

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04390

研究課題名(和文) エネルギーハーベスティングを用いた異種無線センサネットワークの数理モデルの構築

研究課題名(英文) Development of Energy/link budget model for heterogeneous wireless sensor networks

研究代表者

佐々木 重信 (Sasaki, Shigenobu)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：20242399

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)：異種無線センサネットワーク(WSN)が混在する状況で、RFエネルギーハーベスティング(RF-EH)機能による周辺の無線端末の電波からエネルギーの獲得による情報伝送の信頼性と動作寿命の両立を可能とするためのエネルギー収支および回線収支解析の理論的基盤の構築を試みた。センサ端末(ST)/中継端末(RT)/基地局(受信端末:BS)から成るMIMO中継伝送における情報伝送/エネルギー収支モデルを構築し、STからRTへの伝送においてCSMA/CAなどの各種プロトコルを考慮したSTの運用持続時間を評価し、また運用持続時間に関する周辺の無線端末(ES)のからのRF-EHの有効範囲を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を通して、無線センサネットワーク(WSN)において、RFエネルギーハーベスティング(RF-EH)機能により周辺の無線端末の電波からエネルギーの獲得し、情報伝送の信頼性と動作寿命の長期化を両立させるための理論的基盤が構築できた。今後、IoT(モノのインターネット)の拡大により社会の至る場面でデータ収集を行うWSNの展開が想定され、本研究の成果はその普及促進の一助となることが期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this project, we attempted to develop a theoretical basis for energy budget and link budget analysis model to enable both reliable information transmission and operational lifetime by acquiring energy from the radio waves of surrounding wireless terminals through RF energy harvesting (RF-EH) functionality in heterogeneous wireless sensor networks (WSN) scenario.

An information transmission/energy budget model has been developed for MIMO relay transmission consisting of a sensor terminal (ST), relay terminal (RT), and base station (receiving terminal: BS). Effective range of RF-EH from surrounding wireless terminals (ES) regarding operational duration was clarified. We also evaluated the operational lifetime of various transmission protocols such as CSMA/CA, etc.

研究分野：情報通信工学

キーワード：センサネットワーク エネルギーハーベスティング リレー伝送 エネルギー収支 プロトコル MIMO

1. 研究開始当初の背景

無線センサネットワーク(WSN)は、IoT実現のコア技術として位置づけられ、自然現象の監視、建造物の管理、ヘルスケアなど多種多様な応用が期待されている。その普及に伴い図1に示すように、多数の無線通信端末が用途ごとに異なる構成で情報を伝送する WSN (異種 WSN) が同じようなエリアや周波数帯に展開されることが予想される。その場合、各無線端末へは同一あるいは異種 WSN の無線端末からの電波が干渉となりうる。これは情報伝送の信頼性の低下、および伝送データの欠落や再送を招き、それがもとで無線端末に余計な電力消費につながる。その結果として無線端末やそれにより構成される WSN の長期運用にマイナスとなる。

一方、電波や光、振動などからエネルギーを獲得するエネルギーハーベスティング (EH) の無線伝送への利用が注目されている。これまで我々は、WSN の一つの構成要素となる無線中継伝送に電波からエネルギーを獲得する RF エネルギーハーベスティング(RF-EH)の導入を提唱 (2012, IEEE Communication Letters) し、その有効性を示すとともに、データ伝送と RF-EH を簡易に切替える手法を示してきた (2015, IEEE Trans. on Commun.)。

WSN では個々の無線端末は間欠的に (例えば数十分に1回、数秒程度) データを送信し、それ以外は休止または待機状態となる。図1に示すように、ある無線端末の近くにあり、間欠的に電波を発している別の WSN の無線端末も通信では干渉となる。一方でこれをエネルギー源と捉えて RF-EH 機能を無線端末に導入すれば、図2に示すように、データ伝送の合間に電源容量を回復し、無線端末の運用寿命を飛躍的に延ばせる可能性がある。これにより長期間にわたり持続的な運用が可能な「サステナブル (持続可能な) WSN」が実現できる。

