

超小型スペクトラムアナライザを使った 車載ミリ波レーダーの試験

スペクトラムマスタ MS2760A

目次

1. はじめに	2
2. FMCW 信号の基礎知識	3
3. FMCW 信号測定	5
4. MS2760A による FMCW 信号測定	7
5. まとめ	12

1. はじめに

周波数変調連続波（FMCW）信号は、物体検出用のレーダーアプリケーションで用される一般的な変調波です。最も一般的なアプリケーションは車載ミリ波レーダーで、アダプティブクルーズコントロール（ACC）、ブラインドスポットモニタリング（BSM）、リバースワーニング（後退時警告）、衝突防止などの先進安全機能のために、FMCW チャープを車両の全方向に発信します（図 1）。

このアプリケーションノートでは、FMCW 信号の基礎知識、および FMCW 信号を測定する上での課題と解決策を解説します。そして超小型スペクトラムアナライザ“スペクトラムマスタ MS2760A”による基本的な FMCW レーダー試験について説明します。

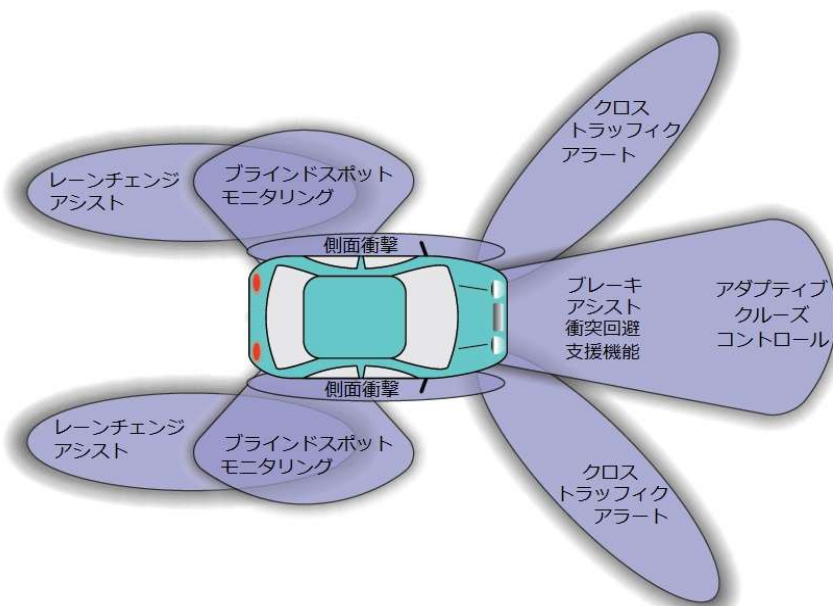


図 1 自動車では、さまざまな検知に FMCW レーダーセンサを使用しています

実際の FMCW アプリケーション

FMCW レーダーが実際に使われている例としては、空港の滑走路の監視があります。FMCW レーダーは世界中の空港に配備されており、航空機の発着に危険を及ぼす可能性のある障害物やゴミがないか、滑走路を監視しています。

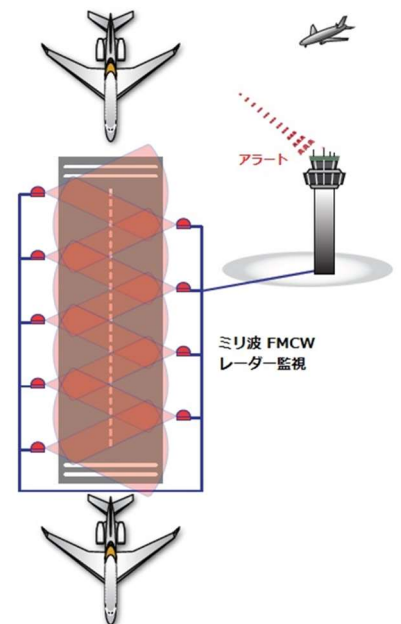


図 2 空港の滑走路の監視

2. FMCW 信号の基礎知識

2.1. FMCW チャープ特性

典型的な FMCW 信号は、時間の経過とともに周波数が線形に増加する単純な正弦波（CW）信号です。信号周波数が増加する期間（スタート周波数からストップ周波数まで）を、チャープと呼びます。FMCW 信号は、「周波数-時間（図 3）」として表示できます。

