

# 電界結合共振、包絡線パルス幅変調、および共振状態最適化制御を用いた三次元 LSI 用チップ間無線信号・電力同時伝送の高効率・大容量化の研究

代表研究者 榎田 洋太郎 東京理科大学 理工学部 電気電子情報工学科

## 1 はじめに

本研究では、電界結合共振電力伝送技術と包絡線パルス幅変調方式を用いた高効率・高精度送信機技術を組み合わせ、さらに共振状態最適化制御を用いることにより、三次元 LSI 用チップ間無線信号・電力同時伝送において、信号を大容量かつ電力を高効率に伝送するための技術的検討を行う。このために、共振状態最適化制御を用いた電界結合共振構成の検討、および EPWM (Envelope Pulse-Width Modulation) 駆動電力増幅器の電界結合共振型無線電力伝送への適用検討を行う。本研究で提案する電界結合共振による LSI チップ間無線信号・電力同時伝送系の全体構成を図 1 に示す。今回のテーマにおいては、実装上の困難性を避けて基本原理の確認および基本技術の確立を行うため、チップ間伝送時と比べ周波数を 1~2 桁程度下げ実験を行う。

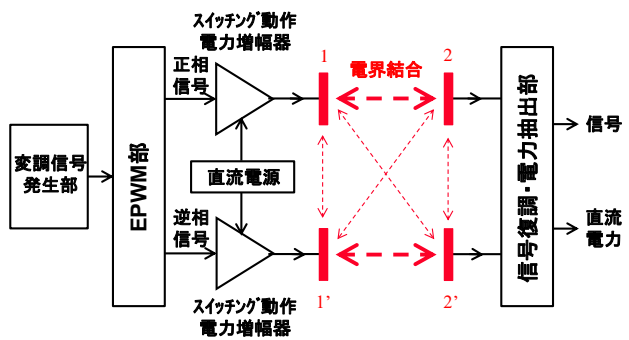


図 1 提案する電界結合共振による LSI チップ間無線信号・電力同時伝送の全体構成

## 2 共振状態最適化制御を用いた電界結合共振構成の検討

### 2-1 共振回路動作の理論構築およびシミュレーションによる性能評価

#### (1) 直並列共振型電界結合無線電力伝送における共振状態最適化 [1]

近年、伝送距離に対し高い電力伝送効率で伝送が可能な結合共振型無線電力伝送は大きな注目を集め、この方式に関する研究が盛んに行われている。電界結合型は磁界結合型に比べて電力効率は低いが、位置ずれに強い、電磁干渉による影響が少ないなどの利点がある。近年、電界結合型でも磁界結合型に匹敵する高い効率で電力伝送ができることが報告されているが、電力伝送部において送・受信に用いるそれぞれ一対の電極間に相互に発生する容量が考慮されていないという問題がある。

これに対し、本研究では第一の検討として、直並列共振型構成を用いた電界結合共振型無線電力伝送

(図 2) において各極板間の相互容量を考慮し、そのときの共振状態を最適化することにより受電電力の伝送距離依存性が少ない回路構成を提案した。本研究で電源部分に高効率なスイッチングモード電力増幅器の一つである D 級電力増幅器を用い、従来方式と提案方式の比較を回路シミュレーションを用いて行った。また、負荷抵抗を上げることによる距離依存性の低減と、電源電圧と負荷抵抗を最適化することで所望供給電力を確保できる設計法を提案した。その結果、内部抵抗や寄生容量のない理想インダクタを用いた場合、伝送距離によらず一定の受電電力が得られることを示した。

しかし、現実のインダクタの内部抵抗や寄生容量を考慮した場合、内部抵抗により伝送距離が大きくなると受電電力が低下する問題があることがわかった。そこで、負荷抵抗を上げ、インダクタの内部抵抗の影響を下げることにより受電電力の距離依存性を低減し電力効率を改善する方法を提案した。さらに、電源電

