

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 www.analog.com/jp/CN0551 をご覧ください。

接続または参考にしたデバイス

AD8353	1MHz~2.7GHz の RF ゲインブロック
ADL5324	400MHz~4GHz、1/2W の RF ドライバ・アンプ
ADG901	0Hz~4.5GHz、40dB オフ・アイソレーション (1GHz)、17dBm P1dB (1GHz) の SPST スイッチ
ADP196	5V、3A のロジック制御式ハイサイド・パワー・スイッチ
ADT6401	2.7V~5.5V 動作のピン設定可能な温度スイッチ
ADM7160	超低ノイズ、200mA のリニア電圧レギュレータ
LTM4693	超薄型低 V_{IN} 、2A の昇降圧 μ Module®レギュレータ

過熱管理機能付きの USB 駆動、433.92MHz RF パワー・アンプ

評価と設計支援

- ▶ 回路評価用ボード
 - ▶ CN0551 Circuit Evaluation Board (EVAL-CN0551-EBZ)
- ▶ 設計および統合ファイル
 - ▶ 回路図、PCB レイアウト・データ、部品表

回路の機能とその利点

国際電気通信連合 (ITU) によって、433.92MHz の産業、科学、医療用 (ISM) 帯域が地域 1 (地理的にはヨーロッパ、アフリカ、ロシア、モンゴル、およびアラビア半島) での使用に割り当てられています。もともとは、無線通信以外のアプリケーションを対象としていましたが、長年にわたるワイヤレス技術や規格の進歩により、ISM 帯域は狭域ワイヤレス通信システムで広く使用されるようになってきました。

433.92MHz 帯域は、ITU 地域 1 のオペレータには免許不要で、ソフトウェア無線、医療機器、重機向けの産業用無線制御システムで多くのアプリケーションが広く使われています。米国で

は、433.92MHz 周波数帯域は免許を保有するアマチュア無線局によって使用されています。

いかなる無線伝送アプリケーションにおいても、アンテナの駆動には、高ゲイン・アンプが不可欠です。アプリケーションの条件によって、単一段または複数段で実装でき、出力電力値が高いほど、RF 伝送の範囲が広がります。ただし、最適な周波数応答を実現するには、適切なインピーダンス・マッチングやフィルタリング、温度管理など、設計におけるいくつかの要素を検討する必要があります。

図 1 の回路は、433.92MHz ISM 帯域で動作する伝送シグナル・チェーン用に最適化された 2 段の RF アンプ・ブロックです。中心周波数では、回路のゲインは約+35.8dB になります。RF 入出力ポートは、50 Ω のインピーダンス・マッチで設計されており、回路と標準的な 50 Ω システムとの直接接続が可能です。

過熱を防ぐため、ユーザ定義の温度トリップ・ポイントに達すると、温度モニタリング・スイッチ回路が RF アンプをディセーブルします。このスイッチ回路はまた、温度がヒステリシス設定値を下回ると、自動的にアンプをイネーブルします。

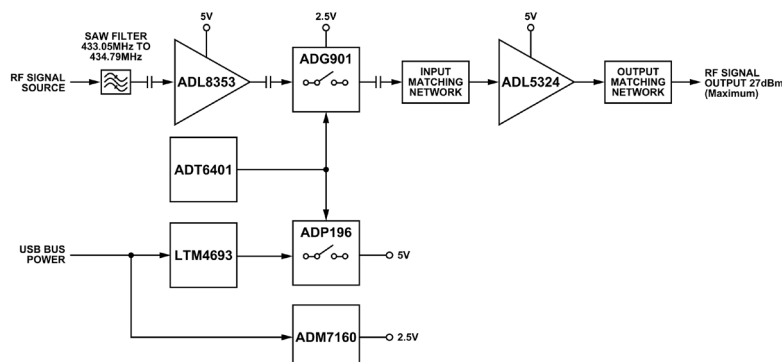


図 1. CN0551 の簡略化したブロック図

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、それぞれの所有者の財産です。※日本語版資料は 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。

