

令和元年6月9日現在

機関番号：25301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06363

研究課題名(和文) エネルギーハーベスト技術を利用するコグニティブ無線の安定性解析と安定化手法の設計

研究課題名(英文) Performance of Cognitive Radio Networks with Energy Harvesting Nodes

研究代表者

榊原 勝己 (Sakakibara, Katsumi)

岡山県立大学・情報工学部・教授

研究者番号：10235137

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)：端末周辺の環境からエネルギーを獲得するエネルギーハーベスト技術を利用した端末を2次的ユーザとするコグニティブ無線ネットワークにおいて、2次的ユーザがスロット付アロハ方式を利用する場合の性能を解析した。一定の仮定の下では、2次的ユーザは、保持しているデータ・パケットの送信失敗回数とエネルギー・パケット数を要素とする2次元マルコフ連鎖としてモデル化することができる。このモデルにより、時間スロット内でデータ・パケットを送信している2次的ユーザ割合に関する不動点方程式を立て、古典的なスロット付アロハ方式と同様、双安定性を示すことを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無線周波数(通信資源)は有限である反面、無線通信を利用する情報は日々増加している。このとき、通信資源の空きを活用するコグニティブ無線、端末周辺の環境からエネルギーを獲得するエネルギーハーベスト技術、スロット付アロハ方式に代表されるMACプロトコルは、増加する情報を収容するために重要な要素技術である。本研究の成果により、スロット付アロハ方式に限定されるものの、このような無線ネットワークの性能を評価するツールを提供することができる。

研究成果の概要(英文)：We investigate performance of secondary users with energy harvesting techniques in cognitive radio networks. Slotted ALOHA is supposed as a medium access control protocol of secondary users. Under certain assumptions, a secondary user can be modeled by a 2-dimensional Markov chain. Using the 2-dimensional Markov chain, we can formulate a fixed point equation with respect to the ratio of secondary users which actually transmit their data packet. Numerical results show that a bistable behavior can be observed in slotted ALOHA consisting of secondary users with energy harvesting techniques in cognitive radio networks to classical, similarly slotted ALOHA.

研究分野：通信工学

キーワード：コグニティブ無線 エネルギーハーベスト技術 ランダムアクセスプロトコル スロット付アロハ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

インターネットを活用した IoT (Internet of Things) /M2M (Machine-to-Machine) 通信システムに向けた需要が高まっている。これに並行して、無線センサーネットワークあるいは無線アドホックネットワークでは、エンドユーザからインターネットまでの通信網、あるいは自律した M2M 通信網としての重要性が増している。これらの無線ネットワークの効率向上に向け、(1)空チャネル時間を利用するコグニティブ無線ネットワーク技術、(2)環境発電を行うことで端末をバッテリーレスにするエネルギーハーベスト技術に関する研究が活発に行われている。両技術を備えている、エネルギーハーベスト技術を利用するコグニティブ無線ネットワーク(以下、"CRN+EH"と略記する)に関しては、物理層からのみでなく、MAC 層における設計、評価も重要なポイントであり、例えば、端末のスループット最適化問題が

A) D.T.Hoang, D.Niyato, P.Wang and D.I.Kim, "Performance optimization for cooperative multiuser cognitive radio networks with RF energy harvesting capability," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol.14, no.7, pp.3614-3629, July 2015

で議論されている。エネルギーハーベスト技術の有無にかかわらず、コグニティブ無線ネットワークでは、1 次的ユーザの空チャネル時間を利用する 2 次的ユーザは、不特定多数となることが想定され、今後のパケット通信要求の急増により、その傾向は一層強まるものと予想される。このため、MAC 層におけるランダムアクセス方式の設計は不可欠である。その性能は、一義的にはスループット、パケット伝送遅延時間により評価される。しかし、ランダムアクセス方式が双安定性を示す(2 個の安定平衡点を有する)ことは 1970 年代より知られている。このため、CRN+EH における安定性解析あるいは安定化手法の設計は、急増するユーザ要求を CRN+EH に収容するために不可欠である。CRN+EH の安定性は、例えば、

B) R.Amer, A.A.El-Sherif, H.Ebrahim and A.Mokhtar, "Cooperative cognitive radio network with energy harvesting: Stability analysis," arXiv: 1509.04110, September 2015