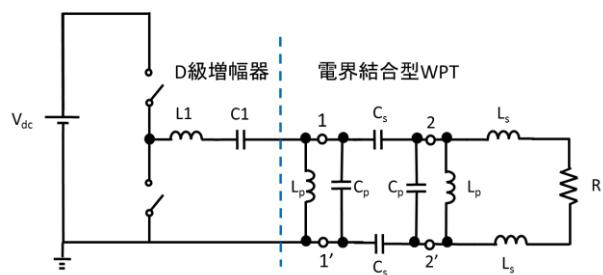


図 2 提案する第一の電界結合型無線電力伝送系の構成 (直並列共振型)

圧と負荷抵抗を最適化することにより所望の距離で所望の受電電力をとりだせることを示した。

**(2) 送受信対称回路構成におけるインピーダンス整合を用いた電界結合無線電力伝送における共振状態最適化 [2]**

上記の結果は、電界結合部分を含めた伝送系を高インピーダンスとすることにより、電極間距離を大きくし結合容量を小さくしても高効率電力伝送ができることを示唆している。この理由は、小さい結合容量に対し共振するインダクタンスが大きくなるため、その寄生抵抗による損失が大きくなるが、負荷抵抗を大きくすると電流が減るため損失が減少するためと考えられる。しかし、通常負荷抵抗の大きさは通常、アプリケーションによって決まっており、自由に設定することはできない。このため、本研究の第二の検討では、伝送系を高インピーダンスとしつつ、低い負荷インピーダンスに対しても高効率伝送を可能とするため、電界結合部分の両側にインピーダンス整合回路を挿入する構成とした。

一方、最近時間反転双対性により電力増幅器と整流器の回路を共用化する研究が報告されている。この原理を用いれば、送信機と受信機の回路を対称化することが可能となる。本研究の第二の検討では、この送受信対称回路構成（図 3）を前提とすることにより、回路設計を簡易化することのできる解析的設計手法の提案を行い、送受信対称回路構成における整合回路の最適設計法を明らかにした。提案する設計法を用いることにより、送受信電極間距離が変化し結合容量が変わった場合でも電力伝送効率の変化を小さくできる。その結果、整合回路のパラメータを電極間距離に応じて変化させる制御の必要性を大きく低減した。

**(3) 共振回路動作の巨視的スケール(チップ間伝送の 100~1000 倍程度)モデル実験による原理確認 [2]**

図 3 に示した提案する第二の電界結合型無線電力伝送系（送受信対称インピーダンス整合型）による伝送回路を基板に実装し、実験的に評価を行った。試作した送受信対称構成インピーダンス整合型電力伝送系の基板構造を図 4 に、実装した基板写真を図 5 に示す。基板の端に SMA コネクタを取り付け、ネットワークアナライザ (Agilent 社 E5071B) により伝送特性を測定した。極板間距離依存性をみるため、伝送間にポリエチレンを挟み、その厚みを変え、透過特性 (S21) を評価した。

実験結果とシミュレーション結果の比較を図 6 に示す。図より、周波数特性による電力伝送特性  $|S_{21}|$  はよく一致し、極板間距離依存性が小さいことが示された。これにより、送受信対称無線電力伝送系は、提案する設計法を用いることにより、極板間距離に応じた整合回路パラメータを制御しなくとも無線伝送電力および電力伝送効率の極板間距離依存性を小さく出来る可能性が示された。しかし、実験結果の透過特性はシミュレーションの結果と比べて約 25dB 低下した。今後、この伝送効率低下の原因を明らかにし、送受信対称回路構成における電界結合型無線電力伝送において高効率電力伝送の実現を図る。

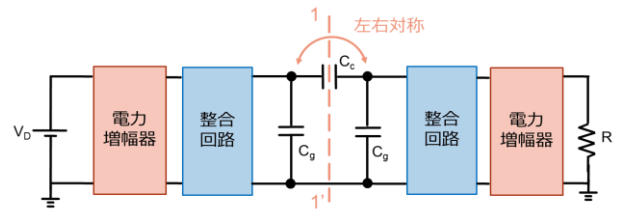


図 3 提案する第二の電界結合型無線電力伝送系の構成 (送受信対称構成インピーダンス整合型)

