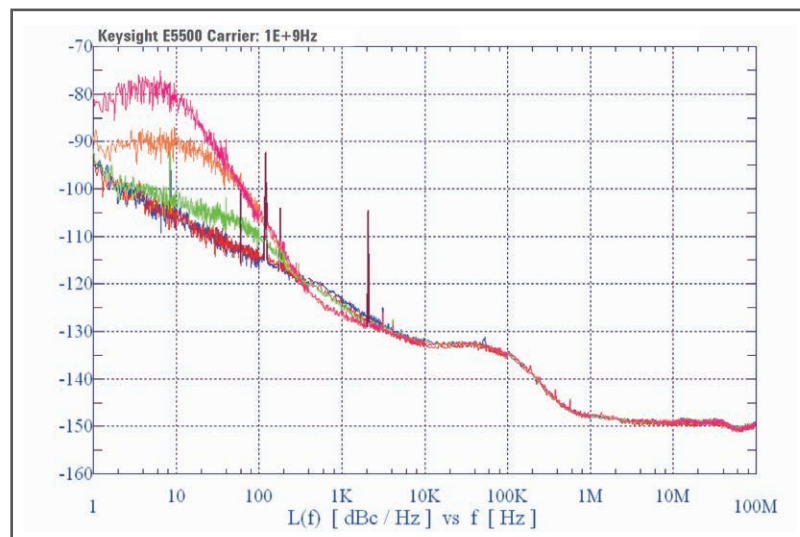


Keysight Technologies

周波数カウンタを使用した 搬送波信号近傍の位相雑音の測定

Application Note
レーダ測定シリーズ



概要

トランシーバ用の搬送波信号とレシーバ用の基準信号を発生する局部発振器(LO)は、すべてのレーダ／電子戦(EW)／通信システムでコアとなる機能です。通信システムでは、さらに多くのデータが限られた帯域幅を使用しています。レーダ・システムの進化に伴い、遠距離のターゲットをより正確に捕捉することが求められています。

このような要求の厳しいニーズに対応するには、安定度とスペクトラム品質の高いLOを使用して、高性能のトランスミッタ／レシーバをデザインする必要があります。安定度やスペクトラム品質の検証では、シグナル(スペクトラム)・アナライザなどの測定器を使用すれば、LOの搬送波信号近傍の雑音／スペクトラム成分を詳細に表示できます。しかし、この種の測定器では、搬送波に極めて近い位相雑音をクリアに表示できません。ここで、「搬送波近傍」、「近傍」とは、周波数ドメイン・プロットのX軸上の搬送波周波数の±200 kHzの範囲内の雑音を表しています。

搬送波近傍の雑音をよりクリアに表示するには、Keysight 53230Aユニバーサル周波数カウンタなどの測定器を使って、シグナル・アナライザでは表示できないところから測定を開始します。このアプリケーション・ノートの残りの部分では、高い分解能とギャップのない測定機能を備えた53230Aを使用することにより、LO信号を詳細に解析できることを説明します。また、測定結果の例を変調ドメイン解析プロットとアレン偏差プロットで示します。¹

問題

最近まで、搬送波信号から10 Hz未満の雑音の特性を徹底的に評価するには、ヘテロダイン法(参考資料2、Riley)などの複雑な測定セットアップや専用の位相雑音アナライザなどの高価な測定システムが必要でした。シグナル・アナライザや周波数カウンタを代わりに使用することはできますが、それぞれに限界があります。

前述のように、シグナル・アナライザでは、スペクトラム成分を詳細に表示できます。代表的な測定では、搬送波近傍の雑音がクリアに表示されます。また、スパンと帯域幅を調整して雑音成分をさまざまな角度で表示することができます。ただし、搬送波近傍では雑音成分が増加し、雑音の原因を特定することは難しくなります。

周波数カウンタでは近傍測定を行うことができますが、有用な結果が得られるように注意する必要があります。例えば、搬送波近傍での測定では、低周波雑音に起因するゆっくりとした変化を確認できるだけのデータを捕捉する必要があります。しかし、大量のタイミング測定の統計解析を行う場合は、標準偏差などの従来の方法では不十分です。この場合、サンプル数が大きいほど、標準偏差が大きくなる可能性があります。すなわち、標準偏差が収束しなくなる可能性があります。

¹ 発振器の不安定性に起因する雑音は、周波数ドメインで測定された場合は通常、位相雑音と呼ばれます。タイム・ドメインで測定された場合は通常、ジッタと呼ばれます(参考資料1、Button)。このアプリケーション・ノートではタイミング測定に重点を置いて説明していますが、高周波LO信号は通常、周波数ドメインに表示されるため、ジッタを「位相雑音」または「雑音」と呼びます。

