

# 超広帯域 車載レーダー信号を 解析する最先端手法 ホワイト・ペーパー

このホワイトペーパーの内容は、上海のEDI CON China  
2018で発表されました

# 目次

はじめに.....	3
■ 外付けハーモニック・ミキサーによるEバンドの測定	
■ 信号とスペクトラムアナライザ（2 Hz～90 GHz）を使用したEバンドの測定	
スペクトラム・アナライザによる超広帯域測定 .....	7
チャープ検出.....	11
チャープリニアリティ測定：ユーザ定義 vs ベストフィット.....	12
チャープセトリング時間の測定 .....	14
まとめ.....	15
参考文献.....	15

自動車のFMCWレーダーは、76 GHz ～ 77 GHzの間で動作します。一部の国では、77 GHzから81 GHzまでの周波数レンジが車載レーダーアプリケーションに利用可能となっています。FMCWレーダーの距離分解能は、信号帯域幅に比例します。したがって、車載レーダーメーカーは、使用可能な周波数レンジを最大限に活用するために、すでに数GHz幅の帯域幅を備えたFMCWレーダーを開発しています。

信号の周波数と帯域幅に加えて、信号の線形性とチャープの長さがレーダーの性能を決定します。したがって、チャープ長、チャープレート、周波数偏差などの車載レーダー信号パラメータを解析することが重要です。

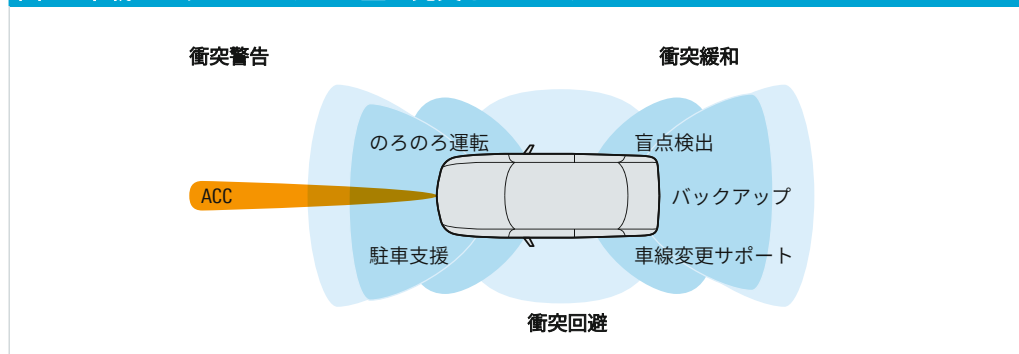
このホワイトペーパーでは、超広帯域信号のEバンドにおけるRF測定の課題を克服するさまざまな方法を検討します。広帯域車載レーダ信号の復調と解析を検討し、その結果と主な性能パラメータについて検討します。

# はじめに

レーダーは、複数のオブジェクトの速度、距離、方位角を素早く正確に決定することを可能にします。

自動車の高度運転支援システム (ADAS) は、危険な状況にある運転者をサポートし、事故の数を減らすのに役立つレーダーセンサーの装備を益々充実させています。

図1：車載レーダーセンサーが益々充実しています



車載レーダーの77 GHz帯 (76 GHz ~ 77 GHz) に加えて、79 GHz帯 (77 GHz ~ 81 GHz) は、一部の国で、利用可能になっています。したがって、自動車業界は、既に数GHz幅の信号を有するEバンドで動作するレーダーセンサーを開発しています。

レーダーセンサーの距離分解能は、その信号帯域幅に比例します。すなわち、帯域幅が広いほど、互いに近接する異なるターゲット間を区別するレーダーセンサーの能力が優れていることになります。

信号の帯域幅だけでは、距離分解能やレーダー性能を保証するには十分ではありません。線形FMチャープからの周波数、電力、周波数偏差、信号対干渉比、チャープレートおよびチャープ持続時間など、こうした信号パラメータは、レーダーコンポーネントの開発および検証中に徹底的にテストする必要があります。

Eバンドにおける5 GHz幅の車載信号を解析することは、従来のテストおよび測定機器の課題です。このホワイトペーパーでは、高性能スペクトラム・アナライザとオシロスコープを組み合わせることで、こうした課題を克服するための手法についてご紹介します。

# Eバンド (60 GHz ~ 90 GHz) におけるRF測定： スペクトラム・アナライザ VS 外付けハーモニック ミック・ミキサの考慮点

スペクトラム・アナライザは、レーダーセンサーの開発、製造、検証において、周波数、EIRP、占有帯域幅、帯域外エミッションなどのRFパラメータを評価するための一般的なツールです。現在、最大90 GHzで動作する高性能スペクトラム・アナライザは、76 GHzと81 GHzで動作するレーダーによって送信されるRF信号の測定が可能です。スペクトラム・アナライザがサポートしていない高周波数レンジについては、外付けのハーモニック・ミキサを使用して拡張できます。このセクションでは、これらの異なるアプローチを使用する際に考慮すべき主要なポイントをご紹介します。

## 外付けハーモニック・ミキサによるEバンドの測定

ほとんどのスペクトラム・アナライザは、79 GHzの高い周波数を直接サポートしていません。この場合、外付けハーモニック・ミキサを使用してアナライザの周波数レンジを拡張できます。ミキサで生成されたLO信号の高調波は、入力信号をスペクトラム・アナライザのIF周波数に変換するために使用されます。



図2：R&S®FSW26（最大26.5 GHz）は、EバンドのRF信号を測定するために、R&S®FS-Z90外部ハーモニック・ミキサ（60 GHz ~ 90 GHz）とともに使用できます。

