

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630169

研究課題名(和文) ディスクリートアナログ電子回路部品だけを用いた量子計算機実現の試み

研究課題名(英文) Implementation of quantum algorithms on an analog printed-circuit-board

研究代表者

深津 晋 (FUKATSU, Susumu)

東京大学・総合文化研究科・教授

研究者番号：60199164

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：周波数分割多重方式の古典通信および情報処理用ハードウェアを活用した量子通信への拡張を目標に、アナログエレクトロニクスของディスクリート部品と古典的な正弦波電圧信号を利用した量子エミュレータを構築、量子アルゴリズム搭載に特化した新規ハードウェアの実装(「安価」、「平易」、「即納」)と動作の検証を試みた。さらに光周波数領域への拡張と量子通信を視野に入れ、秘匿性通信ほか周波数基底の応用展開の可能性を模索した。

研究成果の概要(英文)：An attempt is made to implement quantum algorithms on an analog printed circuit board to emulate a quantum computer using classical sinusoidal voltage waves and discrete devices. By adopting the frequency basis, one can take advantage of the commercially available hardware specifically designed for classical communication protocols based on frequency division multiplexing, which makes the implementation of quantum algorithms effortless, readily accessible and affordable. Extension of such frequency protocols to the optical domain and application to quantum communication and/or cryptography are also attempted.

研究分野：応用物理学

キーワード：アナログエレクトロニクス ディスクリート部品 周波数重ね合わせ状態 正弦波信号 量子アルゴリズム Grover検索 量子通信

1. 研究開始当初の背景

量子コンピュータは、特定の問題群に対して古典コンピュータの性能を凌駕することが知られている。このような量子アルゴリズムとして現在までに 3 つが提案されている。Deutsch-Jozsa の量子アルゴリズムは、 $n$ -ビットの入力 $\{0,1\}^n$ に対し、「全部が 0 か 1 (一様)」あるいは「0 と 1 と半々 (均衡)」(のように予め設定されている)をオラクルとよばれるブラックボックス使って判断する。決定論的な古典コンピュータはこのような処理があまり得意ではない。実用性は低いが、量子アルゴリズムの特徴が出ている例と言える。残るふたつは Shor の素因数分解アルゴリズムと Grover の検索アルゴリズムである。現在、前者をベンチマークテストとして量子コンピュータの開発研究が急ピッチで進められている。素因数分解では冪乗剰余計算の周期決定が重要であり、量子フーリエ変換が用いられる。一方、Grover のアルゴリズムは、検索対象 $|m\rangle$ が判っていて番地が不明のデータベース( $O(N)$ )からオラクル ( $1-2|m\rangle\langle m|$ ) をもとにこれを高確率( $O(N^{0.5})$ )で見出す方法論を与える。本研究では、特にこの量子検索アルゴリズムをベンチマークテストに用いた。

量子コンピューティングに共通するのは、量子ビットとして 2 つの基底 ( $|0\rangle, |1\rangle$ ) の重ね合わせ (ベクトル和) を用いる点である。一方、古典的な波動ほかベクトル表現の可能な物理量にもベクトル和が存在する。実は、量子アルゴリズムの実行に真に必要なのはベクトル和の性質であって量子エンタングルメント (直積集合の部分集合) がなくても実行可能とする議論がある。こうした視点から古典的な光の波動性を用いて量子コンピュータをエミュレートした先行研究が報告されている (コヒーレントコンピューティング)。アナログ回路への量子ゲート実装は、この決定的な証左でもあり、状態ベクトルが直接観測できるという際立った特徴がある。

従来、光が中心の量子コンピュータの開発研究においては、専ら光の運動量基底 (進行方向あるいは空間モード) と 2 つの偏光自由度が利用されてきた。本研究では振動電磁場の“周波数”を新たな基底とする (図 1)。その背景には公共放送等を始めとする周波数縦割りシステムの存在がある。これらの技術体系を流用できれば、専用ハードウェアの新規開発が不要となることが期待できる。さらに周波数チャンネル間の相互干渉に基礎を置く

正弦波信号と周波数 (量子) 状態の対応

$$f_k = f_{offset} + \Delta f \cdot k$$

$$V_{signal} = \sum_k V_k \sin(2\pi f_k t + \phi_k)$$

第 1 qubit:  $|a\rangle|0\rangle + |b\rangle|1\rangle$   
 第 2 qubit:  $|c\rangle|0\rangle + |d\rangle|1\rangle$

$$|\psi\rangle = (|a\rangle|0\rangle + |b\rangle|1\rangle)_1 \otimes (|c\rangle|0\rangle + |d\rangle|1\rangle)_2$$

$$= ac|00\rangle + bc|01\rangle + ad|10\rangle + bd|11\rangle$$

図 1. 正弦波信号と周波数重ね合わせ状態.

