

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：14101

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K17731

研究課題名（和文）エネルギーキューイングによる無線給電情報通信ネットワークの情報通信と給電の最適化

研究課題名（英文）Energy queueing model-based optimization of information communication and power energy supply in wireless powered communication networks.

研究代表者

眞田 耕輔（SANADA, Kosuke）

三重大学・工学研究科・助教

研究者番号：30777545

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、定期的に給電基地局が配下の端末に対して給電を行い、端末の情報通信は自律的に行う給電・情報通信スケジューリング方式を提案した。給電間隔を適切に調整することにより、端末のバッテリー枯渇を回避しながら情報通信性能の向上が得られ、提案手法の有効性を確認した。また、エネルギーキューイングモデルに基づいて提案手法の動作をモデル化することで、適切な給電間隔を導出し、従来方式より高い性能が得られることを確認した。指向性アンテナと無指向性アンテナを用いたシステムへの給電の特徴を数理モデルで考慮し、ネットワークスループットの観点で両方式の優位性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、当該分野において有効な給電機会取得方法とアンテナ特性による性能との関連性を解析的に示し、無線給電情報通信ネットワークの実用化の加速に寄与できるものである。そのため、当該技術分野および社会への波及効果は十分に大きいと言える。

研究成果の概要（英文）：We have proposed a scheduling method called harvest-then-access, in which the access point supplies power energy to the terminals in the network at a constant interval, and the terminals transmit a data packet in a distributed manner. By adjusting the power supply interval appropriately, the network throughput is improved while terminal battery depletion is avoided, and the effectiveness of the proposed method has been confirmed. The appropriate power supply interval can be derived by establishing the mathematical model that considers the operation of the proposed scheduling based on the energy queuing model. The proposed scheduling's performance is confirmed to be higher than that of the conventional method. Finally, the mathematical model considers the characteristics of power supply with directional and omnidirectional antennas, and we have clarified the superiority of both schemes in terms of network throughput.

研究分野：無線通信工学

キーワード：無線給電情報通信ネットワーク 待ち行列理論 理論解析 スケジューリング

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

Society 5.0 では、接続可能な社会を実現するため、エネルギー需給が管理される IoE (Internet of Energy) 社会の実現が重要な課題となっており、その柱の一つとして、「無線電力伝送」が精力的に研究開発されている。この技術を IoT 端末で構成されるネットワークへ適用させ、電源を意識しないネットワークの実現を目指す無線給電情報通信ネットワークの研究が注目されている。無線給電情報通信ネットワークの特徴として、無線給電機能を持つ基地局が無線充電機能付の IoT 端末に給電と情報通信を行い、基地局および端末は給電・充電と情報通信を切り替えて行う。端末は給電によりバッテリーを充電、情報通信によりバッテリーを消費していくが、バッテリー内の電力が枯渇すると端末は情報通信を行えないため、ネットワーク全体の情報通信性能は劣化する。したがって、システムを安定して稼働させるためには、全体の情報伝送と給電効率の観点から適切な給電システム構成を明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、無線給電情報通信ネットワークにおいて、「基地局の給電アンテナ特性」と「IoT 端末の給電機会取得方法」がシステム性能に与える影響を解析的に明らかにしたうえで、ネットワークにおける適切な給電システム構成を示すことである。無線給電情報通信ネットワークの最大の特徴(本質的な動作)は、端末が通信によって電力を消費するだけでなく給電・充電によって電力を回復し、そのバッテリー残量がネットワークにおける情報通信頻度を決定することである。そのため、無線給電情報通信ネットワークの本質的な動作が情報通信性能に与える影響を解明するためには、情報通信と給電・充電によるバッテリー残量の変動を考慮した新たな数理モデルが必要となる。

3. 研究の方法

本研究では、IoT 端末における通信による電力消費と給電によるバッテリーの状態を待ち行列理論を用いて数理モデル化を行う。図 1(a)に、情報通信による電力消費と給電によるバッテリーの残量の状態遷移を表す「エネルギーキューイングモデル」を示す。エネルギーキューイングモデルにより、無線給電による充電と通信電力消費によるバッテリー残量の状態遷移を表現可能である。

本研究では、無線給電/充電機能を備えた IoT 端末と基地局で構成されるネットワークを対象とし、基地局の給電アンテナ特性と IoT 端末の給電機会取得方法のそれぞれの情報通信のスループット特性を、エネルギーキューイングを用いて明らかにしたうえで、適切なシステム構成を示す。

