



テスト済み回路設計集“Circuits from the Lab™”は共通の設計課題を対象とし、迅速で容易なシステム統合のために製作されました。さらに詳しい情報又は支援は <http://www.analog.com/jp/CN0366> をご覧ください。

接続又は参考にしたデバイス

ADL6010	0.5GHz～43.5GHz、45dB、マイクロ波検出器
AD7091R	A/D コンバータ、1MSPS、12ビット、超低消費電力、10ピンLFCSPとMSOP

範囲が-30dBm～+15dBm の 40GHz マイクロ波パワー・メーター

評価および設計サポート環境

回路評価ボード

ADL6010 評価用ボード (ADL6010-EVALZ)

AD7091R 評価用ボード (EVAL-AD7091RSDZ)

システム・デモンストレーション・プラットフォーム
(EVAL-SDP-CB1Z)

設計と統合ファイル

回路図、レイアウト・ファイル、部品表

回路の機能とその利点

図1に示す回路は範囲が45dBの高精度40GHzマイクロ波パワー・メーターで、必要なコンポーネントは2つだけです。RF検出器は、アナログ直線化回路が後に続くショットキー・ダイオードを使用する革新的な検出セルを備えています。低消費電力の12ビット1MSPS A/Dコンバータ(ADC)は、シリアル・ペリフェラル・インターフェース(SPI)ポートにデジタル出力を送ります。

測定実行前に、測定対象となる特定のRF周波数で簡単な校正ルーチンが実行されます。その後、測定モードでシステムを動作させることができます。測定モードでは、CN-0366評価用ソフトウェアが、検出器の入力に加えらる校正済みのRF入力電力をdBm単位で表示します。

この回路の総消費電力は5V単電源使用時で9mW未満です。

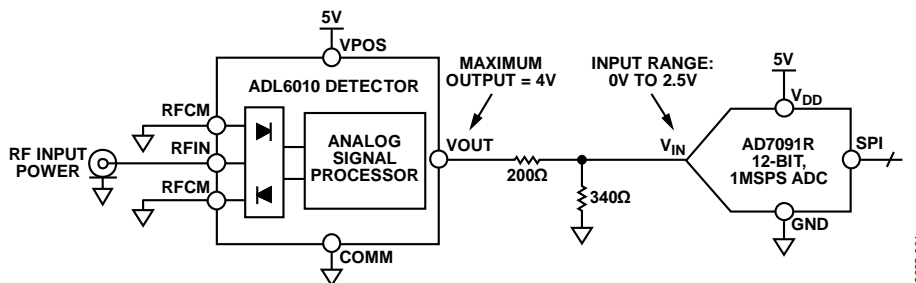


図1. マイクロ波パワー・メーターの簡略回路図 (全接続の一部およびデカップリングは省略されています)

アナログ・デバイセズ社は、提供する情報が正確で信頼できるものであることを期していますが、その情報の利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許やその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。また、アナログ・デバイセズ社の特許または特許の権利の使用を明示的または暗示的に許諾するものでもありません。仕様は、予告なく変更される場合があります。本紙記載の商標および登録商標は、各社の所有に属します。※日本語資料は REVISION が古い場合があります。最新の内容については、英語版をご参照ください。

回路説明

図1に示す回路は、ADL6010 RFおよびマイクロ波パワー検出器を使用して、AC波形を、入力波形の振幅に合わせてスケールした出力電圧に変換します。出力電圧は電圧に対して線形で、勾配の単位は V/Vrms です。ADL6010は、最大帯域幅40MHzのRF信号のエンベロープを取り出すことができます。ただし、ほとんどのパワー・メーター・アプリケーションの出力電圧は、入力波形の振幅を表わす安定したDC値です。

AD7091R 12ビット1MSPS ADCは、検出器出力のサンプリングを行います。そのデータはデータ・キャプチャ・ボードによって処理され、さらに処理と解析を行うためにPCへ送られます。ADCには内部2.5Vリファレンス電圧があり、これはフルスケール電圧を設定するために使用できます。より大きいフルスケール電圧が必要な場合は、内部リファレンスをオーバーライドすることができます。

出力電圧は入力波形の周波数によって変化するので、システムには校正が必要です。変調信号を測定する時は補正係数も必要です。計算には、シンプルなグラフィカル・ユーザ・インターフェースを備えたPCベースのソフトウェアを使用することができます (CN-0366 評価用ソフトウェア)。

