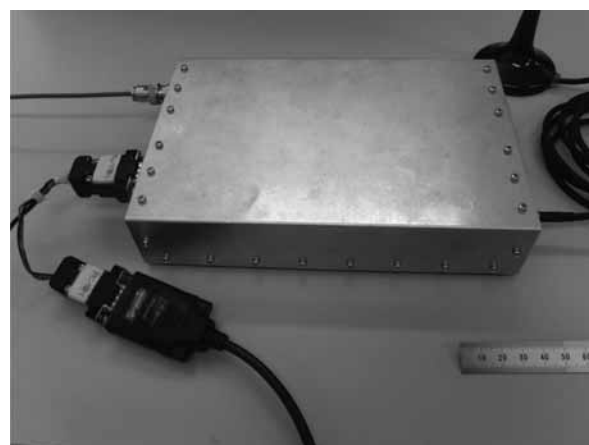


写真1 電波識別装置（試作機）の外観

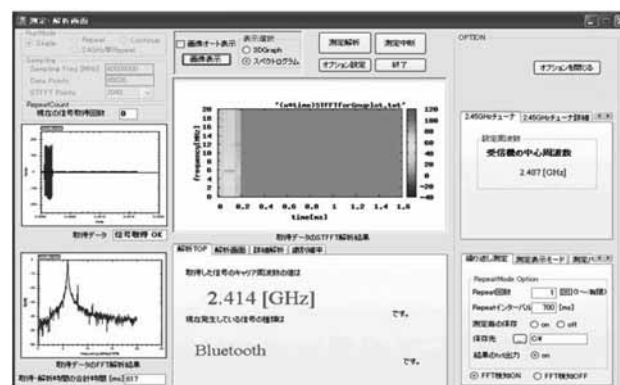


図1 電波識別装置識別結果表示例

システムでは、次の3つの問題が生じる。

- ア 被試験信号の通信方式が不明のため、識別結果の正誤の判断ができない。
- イ 仕様で定義されている全ての通信方式についての試験ができない。
- ウ 評価する度に被試験信号の通信方式が変わってしまう可能性があり、再現性の高い評価ができない。

今回、上記の課題に対処するため、任意の通信方式の被試験信号を生成し、電波識別装置を評価する独自の方法を確立した。同時に、それぞれの通信方式における被試験信号の特徴を明らかにし、判定条件として識別アルゴリズムに組み込むことで電波識別装置の識別性能の向上を図った。さらに、識別性能を定量的に評価するための性能指標を導入し、電波識別装置の識別性能の評価を行った。

2 方法

2.1 評価方法の確立

(1) 被試験信号の発生

本研究における電波識別装置の識別対象として、様々な通信方式が共存する2.4GHz帯の電波の中で、特に利用者数の多い、無線LAN、Bluetooth、ZigBeeを選定する。無線LANは、伝送レートや変調方式の違いにより、さらに様々な通信方式に細分化される。これら方式の異なる様々な通信方式の被試験信号を漏れなく評価するために、被試験信号発生源として、パーソナルコンピュータ (PC) と信号発生器を利用する方法を開発した¹⁾。これにより、方式の異なる様々な被試験信号を容易に生成できる。また、信号発生器と電波識別装置の間を同軸ケーブルで接続するので、外乱の影響を排除した環境での識別性能の評価を可能とした。(図2)

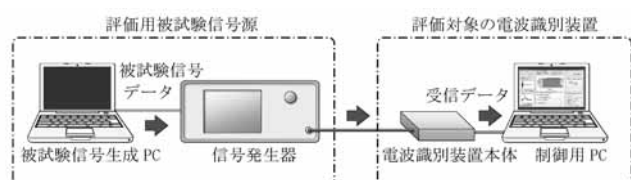


図2 評価環境の構成図

PC上に用意する被試験信号データについては、後述する識別アルゴリズムの検討の際に生成する被試験信号のシミュレーションデータを流用する。詳しくは、「2.2 (2)」項および「3.1 (1)」項で述べる。