解決策

搬送波近傍の測定では、53230Aカウンタなどの測定器を使用することにより、シグナル・アナライザより詳細な解析が可能です。1つの重要な要素(最新のカウンタの重要な差別化要因)が測定分解能です。例えば、53230Aは20 psのタイミング測定分解能を備えています。

53230Aにはまた、高価な高性能タイミング測定器にしか装備されていなかった機能が搭載されています。位相雑音測定に関連した例として、ギャップのない、すなわち、デッド・タイムのない測定があります。余談ですが、この機能により、モジュレーション・ドメイン・アナライザ(MDA)と呼ばれる測定器が実現します。MDAスタイルのプロットは近傍解析に有用なツールです。

これらの機能を使用した搬送波信号の近傍解析について説明する前に、ギャップのないタイミング測定の重要性について簡単に説明します。

ギャップのない測定

代表的なタイミング測定器は、信号の立ち上がり/立ち下がりエッジなどの「スタート・イベント」の発生時にタイマを起動させることによって動作します。タイミング測定器には、ストップ・イベントを検出するまでカウントするタイマが内蔵されています。ストップ・イベントは対応する立ち上がりエッジまたは立ち下がりエッジであり、信号の1周期を表します。

どのカウンタも、サンプリング周期またはゲート時間を調整できます。周波数/周期測定では、カウンタは、ゲート時間の間、エッジ間のタイミングを測定します。ゲート時間の終わりに、すべてのタイミング測定を平均し、逆数を求め、測定周波数を返します。

「汎用」モードでは、カウンタは、測定ゲートの終了後、再アーミング周期を経て、次のゲートを開始します。測定器が再アーミングしている間は信号データが見逃されるため、これはギャップのない測定ではありません。

ギャップのない測定では、再アーミング時間がかかりません。信号エッジ・イベントは、指定のサンプル数(53230Aでは1~1,000,000の範囲)に基づいて、連続的に時間同期されます(ギャップなし)。

カウンタのギャップなしの測定速度は、測定エンジンの速度に依存します。53230Aユニバーサル・カウンタのギャップなしのサンプリング・レートは1 Mサンプル/sで、現時点で業界最高速です。入力信号が測定器のサンプリング・レートを超過している場合(10 MHzあるいは10 GHz)は、プリスケール回路で入力信号を分周してから、内部測定エンジンに送ります。このため、カウンタは、搬送波周波数から遠い雑音成分を測定することはできませんが、搬送波近傍の信号成分を詳細に解析することができます。これについては、結果のセクションで説明します。

高い分解能とギャップのない測定機能を兼ね備えたカウンタでは、以下の2つの有用な信号解析が可能です。

- 搬送波近傍の雑音を詳細に解析でき、雑音の原因をより正確に診断できます
- 他のどのようなタイプの測定器よりもLOに近い測定が行えます

これらの機能の例については、結果のセクションで紹介しています。

搬送波近傍

発振器やクロックの安定度および低周波雑音の処理を解析するために、アラン分散(あるいは2サンプル分散)が開発されました(式1)。アラン偏差を使用する前に、この方法を周波数カウンタで捕捉したデータに適用して、近傍位相雑音の原因を把握します。

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (\bar{y}_{n+1} - \bar{y}_n)^2 \rangle = \frac{1}{2\tau^2} \langle (x_{n+2} - 2x_{n+1} + x_n)^2 \rangle$$

式1. アラン分散(あるいは2サンプル分散)は、フラクショナル周波数測定(y)または位相や時間摂動(x)によって計算できます。

この方法について詳しくお知りになりたい場合、Web上で数多くの参考資料が公開されています。ここでは、概要を紹介します。

- アラン分散は2つの方法(フラクショナル周波数測定(y)または位相や時間摂動(x))で計算できます。
- タウ(τ)は、各"y"または"x"サンプルのモニタ時間を表します。選択した τ の値によって、ターゲットの雑音周波数範囲が決まります。例えば、1 sの τ 値を選択すれば、1 Hzの雑音成分がすべて積分されて消去されます。
- 括弧は無限級数を表します。無限級数に使用されている測定回数(n)が多いほど、計算の信頼度レベルが高くなります。

もう1つの関連する計算がアラン偏差で、アラン分散の平方根です(式2)。この計算を大量の周波数データのサンプルに適用し、プロットすることにより、位相雑音性能に影響を及ぼす潜在的な周期性妨害を確認することができます。この例を結果のセクションに示します。

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\sigma_y^2(\tau)}$$

式2. アラン偏差はアラン分散の平方根です。

結果と利点

2つの例から、周波数カウンタ、PC、ベクトル・データを簡単に操作できるプログラミング環境(MATLAB、Keysight VEE、LabVIEW)を用いることにより、どのような結果が得られるかがわかります。どちらの場合も、キーサイトの信号発生器を使用して、劣化させた信号が生成され、RF出力が53230Aに接続されています。