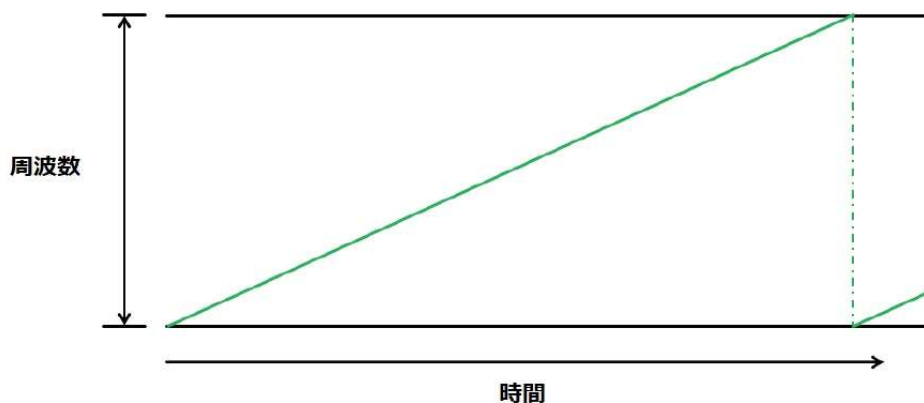


図 3. FMCW チャープ:周波数-時間

FMCW 信号の「周波数-時間（図 4）」からは、チャープ帯域幅、チャープ持続時間、チャープスロープなど、チャープのいくつかの重要な特性がわかります。これらは、FMCW レーダーの性能を特徴づける上で重要な特性です。例えば、FMCW センサの距離分解能は、チャープ帯域幅に比例します（式 1）。

$$D_{res} = \frac{C}{2B}$$

D_{res} = 距離分解能

C: 光速

B: チャープ帯域幅

式 1 : 距離分解能

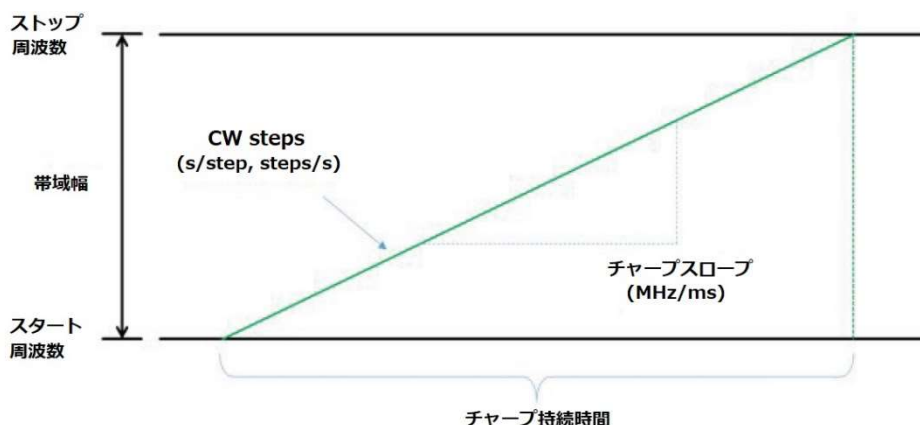


図 4 : FMCW チャープ特性

チャープ帯域幅が広いほど、検出できる分解能は小さく（高く）なります。しかし、分解能はレーダーの最大検知距離とバランスを取る必要があります。最大検知距離は、チャープスロープ（周波数が増加する速度）に反比例します。

$$D_{max} = \frac{fC}{2S}$$

f:IF 周波数

S:チャープスロープ

D_{max}:最大検知距離

C:光速

式 1：最大検知距離

したがって、一定のチャープ持続時間ではチャープ帯域を広くすると、距離分解能は向上しますが、その反面、チャープスロープが増大するため最大検知距離は減少します。その逆の場合も同様です。車載ミリ波レーダーでは、FMCW センサの種類に応じて異なる特性のチャープ信号を使用します。