パワー検出器

ADL6010は、500MHz~43.5GHzで動作する45dBのエンベロープ検出器です。電圧に対して線形な勾配は約5.9V/Vrmsで、50Ωシステムにおける絶対検出器入力範囲は-30dBm~+15dBmまたは-43dBV~+2dBVです。検出セルは、8個のショットキー・ダイオードを使用した独自のダイオード・アレイを使用しており、このアレイは、rms入力電圧振幅を基準とした場合に全体的スケール・ファクタ (または伝達ゲイン) 公称値が×5.9の線形電圧計を形成する、新型のリニアライザ回路に接続されています。出力平均化コンデンサを備えたADL6010は、エンベロープが変化する信号を検出できますが、同じ入力電力に対する出力電圧の変化を補正するために、補正係数を使用する必要があります。出力電圧とrms入力電圧の関係は次式で表されます。

$$V_{OUT} = Slope \times V_{RFIN} + Intercept$$

ここで、
 V_{OUT} はVOUTピンの電圧、
 $Slope$ は10GHzで約5.9V/Vrms、
 V_{RFIN} はrms入力電圧、
 $Intercept$ はデータ延長時にデータとy軸が交差する位置の値です。

ADL6010の機能ブロック図を図2に示します。

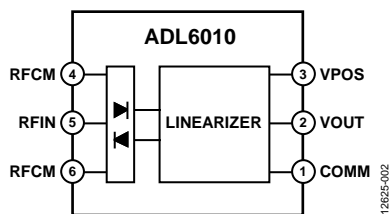


図2. ADL6010 RF/マイクロ波検出器の機能ブロック図

周波数に伴う伝達関数の変化を図3に示します。1GHzと40GHzの出力には、約300mVの電圧差があります。全周波数範囲にわたる温度変動は±0.5dB未満です。図4と図5は、それぞれ10GHzと40GHzにおける温度別の特性変化を示しています。

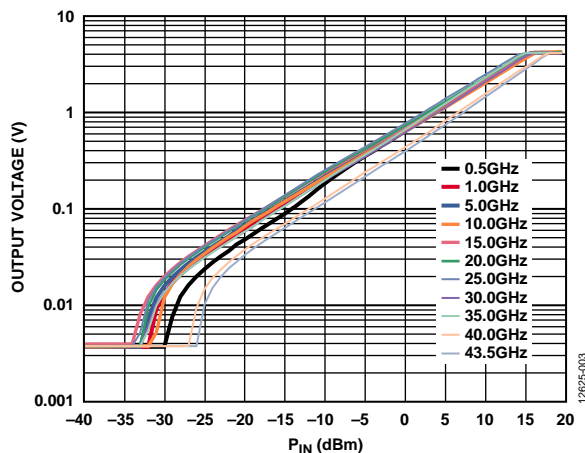


図3. 500MHz~43.5GHzにおける周波数別の伝達関数

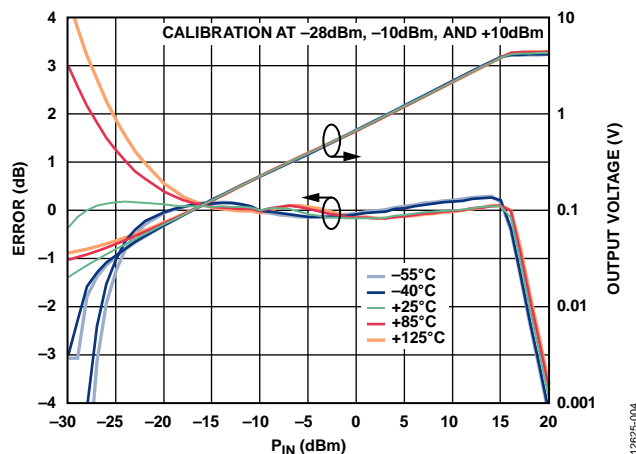


図4. 10GHzにおける温度別の伝達関数と誤差

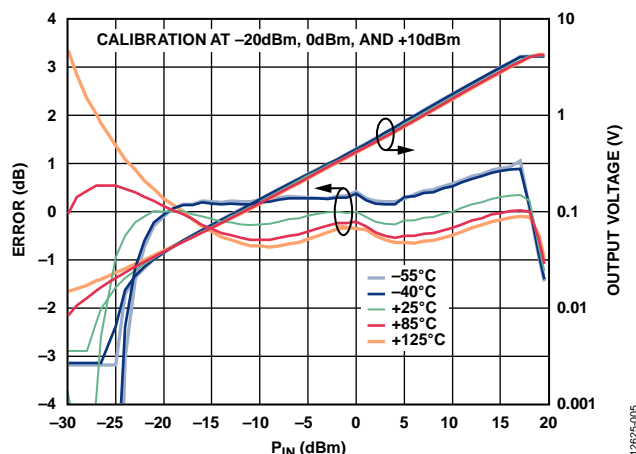


図5. 40GHzにおける温度別の伝達関数と誤差

A/D コンバータ

AD7091Rは12ビット1MSPSのADCで、入力電圧範囲は0V～ V_{REF} です。リファレンス電圧は、内部2.5Vリファレンスか、内部リファレンスをオーバーライドする外部リファレンスによって供給されます。外部リファレンスは5Vとすることができます。2.5Vフルスケール電圧 ($V_{REF} = 2.5\text{ V}$) の場合のLSBの大きさは次のようになります。

