

仮想化技術に基づくモバイルアクセスネットワークの解析的性能評価

山崎 里奈[†] 長谷川 剛^{††} 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科 〒560-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

^{††} 大阪大学サイバーメディアセンター 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-32

E-mail: [†]{r-yamask,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp

あらまし 本報告においては、第5世代携帯電話網などにおけるモバイルアクセスネットワークに着目し、ネットワーク仮想化技術に基づいた集中制御の有効性を明らかにすることを目的とする。そのために、まず、評価対象である、仮想化技術を前提としたアクセスネットワークのモデル化を行う。次に、そのモデルをモバイルアクセスネットワークへ適用し、数値評価を行う。性能評価は、端末を含めたネットワーク全体の消費電力、端末の通信時に発生する遅延時間やスループットの観点で数値評価を行う。評価の結果、端末が発生させるトラフィックの同期度が、収容可能な端末数や、ネットワーク性能に大きな影響を与えるが、システム全体の消費電力にはほとんど影響を与えないことがわかった。

キーワード 第5世代携帯電話網、モバイルアクセスネットワーク、Software Defined Network (SDN)、消費電力、性能評価

1. はじめに

第5世代携帯電話網(5G ネットワーク)に必要なとされる容量を達成するためには、Coordinated MultiPoint (CoMP) [1] や Carrier Aggregation (CA) [2]、Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) [3] などの新しい無線ネットワーク技術を広くサポートすることが必要となると考えられている。さらに、モバイルネットワークを構成する Radio Access Network (RAN) やフロントホールネットワーク、バックホールネットワークの構成の見直しも進んでいる [4] [5]。中でも、RANの基地局部分をクラウド化する Cloud RAN (C-RAN) [6] が注目されている。C-RAN を実現するための基幹技術として、Software Defined Network (SDN) [7] や Network Functions Virtualization (NFV) [8] といった技術が存在する。

文献 [4] においては、C-RAN の実現のために解決すべき現在のフロントホールネットワークの問題点を指摘し、Base Band Unit (BBU) と Remote Radio Head (RRH) の機能分割を改め、フロントホールネットワークのデータをパケット化して転送する Next-Generation Fronthaul Interface (NGFI) アーキテクチャを提案している。文献 [5] においては、モバイルネットワークにおけるフロントホールネットワークとバックホールネットワークの統合制御が提案されており、その実現のために、仮想化技術が重要な役割を果たすと考えられている。

フロントホールネットワークに対して仮想化技術を適用することにより、ベースバンド処理を行うモジュールを仮想化し、クラウド環境でリソースプールとして提供することが可能となる。これにより、ネットワーク制御を集中的に行うことができるため、制御効率や資源利用効率の向上が期待される。また、フロントホールネットワークとバックホールネットワークを統合制御 [5] [9] することにより、ネットワーク資源やサーバ資源を動的に再配置することや、フロントホールネットワークとバックホールネットワークのネットワークリソースを共有することが可能となる。これにより、制御効率や資源利用効率の向上が期待される。それらの結果、モバイルネットワークの端末収容能力や端末スループットの向上、また省電力化が可能になると考えられる。しかし、特にモバイルネットワークにおいては、仮想化技術に基づく制御によるそれらの効果の定量的な評価はほとんど行われていない。

そこで本報告においては、仮想化技術に基づいた集中制御を前提としたモバイルアクセスネットワークに着目し、数学的解析手法に基づいて、その性能評価を行う。そのためにまず、評価対象である、仮想化技術に基づいた集中制御を前提としたアクセスネットワークのモデル化を行い、各ノードや各インタ