例えば、アダプティブクルーズコントロール（ACC）では、車両を検出するために長距離の検知機能がより重要ですが、高い分解能はそれほど必要ありません。

一方、衝突回避の場合は、近距離での急激な変化に素早く対応する必要があるため、分解能がより重要になります。

2.2. チャープフレーム

また、チャープシーケンスを把握することも重要です。いくつかの連続したチャープをフレームと呼びます。フレームは、用途に応じて、10 個～数百個のチャープで構成されます。これらのチャープ特性は均一であることもあれば、帯域幅が広くスロープがシャープなチャープと、帯域幅が狭くスロープが浅いチャープが混在していることもあります。このように、フレームの特性を管理することで、チップセットの電力効率を高めつつ、RF 性能を向上させることができます。また、1 つのフレーム内に複数のチャープがあると、センサにはドップラー情報が得られ、これを使って物体の速度を計算することができます。

フレーム長（フレーム時間：Tf）は、車載ミリ波レーダーで検出できる速度分解能に影響を与えます。フレームを長くすると、速度分解能が向上します（式 3）。より長いフレーム（より多くのチャープで構成される）は、より高い速度分解能が得られます。

$$V_{res} = \frac{\lambda}{2Tf}$$

式 3：フレーム長 Tf に対する速度分解能

フレーム内のチャープは、連続送信することもあれば、各チャープの間にアイドル時間が存在することもあります。

各フレームの間には、オフ時間があります。これはフレームのバーストを分離し、チップセットの電力とパフォーマンスを向上します。図 5 は、これらすべての特性をフルフレームで図示したものです。

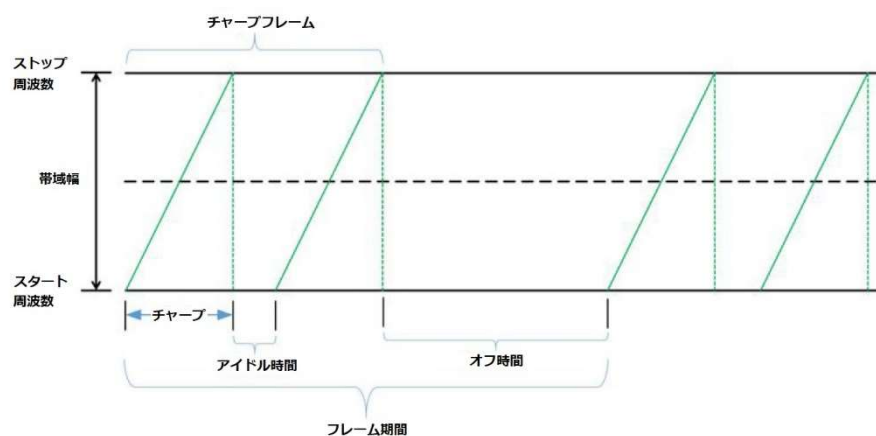


図 5:FMCW フレーム特性

3. FMCW 信号測定

3.1. FMCW 信号の測定に関する課題

現在では、下記の3つの要因により、これらのさまざまなセンサのチャープ特性の測定は難しい場合があります。

- チャープ周波数が極めて急速に変化。
- 超広帯域変調（最大 10 GHz !）
- チャープ周波数が高周波（表 1）。研究開発が進むとさらに高周波になります。

表 1: 各地域における車載ミリ波レーダーの周波数割り当て例

地域（規制当局）	車載ミリ波レーダーの周波数帯域
欧州（ETSI）	76 ~ 81 GHz
米国（FCC）	46.7 ~ 47.9 GHz, 76 ~ 81 GHz
日本（MPT）	60 ~ 61 GHz, 76 ~ 81 GHz

3.2. スペクトラムアナライザを使った測定解析

ほとんどのスペクトラムアナライザは、1 回の掃引でチャープをキャプチャするほど高速ではありません。スペクトラムアナライザは、サンプリングと信号処理を順次行うため、信号をキャプチャできない期間（ブラインドスポット）があります。FMCW チャープのように、周波数が時間とともに急速に変化する信号の場合、ブラインドスポット部分で FMCW 信号の動きを見落とします（図 6）。その結果、スペクトラムアナライザでは FMCW 信号を測定できない、或いは一部しか測定されず、チャープ周波数の変化が測定できないドロップアウトが発生します（図 7）。

