

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：32689
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2018～2020
課題番号：18K04155
研究課題名(和文)無線接続クラスタ型スーパーコンピュータを実現する小型RFフロントエンドの研究

研究課題名(英文) Study of a compact RF front-end realizing a wireless-connected cluster supercomputer

研究代表者
片山 光亮 (Katayama, Kosuke)
早稲田大学・理工学術院(情報生産システム研究科・センター)・講師(任期付)

研究者番号：90538026
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)：本研究課題は、複数の計算ノードを無線で束ねて計算速度の台数効果を得る。しかしながら十分な台数効果を得るためには、高速な通信を実現するRFフロントエンドが必要不可欠である。実際の運用を考慮した場合、RFフロントエンドは小型であることが望ましい。RFフロントエンドの大きさを決めるのは主にアンテナであるため本研究では、クラスタ型スーパーコンピュータに適した放射パターンを持ち高利得、広帯域なスタック構造を持つ八木アンテナをプリント基板上に構成した。この世界最小サイズのスタック八木アンテナを12の計算ノードに適用し、無線クラスタを構成した場合、1計算ノードに比べて600%の高速化が確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義
この技術を用いることで、無線接続クラスタ型スーパーコンピュータが道路上に発現し、人工知能をベースとした自動運転用の高速演算が走行中に行える。この研究成果を応用すれば、メンテナンス性を著しく低下させ、無視できない量の電力を消費するデータセンタの有線ネットワークを置き換えることも可能であるし、オフィスや工場内で外部ネットワークと切り離れた無線接続ローカルエリアネットワークを構築し、セキュリティを大幅に向上させることも可能である。このように本研究は安全安心で持続可能な未来の社会づくりへ大きく貢献できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, multiple computational nodes are wirelessly bundled and higher computational speed is obtained. However, a high-speed RF front-end is necessary not to limit the computational speed. Moreover, a compact RF front-end is desired for practical usage. Since the RF front-end is mainly determined by an antenna, we developed a stacked Yagi-antenna which has an optimal radiation pattern for cluster computing, high gain, and wideband on a printed circuit board. We confirmed that twelve nodes with these antennas achieve a 600% faster speed than that of one node.

研究分野：無線通信

キーワード：平面フィルタ 群粒子最適化 プリント基板 ラットレースパラン 八木アンテナ 無線分散コンピューティング

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1．研究開始当初の背景

人工知能をベースとした自動運転においても、高い演算能力が必要であるが、リアルタイム性とロバスト性が要求されるためにオープンなネットワークを介したクラウドコンピュータの利用は望ましくない。そのため、車載可能な人工知能向けコンピュータが存在するが、演算速度は人工知能向けクラウドコンピュータの13万分の1に満たない1 TFLOPS程度であり、自動運転実現のボトルネックとなっている。

車載可能なコンピュータを計算ノードに見立て、超高速・低遅延な無線ネットワークで接続することで並列度を飛躍的に向上し、人工知能向けクラウドコンピュータに劣らない演算速度が実現できると見込まれる。クラスタ型コンピュータの高速化は計算ノードの並列化により達成されるが、並列化による高速化率はノード間の通信速度により制限される。したがって、オープンネットワーク（コネクテッドカー／つながる車）とは異なる、プロプライエタリで超高速・低遅延なネットワークが必要となる。

2．研究の目的

本研究の目的は、人工知能をベースとした自動運転に必要な演算速度を、24 GHz帯を用いた無線接続クラスタ型スーパーコンピュータにより提供することである。24 GHz帯における超高速な固定基地局用無線通信装置は既に実用化されているが、車載可能な大きさや消費電力にするためには数々の技術的なブレイクスルーが必要となる。固定基地局用通信装置は(1) 利得を稼ぐために、巨大なアンテナを有し、(2) 出力電力を得るために増幅器の消費電力が大きく、(3) 増幅段の利得が低いために、雑音が大きく感度が悪い。このように24 GHz帯の固定基地局用無線通信装置が車載困難な理由はアンテナを含めたRFフロントエンドに起因している。そこで24 GHz RFフロントエンドモジュールの体積と消費電力をそれぞれ既存の1000分の1以下とする新しい技術を生み出す必要がある。

3．研究の方法

車載可能な超小型で低消費電力なRFフロントエンドの要件は、(1) アンテナ利得 35dBi以上のアンテナと、(2) 電力結合効率 90%以上の位相調整機構を備えた高効率増幅器と、(3) 利得 55dB以上で雑音指数 4dB以下の高性能帰還増幅段であると見積もられる。これらの要件を具体的には(1) 小型フェーズドアレイアンテナと(2) 位相調整機能を持つ(3) 高利得・低雑音な増幅器を組み合わせることで達成し、世界初の無線接続クラスタ型スーパーコンピュータを構成可能な、超小型RFフロントエンドを実現する。