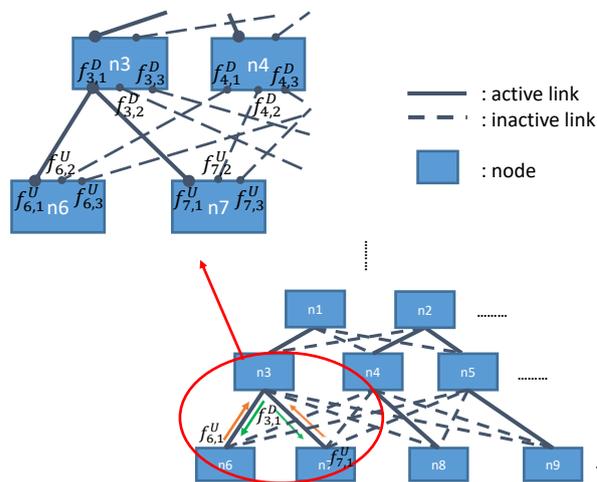


図 1: ネットワークモデル

フェースを通過するトラフィック量、消費電力、パケット廃棄率及び遅延時間を評価するための数学的解析を行う。次に、解析結果を用いて、モバイルアクセスネットワークを対象とした性能評価を行う。具体的には、端末を含めたネットワーク全体の消費電力、端末部分の消費電力、ネットワーク部分の消費電力、端末の通信時に発生する遅延時間やスループットの観点で、収容端末台数の増加にもなうネットワーク性能の変化や、端末のトラフィック特性が与える影響、及び、ネットワーク機器の電力比例性が与える影響を確認する。

本報告の構成は以下のとおりである。2. 章に、解析モデルとして用いるネットワークモデルやトラフィックモデル、消費電力モデル、及び遅延モデルを示す。3. 章においては、2. 章で示した解析結果を用いた性能評価とそれに対する考察を示す。最後に、4. 章でまとめと今後の課題について述べる。

2. 仮想化技術に基づくモバイルアクセスネットワークの性能評価モデル

2.1 ネットワークモデル

図 1 に、ネットワークモデルの概要を示す。本モデルには N^{NODE} 個のノード $n_1, n_2, \dots, n_{N^{NODE}}$ が存在する。ノードの集合を \mathbf{N} とする。ノード n_i は N_i^U 個のアップリンクインタ

フェース $f_{i,1}^U, f_{i,2}^U, \dots, f_{i,N_i^U}^U$ と、 N_i^D 個のダウンリンクインタフェース $f_{i,1}^D, f_{i,2}^D, \dots, f_{i,N_i^D}^D$ を持つ。ノード n_i が持つアップリンクインタフェース及びダウンリンクインタフェースの集合をそれぞれ $\mathbf{F}_{n_i}^U$ 、 $\mathbf{F}_{n_i}^D$ 、とし、 $\mathbf{F}_{n_i} = \mathbf{F}_{n_i}^U \cup \mathbf{F}_{n_i}^D$ とする。ノード n_i のインタフェース $f_{i,j}$ のリンク帯域を $l_{f_{i,j}}$ とする。

ノードのアップリンクインタフェースは接続先となるほかのノードのダウンリンクインタフェースに対応する。その対応の集合 $\mathbf{T} = \{(f^U, f^D)\}$ をネットワークトポロジと呼ぶ。1つのアップリンクインタフェースは、1つのダウンリンクインタフェースに対応するが、1つのダウンリンクインタフェースは複数のアップリンクインタフェースに対応することがある。これは、無線 LAN のアクセスポイントのように1つのインタフェースで複数の端末への接続を行うことに相当する。

ノード n_i は自身が持つアップリンクインタフェースの1つである $f_{i,u}^U (1 \leq u \leq N_i^U)$ のみを用いて n_i が発生させるトラフィック、及び n_i に流入するトラフィックを送信する。送信先のノードを n_j 、対応するインタフェースを $f_{j,d}^D (1 \leq d \leq N_j^D)$ とする。ただし $(f_{i,u}^U, f_{j,d}^D) \in \mathbf{T}$ である。このとき、全てのノードがトラフィック送受信に用いるインタフェース対の集合 $\mathbf{T}^{USE} = \{(f^U, f^D)\} (\subseteq \mathbf{T})$ を本報告においてはトラフィックトポロジと呼ぶ。図1においては、ネットワークトポロジはノードと全てのリンクから構成され、トラフィックトポロジはノードと active link で構成される様子を表している。また、 \mathbf{T}^{USE} が与えられたときに、 n_i が収容しているほかのノードの集合を $\mathbf{A}_i = \{n_k \mid \exists (f_{k,u}^U, f_{i,d}^D) \in \mathbf{T}^{USE}\}$ と定義する。図2に、