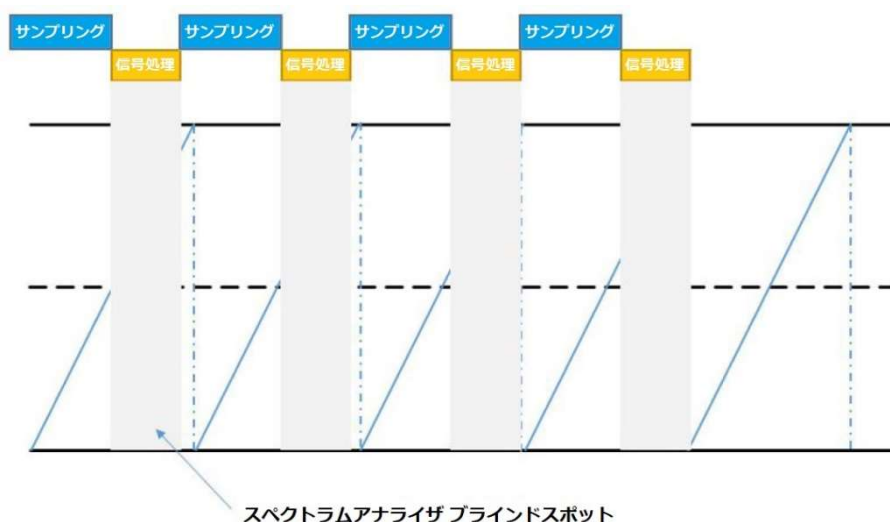


図 6: スペクトラムアナライザは入力された FMCW 信号を順次サンプリングして信号処理します。そのため、時間経過による信号の変化を見落とすことがあります。



図 7: スペクトラムアナライザでの FMCW 信号の測定におけるドロップアウトの例（振幅 - 周波数）

3.3. リアルタイム スペクトラムアナライザ

リアルタイム スペクトラムアナライザ（RTSA）は、RF 信号のサンプリングと信号処理を並列に行うため、ブラインドスポットをなくすことができます。RTSA で測定することにより、チャープの動きを見落とす可能性が低くなります。

しかし、RTSA による測定は、RTSA の帯域幅に制限されます。この帯域幅は、通常、数 10MHz～数 100MHz に限定されます。車載ミリ波レーダーの FMCW チャープ帯域幅は、数 10MHz～数 10GHz です。RTSA の帯域幅よりも広いスパンを必要とする場合は、複数のサンプルを取得し、それらを「つなぎ合わせる」必要があります。これらのつなぎ合わせるサンプルは連続して取得されるため、測定には再び RF 信号を測定できないブラインドスポットが生じます。

RTSA の帯域幅の制限に加えて、解析帯域幅が広いスペクトラムアナライザの多くは、一般に 43GHz 以上の周波数には対応していない一方で、ほとんどの FMCW テクノロジーは 70GHz 以上なのでスペクトラムアナライザ単体では対応できません。

3.4. オシロスコープを使った測定解析

オシロスコープとスペクトラムアナライザを組み合わせた測定システムは、FMCW チャープをモニタするためによく使われる方法です (図 8)。

オシロスコープは、チャープの全特性 (時間および周波数特性) をキャプチャするのに十分な速度を備えています。オシロスコープは、正弦波信号をキャプチャすることができ、これを使って、図 2~図 5 に示したすべてのチャープとフレイムの特性を解析できます。