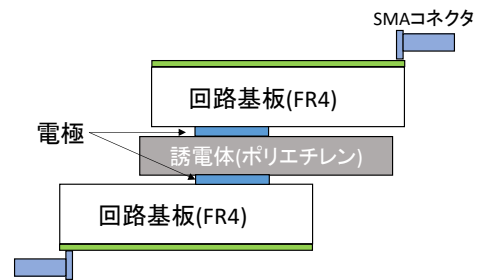


図 4 送受信対称インピーダンス整合型伝送系の基板構造



図 5 送受信対称インピーダンス整合型伝送系の基板写真

**3 EPWM 駆動電力増幅器の電界結合共振型無線電力伝送への適用検討**

**3-1 高効率・低歪み動作のシミュレーションによる評価**

高い周波数利用効率をもつ直交振幅変調 (QAM) や直交周波数分割多重 (OFDM) 方式は、ピーク対平均信号電力比 (PAPR) が高いため、通常の AB 級増幅器では電力効率が大幅に低下する問題がある。これに対し、ア

ナログ的にAB級動作のキャリア増幅器とC級動作のピーク増幅器を組み合わせたドハーティ増幅器が使われているが、本質的に非線形性が大きいいため、高い電力効率を得るために飽和度を高くしようとすると非線形性が強くなり、複雑な歪み補償を行う必要が生じる。

これに対し、定振幅出力のD級増幅器等のスイッチングモード電力増幅器は理論上最大100%の電力効率を実現できる利点があるが、振幅を変化させる機構が送信機に付加的に必要となる。このなかで、搬送波の振幅をオンオフすることにより包絡線を断続させRFバースト信号を生成し、そのデューティを出力振幅に応じて変化させることにより実効的に振幅を変化させることを可能とする包絡線パルス幅変調(EPWM:Envelope Pulse-Width Modulation)方式駆動による電力増幅器[3]、[4]は、高いPAPRをもつ信号を高効率に増幅できる特徴がある。また、包絡線のデューティを $\Delta\Sigma$ 変調によりデジタル的に変化させることにより、振幅情報を精度良く表わすことができることから、高精度な変調信号を生成できる特長がある。特に、直交変調(QM)型EPWM送信機(図7)は、全デジタル化が容易であり、デジタルLSI化に適している利点を持つ。本研究では、このQM-EPWM信号駆動によるD級電力増幅器を用いることにより、信号伝送における高い伝送精度と、電力伝送における高い電力効率の両立を図る。

このQM-EPWM信号駆動によるD級電力増幅器に関

し、(1)オンチップインダクタの対基板容量キャンセリングによるQM-EPWM送信機用D級増幅器内蔵バンドパスフィルタの狭帯域化、(2)三値 $\Delta\Sigma$ 変調二値動作QM-EPWM方式送信機構成の信号・電力同時伝送への適用提案および $\Delta\Sigma$ 変調器サンプリング周波数とI、Qチャンネル交互出力周波数の最適化、および(3)高次通過帯域を利用した電力増幅器挿入トランスバーサルフィルタの検討を行った。

**(1)オンチップインダクタの対基板容量キャンセリングによるEPWM送信機用D級増幅器内蔵バンドパスフィルタの狭帯域化 [5]**

EPWM送信機では量子化雑音が発生する。この量子化雑音をスイッチング動作電力増幅器で増幅すると無駄

な電力消費が発生し、信号に対する実効的な効率が低下する。しかし、オンチップインダクタは寄生抵抗および基板間容量が大きいいため、EPWM送信機で使用するスイッチング動作電力増幅器の内蔵するバンドパスフィルタの帯域を狭くすることができず、信号帯域外の量子化雑音の増幅による無駄な電力消費のため、信号に対する電力効率が低下する問題があった。このため、オンチップインダクタの基板間容量に並列にインダクタを付加することにより並・直列共振器を構成しバンドパスフィルタの狭帯域化(高Q化)を図る構成(図8)を提案し、その効果を回路シミュレーションおよび0.18 $\mu\text{m}$ CMOSプロセスを用いた集積回路試作により定量的に評価した。その結果、フィルタの狭帯域化は達成されたが、通常のSi基板の上のスパイラルインダクタを用いた場合、渦電流、導体損、基板抵抗等による損失により、フィルタの損失が大きいこと