ミキサによる周波数変換は次の式で表現できます。

$$|m \cdot f_{LO} \pm n \cdot f_{RF}| = f_{IF}$$

ここで:

- m LO信号の高調波次数 (m = 1, 2, 3 ...)
- n マイクロ波入力信号の高調波次数 (n = 1, 2, 3...)
- $f_{LO}$  ローカル信号の周波数
- $f_{RF}$  入力信号の周波数
- $f_{IF}$  中間周波数 (IF)

上記の式を見ると、所望の受信周波数での入力信号に加えて、多数の望ましくないイメージ信号および混合変調信号が存在します。外部ハーモニック・ミキサにはプリセクタがなく、イメージ信号を除去できません。したがって、図3に示すように、望ましくない混合変調信号がスペクトル内に存在することになります。

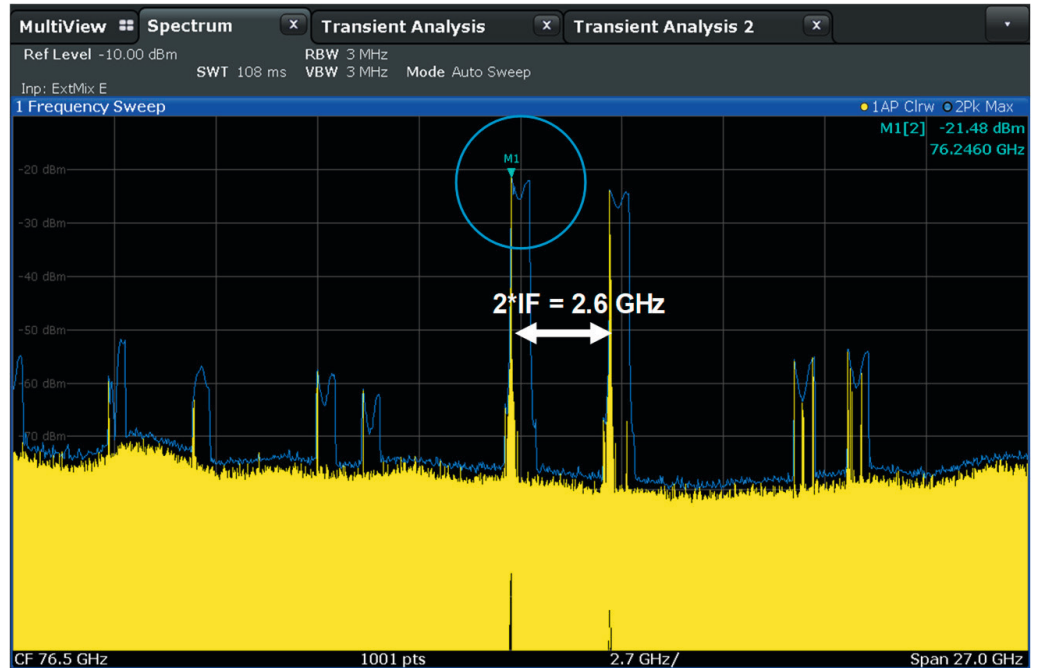


図3：R&S®FSW43に接続されたR&S®FS-Z90外付けハーモニック・ミキサで測定した60 GHz ~ 90 GHzのスペクトラム。76 GHzの希望信号は500 MHz幅です。最も近い画像は、スペクトラム・アナライザの中間周波数の2倍になります。他の不要な混変調信号およびそのイメージも存在します。

所望の信号とそのイメージ信号間のデルタは、スペクトラム・アナライザの中間周波数 ( $2 \cdot f_{IF}$ ) の2倍です。信号帯域幅が ( $2 \cdot f_{IF}$ ) よりも広い場合、所望の信号とそのイメージ信号はスペクトルで重複します

R&S®FSWの中間周波数 (IF) は1.3 GHzなので、外付けハーモニック・ミキサを使用したスペクトラム解析には、イメージフリー周波数レンジの2.6 GHzを提供します。

スペクトラム測定を正確に実行するために、不要なイメージ周波数を除去する必要があります。

二重掃引技術を使用するソフトウェア・アルゴリズムは、不要な混変調信号を識別し抑制します。これらのアルゴリズムは静的な信号ではうまく動作しますが、レーダーアプリケーションで使用するパルス信号や過渡信号を扱うときに限界に達します。

### 信号とスペクトラム・アナライザによるEバンドの測定 (2 Hz ~ 90 GHz)

R&S®FSW85高性能信号/スペクトラム・アナライザは、2 Hz ~ 85 GHzまたはオプションで90 GHzの周波数をカバーします。

8 GHz ~ 85 GHzの周波数では、不要なイメージ周波数を除去するためのハードウェアのプリセクタを備えています。フロントエンドには、YIG技術を実装した狭帯域フィルタが装備されています。YIGフィルタの中心周波数は入力信号に対応し、その狭帯域により不要なイメージ周波数をフィルタリングできます。

YIGフィルタ後、ミキサは入力RF信号を1.3 GHzのIFに変換します。図4では、76 GHzにおいて、イメージフリーで500 MHz幅の信号の観測ができています。