回路の説明

433.92MHz ISM 帯域での動作

CN0551 の RF シグナルは、ゲイン段を通過する前に、まず表面弾性波 (SAW) フィルタを通過します。これは、不要な帯域外アンプの排除に役立ちます。フィルタの選択時には、帯域平坦度と帯域外除去性能のバランスをうまく取る必要があります。SAW フィルタは、挿入損失の原因ともなり、シグナル・チェーン全体のゲインを低下させるため、選択時にはこの点を考慮する必要があります。

このリファレンス設計では、使用されている SAW フィルタの標準的な最大挿入損失は 2dB、終端インピーダンスは 50Ω となります。

アンプ段

CN0551 は、RF シグナル・パスにおいて 2 つのアンプ段を使用します。初段は AD8353 RF ゲイン・ブロック・アンプで、433.92MHz ISM 帯域において 19.6dB (代表値) の固定ゲインを提供します。AD8353 は 1MHz~2.7GHz で動作でき、周波数範囲全域にわたって示されるリターン・ロス、10dB を超えていません。

AD8353 の RF ピンは内部で 50Ω に整合しているため、外付けのマッチング回路がなくても、標準的な RF シグナル・パスに直接統合することが可能です。図 2 に示すように、RF ピンの DC 阻止コンデンサと、電源ピンのバイパス・コンデンサがあれば、AD8353 は適切に動作します。これらのコンデンサの推奨値を表 1 に示します。

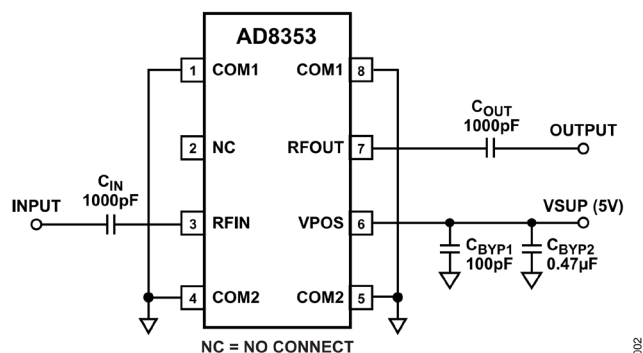


図 2. AD8353 の接続図

表 1. AD8353 用コンデンサの値

Function/Component	Component Values
AC Coupling Capacitors	
C _{IN}	1000 pF
C _{OUT}	1000 pF
Bypass Capacitors	
C _{BYVP1}	100 pF
C _{BYVP2}	0.47 μF

ADL5324 RF ドライバ・アンプは、設計の第 2 段として機能します。このデバイスは、400MHz~4GHz の動作周波数範囲で 18.2dB のゲイン、6.8dB のノイズ指数 (それぞれの代表値)、38.4dBm の出力 3 次インターセプト・ポイント (OIP3) (433.05MHz~434.79MHz での代表値) を実現します。

ADL5324 は、RF チョークを介して RFOUT ピンに +5V を加えるだけで、バイアス・ポイントを設定できます。120nH のインダクタンスの使用を推奨します。これは、433.92MHz ISM 帯域に対する出力マッチング条件もある程度確保できるためです。ADL5324 では、電源ラインの RF 信号と高周波ノイズを除去するために、出力段のバイアスに 3 つのデカップリング・コンデンサを使用する必要があります。RF 出力段のバイアス・インダクタとコンデンサの適切な設定を図 3 に示します。