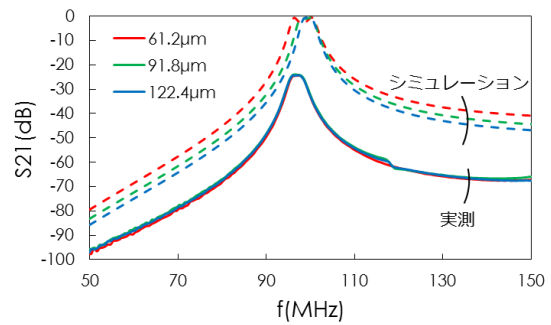


図6 送受対称インピーダンス整合型伝送系の電力伝送特性

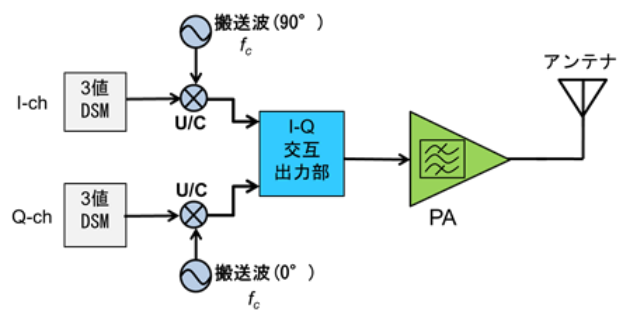


図7 直交変調(QM)型EPWM送信機の構成

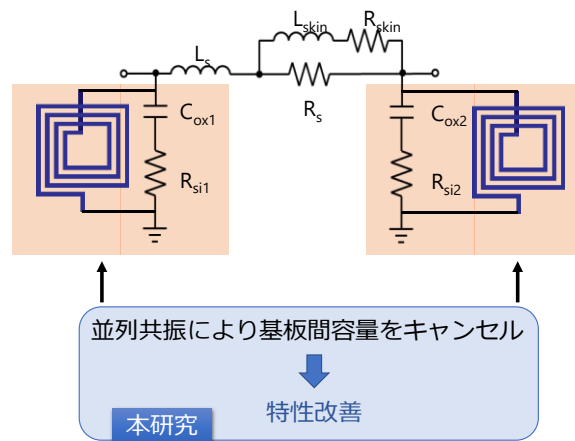


図8 オンチップインダクタの対基板容量キャンセリング

な電力消費のため、信号に対する電力効率が低下する問題があった。このため、オンチップインダクタの基板間容量に並列にインダクタを付加することにより並・直列共振器を構成しバンドパスフィルタの狭帯域化(高Q化)を図る構成(図8)を提案し、その効果を回路シミュレーションおよび0.18 $\mu\text{m}$ CMOSプロセスを用いた集積回路試作により定量的に評価した。その結果、フィルタの狭帯域化は達成されたが、通常のSi基板の上のスパイラルインダクタを用いた場合、渦電流、導体損、基板抵抗等による損失により、フィルタの損失が大きいこと

が分かった。今後は、これらの損失を低減することにより、フィルタの損失低減を図り、電力効率の高効率化を図る予定である。

(2) 三値 $\Delta\Sigma$ 変調二値動作 QM-EPWM 方式送信機構成の信号・電力同時無線伝送への適用提案および $\Delta\Sigma$ 変調器サンプリング周波数と I、Q チャンネル交互出力周波数の最適化 [6]-[7]

QM-EPWM 送信機は、高効率かつ高精度な信号・電力同時伝送を実現する潜在能力があるが、RF 搬送波の停止状態を実現するために正負と零の三値型動作型の $\Delta\Sigma$ 変調器(DSM)を用いる必要がある[8]。この場合電力増幅器の駆動信号が正負と零の三値信号となる(三値 $\Delta\Sigma$ 変調三値動作 QM-EPWM 方式送信機)が、スイッチング電力増幅器は二値動作であるため、正負の信号を発生するためには2台の電力増幅器が必要となる。また、これらの正負信号を合成するための信号合成器が必要となる。

