

無線機同定法の研究—実験方法と結果—

Transmitter Identification — Experimental Techniques and Results —

杉山 功 洪木政昭 岩崎 憲 平野隆之

Tsutomu SUGIYAMA, Masaaki SHIBUKI, Ken IWASAKI, and Takayuki HIRANO

要旨

プレストーク無線機においてオン/オフ時に特徴的な過渡応答を示すことが知られている。しかし、その特徴量は定量化されておらず、様々なモデル、同じモデルでの無線機個体間の差等の研究は十分に行われていない。そこで、3メーカー、6モデルの無線機について、無線機識別用の高速データ取得装置で室内実験を行い無線機識別の有効性の検討を行った。その室内実験の手法と結果について本稿の最初の部分で述べる。引き続き、野外実験とその結果について述べる。

アンテナ経由で受信したデータにおいてどのような影響を示すのかを明らかにするために、無線機の送信出力をアッテネーターで減衰して受信機入力換算値 P_{in} に対して $-70\text{dBm} \sim -120\text{dBm}$ 変化させ、これに伴う S/N 比の低下によるデータへの影響と、トリガレベルとの関係、あるいは、帯域幅による影響を実験データから定性的、定量的に評価した。この評価結果に基づいて、室内実験で得た立上り時の振幅波形との比較検証した。その結果、アンテナ経由で得た過渡応答特性の電圧波形のパターンはノイズや隣接無線局の干渉を受け著しく特性が劣化し、無線機の同定には不向きであることが明らかになった。これに対して取得データからスペクトログラムパターンに変換し、室内実験とのパターンの比較検証においてはスペクトログラムパターンへの影響は少なく室内実験の結果と良好な一致を示し、十分に無線機の識別が可能である結果が得られたことを示す。

We delineated the transient response patterns of several different radio transmitters in order to determine the patterns most useful in the development of a transmitter identification system. Using a high-speed data acquisition system, we first obtained rise and fall data for various transient response patterns that were produced by six different FM radio transmitters when the press-to-talk buttons were switched on and off. We next evaluated the effect of these transient patterns on the time domain and time-frequency spectrograms by measuring the changes in the receiver input level at $P_{in} = -120\text{ dBm}$ and $\text{SNR} = 7.2\text{ dB}$ obtained from three different bandwidths : 250, 50, and 12 kHz. Similarly, spectrogram analysis was used to obtain information about the relationship between bandwidth and noise. Comparison of the spectrogram patterns obtained in both laboratory and field experiments independently corroborated our results. However, the transient patterns in the time domain could not be used because of extensive distortion related to noise and interference from neighboring radio stations. These results suggest that spectrogram analysis of transient response patterns may be the most effective way to secure reliable identification of the FM radio transmitters.

[キーワード]

無線機同定, スペクトログラムパターン, ウィグナー分布

Radio transmitter identification, spectrogram pattern, Wigner-distribution

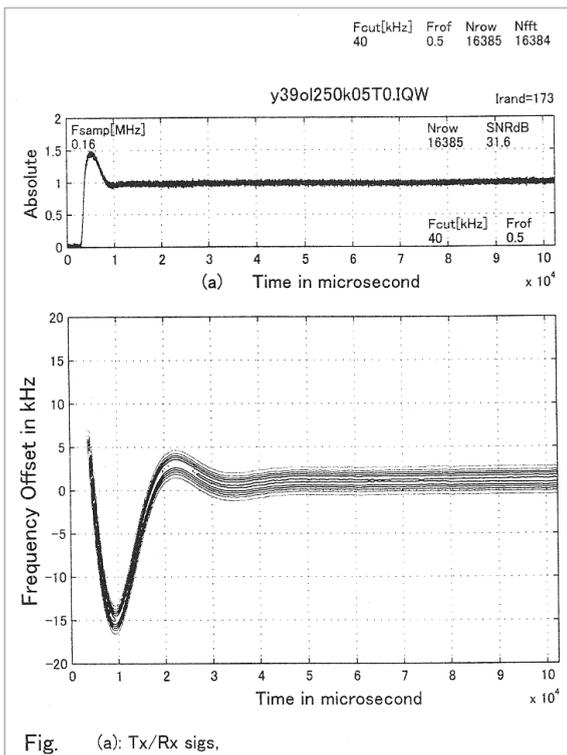


Fig. (a): Tx/Rx sigs.

図22 Tr39のスペクトログラム・パターンへの適用例(2)

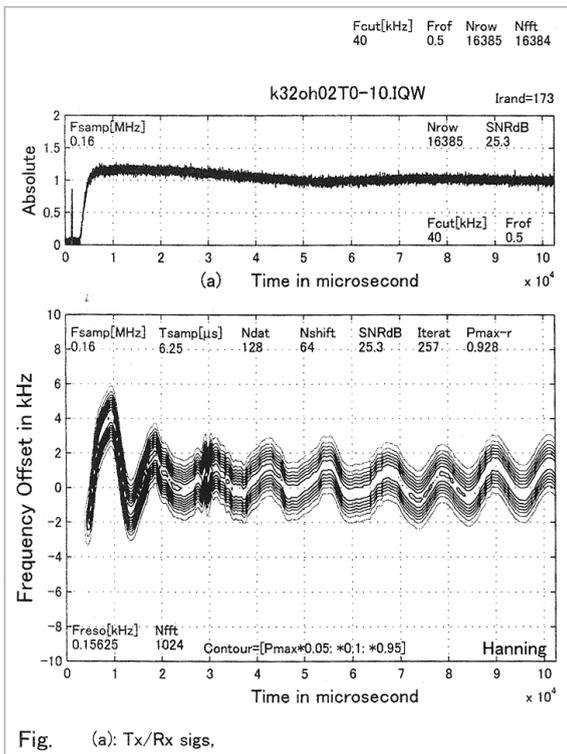


Fig. (a): Tx/Rx sigs.

図23 Tr32のスペクトログラム・パターンへの適用例

別について、どのように対応するかは今後の課題である。

図23にk社Tr32の計算結果を表示した。この無線機の場合、最初大きく周波数が振動し、その後は減衰振動する傾向を示す。他の無線機で行った実験結果では、減衰振動のパターンは複雑ではあるが、示すパターンは機別に異なり無線機の識別が可能であった。

5 スペクトログラム・パターンとIF帯域幅

前章までに紹介した測定例はすべてIF帯域幅に関しては250kHzに設定し測定を行い、振幅波形の絶対値表示とスペクトログラム・パターンの処理段階で40kHzのローパスフィルタを通したものが掲載されている。この章では、スペクトログラム・パターンとIF帯域幅と処理過程のローパスフィルタの関係について考察することにする。

図24は、y社Tr39をIF帯域幅50kHzで測定し、測定したIQデータに遮断周波数20kHzのローパスフィルタを通して処理した結果である。この図と前章の説明で用いたIF帯域幅250kHzでのTR39の測定例、図21、22と比べてみる。まず、振幅波形の比較では、図21、22の両図とも最初オーバーシュートしてその後、一定のレベルに落ち着いている。図24では、オーバーシュートの区間の波形に歪みが生じている。この歪みの原因は、雑音除去に使用したローパスフィルタの影響によるものである。この区間のデータからローパスフィルタの特性を超える周波数成分が取り除かれたことによるものである。しかしながら、パターンの有効性を損なうような影響は観測されていない。

図25は、帯域幅との関係を分かりやすく説明するために、IF帯域幅を12kHzで測定し、データ処理の段階で10kHzのローパスフィルタを通し強調した例を示した。この例の振幅波形の歪みは一層激しく、図21、22のオーバーシュートを示した区間では、帯域制限を超えた周波数成分がフィルタの特性により削り取られ、振幅波形が大きく陥没している。この現象を下のパターンと関係付けてみれば、この部分の周波数成分が除去されていることが明らかになっている。しかし、全体のパターンの傾向はそのまま保存

1 まえがき

不法無線局は、平成9年度、約36,000件、平成10年度、約45,000件、平成11年度は、約37,000件地方総合通信局で確認されている。[1] 不法無線局は重要な無線通信や一般業務無線に混信や妨害を与え、適切な対応が強く望まれている。プレストーク無線機のオン/オフ時の過渡応答特性に着目して、無線機を同定する研究を行ってきた。[2] 以前の調査結果では、過渡応答は数 μ sから数百ms継続すると報告されている。[3] しかしながら、無線機の同定に適用する場合、過渡応答期間の再現性や安定度、環境等の影響について十分な報告例がなかった。本稿の前半で、過渡応答期間の特性や傾向を客観的に把握するために、立上り時の振幅包絡線を飽和電圧で規格化して検討を行った。[4] また、電源電圧の変動と温度変動の影響についても併せて検討を行った。無線機の同定の研究を進める上で、上記の室内実験で得た結果と、後半では、アンテナ経由で得た実験結果を比較検証して無線機識別の有効性を導き出す。

野外実験の内容については最初に、Pinの変化とこれに伴うタイムドメンの立上り振幅包絡線波形及びスペクトログラムへの影響を雑音と帯域幅との関係について定性的・定量的に評価する。次に、今回の実験データに基づいたスペクトログラムの評価結果と室内基礎データに基づいた評価結果と比較検討する。その結果、スペクトログラムの描くパターンの特性が-120dBm、SNR=7.2dBにおいても再現でき、室内実験データとの比較、照合の結果においても、一致していることを確かめることができた。この結果、無線機の同定にスペクトログラムパターンを適用することは有効であることを確認できたので報告する。