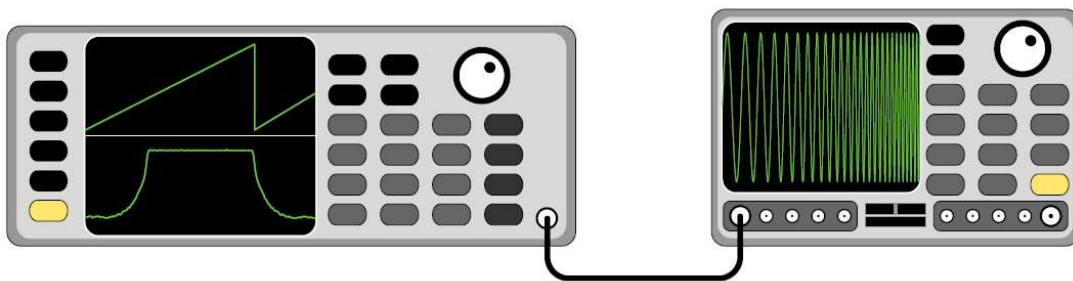


図 8: オシロスコープとスペクトラムアナライザの組み合わせ

これは技術的には最も完成度の高いソリューションですが、2 台の測定器と、それらを接続して測定値を解析するすべてのソフトウェアを購入する必要があるため、圧倒的にコストが高くなります。特に、基本的試験に限定された生産現場やフィールド環境では、このソリューションで提供される全ての測定項目は必要ありません。また、このソリューションは大きく重いので、チャンバー試験やフィールド試験での使用が困難な場合もあります。

4. MS2760A による FMCW 信号測定

4.1. MS2760A による FMCW ミリ波レーダーの試験

超小型スペクトラムアナライザ MS2760A は、FMCW 信号を測定するための堅牢かつ便利なソリューションです。

「3.2. スペクトラムアナライザを使った測定解析」に該当しますが、他のスペクトラムアナライザに比べていくつかの明確な利点があります。

4.1.1. 測定器のサイズと広帯域周波数

まず何よりも、その超小型サイズです。MS2760A は、9kHz~110GHz までの連続した周波数をカバーする唯一のポケットサイズのスペクトラムアナライザです。MS2760A により、チャンバー試験やフィールド試験などが容易になり、生産システムへの組み込みも簡単になります。この超小型サイズと広帯域周波数の組み合わせは、NLTL (非線形伝送線路) 技術 (アンリツの特許技術) によるものです。NLTL “ShockLine” レシーバーは、極めて高い周波数で高調波を発生することができ、MS2760A は 110GHz までの周波数をサンプリングできます。この NLTL 技術により、測定器のサイズを可能な限り小さくし、信号をダウンコンバートするための巨大なミキサーが不要となりました。さらに、信号処理が PC で実施されるため、ハードウェア (マザーボード) を追加する必要もありません。

MS2760A は、その大きさから、チャンバー試験に簡単に組み込むことができ、またラボから持ち出して様々なフィールド試験を行うことができます。

4.1.2. 生産性の向上

これまで説明してきたように、車載ミリ波レーダーを含むミリ波 (mmWave) 試験は、実施が難しい場合があります。ミリ波対応スペクトラムアナライザ（ハーモニックミキサー非搭載）は非常に機構が複雑で高価です。そのため、ラボではしばしば高価な機器のタイムシェアを余儀なくされます。これでは、試験の生産性が低下、開発効率への影響、新製品の市場投入までの期間が延びます。

MS2760A は、手頃な価格で、より多くのエンジニアにミリ波 (mmWave) 対応のスペクトラムアナライザを用意でき、開発作業を並行して行うことができます。そのため、生産システムの立ち上げや開発プロジェクトの遅延や高額な設備投資のリスクを軽減できます。