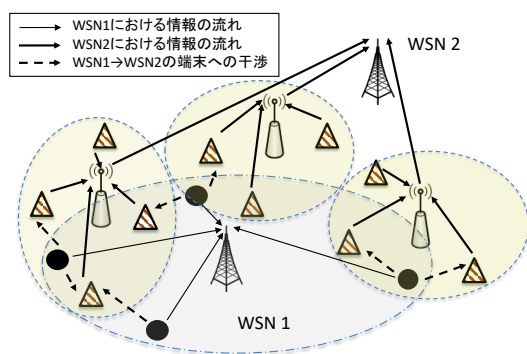


図1 異種 WSN の混在イメージ

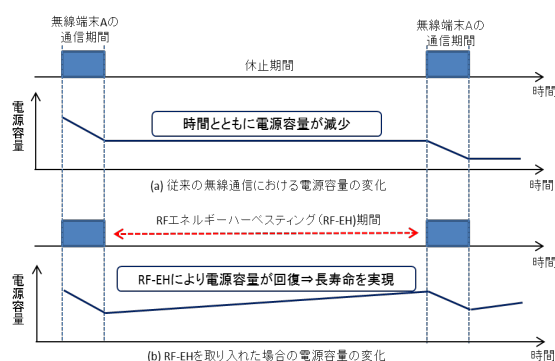


図2 WSN の無線端末における電源容量の変化

2. 研究の目的

本研究では前述した背景のもとで異種の WSN が混在する状況で、RF-EH 機能を無線端末に備えることで周辺の無線端末からの電波からエネルギーを獲得し、WSN における情報伝送の信頼性を確保しつつ動作寿命を飛躍的に延ばすことを狙いとする。そのために WSN におけるエネルギー収支および回線収支解析の理論的基盤を構築し、それを通して RF-EH の導入による異種 WSN の長寿命化の可能性とその条件を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

前節で示した目的に基づき、その可能性を示すために以下の点に取り組んだ。数理モデルの妥当性などの評価は計算機シミュレーションにより行った。

- (1) 無線中継伝送における情報伝送/エネルギー収支モデルの構築
 - 送信端末 (ST) / 中継端末 (RT) / 基地局 (BS: 受信端末) を持つ中継伝送モデルについて
 - ST および RT における通信期間での電力消費を考慮したエネルギー収支の数理モデルの構築
 - ST→RT→BS への情報伝送における回線収支解析モデルの構築
- (2) 1 台の RT に多数の ST が接続する場合について、以下の項目に取り組んだ。
 - 各 ST の RF-EH 期間を考慮したエネルギー収支モデルの構築
 - ST→RT のアクセス方式の違いによる情報伝送の信頼性と運用継続時間の評価
- (3) 複数の近接無線端末からの干渉のモデル化について、以下の項目に取り組んだ。
 - 周辺にある他の無線端末からの到来電波に関して最低受信感度を考慮した周囲からの干渉の影響のモデル化及び RF-EH における最低動作レベルや変換効率を考慮したエネルギー収支モデルの構築
- (4) RF-EH 機能を持つ複数の中継端末による中継伝送について、中継端末におけるエネルギー収支解析モデルと ST→RT→BS への情報伝送における回線収支解析モデルの構築に取り組んだ。

4. 研究成果

本研究を通し、主に次のような成果が得られた。

(1) 無線情報/電力伝送 (Simultaneous wireless information and power transfer: SWIPT) による中継伝送において、多数の送信端末(ST)の中継を行う中継端末(RT)が複数のアンテナとRF-EH機能を備えることにより、データ伝送とエネルギー伝送を同時に行う手法を検討した。RTは、アンテナ切り替え(AS)によりデータ伝送用とエネルギー伝送用にアンテナを割り振ることでSWIPTリレー伝送を行う。RTから基地局(BS)へは複数アンテナによるMIMO伝送を想定し、STの数やRTが使用するアンテナ本数や切り替え手法の違いが通信品質に与える影響をOutage確率の評価により明らかにした。

