

RTSA による パルスレーダーのフィールド測定

フィールドマスタ プロ MS2090A

目次

1. はじめに.....	2
2. 空港監視レーダー	2
3. 気象レーダー	10
4. まとめ.....	12
付録 : MS2090Aがサポートするパルス計測の概要	13

1. はじめに

レーダー、すなわち RF パルスを使って物体を 3 次元的に検出することは、1900 年代初頭から始まりました。当初の用途は軍事用で、特に船舶や航空機の探知が中心でした。現在、レーダーは、航空機の追跡、天候の監視、ボールや自動車の速度検出など、軍事、商業、研究の幅広い分野で使用されていますが、レーダーの基本的な原理は変わっていません。短時間のバースト RF エネルギーを送信し、遠くの物体から跳ね返ってきた RF エネルギーを受信機で検出するというものです。

レーダーは一度設置されると、何十年にもわたって稼働し続けることが期待されます。経年で性能が低下しないように、定期的にレーダーの主要な性能指標を測定する必要があります。その中でも特に重要なのが、送信する RF パルスの特性です。IEEE は、パルス特性の測定に関する規格、「IEEE Std 181-2011, Standard for Transitions, Pulses and Related Waveforms」を公開しています。この規格では、どのようなパルス特性を測定する必要があるのか、そして、それらの特性値をどのように定義・計算するかを詳細に規定しています。

MS2090A (オプション 0421 パルスアナライザ機能付) は、パルスの全特性を測定・表示し、よく使われるレーダーパルス特性の詳細な数値データを測定者に提供します。

このアプリケーションノートでは、MS2090A リアルタイム スペクトラムアナライザ (RTSA) を使った空港監視レーダーや気象レーダーのフィールド測定を紹介します。

2. 空港監視レーダー

2.1. ASR-11 空港監視レーダー

1998 年、米国連邦航空局 (FAA) は、航空機の動きを追跡し、さらに気象情報を提供する ASR-11 (表 1) という新しい空港監視レーダーを導入しました。現在、このレーダーは全米に 400 台以上設置されています。

表 1. ASR-11 空港監視レーダー

ASR-11 空港監視レーダー	
製造業者	Raytheon
周波数	2.7 ~ 2.9 GHz
レンジ	60 マイル (~97 km)
ピークパワー	25 kW
パルス幅	1 μ s ~ 80 μ s
パルス繰り返し周期	~ 1 ms
回転数	12.5 RPM

このレーダーはピークパワーが大きいので、レーダーの設置場所から数十キロ離れた航空機でも発見しやすいのが特徴です。例えば、サンフランシスコ湾の南端に位置する FAA のレーダーは、サンフランシスコ・ベイエリア一帯をカバーしています。



図 1. FAA レーダーのパルスを測定するためのセットアップ（導波管ホーンアンテナと MS2090A）

ASR-11 空港監視レーダーは、2.875GHz で RF パルスを送信します。MS2090A には 2~4GHz の導波管ホーンアンテナを三脚に取り付け、約 50km 離れた場所でレーダーパルスを簡単に検出できます（図 1）。

レーダーアンテナが回転しているため、図 2 に示すように、パルスは約 5 秒ごとに同方向に照射され、MS2090A に向けられます。

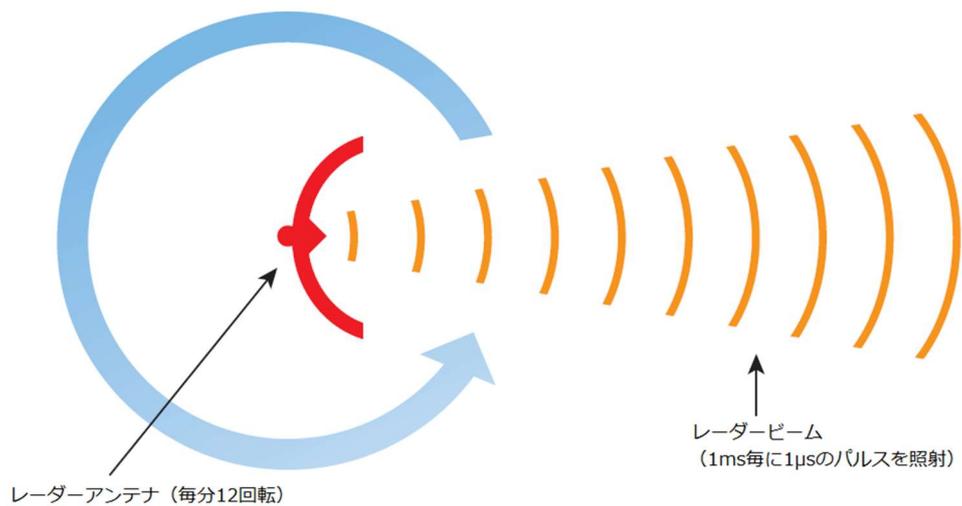


図 2. FAA の空港監視レーダーは 1 分間に 12 回転しながら $1\mu s$ のパルスを送信

パルス持続時間が短く、送信アンテナが回転しているため、スペクトラムアナライザの周波数掃引モードでは、波形の最大ホールド（MAX Hold）機能を使ってもレーダーのパルス信号を検出することが困難です（図3）。

