

無線機同定における過渡応答パターンの検討

Transient Response Patterns for Identifying Radio Transmitters

平野隆之 杉山 功 渋木政昭

Takayuki HIRANO, Tsutomu SUGIYAMA, and Masaaki SHIBUKI

要旨

プレストーク送信機のオン/オフ時に現れる立上り、立下りデータの測定・分析から、時間領域と時間一周波数空間上で、無線機のモデルごとにパターンに特徴的な振る舞いがあり、定義した特徴量の空間での無線機の分布から、モデルごとに有効な特徴量が異なることを示す。

When a press-to-talk transmitter is switched on and off, specific transient patterns in the time domain and time-frequency space are seen for each model and transmitter. We defined the characteristics necessary to identify a radio transmitter and showed that the characteristics effective for identification differs from model to model.

[キーワード]

無線機同定, 電波監視, 時間一周波数分析, 過渡応答, スペクトル・パターン

Radio transmitter identification, radio monitoring, time-frequency analysis, transient response, spectrum pattern

1 まえがき

不法無線局は、消防、航空関係などの重要な無線通信や一般業務用無線へ混信・妨害の原因となり、また、違法に出力を強くして道路沿いのテレビやラジオなどに妨害を与える。これに対して効果的な対応が強く求められ、電波環境を保護することが課題となっている。不法無線局は、改造した無線設備や車両等に搭載して使用するものが多く、さらに、呼出名称の改ざん等を行っていることから、受信した電波の通信内容等の分析では、発射無線局の特定は困難な状況である。取り締まる方法としては、従来から方向探知器などにより不法電波の発射源を求めるのが一般的な方法である。この方法で分かることは、電波の発射場所であり無線機自体でない。そこに同じ周波数帯の無線機が複数台あった場合、どの無線機から電波を発射したのか

を特定することはできない。

そこで、受信した電波から無線機を特定する手法が求められており、無線機個々から発射される電波をデータベース化すれば、不法電波を受信したときに指紋を照合するように無線機特定の可能性がある。

そのための基礎的研究として、プレストーク送信機においてオン/オフ時における様々な過渡応答パターンを測定し、これを利用して無線機の同定の検討をすることが本研究の目的である。過渡応答パターンの一つに、無線機の出力電圧のパターンがあり、これは中心周波数付近を振動しながら振幅が変化してゆくときの振幅包絡波形である[1]。そのほかに、オン/オフ時に中心周波数のふらつきがあることが、見出されている[2]。これは、スペクトルの時間発展を計算することで求めることができ、解析手法として、スペクトログラムや疑似ウィグナー分布などの

時間-周波数解析法とがある[4]。また、Root-MUSIC法、線形予測法を用いた時間-周波数解析法もある[4][5]。手法により、処理速度、分解能、雑音に対する頑健性の違いに特徴があるが、手法により、癖が現れることがある[6]。

プレストーク送信機においてオン/オフ時に特徴的な過渡応答を示すことが知られているが、その特徴は定量化されておらず、また、様々なモデル、同じモデルでの無線機個体の差などの研究はまだ十分にされていない。無線機同定の可能性を探るためには、パターンの特徴を定量化し、無線機のモデルと個体の特徴量空間での分布を求めることが重要である。

本稿では時間領域での振幅包絡線波形と、時間-周波数空間でのスペクトル・パターンから、無線機のモデル、個々の無線機に対しどのような特徴を示す。それから、特徴量を定義し、特徴量空間での無線機の分布を求め、それぞれの無線機のモデルに対して、立上り、立下りの振幅包絡線波形と時間-周波数スペクトル・パターンの特徴量の有効性を示す。

2 時間領域の過渡パターン

開発した測定装置に無線機を直結し、S/N比が高い状況での実験を行った。また、電源として外部電源を用い、定電圧にした。

なお、この実験は室温で行った。測定装置システムの構成は、FM方式による受信信号をダウンコンバータに入力し、IF信号に変換し、A/D変換器に印加し、デジタルIF信号を出力する。デジタルIF信号はデジタル直交検波部で検波され、I信号とQ信号を出力する。プレスオン時の立上り、プレスオフ時の立下りのI・Q信号のデータを記録し、時間領域及び時間周波数空間において分析を行った。

用いた無線機はアマチュア無線ハンデタイプで、無線機メーカー3社(A、B、C)、それぞれ2モデル(α 、 β)の無線機を用い測定を行った。全社ともモデル α の中心周波数は433MHz、モデル β は144MHzである。各モデルとも4個の無線機を用い、個々の無線機に対し、測定は立上り、立下り各10回行った。