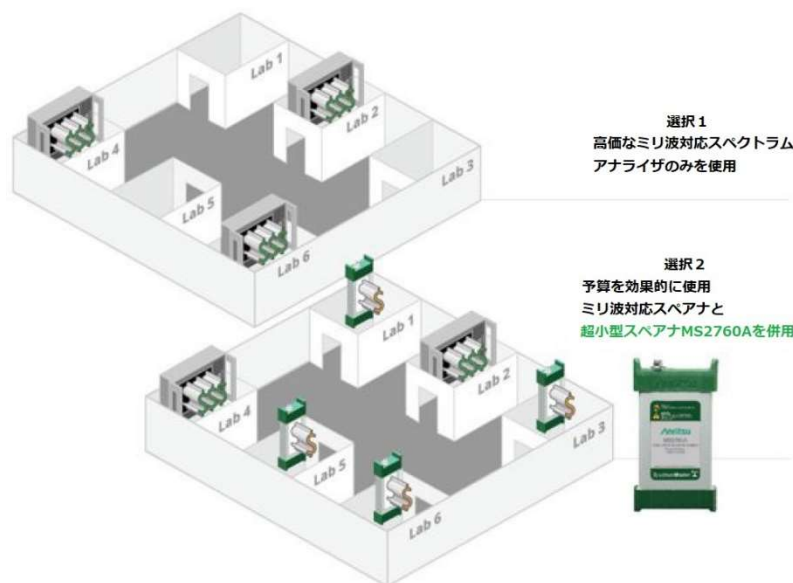


図 9: MS2760A は、より多くのエンジニアにミリ波 (mmWave) の評価機会を提供し、製品開発のスピードアップに貢献します。

さらに、数日間継続して実行するチャンバー試験の場合、MS2760A は、必要な測定機能を試験の終わりまで提供します。高価な機器を数日間にわたり拘束しません。評価機材が限られている状況では、高価な機材を長時間独占することは困難です。MS2760A は、高価な機材の代わりに信号パワーや周波数の変化をモニタします。MS2760A は動作温度が 0~50℃で、温度校正係数を内蔵しているため、条件によっては、DUT とともにチャンバー内に入れることもできます。

4.2. 測定課題の解決

前述のように、スペクトラムアナライザ単体では、FMCW チャープの高速に変化する特性を測定することは困難な場合があります。この課題を解決するために、MS2760A はいくつかの特徴があります。

4.2.1. 最小キャプチャ時間 (Minimum Capture Time)

信号のブラインドスポットを解決するためには、スペクトラムアナライザが信号処理を実施する前段階で、FMCW 信号の全ての動きを解析する元となるデータが必要です。MS2760A は FFT スペクトラムアナライザなので、ある帯域幅（例えば 20M）の信号データを一度にキャプチャし、そのデータをフーリエ変換して信号処理します。

そのため、測定する FMCW フルチャープがある帯域幅（例えば 20M）であることが事前に分かっているならば、信号のブラインドスポットを解決できます。これには、スペクトラムアナライザの最小キャプチャ時間を設定します。

通常、FMCW フレームは、フレーム周期やオフ時間があり、最小キャプチャ時間はチャープ持続時間と同じ時間幅に設定するのではなく、最小キャプチャ時間は以下のように設定します。

チャープ間のアイドル時間とフレーム間のオフ時間によって、FMCW 信号にダウンタイムが生じます。最小キャプチャ時間をチャープ持続時間と同じ時間幅に設定した場合、もし、FFT 演算がオフ時間に掛かると FMCW の周波数帯域の一部が測定できず、測定結果の波形にギャップが生じます。アイドル時間やオフ時間がない場合は、最小キャプチャ時間はチャープ時間と等しくなります。オフ時間がある場合は、すべてのアイドル時間やオフ時間を含んだ FMCW 信号をキャプチャするために最小キャプチャ時間を長くする必要があります（図 10）。

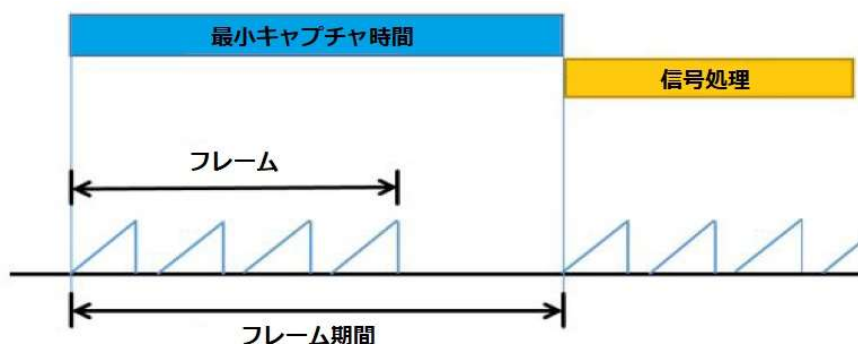


図 10. 最小キャプチャ時間は全てのダウンタイムを含む

MS2760A では、PC のコントロールソフトウェアの“SWEEP”メニューで“MIN CAPTURE TIME”（最小キャプチャ時間）を設定します。最小キャプチャ時間を長く設定したくなるかもしれませんが、キャプチャ時間が長いと掃引時間長くなる（試験時間が長くなる）ので、できるだけ短く設定するのが理想的です。