(2) 識別性能指標の定義

我々は、電波識別装置の性能を表す指標として、表1に示す3つの値を用いた²⁾。

正答率と正解率は、評価対象の通信方式毎に得られる性能であり、正答率と正解率の両方が高い値であれば、評価対象の通信方式が明確に識別できると判断できる。一方、それらのいずれかあるいは両方が低い値の場合は、識別アルゴリズムの判定条件に曖昧さがあり、さらにそれらのどちらが低いかによって、識別アルゴリズムの判定傾向を推測することができる。

識別率は、電波識別装置の総合的な性能を表す特性値であり、この値が高いほど識別装置としての信頼性は高いと判断できる。

表1 電波識別装置の識別性能を示す性能指標

性能指標	定義
正答率	既知の信号を入力して、正しく判定する確率 = (対象信号を入力して正しく答えた回数) / (対象信号の試験回数)
正解率	評価対象の信号名として判定されたとき、それが正解である確率 = (分母のうち、それが正解であった回数) / (対象信号と判定された回数)
識別率	未知の信号に対して、正しく判定する確率 = (正しく判定された回数) / (全体の試験回数)

2.2 識別アルゴリズムの検討

(1) 識別アルゴリズム

電波識別装置が識別処理を行う際、装置内部では、入力された被試験信号に対して様々な識別演算を施し、その演算結果から抽出される特徴量により、被試験信号の通信方式を判定する。この識別演算および特徴量による判定の方法を、我々は「識別アルゴリズム」と呼ぶ。

評価方法を確立するにあたり、事前に被試験信号の特性を明らかにしておく必要がある。表計算ソフトを利用したシミュレーションを行い、各通信方式の仕様に則った被試験信号を生成する。同時に、これらの被試験信号に識別演算を施すことで抽出される特徴量を検証し、識別アルゴリズムに組み込む判定条件を検討する。

(2) 被試験信号の生成

各通信方式の仕様は、IEEE802シリーズに規定されている。仕様書に則った例として、無線LAN信号について述べる。無線LANの標準規格には、IEEE802.11b、IEEE802.11g、IEEE802.11a、IEEE802.11n等の多くの種類があるが、これらは概ね、従来の規格に対して上位互換性を保ちつつ、新しい変調方式や通信周波数帯を追加する形で制定されている。これらの各方式を、変調方式およびデータ伝送レート等に注目して分類した結果を表2に示す。通信方式毎にシミュレーション

表2 無線LANにおける通信方式詳細

通信方式	伝送レート	変調方式		一次変調	符号化率	二次変調	チップレート / シンボルレート	識別結果表示
		ヘッダ部	データ部					
DSSS	1Mbps	DSSS	DSSS	BPSK	-	バーカーコード拡散	11Mcps	802.11b
	2Mbps							
CCK	5.5Mbps	DSSS	CCK	QPSK	-	4種相補符号変調	11Mcps	802.11b
	11Mbps							
OFDM	6Mbps	OFDM	OFDM	BPSK	1/2	4.0 μ sごとに 52サブキャリア分を 逆フーリエ変換	250ksps (GI部除く)	802.11g OFDM
	9Mbps				3/4			
	12Mbps				1/2			
	18Mbps				3/4			
	24Mbps				1/2			
	36Mbps				3/4			
	48Mbps				1/2			
	54Mbps				3/4			
DSSS-OFDM (オプション)	6Mbps	DSSS	OFDM	BPSK	1/2	4.0 μ sごとに 52サブキャリア分を 逆フーリエ変換	x52 SC 帯域幅: 13MHz	802.11g DSSS-OFDM
	9Mbps				3/4			
	12Mbps				1/2			
	18Mbps				3/4			
	24Mbps				1/2			
	36Mbps				3/4			
	48Mbps				1/2			
	54Mbps				3/4			