Passive Optical Network (PON) 技術 [10] に基づいて構築されるアクセスネットワークに対してネットワークモデルを適用した様子を示す。このネットワークモデルは、ネットワーク仮想化技術が適用されたような環境において、集中制御による柔軟な経路制御やトポロジ制御が行われるような場合を取り扱うことができる。なぜなら、ネットワークトポロジに対してトラフィックトポロジを別に定義していることで、あるノードが複数リンクを持ち、トラフィック量などに応じてそれらのリンクを選択して用いるような状況に対応できるためである。

本報告におけるネットワークモデルにおいては、ノードが複数のアップリンクインタフェースを同時に用いてトラフィックを伝送するような状況を考慮しない。しかし、文献 [5] においては、ネットワークトラフィック量に応じて複数のアップリンクインタフェースを用いることが考えられている。そのようなネットワークに対してモデルを適用するためには、モデルの拡張が必要となる。具体的には、ノード n_i は自身が持つアップリンクインタフェースのうち1つまたは複数を用いて、トラフィックを送信するものとする。この際、複数のアップリンクインタフェースに対してトラフィックを分配する方法を考える必要があり、例えば、トラフィックを均等に分配する方法や、各アップリンクインタフェースの物理帯域に比例するように分配する方法などが考えられる。このようなモデルの拡張と評価に関しては今後の課題とする。

2.2 トラフィックモデル

2.2.1 ノード自身のトラフィックモデル

あるノードからトラフィックが発生するとき、そのトラフィックは周期性を持ち、かつ、パケットが発生する時間区間 (ON 区間) と発生しない時間区間 (OFF 区間) を持つものとする。ノード n_i の ON 区間の長さを $T_{n_i}^{ON}$ 、OFF 区間の長さを $T_{n_i}^{OFF}$ とし、ON 区間と OFF 区間の和を n_i の通信周期 $T_{n_i} (= T_{n_i}^{ON} + T_{n_i}^{OFF})$ とする。

1つの ON 区間において n_i がトラフィックトポロジの最上位ノードへ向けて送信するパケット数を m_{n_i} とする。パケットサイズは n_i にかかわらず、平均 s の指数分布を持つものとする。パケットは ON 区間において時間的な偏りなく、かつランダムな時刻に送信されるものとする。このとき、ON 区間におけるトラフィックの平均ビットレートを b_{n_i} とすると、 $b_{n_i} = \frac{s \cdot m_{n_i}}{T_{n_i}^{ON}}$ となる。ノードのトラフィック特性は $T_{n_i}^{ON}$ 、 $T_{n_i}^{OFF}$ 、 s 、 m_{n_i} 及び b_{n_i} で表現される。

2.2.2 収容トラフィックモデル

ノード n_i のあるインタフェースに、複数ノードからのトラフィックが収容されている場合、収容されたトラフィックの特性を、ON 区間の長さ、OFF 区間の長さ、及び ON 区間に発生させるトラフィックの平均ビットレート、さらに、ノード n_i のインタ

