

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H05307

研究課題名（和文）超過密アクセス環境を実現するFiWiネットワーク制御技術

研究課題名（英文）Fiber-Wireless Network for Ultra-Dense Access Environment

研究代表者

西山 大樹 (NISHIYAMA, Hiroki)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：90532169

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 18,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、次世代無線アクセスネットワークにおける省電力化の実現を目的とした。これは、ネットワークに接続される端末数が増大し、ネットワークに求められる要求が多様化している状況であるため、システム全体における負荷が増加してしまい、電力消費が大きくなるという課題があるためである。そこで、ネットワークの各構成要素において省電力化制御を用いることでシステム全体の省電力化が可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究においては、次世代無線アクセスネットワークにおける省電力化手法を確立した。これにより、増大し続けるネットワークの電力的な負荷を低減することが可能となることが期待されるほか、ネットワークの一部だけではなく、無線部分と光部分を含めたアクセスネットワーク全体の省電力化に、一定の貢献を果たすことが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research, we have studied the power saving technique for next generation wireless access networks. In the next generation wireless access networks, the power consumption in both wireless and wired parts increases due to high traffic load generated by the large number of communication terminals and the wide variety of communication demands. To cope with this issue, we have proposed the power saving techniques in both parts, respectively, and succeeded in reducing the power consumption in the entire system.

研究分野：情報通信ネットワーク

キーワード：Fiber-Wireless wireless network optical network

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

IoT (Internet of Things)時代の到来によって携帯電話やパソコンだけでなく、車やウェアラブル端末といったあらゆるものがインターネットに接続される時代になっている。このように様々なモノがインターネットに接続されるようになったことに加え、AR (Augmented Reality) やビデオストリーミング配信などのサービスも多様化しており、ネットワークに求められる要求は多種多様となっている。工業や農業、交通といった分野において広く IoT が使われることで、今までは想定されていなかったような様々な用途にも IoT が用いられることになりつつある。これに伴い、非常に広い範囲に IoT 端末が分布することになり、同時にインターネットとの接続も要求されることになる。さらに集めたデータを解析し、その結果をフィードバックするといった要求、つまりリアルタイム IoT の要求も高まっている。これらの IoT に対応するためには、ネットワーク機器を広い範囲に配置する必要があり、多様な要求を満足することができるネットワークを構築する必要がある。これらのネットワークにおける要求を満足するために、基地局を高密度に配置することがネットワークの一般的な構築方法になりつつある。特に、データトラフィックの制御を集中的に行う「クラウド無線アクセスネットワーク(C-RAN: Cloud-Radio Access Network)」に注目が集まっている。

2. 研究の目的

C-RAN では、要求されるカバレッジを満足するために、外部電源が不十分な場所にも基地局 (RRH: Remote Radio Head)を設置しなければならない。この問題を解決するために、本研究では、FiWi (Fiber Wireless)ネットワークと PoF (Power over Fiber)を組み合わせた C-RAN を想定した。FiWi ネットワークでは光ファイバケーブルを用いて広帯域かつ低遅延の通信を実現可能とする。また、PoF では、OLT (Optical Line Terminal)から光ファイバケーブルを介して基地局に電力を供給する光給電が可能となり、基地局の自律稼働を実現可能とする。この二つの技術を用いることで、高速なリンクを維持しつつ、外部電源を必要としないネットワークを構築することを可能にする。一方で、様々な要求を持っている多数の端末が接続されているため、C-RAN における負荷の増大は免れない。さらに、それらの大量の要求に対応するため、C-RAN の消費電力は増大し続けている。そこで、FiWi ネットワークと PoF を組み合わせた C-RAN を構築する各構成要素において省電力制御を行い、C-RAN 全体の消費電力を低減することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究で想定している C-RAN における省電力化技術として、スリープによる省電力化制御がある。この制御は基地局に実装されており、光信号の送受信を行う ONU (Optical Network Unit) 部分をスリープさせることで消費電力の低減を行う。しかし、ONU がスリープを行っているときはデータのやりとりを行うことができず、通信品質が悪化する可能性がある。そのため、通信品質を担保した省電力化制御を行う必要がある。また、従来の無線アクセスネットワークにおいて省電力化を検討する場合、基地局の省電力化を行うことが一般的である。しかしながら、本研究で想定している C-RAN では PoF を行っているため、OLT における消費電力も考慮しなければならない。そこで、本研究では、FiWi ネットワークと PoF を組み合わせた C-RAN において基地局と無線部分だけでなくネットワーク全体を考慮した効果的な省電力化制御の検討を行った。