$$LSB = (2.5\text{ V})/2^{12} = 610\ \mu\text{V}$$

ADL6010の出力電圧は約25mV～4Vなので、内部2.5Vリファレンスを使用する時は、減衰約1.6の200Ω/340Ω抵抗分圧器により信号振幅を下げて、常にAD7091Rの範囲内となるようにします。

データ解析

ADCによってサンプリングされるデータを取り込むには、EVAL-SDP-CB1Zシステム・デモンストレーション・プラットフォーム (SDP) ボードを、AD7091R評価ボード制御ソフトウェアをベースにしたソフトウェアと組み合わせて使用します。このソフトウェアには、パワー・メーターの読み出しおよび校正用のオプションがあります。パワー・メーターの表示は、ADL6010の入力に加わる電力を示します。ADL6010とAD7091Rで正確な電力測定を行うには、レベルの異なる2つの既知の入力電力をADL6010の入力に加えて、それぞれに対応する出力のADCコードを読み取ります。これら4つの値はグラフ上で2つのポイントを表します。これらの値は、後で校正手順に使用するために保存しておく必要があります。これら2つのポイントを以下に示します。

- ポイント1: (V_{LOW} , $CODE_{LOW}$)
- ポイント2: (V_{HIGH} , $CODE_{HIGH}$)

これら2つのポイントから勾配と切片が得られ、特定の動作周波数でシステムを校正するために使用することができます。

ソフトウェアのパワー・レベル表示画面を図6に示します。

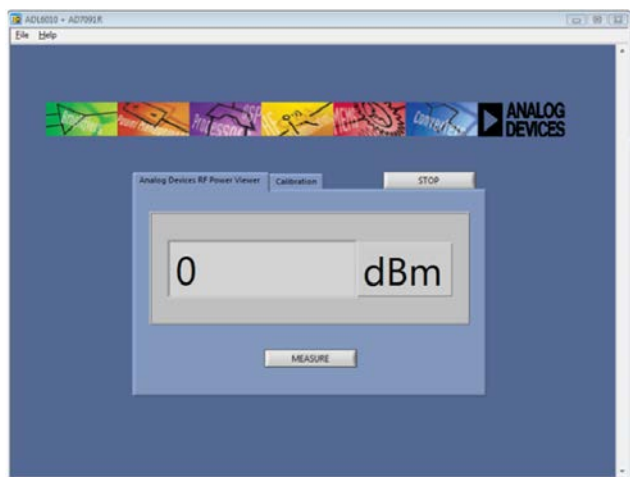


図 6. CN-0366 評価用ソフトウェアの表示画面

システムの伝達関数

検出器入力からADC出力までのシステムの勾配と切片は、次式で表されます。

$$Slope_{SYS} = \frac{CODE_{HIGH} - CODE_{LOW}}{V_{HIGH} - V_{LOW}}$$

$$INT_{SYS} = CODE_{HIGH} - (Slope_{SYS} \times V_{HIGH})$$

ここで、

$Slope_{SYS}$ はシステムの勾配、

$CODE_{HIGH}$ と $CODE_{LOW}$ は、それぞれADCのハイレベル・コード出力とローレベル・コード出力、

V_{HIGH} 、 V_{LOW} は、それぞれハイレベルRF電圧とローレベルRF電圧、

INT_{SYS} はシステムの切片です。

システム全体の伝達関数は次式で表されます。

$$CODE = Slope_{SYS} \times V_{IN} + INT_{SYS}$$

ここで、 V_{IN} は入力RF信号のrms電圧です。

これを V_{IN} について解きます。

$$V_{IN} = \frac{CODE - INT_{SYS}}{Slope_{SYS}}$$

したがって、dBmで表した電力 P_{IN} は次のようになります。

$$P_{IN} (\text{dBm}) = 10 \times \log_{10} \left[\frac{10^3}{R} \left(\frac{CODE - INT_{SYS}}{Slope} \right)^2 \right]$$

入力インピーダンスが50Ωの場合、この式は次のように整理できます。

$$P_{IN} (\text{dBm}) = 13.01 \text{ dB} + 20 \times \log_{10} \left(\frac{CODE - INT}{Slope} \right) \quad (1)$$