において、2 次的ユーザ数を 2 個に限定した下で議論されている。今後は、ランダムアクセス方式の安定性解析に用いられてきた手法が、CRN+EH にも適用可能かを見極めた上で、不特定多数の 2 次的ユーザを想定した CRN+EH の安定性を解析しなければならない。また、双安定性あるいは不安定性を示すのであれば、安定化するための手法設計は必要不可欠なものである。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、CRN+EH に対する適切な数理モデル化を行い、(1) 1 次的ユーザのトラヒック関連パラメータ(無線通信路利用率、バースト性など)、(2) 2 次的ユーザのトラヒック関連パラメータ(メッセージ到着率/サービス率、バースト性、送信確率、再送回数制限など)、(3) 供給エネルギー関連パラメータ(到着率/消費率、環境発電元(1 次的ユーザ・トラヒックの受信電力あるいは太陽光等の独立電源)など)等に関する関数としての定式化した上で、CRN+EH の安定性を解析し、各パラメータの変動に対しても安定的な 2 次的ユーザの通信を行うための安定化手法を設計することを目的とする。

### 3. 研究の方法

下記 2 点に着眼し、一体的に研究を進めた。

#### (1) 数理モデルの構築(平成 28 年度~平成 29 年度前期)

待ち行列理論(特に、1 次的ユーザ利用時、2 次的ユーザは送信できないという意味での無駄時間系)等を利用して、CRN+EH の数理モデル化を行った。CRN+EH の構成要素(1 次的ユーザ・トラヒック、2 次的ユーザ・トラヒック、供給エネルギー)をモジュール化することで、様々な通信環境設定に適用できるに配慮した。前述の各種パラメータの関数としての安定性評価関数を導出し、安定平衡点に関する解析、安定平衡点における CRN+EH の性能(スループット、伝送遅延時間等)を近似的に求めた。そして、1 次的ユーザあるいは 2 次的ユーザのトラヒック変動、エネルギー供給環境の変動による CRN+EH 動作点を追尾し、安定的な動作を保証する安定化手法の設計を行った。

#### (2) 計算機シミュレーションによる検証(平成 29 年度後期~平成 30 年度)

数理モデルによる安定性解析結果および安定化手法に対して、計算機シミュレーションによる精度の検証を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 数理モデルの構築

数理モデル構築に際し、次の条件を課した。

N 個の 2 次的ユーザ(以下、端末と呼ぶ)がスロット付アロハに従って、単位長データ・パケットを送信する。

通信路誤り、捕捉効果を無視できる。すなわち、データ・パケットの同時送信による衝突が発生しなければ、データ・パケットは正しく受信される。

各端末のデータ・バッファおよびエネルギー・バッファの容量は、それぞれ、1 データ・パケットおよび E エネルギー・パケットである。

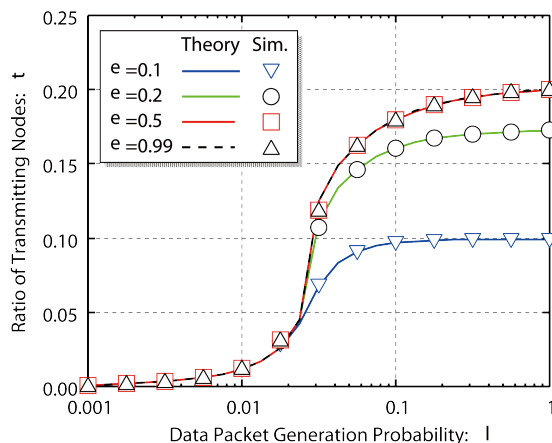
各端末において、時間開始時に、データ・パケットはスロット確率  $\lambda$  で発生し、エネルギー・パケットは確率  $e$  で発生する。

各端末は、データ・パケットおよび1個以上のエネルギー・パケットを保持している場合、データ・パケットを確率  $p$  で送信し、エネルギー・パケット1個を消費する。

同一データ・パケットの再送は、 $L$  回までに制限され、 $L$  回すべての再送に失敗したデータ・パケットは廃棄される。

これにより、各端末は、データ・バッファ内のデータ・パケットの失敗回数と、エネルギー・バッファ内のエネルギー・パケット数を状態とする2次元マルコフ連鎖によりモデル化することができる。