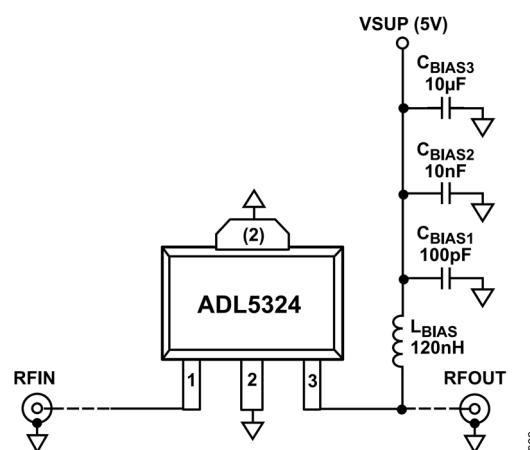


図 3. ADL5324 の DC バイアス・インダクタとコンデンサ

ADL5324 のインピーダンス・マッチング

最適な性能を実現するため、ADL5324 にはインピーダンスを目的の周波数帯域に合わせて調整した外付けのマッチング回路が必要です。入力マッチング回路には、RFIN ピンと直列に配置されたインダクタ (L_{IN}) と抵抗 (R_{IN})、ならびにシヤント・コンデンサ (C_{IN}) が含まれます。同様に、出力マッチング回路は直列インダクタ (L_{OUT}) とシヤント・コンデンサ (C_{OUT}) を使用します。RFIN ピンと RFOUT ピンはどちらも、外付けの DC 阻止コンデンサが必要となります。図 4 は、ADL5324 における全部品を揃えたインピーダンス・マッチング回路を表しています。

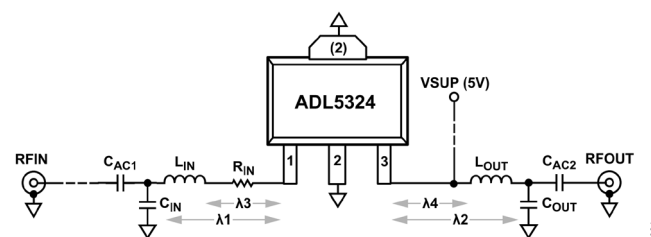


図 4. ADL5324 の外付けマッチング回路

CN0551 リファレンス設計は、ADL5324 データシートに記載されている 420MHz~494MHz チューニング帯域のものと同様の部品値を使用しています。推奨値については表 2 を参照してください。

マッチングには、これらの部品を適切に配置することも重要となります。そのため、CN0551 は ADL5324 データシートにある 420MHz~433.92MHz チューニング帯域の推奨値に従います。

これらの値は部品の中心からアンプの端までを計測したものです。

表 2. ADL5324 外付けインピーダンス・マッチング回路の部品値

Function/Component	Component Values
AC Coupling Capacitors	
C_{AC1}	10 pF
C_{AC2}	20 pF
Tuning Capacitors	
C_{IN}	20 pF
C_{OUT}	6.2 pF
Tuning Inductors	
L_{IN}	1.6 nH
L_{OUT}	5.6 nH
Jumper	
R_{IN}	2 Ω
Component Spacing	
λ_1	419 mils
λ_2	438 mils
λ_3	248 mils
λ_4	311 mils

RF 性能

図 5、図 6、および図 7 は、CN0551 の結果として生じる S パラメータ、位相ノイズ測定値、ならびに安定性測定を示しています。

433.92MHz の中心周波数では、CN0551 のゲインは 35.8dB になります。このシステムは、周波数オフセットが 10kHz および 100kHz の場合は約 -145dBc/Hz 前後の値、周波数オフセットが 1MHz の場合は -130dB/Hz の低位相ノイズを示しています。1MHz を超える周波数オフセットでは、-130dBc/Hz を下回る値が維持されます。

システムは、433.92MHz ISM 帯域幅全体で安定しており、Rollet の安定係数 (k) は 1 を超え、補助安定性測定 (B1) は 0 を超えています。