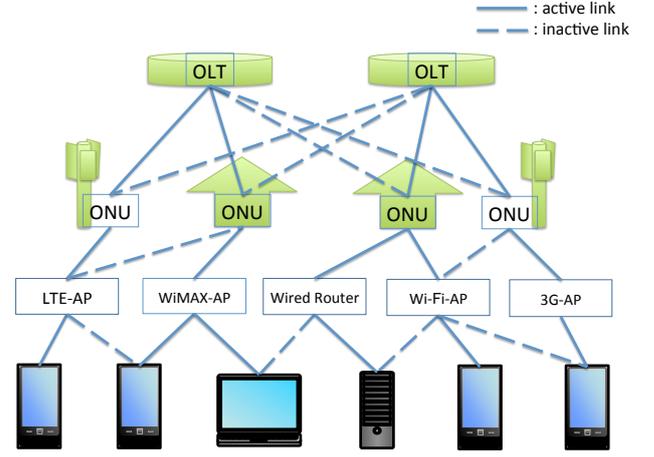


図 2: PON 技術に基づくアクセスネットワークへのモデル適用例

フェース $f_{i,j}$ におけるパケット廃棄率 $p_{f_{i,j}}$ を用いて表現する。以下においては簡単のために、ノードの1つのインタフェースが収容するトラフィックの通信周期は均一であるとし、ノード n_i のインタフェース $f_{i,j}$ が収容するトラフィックの通信周期は、 $T_{f_{i,j}}$ であるとする。通信周期が異なる端末を収容する場合については今後の課題とする。以下においては、インタフェース $f_{i,j}$ がトラフィックを収容しているノードの集合を $\mathbf{N}_{f_{i,j}}$ とする。

$f_{i,j}$ に収容されるトラフィックを発生させているノード $n_k (k \in \mathbf{N}_{f_{i,j}})$ の通信周期を T_{n_k} 、ON 区間と OFF 区間の長さをそれぞれ $T_{n_k}^{ON}$ 、 $T_{n_k}^{OFF}$ とする ($T_{n_k} = T_{n_k}^{ON} + T_{n_k}^{OFF}$)。 $f_{i,j}$ に収容されるトラフィックの ON 区間の同期の度合いを示す指標として同期度 $\sigma_{f_{i,j}} (0 \leq \sigma_{f_{i,j}} \leq 1)$ を定義する。1つの通信周期の開始時刻を 0、終了時刻を $T_{f_{i,j}}$ とすると、 $f_{i,j}$ に収容されるトラフィックの ON 区間は $[0, (1 - \sigma_{f_{i,j}})T_{f_{i,j}}]$ の区間で開始かつ終了するものとする。ただし、全ての端末の通信は通信周期の間に終了するものとする。これは、 $0 \leq \sigma_{f_{i,j}} \leq 1 - \frac{\max_k (T_{n_k}^{ON})}{T_{f_{i,j}}}$ であることを意味する。

$\sigma_{f_{i,j}} = 0$ である場合は、収容されているノードの ON 区間は全く同期されておらず、通信周期内の任意の時刻に通信が発生する。一方、 $\sigma_{f_{i,j}} = 1 - \frac{\max_k (T_{n_k}^{ON})}{T_{f_{i,j}}}$ である場合は、収容されている全てのノードの ON 区間は時刻 0 に開始され、完全に同期している。同期度が高いほど、 $f_{i,j}$ におけるトラフィックの周期 $T_{f_{i,j}}$ に占める OFF 区間が長くなるため、OFF 区間においてスリープ制御を行う場合にはその省電力効果が高くなる一方、ON 区間におけるトラフィックの平均ビットレートが高くなる。

同期度が $\sigma_{f_{i,j}}$ の時の、インタフェース $f_{i,j}$ に到着するトラフィックの ON 区間の長さを $T_{f_{i,j}}^{ON}$ 、OFF 区間の長さを $T_{f_{i,j}}^{OFF}$ 、ON 区間におけるトラフィックの平均ビットレートを $d_{f_{i,j}}$ とする。 $d_{f_{i,j}}$ は、インタフェース $f_{i,j}$ が、ダウンリンクインタフェースの場合は $d_{f_{i,j}}^D$ と、アップリンクインタフェースの場合は $d_{f_{i,j}}^U$ と記述し、以下のように導出される。

$$T_{f_{i,j}}^{ON} = (1 - \sigma_{f_{i,j}})T_{f_{i,j}} \quad (1)$$

$$T_{f_{i,j}}^{OFF} = \sigma_{f_{i,j}}T_{f_{i,j}} \quad (2)$$

$$d_{f_{i,j}}^D = \sum_{n \in \mathbf{N}_{f_{i,j}}^D} \sum_{f \in \mathbf{F}_n^U} \left(d_f (1 - p_f) \frac{T_f^{ON}}{T_{f_{i,j}}^{ON}} \right) \quad (3)$$

$$d_{f_{i,j}}^U = \sum_{f \in \mathbf{F}_i^D} \left(d_f \frac{T_f^{ON}}{T_{f_{i,j}}^{ON}} \right) + b_{n_i} \frac{T_{n_i}^{ON}}{T_{f_{i,j}}^{ON}} \quad (4)$$