系を構築し、擬似的に被試験信号を生成する。

(3) 識別演算の検証

被試験信号の識別を行なうための一般的な演算として、被試験信号の中心周波数検出、周波数帯域幅検出等が知られている。本研究では、これらに加え、非線形スペクトル解析を実施する。具体的には、入力された被試験信号に非線形演算を施した上で高速フーリエ変換 (FFT) を行い、周波数スペクトルを解析する。非線形演算を行うことで、通常のスペクトル解析では検出できない、変調方式の違い等を判別できる可能性がある。しかし、演算の非線形性のために、入力信号に対する応答を理論的に解析しにくいという欠点がある。そこで、2.2 (2)の「被試験信号の生成」で擬似的に生成した被試験信号に対して、シミュレーション上で非線形スペクトル解析演算を行い、各信号に対する応答を数値的に求める。さらに、得られた結果から、各被試験信号を識別するための特徴量を抽出し、電波識別装置の識別アルゴリズムで利用する。

3 結果および考察

3.1 シミュレーション結果と考察

(1) 被試験信号生成

表2に示した通り、無線LANには特徴の異なる様々な通信方式が併用されている。そこで、通信方式毎に個別のシミュレーション系を構築し、被試験信号を生成した。

直接拡散 (DSSS) 方式の信号生成ブロック図を図3に示す。DSSS方式では、一次変調での変調方式の違いにより、伝送レートが1Mbpsか2Mbpsのいずれか

になる。今回は、1Mbpsと2Mbpsの両方の信号生成を行った。

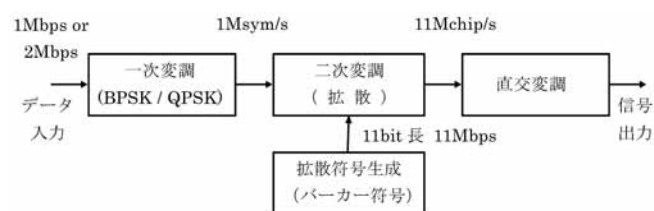


図3 直接拡散 (DSSS) 方式信号生成ブロック図

相補符号変調 (CCK) 方式の信号生成ブロック図を図4に示す。DSSS方式では二次変調用の拡散コードが固定値 (バーカー符号) であるのに対し、CCK方式では、拡散コードとして可変値の相補符号 (コンプリメントリコード) を使用する。伝送データによって拡散コードを変えることにより、伝送レート的高速化を図っている。拡散コードとして用いる相補符号の種類により、伝送レートが5.5Mbpsか11Mbpsのいずれかとなる。今回は、5.5Mbpsと11Mbpsの両方の信号生成を行った。

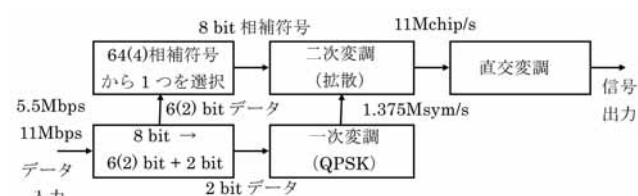


図4 相補符号変調 (CCK) 方式信号生成ブロック図
() 内の数字は5.5Mbpsの場合

直交周波数分割多重 (OFDM) 方式の信号生成ブロック図を図5に示す。OFDM方式では、伝送データを複素周波数軸上にマッピングした後、逆フーリエ変

換を用いて時系列信号列に変換し、GI（ギャップインターバル）部を付加した後、出力する。データをマッピングする際の変調方式および符号化率の違いにより、6 Mbpsから54Mbpsまで、8種類の伝送レートが定義されている。