本研究を達成するために、研究フェーズを研究対象とするネットワーク環境ごとに分け、それぞれのフェーズにおいて 基地局の給電アンテナ特性と IoT 端末の給電機会取得方法とシステム性能との関係を明らかにする。

フェーズ 1: 理想環境を想定したネットワークにおける振舞いの解明

フェーズ 1 では、基地局・端末間距離や端末のトラフィック特性を理想化した環境において、基地局の給電アンテナ特性および 端末の給電機会取得方法の本質と情報通信のスループット特性に与える影響を明らかにする。エネルギーキューイングを拡張することにより、 と による特性を解明する。

フェーズ 2: 現実の環境を想定したネットワークにおける振舞いの解明

フェーズ 2 では、より現実的なシステムの振舞いを明らかにするために、フェーズ 1 において理想化していた項目を考慮し、位置特性およびトラフィック特性が異なる端末が混在するネットワーク環境化におけるシステム性能を明らかにしたうえで、適切なシステム構成を示す。

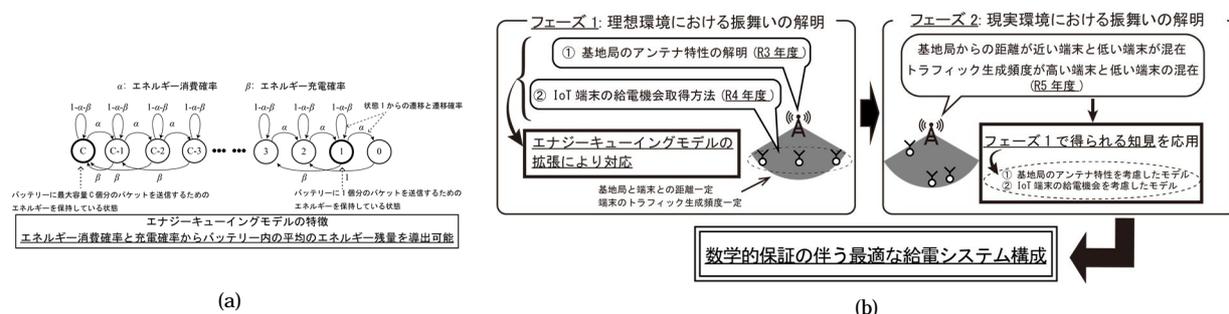


図 1 (a) エネルギーキューイングモデル, (b) 本研究の研究フロー

4. 研究成果

WPCN におけるスケジューリング方式として、HAP が集中管理的に給電・情報送信スケジューリングを行う方式が提案されている。集中管理的な手法では、スケジューリングのため通信（オーバーヘッド）が必要となるため、端末台数の多いネットワークでは、これらのオーバーヘッドがシステム性能劣化の要因となり得る。一方、端末が自律分散的に給電・情報送信のスケジューリングを行う方式も提案されている。自律分散型スケジューリング方式では、各端末がバッテリー残量に応じて自身への給電要求を HAP に対して行う。このとき、制御信号（フレーム）等の通信が端末と HAP 間で行われる。自律分散型スケジューリングの利点として、端末のバッテリー残量状態に応じて柔軟に給電を行うことができるため、バッテリーの枯渇を回避しやすい。一方で、自律分散型スケジューリングでは、HAP がネットワーク全体に対して行う給電の頻度は、各端末の給電要求に依存するため、システム全体の給電頻度の制御は困難となる。そのため、過度な給電による情報通信性能（スループット）の劣化を招く。そこで、両手法の欠点を補う方式として、一定間隔で HAP が給電を行い、基地局の配下にある端末は自律分散的に情報送信を行う Harvest-then-Access 型スケジューリングを提案した。図 2 に、Harvest-then-Access 型スケジューリングにおけるフレーム構成を示す。Harvest-then-Access 型スケジューリングにおけるフレームは、給電期間(WET duration)と情報通信期間(WIT duration)で構成される。まず、給電期間において基地局は配下の端末に対して給電を実施する。そこで、蓄えられた電力を用いて後続の情報通信期間において、端末は自律的なチャネルアクセスを行い、情報通信を行う。これにより、情報通信スケジューリングのためのオーバーヘッド通信をなくすことが可能となる。同時に、ネットワーク全体の給電頻度を基地局側で制御することで、過度な給電要求に起因する情報通信性能劣化を回避することで可能となる。