これにより、データ・パケットを送信している端末割合  $t$  に関する、不動点方程式を導出することが可能となる。

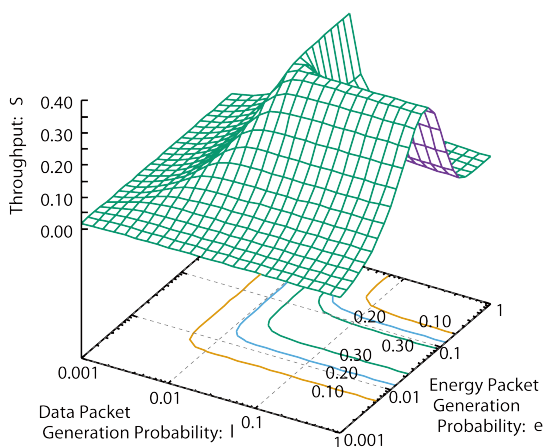


## (2) 精度の検証

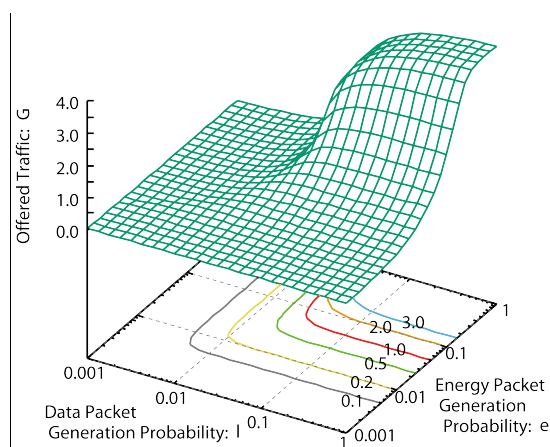
その結果、右図に示すように、不動点方程式に対する数値解析結果と、計算機シミュレーション結果は、十分な精度で一致することがわかった。

## (3) 数値結果

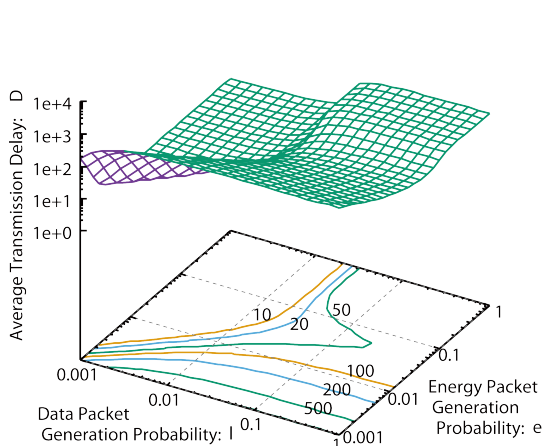
導出した不動点方程式に対する数値解析結果を用いて、スループット、負荷トラヒック、データ・パケットの平均伝送遅延時間、データ・パケットの廃棄確率を求めた。データ・パケット発生確率が1に近く、エネルギー・パケット平均到着数が0.1を超えると、スループットは急激に低下し、双安定性を示していることがわかった。



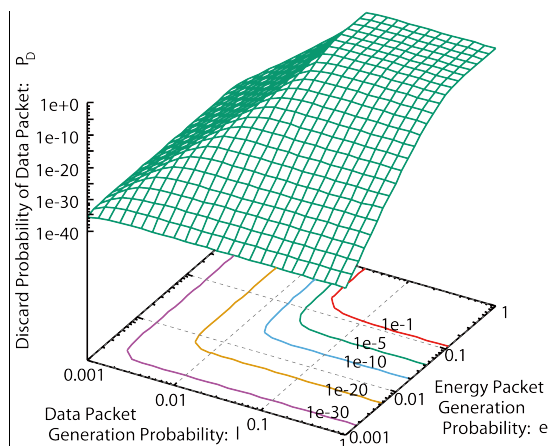
スループット



負荷トラヒック



平均伝送遅延時間



データ・パケット廃棄確率

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件)

(1) 高林健人, 田中宏和, 榊原勝己, "Integrated performance evaluation of the smart body

- area networks physical layer for future medical and healthcare IoT," MDPI Sensors, vol.19, no.1, Article ID 30, 2019年1月. DOI: 10.3390/s19010030
- (2) 榑原勝己, 高林健人, "Modeling and analysis of slotted ALOHA systems with energy harvesting nodes and retry limit," IEEE Access, vol.6, pp.63527-63536, 2018年10月. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2877424
  - (3) 榑原勝己, 依田直也, 高林健人, "Effect of random assigning of initial contention window value on performance of persistent relay CSMA with and without binary exponential backoff algorithm," WSEAS Transactions on Communications, vol.17, Article ID 15, pp.120-128, 2018年3月. URL: <http://www.wseas.org/multimedia/journals/communications/2018/a305904-1038.php>
  - (4) 堀内貴行, 榑原勝己, 武次潤平, "On bistable region of slotted-ALOHA systems with delay constraints," Universal Journal of Communications and Network, vol.4, no.2, pp.29-35, 2016年9月. DOI: 10.13189/ujcn.2016.040201

〔学会発表〕(計 16 件)