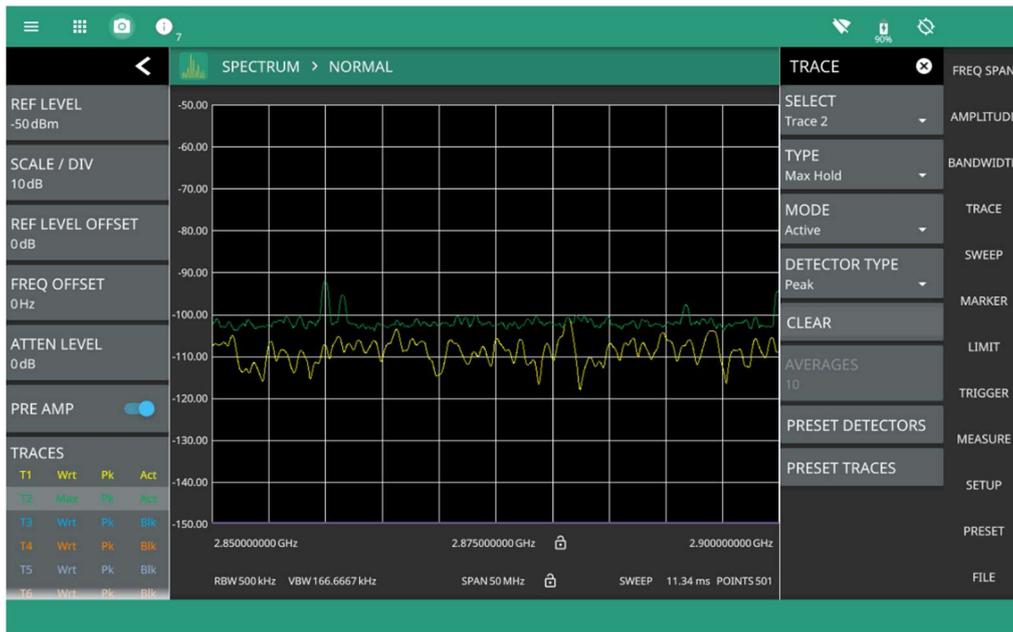


図3. スペクトラムアナライザでは、波形の最大ホールド機能を使っても $1\mu\text{s}$ のパルスを検出できない。

2.2. リアルタイム スペクトラムアナライザ (RTSA) でレーダー信号を測定

そこで、MS2090A のモードを切り替えて RTSA (リアルタイム スペクトラムアナライザ) モードでレーダー信号を測定すると、レーダーパルスを常にキャプチャできます (図 4)。回転するレーダーアンテナが MS2090A に接続された導波管ホーンアンテナの方向に向いた後、それから離れる方向に回転します。RTSA ではこのレーダーアンテナの動きに合わせて、パルスパワーが大きくなったり、小さくなったりを連続的に画面に表示します。あたかも、スペクトラムが「呼吸」しているように RTSA の画面に表示されます。このとき、波形の最大ホールド (MAX Hold) 機能を使用すると信号状況がよくわかります (図 4、5)。

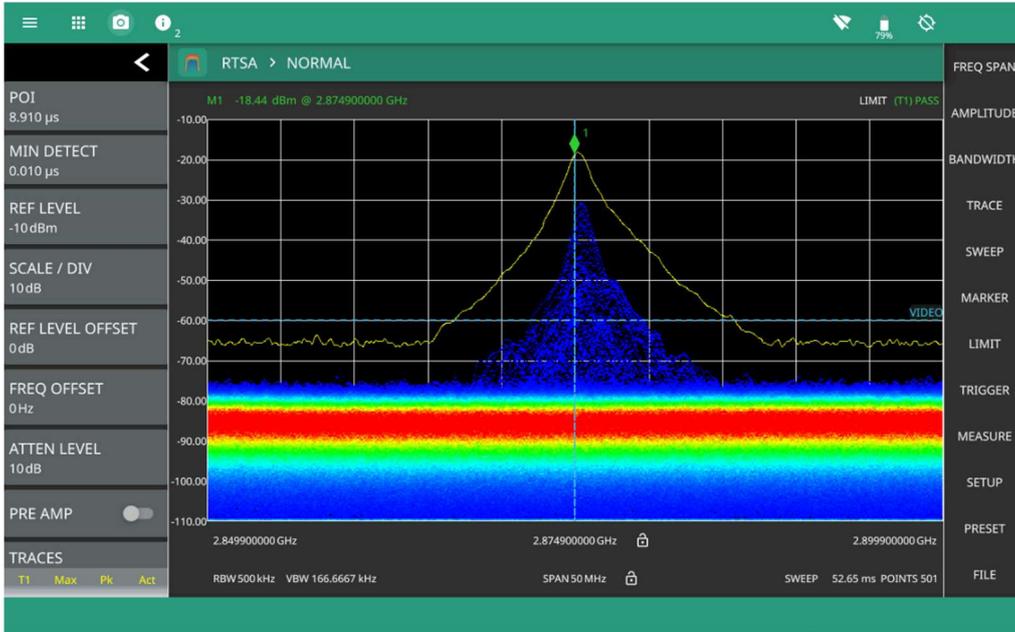


図 4. レーダー信号の受信レベルが高い場合の RTSA スペクトラム密度表示
(レーダーの回転しているアンテナと導波管ホーンアンテナ向きが一致)

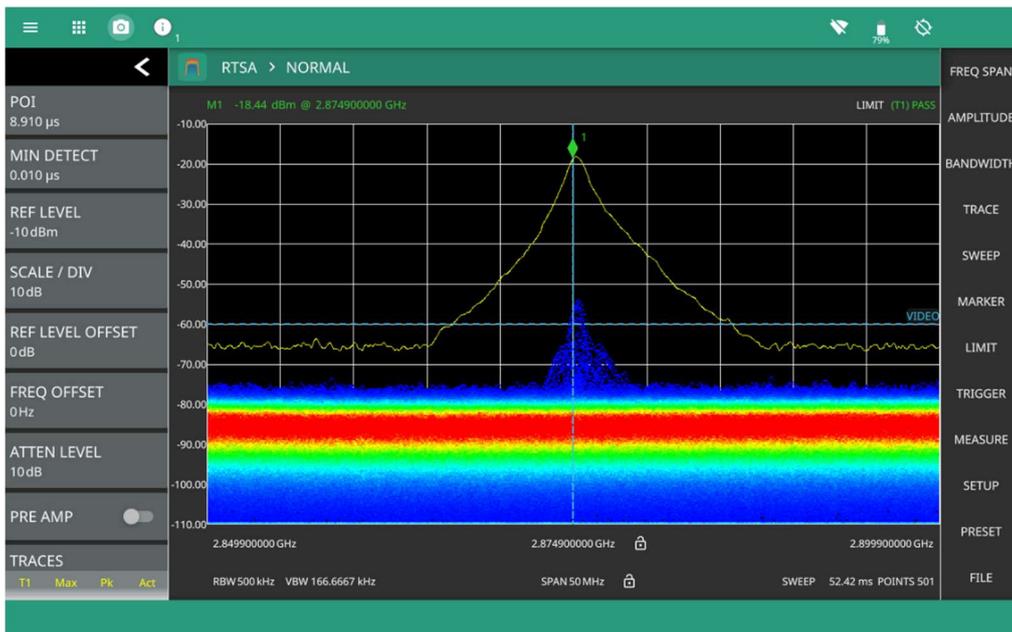


図 5. レーダー信号の受信レベルが低い場合の RTSA スペクトラム密度表示
(レーダーの回転しているアンテナと導波管ホーンアンテナ向きが不一致)

2.3. レーダーパルスを時間領域で表示

次は、時間領域でレーダーパルスを表示します。MS2090A をゼロスパンモードに設定します。これにより、時間領域の波形を表示します。最初は、レーダーパルスが観察できるように長いタイムスパンを設定します。図 6 は、レーダーが回転するときに、5 秒のデューティサイクルで表示するパルス群を示しています。この場合、各パルス群のバーストは、複数の $1\mu\text{s}$ パルスを含んでいます。



図 6. 10 秒のタイムスパンを設定すると、レーダーアンテナが回転し、MS2090A に向けられたパルスバーストが測定されます。

各パルス群の個々の $1\mu\text{s}$ パルスを観察するためには、時間スケールを数ミリ秒にまで拡大する必要があります。これには MS2090A のオプション 0104 (110 MHz 解析帯域幅機能) が対応します。MS2090A (オプション 0104 付き) は、RBW 40 MHz、掃引時間 60 ns の設定で、パルスの立ち上がり時間を極小の 30 ns まで測定可能です。