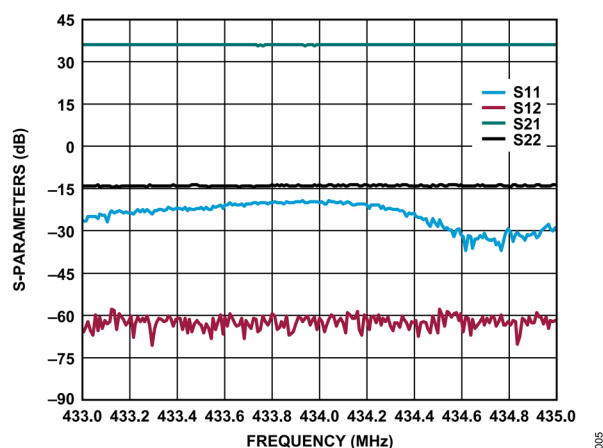


図 5. S パラメータと周波数の関係

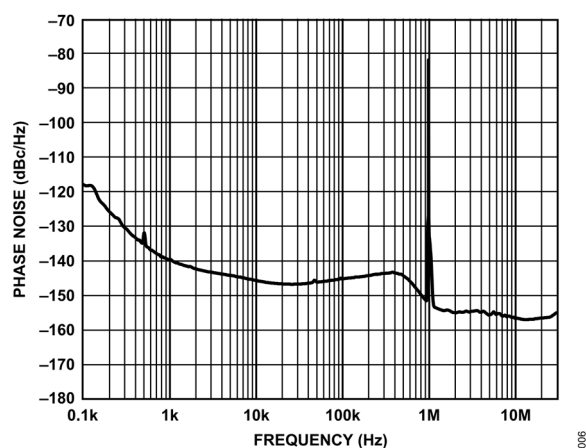


図 6. 位相ノイズと周波数オフセットの関係 (433.92MHz 入力)

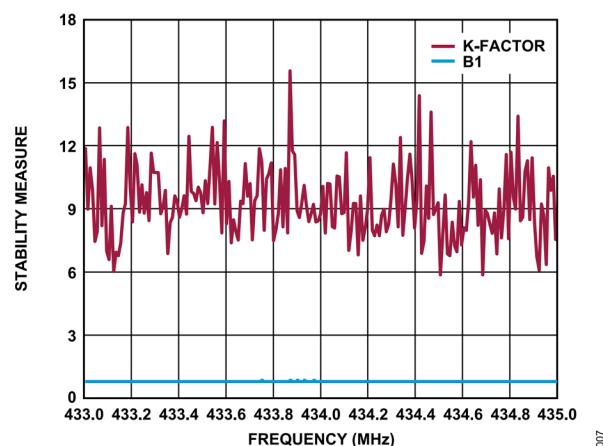


図 7. 安定性測定と周波数の関係

図 8 は、CN0551 の出力電力 (P_{OUT}) と入力電力 (P_{IN}) の関係を示すグラフです。CN0551 にデフォルトの SAW フィルタがインストールされている場合、-3dBm 入力では最大 1/2W の出力電力になります。絶対最大入力電力は、+10dBm です。損傷が生じるおそれがあるため、この入力レベルを超える回路で動作させることは推奨しません。

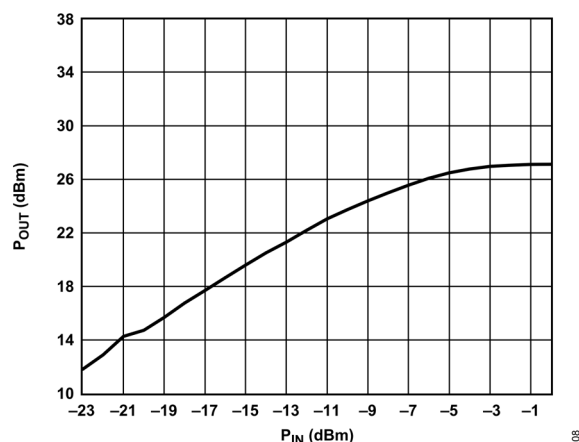


図 8. P_{OUT} と P_{IN} の関係 (433.92MHz 入力)

過熱管理機能

CN0551 には過熱管理機能が実装されており、基板の温度がプリセットされた閾値に達すると、アンプ回路が自動的にディセーブルされます。温度がヒステリシス設定値を下回ると、CN0551 のアンプを自動的にイネーブルします。この機能は、ADT6401 温度スイッチのオープンドレイン出力 (TOVER/TUNDER) を使用して行われます。このスイッチは、ADL5324 付近の温度をモニタし、ピン・プログラマブルなトリップ・ポイントと比較します。

ADT6401 の温度トリップ・ポイントとヒステリシスは、S0、S1、および S2 の各ピンの状態で選択します。CN0551 で使用できる温度トリップ・ポイントとヒステリシスの設定を、表 3 に記載します。

表 3. ADT6401 のトリップ・ポイントとヒステリシスの選択

S0	S1	Temperature Trip	
		Point	Hysteresis
0	0	+65 °C	10 °C
1	0	+75 °C	10 °C
Float	0	+85 °C	10 °C
0	1	+95 °C	10 °C
1	1	+105 °C	10 °C
Float	1	+115 °C	10 °C
0	Float	+5 °C	2 °C
1	Float	-5 °C	2 °C
Float	Float	-15 °C	2 °C