革新技術の採用によって、デジタル化の陰で休眠資産と化した旧技術体系に新たな活路が見いだされる可能性が浮上する。

2. 研究の目的

本研究は、電気信号の周波数を基底としてアナログエレクトロニクス回路上で量子アルゴリズムが実行可能なプラットフォームを構築することが目的である。周波数分割多重方式ハードウェア群を活かしつつディスクリット部品と正弦波電圧によるカスケード接続方式のシミュレータを構築、量子アルゴリズム搭載に特化した実現可能な実装 (「安価」, 「平易」, 「即納」) とその動作検証を目指した。さらに光周波数領域への拡張と量子通信を視野に入れ、秘匿性通信ほか周波数基底の応用展開の可能性を模索した。

3. 研究の方法

- (1) コアコンポーネントの設計・製作  
 位相シフタ バンド除去フィルタ (ノッチフィルタ) とオールパスフィルタを検討。加算器、混合器 サブ MHz に帯域を限定、オペアンプ等を用いた原理の検証実験。周波数シフタ 局発と周波数非依存な混合器を位相シフタ、乗算器によって構成。コムフィルタ ノッチフィルタをカスケード・並列化、2 ポートインライン構成に。
- (2) 周波数重ね合わせ状態の発生  
 周波数シフタ通過後に発生した側波帯をヘテロダイン検波によって検証。
- (3) 万量子ゲートの構築と動作検証  
 周波数回転ゲート (図 2 下)  
 周波数アダマールゲートの製作と動作検証。出力特性を量子トモグラフィで評価。周波数制御 NOT ゲート (図 2 上)  
 製作および動作検証。特徴的な 2 ビット同乗効果を検証。量子トモグラフィ評価。

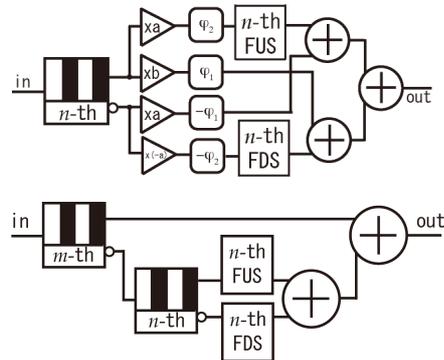


図 2. 制御 NOT ゲート (上) とアダマールゲート (下).

- (4) 量子アルゴリズム実装の試み  
 量子ゲート設計データに基づいて Grover の量子検索アルゴリズムソルバを構築。回路シミュレータで量子検索アルゴリズム搭載の可能性を検証。専用回路の実装法を検討。

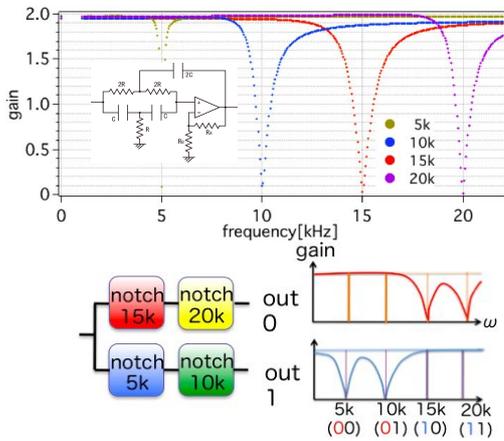


図3. ノッチフィルタ特性(上)とコムフィルタ(下).

(5) 拡張性と応用展開の検討 (研究の総括)

- 他の量子アルゴリズム実装について検討。
- 量子通信アーキテクチャ
- 周波数基底の量子通信への適用を検討。
- 周波数基底鍵配送方式
- 鍵配送生成の速度に着目した周波数分割多重型の新しい量子通信方式の模索。