パルス波形を測定する際には、レーダーが MS2090A の方向に向いたときの高出力パルスをキャプチャできるように、ビデオトリガのレベルを設定します。ビデオトリガを使用することで、レーダーから来た高出力パルスだけを測定できます。図 7 は、レーダーから $1\mu\text{s}$ のパルス列が 1ms の周期で送信されていることを示しています。レーダーのアンテナが回転しつつ、レーダー信号が MS2090A に接続された導波管ホーンアンテナを通過するため、このパルス振幅は変化します。

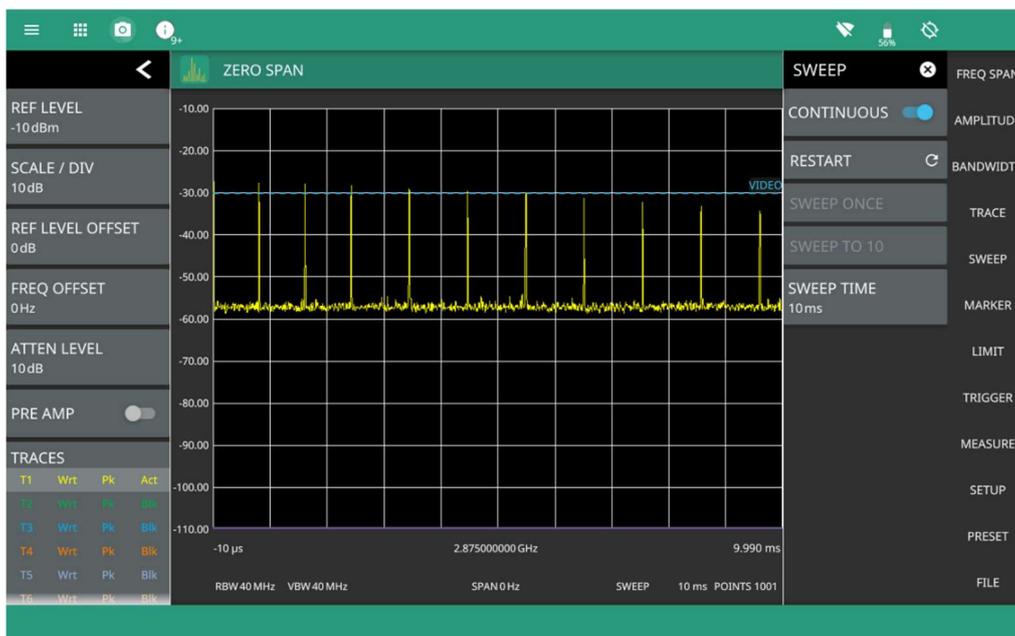


図 7. ゼロスパンモードでレーダーからの $1\mu\text{s}$ のパルス列を測定する

さらにタイムスパンを $20\mu\text{s}$ に設定し、パルスを 1 個だけ表示します (図 8)。

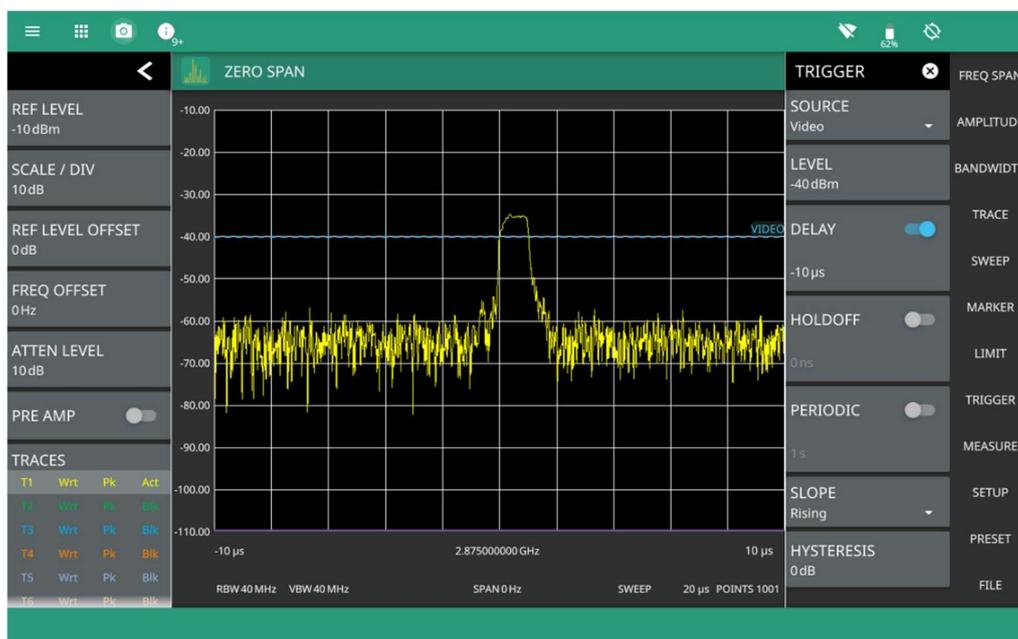


図 8. $1\mu\text{s}$ の単一パルスのゼロスパン表示 ($20\mu\text{s}$ スパン)

ゼロスパンモードで波形上にマーカを置いてパルス波形を測定可能ですが、オプション 0421 (パルスアナライザ機能) のような精度や測定のトレーサビリティはありません。

2.4. MS2090A のパルスアナライザ機能

MS2090A にオプション 0421 (パルスアナライザ機能) を付けると、IEEE 規格に完全に準拠したパルスおよびパルス列の測定が可能です。パルスの繰り返し周波数、デューティサイクル、オフタイムを測定するには、少なくとも 2 つのパルスをキャプチャして画面に表示する必要があります。通常は、より多くのパルスをキャプチャすることをお勧めします (図 9)。パルス列や個々のパルスの特性によっては、立ち上がり時間などのすべての測定を同じスパンで実施できない場合があります。