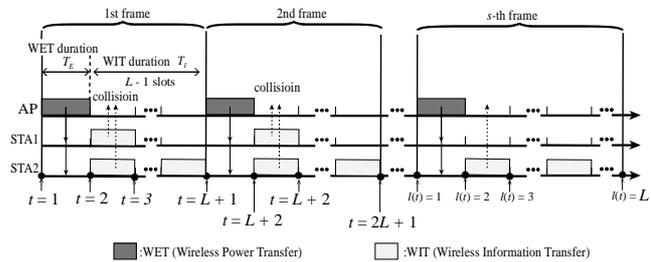


図 2 Harvest-then-Access型スケジューリング

一方、この提案手法において、給電や情報通信のためのオーバーヘッドを必要とせず、過度な給電およびバッテリー枯渇を回避しながらシステム性能の向上を得るためには、適切な時間間隔での給電が求められる。この給電間隔の最適化を行うため、エネルギーキューイングモデルに基づいて、システムの振舞いの数理モデル化を行なった。図 3 に、Harvest-then-Access 型スケジューリングの動作を考慮したエネルギーキューイングモデルを示す。図 3 における状態 (i, k) はそれぞれ、バッテリー残量 (i) とフレーム先頭からのスロット経過時間 (k) を示す。このように、フレーム構成とその時間経過を考慮することで、任意の給電間隔の振舞いを数理モデル上で表すことが可能となる。このモデルからシステムが定常状態における端末の情報送信確率を求め、最終的に任意の給電間隔における Harvest-then-Access 型スケジューリングを用いた情報通信性能を計算により導出することが可能となる。

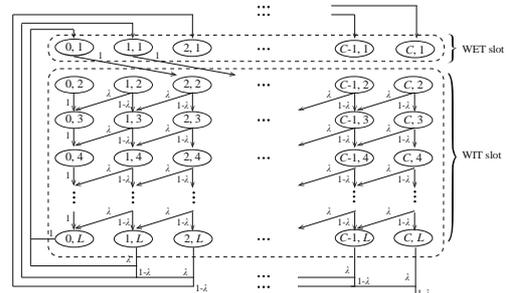


図 3 Harvest-then-Access型スケジューリングの動作を考慮したエネルギーキューイングモデル

図 4 に、提案手法における給電間隔に対するスループット特性を示す。図 4 には、解析モデルおよび計算機シミュレーションから得られた結果を掲載している。解析モデルから得られた結果はシミュレーションから得られた結果と定量的に一致しており、解析モデルの妥当性が確認できる。給電間隔が狭い場合は、ネットワーク上で過度な給電となってしまう、情報通信性能が劣化する。一方、給電間隔が広すぎた場合、バッテリー内の電力枯渇が発生する端末があらわれ、情報通信性能が劣化する。そのため、情報通信性能が最大となる給電間隔が、枯渇による電力消費と給電による電力回復のバランスが取れた適切な給電間隔である。この適切な給電間隔を解析モデルから計算により求め、その適切な給電間隔で Harvest-then-Access 型スケジューリングを動作させることにより、従来方式より高い性能が得られる。

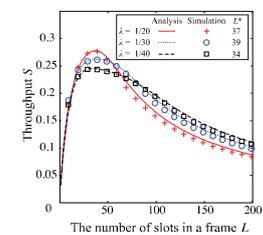


図 4 提案手法の給電間隔に対するスループット特性

図 5 に自律分散型スケジューリングとの性能比較を示す。図 5 の評価では、基地局と端末間の距離は全て等しいとして、基地局と端末間の距離の違いによる獲得給電量と情報通信による電力消費費を理想化している。図 5 より、従来型のスケジューリング方式よりも提案方式は高いスループット性能が得られることが確認できる。提案方式の有効性を確認した。

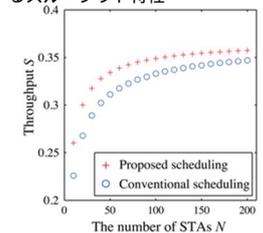


図 5 端末台数に対するスループット (基地局と端末間距離を理想化)