4.2.2. ゼロスパン

条件に合った最小キャプチャ時間を設定した場合、FMCW 信号の伝送全体に関する周波数領域の情報（スタート/ストップ周波数、帯域幅、振幅など）がわかります。しかし、個々のチャープやチャープフレームに関する時間領域の情報は得られません。前述のように、チャープフレームを直接測定するには、オシロスコープのような非常に高速な測定器が必要です。しかし、MS2760A のゼロスパン機能を使うと、チャープ特性を抽出するために十分な情報を集めることができます。

ゼロスパンとは、基本的にある 1 つの周波数に焦点を合わせ、その周波数での振幅の変化を時間軸で観察する高度なスペクトラムアナライザの機能です。図 11 は、FMCW チャープでのゼロスパンの動作を示しています。図 11 上図は、ゼロスパンが基本的に FMCW フレームの水平方向の断面を取ることを示しています。図 11 下図は、スペクトラムアナライザのゼロスパン画面に表示される「振幅－時間」を模式的に表した図です。

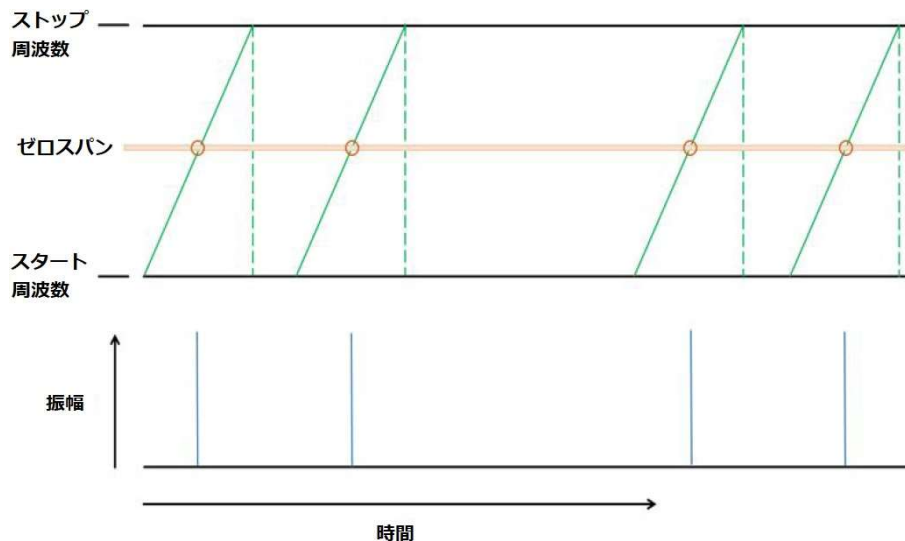


図 11: FMCW レーダー信号のゼロスパン測定

ゼロスパンでは、フレーム時間、フレーム期間、1 フレームあたりのチャープ数など、FMCW 信号のチャープフレームの基本情報を読み取ることができます。

4.3. MS2760A による測定例

以下は、MS2760A が 76GHz~77GHz で 1GHz 帯域の FMCW チャープを測定した例です。ソフトウェアの初期設定では、MS2760A の RBW での最小キャプチャ時間が設定されています。この初期設定のキャプチャ時間の場合、掃引時間は 1.2GHz のスパンに対して約 350ms です。しかし、この設定では FMCW 信号を観察することはできませんでした (図 12)。



図 12: キャプチャ時間が非常に短い設定では、FMCW 信号が観察できません

“SWEEP”メニューの“MIN CAPTURE TIME”の値を大きくして、最小キャプチャ時間をフルフレーム期間と同じかそれ以上に設定します。掃引時間は長くなりますが、測定者は FMCW 信号を観察できます。この例では、フレーム期間が 50ms なので、“MIN CAPTURE TIME”も同じ 50ms に設定します。図 13 にその結果を示します。