2.3 消費電力モデル

ノードの消費電力は、ノード自身の消費電力特性と、ノードが持つインタフェースの消費電力特性によって決定される。ノード n_i 自身の消費電力特性は、送受信するトラフィックが存在するときの消費電力 $e_{n_i}^{ACT}$ と、送受信するトラフィックが存在しないときの消費電力 $e_{n_i}^{OFF}$ によって決定される。ノード n_i がほかのノードのトラフィックを収容しておらず、自身もトラフィックを発生させない場合、すなわち、 $\mathbf{A}_i = \emptyset$ かつ $b_{n_i} = 0$ である場合に、ノードの電源を落とすことができる場合には、 $e_{n_i}^{OFF} = 0$ となる。一方、トラフィック送受信がない場合にも電源を落とすことができない場合には、 $e_{n_i}^{OFF} \geq 0$ となる。

ノード n_i が持つインタフェース $f_{i,j}$ の消費電力 $e_{f_{i,j}}$ は、インタフェースにおけるトラフィックの ON 区間と OFF 区間の長さ、及びトラフィックのビットレートから以下のように決定される。

$$e_{f_{i,j}} = \begin{cases} 0 & \text{if } N_{f_{i,j}} = \emptyset \\ \frac{T_{f_{i,j}}^{ON}}{T_{f_{i,j}}^{ON} + T_{f_{i,j}}^{OFF}} E_{f_{i,j}}^{active} (d_{f_{i,j}} (1 - p_{f_{i,j}})) & \\ + \frac{T_{f_{i,j}}^{OFF}}{T_{f_{i,j}}^{ON} + T_{f_{i,j}}^{OFF}} E_{f_{i,j}}^{sleep} (T_{f_{i,j}}^{OFF}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

関数 $E_f^{active}(x)$ は、ON 区間、すなわちデータ送信中の消費電力を与える関数であり、送信するトラフィックの平均ビットレート x を引数とする。本報告においては、文献 [11] に示されている電力比例性 (Energy Proportionality) の概念を用いて関数 $E_f^{active}(x)$ を以下のように決定する。図 3 に、文献 [11] に基づいた、トラフィックのビットレートと消費電力の関係を示す。図には、完全な電力比例性を持つ場合 (ideal power consumption)、ルータ機器などの場合で、インタフェースボードの追加が発生するような場合 (actual power consumption)、及び、本報告で用いるモデル ($E_f^{active}(x)$) が示されている。本報告で用いるモデルにおいては、トラフィックが 0 である場合でも、一定の消費電力が発生し、トラフィック量の増加に対して線形的に消費電力が増加する。トラフィックのビットレートがノードのキャパシティである B に等しい時の消費電力を e_f^{MAX} とし、トラフィックのビットレートが 0 の時の消費電力を e_f^{MIN} とする。このとき、ネットワークデバイスの Energy Proportionality Index (EPI) は $100 \cdot \frac{e_f^{MAX} - e_f^{MIN}}{e_f^{MAX}}$ と定義される [11]。これに倣い、関数 $E_f^{active}(x)$ を以下のように定める。

$$x = d_{f_{i,j}} (1 - p_{f_{i,j}}) \quad (6)$$

$$E_f^{active}(x) = x \frac{(e_f^{MAX} - e_f^{MIN})}{B_f} + e_f^{MIN} \quad (7)$$