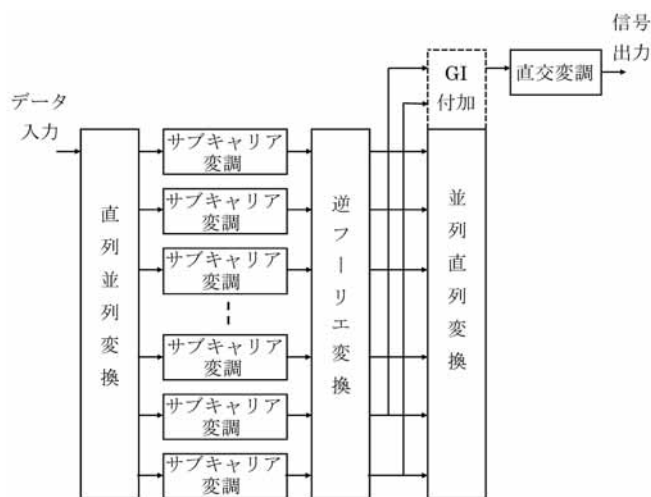


図5 直交周波数分割多重（OFDM）方式信号生成ブロック図

無線LANでは、これらの通信方式の他に、オプション規格としてDSSS-OFDM方式が定義されているが、上記のDSSS方式とOFDM方式の組み合わせであるため、シミュレーション対象からは除外した。

シミュレーションは、パソコン上で汎用の表計算ソフトを用いて実行した。

(2) 従来の手法による解析結果（時系列および周波数スペクトル解析）

DSSS方式、CCK方式、OFDM方式の時系列信号波形の例を、それぞれ図6～図8に、周波数スペクトル波形をそれぞれ図9～図11に示す。各通信方式において、伝送レートの違いによる波形の相違は極めて小さいため、通信方式毎に各1種類の波形のみを提示した。これらを比較すると、DSSS方式とCCK方式では、時系列波形および周波数スペクトル波形にはほとんど差がない。OFDM方式は、他の2方式に比べてやや異なる波形となるものの、これらの波形からは、通信方式を識別できるだけの明確な特徴は得られない。

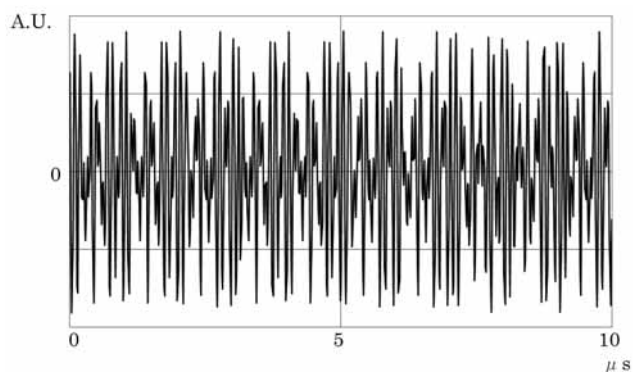


図6 DSSS方式時系列信号波形
(2 Mbps $f_s=55\text{MHz}$ $f_c=10\text{MHz}$)

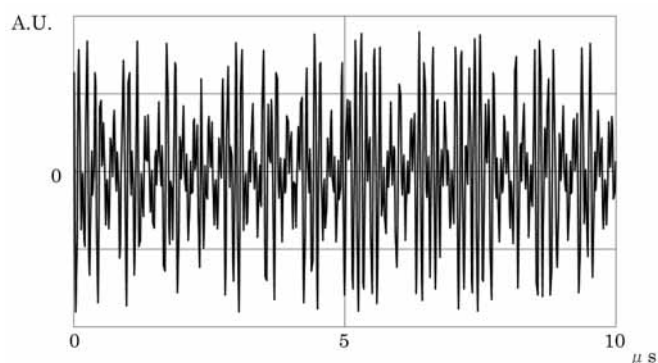


図7 CCK方式時系列信号波形
(5.5Mbps $f_s=55\text{MHz}$ $f_c=10\text{MHz}$)

