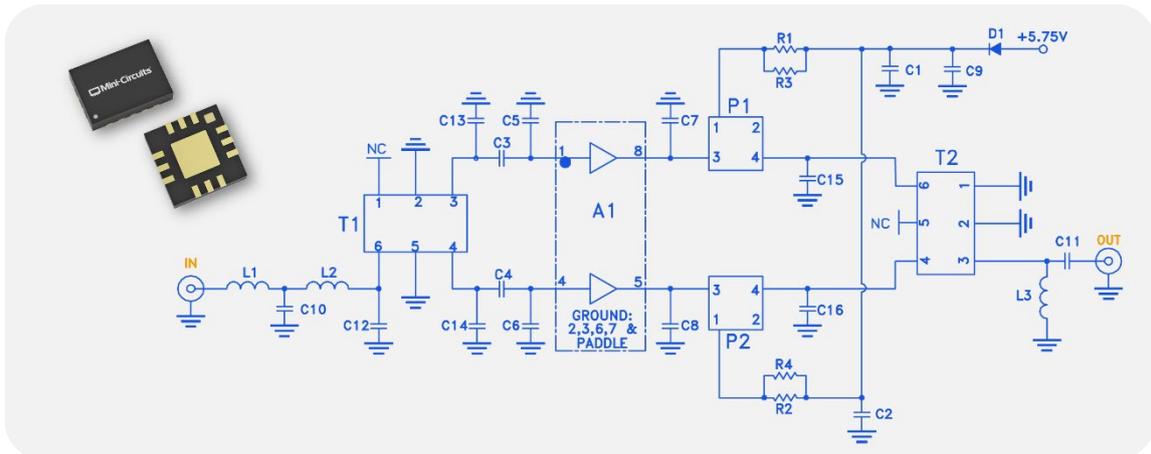


アプリケーションノート

RF/マイクロ波 プッシュプルアンプ 設計の理解

Kit Cox, Mini-Circuits Japan



歴史

驚くべきことに、プッシュプル接続の概念は 3 世紀にわたって存在します。ミズーリ州ベル電話会社のウィリアム W. ディーンは、1895 年 11 月 5 日付けの米国特許 第 549,477 号で、プッシュプル接続の電話送信機について初めて説明しました。¹

次に、ジョン・アンブローズ・フレミング卿は 1904 年²に最初の真空管を発明し、リー・デ・フォレストは、1906 年にフレミングの「バルブ」にグリッドを追加し、これを「オーディオン (audion)」と呼びました。

最後に、ウェスタン・エレクトリック社のエドウィン・ヘンリー・コルピッツは、このような「オーディオン」真空管を 2 本使い、「電波増幅器」と呼ぶプッシュプル回路を作りました。^{3,4} コルピッツは 100 年以上前の特許出願の際に、このプッシュプル構成を利用することで「出力波の中の歪みが、ある程度回避される」ことを認識していました。彼の発明は、1915 年 2 月 16 日に米国特許 第 1,128,292 号として認められました。

