

氏 名 Caijuan Chen

学位(専攻分野) 博士(情報学)

学位記番号 総研大甲第 2456 号

学位授与の日付 2023 年 9 月 28 日

学位授与の要件 複合科学研究科 情報学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Analysis and Optimization for Over-the-Air Federated  
Learning with Energy Harvesting

論文審査委員 主 査 計 宇生  
情報学コース 教授  
福田 健介  
情報学コース 教授  
鯉淵 道紘  
情報学コース 教授  
金子 めぐみ  
情報学コース 准教授  
董 冕雄  
室蘭工業大学 副学長  
(情報電子工学系専攻 教授)

# Summary of Doctoral Thesis

Name in full    Caijuan Chen

Title Analysis and Optimization for Over-the-Air Federated Learning with Energy Harvesting

Federated learning (FL) has attracted significant attention as a promising training framework that effectively utilizes distributed data and computational resources while addressing communication and privacy concerns. However, the communication bottleneck poses a major challenge in traditional FL systems for edge-intelligent networks, where high-dimensional model parameters need to be iteratively updated between the parameter server (PS) and local clients. This frequent back-and-forth communication during the iterative FL process leads to the issue of communication overload. To mitigate this, over-the-air (OTA) computation has been introduced for the FL system, where the PS only requires the average of local model updates instead of individual updates. The communication overhead can be reduced for OTA FL by making full utilization of the spectrum resources when clients send the gradients to PS. In addition, the privacy leakage from the client to the PS can be avoided for OTA FL since the signals received at the PS side through OTA computation are aggregated signals.

Nevertheless, local clients often have limited resources, particularly in terms of battery capacity, which can affect the convergence performance of the OTA FL system. Moreover, replacing batteries in local clients is inconvenient and labor-intensive. In most of the current studies, energy harvesting technologies have not been considered for the OTA FL system. Besides, energy harvested from the environment such as wind, solar power, and human motion can enable local clients to perform sustained training and achieve green computing. Some prior research studies have successfully applied energy harvesting techniques to wireless transmission, task offloading, and resource allocation for mobile edge computing. Different from the previous studies, we propose a novel energy-aware OTA FL system that incorporates the energy harvesting technique to supply power to local clients. Besides, the client selection and receive beamforming design are optimized to realize fast convergence for the OTA FL system under the energy constraint.

In this thesis, our objective is to apply energy harvesting techniques to the energy-constrained OTA FL system to achieve durable training, energy-efficient computation, and rapid convergence. Additionally, we aim to thoroughly investigate the impact of energy harvesting settings on the convergence performance of the OTA FL system.

To accomplish this, we first optimize client selection and energy management to achieve fast convergence in the OTA FL system with energy harvesting clients,

considering a network setting of single-input single-output (SISO) wireless channels, where each client and the PS are equipped with a single antenna. We conduct convergence analysis of the OTA FL system based on the OTA FL model, communication model, energy consumption model, and energy harvesting model. Subsequently, we formulate the client selection problem based on the convergence analysis. To solve this problem, we introduce the channel-energy-data (CED) coefficient to quantitatively characterize the influence of selecting a particular client on the convergence rate. We propose a client selection algorithm that jointly considers channel state information, residual battery capacity, and dataset size. Simulation results demonstrate that our proposed solution outperforms other comparison schemes by intelligently selecting clients according to the CED coefficient. Furthermore, the proposed solution remains superior even when the impacts of noisy channels become significant. Besides, we also evaluate the impact of design parameters on the learning performance of OTA FL.

Next, we consider the single-input multiple-output (SIMO) network setting for the OTA FL system with energy harvesting clients. We focus on optimizing client selection, receive beamforming, and energy management while incorporating transmission power control. We derive the expression of the optimality gap related to client selection and receive beamforming design and formulate a mixed-integer nonlinear programming (MINLP) problem to minimize this gap. The MINLP problem is decomposed into two sub-problems, and we develop the semidefinite relaxation method and the CED-based method to iteratively optimize the receive beamforming sub-problem and client selection sub-problem. We propose an alternative optimization method to address the decoupled sub-problems and obtain solutions to the original MINLP problem. Simulation results demonstrate the superiority of our proposed solution over other comparison schemes in various parameter settings.

