

平成 22 年 5 月 21 日現在

研究種目：特定領域研究
 研究期間：2006～2009
 課題番号：18080001
 研究課題名（和文） 局在電磁波による高速信号伝送を利用した単一磁束量子高速フーリエ変換回路の研究
 研究課題名（英文） SFQ Fast Fourier Transform Circuit Using Localized Signal Transmission
 研究代表者
 中島 康治 (NAKAJIMA KOJI)
 東北大学・電気通信研究所・教授
 研究者番号：60125622

研究成果の概要（和文）：面積優位である 4 ビットの AND/RCA を用いた乗算器を製作し、動作を確認した。RCA はビット数増加で速度は劣化するため、4 ビットの CLA 加算回路を製作し 30GHz までの高速測定を行い完全動作を確認した後、4 ビットの AND/CLA を用いた乗算器を製作し、並列完全動作を確認した。これを用いた 4 ビット乗算器を設計製作し動作を確認した。これにより 4 ビット 2 点 FFT 回路を設計し、シミュレーションで 20GHz を越える動作を確認した。

研究成果の概要（英文）：We have designed and implemented a 4-bit Carry Look-ahead Adder and 4-bit parallel multipliers for a Fast Fourier Transform system. In a high frequency functional test ~30GHz, we confirmed the successful operation of the CLA. We also confirmed the successful operation of the multiplier in a low speed tests. The combination of the fabricated circuits realizes the building blocks of a 4-bit Decimation-in-Time radix 2 butterfly unit that enable us to construct an FFT system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	12,800,000	0	12,800,000
2007 年度	23,200,000	0	23,200,000
2008 年度	3,300,000	0	3,300,000
2009 年度	3,300,000	0	3,300,000
年度			
総計	42,600,000	0	42,600,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：(1) 超伝導材料・素子 (2) 局在電磁波 (3) 磁束量子 (4) ジョセフソン接合 (5) フーリエ変換

1. 研究開始当初の背景

近年のマルチメディア情報の信号処理において FFT は有用な基本アルゴリズムであり、特に認証・照合などのセキュリティ分野の画像解析において高速・高精度の FFT 演算は今

後ますます重要な処理になるものと考えられる。また、X 線回折による分子構造解析などの分析処理においては、高速・高精度の FFT 演算は常に要求される必要がある。単一磁束量子を情報担体とした論理回路はサブテラ

ヘルツ領域でのゲート動作周波数を有し、システムレベルで 100GHz を超える回路を提供する有望な回路である。これまでは、信号伝送をジョセフソン伝送線路 (JTL) により行っているが、長距離の高速伝送が難しくシステム高速化のボトルネックとなっている。そこで、導波路配線中の局在電磁波を信号伝送に用いたシステム構築を目指した。

2. 研究の目的

単一磁束量子を情報担体とした論理回路はサブテラヘルツ領域でのゲート動作周波数を有し、システムレベルで 100GHz を超える回路を提供する有望な回路である。これまでは、信号伝送をジョセフソン伝送線路 (JTL) により行っているが、長距離の高速伝送が難しくシステム高速化のボトルネックとなっている。そこで、導波路配線中の局在電磁波を信号伝送に用いたシステム構築を目指し、信号処理プロセッサの応用として最もインテンシブな動作が要求される 2 次元高速フーリエ変換 (FFT) 処理を取り上げる。近年のマルチメディア情報の信号処理において FFT は有用な基本アルゴリズムであり、特に認証・照合などのセキュリティに関連する画像解析分野において高速・高精度の FFT 演算は今後ますます重要な処理になるものと考えられる。また、X 線回折による分子構造解析などの分析処理においては、高速・高精度の FFT 演算は常に要求される必要がある。そこで我々は、SFQ 回路による FFT 回路に局在電磁波信号伝送を適用し、高速な信号処理回路の構成を行うことを研究目的とする。

