

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04461

研究課題名(和文)アナログ広帯域イメージリジェクションフィルタの周波数特性の測定に関する研究

研究課題名(英文)A Study on a measurement of the frequency response of an analog wide-band image rejection filter

研究代表者

庄野 和宏 (Shouno, Kazuhiro)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：50333993

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：RCポリフェーズフィルタ(RCPF)の周波数特性の測定において、広帯域に渡って位相差が正確に90°で、振幅が正確に互いに等しい正弦波を加える必要がある。本研究は、次の2つの方法を通し、これらの過酷な要求を緩和した。一つは、被測定フィルタ(FUT)に、正弦波の代わりに4相の矩形波信号を加えることで実現される。他の方法は、正弦波を加え、伝達関数を重ね合わせることで実現される。上記の方法を確かめるため、幾つかのデジタル回路、アナログスイッチとRCPFを一つの試作チップ上に実装した。実験を通し、周波数特性を測定できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

集積化RCPFの周波数特性の測定問題を積極的に取り扱った研究は、これまで殆ど見られず、集積回路の評価結果を伴った珍しいものとなった。回路設計の過程で、測定誤差を所望値より小さくする方法や、回路ブロックの面積配分方法などの設計手法も提供することができた。提案手法は、実装困難な高精度広帯域多相正弦波発生回路を必要とせず、幾つかのD-FFを使った簡単なデジタル回路とアナログスイッチを集積回路に追加するだけで実現できる。学術的観点からは、今後の新しい集積化RCPFの評価に貢献できる。工業的観点からは、デザイン&テストビリティに寄与することができ、両者において価値の高い研究となった。

研究成果の概要(英文)：In the measurement of the frequency response of an RC polyphase filter (RCPF), it is necessary to apply 4-phase sinusoidal signal whose phase differences are strictly 90 degrees and whose amplitudes are strictly same to each other over the wide frequency range. However, this study aims to relax these severe conditions through the following two methods. The first method is achieved by applying 4-phase square waves to the filter under test (FUT) instead of sinusoidal waves. It is achieved by adding a simple digital circuit including several D flip-flops. The second method is achieved by applying a single sinusoidal wave and superposing the transfer characteristics. In order to investigate these methods, digital circuits, analog switches and an RCPF were implemented on an identical prototype chip. It was confirmed that the frequency response of the RCPF can be measured using these approaches.

研究分野：アナログフィルタ

キーワード：RCPF 周波数特性 測定 アナログ 矩形波 アナログスイッチ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

RC ポリフェーズフィルタ(RCPF)は簡単な回路で実装が容易なため、産業界でデジタル携帯通信機器への導入が始まっているものの、特に高域で IRR の測定誤差が極めて大きくなり実用的でない。例えば、100MHz 級の広帯域 IR フィルタで 40dB の IRR を正しく測定したい要望があるが、測定問題が未解決であるため、仮に広帯域の IR フィルタが実現できたとしても、現状では特性を測定・確認する方法がない。従来の測定系では、RCPF に  $90^\circ$  ずつ位相がずれた正弦波を入力する必要がある。フィルタの線形性に注目すれば、4つの入力端子に、平衡-不平衡トランスを外付けすることで実質 2つの入力端子とし、一つずつ正弦波を加え、伝達関数を重ね合わせることで、被測定フィルタの特性を間接的に知る。この方法では、つなぎ換えの際の配線長が変わらないようにしなければならないという課題があった。

### 2. 研究の目的

配線長による位相ずれは、 $0.1^\circ$  以内、100MHz における配線長の差は 0.83mm 以内が求められる。従来の方法では、つなぎ換えで配線長による 4つの信号経路間の配線長の差を必要な誤差以内に抑えることが困難である。この問題を解決するため、測定系を集積化し、二つのアプローチを用いて RCPF の周波数特性を測定する。