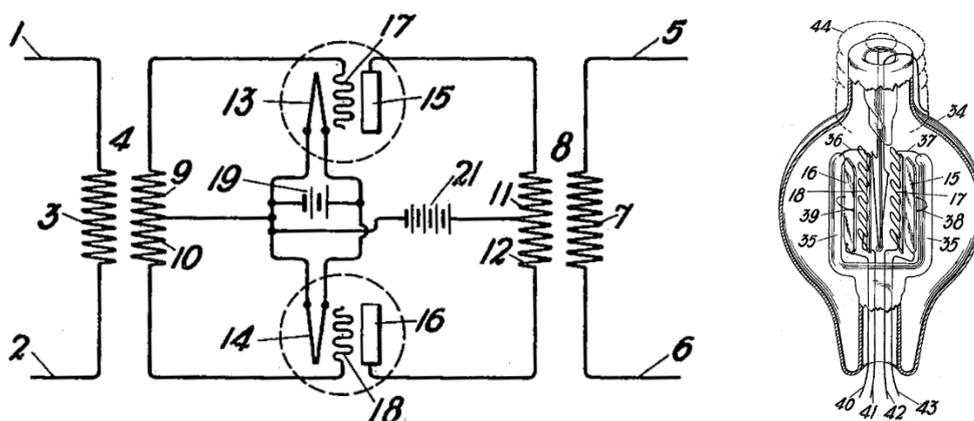


図 1: 1915 年 2 月 16 日に取得したコルピッツのプッシュプル増幅器特許第 1,128,292 号に描かれている回路図 (左) と、2 つの真空管のうちの 1 つ (右)。コルピッツはその特許出願の中で、今日のエレクトロニクス設計でも享受されている、非線形性と同じ利点を指摘した。

100 年を早送りして「kHz」を「GHz」に置き換えると、今日ではどこでもプッシュプルアンプ構成を見つけることができます。この記事では、シンプルな現代のプッシュプルアンプ構成とその性能上の利点について説明します。

また、PHA-11+ などの Mini-Circuits のデュアルマッチ MMIC アンプを使用することで、今後のプロジェクトで、簡単にこれらの利点を活用する方法を紹介します。

基本的なプッシュプル構成

開発当初から 1 世紀にわたって、無数のプッシュプルアンプ構成が開発されてきました。これらの構成の中には、複雑なトランスの動作に関する前提知識を必要とするものもあります。

ただし、わかりやすくするために、基本的な構成を使用して中心となる概念を説明します。

図 2 の基本的な例を考えてみましょう。この例では、2 つの単純なバラントランスと組み合わせた 1 組の汎用アンプを使用しています。

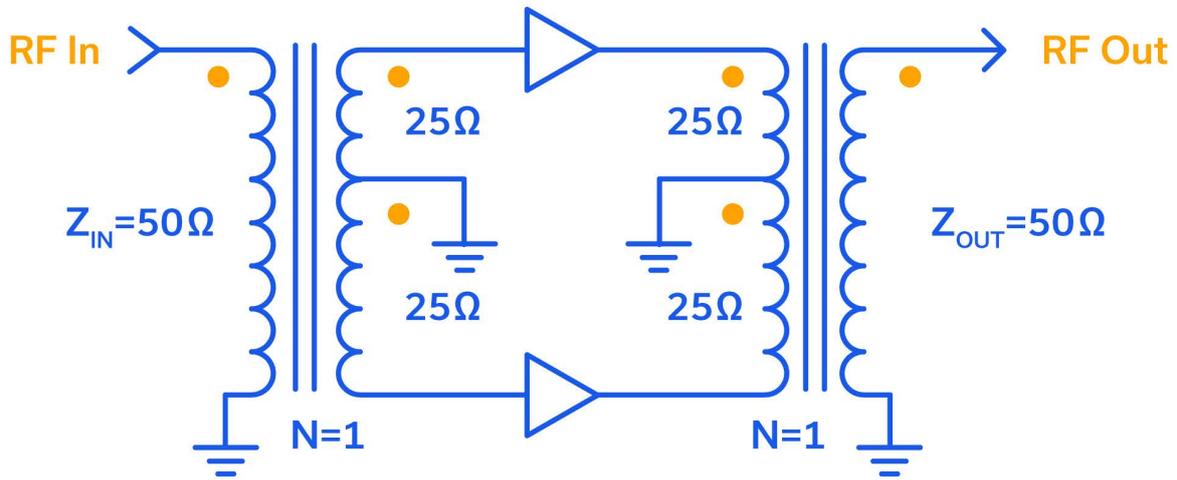


図 2: 2 つの 1:1 バラントランスを使用したプッシュプルアンプの一般的なブロック図。

この例では、トランスの巻数比を $\frac{N_{OUT}}{N_{IN}} = N = 1$ に設定することで、おそらく最も単純なインピーダンス変換回路で説明することにします。 n_{OUT} とはセンタータップされた側の両方の半分を合わせた巻き数を意味することに注意してください。