ユーザ校正アルゴリズム

CN-0366評価用ソフトウェアは、特定の動作周波数でワンタイム校正を行います。校正は、図6に示すウィンドウのCalibrationタブを使用して行います。校正ルーチンは以下の通りです。

1. RF電力をハイレベル (V_{HIGH}) に設定します。
2. ADCからのコード ($CODE_{HIGH}$) を測定します。
3. RF電力をローレベル (V_{LOW}) に設定します。
4. ADCからのコード ($CODE_{LOW}$) を測定します。
5. システムの勾配を計算します (単位はコード数/V)。
6. システムの切片を計算します (単位はコード数)。
7. 勾配と切片を校正係数として保存します。
8. 任意の入力RF電力でADCコードを測定します。
9. コード、勾配、切片を使用して入力電力を計算します。

ADC を含む全シグナル・チェーンの測定結果

測定は、CN-0366 評価用ソフトウェアを使用して複数の周波数で行いました。各周波数では、測定実施前に校正を行っています。その結果を図7、図8、および図9に示します。図7では、誤差の校正電力レベルへの依存性に注意してください。適切な校正レベルを選ぶには、ある程度の試行錯誤が必要です。

図7から図9は、測定入力電力と ADL6010 の入力に実際に加えられた電力、および両者の誤差を示しています。

データは 0°C、25°C、70°C の各温度で測定され、1GHz、10GHz、20GHz、および 30GHz の各周波数に対する結果が図10、図11、図12、図13に示されています。