### 3. 研究の方法

本研究は、以下の二つのアプローチを実現する集積回路を試作し、同一チップ上に実装された RCPF の周波数特性を測定する。

#### (1)方法 1 (矩形波を使う)

従来の方法に従うなら、集積回路内で高周波の正弦波を作れば良いということになるが、4相で振幅が等しく、 $90^\circ$ 度の位相差を正確に保つ信号を生成することは現実的に困難である。そこで、集積回路に、4相矩形波発生回路を搭載する。このようにすれば、4相の配線は集積回路内で完結するので、寸法精度が極めて高い LSI 内部では、配線長の違いをサブミクロンオーダーに収め、配線長の問題を大幅に解決できる見通しが高い。矩形波発生回路はデジタル回路なので、集積化は容易である。矩形波はフーリエ級数展開によれば、基本波とその奇数倍の高調波の和になっているので、フィルタの出力をスペクトラムアナライザで基本波成分を観察すれば良い。マスタクロックは、集積回路外からスイープジェネレータで入力する。内部分周回路を用いた  $90^\circ$ 度位相差の 4相信号発生回路を設け、4倍の周波数でスイープし、スペクトラムアナライザのスイープ開始タイミングと同期させれば、管面に周波数特性が現れる(図 1)

#### (2)方法 2 (アナログスイッチを内蔵する)

配線長の問題を解決するために、集積回路上でつなぎ換えを行う機能をもつアナログスイッチを内蔵する(図 2)。この方法は、方法 1 と比べ、高価なベクトルネットワークアナライザが必要となるが、アナログスイッチを内蔵するだけでよいので、集積回路に搭載する追加回路は、方法 1 よりさらに簡単である。

本研究では、アナログスイッチにより信号経路を切り替え、一度の試作で方法 1、方法 2 の両方の実験を行えるように工夫した。

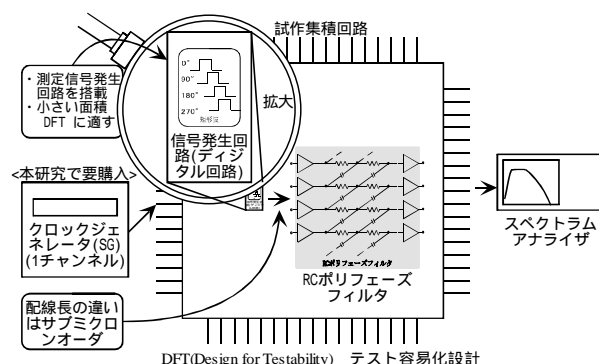


図 1 測定用回路の集積化(方法 1)

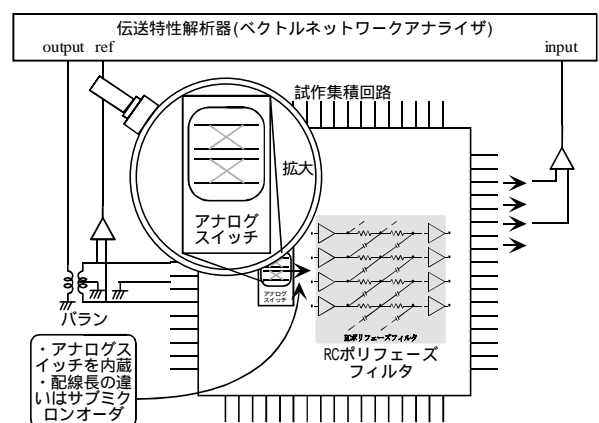


図 2 測定用回路の集積化(方法 2)

#### 4. 研究成果

まず、Minimal Fab による  $6\mu\text{m}$  SOI-CMOS プロセスにより集積回路を 3 回試作した。この回路は 0.5 インチウエハ上に実装され(図 3)、物質材料研究機構に依頼して 4mm 角にダイシングし、本学のオープンファシリティ研究機構の共用装置でチップのアッシング並びにワイヤボンディングを行い、集積回路の動作確認のため、評価基板を作成した。集積回路の電源電圧は 5V である。回路解析に LTspice、レイアウトに KLayout を用いた。DRC(Design Rule Check : デザインルールチェック)および LVS(Layout Versus Schematics : レイアウト対回路図整合チェック)も KLayout 上で実施した。これらはいずれも無料のソフトウェアである。回路設計を通して、次の知見が得られた。