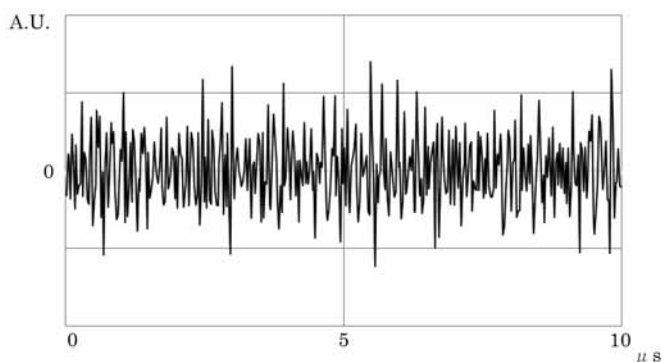


図8 OFDM方式時系列信号波形
(54Mbps $f_s=40\text{MHz}$ $f_c=3.5\text{MHz}$)

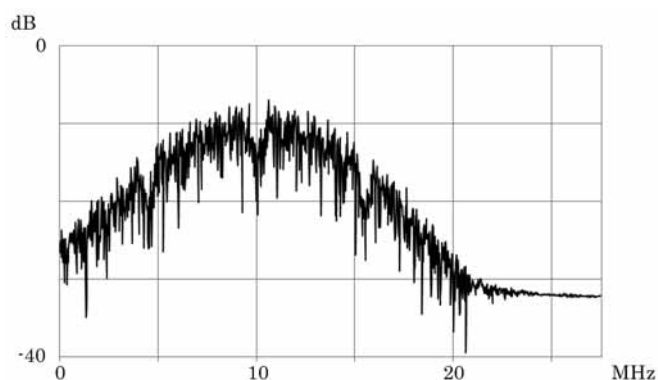


図9 DSSS方式周波数スペクトル波形
(2 Mbps $f_s=55\text{MHz}$ $f_c=10\text{MHz}$)

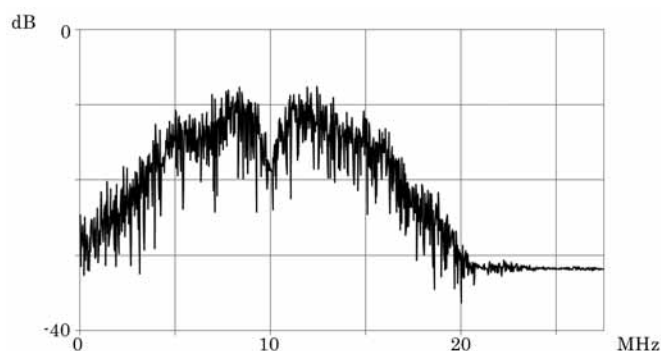


図10 CCK方式周波数スペクトル波形
(5.5Mbps $f_s=55\text{MHz}$ $f_c=10\text{MHz}$)

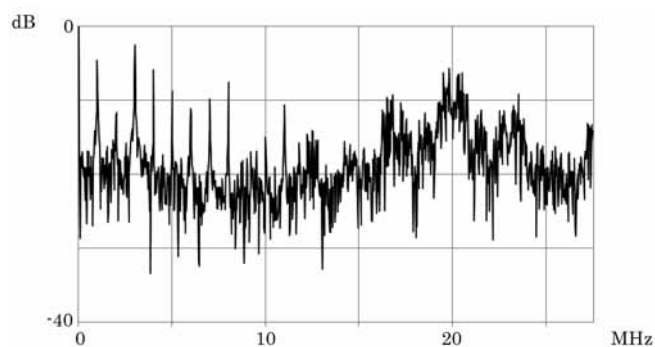


図13 DSSS方式非線形スペクトル波形
(2 Mbps $f_s=55\text{MHz}$ $f_c=10\text{MHz}$)