いくつかの測定値は、平均化機能を持たない初期バージョンのソフトウェアを使用して得られたものなので、低入力電力レベル側に大きなリップルが見られます。

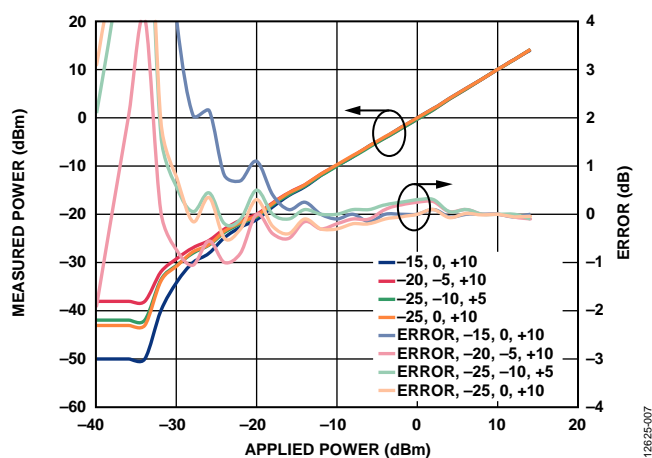


図7. 1GHz でさまざまな3点校正を行った場合の印加電力と測定電力/誤差の関係

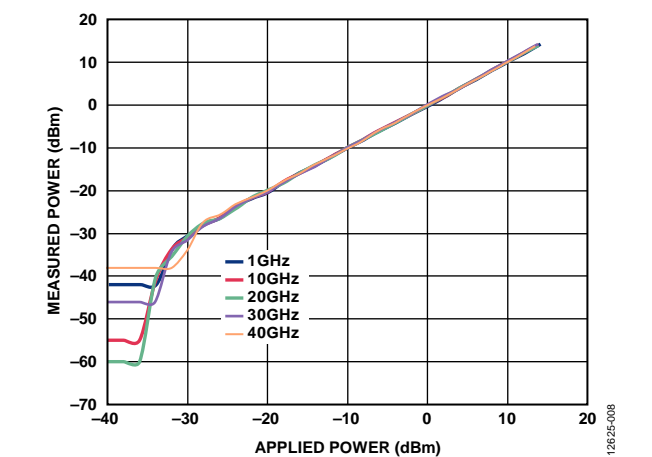


図8. さまざまな周波数における印加電力と測定電力の関係

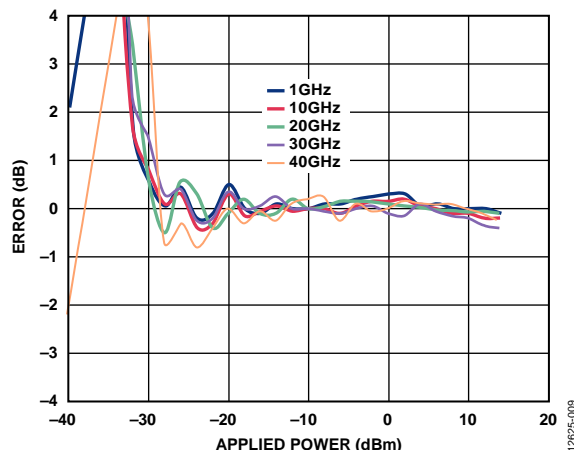


図9. さまざまな周波数における印加電力と測定電力誤差の関係

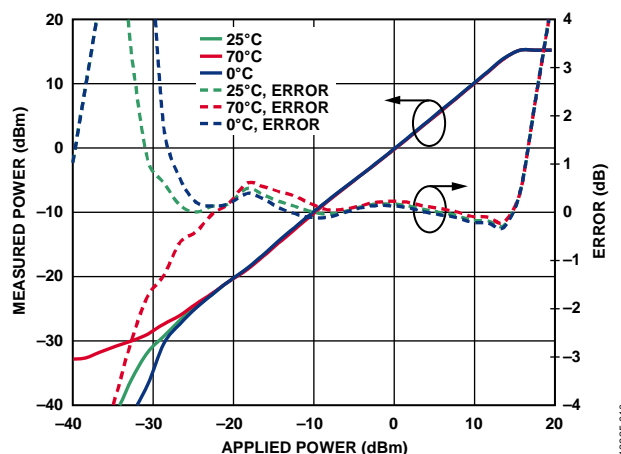


図10. 1GHzにおける温度別の印加電力と測定電力/誤差の関係

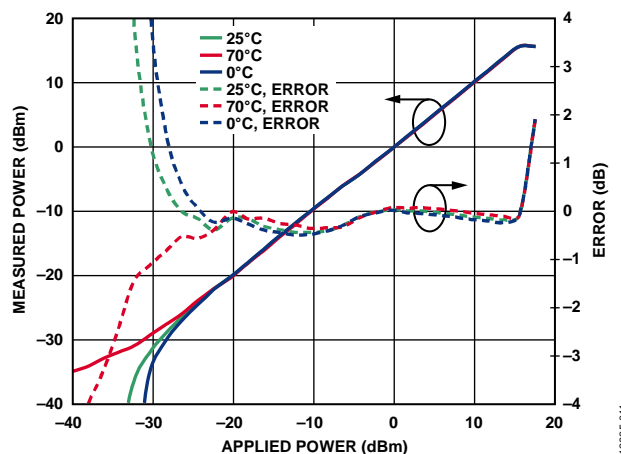


図11. 10GHzにおける温度別の印加電力と測定電力/誤差の関係

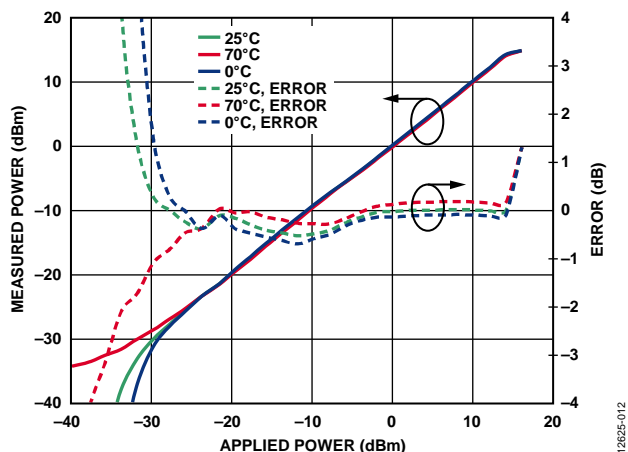


図 12. 20GHz における温度別の印加電力と測定電力/誤差の関係

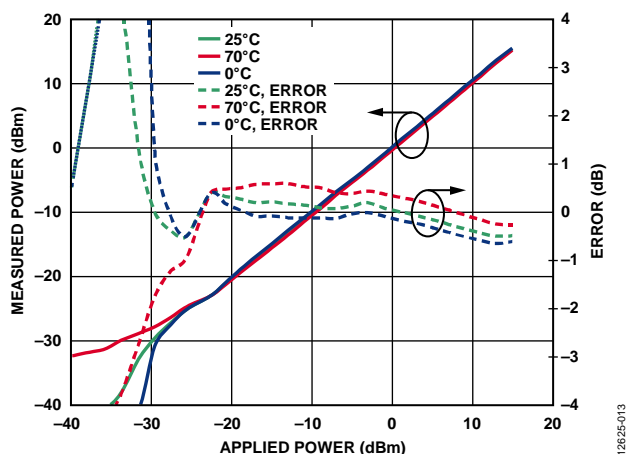


図 13. 30GHz における温度別の印加電力と測定電力/誤差の関係

式の概要

以下に、CN-0366 の式の概要と、パワー・メーター回路の機能を理解する手掛かりとなる追加的な式を示します。

ADL6010 の伝達関数は次式で表されます。

$$V_{OUT} = Slope_{DET} \times V_{IN} + INT_{DET}$$

ここで、

V_{OUT} は検出器の DC 出力電圧、
 $Slope_{DET}$ は V/V_{rms} で示した検出器のゲイン/勾配、
 V_{IN} は入力 RF 信号の rms 電圧、
 INT_{DET} は V 単位で示した検出器の切片です。