(1) 想定環境

図1に本研究における想定環境を示す。FiWi ネットワークにおける有線ネットワーク部分は、スプリッタ、光ファイバ、OLT、ONU で構成される。OLT はコアネットワークから受信したデータをそれぞれの基地局に光ファイバを通して送信する。この時、データを光信号に変換して光ファイバとスプリッタを介することで通信を行っている。さらに、OLT は 2 種類の OSU (Optical Subscriber Unit) から構成され、通信および電源供給のための信号を送信する。OLT はデータ通信用の OSU を複数有し、それぞれが固有の波長で動作すると想定した。一方、電源供給のための OSU、つまり PoF 用 OSU は、通信用とは別の波長を使用して基地局へ電力を供給している。その原理の詳細は後述する。また、これらの通信用の OSU は、データトラフィックの需要に応じてスリープを行うことが可能であり、OLT における消費電力の削減に貢献する。

FiWi ネットワークにおける無線ネットワーク部分は、広範囲の IoT デバイスに同時に対応できるセルラネットワークにて構成される。基地局において、無線ネットワーク部分に含まれるの

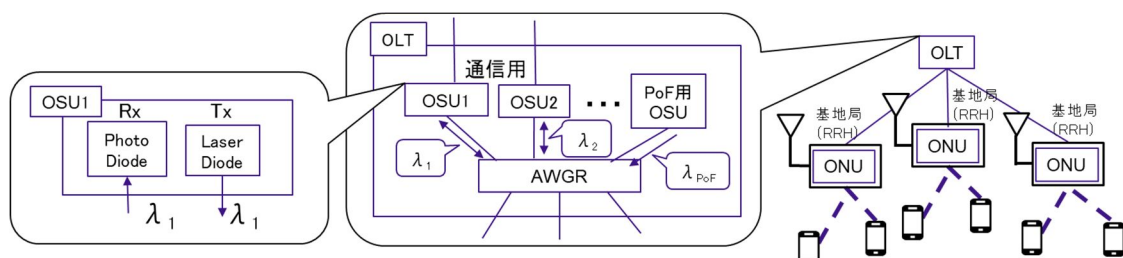


図1. 想定ネットワーク

は電波を送受信する無線装置であり、無線デバイスと基地局との通信は C-RAN において集中制御で管理される。集中制御で基地局の動作を制御することにより、スムーズな通信が実現可能である。

前述したように、OLT は 2 種類の OSU、つまり通信用 OSU 及び PoF 用 OSU を持つ。PoF 用 OSU が用いる電力供給用の光の周波数は、通信用 OSU が用いる光信号の周波数帯とはかなり離れているとした。OLT はまた、各 OSU の波長を動的にルーティングする AWGR (Arrayed Waveguide Grating Router) を有している。OLT からの光信号は、光ファイバを介して ONU に到達し、ONU において、光信号をデータに戻すことになる。これに加え、PoF では、光ファイバを介して電力供給用の光信号を ONU に送ることで、ONU に電力が供給される。これによって、ONU のバッテリーを充電することが可能となる。

しかしながら、PoF による電力供給を最小限にするために、ONU は、データ通信の頻度に応じてより消費電力の小さい「スリープフェーズ」に入ることによって省電力化を実現している。スリープフェーズでは、ONU の受信モジュールの電源を入れたまま送信モジュールをスリープさせて消費電力を削減し、途中でデータを損失せずに電力を受信できるようにする。ここでは PoF 用の波長を用いて、効率的に電力供給を行い、他の通信している ONU に影響を与えないようにしている。ここで、ONU が「アクティブフェーズ」にあるときは、OLT は同時にデータと電力の両方を送信しない。アクティブフェーズの間は、送信モジュールと受信モジュールの両方の電源が入った状態であり、データ通信用の波長を用いることで通信を実現している。ONU は OLT によって供給される電力エネルギー、すなわち、他の外部電源なしで動作することが理想的である。これを可能にするために、各 ONU のアクティブとスリープを行うサービスサイクルは、実際の IoT デバイス要求を満たすための必要なアクティブフェーズと、ONU のバッテリーの充電のためのスリープフェーズから構成されることとした。さらに、スリープフェーズ中に PoF によって供給される電力は、アクティブフェーズで消費される電力と等しいとした。これは ONU の稼働が、1 サイクルだけでなく持続的に稼働しなければならないため、1 サイクルにおける消費電力と供給される電力が等しければ、次のサイクルの影響を考慮することなくスリープとアクティブのサイクルを決定することが可能となるためである。