4. 研究成果

初年度は、基本量子ゲートの回路デザインとプロトタイプ構築をターゲットに据え、2ビット周波数基底を{5, 10, 15, 20 kHz}として(2周波数で1ビット(図1))基本量子ゲートの個別動作検証を目指した。回路デザインの制約からコアコンポーネントの開発順序を当初計画から若干変更し、(1)コムフィルタ、(2)位相シフタ、(3)加算器、(4)周波数シフタの順とした。基本デザインはプラグ&プレイ構成の視点から2ポート・インライン型とした。図3上部パネルはノッチフィルタの回路と透過特性である。これらを下図のように配置すると上アーム 15, 20 kHz、下アーム 5, 10 kHz 透過の2ビットコムフィルタが構成できる。(2)については、周波数非依存型の広帯域対応の位相フィルタを目指した。原理の検証にはオペアンプを採用したが、マイクロ波トランジスタも検討した。図4左は、折衷案としての位相フィルタ回路である。これは正弦波電圧信号の振幅一定条件下での広帯域化が困難なためである。図3のノッチフィルタにオールパスフィルタ(同図右)を後置することで、4周波数{5, 10, 15, 20 kHz}において91.0-91.7°のシフトを得た。ノッチフィルタとオールパスフィルタを併用。(3)につ

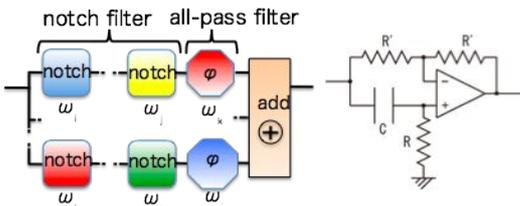


図4. 周波数非依存型の位相フィルタ(左)とオールパスフィルタ回路(下)。

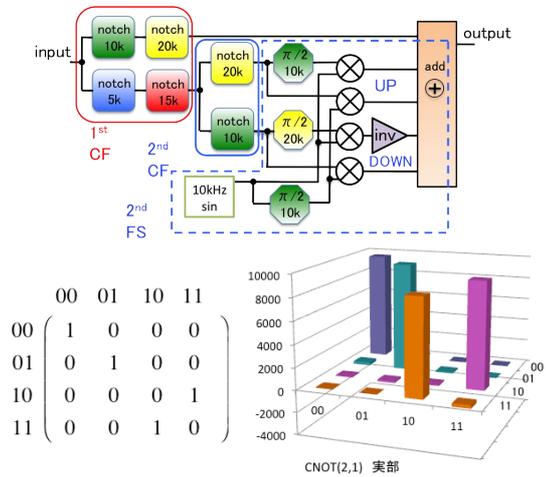


図5. 制御NOTゲートの回路構成(上)および量子トモグラフィの結果(下)。

いては計装アンプなどを検討の末、標準的な反転増幅器を利用。(4)については信号の可干渉性を確保すべく、局発と混合器に位相シフタ、乗算器、加算器(減算器)を組み合わせたデザインを新たに設計した。

コンポの動作検証と周波数重ね合わせ状態の発生検証にはデジタル信号源を用いた。周波数シフタ通過後の側波帯はオシロスコープ上で直接検証する一方、密度行列の対角項をスペクトルアナライザで確認した。

尚、実装に際しては部品の精度の確保が必要だったが、経済性を考慮してコアコンポーネント製作には高精度(EIA192; 0.1%)と標準精度(E24: 5%, E96: 1%)の抵抗および1%薄膜キャパシタを組み合わせて使った。

その結果、当初の予定どおりに1, 2ビット量子ゲート設計から量子アルゴリズム実装の段階へと研究を推進できる状況となった。

次年度では、能動素子組み込み制御 NOT (図5)ゲートと回転ゲート(図6)を構築、忠実度  $F = \frac{|\text{Tr}(M_{ideal}^* M_{exp})|}{2\sqrt{\text{Tr}(M_{exp}^* M_{exp})}}$  の値が量子トモグラフィ評価で98.5%を超えた。これら周波数制御 NOT ゲートと周波数回転