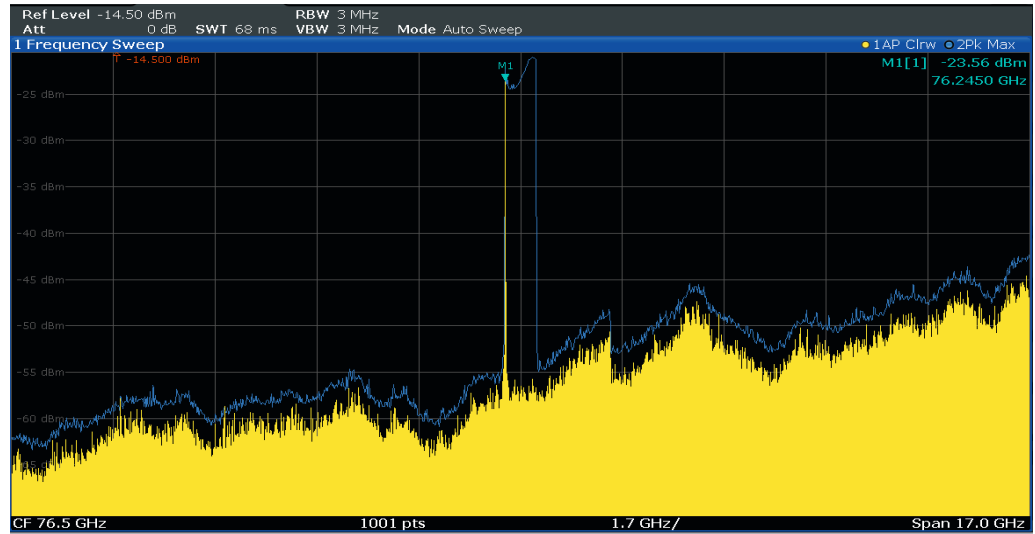


図4. R&S®FSW85で測定した、76 GHzでの500 MHz帯域幅のFMCWレーダー信号のスペクトラム

必要な周波数をサポートする単一の機器でスペクトルを分析すると、外付けハーモニックミキサに比べていくつかの利点があります。

- DCから85/90 GHzまでの連続したスペクトラム解析
- スペクトラム・アナライザモードでのプリセクタ/YIGフィルタによる本来のメッセージ信号抑制
- レベル調整の改善：アッテネータの内部調整など
- ケーブルの削減
- SEM測定のパダイナミックレンジが向上

85 GHzまでのオプションの外付けプリアンプは、スペクトラム・アナライザのノイズフロアを改善します。これは、大気中のレーダー信号を測定する場合に最適です。



図5：R&S®HA-Z24E外付けプリアンプ（1 GHz～85 GHz）を使用したR&S®FSW85シグナル・スペクトラム・アナライザ

# スペクトラム・アナライザによる超広帯域測定

航空宇宙および防衛、無線および車載アプリケーションの業界の需要により、解析帯域幅の需要が継続的に増加しています。その結果、2 GHzまでの内蔵復調帯域幅を持つシグナル・スペクトラム・アナライザが市販されています。帯域幅拡張オプションを備えたR&S®FSWシグナル・スペクトラム・アナライザは、最大2 GHzの広帯域測定を実行し、60 dBc以上のSFDR (Spurious Free Dynamic Range) を実現します。

特にR&Dラボにおいて、車載レーダー信号を復調して分析するには、最大5 GHzの復調帯域幅が必要です。外付けA/Dコンバータとしてオシロスコープと高性能な信号とスペクトラムアナライザを組み合わせることで対応可能です。



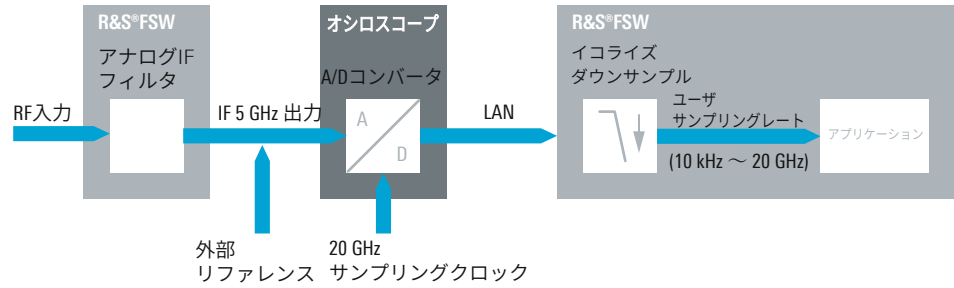
図6：外付けデジタイザとしてR&S®RTO2064オシロスコープと一緒に使用されるR&S®FSW-B5000ハードウェア・オプションを装備したR&S®FSW85信号およびスペクトラム・アナライザは、5 GHzの信号解析帯域幅を提供します。

ユーザーが設定した測定帯域幅に応じて、アナライザは信号を2.8 GHzまたは3.5 GHzの中間周波数にダウンコンバートします。オシロスコープは信号をデジタル化し、デジタル化されたデータをLAN経由でアナライザーに転送します。図7に信号処理のブロック図を示します。

スペクトラム・アナライザのRF入力からオシロスコープのA/Dコンバータまでの全信号経路は、振幅と位相応答に関して特性付けられます。オシロスコープからのデジタルデータはデジタルベースバンドに混合され、測定アプリケーションはイコライズされたI/Qサンプルを受信します。

オシロスコープとアナライザの接続は、ユーザーに明確に分かりやすくなっています。シグナル・アナライザは、オシロスコープを制御し、デジタルデータを転送、処理、およびイコライズします。

図7：R&S®FSW、R&S®FSW-B5000オプション、R&S®RTO2064で5 GHzの復調帯域幅を実現するための信号処理ブロック図



R&S®FSWは、信号を2.8 GHzまたは3.5 GHzの中間周波数にダウンコンバートします。R&S®RTO2064は、20 GHzのサンプリング・レートで信号をデジタル化し、LAN経由でR&S®FSWに転送します。さまざまなR&S®FSW測定アプリケーションが、結果として得られるI/Qデータを分析できます。