したがって、図2 に示すように、センタータップ巻線の各半分のインピーダンスは下記の式で表されます。

$$Z_{HALF} = \frac{(N^2)(Z_{IN})}{2} = \frac{(N^2)(Z_{OUT})}{2} = \frac{(1^2)(50\Omega)}{2} = 25\Omega$$

動作説明

図2の二次側センタータップ付バラントランスは、プッシュプルアンプ構成の基本要素です。アンプは理想的で、ゲインと位相が完全に一致し非反転であると仮定します。

プッシュプルアンプは、不平衡（シングルエンド）の一次信号を取得し、それを 180° 位相が異なる 2 つの信号の平衡ペアに分割し、2 つの増幅デバイス、1 つは GND に対して実効位相シフト $+90^\circ$ 、もう 1 つは -90° を駆動することによって動作します。

入力バラントランスは、センタータップ巻線が一次巻線、シングルエンド巻線が二次巻線とみなされ、アンプペアの出力でミラー化されます。アンプの出力信号はセンタータップされた一次側に印可され、デバイスは完全に位相が逆転しているため、一方のアンプが電流を駆動しているとき反対側のアンプは吸い込み電流です。別の言い方をすると、一方のアンプが最大電圧で動作する場合、ドット表記法で示す極性に従い、もう一方のアンプは最小電圧で動作します。

センタータップの二次側でのこの押し引き動作（そのため、「プッシュプル増幅器」という名前が付けられています）により、デバイスが結合され、それらの電力の和が得られます。通常、デバイスの出力電圧が最も高い状態（電流が流れ出しているように見える）は「プッシュ」と見なされ、出力電圧が最も低い状態（電流を吸い込んでいるように見える）は「プル」と見なされます。

メリット

図2の例は、一般的なプッシュプルアンプ構成を示していますが、実際のアプリケーション回路では大きく異なる可能性があります。それにもかかわらず、プッシュプルトポロジには固有の利点があります。

トポロジの主な利点の1つは、偶数次の高調波がキャンセルされることです。基本波入力信号が 180° 位相が異なる2つの信号に分割されるのと同じように、第2高調波、つまり $2f_0$ は 360° 位相が異なる2つの信号に分割されます。これは同相と同等です。出力バランstransのセンタータップの一次側が、周波数 $2f_0$ の同位相の2つの信号によって励起されると想像してください。センタータップされたグラウンドの両側に存在する信号は常に同レベルで同位相であるため、理想的なケースでは巻線に電流は流れず、トランス磁束も第2高調波出力もありません。基本的に、いずれの偶数次高調波信号もバランstransの純粋なコモンモード励起を引き起こします。

帯域幅が1オクターブを超えるレシーバーLNAと広帯域パワーアンプは、この高調波キャンセルの恩恵を受けます。このため、この基本的かつ長年使用されているアンプ構成が広く普及しており、低電力LNAから超高電力送信機に至るまで、あらゆるものに採用されています。

デメリット

シングルアンプと比較して、プッシュプルアンプトポロジに対する従来の欠点は3つあります。

- 1) ペアのアンプ間で同一の性能を保証することが難しい、
- 2) 基板スペースが増加する、そして
- 3) コストの増加

ペアになった二つのアンプの個々のユニット間の位相のわずかな違いは、たとえ同じモデル、同じロットのユニットであっても、システムのパフォーマンスに大きな影響を与える可能性があります。

ミニサーキットのソリューション

Mini-Circuits は、当社のデュアルマッチ MMIC アンプ製品ラインで、上記3つの欠点すべてに対する解決策を提供します。これらの製品は、1つの小さな MMIC パッケージ内に2つの整合アンプダイを組み合わせており、上記の伝統的な欠点を最小限に抑えながら、プッシュプル設計の利点を提供します。

設計者の利便性を考慮して、多くのモデルには、優れた直線性を実現するために最適化された IP2 および IP3 測定値も含む、 50Ω および 75Ω 両方のシステムでのプッシュプル動作のテストボードの回路図とデータが含まれています。次のセクションでは、有名な PHA-11+ を使用した例を紹介します。