MDAプロットの使用

最初の例では、53230Aに対する入力、方形波雑音により周波数変調された1 GHzの搬送波です。カウンタのギャップなしの測定速度は100 kサンプル/sに設定され、500個の測定値が収集されました。データはPCIに転送され、Keysight VEEで処理され、MDAスタイルのプロットで表示されています(図1)。この種のプロットでは、X軸上に時間データ、Y軸上に周波数データが表示されます。

シグナル・アナライザのディスプレイには、FMまたはFMが搬送波近傍にスペクトラム成分を持つクラッタとして現れます。これに対して、MDAプロットは、潜在的なノイズ・ソースのタイム・ドメイン形状を示します。この場合、MDAプロットからは、1 GHz搬送波に付加されたFM方形波雑音がわかります。これは、電源、変圧器またはメカトロニクス・コンポーネントに起因するスプリアス結合雑音を検出するのに非常に有用です。

また、ヒストグラムで表すことにより、「周波数ドメインのような」フォーマットで表示できます。ギャップのないサンプルのヒストグラム・プロット表示は、全帯域幅が狭く分解能帯域幅が高いシグナル・アナライザのデータ表示と同等です。

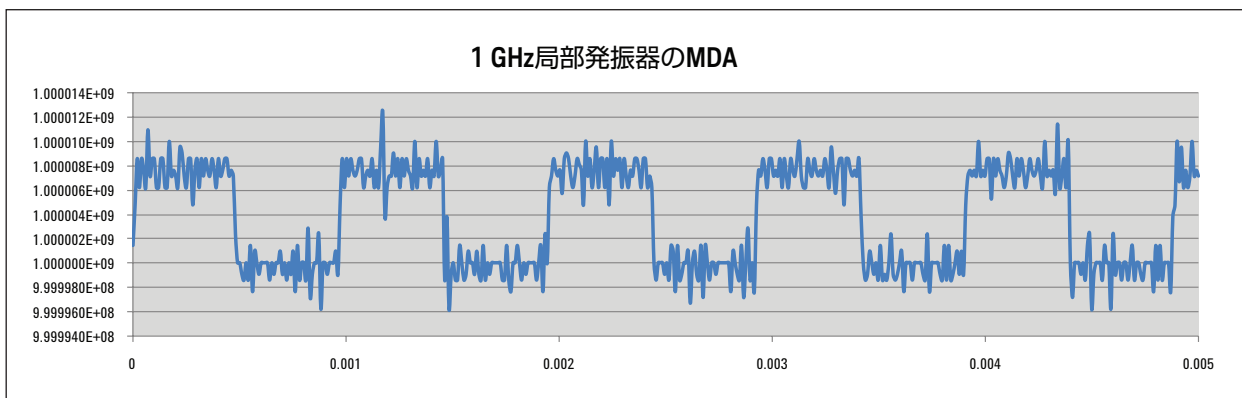


図1. このMDAスタイルのプロットは、周波数(Y軸)対時間(X軸)を示しています。このプロットからは、1 GHzの搬送波に印加された変調信号がわかります

アラン偏差の適用

2番目の例では、アラン偏差を使用して3 GHz LO信号を解析しています。周期性雑音を付加するために、テスト信号は、3 Hzの偏差で1 Hzの正弦波によって周波数変調されています。53230Aのギャップなしの測定速度は100 msに設定され、1,200回の測定が実行され、12 sのデータが得られました。

40 ms ~ 2 sの範囲の τ 値を使用して「全タウ解析」と呼ばれるデータの解析を行い(参考資料3、NIST)、データのアラン偏差を計算しました。LO信号の全タウ解析により、温度サイクルなどの低周波周期性妨害を簡単に検出できます(参考資料2、Riley)。全タウ・プロットは、MATLABを使用して作成されました(図2)。¹

図2では、 τ 値が1、2 sで低下しています。1 Hz正弦波周期であるため、これは当然の結果です。結果として、付加された1 Hzの雑音が、1 sと2 sの τ 値でのアラン偏差測定から積分され消去さ

れています(雑音周期の整数倍であるため)。図では、 τ 値が小さくなるに従って、アラン偏差も徐々に減少しています。これは、ノイズ・ソースの周波数レンジからさらに逸脱しているためです。

いくつかの τ 値での減少およびアラン偏差測定のトレンド変化から、LO信号に影響を及ぼしている寄生雑音の周波数レンジがわかります。こうしたLO信号に極めて近い雑音の解析により、ソースを特定し、雑音の低減/除去に役立つ情報を得ることができます。