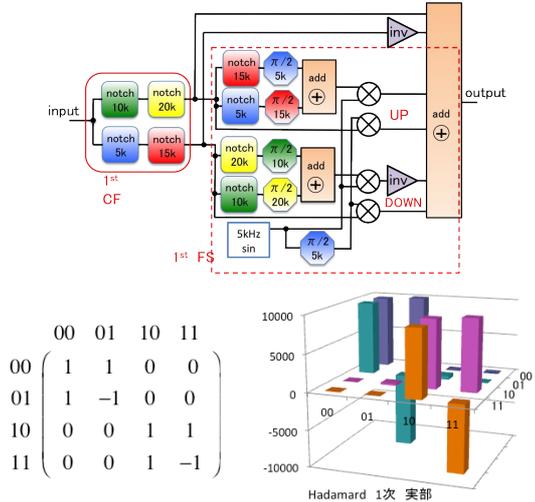


図6. アダマールゲートの回路構成(上)および量子トモグラフィの結果(下)。

ゲートを基本構成ブロックとしてカスケード接続を試み、2ビットまでの実装を行った。

次に、この結果をもとに Grover 量子検索アルゴリズムの実装とその動作検証を試みた。通常の構成は、初期化、アダマール変換、オラクル、拡散変換 (Grover 繰り返し) であるのに対し、周波数基底ではカスケード配置かつオラクル、拡散変換内  $|00\rangle$  位相反転はノッチフィルタ、反転増幅器によって構成した。実装部品の特性を反映させた SPICE 回路シミュレータによる仮想実験においては、1 回検索において  $\{5, 10, 15, 20 \text{ kHz}\}$  の 2 ビット周波数基底に対し、弁別比が 3 から 20 の間で検索ターゲットの位置同定が可能との結論を得た (図 7)。これにより同検索ハードウェア実装に向けて重要な足がかりが得られた。しかし、ビット数増に応じて回路構成部品の点数が指数関数的に増加することからチップ部品の投入や、モノリシック化もあわせて検討した。また光通信周波数帯への周波数基底の拡張を模索した。

最終年度では、前年度までの成果であるディスクリット部品を用いた制御 NOT ゲートならびに回転ゲートを基本構成ブロックとして他ビット化について主に検討した。その結果、チップ部品の点数にもまして実装作業の増加がスケラブルでないため、物理リソースの観点から微細化・集積化・モジュール化が不可欠との結論に至った。これは周波数帯域を kHz から GHz へ拡張する方向性とも矛盾しない。

さらに前年度に引き続き、周波数基底の概念を 100THz の光領域にまで拡張することを試みた。光の振動数領域では直接周波数変調が困難であり、これに代わる方法として動的プログラマブルな周波数変調方式を検討した。非線形結晶導波路を通過した光通信帯域の位相変調光電場に振動変調の時間窓を設けたところ、フィルタおよび干渉計法を用いた方法にくらべて高効率の側波帯発生が可能なのことがわかった。

また周波数基底の特性を利用して真の単

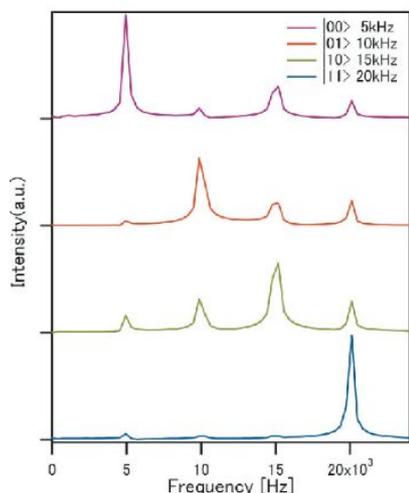


図 7. Grover 検索のシミュレーション結果。

一光子ヘテロダイン検出の可能性を探った。音響光学変調素子による周波数変調ではモードが異なる複数の側波帯が同時発生する。この効果を利用して「周波数ビームスプリッタ」を構成、スクリーン不在の時間ドメイン上に明瞭度 90%級の干渉フリンジを高再現性、高 S/N 比で発生させることに成功した。

さらにこれら一連の技術の複合化を通じて、当初計画で触れた量子通信のためのプラットフォームの整備にも着手した。その結果、周波数ドメインにおける差動位相変調の新たな手法を見出し、2 ビット量子鍵配送の原理の検証実験を試みた。この新しい通信プロトコルは単一光子源や量子エンタングルメントなどを必要とせず、かつ既存の波長 (周波数) 分割多重方式とも整合性が高く、アナログエレクトロニクスへの即時転用の潜在的可能性を秘めている。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 0 件)

[学会発表](計 3 件)

大川洋平、大村倫史、安武裕輔、深津 晋、「周波数上に位相符号化する DPS 量子鍵配送方式」第 63 回応用物理学会春季学術講演会・2016/03/18~03/22・東工大大岡山キャンパス (東京都目黒区)

Yohei Okawa, Fuminori Omura, Yuhsuke Yasutake, Susumu Fukatsu, “Single Photon Heterodyning”, The Conference on Optics, Atoms and Laser Applications, 2015 (IONS-KOALA)・2015/11/23~11/27・University of Auckland City Campus, Auckland (New Zealand)

大川洋平、大村倫史、安武裕輔、深津 晋、「光子ヘテロダイニング」日本物理学会 2015 年秋季大会・2015/09/16~09/19・関西大学千里山キャンパス (大阪府吹田市)

[その他]

ホームページ:

研究室 URL <http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/fkatz/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

深津 晋 (FUKATSU, Susumu)  
東京大学・総合文化研究科・教授  
研究者番号: 60199164