## 5 GHz I/Q帯域幅拡張機能を使用した最大測定時間

5 GHzの帯域幅拡張により、データを欠落させることなく超広帯域のチャープシーケンスをキャプチャすることが可能になります。各スイープまたはI/Qデータ収集では、アナライザは一定量のギャップレスデータを捕捉します。

アナライザが5 GHzの帯域幅で捕捉できる最長のギャップレスシーケンスは、オシロスコープが処理するデータレートとインストールされたメモリの更新に依存します。

オシロスコープが20 GHzのサンプリングレートを使用し、メモリ長が2000 Mサンプルの場合、5 GHzの測定帯域幅で達成できる最大レコード長は次のように計算されます。

$$\left( \frac{2000 \text{ Msample} \cdot 6.25 \text{ GHz}}{20 \text{ GHz}} \right) - 100 = 624.999900 \text{ Msample}$$

6.25 GHzは5 GHz解析帯域幅でアナライザが使用するサンプリングレートです。最大測定時間は次のように計算できます。

$$MaxMeas\_time(s) = \frac{MaxRecordLength\_analyzer(Msample)}{Sampling\_Rate_{Analyzer}(GHz)} = \frac{624.99}{6.25} \cong 100 \text{ ms}$$

この式は、R&S®RTO2064オシロスコープで使用される5 GHz分析帯域幅拡張機能を備えたR&S®FSWが、単一収集で最大100 msのギャップレスI/Qデータをキャプチャできることを示しています。さまざまな測定アプリケーションにより、キャプチャされたI/Qデータの詳細な解析が可能です。以下のセクションでは、77 GHzで5 GHzに近い帯域幅を持つFMCWチャープ信号の広帯域解析の例を示します。これは車載レーダーアプリケーションで使用される信号と同等です。



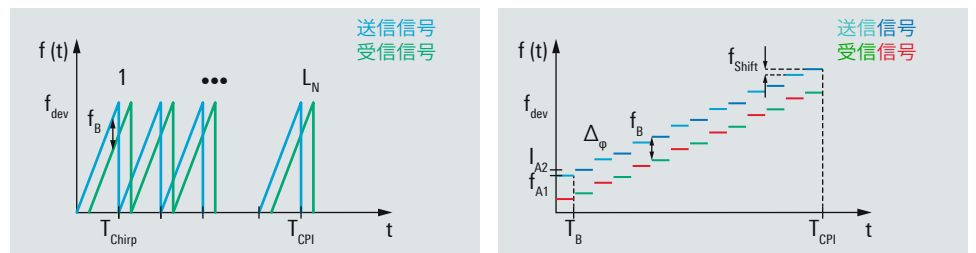
# EバンドにおけるFMCW信号の解析： 測定手法と性能パラメータ

車載レーダーで使用される最も一般的な波形は、通常、チャープまたはホッピング連続波 (CW) 信号です。共通の波形規格はありません。波形は各レーダーメーカー固有で、知的財産に属します。

CWレーダーは、パルス・レーダー・システムに比べて送信電力が低いため、レーダーの小型化および安価に提供が可能です。ゼロ・ブラインド・レンジ、ドップラー周波数シフトの直接測定、静電タール測定の可能性などの他の利点は、CW信号を自動車および産業分野に非常によく適合できます。

最初の車載レーダーはMFSKのようなホッピング信号を使用していました。現在は、数多くの車載レーダーが周波数変調されたチャープ波形 (例：低速LFMCWまたは高速FMCW波形) を使用しています。

図8：周波数変調連続波 (FMCW) チャープ波形 (左) 対 多周波数シフトキーイング (MFSK) 波形 (右)

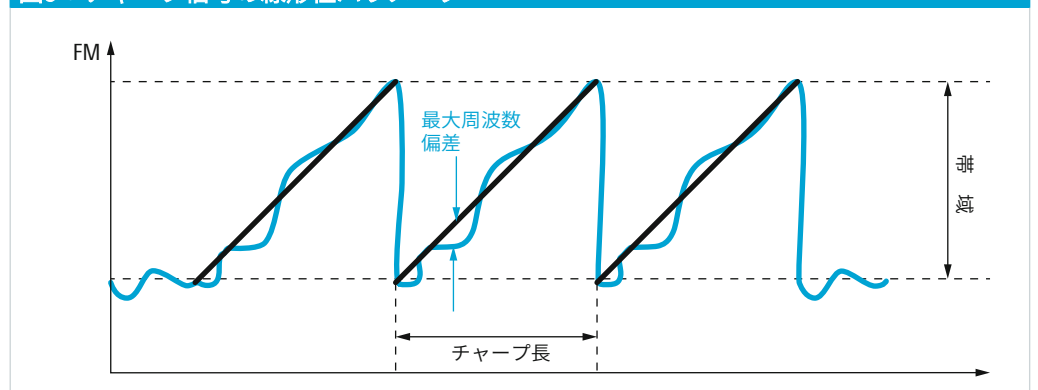


ほとんどの車載レーダーは、長さが $T_{CPI}$ のブロックにトランスミットされた $T_{Chirp}$ の持続時間を持ついくつかの非常に短い線形周波数変調連続波 (LFMCW) チャープからなるチャープシーケンスを使用します。

信号帯域幅、チャープ持続時間、チャープレートなどのパラメータは、レーダーの距離と速度の分解能に直接的な影響を与えます。

達成された範囲および半径方向の速度分解能も、信号線形性に依存します。レーダー信号における不必要な影響は、推定精度およびレーダーシステム性能に影響を与えます。

図9：チャープ信号の線形性パラメータ



連続波レーダー信号の解析には、チャープ信号の解析をサポートする専用の測定アプリケーションが利用できます。測定アプリケーションは、シグナル・アナライザで捕捉されたI/Qデータ内の個々のチャープの開始と終了を検知します。これは、ユーザー定義された解析範囲、すなわち測定帯域幅および取得時間内のすべての性能パラメータを計算します。