2 室内実験データ

室内実験は、高速データ取得装置によって行う。構成及び無線機からの信号接続と装置の設置等については、受信機能付高速データ取得装置の開発編の高速データ取得装置の説明のところで述べてある。ここでは、割愛する。実験に

使用した無線機は、3社、6モデル、24台である。本文中で使用する記号 α は144MHz帯、 β は430MHz帯を示し、A、B、Cは製造メーカを示す。各無線機との関係については、付1. 無線機仕様一覧表を参照のこと。

図1は、3社、6モデルの代表的な立上り時の振幅包絡線波形を示す。縦軸は振幅を単位mVで、横軸は経過時間を単位msで示してある。上段に示したA社の場合、主立上りを迎える前に短時間で収束するパルス状の波形が観測される。主立上りでは、いったん、オーバシュートの現象を示し、その後、緩やかに減衰して一定のレベルに到達する。B社の場合、オーバシュートして徐々に減衰して一定のレベルに収斂している。A社と異なる点は、パルス状の波形が観測されていないことと、オーバシュート期間中の継続時間が長いことと、パターンが丸みを帯びていることである。C社の場合、オーバシュートの現象は見られないが、緩やかにレベルが増大し、飽和するために要する時間が比較的長い。このように三者三様の包絡線波形のパターンを示す。

図2は、立下り波形を示す。この図で各社の各

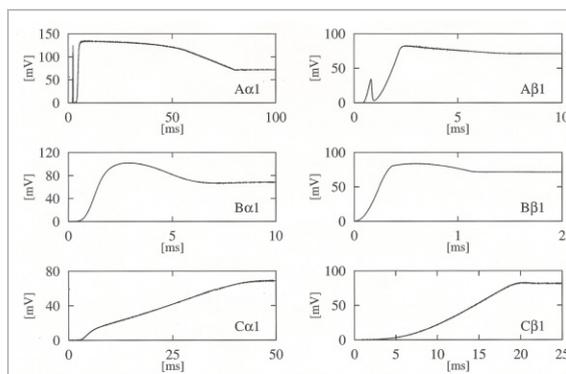


図1 各モデルの立上り時の振幅包絡線波形

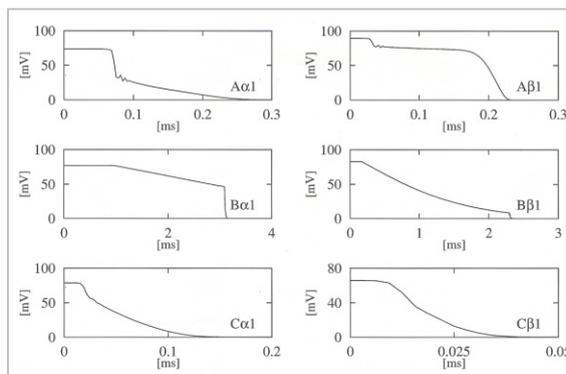


図2 各モデルの立下り時の振幅包絡線波形

モデルに共通することは、強制的に信号レベルを遮断され、立ち下がりには要する時間が極端に短く圧縮されている。このため、無線機の識別に必要な情報量が立ち上がりデータと比較して少なくなっていることが分かる。今後、以上の理由から、無線機識別用データとして、立上りデータを対象に検討することにする。

2.1 データ処理の方法と特性

図1で示したように、無線機メーカー、モデル毎に振幅の包絡線波形が異なることが理解できた。データ処理に当たり、図3に示すような、閾値間タイムラグを規定する。規定の仕方は、振幅が飽和したレベル(V)を100として、遷移途中の振幅電圧(V_s)を10%刻みで規格化する。この遷移課程を閾値と表現することにする。閾値間タイムラグ Δt は、振幅飽和レベルを0(ms)として、規格化した10%刻みの各点に相当する V_s に到達するまでの時間を示すものとする。図4に、閾値間タイムラグ Δt と規格化した閾値を10%ステップの電圧比率として取り扱い処理した代表例で

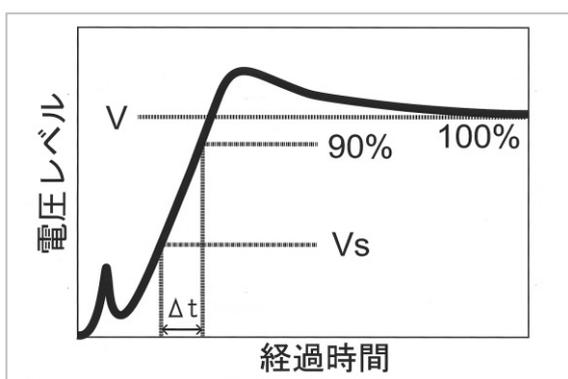


図3 閾値間タイムラグの定義

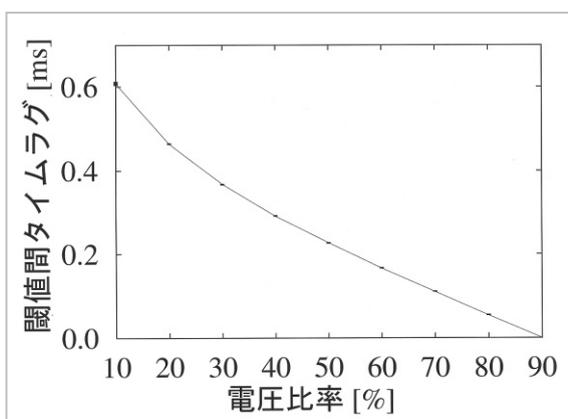


図4 閾値間タイムラグ Δt と電圧比率

ある。この例は、A社、144MHz帯モデル1を10回連続測定を行い処理した結果である。図中に平均値からの誤差範囲をエラーバーで示してある。無線機の包絡線波形の評価方法として、室内実験データに適応して検討した特性評価結果について以下に述べる。

2.2 閾値間タイムラグと電圧依存特性

図5に閾値間タイムラグ電圧特性を示す。無線機の電圧依存特性を試験するために、無線機を恒温槽中に取り付けて、温度+25℃で、電源電圧を15.2V、13.8V、12.4Vの各設定電圧で測定を行い、データの平均化処理を行った。電圧変化と閾値間タイムラグの関係は、電源電圧を上げると、閾値間タイムラグは減少する傾向を示した。この傾向は各社の各モデルについても共通した特性を示す。C社の $\alpha 1$ モデルについては、他の示す特性より少し強い反応を示した。

2.3 閾値間タイムラグと温度依存特性

図6に閾値間タイムラグ温度特性の測定例を示した。無線機の温度特性を得るために、恒温槽を使用して、+40℃、+25℃、-10℃の各設定温度で10回連続測定し平均化を行ってその誤差範囲をエラーバーで示した。3社、6モデルに共通していることは、設定温度が低くなるに従って、閾値間タイムラグ短くなり、温度依存性を示している様子が分かる。その中で、C社の α と β の-10℃で示す閾値間タイムラグ特性の変化が大きいほか、ほぼ似た傾向を示した。ただし、A社 β モデルの-10℃の測定例中で、電圧比率10~20%間で傾向が大きく変化しているのは、本立上り前のパルス状波形の影響を受けたためである。

2.4 閾値間タイムラグと個体間の特性

図7に閾値間タイムラグと4台の無線機の個体間の特性を示した。この時の測定条件は、温度+25℃、電源電圧を13.8Vの通常の動作状態で行った。全体的に個体間の特性のまとまり具合は整っているが、A社の $\alpha 1$ に限り異なる特性を示した。図8に閾値間タイムラグと各モデルとの関係を示した。この図から、同一メーカーのモデルについては類似した特性を示すことからメ