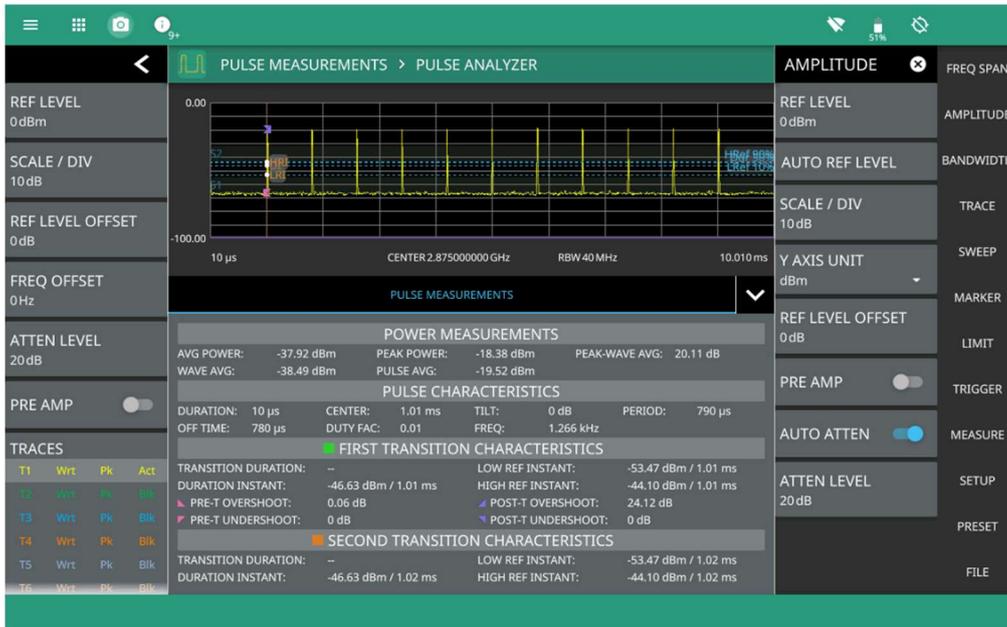


図 9. パルスアナライザ機能で複数のパルスを取り込み、パルス繰り返し周波数 (PRF)、デューティサイクル等のパルス特性測定を実現

ビデオトリガレベルとプリトリガディレイを設定して、MS2090A の画面にパルス列を安定して表示します。オプション 0421 (パルスアナライザ機能) は、キャプチャされたデータに対して測定を自動的に実施します。測定者による追加設定は必要ありません。

単一のパルスを表示するには、掃引時間を短くします。波形の立ち上がりと立ち下がりの 10% と 90% のエッジには垂直方向のマーカラインを自動的に配置し、パルス持続時間の測定に使用されるリファレンスレベル 50% には水平方向のマーカラインを自動的に配置します (図 10、11)。IEEE のデフォルト値は、必要に応じて測定者が手動で修正可能です。

IEEE 測定の詳細はこのアプリケーションノートの“付録 : MS2090A がサポートするパルス計測の概要”に記載しています。

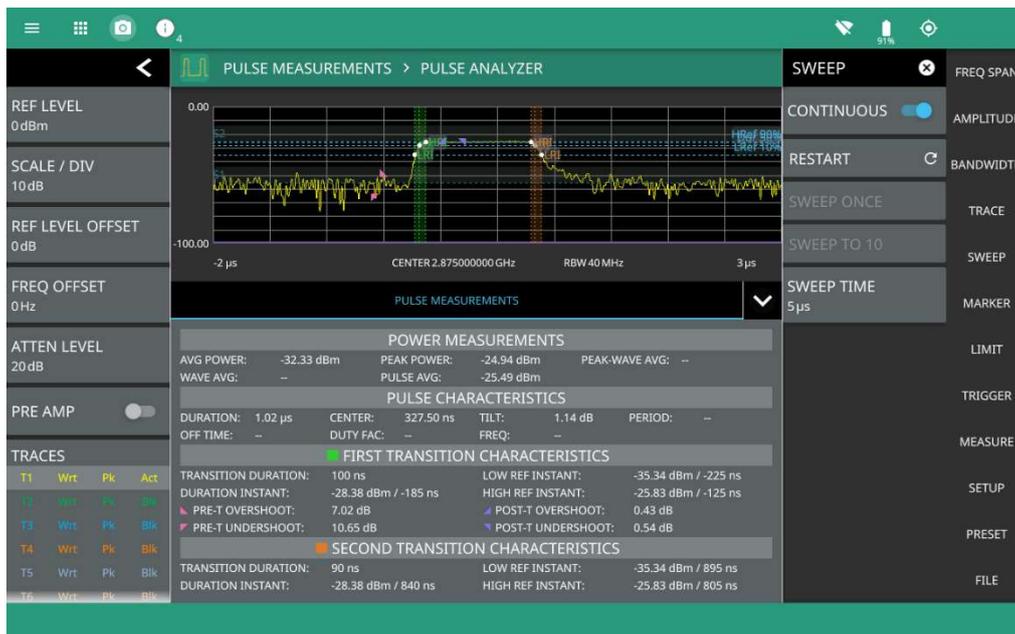


図 10. シングルパルスに対するパルスアナライザ機能の結果

図 11 は、単一パルス波形をより詳細に見るためのフルスクリーンモードです。



図 11. トランジション マーカラインを表示する、シングルパルス画面表示 (パルスアナライザ機能)

MS2090A (オプション 0421 パルスアナライザ機能付) は、空港監視レーダーのフィールド測定を、レーダーの運用中に中断することなく、正確かつ迅速に実施できます。

3. 気象レーダー

3.1. NEXRAD 気象レーダー

レーダーのもう一つの一般的な用途は、降雨、暴風、雪などの気象状況を監視することです。気象レーダーには、降雨や暴風を積極的に追跡する地上型のものと、広範囲を監視する衛星型のものがあります。米国では、150 台以上の地上気象レーダーのネットワークが米国国立気象センターによって運営されています。これは次世代気象レーダー (NEXRAD) システムとして知られており、最初のレーダーは 1990 年代に配備・運用され、システムは継続的に強化されています (表 2)。

表 2. WSR-88D 米国立気象レーダー

WSR-88D 米国立気象レーダー	
プライムコントラクター	Unisys
周波数	2.7 ~ 3.0 GHz
レンジ	90 ~ 150 マイル (~145 ~ 240 km)
ピークパワー	700 kW
パルス幅	~ 1 μ s ~ 5 μ s
パルス繰り返し周期	~ 1 ms
回転数	3 RPM

気象レーダーの特性は、空港監視用レーダーと似ています。どちらも同じ周波数帯と高出力のパルスを使用しています。そのため、これらの間に干渉がないように、周波数計画が重要です。サンフランシスコ・ベイエリアをカバーする気象レーダーは、サンノゼの南約 20 マイルにある Umunhum (ユマンハム) 山に設置されています (図 12)。



図 12. Umunhum (ユマンハム) 山 気象レーダーステーション

Umunhum (ユマンハム) 山の気象レーダーは、2.745GHz で送信し、アンテナは 1 分間に約 3 回転します (図 13)。パルス列は、その時の気象状況によって変化します。激しい雨が降ると、より多くのパワーを反射し、気象レーダーのレンジが短くなります。

3.2. MS2090A による気象レーダーの測定

この気象レーダーに対するテストセットアップは、前述の空港監視レーダーと同様です。MS2090A に接続した導波管ホーンアンテナを気象レーダーの方向に向けることで、レーダーの設置場所から何十キロも離れた場所での測定が可能です (図 13)。