3. 研究の方法

初めに局在電磁波伝送路を適用した高速乗算器と 2 点 DFT 回路の数値解析を行った。導入した CONNECT ライブラリにより基本となるゲートセルを組み合わせた演算ブロック (部分積生成ブロック、加算ブロック、減算ブロックなど) を個別に解析し、動作マージンやタイミングの評価を行った。同時に 4 ビット高速乗算器と 2 点 DFT 回路をベースにそれら回路の高速化を目指すとともに、ビット数の増加を図った。特に局在電磁波伝送路を用いたシステムの性能評価を詳細な数値解析により行った。その後、現有の CAD システムを用いてマスク設計に移行した。回路パラメータ評価と基本ゲートセルの測定回路の集積化は ISTE のチップファンダリーを利用して行った。試作したテスト回路を用いて、ジョセフソン電子回路の基本パラメータであるインダクタンスや接合特性の評価を行い、局在電磁波伝送路とのインピーダンス整合条件などを探った。計測は現有の極低温冷却設備と信号計測システムならびに ISTE 仕様測定治具、サンプリングスコープ

プラグインモジュール、ロジック信号発生器、高周波信号増幅器を用いて多チャンネルの信号測定を行った。設計した回路の試作をチップファンダリーを通して行い、多チャンネルの信号測定を行った。その測定による動作特性と設計値との比較を行い、特定研究グループの間で性能検討を行った。特に局在電磁波伝送路を用いたシステムの性能評価について詳細な検討を加えた。

4. 研究成果

本研究は SFQ 論理回路の高速性を生かした FFT システムの設計および集積化を目的として行われた。バタフライ回路を構成するために必要な乗算器、加算器と減算器を設計した。4 ビットの場合には AND Array/Ripple Carry Adder を用いた乗算回路が適していることを示した。この乗算回路を用いたバタフライを 1.35 GHz のクロック周波数で動作させたときに、計算時間が 4.5 ns オーダーとなった。乗算回路計算時間は 890 ps であった。一方、半導体回路では、遅延が 652 ps の 32 ビットの 90 nm CMOS 乗算回路が発表されている。ビット数の違いはあるが、この二つの回路の性能は同程度である。しかし、90 nm に対してジョセフソン接合サイズが 2.0 μm であり、集積化には余裕がある。さらに、既の実現可能なプロセスの向上を考慮すれば、本回路構成でも半導体回路の性能を上回ると見積もることができる。

さらにビット数を増加させた場合を考慮し、CLA 構成とした加算器をベースにして、CONNECT セルライブラリを用いて回路を設計し、シミュレーションを行い、ISTEC の臨界電流密 2.5kA/cm² の Nb/Al/Nb 標準プロセスによって集積化を行った。その結果、4bitCLA は 1051 接合、その面積は 1.5 × 1.5mm²、消費電力は 20GHz 動作時で 0.269mW となった。4bit 符号なし乗算器は 3360 接合、面積は 2.92 × 1.84mm²、消費電力は 20GHz 動作時で 0.920mW となった。

この 4bitCLA を集積化して高速測定を行った。低速測定での DC バイアスマージンは ±12% であった。確認した最高動作周波数は約 30GHz で、それ以上の動作確認はクロックジェネレータが対応していないため不明である。4bit 符号なし乗算器は低速測定で全動作を確認した。DC バイアスマージンは部分積構成部は ±5.5%、最終加算部は ±17% であった。さらに設計した 4bitCLA と 4bit 符号なし乗算器を改良した回路を利用して、FFT システムのコア部分である 2 点バタフライユニットを設計した。その動作可能クロック周波数は 20GHz、スループットは 20GHz、レイテンシは 1350ps、ジョセフソン接合数は 22000、DC バイアス電流値は 2.35A、占有面積は 8 × 7mm²、総消費電力は 6mW と見積もられた。

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 18 件)