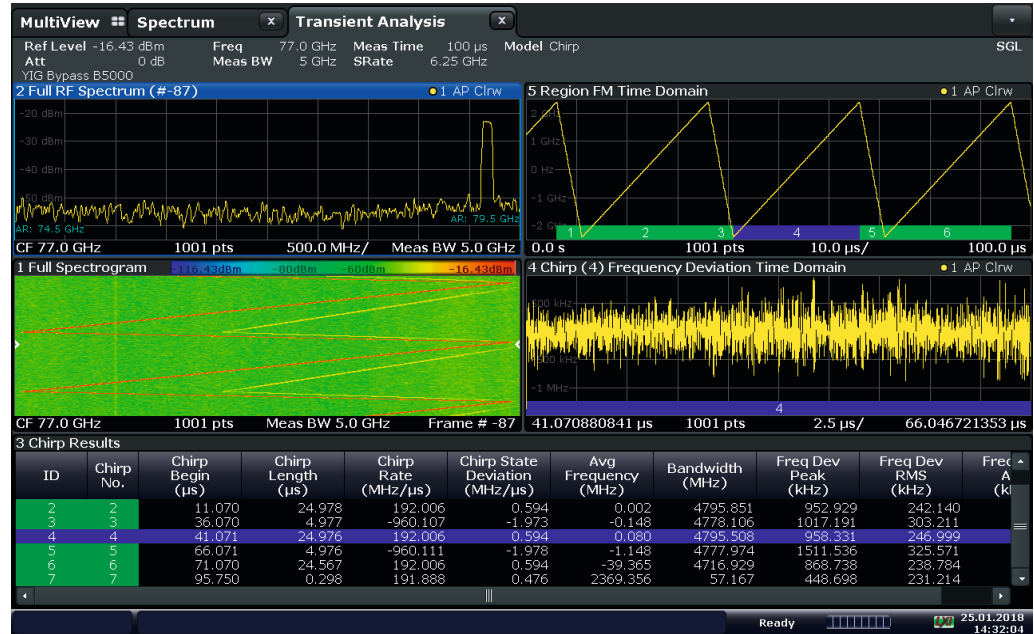


図10：R&S®FSW-K60C トランジェント測定アプリケーション

上の図は、チャープ測定アプリケーションのスクリーンショットです。

- 「フルスペクトログラム」グラフは、時間（垂直方向上向き）と周波数（水平方向）の領域でのI/Qキャプチャバッファを示します。色は出力レベルを示します。
- この例では、測定時間は100 μsに設定されています。5 GHzに近い帯域幅を有する6つの周波数チャープが捕捉されています。
- 「Full RF Spectrum」グラフは、キャプチャバッファの一部（フレーム）のFFTを表示します。これは最後のフレーム、つまりスペクトログラムの上のラインです。メインキャリアが表示されます。
- 「Region FM Time Domain」には、信号対時間の周波数変調 (FM) が表示されます。青色または緑色のカラーバーが検出された6つのチャープに下線を引いています。復調帯域幅 (すなわち、50 MHz) の1% のビデオフィルタは、ピーク検出器の前に不要な信号およびノイズを除去します。
- 「Chirp Frequency Deviation Time Domain」には、検出されたチャープの1つに対する復調されたFM信号の周波数誤差 対 時間が表示されます。
- 「Chirp Results」テーブルには、検出されたすべてのチャープについて関心のあるすべてのパラメータが表示されます。
- この例では、アプリケーションは自動的にチャープを検出し、リニアチャープが最もよく合っていると仮定して周波数偏差を計算します。

次のセクションでは、チャープ検出と直線性の測定について詳しく説明します。

# チャープ検出

デフォルトでは、解析アプリケーションは、いわゆるチャープ状態を自動的に検出します。すなわち、公称チャープ率 (MHz/μs単位) と、セトリング効果を補うための許容範囲です。チャープレートの偏差が公称周波数より上または下の許容誤差内にとどまる限り、チャープが検出されます。

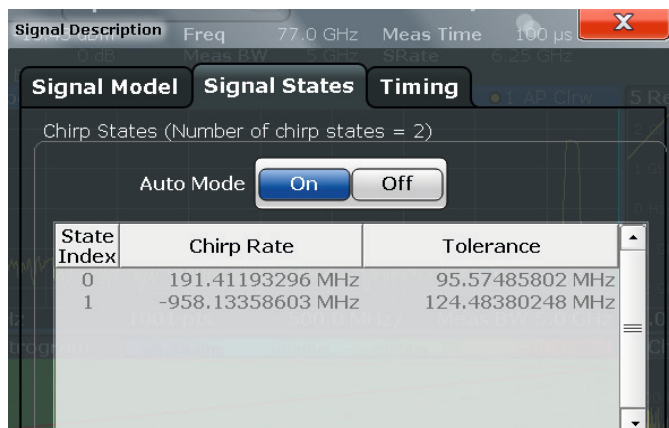


図11：R&S®FSW-K60Cアプリケーションの信号記述表、チャープ自動検出 (自動モード：オン)

デフォルトの自動モードでは、アプリケーションは、チャープレート時間領域トレース (図12) から公称チャープ速度および許容差を計算します。アプリケーションは、測定されたチャープレートの分布を計算し、相対的に一定のチャープレートで信号のこれらの部分を検出します。