これを V_{IN} について解きます。

$$V_{IN} = \frac{V_{OUT} - INT_{DET}}{Slope_{DET}}$$

ADC の伝達関数は次式で与えられます (ADL6010 でドライブした場合)。

$$CODE = V_{OUT}/LSB$$

$$LSB = V_{REF}/4096$$

ここで、

$CODE$ は ADC の出力コードで 0~4096 の無次元数、
 V_{REF} は ADC のフルスケール・リファレンス電圧で、単位は V、
 LSB は ADC により識別可能な最小量子化電圧で、単位は V/ステップまたは V/ビットです。

これを V_{OUT} について解きます。

$$V_{OUT} = CODE \times LSB$$

これを前出の V_{IN} の式に代入すると次式が得られます。

$$V_{IN} = \frac{CODE \times LSB - INT_{DET}}{Slope_{DET}} \tag{2}$$

すべての式を参照して入力電力の式に戻ると、次式が得られます。

$$P_{IN} \text{ (dBm)} = 10 \log_{10} \left[10^3 \frac{V_{IN}^2}{R} \right]$$

ここで、 R は ADL6010 の RFIN ピンのインピーダンスです。

電力の式に V_{IN} を代入すると次式が得られます。

$$P_{IN} \text{ (dBm)} = 10 \log_{10} \left[\frac{10^3}{R} \left(\frac{CODE \times LSB - INT_{DET}}{Slope_{DET}} \right)^2 \right]$$

この式を整理すると次式が得られます。

$$P_{IN} \text{ (dBm)} = 30 \text{ dB} - 10 \log_{10} R + 20 \log_{10} \left(\frac{CODE \times LSB - INT_{DET}}{Slope_{DET}} \right)$$

$R = 50\Omega$ の場合、式はさらに次のように整理できます。

$$P_{IN} \text{ (dBm)} = 13.01 \text{ dB} + 20 \log_{10} \left(\frac{CODE \times LSB - INT_{DET}}{Slope_{DET}} \right) \tag{3}$$

この式は ADL6010 検出器出力の勾配と切片に関する式で、システム内の相互関係を明らかにするという概念的な目的に有効です。ただし、実際的な目的のためには、システム全体の勾配と切片という観点に基づくシステムの伝達関数が必要です。この場合、勾配の単位はコード数/V で、切片の単位はコード数です。最終的な伝達関数は次のように導くことができます。

システムの勾配 ($slope_{SYS}$) とシステムの切片 (INT_{SYS}) に基づくシステムの伝達関数の導出は、式 2 から始まります。この式は、検出器の勾配 ($slope_{DET}$) と切片 (INT_{DET}) を基づいて入力電力を導きます。この導出は、以下に示すように、 V_{IN} の式 (式 2) の分子と分母の両方に $1/LSB$ を乗じることによって行われます。

$$V_{IN} = \frac{CODE \times LSB - INT_{DET}}{Slope_{DET}} \times \frac{1/LSB}{1/LSB}$$

V_{IN} に関するこの式を式2に代入すると、式1が得られます。

INT_{DET} の単位はV、 $Slope_{DET}$ の単位はV/Vrms、LSBの単位はV/コード数です。1/LSBを乗じると INT_{DET} が等価ADCコードに、検出器勾配がコード数/Vrms単位のシステム勾配に変換され、次の関係が得られます。

$$INT_{SYS} = INT_{DET} / LSB$$

$$Slope_{SYS} = Slope_{DET} / LSB$$

CN-0366 回路用の回路図、レイアウト図、ガーバーファイル、部品表を含むすべての設計ファイルのセットは、CN-0366 Design Support Package に含まれています。

バリエーション回路

パワー・モニタリングおよびVGAアプリケーションにおける一般的な手法では、図14に示すように、一定の電力をカプラーによって伝送ラインから取り出し、その信号をRF/マイクロ波検出器へ送ります。