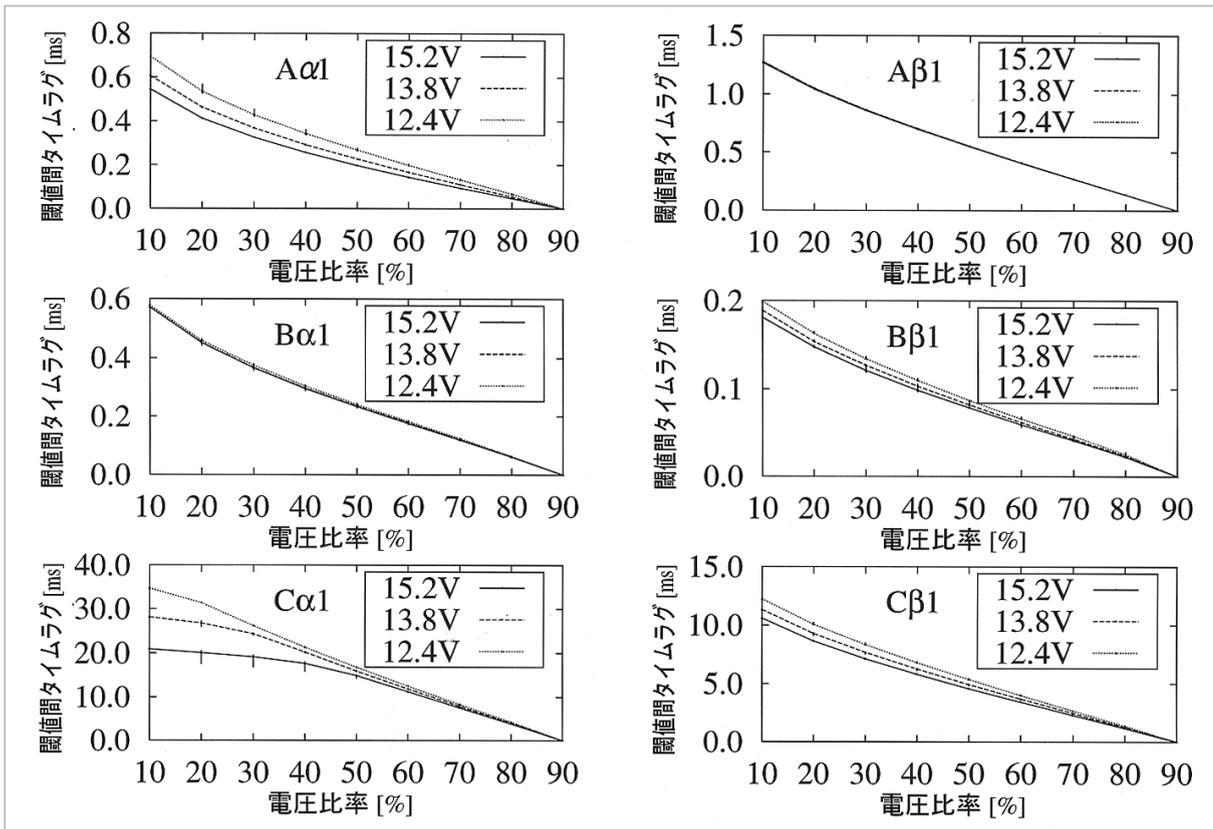


図5 閾値間タイムラグと電圧依存特性

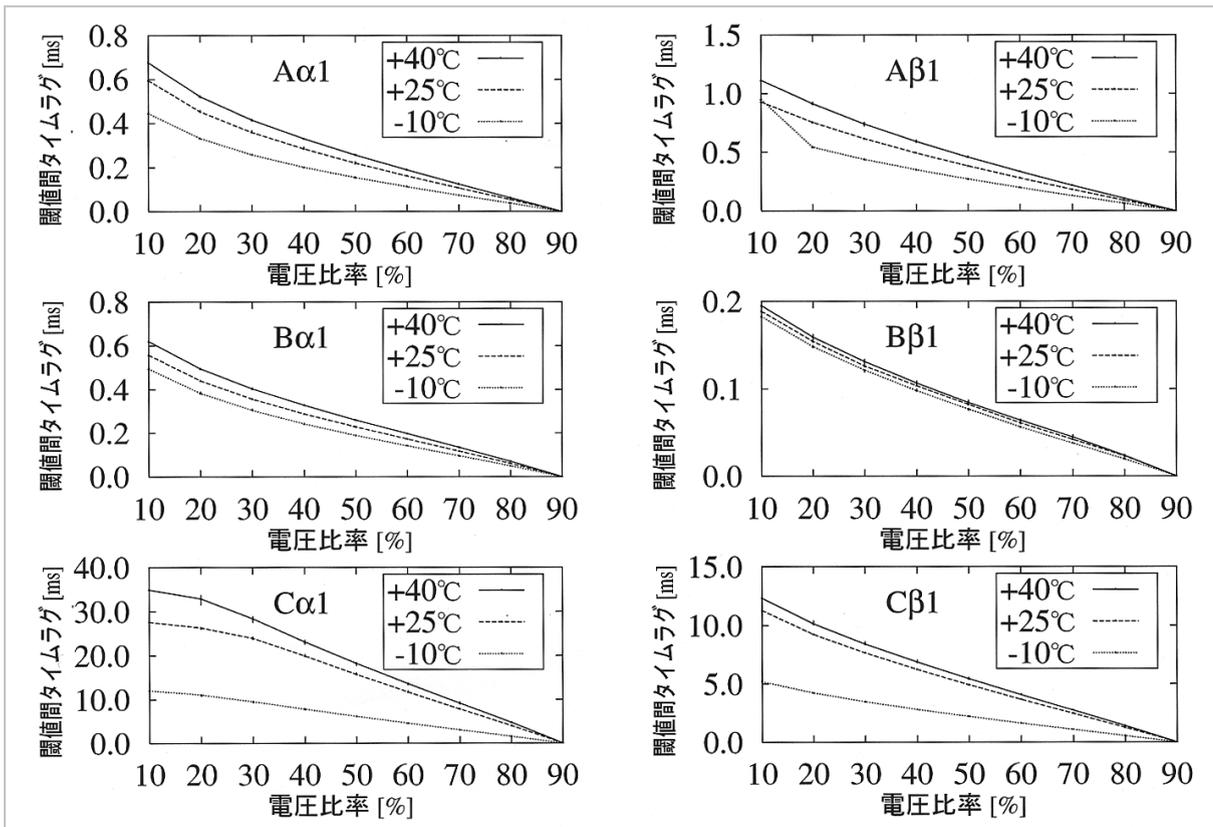


図6 閾値間タイムラグと温度依存特性

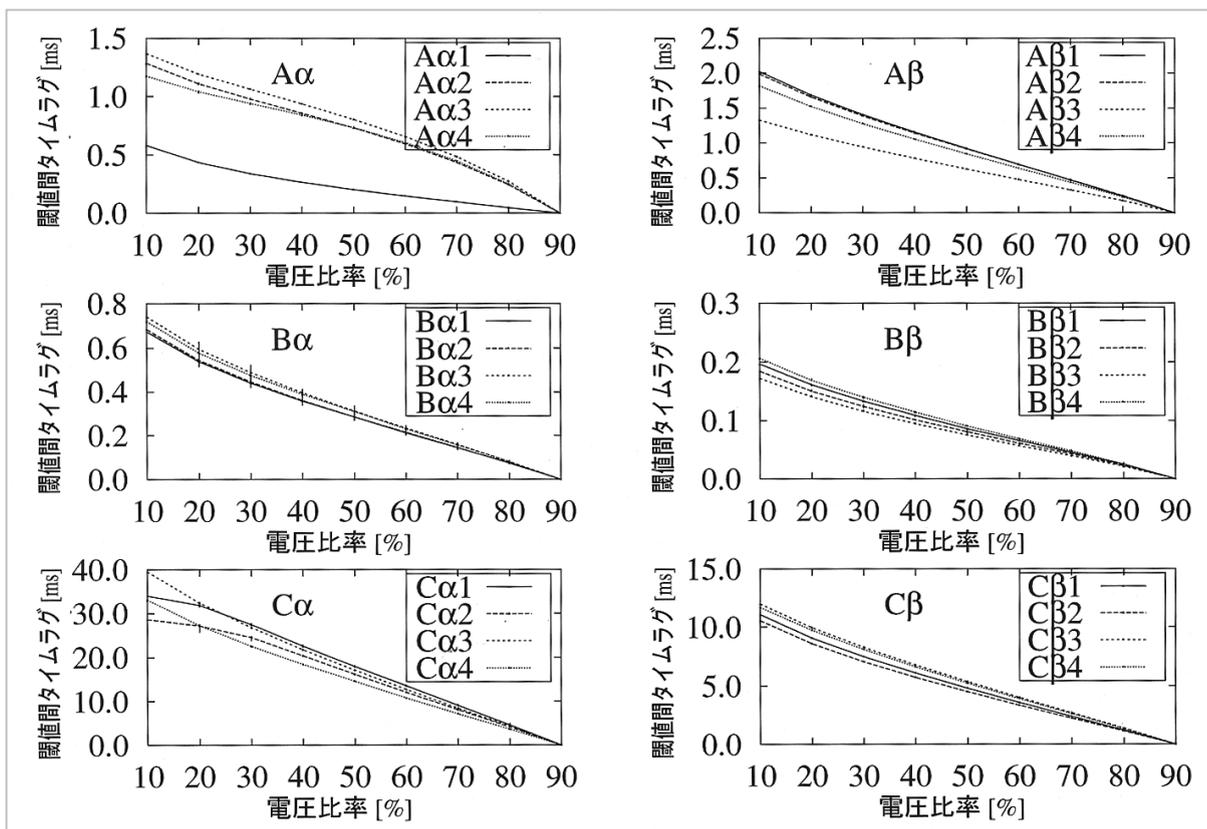


図7 閾値間タイムラグと個体間の特性

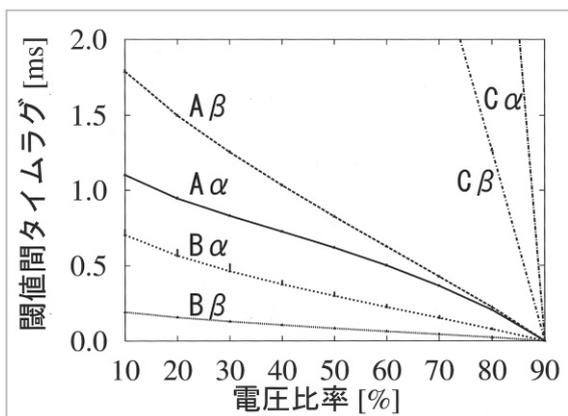


図8 閾値間タイムラグと各モデルとの関係

一カ別に分類でき、さらに、モデル別については、閾値間タイムラグが各モデル毎に異なり識別可能であることが分かる。しかし、個体間の識別となると、対象無線機の数拡大した場合、この手法のみでの識別に困難性が生じる。後編の時間-周波数空間の特徴量の検討で、より詳細な無線機の同定の可能性について述べる。^[5]