4．研究成果

本「無線接続クラスタ型スーパーコンピュータを実現する小型RFフロントエンドの研究」は、要素技術として(1) 伝送線路 導波管変換器 (2) 位相調節機構 (3) 高効率増幅器 からなるとして研究をスタートさせた。(1) では従来F行列の縦続接続として表現されていた伝送線路特性へ伝送線路接続部特性(エッジモデル)の埋め込みを行うことで、伝送線路特性を高精度に見積もる方法を提案し、電気・情報関係学会九州支部連合大会において「Training Dataset Synthesis for Planar Filter Circuits Learning」を発表し [1]、国際非線形・通信・信号処理学会において「Edge Model Embedding Method for Planar Filter Synthesis」を発表した [2]。これらの技術を用いることで従来、数時間かけて電磁界解析により得られていた伝送線路形状からの高精度な周波数特性が、数ミリ秒で得られるようになった。さらに伝送線路特性を学習することで、所望の周波数応答フィルタを自動設計できるようになった [3]。結果を信号処理学会論文誌に「Direct Planar Filter

Synthesis Using Convolutional Neural Network」として発表し、論文賞を受賞した [4]。また本手法を用いることで、伝送線路形状から周波数特性を得ることができることも示した。本手法を用いることで、(1) 伝送線路 - 導波管変換器が高性能かつ短時間に設計できるようになった。(2) では位相調整素子としてダイオードを測定し、モデリングを行った。精度良くモデリングを行うために、種々の1ポートデエンベディング手法を評価し [5]、ダイオードモデルを区分線形化した [6]。(3) では、鳥や魚の集団行動に学んだ群粒子最適化と呼ばれる技術を増幅器の設計へ導入することで、増幅器の利得・帯域・安定性・消費電力を総合的に考慮して自動設計することができるようになった。これにより、10 dB以上の利得を持つ24 GHz広帯域増幅器が1時間以内に設計でき、結果をサービスコンピューティング研究会において「Parameters of Particle Swarm Optimization for 24 GHz Amplifier Design」として発表し [7]、信号処理学会論文誌では「Particle Swarm Optimization for Comprehensive 24 GHz Amplifier Design」として発表し、論文賞を受賞した [8]。この技術により、増幅デバイスの性能を最大限に引き出すことができるようになった。

当初、(1) 伝送線路 - 導波管変換器と(2) 位相調節機構を組み合わせることでフェーズドアレーアンテナを構成し、計算ノードとの通信を確立する予定であったが、(4) 放射パターンを考慮したアンテナ設計により、位相調節無しで広範囲かつ高利得に無線接続できることが分かった [9]。八木アンテナをスタック構造にすることで、広範囲の計算機ノードと接続できる放射パターンを実現し、本アンテナ設計は、国際非線形・通信・信号処理学会において「13.6 dBi Stacked-Yagi Antenna on A PCB for Edge Computing」として発表した [10]。また、スタック構造にするためにRF信号の分配が必要であるが、ラットレースバランを用いることで低損失・広帯域に信号が分配できることを示した [11]。

(4) 放射パターンを考慮したアンテナが実現できたことで、各ノードと高速に通信が可能となり、映像情報メディア学会で動画伝送を用いてデモンストレーションした [12]。このアンテナを用いて、無線接続クラスタ型スーパーコンピュータを議論し [13]、実装及び測定結果を、“Wireless Distributed Computing System Using High-Gain Array Yagi-Antenna”として学術論文誌へ掲載した [14]。(3) 高効率増幅器を含む、無線接続クラスタ型スーパーコンピュータの議論は、“System and Component Design for Wireless Distributed Computing”と題して国際会議で発表した [15]。

結果として、世界最小のスタック構造を持つ高利得八木アンテナを含むRFフロントエンドを用いて12計算ノードを無線接続で束ねた場合、1計算ノードに比べて600%の高速化が確認された。計算ノードをさらに増やすことで、人工知能をベースとした自動運転が可能となる見通しを得た。

[1] Kosuke Katayama, Kiyoto Takahata, Takashi Ohsawa and Takaaki Baba, “Training Dataset Synthesis for Planar Filter Circuits Learning,” The 71th Joint Conference of Electrical, Electronics and Information Engineers in Kyushu, pp. 264, Sept. 2018.

[2] Kosuke Katayama, Kiyoto Takahata, Takashi Ohsawa, Takaaki Baba, “Edge Model Embedding Method for Planar Filter Synthesis,” RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP), pp. 502-505, March 5-7, 2019.

[3] K. Katayama, T. Baba, "Auto-Encoder/Decoder for Planar Filter Analysis/Synthesis," IEICE Thailand-Japan MicroWave, June 26-28, 2019.