次に、基地局から近傍に配置された端末と遠方に配置された端末が混在するネットワークを想定環境として、提案方式の評価を行った。無線給電情報通信ネットワークでは、基地局から遠方の端末ほど基地局からの獲得できる給電電力量が少なく、情報通信のための電力消費が大きいと電力の消費および獲得という点で、二重苦が強いられる(Double-near-far問題)。遠方端末のバッテリー枯渇を回避しながら、ネットワーク全体のスループットの向上が得られるスケジューリングが求められる。遠方端末と近傍端末とでの、電力の消費および獲得電力量の違いは、エナジーキューイングモデルにおける状態遷移先をそれぞれ変更することで、容易に考慮することが可能である。このDouble-near-far問題の影響を考慮した評価環境での従来手法と提案手法の比較を図6に示す。図6より、端末台数が少ないときは従来手法の方が提案手法より性能が高いが、端末台数が多いネットワークにおいては提案手法の方が高い性能が得られることが確認できる。この理由として、従来手法では端末台数が多くなるにつれて遠方端末からの給電要求が頻繁となり、遠方端末のバッテリー枯渇を防ぐために頻繁に給電を行う必要があり、その結果情報通信の機会が削がれているためである。提案手法は、遠方および近傍端末で同等のスループットが得られる給電間隔(頻度)で給電を行うため、端末台数が増えたとして高い性能が得られる。

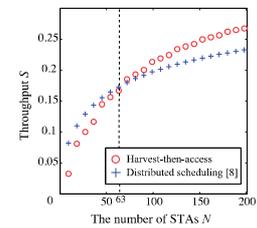


図6 端末台数に対するスループット (Double-near-farを考慮)

本研究成果は国際会議で発表し、論文誌へ採録済みである。給電機会取得方法に関して、基地局と端末間の距離を理想化した条件での評価と、基地局からの近傍端末と遠方端末が混在するネットワークでの性能評価を行い、適切な給電方針を数理的に示した。

基地局の給電アンテナ特性と当該ネットワークの性能との関連性の解明に着手した。無指向性のアンテナを用いた給電では、基地局から全方向への給電することで、ネットワーク全体に対して給電を行う。一方で、ネットワーク全体に対して給電を行うことで、バッテリー内の電力が十分にある端末に対しても給電を行うことになる。バッテリー容量以上の電力は充電されないことから、実質的にその給電に費やしたエネルギーが無駄となる。また、遠方に配置されている端末のように、真に給電を必要としている端末に対して十分な給電を行うことができないことが想定される。指向性アンテナを用いて給電を行うと、給電エネルギーを一方向へ集中させることで、真に給電を必要としている端末に対して大きな電力量の給電が可能となる。一方、給電を必要としている端末を基地局が把握する必要があり、給電のためのオーバーヘッド通信が求められる。これらの給電アンテナ特性とネットワークの情報通信性能との関連性を「エナジーキューイングモデル」を用いて明らかにする。

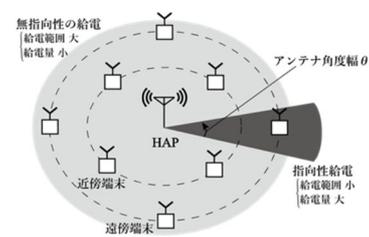


図7 給電アンテナ特性を考慮したシステムモデル

無指向性アンテナと指向性アンテナのネットワークへの給電特性の違いは、「給電対象となる端末」と「給電での獲得電力量」である。これらを数理モデルで同時に考慮するために、図8に示すエナジーキューイングモデルを新たに考案した。図8のエナジーキューイングモデルでは、指向性アンテナによる獲得する給電と、オーバーヘッド通信による電力消費に関する遷移が考慮されている。給電要求が成功し指向性の給電が行われる確率を数式として表すことで、指向性アンテナによる特徴をモデル内で考慮することが可能となる。

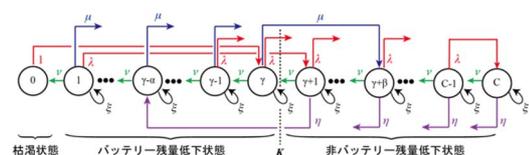


図8 指向性アンテナによる給電を考慮したエナジーキューイングモデル

図9は無指向性アンテナおよび指向性アンテナを用いたネットワークのスループットの比較を示す。端末台数が少ないネットワークにおいては指向性給電の方が無指向性給電の方が高いスループットが得られるが、端末台数が増えていくと無指向性給電の方が高いスループットが得られることが確認できる。