3 アンテナ経由による実験

実験項目は無線機毎に受信機入力レベルとS/N、IF帯域幅、トリガポイント等の条件を種々変えたデータの取得実験を行った。実験に当たり不確定要素をできる限り排除し、信頼性を得るために送受信アンテナを個別に設置した。設置に当たり筐体輻射等の影響を考慮してアンテナ間を300m程度離して取り付けた。ただし、アンテナ間には4階のビル等が介在し見通し距離の関係が成立しないよう配慮した。

図9は市販のデスクトップ型アンテナを実験用アンテナとして3号館屋上に設置した状態を示す。無線機とアンテナ間にアッテネータを接続し送信出力を調整し受信側にて受信機入力レベルが希望するレベルになるように配置した。無線機への電源供給には外部から安定化電源を使用する等、測定条件は室内実験と同じ設定で行った。付1に室内実験に使用した無線機仕様の一覧表を示す。この表の備考欄に○印で示す無線機は今回の実験で使用した無線機を示す。



図9 屋上に設置した実験用アンテナ

3.1 アンテナ経路による取得データ

アンテナ経路によるデータ取得実験では、同じ帯域内の隣接無線局からの干渉やS/N比の低下によるデータへの影響等が考えられる。そこで一連の取得実験で得たデータから具体例を示し、それらのデータが無線機の識別の有効性について考察を行う。隣接無線局の干渉や雑音の影響を受けた場合の振幅波形の測定例を図10で示す。i社 TR51、145MHz FMトランシーバ、送信出力5wをAtt=30dB挿入し、受信機入力レベルPin=-110dBm、S/NR=7.2dBをアンテナ経路で高速データ取得装置で得たものである。

図11に室内実験で得た振幅波形を示す。両者の測定データを比較すると、アンテナ経路での測定データは全体的に雑音が重畳して立上り波形の特徴も識別できないほど信号が歪んでいる様子が分かる。この時のIQデータに基づいて、FFTで周波数領域に変換してスペクトログラムで表示した例を図12に、また室内実験データによるスペクトログラムを図13にそれぞれ示した。

図10の振幅波形が雑音の影響を支配的に受けていると思われたのが、実際は、隣接無線局の干渉であることがここで明らかになっている。図12から分かるように、目的の信号、干渉波、

雑音が切り分けられて表示されている。干渉の程度により振幅波形への影響は異なるが、スペクトログラムへの影響を両者のパターンを重ね合わせて調べたところ、干渉によるパターンの変形や歪み等が観測されず良好な結果を得ることができた。この比較結果については、後ほどスペクトログラム・パターンに展開した図に基づいて明らかにする。この章でのまとめとして、室内実験で得た振幅波形の特徴の抽出法を、アンテナ経路によるデータに適応して無線機識別に活用することは、余程、雑音や干渉の強度等条件が整わない限り困難であることが分かった。しかし、スペクトログラムへの影響はほとんど受けず、室内実験で得たスペクトログラムのパターンと比較した結果においてもよい特性を示し、無線機の識別に有効であることが分かった。次の章でスペクトログラムのパターン有効性について更に検証する。

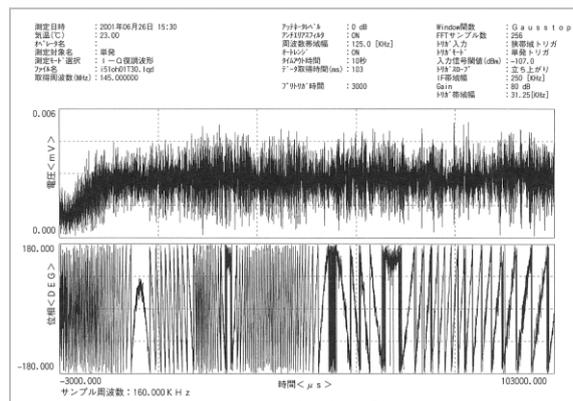


図10 Tr51が干渉を受けた場合の立上り波形の測定例

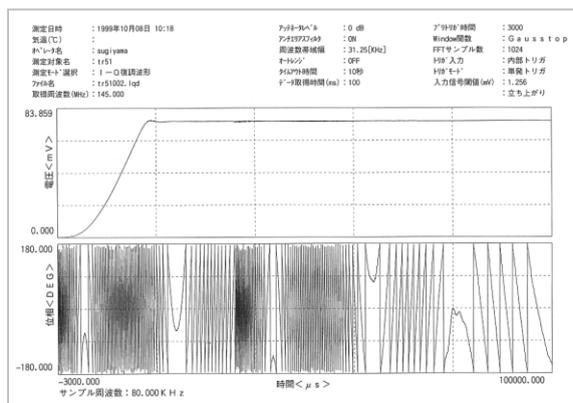


図11 Tr51の室内実験で得た立上り波形の測定例

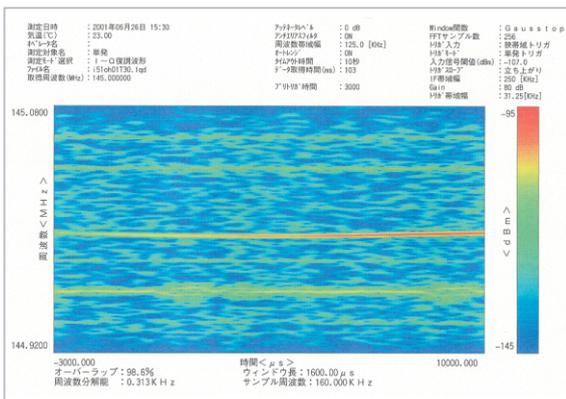


図12 Tr51が干渉を受けた場合のスペクトログラム

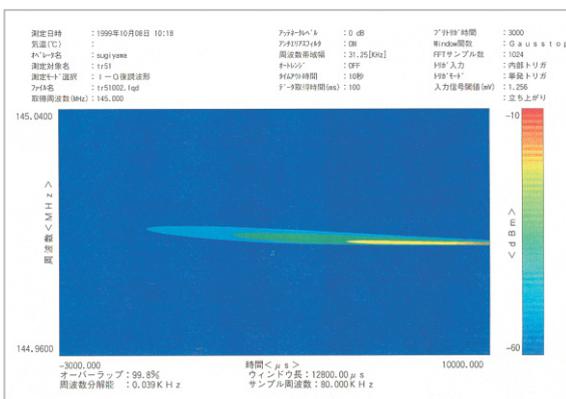


図13 Tr51の室内実験データから得たスペクトログラム

3.2 データ処理

アプリケーションソフトを起動してIQデータに基づいてFFTで変換したスペクトログラム表示が可能であることは前の章で示した。このスペクトログラム表示を用いてカーソルを移動し指定することにより、各点の周波数とスペクトルの強度の読み出しが可能である。この機能を利用して、スペクトログラムの描いたパターンについて詳細に検討を行う。

この機能を利用する場合、1画面で表示可能な範囲は、10msに制限されている。そこでスペクトログラムの全体のパターンを描き出すために、1ms毎の周波数、スペクトル強度をスペクトルの最大値にカーソルを移動して読み出した。

図14の上段、下段にi社のTr51トランシーバでの実験例を示した。送信レベルをアッテネータ値で0、10、20、30dBと切り替えた時の読み出しデータに基づいて記号を変えてグラフにして示してある。図14上段の周波数と経過時間との関係では、0～20dBまでは徐々に前の方に変

化しているが、30dBになるとパターンが前の方に大きくシフトする様子を読みとれる。ここで、トリガ設定とパターンのシフトについて検討した結果について述べる。i社のこのタイプの無線機が20～40msにかけて周波数ステップが起こることが、室内実験で確認されている。Att=0dBの場合、この図からTr51はトリガ開始から33ms後に周波数ステップが起こることが分かる。今回の実験で入力レベルPinをアッテネータで切り替えた場合の周波数ステップの発生ポイントの変化の様子を①→④で示した。①→③までは変化が少ないが、室内実験より2ms程度前にシフトしている。③→④では5ms程度更にシフトしている。ただし0～20dBまではトリガ設定をそのままにして、30dBで-97dBm～-107dBm変更してある。このパターン全体がシフトする原因は、トリガ設定値の変更による効果とS/N比の低下による影響を受けたために生じたものである。しかし、この現象によるパターンの変形等の影響は関係なかった。

図14下段は、スペクトル信号最大値と経過時間との関係を示している。立上り開始から10数msにかけて信号レベルは緩やかなカーブを描きながら上昇してその後はレベルが安定している。アッテネータの10dB毎の切り替えに対応して信号レベルも変化し期待した通りの値で観測された。この結果、装置の動作や、関係ソフトウェアが正常に動作していることを併せて確認できた。

図15は所有する4台の無線機の周波数ステップと発生する時間関係を室内データに基づいて整理し、トリガレベル0dBmとして表示した。また、今回のTr51の実験結果について整理した結果をグラフに示した。

次に、立上り時の周波数変化と測定毎の変動が大きいy社のTr39無線機に着目して、周波数変化と変動の著しい区間である立上り開始から40msにわたり、10回の測定データから1ms毎の最大周波数を読み取り、図16に、周波数平均値とともに上から順に並べて示した。これらの図に基づいて整理すると、この無線機の立上り初期に現れる周波数変化が落ち着くまで16ms程度を要して、その後は収束するという共通した傾向がはっきりしている。次に、最大周波数-時