(2) センサ端末におけるデータ伝送とRF-EHのエネルギー収支モデルを構築し、周囲の複数のエネルギー源とみなせる無線端末(ES)の電波からセンサ端末へ有効なRF-EHが行える範囲を、エネルギー獲得しきい値を考慮したエネルギー収支の評価を通して明らかにした。この際にセンサ端末(ST)から中継端末(RT)への伝送パケットの廃棄により起こる再送により生じる付加的なエネルギー消費も考慮した。STから異なる距離にある2つのESからのRF-EHを考慮した場合の運用持続時間を求め、最も近いESの距離と、より遠い距離にあるESとの距離比に対するRF-EHの有効範囲を明らかにした。

(3) Detcted and Forward(DetF)による複数の中継端末を切り替えるリレー伝送を想定し、中継端末のバッテリー残量によりリレー伝送を行う中継局を切り替え、それ以外の中継端末でRF-EHを行う手法について、伝搬損失とライスフェージング環境を考慮した場合のEH時間ならびに中継局数に対するOutage確率を評価した。また干渉源となる無線端末の存在が通信面とRF-EHの面で中継端末に与える影響に関する理論モデルを構築し、それを元に中継局と干渉端末の距離に対するOutage確率と持続時間の評価を通してその影響を明らかにした。これにより中継局数の増加による性能の改善効果を示した。図3に示すRF-EH機能を持つ中継局による複数のセンサ端末からのMIMOリレー伝送(タイムチャート例を図4に示す)を行う手法について、シングルストリーム伝送とマルチストリーム伝送における他の無線局からの干渉がOutage確率やシステム持続時間に与える影響を明らかにした。結果の例を図5~図8に示す。

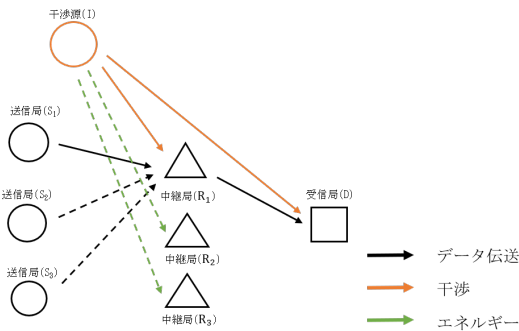


図3 システムモデル

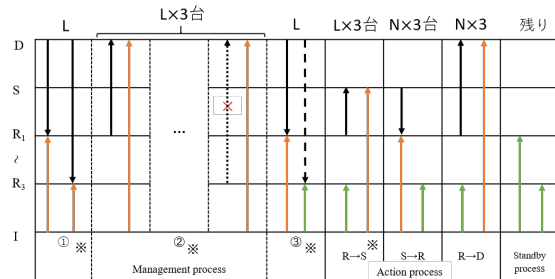


図4 タイムチャート例

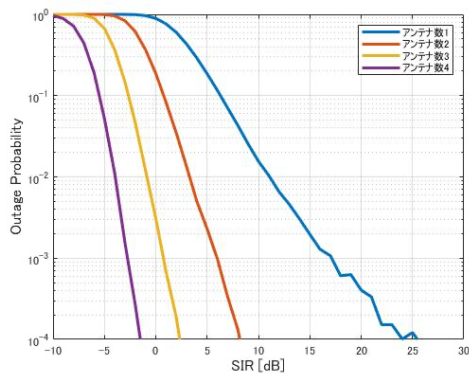


図5 outage 確率(シングルストリーム伝送)

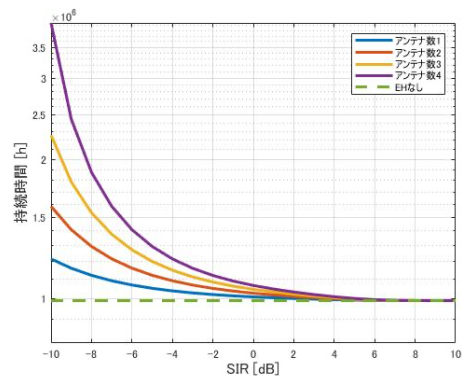


図6 持続時間(シングルストリーム伝送)