1. T. Onomi, T. Kondo, and K. Nakajima, "Implementation of High-Speed Single Flux-Quantum Up/Down Counter for the Neural Computation Using Stochastic Logic," IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol.19, no.3, June 2009, pp.626-629 査読有.
2. Y. Hayakawa, and K. Nakajima, "Parameter Analysis for Removing the Local Minima of Combinatorial Optimization Problems by Using the Inverse Function Delayed Neural Network," Advances in Neuro-Information Processing, 15th Int. Conf., ICONIP 2008, Auckland, New Zealand, November 25-28, 2008, Revised Selected Papers, Part I, 2009, pp. 875-882 査読有.
3. 千承佑, 早川吉弘, 中島康治, "外観検査システムのための高速ハードウェアニューラルネットワークの設計", 電子情報通信学会論文誌A, vol. J92-A, no. 1, Jan. 2009, pp. 37-47 査読有.
4. Y. Yamada, K. Nakajima, and K. Nakajima, "RF impedance of intrinsic Josephson junction in flux-flow state with a periodic pinning potential," Physica C, vol. 468, Sep. 2008, pp. 1295-1297 査読有.
5. K. Nakajima and S. Suenaga, "Bursting characteristics of a neuron model based on a concept of potential with active areas," Chaos, American Institute of Physics, vol. 18, May 2008, p. 023120 査読有.
6. J. Sveholm, Y. Hayakawa, and K. Nakajima, "Recalling Temporal Sequences of Patterns Using Neurons with Hysteretic Property," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E91-A, No. 4, April 2008, pp. 943-950 査読有.
7. S. Chun, Y. Hayakawa, and K. Nakajima, "Hardware Neural Network for a Visual Inspection System," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E91-A, No. 4, April 2008, pp. 935-942 査読有.
8. T. Onomi, T. Kondo, and K. Nakajima, "High-speed single flux-quantum up/down counter for neural computation using stochastic logic," Journal of Physics: Conference Series, vol.97, March 2008, p.012187 査読有.
9. A. Sato, Y. Hayakawa and K. Nakajima, "Avoidance of the Permanent Oscillating State in the Inverse Function Delayed Neural Network," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E90-A, no. 10, Oct. 2007, pp.2101-2107 査読有.
10. S. Suenaga, Y. Hayakawa and K. Nakajima, "Design of a Neural Network Chip for the Burst ID Model with Ability of Burst Firing," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E90-A, no. 4, April 2007, pp. 715-723 査読有.
11. S. Sato, K. Inomata, M. Kinjo, N. Kitabatake, K. Nakajima, H. B. Wang, and T. Hatano, "Macroscopic Quantum Tunneling and Resonant Activation of Current Biased Intrinsic Josephson Junctions in Bi-2212," IEICE Trans. Electronics, vol. E90-C, no.3, March 2007, pp. 599-604 査読有.
12. K. Inomata, S. Sato, M. Kinjo, N. Kitabatake, H. B. Wang, T. Hatano and K. Nakajima, "Study of macroscopic quantum tunnelling in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ intrinsic Josephson junctions," Superconductor Science and Technology, vol. 20, no.1, Jan. 2007, pp. S105-S109 査読有.
13. 佐藤朱里, 早川吉弘, 中島康治, "Inverse Function Delayed モデルによる組み合わせ最適化問題正解率のパラメータ依存性," 電子情報通信学会論文誌基礎・境界, vol. J89-A, no. 11, Nov. 2006, pp. 960-972 査読有.
14. Y. Nakamiya, M. Kinjo, O. Takahashi, S. Sato, K. Nakajima, "Quantum Neural Network Composed of Kane's Qubits," Jpn. Journal of Applied Physics, vol. 45, No. 10A, Oct. 2006, pp. 8030-8034 査読有.
15. S. Suenaga, Y. Hayakawa and K. Nakajima, "Dynamical Behavior of Neural Networks with Anti-Symmetrical Cyclic Connections," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E89-A, no. 10, Oct. 2006, pp. 2775-2786 査読有.
16. J. Sveholm, Y. Hayakawa and K. Nakajima, "Temporal Sequences of Patterns with an Inverse Function Delayed Neural Network," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E89-A, no. 10, Oct. 2006, pp. 2818-2824 査読有.
17. H. Li, Y. Hayakawa, S. Sato and K. Nakajima, "Hardware Implementation of an Inverse Function Delayed Neural Network Using Stochastic Logic," IEICE Trans. Information and Systems, vol. E89-D, no. 9, Sep. 2006, pp. 2572-2578 査読有.
18. Y. Yamada, K. Nakajima, and K. Nakajima, "RF Responses and In-Phase Josephson Vortex Motion in an Intrinsic Josephson Junction System with a Periodic Pinning Potential," Journal of the Korean Physical Society, vol. 48, no. 5, May 2006, pp.1053-1056 査読有.