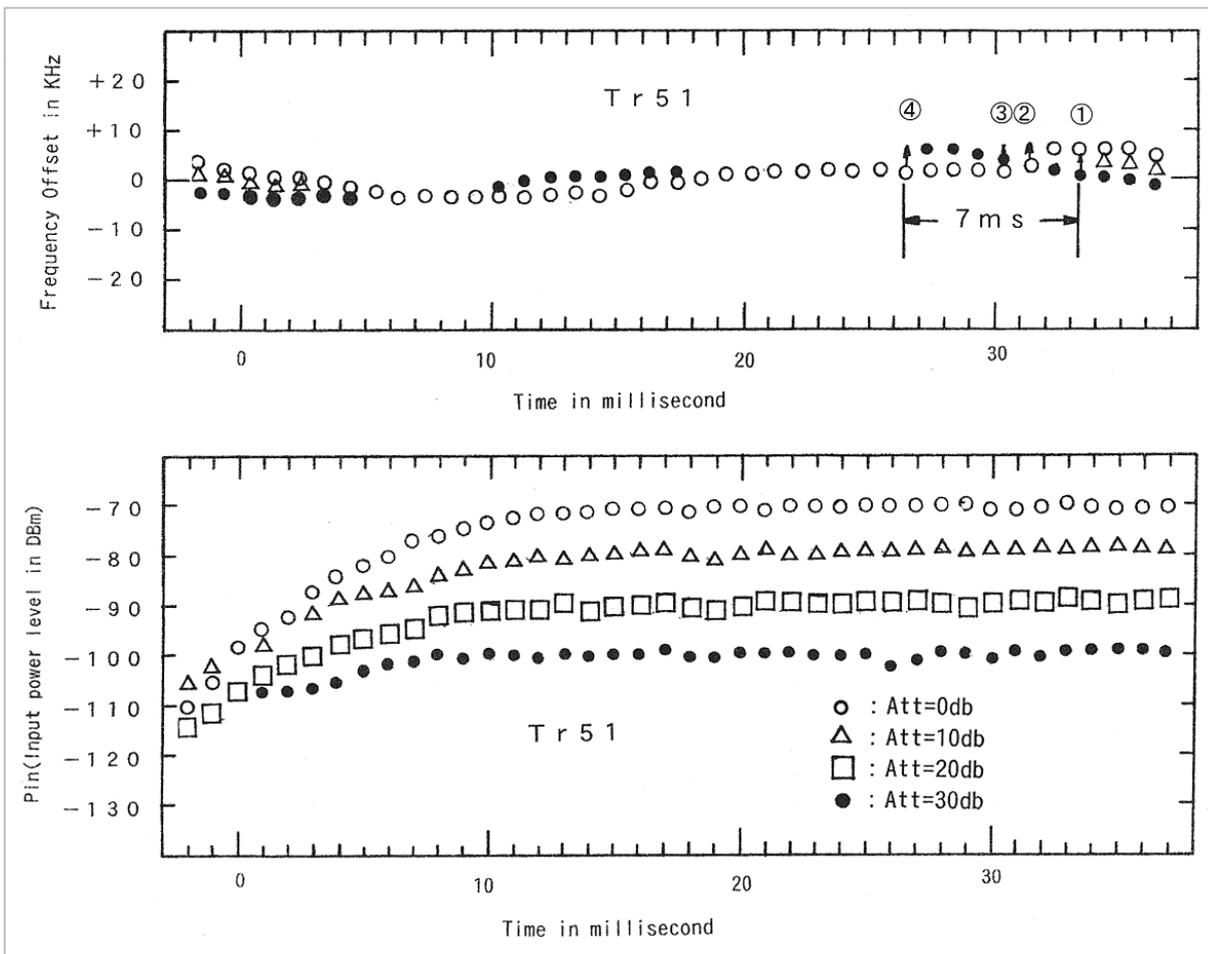


図 14 上段: 送信レベルを 10dB ステップで切替えた時の周波数と周波数ステップ
 下段: 送信レベルを 10dB ステップで切替えた時のスペクトル強度最大値

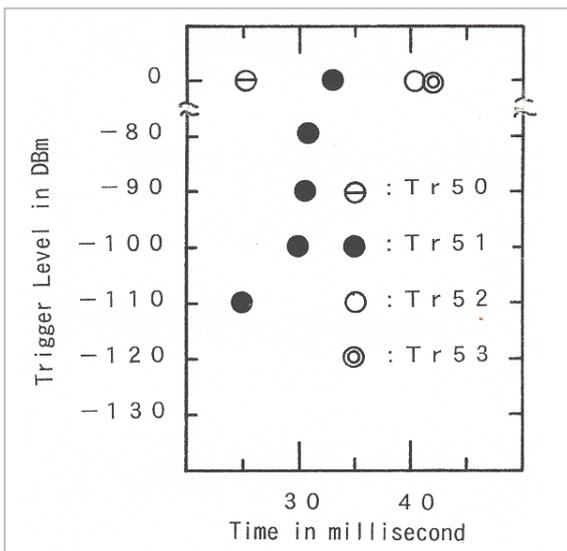


図 15 i社 Tr51 と同一モデルのトリガレベルと周波数ステップの関係

間空間の周波数平均値について見てみると最大周波数の平均値が Att=0 から Att=30dB にかけて

徐々に早まって現れている。これは Tr51 の実験例で示したようにトリガーレベルの設定の影響によるものである。また、平均値に関して、中央に位置せず若干偏りをもつことがこの無線機の特徴をよく示している。

図 17 に、所有する 4 台の同モデルの室内実験の結果を整理した図を示した。この図に示すように周波数-時間空間に現象が重なってしまう場合、無線機の機別の識別が困難となり、今後の課題となる。

図 18 に、Att=10dB の実験結果と、室内実験データでの同様の処理をした結果を示す。●印は最大周波数が発生する周波数-経過時間との関係の平均値を、縦方向と横方向の矢印は平均値からの変動幅を示す。○印は今回の実験結果に基づいて処理した結果をそれぞれ表示した。この図から最大周波数の平均値はほぼ似た傾向示したが、これに対して、最大周波数が発生する