デフォルトでは、CN0551 のリファレンス設計は+95°C のトリップ・ポイントと、+10°C のヒステリシス設定を使用します。

ADL5324 は、ADT6401 出力から直接制御できる内部パワーダウン機能を有していないため、この機能は、スイッチング回路を使用して外付けで実装する必要があります。CN0551 では、これを、ADG901 RF スイッチと ADP196 パワー・スイッチを使用して、ADL5324 への RF 入力と DC バイアスを切断することで行います。図 9 で示すように、ADT6401 出力を使用して両方のデバイスを同時にオン/オフすることができます。ADG901 の場合、CTRL ピンの 2.5V レベル条件を満たすため、比率 1:1 の抵抗分圧器を使用します。

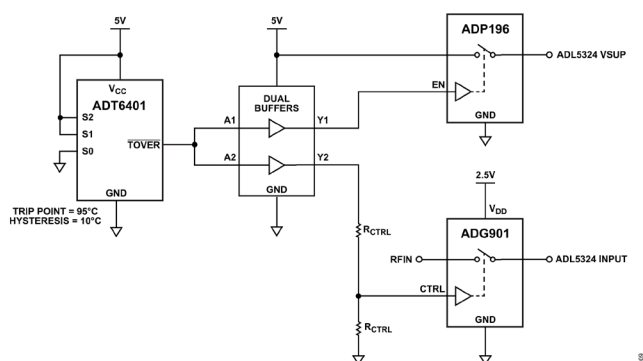


図 9. CN0551 過熱管理回路

最適性能を得るには、ADT6401 の GND ピンと、熱源の GND ピンの熱抵抗を最小限に抑える必要があります。そのため、ADT6401 を ADL5324 のできるだけ近くに配置することが重要になります。

レイアウト時の考慮事項

パワー・アンプは使用時に大量の熱を発生させるため、放熱には特に注意を払う必要があります。消費電力に関する考慮事項に対処するため、EVAL-CN0551-EBZ は、3 層の厚いグラウンド・プレーンと、ADL5324 の下や周囲に配置されている複数のサーマル・ビアを使用しています。

サーマル・カメラを使用して EVAL-CN0551-EBZ を観察したところ、図 10 に示すように、RF 入力が-10dBm の場合に ADL5324 周辺における基板温度のピークは約 46°C であることがわかりました。レイアウトでの放射手法と過熱モニタリング回路を組み合わせることにより、ADL5324 が最大ジャンクション温度まで上昇することを防ぎます。



図 10. CN0551 の熱性能 (RF 入力電力 = -10dBm)

USB パワー・マネージメント

CN0551 は、マイクロ USB ポートを介して電力を供給し、LTM4693 μ Module によって+5V に調整されます。この超薄型のスタンドアロン昇降圧 DC/DC コンバータには、低ノイズ・アンプ電源用のスイッチング・モード・コントローラとパワー・デバイスが既に内蔵されているため、レギュレータ回路の設計を簡素化できます。CN0551 の+5V デバイスは、通常動作時に約 175mA を消費しますが、その大半は ADL5324 と AD8353 で消費されます。2 つのアンプ段はまた、高温時に追加の電源電流が流れます (各データシートに記載)。LTM4693 は最大連続出力電流が 2A であるため、CN0551 の電流条件を処理するのに十分です。

LTM4693 の適正な動作に必要なのは、バイパス・コンデンサが複数、帰還抵抗と RC 補償回路がそれぞれ 1 つだけです。図 11 で示すように、CN0551 は LTM4693 データシートにあるバイパス・コンデンサと RC 補償回路の推奨値に従っています。SS ピンと MODE/SYNC ピンは、CN0551 の V_{IN} に接続します。これによって、デフォルトの 2ms ソフトスタート期間では低ノイズ、固定周波数パルス幅変調 (PWM) 動作で動作するようにデバイスが設定されます。