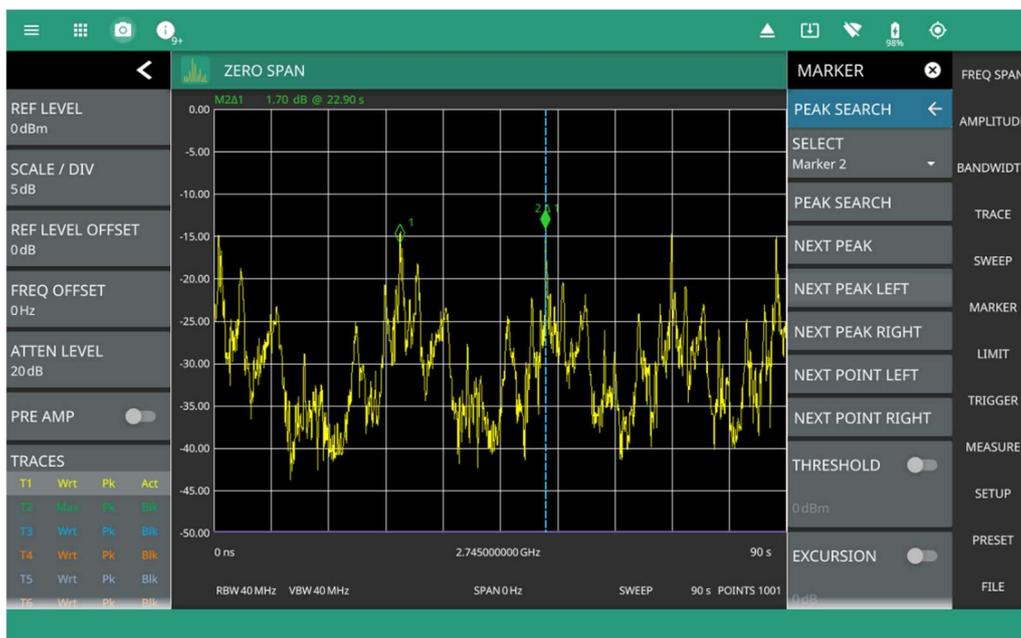


図 13. 回転するレーダーアンテナから 20 秒ごとにバーストパワーが発生 (ゼロスパン測定)

ゼロスパンモードでパルス列を解析することで、大気の状態の変化を分析するために、気象レーダーが異なるモードで使うパルス繰り返し周波数の変化がわかります。図 14 は、その違いを 2 つの異なる測定画面で示したものです。

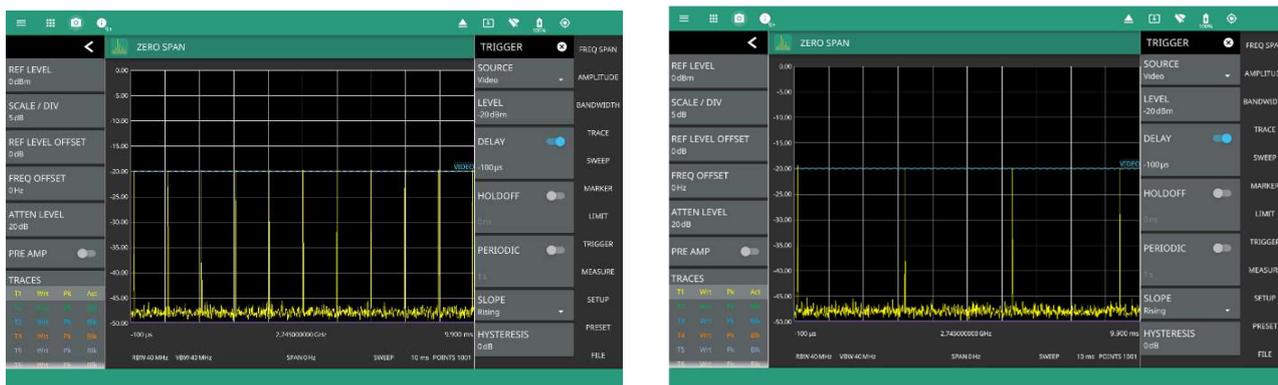


図 14. 大気の状態によって、気象レーダーのパルス繰り返し周波数を変化させる

また、オプション 0421（パルスアナライザ機能）を使用すると、図 15 に示すように、パルス列と個々のパルスの特性を素早く詳細に解析できます。

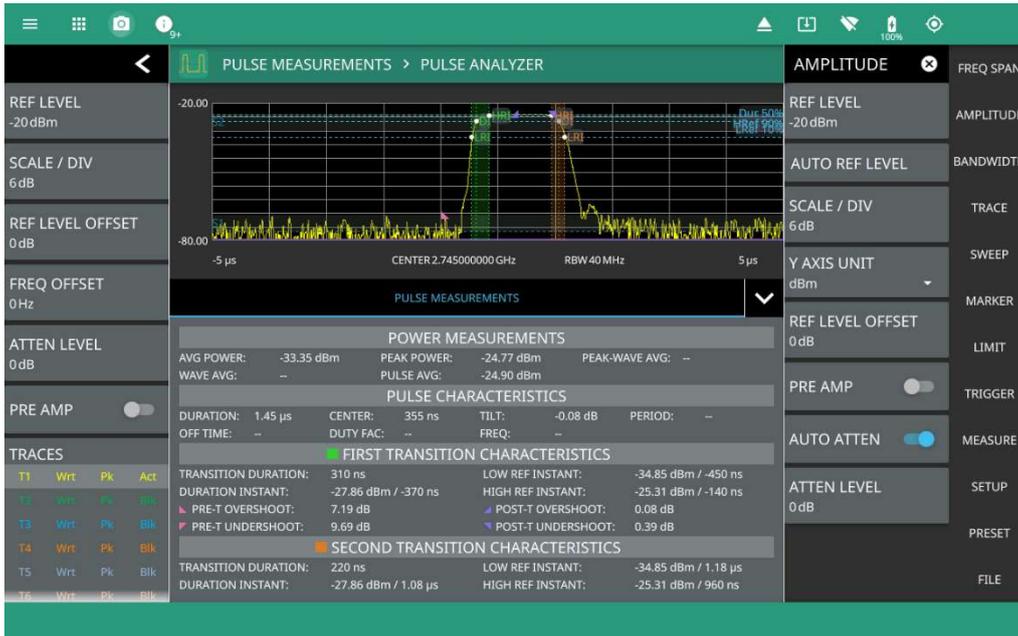


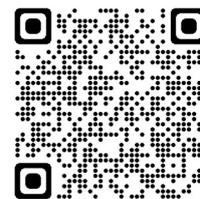
図 15. 気象レーダーパルスの特性評価

4. まとめ

MS2090A（オプション 0421 パルスアナライザ機能付）は、フィールドでパルスレーダー信号を測定する強力なリアルタイム スペクトラムアナライザ（RTSA）テストソリューションです。広い測定帯域幅を持ち、立ち上がり時間を極小の 30ns で測定可能です。IEEE 規格に準拠したパルス測定と組み合わせることで、メンテナンスやトラブルシューティングのためのレーダーの定期テストが、今までラボに限定されていた方法で、フィールドにおいて実現します。