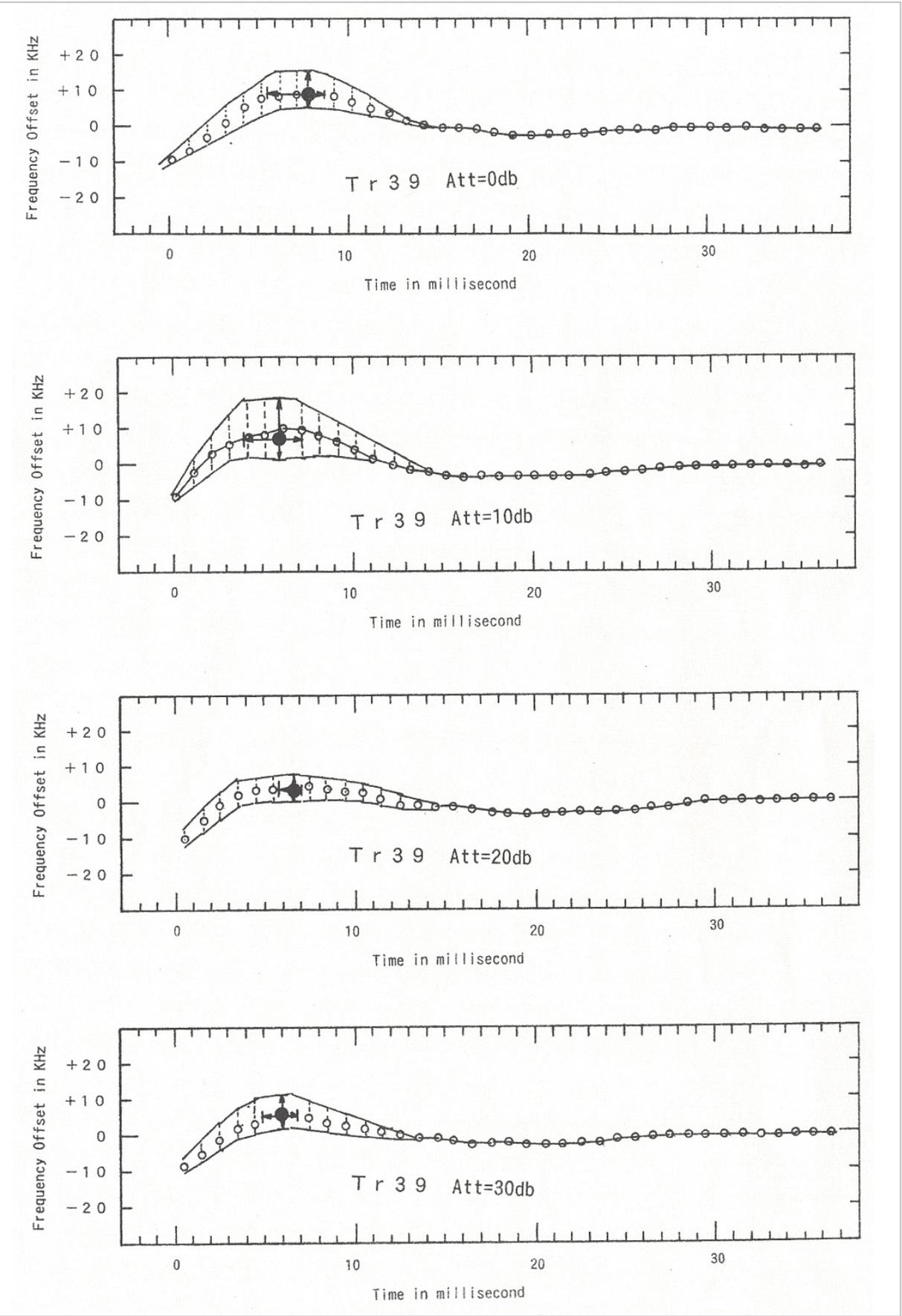


図 16 y社 Tr39の送信レベルを 10dB step で切替えた場合の立上り特性の処理結果

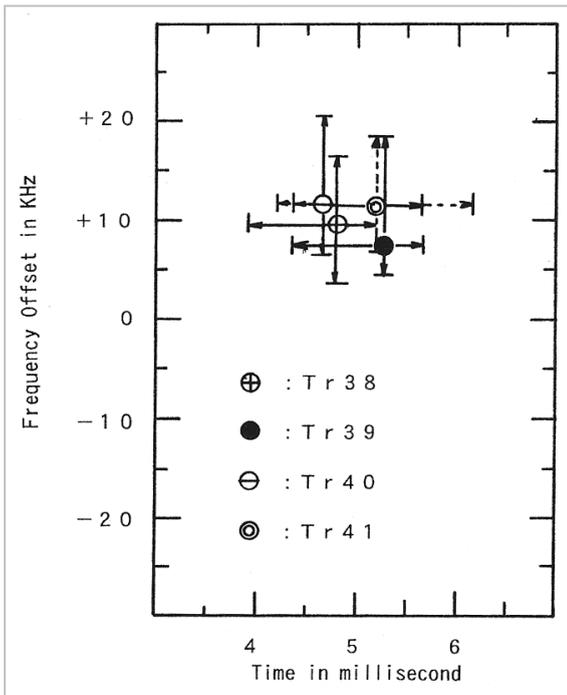


図 17 y社 Tr39と同一モデルの周波数ピークが発生する時間-周波数空間上の関係

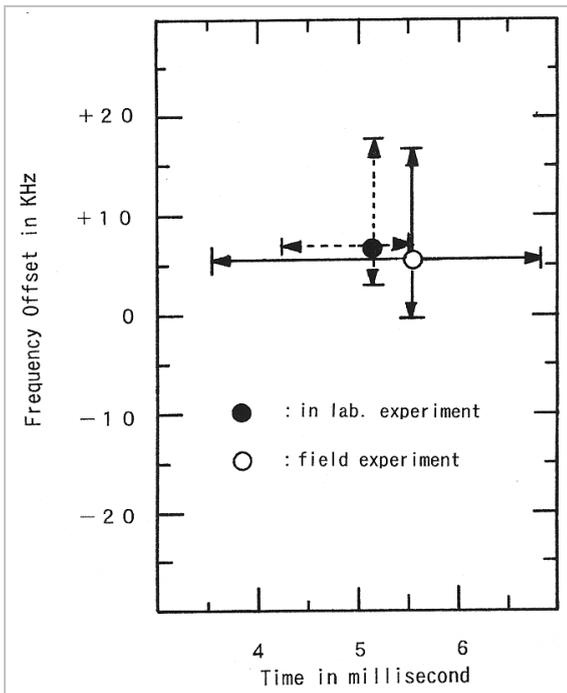


図 18 室内実験とアンテナ経由による実験結果の比較例

時間の変動幅に関してアンテナ経由での実験結果が2倍程度に変動幅が悪い結果となっている。これは、受信機能を追加したために、付加雑音の影響を受けたことによるものと思われる。

4 スペクトログラム・パターン

取得データからスペクトログラムに変換し、さらに、無線機の特徴を適切に表すスペクトログラム・パターンに変換する。パターンの照合を効率よく行うためには、適切なスペクトログラム・パターン表示手法の必要性が重要になってきた。前章のデータ処理で使用した最大表示10msの画面表示からの読み出しデータによる処理では不十分で、迅速にスペクトログラム・パターンの全体像を把握できるツールが必要になった。そこで、データ解析法の研究で開発されたソフトウェアの適応を試みた。

図19にi社 Tr51にこのソフトウェアを適応した時の例を示す。上段(a)に振幅の絶対値が表示されている。下段(b)のスペクトログラム・パターンは、データ長 Nfft=1024 の高速フーリエ変換 (FFT) を行い、スペクトログラムを計算し、データ取得時間全体にわたり最大信号レベル Pmax の95%から10%までを0.05ステップの等高線でパターン化して表示している。デシベル表示選択の場合は、Pmax の1dBから2dBステップで-22dBまでの表示となる。データ長 Nfft=1024 を採用した理由は、周波数分解能と時間分解能及びスペクトラム密度の広がり具合から決めた。縦軸は中心周波数からの周波数偏差をこの場合は±15kHz範囲で示し、横軸はトリガ開始ポイントからの経過時間を102msに亘ってパターン化して表示してある。このツールは対話式で表示形式をリニヤとデシベルの選択が可能で、周波数のレンジ等を適切な大きさのパターンが得られるように工夫されている。この図から、この無線機 Tr51 の固有の周波数ステップが完璧にスペクトログラム・パターンとして捉えている様子が分かる。

図20は、図19のときよりアッテネータ値を30dB挿入し、強い干渉を受けた場合の振幅波形の絶対値とスペクトログラム・パターン及び干渉波をスケールダウンして示した。両図の振幅波形を比較してみると前者では振幅波形は若干、雑音の影響と隣接局からの干渉を受けている様子が窺える。しかし、後者の振幅波形になると干渉波と雑音の影響が支配的になり信号波形の原型が確認できないほどに劣化している。図13

と図14の周波数ステップの起こったポイントに着目してみると、図14の場合、トリガ設定の変更とS/N比が24.3~7.2dBと変化したためにパターン全体が約4 μ s見かけ上早く立上っている。両図のスペクトログラム・パターンを重ね合わせて一致具合を調べた結果、スペクトログラム・パターンの変形等の影響はほとんどなく両者のパターンはよい一致を示した。

図21、22にy社Tr39に適応した場合の振幅波形とスペクトログラム・パターンの計算結果を示した。この無線機は0~30msにかけて立上り時の周波数変化が激しく振動し、その後は設定周波数に収斂する特性を示している。測定毎の変動を明示するために測定を10回連続して行い、その中で周波数変化の最大と最小の測定例を選んで示してある。所有する4台の同機種について周波数変動と現象の時間との関係について室内データに基づいて処理した結果は図11で示した通りである。この図で着目してほしい点は、4台の無線機の特性的発生する位置関係が重なり合っていることである。このように特性が重なり合った無線機の識別を行うことは、現在の所、不可能である。このような特性を持つ無線機の識