(2) ONU におけるタイムスロットの導入

ここでは、ONU スリープを行う上で、タイムスロットを導入したときに OLT に与える影響について述べる。OLT では PoF を用いて ONU へ電力供給を行っているため、OLT における消費電力は ONU の消費電力の影響を受ける。そのため、ONU の制御を上手く行うことで、OLT における消費電力をさらに低減することが可能となる。そこで、ONU スリープをタイムスロットに基づいて行い、OLT に接続される複数の ONU をより効果的に省電力化することで、OLT の消費電力の低減を行う。1 サイクルにおける稼働 OSU 数が少なく済めば、OLT の消費電力を低減することが可能となる。まず、タイムスロット数が 1 つの例を考える。このとき、既存手法であれば 4 台の ONU と通信するために 4 台の OSU を稼働することになる。これは、2 台の ONU を考慮したときにアクティブ時間の重複があるため、重複した時間の通信を確保するために 4 台の OSU を稼働する必要があるためである。一方、タイムスロットを 3 つにした例を考える。こちらはタイムスロットごとに OSU の稼働台数を変更することができる。そして、2 台の ONU ごとに存在する重複しているタイムスロットを分散させることで、該当するタイムスロットにおける稼働 OSU を減らし、全体的な稼働 OSU 数の低減に貢献している。つまり、ONU アクティブフェーズの重複を最小限にするために十分な制御を行うことができれば、必要な OSU の量を大幅に減らすことが可能となる。したがって、OSU 側の稼働台数の低減のために、ONU の 1 サイクルにおいてタイムスロットを用いた細分化を行うことを提案した。タイムスロットを導入することにより、OLT は、各タイムスロットに必要なアクティブな OSU の正確な数をスケジューリングすることができるため、エネルギー消費を低減することが可能となる。しかしながら、より多くのタイムスロットを導入することにより、オーバーヘッドコストのために ONU のエネルギー消費が増加することも考えられる。

図 2 に省電力化制御を行う際の PoF 用 OSU と通信用 OSU における消費電力のトレードオフ関係を示す。OLT は PoF を介して、OSU から ONU に電力を供給しなければならない。データ通信用 OSU を考えた場合、タイムスロット数を増加させることで、より詳細なスケジューリングが可能となり、稼働する OSU の台数を低減することが可能となるが、PoF 用 OSU を考えた場合はそうではない。PoF 用の OSU の消費電力は、ONU によって消費された電力に等しいため、ONU における無駄な消費電力の増加は避けなければならない。しかしながら、タイムスロット数の増加は ONU におけるアクティブフェーズとスリープフェーズの切り替えのために追加消費電力を発生させることとなる。そのため、図 2 に示したようなトレードオフの関係が存在することになる。したがって、システム全体のエネルギー消費を最小にするために、このタイムスロットにおける最適な構成を見つける手法を提案した。

4. 研究成果

(1) タイムスロットを用いた省電力化手法

ONU の稼働サイクルをタイムスロットに分割し、ONU の状態を制御することで、通信に必要な OSU の数を最小にする方法を提案した。ONU でペアを作成し、ONU の協調と OSU の割り当てを決定する。ここでは、一対の ONU について考える。これらのタイムスロットは、3 つのタイプに分