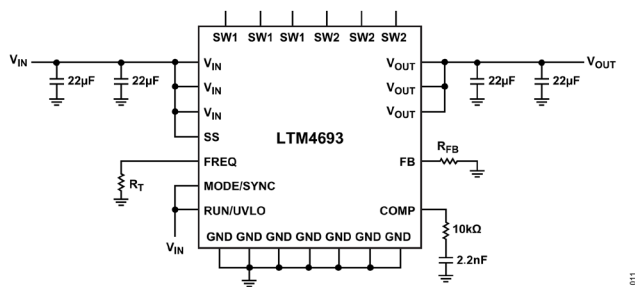


図 11. LTM4693 の接続図

LTM4693 の出力電圧は、 V_{OUT}^+ ピンと FB ピンの間に接続された外付けの帰還抵抗 (R_{FB}) によって設定され、その値は式 1 を使用して計算されます。

$$V_{OUT} = 1.0 \text{ V} \left(\frac{60.4 \text{ k}\Omega + R_{FB}}{R_{FB}} \right) \quad (1)$$

ここで、
 V_{OUT} は、必要となる出力電圧 (単位: V)、
 R_{FB} は帰還抵抗 (単位: k Ω) です。

必要な出力電圧が +5V の場合、この式で導かれる R_{FB} 値は 15.1k Ω になります。これは、15k Ω 抵抗として設計に実装されています。

デフォルトでは、LTM4693 のスイッチング周波数は 1MHz です。ただし、FREQ ピンと GND の間に外部抵抗 (R_T) を接続すれば、値を増加させることが可能です。この値は、式 2 を使用して計算します。

$$R_T = \frac{110}{f_{sw} - 1} \quad (2)$$

ここで、
 f_{sw} は必要なスイッチング周波数 (単位: MHz)、
 R_T は外部抵抗 (単位: k Ω) です。

高いスイッチング周波数を使用すると、電力効率が下がりますが、出力電圧リップルも下がるため、アンプの電源電圧の安定性が向上します。図 12 に示すように、周波数が高いほど、近接位相ノイズを最小限に抑えるのに役立ちます。CN0551 では、スイッチング周波数は 2MHz に設定されています。この値を式 2 で使用すると、 R_T は 110k Ω になります。

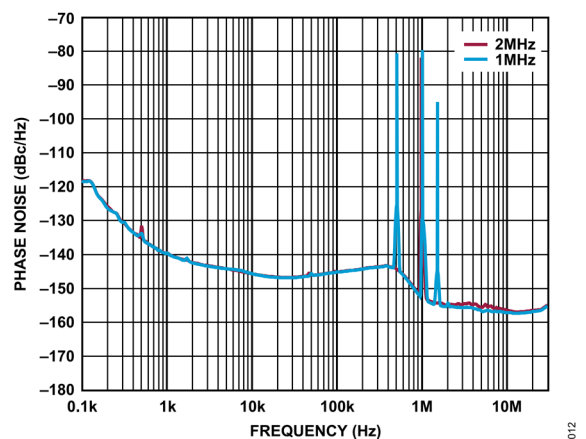


図 12. LTM4693 の異なる周波数 (1MHz と 2MHz) を使用した CN0551 の位相ノイズ

ADM7160 の低ドロップアウト (LDO) レギュレータは、ADG901 の RF スイッチに必要な +2.5V の電源電圧を生成します。このデバイスは、2.3V~6.5V の入力電圧範囲と、最大 200mA の電流を供給できる固定出力電圧を備えています。

LDO の安定性を確保するため、実効容量 (C_{EFF}) が 0.7 μ F を超える高品質コンデンサ (X5R や X7R など) を使用する必要があります。これには温度や DC バイアスの影響を考慮する必要があります。式 3 を使用し、選択したコンデンサの仕様に基づき、 C_{EFF} を計算することができます。

$$C_{EFF} = C_{BIAS} (1 - TEMPCO) (1 - TOL) \quad (3)$$

ここで、
 C_{EFF} は最も厳しい条件の容量 (単位: μ F)、
 C_{BIAS} は動作電圧での実効容量 (単位: μ F)、
 $TEMPCO$ は最も厳しい条件のコンデンサ温度係数、
 TOL は、最も厳しい条件のコンデンサ許容誤差です。