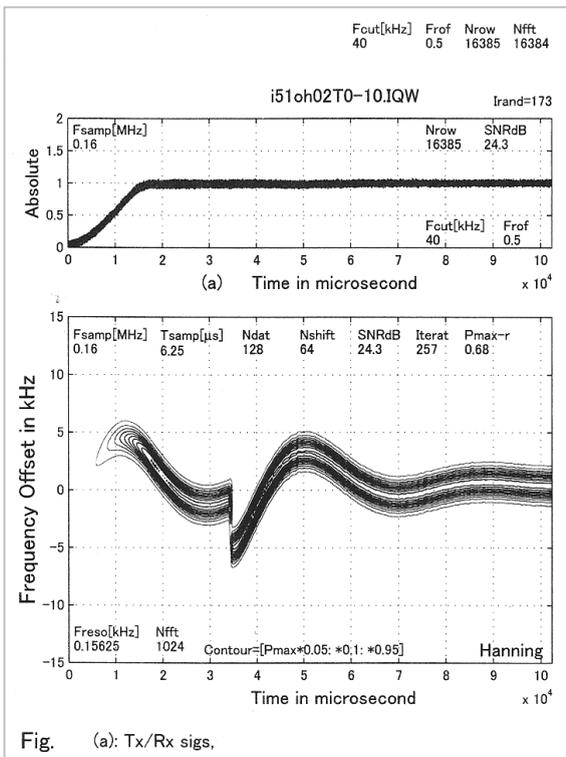


図19 Tr51の振幅波形とスペクトログラム・パターンへの適用例

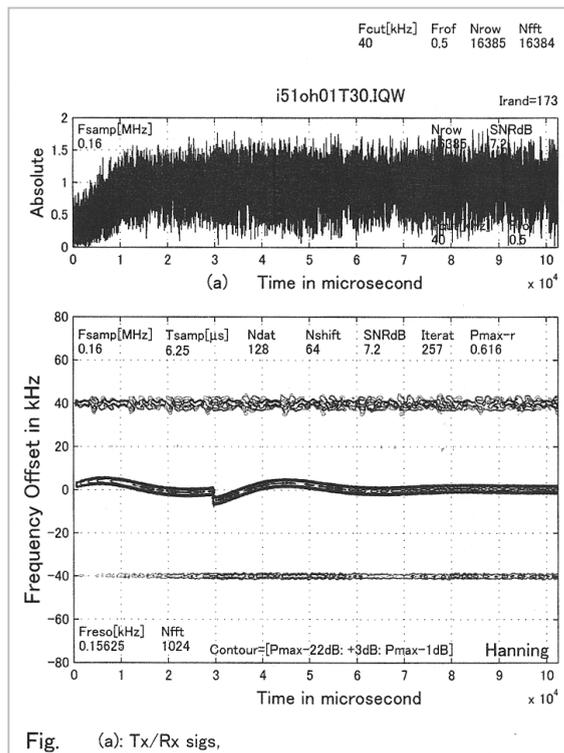


図20 Att=30dB挿入、強い干渉受けた場合の振幅波形とスペクトログラム・パターン

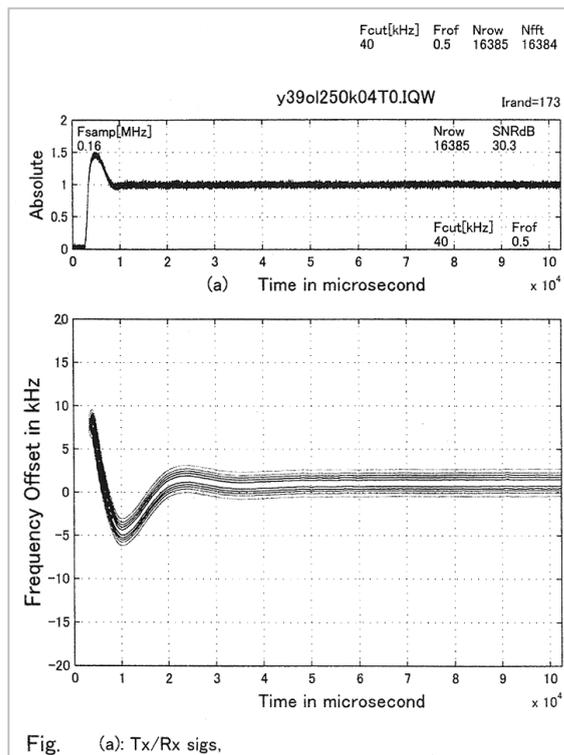


図21 Tr39のスペクトログラム・パターンへの適用例(1)

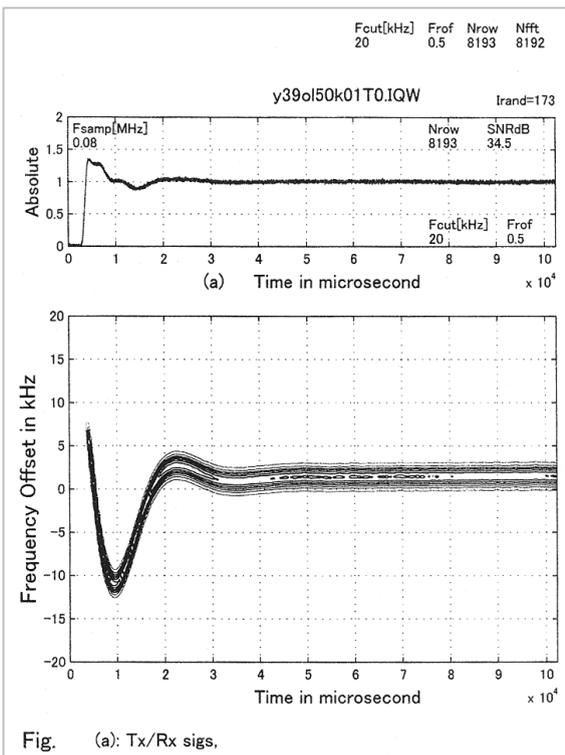


Fig. (a): Tx/Rx sigs.
図 24 Tr39 に IF 帯域制限 50kHz をかけたときの振幅波形とスペクトログラム・パターン

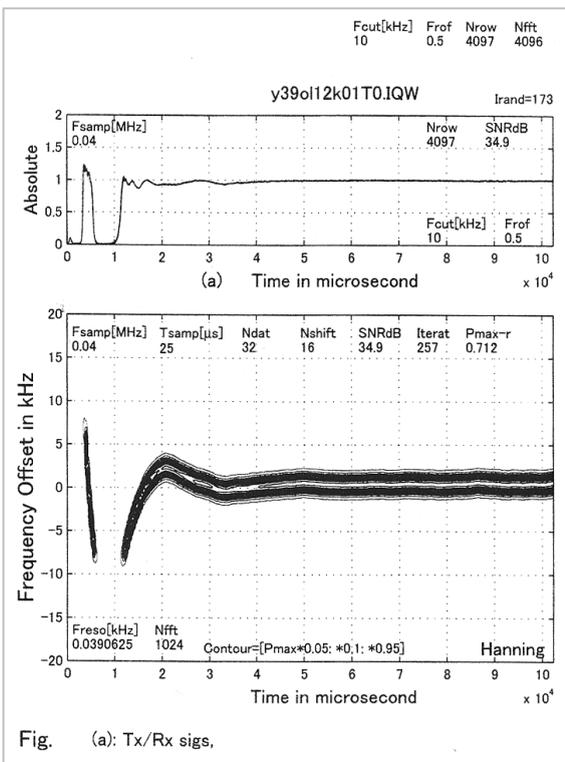


Fig. (a): Tx/Rx sigs.
図 25 Tr39 に IF 帯域制限 12kHz をかけたときの振幅波形とスペクトログラム・パターン

され無線機の識別が可能になることが分かる。以上のことをまとめると、スペクトログラム・パターンと帯域幅の関係は、帯域幅が狭くなればなるほど、雑音を抑圧してS/N比を改善する効果に期待できる。しかし、その反面、必要とする信号の情報が失われるおそれがある。時間領域の振幅波形はこの影響が大きく、振幅波形の特性が低下する。これに反して、周波数領域のスペクトログラム・パターンでは影響を受けた部分がはっきり確認できる。雑音の影響が大きい状況下に置いて、無線機の識別を行う場合、狭帯域化の信号処理して得たパターンも有効に活用できることが分かった。

6 ウィグナー分布との関係

ウィグナー分布は高速フーリエ変換 (FFT) による計算で、周波数分解能と時間分解に優れるという利点から、当初、無線機の同定に適用することを目的に研究を行ってきた。しかし、今回の一連の実験データの解析にFFTによる手法を適用してきた。この適用理由は、瞬時周波数表現は時間変化に対して良く反応するが、雑音や干渉の影響を直に受ける特徴がある。疑似ウィグナー分布は、スペクトログラムに比べて、2倍の周波数分解能を持つが取り上げた報告例では顕著な差は見られない。[6] そこで、雑音や干渉の影響に対応できる手法として、一般的なFFTによるスペクトログラムを適応させることとした。FFTによる手法を適応させる場合、適正なデータ長を選択することで、周波数分解能と時間分解能を低下させずに十分に適用できることが分かった。ここで、データ長と周波数分解能と時間分解能の関係について説明をする。

図26は、データ長Nfft=128で計算したスペクトログラムを示す。この場合、今までのデータ長Nfft=1024で処理したスペクトログラムの周波数分解能が1/8、時間分解能を8倍程度に相当する。このスペクトログラムはデータ長Nfft=1024で処理した結果と比較して、周波数分解能の低下と時間分解能の不適性により周波数変化の激しいところで、全体的に滑らかさが失われている。このようなことから、周波数分解能と時間分解能との兼ね合いにより、データ長Nfft=1024

で今回の実験データの解析を行うことにした。次に、ウィグナー分布とスペクトログラムとの関係を同一の実験データに基づいて計算したそれぞれの結果を参考にして、計算手法の違いによる特徴を整理することにする。

まず、図27にFFTによるスペクトログラム・パターンをlogスケールで表示した結果を示す。次に、図28にウィグナー分布による計算結果を同じlogスケールで表示した。両者を比較すると、雑音の影響とスペクトラムの幅が異なって表示されていることに気付く。この雑音の影響とスペクトラムの幅の広がり具合は、ウィグナー分布の方が周波数分解能に優れているため雑音の強く影響を受けやすい反面、スペクトラムの幅が狭くなって計算されている。しかし、基本的なパターンは両者とも一致しており、無線機の識別に適応する上では問題とならない。各種データ解析法の特徴及び評価の詳細についてはデータ解析法(編)を参照のこと。