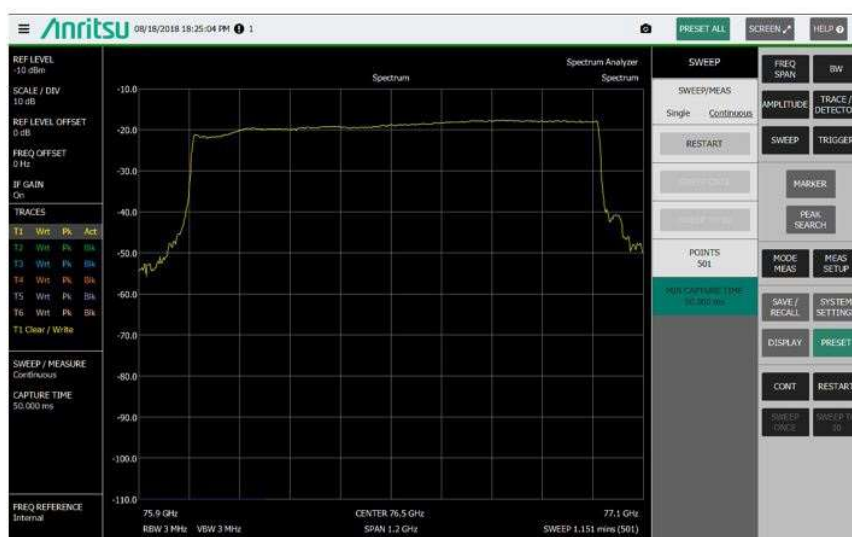


図 13: フレーム期間と同じキャプチャ時間で表示される FMCW 波形

MS2760A は、1 回の掃引で FMCW チャープ信号のすべての動きを捉え、完全に FMCW チャープ波形を測定できます。掃引時間は 350ms から 1.15 分になりました。“MIN CAPTURE TIME”の数値を小さくすれば掃引は速くなりますが、下げすぎると図 7 のようにドロップアウトが発生します。この波形は、基本的には Max Hold 型の波形で、信号波形をキャプチャするためにチャープフレームの多くのサイクルが必要です。しかし、Max Hold 波形よりも優れている点は、FMCW 信号がドロップした場合、それが掃引波形に反映されることです。Max Hold 波形では、この現象がマスクされてしまいます。

ここで、最小キャプチャ時間を設定するためのフレーム期間が不明であると仮定します。ここで役に立つのがゼロスパン測定です。図 14 は、FMCW チャープ信号をゼロスパンで測定したときのチャープの様子です。この場合、2 つのチャープフレームが表示されており、チャープフレームの間にはオフ時間があります。マーカを使用し、フレーム時間とフレーム期間を簡単に測定できます。マーカ 1 とマーカ 2 の時間差は約 15ms（フレーム時間）、マーカ 1 とマーカ 3 の時間差は約 50ms（フレーム期間）です。フレーム期間は周波数領域の最小キャプチャ時間“MIN CAPTURE TIME”設定に必要な測定データです。



図 14 : ゼロスパンで見る FMCW チャープフレーム



図 15: ゼロスパンの FMCW フレームを拡大すると、フレーム内のチャープ数が判明します

さらに、チャープフレームを拡大すると、もう一つの貴重な情報が得られます。チャープフレームは複数のピークで構成されます。各ピークは、このフレーム内のチャープです。このピークを数えれば（ここでは 32 個）、1 チャープフレームあたりのチャープ数と、各チャープのアイドル時間が分かります（図 15）

わずかな設定で、MS2760A は、車載ミリ波レーダー信号の基本的特性を測定できます（FMCW チャープ信号のスタート/ストップ周波数、帯域幅、振幅、フレーム時間/期間、およびフレームあたりのチャープ数）。これらは、ラボ、生産現場、さらにはフィールドで FMCW 送信機の基本的な機能試験を実施するのに十分です。

5. まとめ

FMCW レーダーは、多くの分野、特に車載ミリ波レーダーで物体検出技術に革命をもたらしています。しかし、この複雑な変調方式の RF 測定は、複雑で、費用がかかり、また時間がかかります。

しかし、超小型スペクトラムアナライザ MS2760A は、FMCW レーダーの基本的な試験に最適なツールであり、比類のない超小型サイズで十分な測定機能と利便性を兼ね備えています。

関連する Web は下記です

<https://www.anritsu.com/ja-jp/test-measurement/products/ms2760a>





お見積り、ご注文、修理などは、下記までお問い合わせください。
記載事項は、おことわりなしに変更することがあります。

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