(1)RCPF はインピーダンスレベルによって実装面積が変化し、その面積が最小となる最適値がある。しかしながらその最適値に設定した場合、キャパシタと基板間との寄生容量により周波数特性がかなり劣化するので、ある程度の許容レベルとなるように(つまり実装面積を多少犠牲にして)調整する必要がある。

(2)信号源抵抗、RCPF の負荷容量による周波数特性劣化を 3dB 以下に抑える方法を明らかにした。これは RCPF の構成素子値の関数で表される。

(3)矩形波発生回路の出力バッファとアナログスイッチの実装面積が最小となる配分方法を算出できた。これは、上記(2)で求めた信号源抵抗と、ある on 抵抗を持つアナログスイッチや出力抵抗をもつデジタルバッファを仮レイアウトして得られる実装面積の関数で表される。

これらは実装面積の最適化だけでなく、測定誤差の予測を可能とする重要な成果である。集積回路製造上の問題により、回路全体は動作しなかったが、幾つかの評価用 TEG の動作確認を行うことができた。以上の研究成果を 2022 年度の国内学会(2 件)と、国際会議(2 件)で発表した。

次に、 $0.6\mu\text{m}$  CMOS プロセスにより集積回路を 2 回試作した。回路設計とレイアウトに際し、LTspice、KLayout、最終チェックに Jedat 社の SX-Meister を用いた。これはフェニテック社による製造で、 $1.8\text{mm}$  角、電源電圧 5V、搭載した RCPF は 3 次、周波数通過域  $8\text{M} \sim 40\text{MHz}$  である。プロセス変更により全ての回路設計をやり直したが、前回と同一の設計 CAD を使うことができたこと、類似の PDK(プロセスデザインキット)を利用できたと共に、前回試作の際に得られた知見により、短期間に設計できた。試作の結果、矩形波発生回路は  $200\text{MHz}$  超のマスククロック周波数で動作(矩形波発生回路は一種の 4 分周回路なので  $50\text{MHz}$  超まで出力可)し、信号源抵抗やアナログスイッチの on 抵抗も期待通りであることを確認した。図 5 に測定結果を示す。同図において、黒線は方法 1、

青線は方法 2 によるものである。測定値がシミュレーション結果とやや異なるが、方法 1、方法 2 の両者はよく一致し、本研究の目的である RCPF の周波数特性を測定することができたといえる。負の周波数領域で I, Q 出力が一致しないのは、RCPF に用いたキャパシタの素子値ばらつきが大きいことによる。以上の結果を 2023 年度の国際会議で 2 件発表する予定である。

RCPF のキャパシタの問題の解決と、さらに高精度な測定を狙った集積回路を、フェニテック社のご厚意による無償枠で現在試作中である。当初の目的は  $100\text{MHz}$  級の RCPF の測定であった。仮に  $0.18\mu\text{m}$  の半導体製造プロセスを用いた場合、スケールアップによれば、およそ  $130\text{MHz}$  帯の RCPF の測定が可能であると考えられる。副産物として、初回試作製造上の問題を分析する過程で、RCPF の興味深い性質が明らかになった。これについては、今後発表する。

本研究全般に関し、研究協力者の谷本洋名誉教授、研究分担者の武藤浩二教授から多大な協力を得た。また評価実験に関し法政大学吉野理貴客員講師、レイアウトならびに PDK に関し(株)アナジックス森山誠二郎氏、(有)たかもり高橋誓氏から多くの重要な助言をいただいた。初回試作に関して、ロジックリサーチ(株)の皆様へ援助頂いた。共に回路設計とレイアウト作業、評価実験を行った大学院生の佐藤リナ氏、深川寛太氏に感謝する。