Mini-Circuits PHA-11+: すぐに使える設計で優れた IP2 および IP3

PHA-11+ は、Mini-Circuit の最も人気のあるデュアルマッチ MMIC アンプ設計の 1 つであり、業界の多くの設計者にとって定番のコンポーネントとなっています。

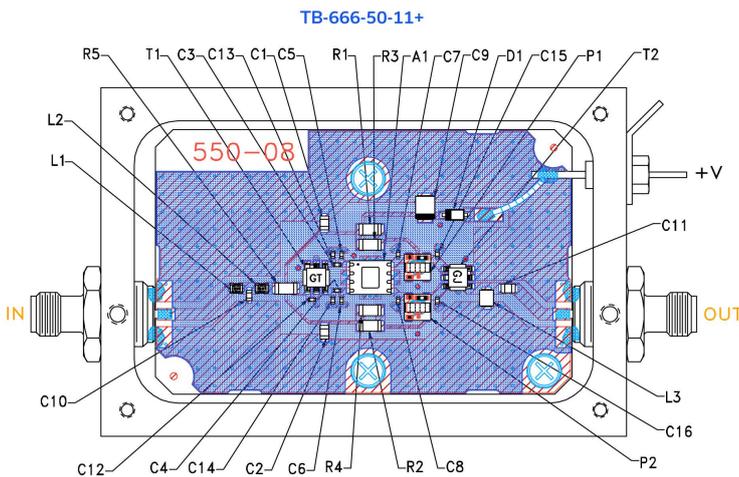
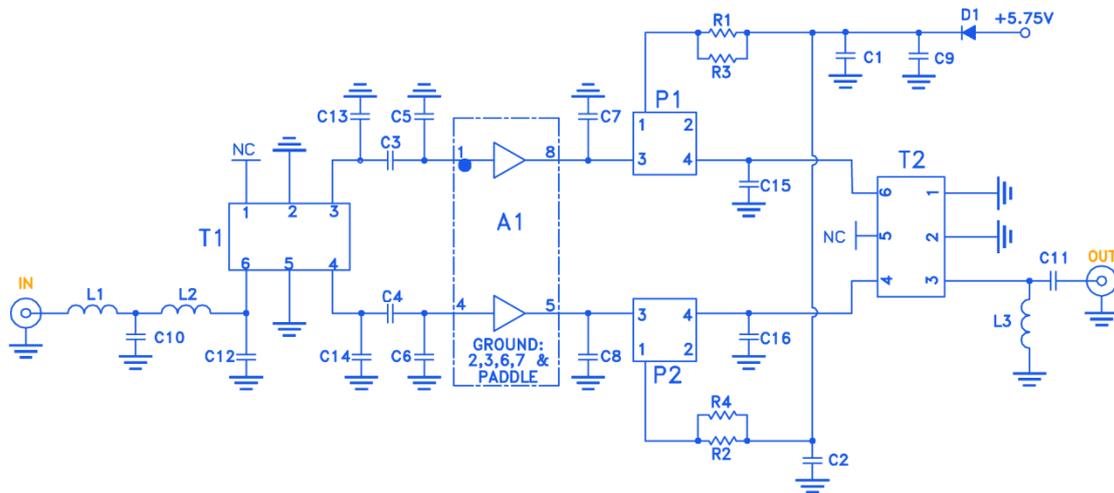
Mini-Circuits は、50Ωと 75Ωの両方の 3 つの異なるプッシュプル構成でこのモデルの特性を評価していて、各回路の評価ボードを利用できます。50~3,000MHz の広帯域 50Ω動作向けに設計された、これらのアプリケーション回路の 1 つの、回路図と評価ボードを以下に示します。

PHA-11+ SMT Dual Matched Amplifier



主な特長:

- 1パッケージに 2 つの
 整合アンプを搭載
- 50~3,000 MHz
- 0.8 GHz プッシュプル構成での
 +44dBm typ. IP3、
 +78dBm typ. IP2
- 50 または 75Ω



| COMPONENT | VALUE | SIZE |
|-----------|--|----------------|
| A1 | Mini-Circuits PHA-11+ | PER DATA SHEET |
| C1,C2 | .039 uF | 0805 |
| C3,C4 | .001 uF | 0402 |
| C5,C6 | .2 pF | 0402 |
| C7,C8 | 1.1 pF | 0402 |
| C9 | 1.0 uF | 1311 |
| C10 | .4 pF | 0603 |
| C11 | 270 pF | 0805 |
| C12 | .4 pF | 0402 |
| C13 | .7 pF | 0402 |
| C14 | .3 pF | 0402 |
| C15 | .6 pF | 0402 |
| C16 | 1.0 pF | 0402 |
| D1 | Diode, Schottky Rectifier Vf=.385V @ .5A, Vr=10V MAX | — |
| L1,L2 | 1.1 nH | .073"X.054" |
| L3 | 1.5 oh | 1008 |
| R1,R2 | 5.11 Ohm | 1206 |
| R3,R4 | 7.50 Ohm | 1206 |
| T1 | Mini-Circuits TCM2-33WX+ | PER DATA SHEET |
| T2 | Mini-Circuits TCM2-43X+ | PER DATA SHEET |
| P1,P2 | Mini-Circuits TCBT-6G+ | PER DATA SHEET |

図3: 上: Mini-Circuits の TCM2-33WX+ 入力バラン(T1) および TCM2-43X+ 出力バラン(T2) を使用したプッシュプル構成の PHA-11+ デュアルマッチ MMIC アンプ(A1) の広帯域 50Ωアプリケーション回路図
下: 対応評価ボード TB-666-50-11+ とコンポーネントリスト。

上記の**広帯域 50Ω 回路**に加えて、**狭帯域 50Ω** (50 – 1,200 MHz) および **75Ω** (50 – 1,300 MHz) 用の回路とテストボードも用意されています。PHA-11+のデータシートには、以下の 3 つのアプリケーション回路すべての標準的な性能が記載されています。

表 1: Mini-Circuits PHA-11+ の 3 つのアプリケーション回路/テスト ボードのゲイン、IP2、および IP3 の代表性能データ

| 周波数 (MHz) | 75Ω (TB-566-75-11+) | | | 狭帯域 50Ω (TB-566-50-11+) | | | 広帯域 50Ω (TB-666-50-11+) | | |
|-----------|---------------------|------------|------------|-------------------------|------------|------------|-------------------------|------------|------------|
| | ゲイン (dB) | OIP3 (dBm) | OIP2 (dBm) | ゲイン (dB) | OIP3 (dBm) | OIP2 (dBm) | ゲイン (dB) | OIP3 (dBm) | OIP2 (dBm) |
| 50 | 14.2 | 45.0 | 79.0 | 15.2 | 45.0 | 82.0 | 14.1 | 40.1 | 71.4 |
| 250 | 13.7 | 43.0 | 79.0 | 13.8 | 45.0 | 84.0 | 13.8 | 40.7 | 70.5 |
| 450 | 14.0 | 42.0 | 81.0 | 13.8 | 44.0 | 81.0 | 14.1 | 42.2 | 75.6 |
| 850 | 14.1 | 43.0 | 72.0 | 13.0 | 44.0 | 76.0 | 13.1 | 40.4 | 71.5 |
| 1200 | 13.8 | 40.6 | 78.0 | 12.0 | 43.0 | 72.0 | 12.9 | 39.4 | 62.1 |
| 1300 | 13.5 | 40.3 | 78.0 | – | – | – | 12.8 | 40.0 | 56.8 |
| 1500 | – | – | – | – | – | – | 12.2 | 39.7 | 60.8 |
| 2000 | – | – | – | – | – | – | 11.8 | 41.0 | 65.2 |
| 3000 | – | – | – | – | – | – | 8.6 | 36.2 | 70.8 |

広帯域 50Ω(TB-666-50-11+) は、帯域幅、IP3 および IP2 のパフォーマンスの最適な組み合わせに最適化されています。**狭帯域 50Ω** (TB-566-50-11+) は、帯域幅はわずかに減少していますが、IP3 および IP2 のパフォーマンスを最大化しています。**75Ω 回路** (TB-566-75-11+) は 75Ω 特性インピーダンスに整合しています。このデータは、プッシュプル アンプ構成におけるデバイスの優れた直線性と偶数次高調波のキャンセルだけでなく、さまざまな異なるシステム要件の構成要素としての柔軟性も示しています。