信号記述表の公称チャープ率は、頻繁に発生するチャープ率です。信号ノイズが増加し、チャープレートが一定でない場合、許容値は増加します。

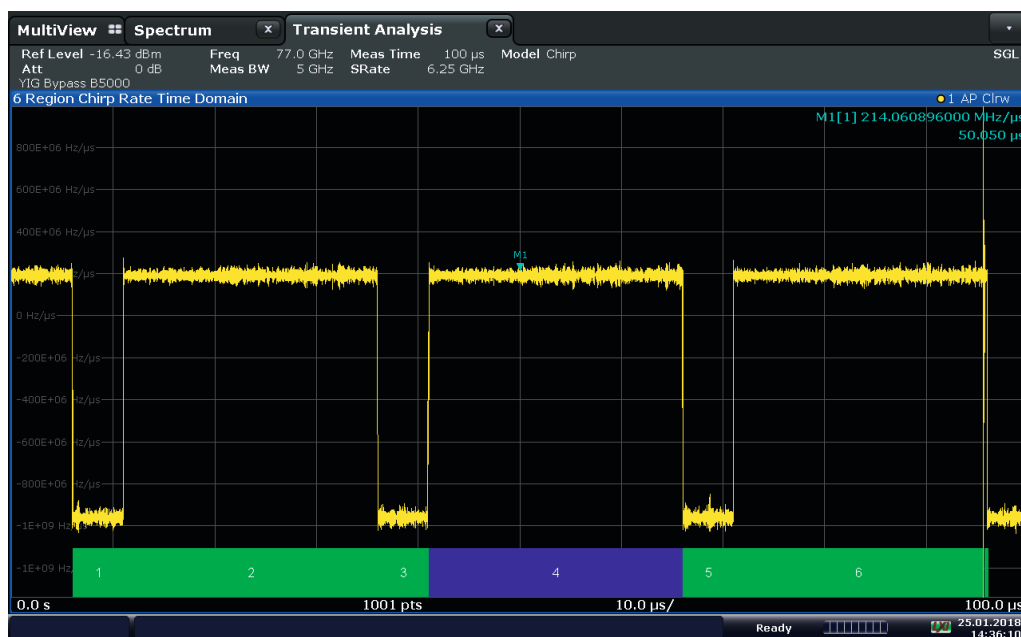


図12：チャープ検出のベースとなる時間領域のチャープレート測定

初期段階における信号の概要については、デフォルトの自動検出で十分です。信号の公称周波数またはチャープレートの値を知っている場合は、信号状態テーブル (図11) に手動で入力し、自動モードをオフにすることができます。アプリケーションは、ユーザー定義のチャープレートと許容値を満たすチャープを検出します。

## チャープリニアリティ測定： ベストフィット vs ユーザー定義

チャープ周波数変調 (FM) 信号を使用するレーダーシステムでは、FM直線性が重要な測定項目です。直線性を測定する場合は、FMと時間領域測定の周波数偏差が重要です。

時間領域における周波数偏差は、特定のFM基準信号に対して計算されます。

デフォルトでは、FM基準信号は平均測定チャープレートから直接計算されます (図12)。測定された平均チャープ状態からの逸脱は補償されます。

モデルパラメータの最適なフィットからの最小偏差を表示したい場合は、デフォルト設定を推奨します。この場合、補償チャープ状態偏差チェックボックスが有効になります (図13)。

図14は、1つのチャープに焦点を合わせるベストフィット手法を用いた線形性測定の例を示します。マーカーは、時間領域におけるピーク周波数偏差を強調表示するように設定されています。