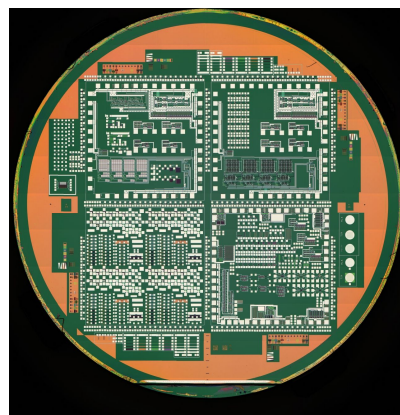


図 3 試作集積回路 1

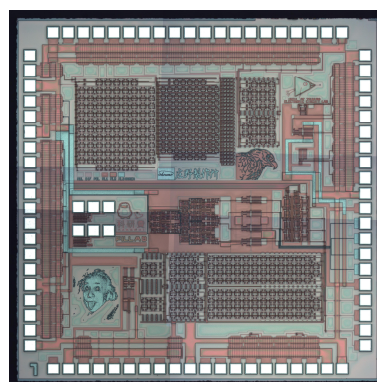


図 4 試作集積回路 2

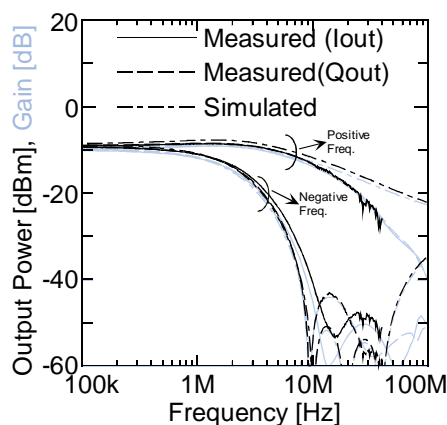


図 5 測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Fukagawa Kanta, Shouno Kazuhiro, Tanimoto Hiroshi, Muto Cosy, Moriyama Seijiro, Takahashi Chikau, Yoshino Michitaka
2. 発表標題 Implementation of an RCPF and Its Measurement Circuitry for the Method Based of Superposition
3. 学会等名 2023 38th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sato Lina, Shouno Kazuhiro, Tanimoto Hiroshi, Muto Cosy, Takahashi Chikau, Moriyama Seijiro, Takahashi Chikau, Yoshino Michitaka
2. 発表標題 Imprimentation of a 4-phase Square Waves Generator and Its Application for Mesurement of Frequency Characteristics of an RCPF
3. 学会等名 2023 38th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Fukagawa Kanata, Shouno Kazuhiro, Tanimoto Hiroshi, Muto Cosy, Yoshino Michitaka, Moriyama Seijiro, Takahashi Chikau
2. 発表標題 An Implementation of an RCPF and Its Measurement of the Frequency Response Based on Superposition
3. 学会等名 2022 37th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sato Lina, Shouno Kazuhiro, Tanimoto Hiroshi, Muto Cosy, Yoshino Michitaka, Moriyama Seijiro, Takahashi Chikau
2. 発表標題 Measurement of the Frequency Characteristics of an RC Polyphase Filter Using 4-phase Square Waves
3. 学会等名 2022 37th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 深川寛太, 庄野和宏, 谷本 洋, 武藤浩二, 森山誠二郎, 高橋 誓, 吉野理貴
2. 発表標題 ミニマルファブによるRCポリフェーズフィルタの実装と重ね合わせを用いた周波数特性の測定
3. 学会等名 電気学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤リナ, 庄野和宏, 谷本 洋, 武藤浩二, 森山誠二郎, 高橋 誓, 吉野理貴
2. 発表標題 4相矩形波発生回路を利用したRCポリフェーズフィルタの周波数特性の測定
3. 学会等名 電気学会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	武藤 浩二  (Muto Cosy)  (30311096)	長崎大学・教育学部・教授   (17301)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	谷本 洋  (Tanimoto Hiroshi)  (20322886)	北見工業大学・工学部・名誉教授   (10106)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------