ここでは、アラン分散/偏差測定による雑音および安定度の解析について、ごく簡単に説明しています。詳細については、NISTハンドブック(参考資料3)をご覧ください。

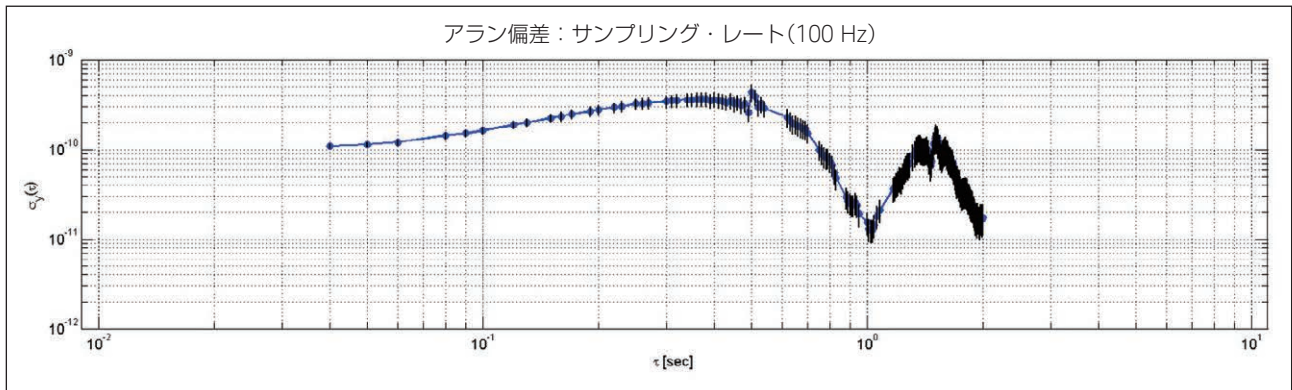


図2. アラン偏差の計算に基づいた全タウ・プロットでは、低周波の周期性妨害を確認できます

¹ 図2のプロットを作成したMATLABスクリプトは、プログラム/コード共有サイト、MATLAB Centralの"Stability Analyzer 53230A"で無料で提供されています。

まとめ

周波数カウンタは、シグナル・アナライザで得られる情報を補完するのに、最適なツールです。高分解能とギャップのないサンプリングの2つの重要な機能を備え、近傍位相雑音を捕捉できるだけでなく、ノイズ・ソースに関するヒントを得たり、雑音を低減／除去する方法を見つけることができます。

参考資料

1. Button, K.J.(1984年)。Infrared and Millimeter Waves; Ch 7, Phase Noise and AM Noise Measurements in the Frequency Domain(239-289)。Academic Press, Orlando, FL
2. Riley, W. J.(2007年)。Methodologies for Time-Domain Frequency Stability Measurement and Analysis。以下のWebサイトから入手：www.wiley.com/METHODOLOGIES.pdf
3. National Institute of Standards and Technology(NIST) Handbook of Frequency Stability Analysis(NIST Special Publication 1065)。NISTのWebサイトから入手：<http://tf.nist.gov/general/pdf/2220.pdf>

関連情報

- **53200シリーズ RF&ユニバーサル周波数 カウンタ／タイマ**、カタログ番号5990-6339JAJP
- **Keysight 53200Aシリーズ RF/ユニバーサル周波数 カウンタ／タイマ**、カタログ番号5990-6283JAJP
- MATLAB：詳細については、MathWorksのWebサイトをご覧ください：www.mathworks.com/products/matlab/
- Selection Guide：**Keysight's Phase Noise Measurement Solutions**, literature number 5990-5729EN

myKeysight

myKeysight

www.keysight.co.jp/find/mykeysight

ご使用製品の管理に必要な情報を即座に手に入れることができます。

AXIe

www.axiestandard.org

AXIe (AdvancedTCA® Extensions for Instrumentation and Test) は、AdvancedTCA® を汎用テストおよび半導体テスト向けに拡張したオープン規格です。Keysight は、AXIe コンソーシアムの設立メンバーです。

DEKRA Certified
ISO 9001:2008
Quality Management System

www.keysight.com/go/quality

Keysight Electronic Measurement Group
DEKRA Certified ISO 9001:2008
Quality Management System

契約販売店

www.keysight.co.jp/find/channelpartners

キーサイト契約販売店からもご購入頂けます。
お気軽にお問い合わせください。

www.keysight.co.jp/find/AD

キーサイト・テクノロジー合同会社

本社 〒192-8550 東京都八王子市高倉町9-1

計測お客様窓口

受付時間 9:00-18:00 (土・日・祭日を除く)

TEL ☎ 0120-421-345 (042-656-7832)

FAX ☎ 0120-421-678 (042-656-7840)

Email contact_japan@keysight.com

ホームページ www.keysight.co.jp

記載事項は変更になる場合があります。
ご注文の際はご確認ください。