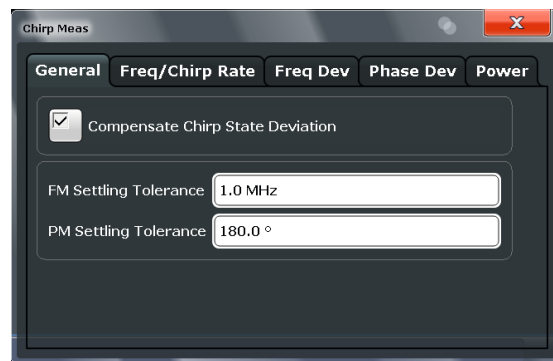


図13：デフォルトでは、測定されたチャープレートがチャープ直線性測定を実行するために使用され、平均チャープ状態からのずれが補償されます。

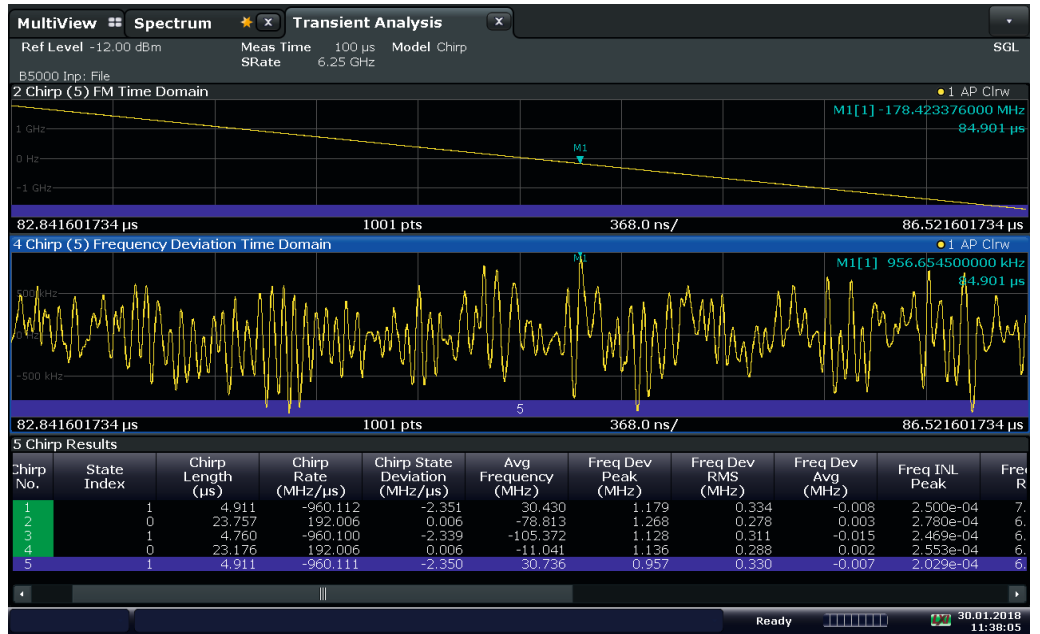


図14：ベストフィット測定手法による直線性測定の例。チャープ5に焦点を当てる；FM時間領域および周波数偏移時間領域パラメータ

実際には、レーダー信号が特定のチャープレートおよび許容値を満たすことを検証するために、既知のユーザー定義の公称チャープレートに関するFM偏差トレースを測定することがしばしば必要となります。

この場合、自動モードをオフにして、指定されたチャープレートと許容値を「Signal description table」（図11）に入力し、測定値と指定値の偏差を測定することができます。この測定では、ユーザーは自動モードをオフにして、「チャープ状態偏差の補償」チェックボックスを無効にする必要があります。

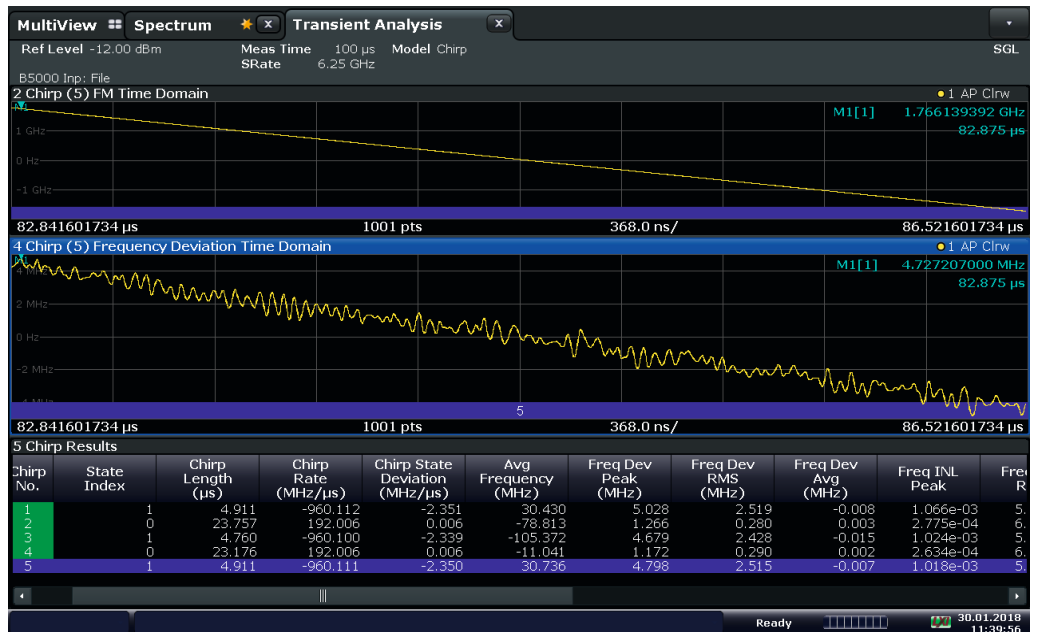
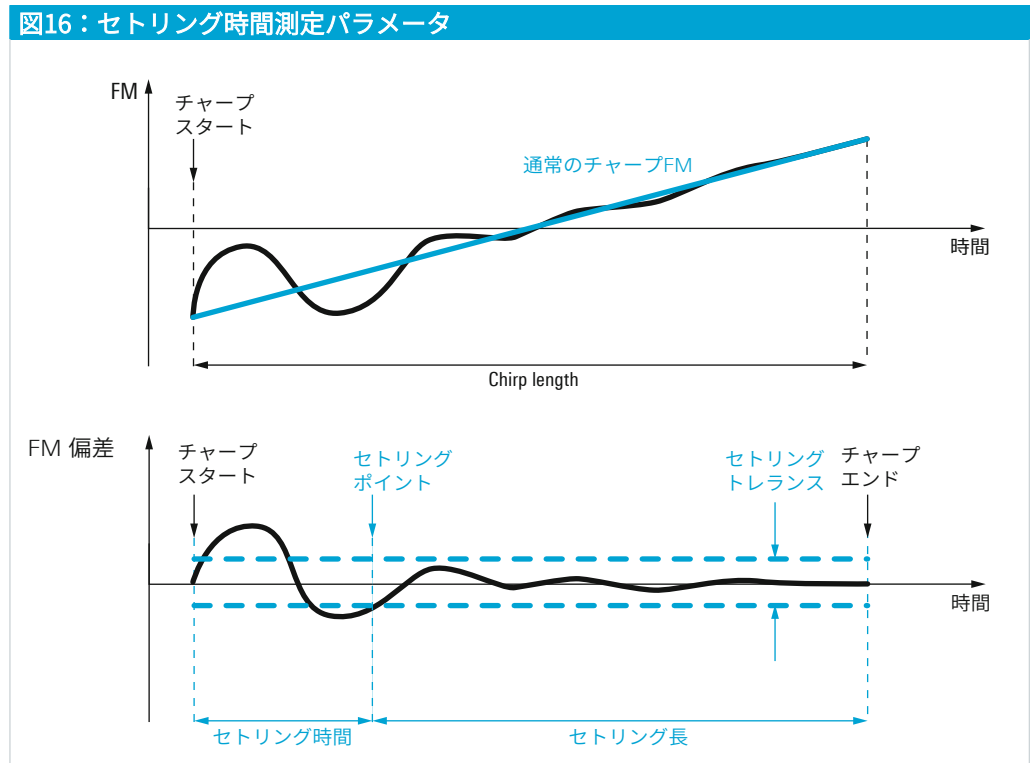