関連する Web は下記です

<https://www.anritsu.com/ja-JP/test-measurement/products/ms2090a>



付録 : MS2090A がサポートするパルス計測の概要

1. High、Low リファレンスレベル (ヒストグラム アルゴリズムによる)

パルスのレベルタイプが AUTO に設定されている場合、ヒストグラム アルゴリズムを使用して、パルスの High リファレンスレベルと Low リファレンスレベルを決定します。これは「IEEE Standard for Pulses, Transitions and Related Waveforms(181-2011), Section 5.2.1.」で規定されています。ヒストグラム アルゴリズムへの入力、波形データの振幅 dBm です。波形データはヒストグラムに変換します。ヒストグラムの分解能は、波形データ値の全範囲（波形の最大値から最小値）で 0.01dB です。すなわち、波形の各データポイントの振幅(dBm)は、その振幅が含まれるヒストグラムの区間の「カウント値」を増加します。

* ヒストグラムの区間：波形データの振幅域を幾つかの範囲に分ける。ここでは波形データ dBm 値を一定の振幅範囲（例えば 0.01dB の分解能）に分けます。

パルスの High リファレンスレベルと Low リファレンスレベルを決定するために、各ヒストグラムの区間は「上部」と「下部」の2つのグループに分けます。「上部」は振幅(dBm)の上位 50%の範囲に対応するすべての区間で構成され、「下部」は下位 50%の範囲に対応します。

次に、「上部」ヒストグラムでカウントが最も高いヒストグラムの区間がパルスの High リファレンスレベルになります。同様に「下部」ヒストグラムのカウントが最も高いヒストグラムの区間がパルスの Low リファレンスレベルになります。

ただし High、Low リファレンスレベルいずれのカウント値が入力波形データポイント総数の 1%未満の場合、ヒストグラムは 10 倍の分解能で再作成します。区間幅を大きくしてヒストグラムを再生成するこのプロセスは、High、Low リファレンスレベルいずれのカウント値がポイント総数の 1%以上になるまで繰り返します。この方式では、結果として得られる High、Low リファレンスレベルの最高分解能が 0.01 dBm であり、入力波形の状態変動の程度に応じて、分解能は 0.1 dBm、1dBm などに再設定されます (図 1)。

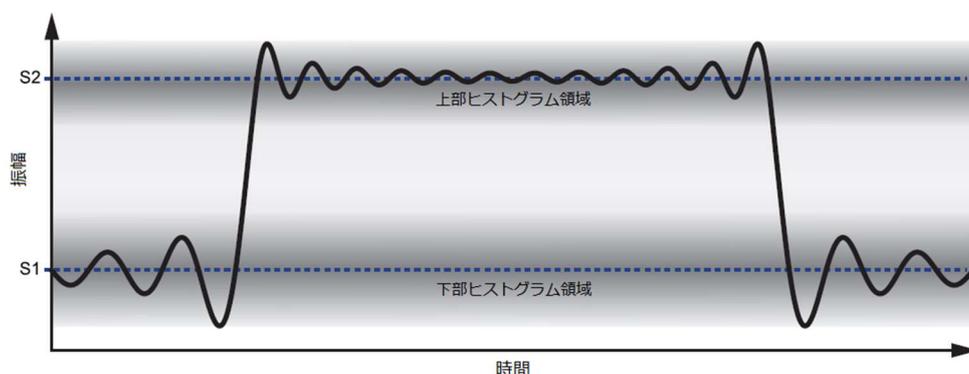


図 1. High、Low リファレンスレベルを求める

パルスのレベルタイプが“USER”に設定されている場合、測定者はパルスの High、Low リファレンスレベルを決定し、“USER TOP (S2)”と“USER BOTTOM (S1)”の設定を使ってそれぞれのレベルを入力します。

2. リファレンスレベルのインスタント (Reference Level Instant)

インスタント (Instant) とは、波形内の特定のデータ (時間で表される) のことです。これらは通常、パルス波形の最初のインスタントを基準にします (図 2、3)。以降の文章で、パルス測定値の定義について説明します。

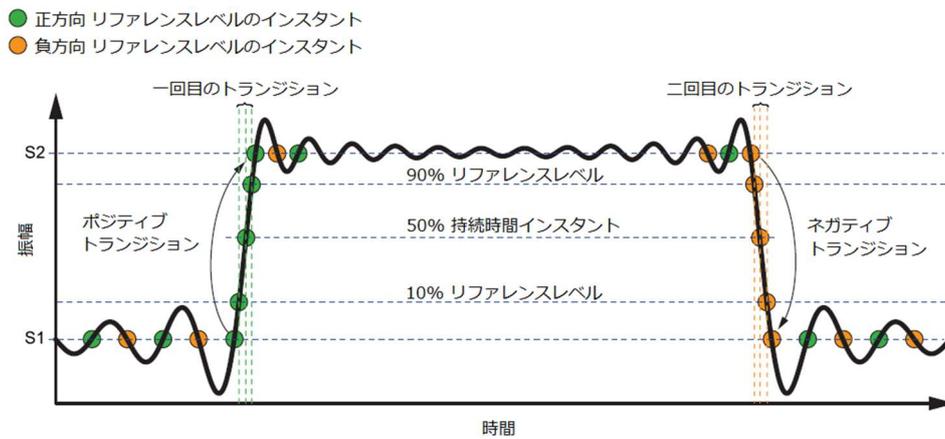


図 2. 正のパルス波形のインスタントとトランジション

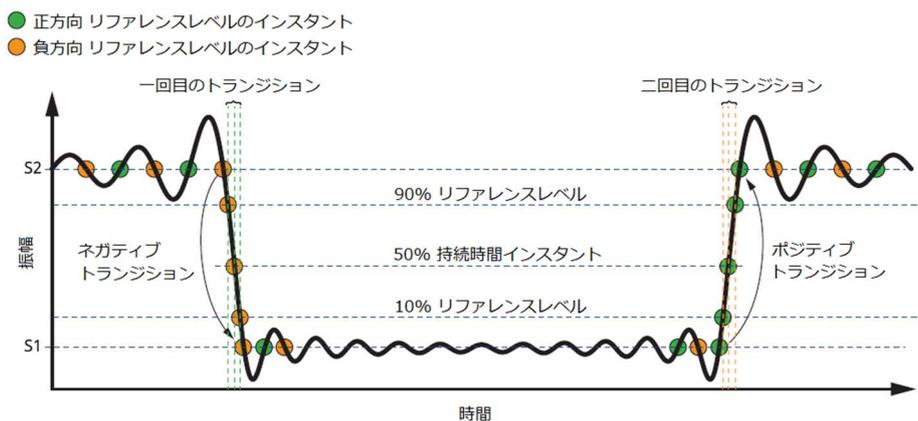


図 3. 負のパルス波形のインスタントとトランジション

3. トランジション (Transition)