ここで、 e_f^{MAX} 、 e_f^{MIN} 、及び B_f は、インタフェース f の消費電力特性を決定するパラメータである。また、アイドル時の消費電力を表す関数 $E_f^{sleep}(t)$ は、ノードのスリープ制御を前提とし、OFF 区間の長さ t に対する関数としている。これは、トラフィックが流れない時間の長さに応じた、複数のスリープモードを持つことを考慮するためである。これらより、ノード n_i の消費電力 e_{n_i} は、以下のように算出される。

$$e_{n_i} = \begin{cases} e_{n_i}^{OFF} + \sum_{f \in \mathbf{F}_{n_i}} e_f & \text{if } \mathbf{A}_i = \emptyset \text{ and } b_{n_i} = 0 \\ e_{n_i}^{ACT} + \sum_{f \in \mathbf{F}_{n_i}} e_f & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

2.4 遅延モデル

トラフィックの性能は、端末が送信するパケットがトラフィックトポロジにおける最上位ノードへ到達するまでの遅延時間であるエンド間パケット遅延時間、及びその際に発生するパケット廃棄率であるエンド間パケット廃棄率で評価する。エンド間パケット遅延時間は、パケットが通過する各ノードにおけるバッファリング時間とパケット処理時間の和とする。エンド間パケット廃棄率は、パケットが通過する各ノードにおけるパケット廃棄率を用いて算出する。

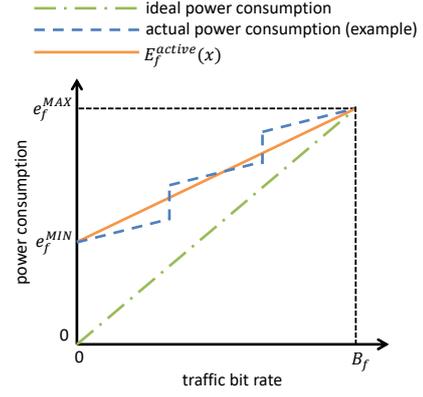


図 3: デバイスの電力比例性

各ノードにおけるパケット廃棄率及びバッファリング時間とパケット処理時間の和は、M/M/1/K 待ち行列モデル [12] を用いて導出する。一般に、M/M/1/K 待ち行列モデルにおける、客の平均到着間隔を $\frac{1}{\lambda}$ 、平均サービス時間を $\frac{1}{\mu}$ 、システム内容数の最大値を K とすると、棄却率 P と平均系内時間 W は以下で示される。

$$P = \frac{\rho^K}{1 + \rho + \dots + \rho^K} \quad (9)$$

$$W = \frac{1}{\lambda(1-P)} \sum_{n=0}^{K-1} n \frac{1-\rho}{1-\rho^{K+1}} \rho^n \quad (10)$$

$$= \frac{1}{\lambda(1+\rho+\dots+\rho^{K-1})} \sum_{n=0}^{K-1} n \rho^n \quad (11)$$

ただし、 $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ である。

ノードの各インタフェースに関して、 λ 及び ρ を、それぞれ到着するパケットの到着レート、及びインタフェースのリンク帯域を用いて決定する。また、バッファサイズを $(K-1)$ パケットとし、棄却率をノードの各インタフェースにおけるパケット廃棄率、系内時間をパケットがノードに到着してから処理を経て出力されるまでの時間とみなす。それにより、インタフェース f において、以下の式が得られる。

$$\lambda_f = \frac{d_f}{s} \quad (12)$$

$$\mu_f = \frac{l_f}{s} \quad (13)$$

$$p_f = \frac{\rho_f^K}{1 + \rho_f + \dots + \rho_f^K} \quad (14)$$

$$w_f = \frac{1}{\lambda_f(1-p_f)} \sum_{n=0}^{K-1} n \frac{1-\rho_f}{1-\rho_f^{K+1}} \rho_f^n \quad (15)$$

$$= \frac{1}{\lambda_f(1+\rho_f+\dots+\rho_f^{K-1})} \sum_{n=0}^{K-1} n \rho_f^n + \frac{1}{\mu_f} \quad (16)$$