[学会発表] (計 74 件)

1. 渡辺峰生, 片山秀瑛, 桜庭栄, 猪股邦宏, 小野美武, 佐藤茂雄, 中島康治, Low-Tc ジョセフソン接合列における集団的スイッチング特性, 2010 年春季 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 18p-V-12, 平塚, 2010 年 3 月, (2010 年 3 月 18 日)
2. 中本涼介, 桜庭栄, 小野美武, 佐藤茂雄, 中島康治, 大規模集積回路のための SFQ Booth Encoder, 電子情報通信学会 2010 年総合大会, C-8-18, 仙台, 2010 年 3 月, (2010 年 3 月 16 日)
3. 桜庭栄, 小野美武, 中島康治, 4 ビット並列高速フーリエ変換システム, 電子情報

- 通信学会 2010 年総合大会、C-8-17、仙台、2010 年 3 月、(2010 年 3 月 16 日)
4. 黒瀬幸司、曾田尚宏、早川吉弘、佐藤茂雄、中島康治、van der Pol 相互結合系のポテンシヤルとアクティブエリアに基づく動特性解析、電子情報通信学会 2010 年総合大会、A-2-12、仙台、2010 年 3 月、(2010 年 3 月 16 日)
 5. 曾田尚宏、黒瀬幸司、早川吉弘、佐藤茂雄、中島康治、高次結合ネットワークによる組み合わせ最適化問題解探索のパラメータ特性、電子情報通信学会 2010 年総合大会、A-2-1、仙台、2010 年 3 月、(2010 年 3 月 15 日)
 6. 曾田尚宏、黒瀬幸司、早川吉弘、佐藤茂雄、中島康治、離散時間高次結合逆関数遅延ネットワーク、信学技報、Vol.109, No.458, NLP2009-177, pp.131-136, Mar. 2010, 東京、(2010 年 3 月 10 日)
 7. 黒瀬幸司、曾田尚宏、早川吉弘、佐藤茂雄、中島康治、2 次ポテンシヤル上にアクティブエリアを持つ振動子相互結合系の振る舞い、信学技報、Vol.109, No.458, NLP2009-181, pp.109-113, Mar. 2010, 東京、(2010 年 3 月 10 日)
 8. 前波勇介、小野美武、早川吉弘、佐藤茂雄、中島康治、超伝導ニューラルネットワークとその 4-Queen 問題への応用、信学技報、Vol.109, No.458, NLP2009-172, pp.81-85, Mar. 2010, 東京、(2010 年 3 月 10 日)
 9. R. Nakamoto, S. Sakuraba, T. Onomi, S. Sato, and K. Nakajima, "Booth encoder for large scale integration SFQ circuits," Proceedings of Superconducting SFQ VLSI Workshop SSV 2010, pp.103-104, Yokohama Japan, Jan. 2010 (2010 年 1 月 13 日)
 10. S. Sakuraba, A. Martins, T. Onomi, S. Sato, and K. Nakajima, "High Throughput Parallel Arithmetic Circuits for Fast Fourier Transform," Proceedings of Superconducting SFQ VLSI Workshop SSV 2010, pp.10-15, Yokohama Japan, Jan. 2010 (2010 年 1 月 13 日)
 11. 佐藤茂雄、金城光永、中島康治、ホップフィールドネットワークと断熱的量子計算、信学技報、Vol.109, No.269, NLP2009-91, pp.51-54, Nov. 2009, 屋久島、(2009 年 11 月 11 日)
 12. K. Kurose, T. Sota, Y. Hayakawa, and K. Nakajima, Analyses of Two Dimensional Hindmarsh-Rose Type Model Based-on a Concept of Potential with Active Areas, Proceedings of the 2nd Student Organizing International Mini-Conference on Information Electronics Systems, p. 167, Sendai, Japan, Oct. 2009 (2009 年 10 月 27 日)
 13. T. Sota, Y. Hayakawa, and K. Nakajima, Solving Combinatorial Optimization Problems with the Quartic Form Energy Function of the Neural Network, Proceedings of the 2nd Student Organizing International Mini-Conference on Information Electronics Systems, pp. 69-70, Sendai, Japan, Oct. 2009 (2009 年 10 月 27 日)
 14. K. Kurose, Y. Hayakawa, and K. Nakajima, Analyses of the dynamics of interconnected van der pol models based-on a concept of potential with active areas, Proceedings of the 2009 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp. 423-426, Sapporo, Japan, Oct. 2009 (2009 年 10 月 20 日)
 15. T. Sota, Y. Hayakawa, and K. Nakajima, The Quartic Form Energy Function for General Combinatorial Optimization Problems, Proceedings of the 2009 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp. 527-530, Sapporo, Japan, Oct. 2009 (2009 年 10 月 20 日)
 16. 黒瀬幸司、早川吉弘、中島康治、Two Dimensional Hindmarsh-Rose Type Model のポテンシヤル上のアクティブ領域に基づく動特性解析、日本神経回路学会第 19 回全国大会、P2-20、仙台、2009 年 9 月、(2009 年 9 月 25 日)
 17. 曾田尚宏、早川吉弘、中島康治、非線形自己結合を持つ逆関数遅延ニューラルネットワーク、日本神経回路学会第 19 回全国大会、P1-18、仙台、2009 年 9 月、(2009 年 9 月 24 日)
 18. 早川吉弘、中島康治、逆関数遅延ニューラルネットワークを用いたナンバープレイスの解法、日本神経回路学会第 19 回全国大会、P1-17、仙台、2009 年 9 月、(2009 年 9 月 24 日)
 19. S. Sakuraba, T. Onomi, and K. Nakajima, "4-bit Parallel Multiplier for a Fast Fourier Transform," Extended Abstracts of the 12th International Superconductive Electronics Conference, SP-P40, Fukuoka, June 2009 (2009 年 6 月 19 日)
 20. S. Sakuraba, T. Onomi, and K. Nakajima, "4-bit Parallel Adder for a Fast Fourier Transform System," Proceedings of Superconducting SFQ VLSI Workshop SSV2009, P12, Fukuoka, June 2009 (2009 年 6 月 19 日)
 21. S. Sato, K. Matsushita, K. Inomata, H. Wang, T. Hatano, M. Kinjo, and K. Nakajima, "Collective Dynamics of Intrinsic Josephson Junctions," Extended Abstracts of the 12th International Superconductive Electronics Conference, TD-P35, Fukuoka, June 2009 (2009 年 6 月 18 日)
 22. 中島康治、早川吉弘、黒瀬幸司、バーストニューロンモデルのポテンシヤル上のアクティブ領域に基づく動特性解析、第 58 回理論応用力学講演会、2C08、東京、2009 年 6 月、(2009 年 6 月 10 日)
 23. 松下耕司、佐藤茂雄、猪股邦宏、金城光永、王華兵、羽多野毅、中島康治、固有ジョセフソン接合列における集団力学について、2009 年春季 第 56 回応用物理学関係連合講演会、2p-ZP-2、つくば、2009 年 4 月、(2009 年 4 月 2 日)
 24. 桜庭栄、小野美武、中島康治、高速フーリエ変換システム用ハイスループット並列加算器、電子情報通信学会 2009 年総合大会、C-8-18、松山、2009 年 3 月、(2009 年 3 月 20 日)
 25. 小野亜衣子、佐藤茂雄、金城光永、中島康