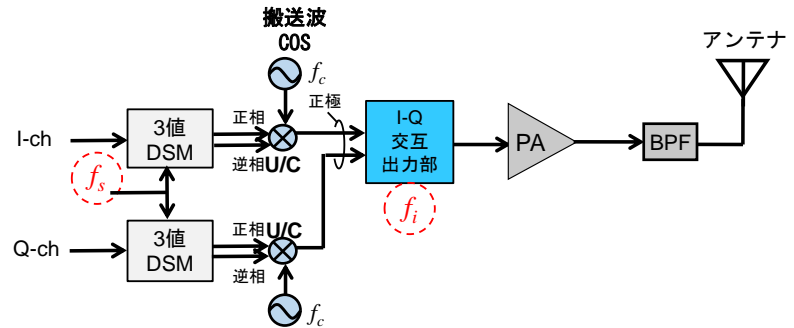


図9 三値 $\Delta\Sigma$ 変調二値動作 QM-EPWM 方式送信機

しかし、この三値 $\Delta\Sigma$ 変調三値動作 QM-EPWM 方式送信機では、信号合成器による電力消費及び回路面積の増大の問題がある。そこで、申込者らは以前、三値 $\Delta\Sigma$ 変調器を用いつつ、EPWM 信号を二値にすることを可能とする送信機構成を提案した(図9)[9]。この送信機では、電力増幅器が1台のみで構成でき、合成器を必要としないため、従来の三値動作 QM-EPWM 方式送信機と比較して、電力消費と回路面積を抑えることが可能である。本研究では、この三値 $\Delta\Sigma$ 変調二値動作 QM-EPWM 方式送信機構成の信号・電力同時同時伝送への適用提案を行った。

また、従来の直交変調型 EPWM 送信機及び提案した二値動作 QM-EPWM 送信機においては、 $\Delta\Sigma$ 変調器のサンプリング周波数( $f_s$ )、交互出力の周波数( $f_i$ )、搬送波周波数( $f_c$ )の最適な関係が示されていない。本研究では、二値動作 QM-EPWM 送信機を提案すると共に、三値動作 QM-EPWM 送信機及び二値動作 QM-EPWM 送信機において、デジタル信号処理シミュレーションとマイクロ波回路シミュレーションを用いて評価を行い、変調精度(EVM)及び電力付加効率(PAE)に対して最適な $f_s$ 、 $f_i$ 、 $f_c$ の関係を明らかにした[6]、[7]。

(3) 高次通過帯域を利用した電力増幅器挿入トランスバーサルフィルタ [10]

QM-EPWM 送信機の課題である帯域外量子化雑音放射を低減するために、電力増幅器挿入トランスバーサルフィルタの高次通過帯域の利用を提案し、その効果を定量的に評価した。QM-EPWM 送信機は、QM-EPWM に用いる $\Delta\Sigma$ 変調により発生する信号帯域外の量子化雑音が他システムに干渉を与えないようにするため、狭帯域の RF フィルタにより帯域制限を行う必要がある。しかし、RF における狭帯域フィルタを LC フィルタで構成することは困難である。この狭帯域な RF フィルタを低損失に構成する手法として、申込者らは以前、遅延の異なる複数の信号を干渉させることにより RF 帯で狭帯域な帯域通過フィルタを実現できる、トランスバーサル・フィルタ(TF)の各経路にスイッチングモード電力増幅器を挿入する構成を提案した。この構成では、トランスバーサルフィルタの各経路に信号を遅延、分配する部分の損失が送信機効率を大きく低下させない利点がある。また、各フィルタ経路に挿入された電力増幅器はスイッチング動作を行うため、高効率電力増幅が可能である。さらに、電力増幅器の入力信号をデジタル的に遅延させることにより、中心周波数と帯域幅を容易に変化できる利点がある。しかし、量子化雑音を十分に除去するためには帯域幅を狭くする必要があり、そのためには TF の経路数を増やす必要がある。そうすると多経路からの信号を合成する際の損失が大きくなり電力効率が低下する問題があった。従来の電力増幅器挿入型 TF では1次の RF 帯通過帯域を用いていたが、本検討では二次以上の高次の通過帯域を使用することにより帯域幅を広げることなく経路数を低減する方法を提案した。これにより信号合成時の電力損失を抑え、帯域外の量子化雑音の低減と高い効率での電力増幅を可能とできることを計算機シミュレーションにより示した。