2.1 時間領域立上り・立下りパターン

図1に各社モデルごとの立上り、立下りの振幅包絡線波形すなわち過渡パターンを示した。A社無線機の立上りパターンは一時的に電圧レベルが上がるスパイクが生じ、立下りは指数的に比較的早く立下るが、モデル β では下がり始めに欠けがある。B社立上りはオーバーシュートが生じ、大きさがモデルにより異なり、立下りではモデル α は徐々に下がり、途中で急激に立下り、モデル β は、ゆっくり指数的に下がり、最後に少し急激に下がる。C社立上りは、非常にゆっくりしており、他の社の無線機より、およそ一桁異なったが、下がりには極端に早かった。このようにモデルごとに、立上りと立下りは様々なパターンを示しており、無線機の識別に有力な情報であることが分かる。

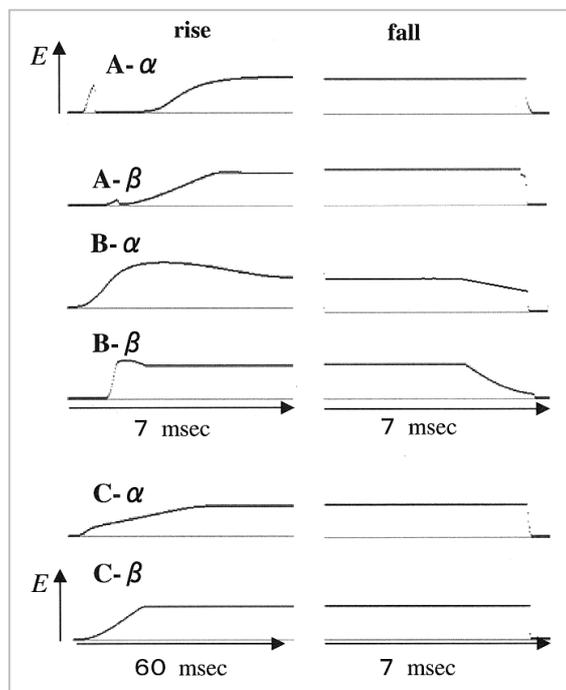


図1 無線機モデルごとの立上り、立下り振幅包絡線パターン

2.2 立上りと立下り時間の比較

パターンの特徴として、一時的に電圧レベルが上がるスパイクやオーバーシュート等いろいろあるが、振幅包絡線の定常値に対し立上り、立下りとも10%~90%となるタイムラグを特徴量として定義した。ただし、A社 α の立上りはスパイクが大きいため、分析する時点でこれを

省いた。

横軸に立上り時間、縦軸に立下り時間の10回の平均値と最大、最小値をプロットして、無線機ごとに示したものが図2である。同じモデルはほぼ同じ領域に分布している。実験で用いたモデルは6種に過ぎないが、無線機のモデルごとの傾向は、立上りが遅いモデルほど立下りが早くなり、立上りが早いモデルほど立下りが遅くなる傾向が見受けられる。

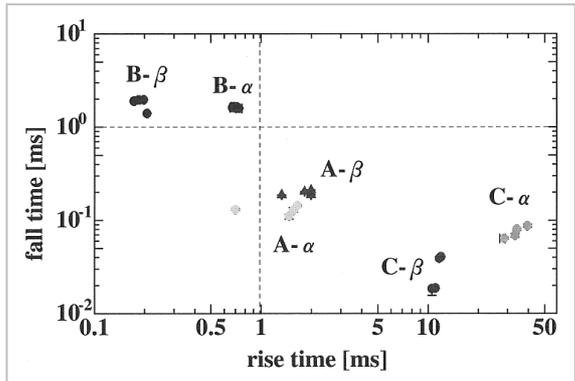


図2 立上り立下り時間特徴量空間における無線機の分布

3 時間一周波数スペクトル・パターン

過渡応答特性は非定常信号であり、これまで、様々な解析法を試みているが[4][5]、本稿では無線機のモデル、または、個々の無線機に対する過渡パターンの振る舞いの傾向を求め、無線機の同定に必要な特徴を示すことが重要点であるため、時間一周波数分析として高速フーリエ変

換(FFT)を用いて、スペクトログラムを求めた。データ長は256とし、ハミング窓を用いた。

3.1 立上り、立下り時間一周波数スペクトル・パターン

図3に各モデル、立上りと立下りの時間一周波数スペクトル・パターンを示した。各モデルで特徴的なパターンを示しており、特徴としてスペクトルの揺れの向き、周波数の飛び等がある。A社無線機の立上りにおいて時間領域でのスパイクが時間一周波数空間上では島で現れ、中心周波数より高周波側に現れている。周波数は時間に対して左右に周波数が揺れる。立下りは急激に周波数のマイナス方向にスペクトルが広がり消える。B社立上りにおいてモデル α はいったん、高周波側に揺れて中心周波数に戻り、モデル β は高周波側にオーバーシュートの揺れた。立下りパターンではモデル α は高周波側に、いったん、周波数が飛んでしばらくして元の周波数に戻り、ある程度時間がたってからスペクトルが消え、モデル β は低周波側に飛んでから、高周波側に流れるようにしてスペクトルが消失した。C社立上りパターンはA、B社に比べてかなり遅く、立上り時に周波数の飛びが見られることが特徴であり、飛びの出る位置が個々の無線機で異なった。立下り時は数回飛びが起きてから、スペクトルが消失した。