- 治, ニューラルネットワークの手法を用いた断熱的量子計算における計算性能のハミルトニアン依存性について、電子情報通信学会 2009 年総合大会、A-2-35、松山、2009 年 3 月、(2009 年 3 月 20 日)
26. 黒瀬幸司、早川吉弘、中島康治、ニューロチップを用いたバーストIDモデル相互結合系の測定、電子情報通信学会 2009 年総合大会、A-2-22、松山、2009 年 3 月、(2009 年 3 月 19 日)
 27. 曾田尚宏、早川吉弘、中島康治、高次シナプス結合ニューラルネットワークによる組み合わせ最適化問題解探索、電子情報通信学会 2009 年総合大会、A-2-28、松山、2009 年 3 月、(2009 年 3 月 19 日)
 28. 押切智子、早川吉弘、中島康治、高次元ニューロンモデルの動的相互作用に関する研究、電子情報通信学会 2009 年総合大会、A-2-23、松山、2009 年 3 月、(2009 年 3 月 19 日)
 29. Ali A. Lemus, Y. Hayakawa, and K. Nakajima, Neural Searching Algorithm for Combinatorial Optimization Problems, 電子情報通信学会 2009 年総合大会、情報システムサイエティ総合大会特別号学生ポスターセッション、p. 86, March 2009, 松山、(2009 年 3 月 18 日)
 30. 佐藤茂雄、猪股邦宏、王華兵、羽多野毅、金城光永、中島康治、固有ジョセフソン接合の量子特性、電子情報通信学会 2009 年総合大会、CT-1-2、松山、2009 年 3 月、(2009 年 3 月 17 日)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中島 康治 (NAKAJIMA KOJI)
東北大学・電気通信研究所・教授
研究者番号：60125622

(2) 研究分担者

小野美 武 (ONOMI TAKESHI)
東北大学・電気通信研究所・助教
研究者番号：70312676