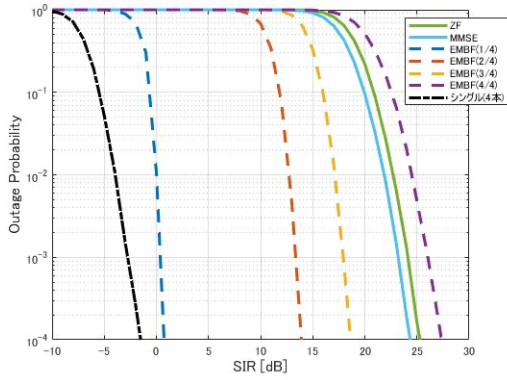


図 7 outage 確率(マルチストリーム伝送)

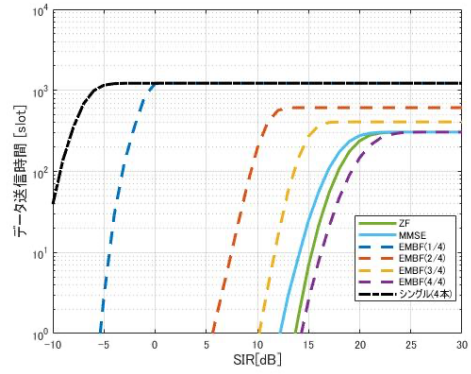
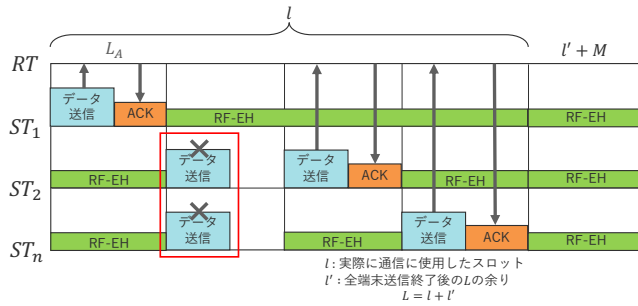
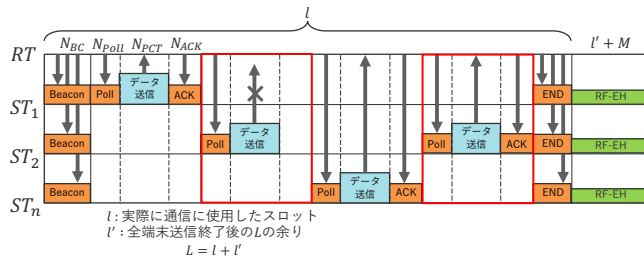


図 8 データ送信時間(マルチストリーム伝送)

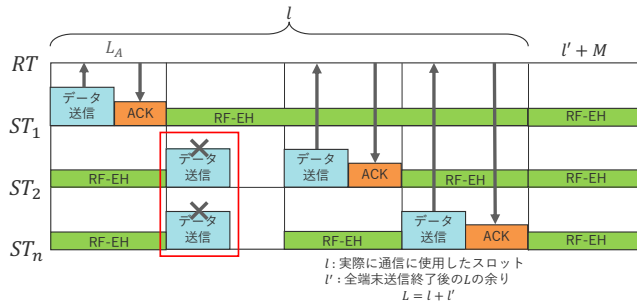
(4) センサ端末(ST)から中継端末(RT)への伝送について、図 9 に示す RF-EH を考慮した場合のランダムアクセス型プロトコル (Slotted ALOHA) とポーリング型プロトコル (Point Coordination with Energy Harvesting: PCEH)、及び CSMA/CA プロトコルについて運用持続時間の評価を行い、ST の端末数に対する各種プロトコルの優劣を明らかにした。一般的な WSN モデルを考慮し、ST から RT への伝送に CSMA/CA などの各種プロトコルについて RF-EH を考慮した場合の ST の運用持続時間を評価しその優劣を明らかにした。結果の例を図 10 に示す。