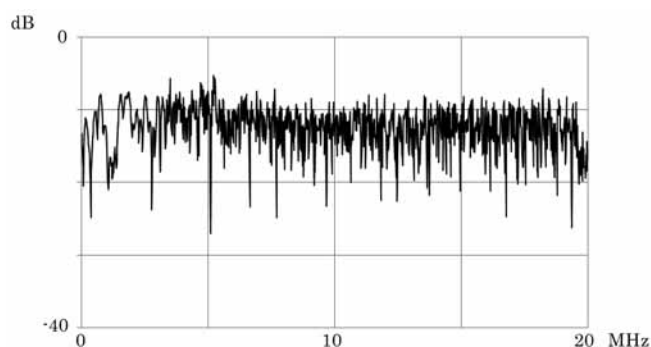


図11 OFDM方式周波数スペクトル波形
(54Mbps $f_s=40\text{MHz}$ $f_c=3.5\text{MHz}$)

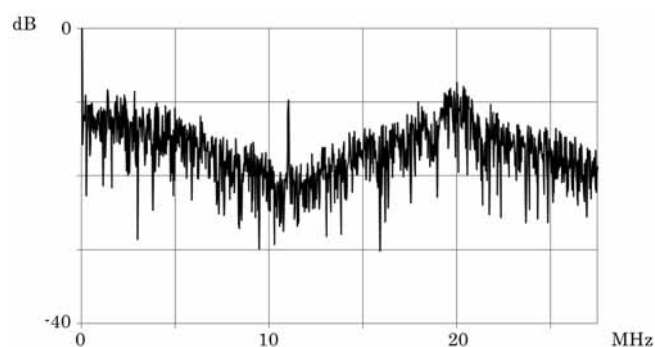


図14 CCK方式非線形スペクトル波形
(11Mbps $f_s=55\text{MHz}$ $f_c=10\text{MHz}$)

(3) 開発した手法による解析結果（非線形スペクトル解析）

DSSS方式（1 Mbps）、DSSS方式（2 Mbps）、CCK方式（11Mbps）、CCK方式（5.5Mbps）、OFDM方式の非線形スペクトル波形を、それぞれ図12～図16に示す。これらの波形からは、通信方式毎に特徴の異なる、パルス状のスペクトルピーク波形が観測される。これらの波形の特徴を抽出して判定すると、通常の周波数スペクトル解析では区別がつかなかった通信方式の違いを明確に区別することが可能である。

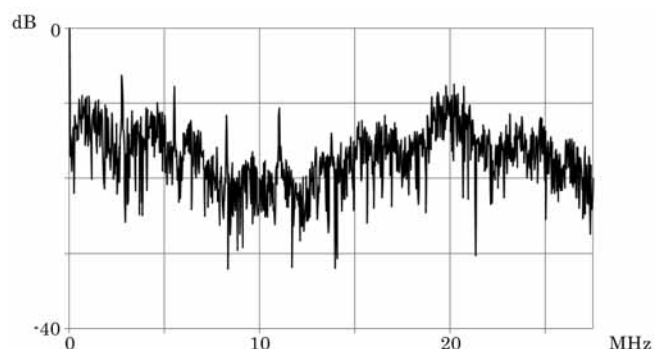


図15 CCK方式非線形スペクトル波形
(5.5Mbps $f_s=55\text{MHz}$ $f_c=10\text{MHz}$)

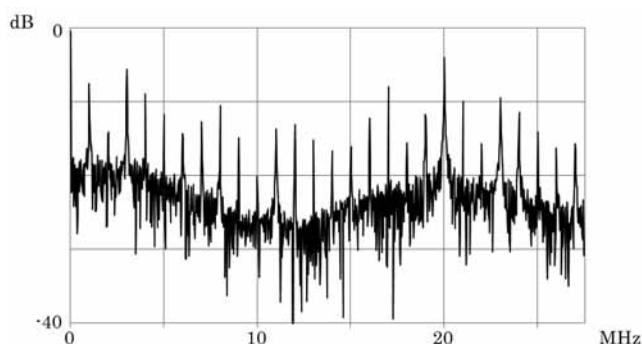


図12 DSSS方式非線形スペクトル波形
(1 Mbps $f_s=55\text{MHz}$ $f_c=10\text{MHz}$)