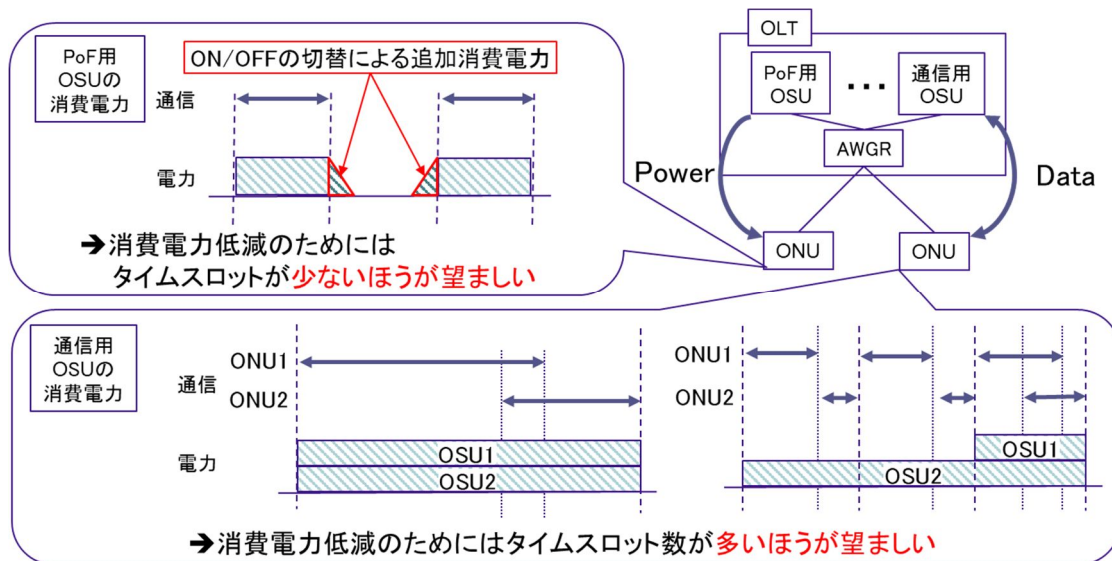


図 2 . PoF 用 OSU と通信用 OSU における消費電力のトレードオフ関係

類することができる。タイプ(0)のタイムスロットについては、どちらのONUもアクティブではないので、OSUはスリープすることが可能である。タイプ(1)のタイムスロットの場合、ペアのアクティブ時間の間に重複はない。したがって、一台のOSUのみで、二台のONUにこのタイムスロットのサービスを提供することができる。最後に、タイプ(2)のタイムスロットは、タイムスロット中に両方のONUがアクティブである間隔があるため、このタイムスロット中にこのペアに対して2つのOSUが必要となる。このタイムスロットの分類に続いて、ONUのペアを2つのグループに分けることができる。この第1のグループでは、タイプ(0)および(1)のタイムスロットのみで構成される。エネルギー消費を最小限に抑えるために、できるだけOSUを使用したくないため、タイムスロットタイプ(0)の数が最大であることが望ましい。これは、(1)のタイプのすべてのタイムスロットを、ペアの間で、アクティブ時間の比率と同じ割合で分割することで可能となる。第2グループにおいてこのペアは必ず2台のOSUを利用するタイプ(2)のタイムスロットを持つ。そのため、省電力化の観点から、このグループはタイプ(0)のタイムスロットを持たず、タイプ(2)のタイムスロットの数を最小にすることに焦点を当てる。このグループにおいても、タイプ(1)のタイムスロットは、アクティブ時間と同じ比率に従ってペアとの間で分割される。さらに、タイプ(2)では、タイプ(2)のタイムスロットの数を最小限にするために、両方のONUがタイムスロット全体に対してアクティブになる可能性がある。これにより、アクティブなOSUの数を減らすことが可能となる。したがって、タイプ(1)のすべてのタイムスロットとタイプ(2)のすべてのタイムスロットにおけるアクティブ時間の合計が、必要とされるアクティブ時間以上でなければならない。さらに、タイプ(2)のタイムスロット数を考えた場合、タイプ(1)のタイムスロットがタイプ(2)に変化した瞬間からタイプ(2)のタイムスロット数の導出が可能となる。このタイムスロット数を用いて、OLTの消費電力の導出を行う。OLTの消費電力はPoF用OSUにおける消費電力とデータ通信用OSUにおける消費電力から算出されるため、PoF用OSUにおける消費電力とデータ通信用OSUにおける消費電力について以下で説明する。

(2) PoF 用 OSU と通信用 OSU における消費電力

PoF 用 OSU における消費電力

ONUは、OLTによって提供されるエネルギーのみで動作すると想定するため、ONUを動作させるためのエネルギーはOLTのPoFによって消費されるエネルギーに等しい。そのため、OLTのPoF用OSUの消費電力はONUに到着するIoTトラフィックの量によっても影響を受ける。また、各ONUのアクティブ時間とスリープ時間(および各フェーズでの消費電力)が分かれば、PoF用OSUの消費電力を計算することが可能である。ただし、フェーズの切り替えには図2に示したように、わずかな追加消費電力が必要となる。このときタイプ(1)のすべてのタイムスロットに状態遷移が存在することになる。そのため、追加消費電力が必要となる。一方で、エネルギー消費が最小限に抑えられるように、タイプ(2)のタイムスロットでは可能な限り長い時間をアクティブにしようとするため、タイムスロット中すべてアクティブの場合がある。その場合は、追加消費電力は発生しない。