トランジションとは、パルス波形の 2 つの状態 (High、Low リファレンスレベル) をつなぐ波形の連続した領域のことです。パルスのトランジションを特定するには、まず、波形データから基準となるレベル (High、Low リファレンスレベル) を超えるインスタントだけが含まれたリストを作成します。リストの各インスタントには、対応する番号と方向 (例えば、Low リファレンスレベルを横切る直前のデータポイント番号と、波形が Low リファレンスレベルの下から上に横切るか、あるいはその逆かを示す方向) があります。(図 2、3)

このインスタントのリストは、番号の昇順でソートします。次に、リストの中から、同じ方向を向いている連続したインスタントを抽出して、すべてのポジティブトランジションとネガティブトランジションを見つけます。

波形は、High リファレンスレベルの 90% を超えると "High 状態"、10% を下回ると "Low 状態" と定義します (図 2、3)。これは、パルス波形の上部/下部の境界を使用する代わりに選択された方法です (IEEE 規格ではオプション)

4. パルス持続時間とパルス周期 (Pulse Duration、Pulse Period)

入力波形から、上述の波形のポジティブトランジション (positive transitions) とネガティブトランジション (negative transitions) を見つけ、パルスがあるかどうかを確認します。パルスの存在を確認した後、パルス持続時間を算出します。パルス持続時間は基準値 (High リファレンスレベルの 50%) がポジティブ/ネガティブトランジションの間に存在する時間です。この基準値によって、パルスの開始点と終了点が決まります。パルス持続時間とは、この終了点と開始点の時間差です。

また、パルス周期は、同様にポジティブ/ネガティブトランジションから波形データの中にパルスがあるかどうかを確認します。パルス持続時間とは異なり、パルス周期は、パルスの繰り返し、つまりパルス列がなければ算出できません。パルス周期を算出するためには、基準値 (High リファレンスレベルの 50%) に少なくとも 3 つのトランジションが必要です。パルス周期は、最初のパルスの開始点と 2 番目のパルスの開始点の間の時間差です。

5. 波形平均値 (Wave Average)

波形平均値は、パルス周期内のすべての波形ポイントのパワーの平均です。パルス周期の開始点、および終了点を確認するために、言い換えれば、少なくとも 1 つの完全なパルス周期があるかどうかを判断するために、トランジションの数を数えます。完全なパルス周期が波形データの中に存在しない場合、MS2090A は“nan”を返します。パルス周期が存在する場合は、開始点は最初のトランジションの始まりで、終了点は次のパルス周期のトランジション始まりです。

たとえば、6 つのトランジションがあるパルス波形には、最初のトランジションの前にいくつかのデータポイントがあり、その後には 2 つの完全なパルス周期が続き、その後には不完全なパルス周期が続きます。

すべての完全なパルス周期の開始点と終了点が見つけ、それらの間のすべてのデータポイントの振幅を合計し、データポイント総数で除算することで波形平均値を算出します。

6. トレース平均値 (Trace Average)

トレース平均値は、波形内のすべてのデータポイントの指数平均です。上述の波形平均値とは異なり、パルス周期に制約されません。

7. パルス平均値 (Pulse Average)

パルス平均値は、パルスの High 状態のポイント (通常、High リファレンスレベルの 90% より上のデータポイント) の平均値です。これは、正のパルスにのみ適用されます。正のパルスがない場合は、測定値は返されません。

8. パルスの中心インスタントと繰り返し周波数 (Pulse Center Instant、Pulse Repetition Frequency)

パルスの繰り返し周波数は、パルス周期の逆数 ($1/\text{パルス周期}$) です。パルスの中心インスタントは、パルス持続時間 (リファレンスレベル 50%) の開始点に、パルス持続時間の 2 分の 1 ($\text{パルス持続時間}/2$) の時間を加えて算出します。

9. パルスピーク (Pulse Peak)

パルスピークとは、正のトランジション後の波形の最大値のことです。正のトランジションがない場合は、波形全体の中でのピーク値が返されます。

10. パルスチルト (Pulse Tilt)

パルスチルトはパルス波形の歪みです。正のパルスの場合は上部波形、負のパルスは下部波形の傾きです。

パルス波形には極性があり、負または正のパルスに対して計算されます。パルスチルトを算出するためには、完全なパルス波形（少なくとも2つのトランジションがあるパルス）が必要です。

十分な波形データポイントがあれば、オーバーシュートが最も発生しやすい最初と最後の25%のサンプルを計算から除外します。残りの50%のサンプルから波形の傾きを最小二乗法で算出し、この波形の傾きに波形ポイント数を乗じてパルスチルトを算出します。

11. 波形振幅 (Wave Amplitude)

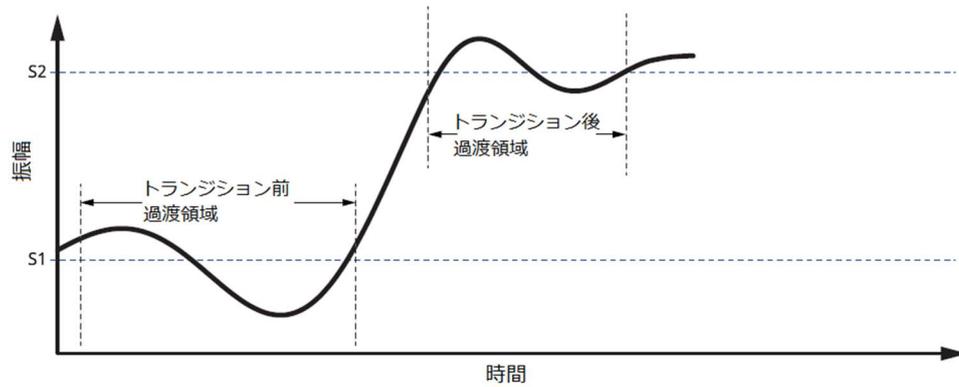
波形振幅は、High リファレンスレベルの振幅から Low リファレンスレベルの振幅を引きます。単位は dB です。