3 つの回路すべての回路図、コンポーネントリスト、およびテストボードの注文情報は、Mini-Circuits の Web サイトまたは認定販売代理店から入手できます。

一歩先へ: バランスアンプ

Mini-Circuits のデュアルマッチアンプは、図4 に示すように、 balan を直交位相ハイブリッドカップラに置き換え、絶縁ポートを終端することにより、バランスアンプトポロジを構成するために使用することもできます。この構成には、アンプの入力および出力回路の不整合からの保護など、さらに多くの利点があります。

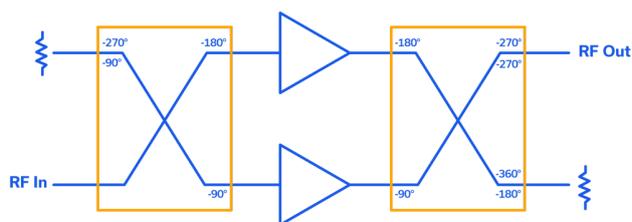


図4: 基本的なバランスアンプ構成。

詳細について日本語版アプリケーションノートは、2024 年にリリース予定です。

いつでもお手伝いします

PHA-11+ は、プッシュプルアンプトポロジの性能上の利点だけでなく、システム設計者向けの Mini-Circuits のすぐにテストできるソリューションを説明するために使用した一例にすぎません。Mini-Circuits は、コアとワイヤ、LTCC、および MMIC テクノロジーにわたる RF バラントランスの業界をリードするポートフォリオを提供し、次のプロジェクトに最適なプッシュプル回路を作成するのに役立ちます。

参考資料

1. ウィリアム W. ディーン、電話用ローカル送信回路。米国特許第 549,477 号。
2. ウィキペディア。ジョン・アンブローズ・フレミング。
en.wikipedia.org/wiki/John_Ambrose_Fleming。
3. エドウィン・ヘンリー・コルピッツ、電波増幅器。米国特許第 1,128,292 号。
4. WESTERN ELECTRIC CO., Inc. 他、対 WALLERSTEIN。Circuit Court of Appeals, Second Circuit. 1932年7月18日。

ご連絡

Mini-Circuits Japan 株式会社

〒222-0033

神奈川県横浜市港北区新横浜 3-6-12

日総第 12 ビル 6 階

電話 : 045-548-5058

Email: kit.cox@minicircuits.com

Web: minicircuits.co.jp

重要なお知らせ

本書は Mini-Circuits に帰属し、著作権、商標、およびその他の知的財産法によって保護されています。

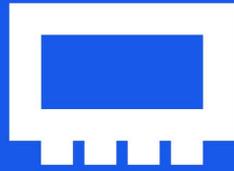
ここに記載された情報は、Mini-Circuits がお客様への便宜を図るために提供するものであり、Mini-Circuits の部品の購入を促進し、それに付随する目的にのみ使用することができます。Mini-Circuits の書面による事前の許可なく、本書を複製、修正、配布、出版、電子データベースへの保存、送信、および本書に含まれる情報をいかなる形式または手段によっても利用することはできません。

本書は、予告なく変更、修飾、変化、調整、修正されることがあり、誤り、省略、不正確さ、間違い、欠陥が含まれることがあります。Mini-Circuits は、上記のいずれについても責任を負わず、またそのことを理由に責任を負うことはありません。従って、本書はガイドラインとしてのみ使用されるものとします。

商標

本書内で引用されているすべての商標は、各所有者に帰属するものです。Mini-Circuits および Mini-Circuits 製品は、上記の参照商標の所有者と提携しておらず、承認または協賛をしていません。

Mini-Circuits および Mini-Circuits ロゴは、Scientific Components Corporation の登録商標です。



Mini-Circuits[®]