通信用 OSU における消費電力

PoFを介して消費されるエネルギーの他に、OLTはONUと通信するためにOSUが必要であり、そのためのエネルギーを消費する。このエネルギーを計算するために、すべてのタイムスロットで使用されるOSUの総和をすべてのONUのペアを用いて定義する。ここで、すべてのタイムスロットの値を合計することになるが、OSUは再利用されることに留意する必要がある。したがって、サイクル全体で実際に必要とするOSUの総数が導出可能となる。ただし、これらのOSUは必ずし

もアクティブである必要はない。つまり、各タイムスロットでの ONU の要求に応じて、それらの一部またはすべてをスリープにすることが可能である。

(3) OLT における消費電力

前述した PoF 用 OSU における消費電力と通信用 OSU における消費電力を用いて OLT における消費電力を求めた。ONU に供給される電力、OSU と ONU との間でデータのやり取りをするために必要な電力の両方を考慮して、システム全体のエネルギー消費を最小限に抑えるタイムスロットの数を見つけることで、省電力化を実現する。消費電力の最適値を見つけるためにはこの整数線形計画問題を解く必要がある。今回は、この問題を分岐可能な線形計画緩和問題に分割して元の状態の最適解が見つかるまで分枝限定法にて導出した。この解法は個別に OLT に適用する必要があるため、計算量が莫大に増加することはない。つまり、必要な計算量は、OLT に接続される OSU および ONU の数によって制限されるため、この解法が利用可能となり、OLT の拡張と同様に本解法も拡張可能となる。

(4) 数値解析による提案手法の評価

アクセスネットワーク全体の省電力化について検討し、ONU のスリープフェーズへのタイムスロットを導入することによる OLT およびネットワークの省電力化の影響を確認した。図 3 は、OSU と ONU との間の通信が発生する際に使用される消費電力と、ONU を PoF によって稼働するために必要な消費電力を示している。ここでは、タイムスロット数を変更することで各消費電力の影響を評価している。さらに、リアルタイム IoT の要件を満たすために、遅延閾値を固定値で用いている。タイムスロットの数を増やすと、各 ONU の間でスリープをより効率的に行うことが可能となり、通信に必要な OSU 数が減少するため、OLT における消費電力もまた減少する。これは、図 3 に示すように、通信に用いられるエネルギーの減少を意味している。しかしながら、ONU の通信要求は満たされなければならないため、通信のために最低限必要な OSU 数はアクティブでなければならない。一方、前述したように、タイムスロット数の増加より、ONU の状態が切り替わることによる追加的な消費電力が増加し、余分なエネルギー消費を招くこととなる。これは、タイムスロット数を増加させることによって実際に PoF によって消費されるエネルギーが増加することを意味する。