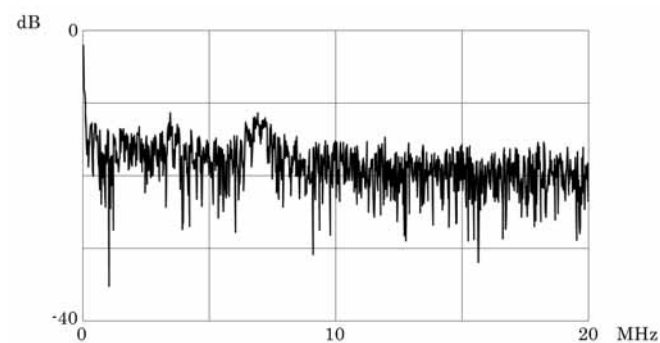


図16 OFDM方式非線形スペクトル波形
(54Mbps $f_s=40\text{MHz}$ $f_c=3.5\text{MHz}$)

3.2 識別性能評価結果と考察

3.1のシミュレーションにより明らかにした、「各通信方式における非線形スペクトル波形の特徴を抽出して判定する処理」を電波識別装置の識別アルゴリズムに組み込み、識別性能の評価を行った。但し、各通信方式における伝送レートの識別は行っていない。結果を表3に示す。いずれの信号種別においても、正答率、正解率、識別率とも95%以上という極めて高い識別性能が得られた。一部、「DSSS-OFDM」信号を入力した時に「OFDM」信号と誤判定するケースが散見されたが、これは、被試験信号の途中からデータを取り込んだために前半のDSSS部分を検出できなかったためと考えられる。被試験信号を途中から取り込んだ場合の処理を改善することで対処可能である。

今回、全体の識別率の他に、被試験信号の種別毎に正答率と正解率を明らかにしたことにより、今後、電波識別装置本体や識別アルゴリズム等が変更になった場合の識別性能の違いを、詳細かつ定量的に把握することができるようになった。

4 まとめ

- ・電波識別装置の識別性能を、高い再現性で評価する独自の評価方法を確立し、その有効性を示した。
- ・シミュレーションにより、被試験信号の生成、識別演算の検証を行うことで、識別アルゴリズムを検討する方法を示した。
- ・検討した識別アルゴリズムを実際の電波識別装置に組み込み、確立した評価方法によって識別性能を評価した。また、新たに導入した性能指標によって識別性能を定量的に表わすことができた。

今後、電波識別装置の実用化に向けて、本研究結果を活用する。

参考文献

- 1) 杉森正康 他：電波識別技術の実用化開発（第2報），静岡県工業技術研究所研究報告，第8号，79-82（2016）。
- 2) 杉森正康 他：電波識別技術の実用化開発（第1報），静岡県工業技術研究所研究報告，第7号，114-115（2015）。

表3 識別性能評価結果（判定結果が正しい箇所を網がけで表示）

		識別結果							正	誤	正答率	
		無線LAN				Bluetooth FHSS	ZigBee DSSS	その他				
		802.11b DSSS	802.11b CCK	802.11g OFDM	802.11g DSSS+OFDM							
入力信号	無線LAN	802.11b DSSS	58						2	58	2	96.7%
		802.11b CCK		60						60	0	100.0%
		802.11g OFDM			240					240	0	100.0%
		802.11g DSSS+OFDM			9.5	228.5			2	228.5	11.5	95.2%
		Bluetooth FHSS					57		3	57	3	95.0%
		ZigBee DSSS						30		30	0	100.0%
正		58	60	240	228.5	57	30	0	673.5			
誤		0	0	9.5	0	0	0	7		16.5		
正解率		100.0%	100.0%	96.2%	100.0%	100.0%	100.0%	-	識別率:		97.6%	