(a) Slotted ALOHA



(b) PCEH



(c) CSMA/CA

図 9 各プロトコルにおけるタイムチャート

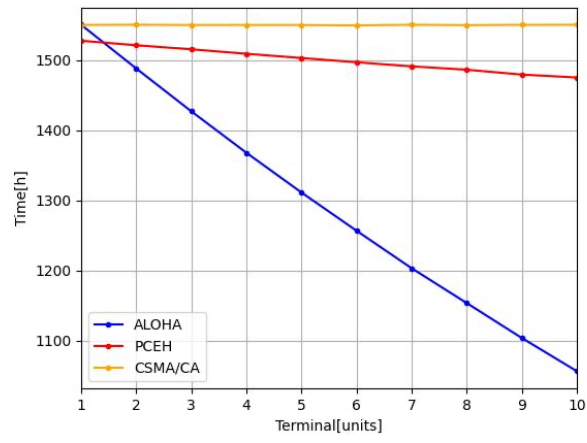


図 10 送信端末数に対する持続時間の例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 佐々木重信・齋藤瑞奈 | 4. 巻 vol. 122, no. 83 |
| 2. 論文標題 Wireless Powered伝送システムにおける通信プロトコルに関する一検討 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告 | 6. 最初と最後の頁 6-9 |
| 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 林 啓太・佐々木重信 | 4. 巻 vol. 122, no. 277 |
| 2. 論文標題 干渉を考慮したマルチユーザWireless Powered MIMOリレー伝送システムの一検討 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告 | 6. 最初と最後の頁 13-18 |
| 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 佐々木重信・猪股利弘 | 4. 巻 vol. 121, no. 70 |
| 2. 論文標題 Wireless Poweredリレー伝送プロトコルに関する一検討 | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告 | 6. 最初と最後の頁 39-41 |
| 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 中村健志, 佐々木重信 | 4. 巻 120 |
| 2. 論文標題 Wireless Poweredリレー伝送における中継局数の影響について | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告 | 6. 最初と最後の頁 13,17 |
| 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 熊澤隼斗, 佐々木重信 | 4. 巻 vol.119, No.73 |
| 2. 論文標題 マルチユーザ SWIPT MIMO リレー伝送におけるユーザ数の影響 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告 | 6. 最初と最後の頁 1-6 |
| 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7件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 佐々木重信・猪股利弘 |
| 2. 発表標題 Wireless Poweredリレー伝送プロトコルに関する一検討 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会短距離無線通信 (SRW) 研究会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 桑名 遼・佐々木重信 |
| 2. 発表標題 Wireless PoweredセンサネットワークにおけるRF-EHの有効範囲に関する検討 |
| 3. 学会等名 革新的無線通信技術に関する横断型研究会(MIKA2021) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 桑名透, 佐々木重信 |
| 2. 発表標題 Wireless Powered伝送における有効な RF-EH 範囲に関する一検討 |
| 3. 学会等名 2020年度電子情報通信学会ソサイエティ大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 中村健志, 佐々木重信 |
| 2. 発表標題 Wireless Poweredリレー伝送における中継局数の影響について |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会短距離無線通信研究会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 佐々木重信 |
| 2. 発表標題 Wireless Powered Communicationsをめぐる現状と課題 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会短距離無線通信研究会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 佐々木重信, 熊澤隼斗 |
| 2. 発表標題 マルチユーザSWIPT MIMOリレー伝送システムの特性評価 |
| 3. 学会等名 2019年革新的無線通信技術に関する横断型研究会(MIKA2019) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 佐々木重信, 熊澤隼斗 |
| 2. 発表標題 マルチユーザSWIPT MIMOリレー伝送システムの特性評価 |
| 3. 学会等名 超知性ネットワーキングに関する分野横断型研究(RISING2019) |
| 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 |
|---------|---------|
|---------|---------|