時間領域のパターンと時間一周波数空間上のパターンを比較すると全体的にタイムスケール的にもまた、各空間上での特徴的な変化は別々に現れているものが多い。立下り時は時間領域

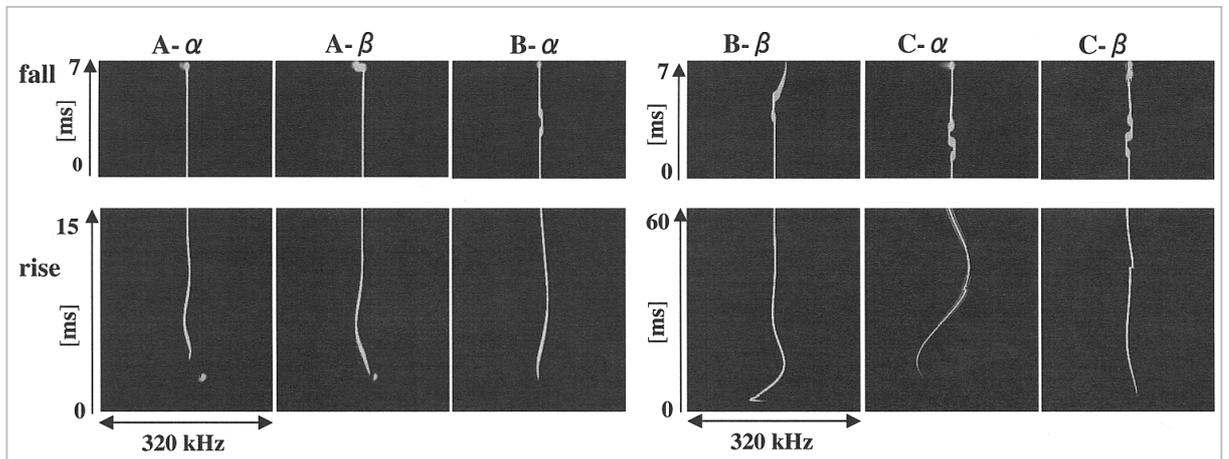


図3 無線機のモデルごとの立上り、立下り時間一周波数スペクトルパターン

のパターンの変化よりも早く時間-周波数空間上のパターンでの変化が現れやすい傾向があるが、不安定であることが多かった。

3.2 時間-周波数スペクトル・パターンの特徴量

時間-周波数領域でのパターンは多様であり、島の有無、飛びの有無、パターンの曲がり具合、周波数の変動幅等いろいろある。ここでは定量化しやすい特徴量としてスペクトルのパワー最大値に対してパワーの平方根が10%になる時点と、ある特徴となるスペクトル・パターンが現れる特徴点との時間差 Δt を特徴量として採用した。立上りに関して、スペクトル・パターンが曲がりくねるタイプは、周波数方向に最大に揺れる時点までとし(図4(a))、飛びが現れるタイプは飛びが現れる時点までとした(図4(b))。また、立下りに関しては、A社のようにスペクトルが広がり消失するタイプは、広がり始まる点を特徴点とし、B社モデル β は、変化しはじめる場所を特徴点とし、飛びが複数ある場合は複数求め、その最大の差を特徴量とした。

図5に横軸に時間領域の立上り時の Δt 、縦軸に時間周波数空間での立上り時の Δt とした特徴量空間における実験で用いた無線機の分布を示した。B社モデル α 群とB社モデル β 群は、図2では立上りと立下り時の特徴量の差がないために、特徴量増加に対する効果がなかったが、図5のように時間周波数空間での立上り時の Δt を導入すると、特徴量空間での距離が増す。A社モデル α 、 β の一部の無線機は、個体ごとの差が現れている。C社のモデル α 、 β とも、個々の無線機個体の区別が明瞭になった。これは、周波数の飛びは再現性があり、精度がよい特徴量があるためである。