- [4] Kosuke Katayama and Takaaki Baba, "Direct Planar Filter Synthesis Using Convolutional Neural Network," Journal of Signal Processing (JSP), vol. 23, no. 6, pp. 235-242, Nov. 2019.
- [5] 片山光亮, 馬場孝明, 大澤 隆, 「1ポートデエンベディング手法の比較」, 2020年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, p. 26, 2020年9月15-18日.
- [6] 片山光亮, 馬場孝明, 大澤 隆, 「アンチパラレルダイオードの区分線形モデリング」第73回電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2020年9月26-27日
- [7] Kosuke KATAYAMA Kui-Ting CHEN and Takaaki BABA, "Parameters of Particle Swarm Optimization for 24 GHz Amplifier Design," IEICE Technical Report SC2018-13, pp. 71-76, June 2018.
- [8] Kosuke Katayama, Kui-Ting Chen, Takaaki Baba, "Particle Swarm Optimization for Comprehensive 24 GHz Amplifier Design," Journal of Signal Processing (JSP), Vol. 22, No. 6, pp. 243-250, Nov. 2018.
- [9] 片山光亮・馬場孝明・大澤 隆, "プリント基板上の +8.5 dBi 2.4 GHz スタックド八木アンテナ," 電気関係学会九州支部第72回連合大会, p. 226, 2019年9月27-28日.
- [10] Kosuke Katayama, Takaaki Baba, Takashi Ohsawa, "13.6 dBi Stacked-Yagi Antenna on A PCB for Edge Computing," RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP), pp. 363-366, Feb. 28- March 2, 2020.
- [11] 片山光亮・馬場孝明・大澤 隆「アンテナに用いる平面バランの考察」電子情報通信学会ソサイエティ大会、2019年9月10-13日.
- [12] 片山 光亮, 馬場 孝明, 大澤 隆 "プリント基板上のスタック八木アンテナによる動画伝送実験," 映像情報メディア学会技術報告、pp. 63-66, 2020年1月24日
- [13] 片山 光亮, 馬場 孝明, 大澤 隆, "プリント基板上のスタック八木アンテナによる無線クラスタ," 2020年電子情報通信学会総合大会, p. 416, 2020年3月17日-20日.
- [14] Kosuke Katayama, Takaaki Baba and Ohsawa Takashi, "Wireless Distributed Computing System Using High-Gain Array Yagi-Antenna," Journal of Signal Processing (JSP), Vol. 25, No. 3, pp. 93-101, May 2021.
- [15] Kosuke Katayama, Takaaki Baba, Takashi Ohsawa, "System and Component Design for Wireless Distributed Computing," 2020 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT), pp. 269 - 271, Sept. 2-4, 2020.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kosuke Katayama and Takaaki Baba	4. 巻 6
2. 論文標題 Direct Planar Filter Synthesis Using Convolutional Neural Network	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Signal Processing (JSP)	6. 最初と最後の頁 235-242
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2299/jsp.23.235	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kosuke Katayama, Kui-Ting Chen, Takaaki Baba	4. 巻 22
2. 論文標題 Particle Swarm Optimization for Comprehensive 24 GHz Amplifier Design	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Signal Processing	6. 最初と最後の頁 243-250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2299/jsp.22.243	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 K. Katayama, T. Baba
2. 発表標題 Auto-Encoder/Decoder for Planar Filter Analysis/Synthesis
3. 学会等名 IEICE Thailand-Japan MicroWave (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 片山光亮・馬場孝明・大澤 隆
2. 発表標題 アンテナに用いる平面バランの考察
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 片山光亮・馬場孝明・大澤 隆
2. 発表標題 プリント基板上の +8.5 dBi 2.4 GHz スタックド八木アンテナ
3. 学会等名 電気関係学会九州支部第72回連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kosuke Katayama, Takaaki Baba, Takashi Ohsawa
2. 発表標題 13.6 dBi Stacked-Yagi Antenna on A PCB for Edge Computing
3. 学会等名 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 片山 光亮, 馬場 孝明, 大澤 隆
2. 発表標題 プリント基板上のスタック八木アンテナによる動画伝送実験
3. 学会等名 映像情報メディア学会技術報告
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 片山 光亮, 馬場 孝明, 大澤 隆
2. 発表標題 プリント基板上のスタック八木アンテナによる無線クラスタ
3. 学会等名 2020年 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kosuke KATAYAMA Kui-Ting CHEN and Takaaki BABA
2. 発表標題 Parameters of Particle Swarm Optimization for 24 GHz Amplifier Design
3. 学会等名 IEICE Technical Report SC2018-13, pp. 71-76, June 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kosuke Katayama, Kiyoto Takahata, Takashi Ohsawa and Takaaki Baba
2. 発表標題 Training Dataset Synthesis for Planar Filter Circuits Learning
3. 学会等名 The 71th Joint Conference of Electrical, Electronics and Information Engineers in Kyushu, pp. 264, Sept. 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kosuke Katayama, Kiyoto Takahata, Takashi Ohsawa, Takaaki Baba
2. 発表標題 Edge Model Embedding Method for Planar Filter Synthesis
3. 学会等名 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP), pp. 502-505, March 5-7, 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------