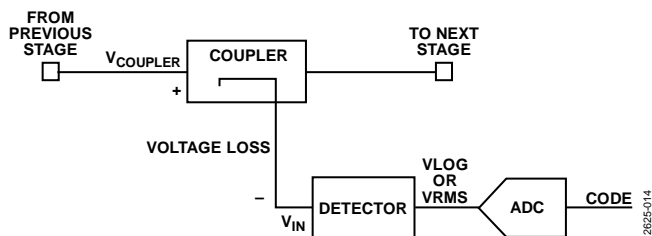


図14. カプラーを使用した一般的なパワー・メーター・アプリケーション

このセットアップを校正する時も、前に説明した校正ルーチンは変わりません。カプラーと伝送ラインの損失は校正されて、勾配および切片の式に組み込まれます。システムの勾配と切片の計算時には、カプラーの入力に加えられる電圧レベルを使用してください。検出器への入力電圧とADC出力コードを使用した場合のシステムの勾配と切片は、以下の通りです。

$$Slope_{SYS} = \frac{CODE_{HIGH} - CODE_{LOW}}{V_{HIGH} - V_{LOW}}$$

$$INT_{SYS} = CODE_{HIGH} - (Slope_{SYS} \times V_{HIGH})$$

ここで、

V_{HIGH} と V_{LOW} は、それぞれ入力検出器に加えるハイレベル電圧とローレベル電圧です(図14ではともに V_{IN} として表示)。 $CODE_{HIGH}$ と $CODE_{LOW}$ は、ADCのハイレベル出力とローレベル出力です。

カプラー入力に既知の電圧(図14では $V_{COUPLER}$ として表示)を加えた場合、カプラー入力と検出器入力間の一般的な関係は次式で表されます。

$$V_{IN} = V_{COUPLER} \times Voltage\ Loss$$

ここで、Voltage Lossは分数形式で表される一定の減衰係数です。たとえば、カプラー入力から検出器入力までの間の20dBの電圧損失は、1/10の電圧損失係数に相当します。

検出器入力の代わりにカプラー入力の電圧レベルを使用する場合、カプラーと伝送ラインの損失を含む新しいシステム勾配の式は次のようになります。

$$Slope_{SYS} = \frac{CODE_{HIGH} - CODE_{LOW}}{V_{HIGH}' - V_{LOW}'}$$

ここで、 V_{HIGH}' と V_{LOW}' は、それぞれカプラー入力におけるハイレベル側とローレベル側の校正電圧です。

同じ式を、検出器入力電圧とカプラーおよび伝送ラインの損失について表すと、次のようになります。

$$Slope_{SYS} = Voltage\ Loss \times \frac{CODE_{HIGH} - CODE_{LOW}}{V_{HIGH} - V_{LOW}}$$

損失10dBのカプラーを使用するシステムの1GHzと5GHzにおける伝達関数を図15に示します。

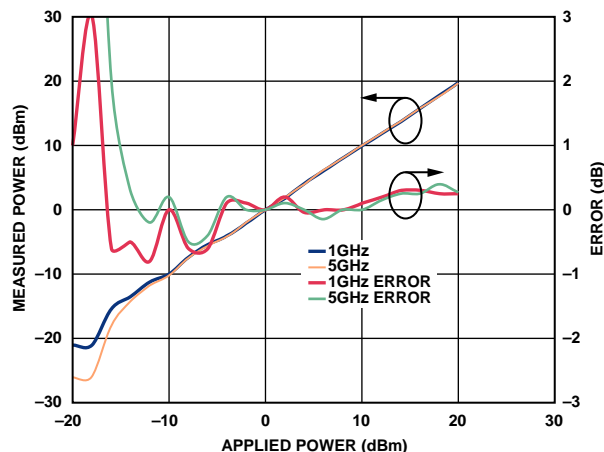


図15. 10dBのカプラーを使用したシステムの1GHzと5GHzにおける印加電力と測定電力/誤差の関係

回路の評価とテスト

必要な装置

CN-0366 に示す評価を行うには、以下の装置類が必要です。

- ADL6010-EVALZ 評価ボード
- EVAL-AD7091RSDZ 評価ボード
- EVAL-SDP-CB1Z SDP ボード
- Agilent E8257D シグナル・ジェネレータ
- Agilent 34410A デジタル・マルチメータ
- USB ケーブル (EVAL-SDP-CB1Z に付属) で SDP ボードに接続した Windows® 7 搭載 PC
- ADL6010-EVALZ ボード用 5V 電源
- EVAL-AD7091RSDZ 評価ボード用の 9V AC アダプタ (EVAL-AD7091RSDZ に付属) EVAL-SDP-CB1Z の電源は EVAL-AD7091RSDZ のレギュレータから供給されます。
- CN-0366 評価用ソフトウェア

評価開始にあたって

図 1 に示す回路を実装するには、ADL6010-EVALZ 評価ボードと EVAL-AD7091RSDZ 評価ボードに、以下の変更とリンク設定を行ってください。