12. 波形平均値 (Wave Average) からピークまでの値

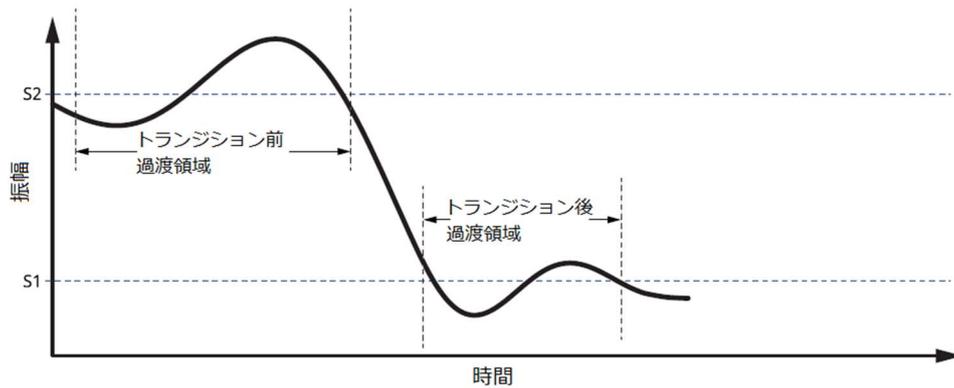
パルスピークから波形平均値を引き dB で算出します。この場合、波形平均値が有効な値であることが必要なので、測定には完全なパルス周期のデータが少なくとも一つは必要です。

13. トランジション前後の過渡領域 (Aberration Region)

トランジション前の過渡領域は、トランジションにおけるリファレンスレベル S1,S2 (図 4) を交差する前の波形領域です。領域幅はトランジション時間の 3 倍です。ただし、トランジション前の使用可能な波形データによって上限があります。トランジション後の過渡領域は、トランジションが終わった状態を開始点とし、トランジション時間の 3 倍または、次のトランジションの開始点のいずれか早い方で終了する領域です。



正のパルス 過渡領域

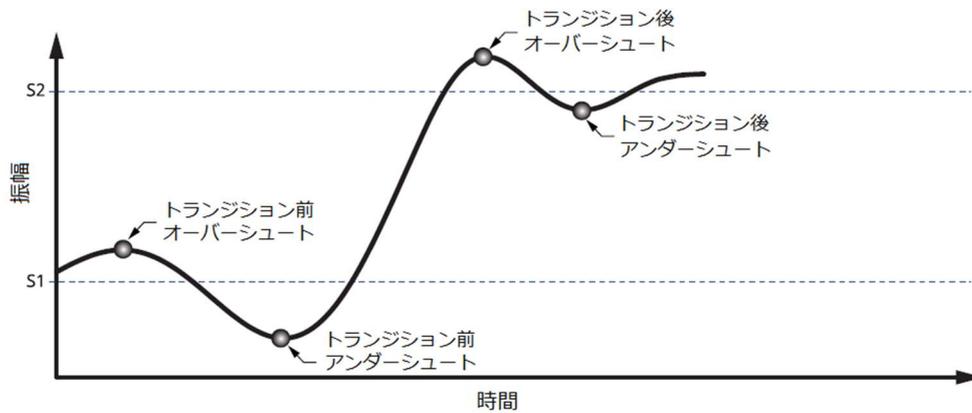


負のパルス 過渡領域

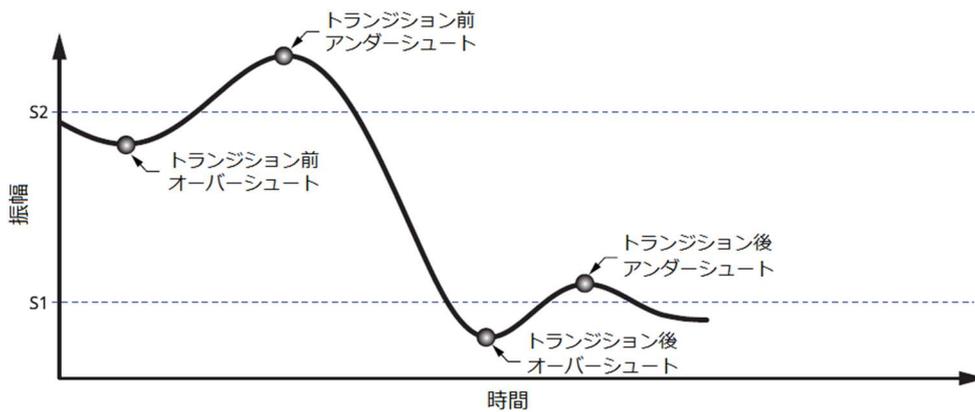
図 4. パルス波形の過渡領域

14. 過渡領域のオーバーシュートとアンダーシュート (Overshoot、Undershoot)

オーバーシュートとアンダーシュートは、過渡領域のトレース値の最大値と最小値の差で、ローカルステートレベル (Local state level) ごとに算出します。ローカルステートレベルは、ポジティブトランジションでは (Low = トランジション前 → High = トランジション後)、ネガティブトランジションでは (High = トランジション前 → Low = トランジション後) のことです (図 5)。



正のパルス オーバーシュート、アンダーシュート



負のパルス オーバーシュート、アンダーシュート

図 5. パルス波形のオーバーシュート、アンダーシュート

アンリツ株式会社

<https://www.anritsu.com>

本社 〒243-8555 神奈川県厚木市恩名5-1-1 TEL 046-223-1111
厚木 〒243-0016 神奈川県厚木市田村町8-5
通信計測営業本部 TEL 046-296-1244 FAX 046-296-1239
通信計測営業本部 営業推進部 TEL 046-296-1208 FAX 046-296-1248
仙台 〒980-6015 宮城県仙台市青葉区中央4-6-1 S S 3 0
通信計測営業本部 TEL 022-266-6134 FAX 022-266-1529
名古屋 〒450-0003 愛知県名古屋市中村区名駅南2-14-19 住友生命名古屋ビル
通信計測営業本部 TEL 052-582-7283 FAX 052-569-1485
大阪 〒564-0063 大阪府吹田市江坂町1-23-101 大同生命江坂ビル
通信計測営業本部 TEL 06-6338-2800 FAX 06-6338-8118
福岡 〒812-0004 福岡県福岡市博多区榎田1-8-28 ツインスクエア
通信計測営業本部 TEL 092-471-7656 FAX 092-471-7699

■カタログのご請求、価格・納期のお問い合わせは、下記または営業担当までお問い合わせください。

通信計測営業本部 営業推進部

TEL: 0120-133-099 (046-296-1208) FAX: 046-296-1248
受付時間/9:00~12:00、13:00~17:00、月~金曜日(当社休業日を除く)
E-mail: SJPost@zy.anritsu.co.jp

■計測器の使用法、その他については、下記までお問い合わせください。

計測サポートセンター

TEL: 0120-827-221 (046-296-6640)
受付時間/9:00~12:00、13:00~17:00、月~金曜日(当社休業日を除く)
E-mail: MDVPOST@anritsu.com

■本製品を国外に持ち出すときは、外国為替および外国貿易法の規定により、日本国政府の輸出許可または役務取引許可が必要となる場合があります。
また、米国の輸出管理規則により、日本からの再輸出には米国商務省の許可が必要となる場合がありますので、必ず弊社の営業担当までご連絡ください。

ご使用前に取扱説明書をよくお読みのうえ、正しくお使いください。

2104