ただし、 $\rho_f = \frac{\lambda_f}{\mu_f}$ である。(12)–(16) 式の計算は下位ノードから順に行い、ダウンリンクインタフェースにおいてはパケット廃棄は発生しないものとする。

あるノードに到着するパケットの到着レートは、端末が送出するパケットレートと、当該ノードに到着するまでに経由する他ノードにおけるパケット廃棄率を考慮して算出する。最上位

ノードの出力リンクに到着すべきパケット数を M 、各端末が送信するパケット数を $M'(\geq M)$ とする。各端末が送信するパケット数を、経由するノードにおけるパケット廃棄を考慮し、最上位ノードの出力リンクに到着するパケット数が M にできる限り近くなるように決定する。このとき、ノードが収容するトラフィック量が多すぎる場合には、ネットワークのパケット廃棄率が高くなることによって、各端末からの送信パケット数をどれだけ大きくしても、到着パケット数が M に達しないことがある。その際は、ネットワークがそのトラフィックを収容することができなとみなす。ノード n_i から送信されるパケットが最上位のノードに到達するまでに通過するノードの集合を C_{n_i} とする。全ての端末について、以下の手順 (1) – (5) を行う。

- (1) ノード n_i が1つの ON 区間において送信するパケット数を、トラフィックデマンドとして与えられる値 (m_{n_i}) に初期化する。
- (2) ノード n_i から最上位ノードに到着すべきパケット数 M_{n_i} を求める。

$$M_{n_i} = \sum_{n \in C_{n_i}} m_n \quad (17)$$

- (3) 各ノードのパケット廃棄率を導出する。
- (4) ノード n_i から送信され、最上位ノードに到着するパケット数 M''_{n_i} を求める。

$$M''_{n_i} = m_{n_i} \left(\prod_{n \in C_{n_i}} (1 - p_{fn}^U) \right) \quad (18)$$

- (5) $M''_{n_i} \geq M_{n_i}$ または $|M_{n_i} - M''_{n_i}| \leq \delta$ であれば、終了する。 δ は許容誤差を表す。 $|M_{n_i} - M''_{n_i}| > \delta$ であれば、各ノードが送信するパケット数を変更し、(3) へ戻る。ただし、トラフィックを収容できないと判断した場合には終了する。

3. モバイルアクセスネットワークの性能評価

本章では、2. 章で構築したモデルを用いて、モバイルアクセスネットワークの性能評価を行った結果を示す。

3.1 評価環境

5G ネットワークにおいては、電波の届く範囲が半径数キロメートルから数十キロメートルであるマクロセルを提供する基地局と、マクロセルを補完するために用いられ、半径数百メートルから数キロメートルを被覆するスモールセルを提供する小型の基地局を併用することで、通信可能領域を広く保ちながら、収容できるトラフィック量を大きくするアーキテクチャが検討されている [13–15]。そのことを鑑み、本報告においては、単一のマクロセルが被覆する範囲を、4つのスモールセルが被覆し、これらの基地局が PON 技術に基づくネットワークによって収容される環境を想定した評価を行う。すなわち、マクロセル基地局とスモールセル基地局は、それぞれ個別の Optical Network Unit (ONU) に接続され、ONU は Optical Line Terminal (OLT) に収容されている。図 4 に、想定しているアクセスネットワーク環境を示す。また、基地局を収容しているネットワークのリンク帯域は全て 10 Mbps とし、伝搬遅延時間は 0 とした。端末はマクロセルとスモールセルの両方に被覆された領域に均一に分布する。すなわち、各端末はマクロセル基地局、あるいは 4 つのうち 1 つのスモールセル基地局に接続することができる。端末は最上位ノードである OLT に向けてトラフィックを発生させる。