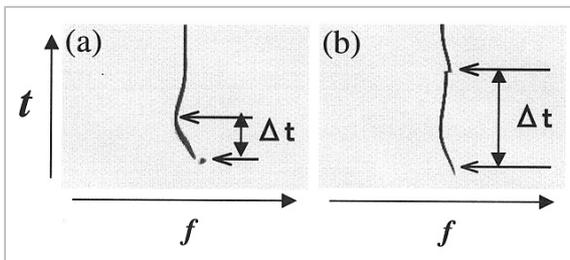


図4 時間-周波数空間における特徴量の定義

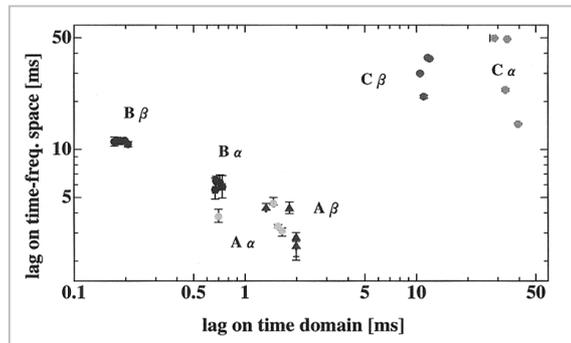


図5 立上り時、時間領域-時間周波数空間特徴量空間における無線機の分布

3.3 誤差による特徴量の評価

相対誤差として10回の測定で“(最大値-最小値)/平均値”を用い、時間領域、時間-周波数空間における立上り、立下りのモデル別特徴量の評価を行った。図6にはモデルごとの相対誤差の平均値を示した。図の凡例のT-rise、TF-rise等は、それぞれ、時間領域立上りの場合、時間周波数空間立上り特徴量の場合である。A、C社の時間領域での立下りの相対誤差が高い値を示す原因は、立下り時間が非常に短いため、サンプリングが十分でなく、1サンプルのずれで相対誤差が大きく変化するためである。時間-周波数空間で立上りの誤差の原因は、周波数の揺れ測定の度に変動があるためである。また、C社、時間-周波数空間で立下りの場合、誤差の原因は、周波数の飛びが不安定に数回起こり、突然スペクトルが消失するためである。それぞれのモデルで誤差が小さい特徴量が異なるため、無線機同定のためには、幾つかの特徴量を組み合わせることが重要である。

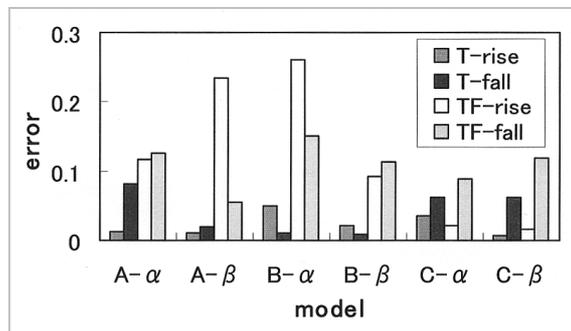


図6 モデル別相対誤差

4 むすび

プレストーク送信機においてオン/オフ時に現れる過渡応答パターンを測定し、時間領域、時間-周波数空間での特徴を数社無線機のモデルで実験し検討を行った。その結果、時間領域と時間-周波数空間において無線機のモデルや立上り、立下りにより、様々なパターンを示すことが分かった。過渡応答パターンから特徴量を定義して、抽出を行ったが、無線機のモデル、または、立上りと立下りで、時間領域と時間-周波数空間における特徴量が無線機同定に有効なものが異なった。今回定義した特徴量による同一モデル個々の無線機の差は識別できるモデルとできないモデルに別れたが、モデルの差は明瞭に現れた。同定の確度を増すために、幾つかな特徴量を組み合わせることが必要であり、今回定義し

た以外の特徴量を増やし、定性的なもの、例えば、飛びのある無し、回数、変動の方向など、加えると有効である。

時間-周波数空間でのパターンは時間領域と違い複雑なため、同定に有効な特徴量をどのように抽出するかが重要になる。そのために、FFT以外の手法で解析する必要がある。FFTの場合、周波数分解能を上げると、時間分解能が低下するトレードオフの問題や周波数が離散的なため、微妙な周波数の変動が捉えにくくなるなど問題がある。また、今回は無線機の出力を測定器に直結しノイズが存在しない場合の実験であったが、実際はマルチパスなどの様々なノイズを含み、時間領域の特徴量を測定は難しくなる。そのため、高分解能でノイズに強い時間周波数空間での解析が重要になる。

参考文献

- 1 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.
- 2 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-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.
- 3 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.
- 4 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-,” 1999 信学総大, B-4-70, Mar. 1999.
- 5 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-線形予測法-,” 1999 信学ソ大(基礎・境界), A-4-3, Sep. 1999.
- 6 平野隆之, 高次指数平滑法による逐次相関関数を用いたスペクトル, “1998 信学ソ大(基礎・境界), A-4-21, Sep. 1998.

ひらの たかゆき
平野隆之
元科学技術庁 特別研究員



すぎやま つとむ
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



しづま まさあき
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