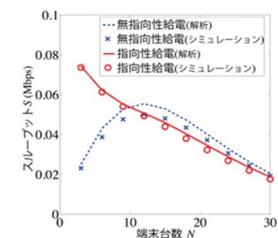


図9 無指向性給電と指向性給電の性能比較

無指向性の給電ではネットワーク上の全端末を給電対象としているため、端末台数が多いネットワークにおいては全体に対して給電を行なった方が、一度の給電実施により実質的に全端末が獲得する総電力量は向上し、結果的にネットワークにおける給電効率が向上する。指向性給電と無指向性給電の優位性が逆転するようなネットワークの端末台数(密度)は、獲得給電電力量と消費電力量のパラメータに依存する。解析モデルにおいて、これらのパラメータの任意値の組み合わせでの計算が可能である。

本研究は、当該分野において有効な給電機会取得方法とアンテナ特性による性能との関連性を解析的に示し、無線給電情報通信ネットワークの実用化の加速に寄与できるものである。そのため、当該技術分野および社会への波及効果は十分に大きいと言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 岩城敦大, 眞田耕輔, 羽多野裕之, 森 香津夫	4. 巻 vol. 121, no. 433, NS2021-144
2. 論文標題 Harvest-then-Access型スケジューリングに基づく無線給電情報通信ネットワークにおけるDouble-near far 問題を考慮した性能解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会	6. 最初と最後の頁 129-134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 伊藤立樹, 岩城敦大, 眞田耕輔, 羽多野裕之, 森 香津夫	4. 巻 vol. 122, no. 453, CCS2022-75
2. 論文標題 無線給電情報通信ネットワークにおける給電要求通信を考慮した性能解析	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電子情報通信学会 複雑コミュニケーションサイエンス研究会	6. 最初と最後の頁 69-74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Iwaki Atsuhiko, Sanada Kosuke, Hatano Hiroyuki, Mori Kazuo	4. 巻 -
2. 論文標題 Performance Analysis of Harvest-then-Access Protocol for Wireless Powered Communication Network	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceeding of 2023 IEEE 20th Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)	6. 最初と最後の頁 555-560
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CCNC51644.2023.10060293	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Iwaki Atsuhiko, Sanada Kosuke, Hatano Hiroyuki, Mori Kazuo	4. 巻 11
2. 論文標題 Markov-Chain Based Performance Analysis and Evaluation of Harvest-Then-Access Scheduling for Wireless Powered Communication Network	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 66497 ~ 66505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2023.3289592	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 伊藤立樹, 眞田耕輔, 羽多野裕之, 森 香津夫	4. 巻 vol. 123, no. 307, NS2023-156
2. 論文標題 指向性給電を用いた無線給電情報通信ネットワークにおけるエネルギーキューイングモデルに基づく性能解析	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会	6. 最初と最後の頁 175-180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 岩城敦大, 眞田耕輔, 羽多野裕之, 森 香津夫	4. 巻 vol. 121, no. 102, NS2021-51
2. 論文標題 定間隔無線給電情報通信ネットワークにおけるエネルギーキューイングモデルを用いたスループット解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会	6. 最初と最後の頁 94-99
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 岩城敦大, 眞田耕輔, 羽多野裕之, 森 香津夫
2. 発表標題 Harvest-then-Access型スケジューリングに基づく無線給電情報通信ネットワークにおけるDouble-near far 問題を考慮した性能解析
3. 学会等名 電子情報通信学会 複雑コミュニケーションサイエンス研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤立樹, 岩城敦大, 眞田耕輔, 羽多野裕之, 森 香津夫
2. 発表標題 無線給電情報通信ネットワークにおける給電要求通信を考慮した性能解析
3. 学会等名 電子情報通信学会 複雑コミュニケーションサイエンス研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Atsuhiko Iwaki, Kosuke Sanada, Hiroyuki Hatano, Kazuo Mori
2. 発表標題 Performance Analysis of Harvest-then-Access Protocol for Wireless Powered Communication Network
3. 学会等名 2023 IEEE 20th Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩城 敦大, 眞田 耕輔, 羽多野 裕之, 森 香津夫
2. 発表標題 定間隔無線給電情報通信ネットワークにおけるエナジーキューイングモデルを用いたスループット解析
3. 学会等名 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩城 敦大, 眞田 耕輔, 羽多野 裕之, 森 香津夫
2. 発表標題 無線給電情報通信ネットワークにおける給電・情報通信スケジューリングの提案とその性能解析
3. 学会等名 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤立樹, 岩城敦大, 眞田耕輔, 羽多野裕之, 森 香津夫
2. 発表標題 指向性給電を用いた無線給電情報通信ネットワークにおけるエナジーキューイングモデルに基づく性能解析
3. 学会等名 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会
4. 発表年 2023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
---------	---------