- (1) 高林健人, 田中宏和, 榑原勝己, "SmartBANの統合的性能評価に関する一検討," 電子情報通信学会技術研究報告(ヘルスケア・医療情報通信技術研究会), 東京, vol.118, no.509, MICT2018-73, pp.27-32, 2019年3月.
- (2) 高林健人, 田中宏和, 榑原勝己, "Evaluation of preamble detection in ETSI SmartBAN PHY," in Proceedings of the 13th EAI International Conference on Body Area Networks (BODYNETS 2018), Oulu, Finland, pp.xxx-xxx, 2018年10月.
- (3) 毛利将也, 高林健人, 榑原勝己, "モバイルアドホックネットワークにおける通貨を用いた協調方式での高優先度パケット送信率の向上," 平成30年度(第69回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, 広島, no.R18-09-14, 2018年10月.
- (4) 中田耀至, 榑原勝己, 高林健人, "エネルギーハーベスト端末からのデータ収集ネットワークにおけるEH-RDFSA方式の性能改善に関する研究," 平成30年度(第69回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, 広島, no.R18-09-13, 2018年10月.
- (5) 榑原勝己, 中田耀至, 高林健人, "Performance analysis of slotted ALOHA systems with energy harvesting nodes and retry limit using DTMC model," in Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS 2018), Poznan, Poland, pp.651-655, 2018年9月.
- (6) 高林健人, 田中宏和, 榑原勝己, "Performance Evaluation of Error Control Scheme in ETSI SmartBAN PHY," in Proceedings of the Global IoT Summit 2018 (GIoTS 2018), Bilbao, Spain, pp.7-12, 2018年6月.
- (7) 大室祐斗, 高林健人, 榑原勝己, "Detection scheme of selfish Node in WBAN utilizing CSMA/CA based on IEEE 802.15.6," in Proceedings of the 12th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT 2018), Sydney, Australia, pp.66-69, 2018年3月.
- (8) 依田直人, 榑原勝己, 高林健人, "Persistent リレーCSMA方式における競合ウィンドウ値に関する検討," 第19回IEEE広島支部学生シンポジウム(HISS2017), 松江, no.A2-13, pp.81-84, 2017年12月.
- (9) 高林健人, 田中宏和, 榑原勝己, "ETSI SmartBAN物理層における誤り制御方式に関する一検討," 第40回情報理論とその応用シンポジウム, 新発田, no.2.3.3, pp.96-101, 2017年11月.
- (10) 榑原勝己, 依田直也, 高林健人, "Simulation study of persistent relay CSMA with random assigning of initial contention window values," in Proceedings of the 12th International Conference on Systems and Networks Communications (ICSNC2017), Athens, Greece, pp.36-41, 2017年10月.
- (11) 中田耀至, 榑原勝己, 高林健人, "再送回数制限されたエネルギーハーベスト端末によるスロット付ALOHAの性能評価," 平成29年度(第68回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, 岡山, no.R17-09-12, 2017年10月.
- (12) 西村諒, 榑原勝己, 高林健人, "バックオフ遅延を含む確率的フラッディングの到達率に関する検討," 平成29年度(第68回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, 岡山, no.R17-09-11, 2017年10月.
- (13) 大室祐斗, 高林健人, 榑原勝己, "CSMA/CAを用いたWBAN内における不正ノード検出法に関する一検討," 電子情報通信学会2017年ソサイエティ大会, 東京, no.B-20-11, p.394, 2017年9月.
- (14) 堀内貴行, 榑原勝己, 武次潤平, "On stability of slotted-ALOHA systems with delay constraints and geometric transmission probability," in Proceedings of the 31st International Conference on Information and Networking (ICOIN2017), Danang, Vietnam, pp.309-314, 2017年1月.
- (15) 堀内貴行, 榑原勝己, 武次潤平, "遅延制限されたスロット付アロハ方式の安定性に対する送信確率の影響," 平成28年度(第67回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, 東

広島, no.R16-09-02, 2016年10月.

- (16) 堀内貴行, 榊原勝己, 武次潤平, "On bistable behavior of slotted-ALOHA systems with delay constraints," in Proceedings of the 13th IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS2016), Tokyo, Japan, pp.525-529, 2016年8月.

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者 (2017年4月19日まで)

研究分担者氏名: 武次 順平

ローマ字氏名: TAKETSUGU JUMPEI

所属研究機関名: 岡山県立大学

部局名: 情報工学部

職名: 助教

研究者番号 (8桁): 10405483

(1) 研究分担者 (2017年4月19日以降)

研究分担者氏名: 高林 健人

ローマ字氏名: TAKABAYASHI KENTO

所属研究機関名: 岡山県立大学

部局名: 情報工学部

職名: 助教

研究者番号 (8桁): 70803336

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、研究者個人に帰属されます。