ADL6010-EVALZ の R1 を 200Ω 抵抗 (0402 サイズ) に置き換えます。

EVAL-AD7091RSDZ の R1 を 0Ω 抵抗 (0603 サイズ) に、C13 を 340Ω 抵抗 (0603 サイズ) に置き換えます。また、EVAL-AD7091RSDZ のリンク設定において、Position C に LK1 を、Position C に LK2 を設定し、LK3 と LK4 をオープンのままにします。

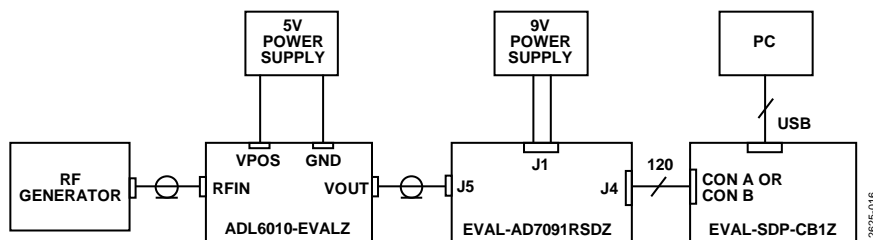


図 16. RF およびマイクロ波パワー・メーターのテスト用機能ブロック図

機能ブロック図

受信チェーンのテストに使用したテスト・セットアップの機能ブロック図を図 16 に示します。

セットアップとテスト

マイクロ波パワー・メーターのセットアップとテストは、以下のステップに従って行います。

1. すべてのテスト装置のスイッチをオンにして、使用可能な状態になるまで待ちます。
2. ADL6010-EVALZ 評価ボードの入力を、Agilent のシグナル・ジェネレータに接続します (バレル・コネクタでシグナル・ジェネレータと評価ボードを直接接続することを推奨)。
3. ADL6010-EVALZ 評価ボードの出力を、EVAL-AD7091RSDZ 評価ボードの入力に接続します。
4. EVAL-SDP-CB1Z SDP ボードを、EVAL-AD7091RSDZ 評価ボードに接続します。
5. SDP ボード付属の USB ケーブルを使って、SDP ボードを PC に接続します。
6. SDP 制御ボードに接続された PC に、CN-0366 評価用ソフトウェアをダウンロードしてインストールします。
7. ソフトウェアのインストーラが正常に終了したら、実行可能ファイルを実行します。
8. シグナル・ジェネレータのスイッチを入れて、ADL6010 の動作限界内の電力と周波数に設定します。
9. 正確な電力指示値を得るために、ソフトウェアの校正ルーチンを実行します。
10. 以上で、ソフトウェアの GUI が、ADL6010 の入力に加わる正確な電力を計算して表示します。

さらに詳しい資料

CN-0366 Design Support Package.

Analog Dialogue 39-09 : 高速プリント回路基板レイアウトの実務ガイド

UG-409. EVAL-AD7091RSDZ Evaluation Board User Guide. Analog Devices.

ADIsimRF Design Tool.

CN-0178 Circuit Note : ソフトウェア・キャリブレーション方式の 50MHz~9GHz RF 電力計測システム

MT-031 Tutorial : Grounding Data Converters and Solving the Mystery of "AGND" and "DGND." Analog Devices.

MT-073 Tutorial : High Speed Variable Gain Amplifiers (VGAs). Analog Devices.

MT-101 Tutorial : Decoupling Techniques. Analog Devices.

データシートと評価ボード

ADL6010 データシート/評価ボード

AD7091R データシート/評価ボード

改訂履歴

10/14—Revision 0: 初版

「Circuits from the Lab/実用回路集」はアナログ・デバイセズ社製品専用で作られており、アナログ・デバイセズ社またはそのライセンスの供与者の知的所有物です。お客さまは製品設計で「Circuits from the Lab/実用回路集」を使用することはできますが、その回路例を利用もしくは適用したことにより、特許権またはその他の知的所有権のもとでの暗示的許可、またはその他の方法でのライセンスを許諾するものではありません。アナログ・デバイセズ社の提供する情報は正確でかつ信頼できるものであることを期しています。しかし、「Circuits from the Lab/実用回路集」は現状のまま、かつ商品性、非侵害性、特定目的との適合性の暗示的保証を含むがこれに限定されないいかなる種類の明示的、暗示的、法的な保証なしで供給されるものであり、アナログ・デバイセズ社はその利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許権もしくはその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。アナログ・デバイセズ社はいつでも予告なく「Circuits from the Lab/実用回路集」を変更する権利を留保しますが、それを行う義務はありません。商標および登録商標は各社の所有に属します。

©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved. 商標および登録商標は各社の所有に属します。