図15：測定された平均チャープレート（ベストフィット）の代わりに、信号記述テーブルの公称チャープレートを基準として計算された周波数偏差

# チャープセトリング時間の測定

チャープ信号の周波数、位相、または電力の結果をより正確に計算するには、測定レンジを定義し、チャープの特定の部分のみを考慮して、例えばセトリング効果を排除することができます。

チャープ安定時間を測定することも重要です。これは、FM信号が公称周波数付近の指定された公差内に収束するのにかかる時間です。図16に示すように、FM定偏差を考慮したFM偏差から、チャープ安定時間、セトリングポイント、安定長などのセトリングパラメータを計算します。



下のスクリーンショットは、図10のサンプル信号のセトリングタイムとセトリングポイント測定結果を示しています。ここでは、FMのセトリング許容値が公称周波数を中心に1 MHzに設定されています。

MultiView Spectrum Transient Analysis										
Ref Level -12.00 dBm		Meas Time 100 µs		Model Chirp		SGL				
B5000 Inp: File										
5 Chirp Results										
Chirp No.	Chirp Length (µs)	Chirp Rate (MHz/µs)	Chirp State Deviation (MHz/µs)	Avg Frequency (MHz)	Bandwidth (MHz)	FM Settling Point (µs)	FM Settling Time (µs)	FM Settled Length (µs)	Freq Dev Peak (MHz)	Fi
1	4.911	-960.083	-2.322	30.419	4715.312	24.668	2.442	0.208	5.039	
2	23.757	192.008	0.008	-78.812	4561.579	38.932	11.508	1.611	1.265	
3	4.760	-960.077	-2.316	-105.378	4569.660	54.603	2.160	0.463	4.672	
4	23.176	192.007	0.007	-11.040	4450.052	58.068	0.000	12.777	1.171	
5	4.911	-960.081	-2.320	30.724	4714.689	84.558	2.332	0.316	4.787	

図17：1 MHzのFM安定公差の測定結果

## まとめ

ローデ・シュワルツは、Eバンドで超広範囲の車載レーダー信号を分析するという難題克服のため、フレキシブルで、完全に統合された、使いやすいソリューションを提供しています。R&S®FSW85は、単体で2 Hz ~ 85 GHzまたは90 GHzの連続したスペクトラム測定が可能です。ビルトインのYIGフィルタにより、85 GHzまでのイメージフリー・スペクトラムが保証されます。

外付けデジタイザとしてのR&S®RTOオシロスコープと組み合わせたR&S®FSW-B5000 5 GHz帯域幅の拡張により、イコライゼーションされ、完全に特性化された信号経路が提供されます。シグナル・アナライザは、オシロスコープを制御して、R&S®FSWユーザー・インタフェースを通じてすべての操作が可能です。

R&S®FSWで提供される過渡解析アプリケーションは、レーダー・チップ、センサー、およびコンポーネントによって送信される信号について、フレキシブルで詳細な解析が可能です。信号線形性などの主信号パラメータを、自動または手動でユーザーのニーズに応じて測定します。

## 参考文献

No.	参考文献
[1]	C. Rauscher, Fundamentals of Spectrum Analysis, Rohde&Schwarz, Munich, ISBN 978-3-939837-01-5
[2]	Rohde&Schwarz, S. Heuel, "Radar Waveforms for A&D and Automotive Radar", White Paper
[3]	Rohde&Schwarz, S. Heuel, "Automated Measurements of 77 GHz FMCW Radar Signals", Application Note
[4]	R&S®FSW IQ Analyzer User Manual, Rohde&Schwarz, Munich
[5]	R&S®FSW-K60 Transient Measurements User Manual, Rohde&Schwarz, Munich

ローデ・シュワルツ

Rohde&Schwarz グループは、次の各ビジネス・フィールドにおいて革新的なソリューションを提供し続けています：電子計測器、放送機器、セキュリティ通信、サイバーセキュリティ、そしてモニタリング&ネットワーク・テスト。創業80年を超えるドイツ・ミュンヘンに本社を構えるプライベート・カンパニーで、世界70カ国以上に拠点を持ち、大規模な販売・サービスネットワークを展開している会社です。

ローデ・シュワルツ・ジャパン株式会社  
www.rohde-schwarz.com/jp

**お客様窓口：**

・ご購入に関するお問い合わせ

TEL：0120-190-721 | FAX：03-5925-1285

E-mail：sales.japan@rohde-schwarz.com

・技術ホットラインTEL：0120-190-722

E-mail：TAC.rsjp@rohde-schwarz.com

・修理・校正・サービスに関するお問い合わせ

TEL：0120-138-065

E-mail：service.rsjp@rohde-schwarz.com

**電話受付時間 9:00 ~ 18:00**

(土・日・祝・弊社休業日を除く)

R&S® は、ドイツRohde&Schwarz の商標または登録商標です。  
PD 5216.1292.52 | Version 01.00 | November 2018 (sk)  
ホワイト・ペーパー | 超広帯域車載レーダー信号を解析する最先端方法に  
掲載されている記事・図表などの無断転載を禁止します。  
おことわりなしに掲載内容の一部を変更させていただくことがあります。  
あらかじめご了承ください。

© 2018 Rohde&Schwarz GmbH&Co. KG | 81671 Munich, Germany



5216129252