3-2 高効率・低歪み動作の巨視的スケールモデル実験による確認 [11]

3章3-1(2)で述べた三値 $\Delta\Sigma$ 変調二値動作 QM-EPWM 信号を駆動信号として用いる D 級電力増幅器を初めて基板実装により試作し、実験的に特性を評価した。送信機の電力効率、変調精度(EVM)評価実験系を図10に、試作した D 級電力増幅器を図11に示す。実験の結果、搬送波周波数 50MHz および 500MHz の三値 $\Delta\Sigma$

変調二値動作 QM-EPWM 信号に対して、ドレイン効率率がそれぞれ 62.9%、41.1%と良好な値が得られた。一方、変調精度の指標である EVM の測定値は 50MHz では-29dB と良好であったが、500MHz では-22.2 dB とやや高く劣化のある結果となった。その原因を調査したところ、500MHz で EVM が劣化した原因は、電力増幅器を除いた評価系の EVM の測定限界によるものであることが判明した。今後、測定系の改良を行い、500MHz においてもシミュレーションにより得られた-30dBm 程度の良好な EVM の実現を図る予定である。

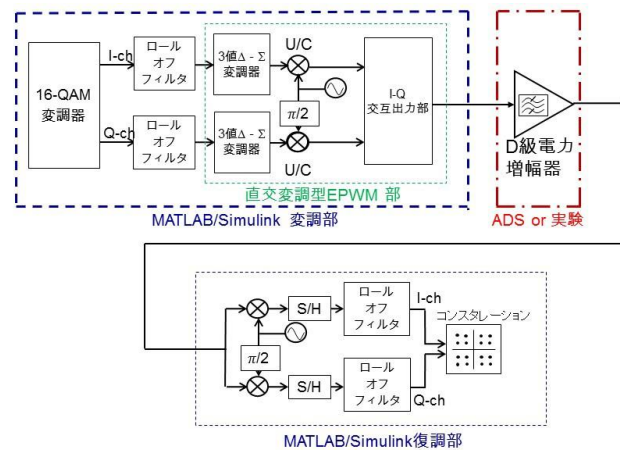


図 10 三値  $\Delta \Sigma$  変調二値動作直交 QM-EPWM 方式送信機の電力効率、変調精度 (EVM) 評価実験系

#### 4 むすび

本研究では、電界結合共振電力伝送技術と包絡線パルス幅変調方式を用いた高効率・高精度送信機技術を組み合わせ、さらに共振状態最適化制御を用いることにより、三次元 LSI 用チップ間無線信号・電力同時伝送において、信号を大容量かつ電力を高効率に伝送するための技術的検討を行った。このために、(1) 共振状態最適化制御を用いた電界結合共振構成の検討、および(2) EPWM 駆動電力増幅器の電界結合共振型無線電力伝送への適用検討を行った。(1)の検討により、高効率な電界結合共振型電力伝送が可能となる見通しを得た。また、送受信対称回路構成において適切なパラメータ設定を行うことにより、伝送距離が変化しても電力伝送効率の変化が少ない設計が可能であることを示した。これにより、制御を行わなくてもチップ間距離の変化に対する伝送電力および電力効率の変化を小さく出来る可能性が示された。また、(2)の検討により、直交変調型 EPWM 方式による駆動信号を用いてスイッチング動作型電力増幅器を駆動することにより、高い電力効率と大容量伝送の両立が可能とできる見通しを得た。