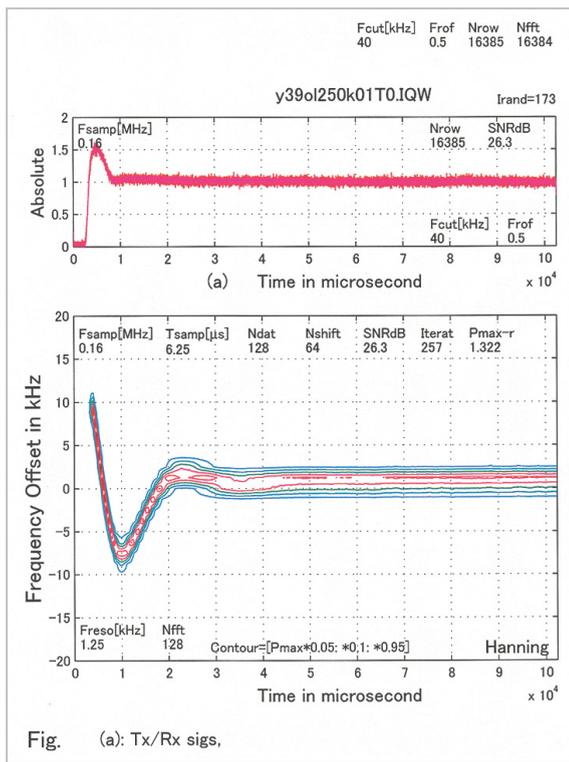


図26 データ長 Nfft=128 で処理した場合の振幅波形とスペクトログラム・パターン

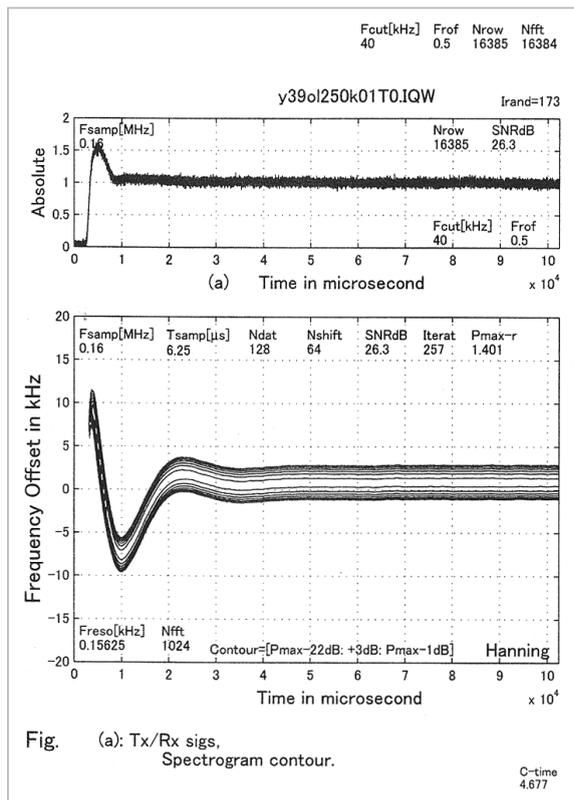


図27 データ長 Nfft=1024 で処理した場合の振幅波形とスペクトログラム・パターン

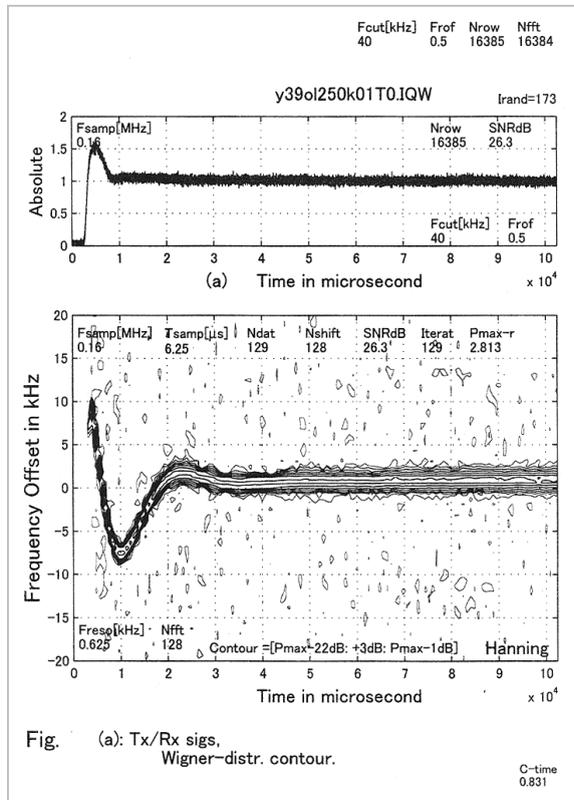


図28 ウィグナー分布で処理した場合の振幅波形とスペクトログラム・パターン

7 まとめ

受信機能付高速データ取得装置による実験では、Pin(受信機入力換算値)の変化に伴うタイムドメインの立上り包絡線波形とスペクトログラム・パターンへの影響について検討した。この結果、タイムドメインの立上り包絡線波形への影響は、Pinの低下に従い、外部雑音の影響でS/N比も低下する。さらに、隣接無線局からの干渉等により、室内実験で得たnoise freeでの状態と比較してタイムドメインの波形歪みが激しく、無線機の識別にタイムドメインの波形情報を適用することはほとんど難しいことが明らかになった。これに対して、スペクトログラムは、信号、雑音、干渉波が周波数別に分離できスペクトログラムに影響を与えないことが、室内データに基づくスペクトログラムとの比較検証の結果明らかになった。また、帯域制限をかけた場合、帯域外の周波数成分が遮断されるだけで、スペクトログラム・パターンに影響を与えないことが検証され、無線機の識別に適用すること

が有効であることが分かった。これまでの実験でスペクトログラム・パターンによる無線機識別に適応した場合、モデル毎の識別は可能であるが、同一モデル内の機別の識別は、一部の無線機に見られるように周波数-時間空間で現象が重なって観測される場合、この方法では識別ができないことが今後の課題として残る。

謝辞

本研究は郵政省(現総務省)の協力依頼事項として、本省の支援のもとに行われた。研究期間中の本省及び通信総合研究所の関係者に深く感謝する。また、装置の開発に協力を頂いたAgilent Technologiesの鈴木康雄氏、加藤好忠氏、さらに、無線局の申請等に協力を頂いた三木千紘主任研究官、論文の出版に際し貴重なご意見を頂戴した磯部俊吉科学技術情報グループリーダーに感謝する。

参考文献

- 1 電波利用のホームページ, <http://www.tele.soumu.go.jp/>
- 2 市野芳明, 鈴木 晃, 杉山 功, 鎌田満博, “無線機同定へのウィグナー・ビレ分布の応用について,” 信学論(B), Vol.J77-B-II, No.10, pp.584-586, Oct. 1994.
- 3 塩原 和, 小島信男, 地濃力男, 高橋 達, “プレストーク方式送信機の送受切替時における過渡周波数変動”, 電波季, 17, 90, pp.281-268, May 1971.
- 4 杉山 功, 渋木政昭, 平野隆之, 岩崎 憲, “無線機同定システムにおけるデータ取得システムと無線機の立上り波形,” 2000信学総大, B-4-23, Mar. 2000.
- 5 平野隆之, 杉山 功, 渋木政昭, 岩崎 憲, “無線機同定のための時間一周波数スペクトル・パターンの一考察,” 2000信学総大, B-4-24, Mar. 2000.
- 6 岩崎 憲, 平野隆之, 渋木政昭, 杉山 功, “過渡応答に基づく無線機同定のためのデータ解析法—Root MUSIC法—”, 標準計測部談話会資料, 27 May 1999

付1. 無線機の仕様一覧表

N	メーカー	型式	周波数	出力	技適・型式等	シリアルNo.	備考
30	KENWOOD	TH-42	430MHz 帯	5W/13.8V	KU071-35002	00700052	A β 1
31		TH-42	430MHz 帯	5W/13.8V	KU071-35003	00700053	○ A β 2
32		TH-42	430MHz 帯	5W/13.8V	KU071-35004	00700052	A β 3
33		TH-42	430MHz 帯	5W/13.8V	KU071-35947	01100077	A β 4
34	KENWOOD	TH-22	144MHz 帯	5W/13.8V	KV070-22017	91200127	A α 1
35		TH-22	144MHz 帯	5W/13.8V	KV070-22326	00100176	A α 2
36		TH-22	144MHz 帯	5W/13.8V	KV070-22825	00400275	A α 3
37		TH-22	144MHz 帯	5W/13.8V	KV070-24234	01200094	A α 4
38	YAESU	FT-40N	430MHz 帯	5W/12V	KU167-04935	9D230035	B β 1
39		FT-40N	430MHz 帯	5W/12V	KU167-04936	9D230036	○ B β 2
40		FT-40N	430MHz 帯	5W/12V	KU167-04937	9D230037	B β 3
41		FT-40N	430MHz 帯	5W/12V	KU167-04938	9D230038	B β 4
42	YAESU	FT-10N	144MHz 帯	5W/12V	KV166-03191	8I190091	B α 1
43		FT-10N	144MHz 帯	5W/12V	KV166-03192	8I190092	B α 2
44		FT-10N	144MHz 帯	5W/12V	KV166-03198	8I190098	B α 3
45		FT-10N	144MHz 帯	5W/12V	KV199-98023	8J066004	B α 4
46	ICOM	C-T32	430MHz 帯	5W/13.5V	KU153-03881	03881	C β 1
47		IC-T32	430MHz 帯	5W/13.5V	KU153-04637	04637	○ C β 2
48		IC-T32	430MHz 帯	5W/13.5V	KU153-05556	05556	C β 3
49		IC-T32	430MHz 帯	5W/13.5V	KU153-05711	05711	C β 4
50	ICOM	C-T22	144MHz 帯	5W/13.5V	KV152-02552	02552	C α 1
51		IC-T22	144MHz 帯	5W/13.5V	KV152-02556	02556	○ C α 2
52		IC-T22	144MHz 帯	5W/13.5V	KV152-03346	03346	C α 3
53		IC-T22	144MHz 帯	5W/13.5V	KV152-03354	03354	C α 4

備考欄の記号は本文中の無線機を指し、○印は今回の野外実験に使用した無線機を示す。



杉山 功

電磁波計測部門測定技術グループ研究員
型式検定試験法の開発



渋木政昭

電磁波計測部門測定技術グループ主任
研究員
周波数標準



岩崎 憲

電磁波計測部門測定技術グループ主任
研究員
移動通信

平野隆之

元科学技術庁 特別研究員