In summary, this thesis focuses on enhancing the convergence of the OTA FL system. We consider the optimization of client selection, receive beamforming, and transmission power control under the energy constraint for the OTA FL system with energy harvesting clients. Simulation results show that our proposed methods outperform comparison schemes in both the SISO and SIMO network settings.

## 博士論文審査結果

Name in Full  
氏名

Caijuan Chen

Title  
論文題目  
Harvesting

Analysis and Optimization for Over-the-Air Federated Learning with Energy

本学位論文は英語で書かれており、「エネルギー採取機能を有するデバイスによる空中計算連合学習に関する研究」(和訳)と題し、全5章から構成されている。

第1章と第2章では研究の背景について紹介した。連合学習システムではIoTデバイス等による分散学習でユーザの生データの送信を回避でき、プライバシーの保護に有利である。また、無線信号のアナログ計算による空中計算(Over-the-Air Computation)は通信と計算の融合を実現する新しいメカニズムとして、連合学習に利用できる。一方、自然エネルギーで駆動されるデバイスを用いた空中計算連合学習を行う場合、クライアントと呼ばれる、分散学習を行うデバイスの選択と、送信電力制御の最適化が学習精度を確保する上で重要な課題であると説明した。

第3章では、エネルギー採取機能を有するデバイスによる空中計算連合学習システムにおいて、クライアントとモデル集約を行うサーバがともに単一のアンテナを有する場合のクライアント選択問題について述べている。まず連合学習、空中計算、エネルギー採取と消費をモデル化し、学習損失の収束性解析により、学習精度の最適化問題を数式化した。さらに、無線チャネル変動とエネルギー採取状況に適応できるオンライン問題に変換して、チャネル、エネルギーおよびデータ量を同時に考慮したクライアント選択手法を導出した。シミュレーションによる評価の結果、エネルギー利用効率を向上させながら良い学習効果が得られることを示した。

第4章では、空中計算連合学習システムにおいて、サーバ側が複数のアンテナを有する場合の受信ビームフォーミングとクライアント選択を同時に行う方法について述べた。複数アンテナの導入による学習精度の最大化はクライアント側のバッテリー容量、最大伝送電力、受信ビームフォーミングベクトル、およびクライアント選択を同時に考慮しなければならない。学習損失の収束性解析により、それを非凸の混合整数非線形計画問題として数式化した。それを解決するために、受信ビームフォーミングとクライアント選択の2つの子問題に分割して、交互最適化を行う方法を提示した。シミュレーションによる評価の結果、受信ビームフォーミングによる学習性能の向上が確かめられ、既存方式よりも優れた学習性能が得られることを示した。

最後に第5章で結論をまとめ、研究の適用範囲と将来の方向性を提示した。

公開発表会では博士論文の章立てに従って発表が行われ、その後に行われた論文審査会及び口述試験では、審査委員からの質疑に対して適切に回答がなされた。

質疑応答後に審査委員会を開催し、審査委員で議論を行った。審査委員会では、出願者の博士研究の学術レベルが十分に高く、実用的な意義も有していることが評価された。

以上を要するに本学位論文は、環境からエネルギーを採取する機能を有するデバイスによる空中計算連合学習システムにおいて、エネルギー管理、クライアント選択、および受信ビームフォーミングの最適化を通して学習性能を向上させる問題の解決方法とその有効性を示したものであり、情報通信研究分野の発展に寄与しているという点で学術的価値が大きい。また、本学位論文の成果として、情報学コースの定めるトップ国際会議論文1件とジャーナル論文1件が発表され、学術コミュニティからの評価も得ている。以上の理由により、審査委員会は、本学位論文が学位の授与に値すると判断した。