CN0551 では、ADM7160 で使用されるコンデンサの定格容量は 4.7 μ F、最も厳しい条件の温度係数は 0.15、最も厳しい条件の許容誤差は 0.20 となります。容量と電圧バイアスとの関係を示すグラフによると、入力バイパス・コンデンサ (+5V バイアス) と出力バイパス・コンデンサ (+2.5V) の実効容量は、それぞれ約 2.13 μ F と 3.60 μ F です。式 3 でこれらの値を使用すると、最も厳しい条件の容量値が 1.45 μ F と 2.45 μ F となり、どちらも最低条件である 0.7 μ F を上回っています。

バリエーション回路

0.5W の電力レベルが不要な場合は、ADL5320 を 433.92MHz ISM 帯域の代替ドライバ・アンプとして使用できます。ADL5324 と比較すると、このデバイスはゲインがわずかに高く、ノイズ指数は低くなりますが、その代わりに OIP3 は低くなっています。ADL5320 の飽和出力レベルは 250mW ほどにとどまります。

ADT6402 を、温度スイッチとして使用することも可能です。このデバイスはピン互換性があり、ADT6401 と仕様は同じですが、アクティブ・ロー出力を備えています。ADT6402 を使用する場合、反転バッファが必要になります。

アナログ・デバイスでは 915MHz、および 2.45GHz ISM 帯域での送信に使用できる同様のアンプ設計も提供しています。詳細については、[CN0522](#) および [CN0417](#) の回路ノートを参照してください。

回路の評価とテスト

ここでは、CN0551 の S パラメータおよび位相ノイズをテストするためのセットアップと手順について説明します。詳細については、EVAL-CN0551-EBZ User Guide を参照してください。

必要な装置

テストの実施には、次の装置を使用します。

- ▶ CN0551 回路評価用ボード (EVAL-CN0551-EBZ)
- ▶ Keysight® E5061B ベクトル・ネットワーク・アナライザ
- ▶ Rohde & Schwarz® SMA100A 信号発生器
- ▶ Rohde & Schwarz FSUP シグナル・アナライザ
- ▶ 20dB アッテネータ (シグナル・アナライザの入力保護機能で任意使用)
- ▶ 5V、 $\geq 0.5A$ の AC/DC 電源アダプタ (マイクロ USB ケーブル付き)
- ▶ SMA ケーブル

セットアップとテスト

図 13 は、CN0551 のベクトル・ネットワーク・アナライザへの適切なポート接続を示しています。S パラメータを測定するには、以下の手順を実施します。

1. ベクトル・ネットワーク・アナライザの掃引範囲と周波数のステップ・サイズを設定します。開始周波数と停止周波数はそれぞれ 433MHz と 435MHz に設定します。掃引の周波数ステップ・サイズは 10kHz に設定します。
2. キャリブレーション・キットを使用して、ベクトル・ネットワーク・アナライザのフル 2 ポート・キャリブレーションを実施します。EVAL-CN0551-EBZ の RF 入力ポートに直接接続できるため、テスト・セットアップに必要な計測ケーブルは 1 つのみです。
3. 5V 電源アダプタとマイクロ USB ケーブルを使用して、EVAL-CN0551-EBZ に電源を供給します。
4. キャリブレーション済みのテスト・セットアップを使用して、ベクトル・ネットワーク・アナライザのテスト・ポートに EVAL-CN0551-EBZ を接続します。
5. ネットワーク・アナライザを設定し、個々の S パラメータのパターンを表示します。
6. ベクトル・ネットワーク・アナライザのオート・スケール機能を実行します。必要に応じて、後でスケールを調整します。

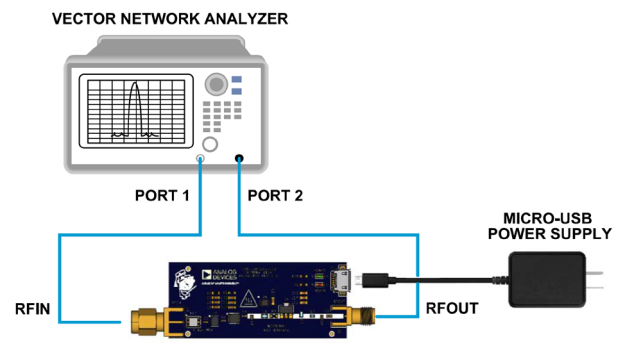


図 13. S パラメータの計測セットアップ

図 14 は、CN0551 の信号源アナライザと信号発生器への位相ノイズ・テスト用の適切なポート接続を示しています。位相ノイズを測定するには、以下の手順を実施します。