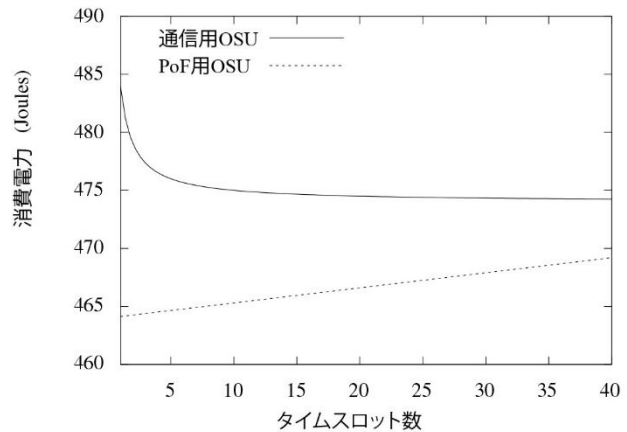


図 3. 通信用 OSU と PoF 用 OSU における消費電力

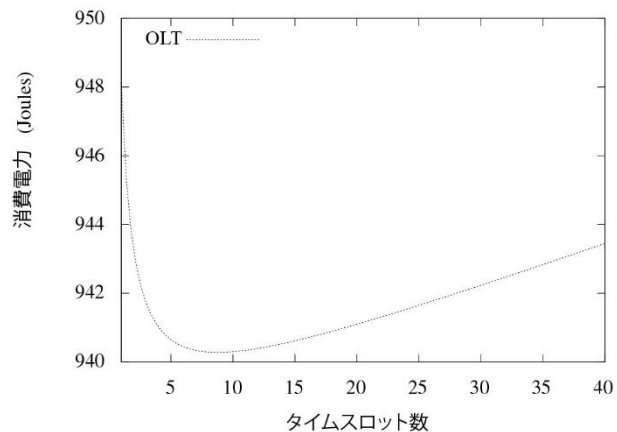


図 4. OLT における消費電力

図 4 は、OLT によって消費された総エネルギーを示している。この結果は、図 3 の値を合計することによって得られる。ここでも、タイムスロットの数を変更することで消費電力の変化を確認した。タイムスロット数が増えることで通信における消費電力と PoF における消費電力は異なる変化をする。スロット数が増加するにつれて、ONU がスリープフェーズとアクティブフェーズを切り替えなければならない回数が増加し、その結果、追加的に必要な消費電力が増加するため、ONU 全体の電力消費が増加する。また、スロット数が増加するにつれて、各タイムスロットにおけるアクティブな OSU の数を減らすことが可能になるため、消費電力的には減少の傾向をたどる。一方で、タイムスロット数が少なくなると、各タイムスロットにおけるアクティブな OSU 数は増加するため、消費電力は高くなる。必要な OSU の数が増えるため、すべての OSU で消費される合計のエネルギーが増加する。したがって、タイムスロット数が少ない場合、アクティブな OSU の数が多くなるためにエネルギー消費が増加することになる。以上のことから、総消費電力の曲線を検討した場合、タイムスロット数によって通信に必要な OSU の数と PoF によって必要な消費電力の関係からトレードオフの関係があることがわかる。また、本研究で提案した計算式により OLT の消費電力を最小とする最適なタイムスロット数を導出することが可能である。

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 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Miyanabe Keisuke, Gama Rodrigues Tiago, Lee Yunseong, Nishiyama Hiroki, Kato Nei	4. 巻 6
2. 論文標題 An Internet of Things Traffic-Based Power Saving Scheme in Cloud-Radio Access Network	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Internet of Things Journal	6. 最初と最後の頁 3087 ~ 3096
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JIOT.2018.2878884	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 Katsuya Suto, Keisuke Miyanabe, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, Hirotaka Ujikawa, and Ken-Ichi Suzuki	4. 巻 2
2. 論文標題 QoS-Guaranteed and Power-Efficient Network Operation for Cloud Radio Access Network with Power over Fiber	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Computational Social Systems	6. 最初と最後の頁 127, 136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCSS.2016.2518208	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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 宮鍋慶介, 西山大樹, 加藤寧
2. 発表標題 タイムスロットを用いたOLTの省電力化に関する研究
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yunseong Lee, Hiroki Nishiyama, and Nei Kato
2. 発表標題 Analysis of Power Consumption of Cloud-Radio Access Network using an M/M/c Queueing Model
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yunseong Lee, Hiroki Nishiyama, and Nei Kato
2. 発表標題 A Study on Power Consumption of Cloud-Radio Access Network
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮鍋慶介, 西山大樹, 加藤寧, 山田崇史, 鈴木謙一
2. 発表標題 C-RANにおけるトラヒックに応じた柔軟なネットワークリソース割り当てに関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yunseong Lee, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, Hirotaka Ujikawa, and Ken-Ichi Suzuki
2. 発表標題 A Study on the Power Saving Technology of Networks in Smart Factory
3. 学会等名 2016年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Yunseong Lee, Hiroki Nishiyama, and Nei Kato
2. 発表標題 A Study on the Power Saving Technology in Cloud Radio Access Network with Power over Fiber
3. 学会等名 2017年電子情報通信学会通信総合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮鍋慶介, 西山大樹, 加藤寧
2. 発表標題 C-RANにおけるユーザー要求を考慮したシステム構築に関する初期検討
3. 学会等名 2017年電子情報通信学会通信総合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 李允成, 西山大樹, 加藤寧
2. 発表標題 無線センサネットワークにおける省電力技術
3. 学会等名 電子情報通信学会2016年総合大会
4. 発表年 2016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
--	---------------------------	-----------------------	----