#### 【参考文献】

- [1] 難波隆一, 榎田洋太郎, 小澤佑介, “距離依存性の少ない電界結合共振型無線電力伝送の検討,” 信学技報, vol. 115, no. 3, WPT2015-9, pp. 45-50, 2015 年 4 月.
- [2] 難波隆一, 榎田洋太郎, 小澤佑介, “電界結合型無線電力伝送における送受信対称回路構成の検討,” 信学技報, vol. 115, no. 476, pp. 195-200, 2016 年 3 月.
- [3] 足立寿史, 飯田正憲, “送信回路装置,” 特願 2002-45388, 2002 年 2 月.
- [4] Y. Wang, “A class-s RF amplifier architecture with envelope deltasigma modulation,” IEEE Radio & Wireless Conference, RAWCON2002, pp. 177-179, 2002.
- [5] 渡邊邦彦, 榎田洋太郎, 小澤佑介, “オンチップインダクタの対基板容量キャンセリングによる EPWM 送信機用 D 級増幅器内蔵バンドパスフィルタの狭帯域化,” 信学技報, vol. 115, no. 476, pp. 189-193, 2016 年 3 月.
- [6] Takashi Noda, Yohtaro Umeda, Yusuke Kozawa, “Optimization of DSM Sampling Frequency and Interleaving Frequency for Bi-level Quadrature-modulation EPWM Transmitter,” 2016 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP' 16), 8A11-3-4, Mar. 2016.

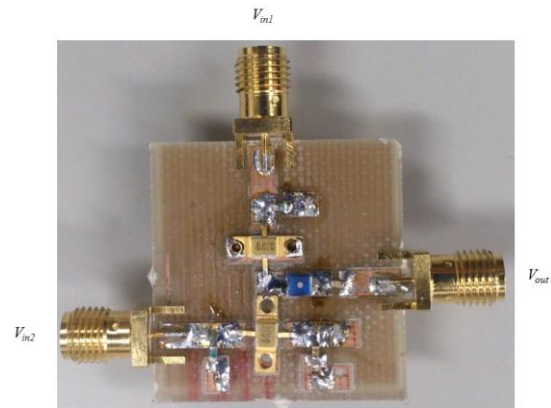


図 11 基板実装により試作した D 級電力増幅器

[7] Takashi Noda, Yohtaro Umeda, Yusuke Kozawa, "Optimization of DSM Sampling Frequency and Interleaving Frequency for Bi-level Quadrature-modulation EPWM Transmitter," Journal of Signal Processing, vol. 20, no. 4, p. 179-182, Mar. 2016.

[8] H. Izumi, M. Kojima, Y. Umeda and O. Takyu: Comparison between quadrature- and polar-modulation switching-mode transmitter with pulse-density modulation, Int. Conf. on Advanced Communication Technology (ICACT), pp. 1140-1145, Jan. 2013.

[9] 野田 昂志, 染谷 和, 飯倉 祥晴, 榎田 洋太郎, 小澤 佑介, 3 値  $\Delta \Sigma$  変調器により生成した 2 値包絡線パルス幅変調信号を用いる直交変調型送信機," 信学技報, vo. 114, no. 318, pp. 83-88, 2014 年 11 月.

[10] Kouhei Nagasawa, Shota Fujioka, Kazuhiro Watanabe, Yohtaro Umeda, Yusuke Kozawa, "Power-Amplifier Inserted Transversal Filter using High-Order Pass Band," 2015 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT2015), pp. 124-126, Sendai, Japan, Aug. 2015.

[11] 藤村拓弥, "D 級電力増幅器を用いた 2 値直交変調型 EPWM 送信機の実験的評価," 東京理科大学理工学部電気電子情報工学科卒業論文、2016 年 3 月.

### 〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
距離依存性の少ない電界結合共振型無線電力伝送の検討	電子情報通信学会技術研究報告 (無線電力伝送研究会)	2015 年 4 月
オンチップインダクタの対基板容量キャンセリングによる EPWM 送信機用 D 級増幅器内蔵バンドパスフィルタの狭帯域化	電子情報通信学会技術研究報告 (マイクロ波研究会)	2016 年 3 月
電界結合型無線電力伝送における送受対称回路構成の検討	電子情報通信学会技術研究報告 (マイクロ波研究会)	2016 年 3 月
Optimization of DSM Sampling Frequency and Interleaving Frequency for Bi-level Quadrature-modulation EPWM Transmitter	2016 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP' 16)	2016 年 3 月
Optimization of DSM Sampling Frequency and Interleaving Frequency for Bi-level Quadrature-modulation EPWM Transmitter	Journal of Signal Processing	2016 年 7 月