1. 信号源アナライザを設定して位相ノイズを測定し、測定範囲を設定します。開始オフセットと停止オフセットはそれぞれ 1kHz と 30MHz に設定します。
2. 信号発生器出力の周波数を 433.92MHz に、レベルを -10dBm に設定します。
3. 信号源アナライザのデータシートに記載されている最大入力レベルを参照して、信号源アナライザがアンプ出力 (-10dBm 入力時に約 25.85dBm) に対応できるかどうかを確認してください。必要に応じて、アッテネータを信号源アナライザの入力に接続します。
4. 5V 電源アダプタとマイクロ USB ケーブルを使用して、EVAL-CN0551-EBZ に電源を供給します。
5. 信号発生器の出力を EVAL-CN0551-EBZ の RF 入力に接続します。
6. EVAL-CN0551-EBZ の RF 出力を信号源アナライザに接続します。
7. 信号源アナライザで新しい測定を開始します。

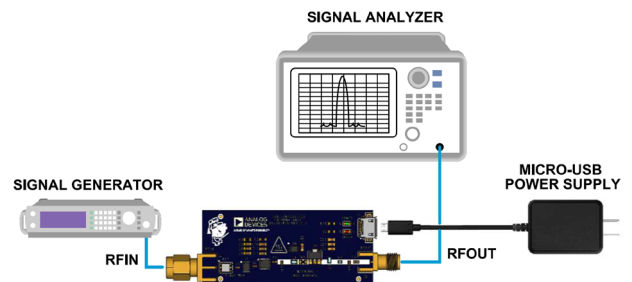


図 14. 位相ノイズ計測セットアップ

更に詳しい資料

AD8353 S パラメータ

ADL5324 S パラメータ

ADG901 S パラメータ

ADIsimRF™ RF シグナル・チェーン・カリキュレータ

LTspice® SPICE シミュレーション・ソフトウェア

LTpowerCAD® 設計ツール

消費電力とダイ温度カリキュレータ

MT-093 Tutorial, Thermal Design Basics, Analog Devices.

MT-101 Tutorial, Decoupling Techniques, Analog Devices.

Tompsett, Kevin. 2017. スイッチング電源用第2段出力フィルタの設計。アナログ・デバイセズ。

Kumbhar, Abhaykumar. 2017. Overview of ISM Bands and Software-defined Radio Experimentation. Wireless Personal Communications: An International Journal, Volume 97.

Rao, Shreharsha. 2005. Make the Most of the Unlicensed ISM Band. EETimes.com.

Sylla, Iboun. 2009. Understanding Regulations When Designing a Wireless Product in the Unlicensed Frequency Bands. EETimes.com.

Schweber, Bill. 2018. The RF Power Amplifier, Part 1: Functions. AnalogICTips.com.

Kundert, Ken. 2006. Power Supply Noise Reduction. The Designer's Guide Community.

データシートと評価用ボード

CN0551 評価用ボード

AD8353 データシート

AD8353 評価用ボード

ADL5324 データシート

ADL5324 評価用ボード

ADG901 データシート

ADG901 評価用ボード

ADM7160 データシート

ADM7160 評価用ボード

ADT6401 データシート

LTM4693 データシート

LTM4693 評価用ボード

改訂履歴

07/2022—Revision 0: Initial Version



ESDに関する注意

ESD（静電放電）の影響を受けやすいデバイスです。電荷を帯びたデバイスや回路ボードは、検知されないまま放電することがあります。本製品は当社独自の特許技術である ESD 保護回路を内蔵してはいますが、デバイスが高エネルギーの静電放電を被った場合、損傷を生じる可能性があります。したがって、性能劣化や機能低下を防止するため、ESD に対する適切な予防措置を講じることをお勧めします。

「Circuits from the Lab／実用回路集」はアナログ・デバイセズ社製品専用に作られており、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。

©2022-2022 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。