図 5 に、上述したネットワーク環境を、2. 章で述べたネットワークモデルに基づいて表現したものを示す。このモデルを用いて、接続する端末数、マクロセル基地局とスモールセル基地局のそれぞれに接続する端末の割合、及び基地局や ONU の消費電力特性などが、ネットワークの消費電力や端末のネットワーク性能に与える影響を評価する。表 1 に各ノードの消費電力を、表 2 にネットワーク機器の電力比例性が低い場合のインタフェースの消費電力特性を、表 3 にネットワーク機器の電力比例性が高い場合のインタフェースの消費電力特性を、それぞれ示す。表 2 及び表 3 中の、 $A \rightarrow B$ は、ノード A とノード B を接続しているリンクの、ノード A 側のインタフェースの消費電力特性を表す。電力比例性が低い場合においては、ネットワーク機器の消費電力は、収容しているトラフィックのビット

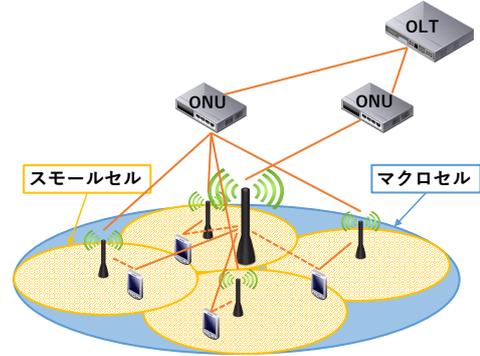


図 4: 評価対象とするアクセスネットワーク環境

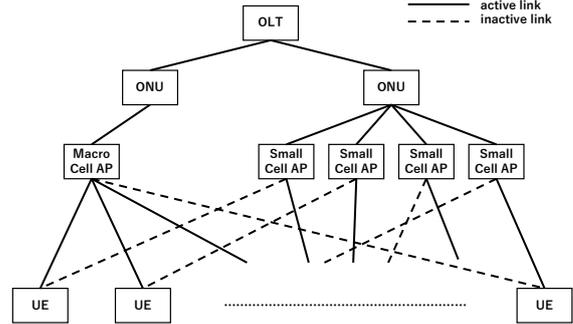


図 5: 評価対象のネットワークモデル

表 1: 各ノードの消費電力

ノードの種類	e_n^{ACT}	e_n^{OFF}
OLT	200 W	200 W
ONU	50 W	0 W
マクロセル基地局	300 W	300 W
スモールセル基地局	300 W	0 W
端末	0 W	0 W

表 2: 電力比例性が低い場合の各ノードのネットワークインタフェースのリンク帯域と消費電力特性

インタフェース	リンク帯域	e_f^{MAX}	e_f^{MIN}	E_f^{sleep}
OLT → ONU	10 Mbps	20 W	20 W	20 W
ONU → OLT	10 Mbps	20 W	20 W	20 W
ONU → 基地局	10 Mbps	4 W	4 W	4 W
基地局 → ONU	10 Mbps	4 W	4 W	4 W
マクロセル基地局 → 端末	10 Mbps	0 W	0 W	0 W
スモールセル基地局 → 端末	10 Mbps	0 W	0 W	0 W
端末 → マクロセル基地局	10 Mbps	1.0 W	0.7 W	0.01 W
端末 → スモールセル基地局	10 Mbps	0.4 W	0.1 W	0.01 W

表 3: 電力比例性が高い場合の各ノードのネットワークインタフェースのリンク帯域と消費電力特性

インタフェース	リンク帯域	e_f^{MAX}	e_f^{MIN}	E_f^{sleep}
OLT → ONU	10 Mbps	20 W	0 W	0 W
ONU → OLT	10 Mbps	20 W	0 W	0 W
ONU → 基地局	10 Mbps	4 W	0 W	0 W
基地局 → ONU	10 Mbps	4 W	0 W	0 W
マクロセル基地局 → 端末	10 Mbps	0 W	0 W	0 W
スモールセル基地局 → 端末	10 Mbps	0 W	0 W	0 W
端末 → マクロセル基地局	10 Mbps	1.0 W	0.7 W	0.01 W
端末 → スモールセル基地局	10 Mbps	0.4 W	0.1 W	0.01 W

レートやトラフィックの有無にかかわらず、一定となるように設定している。一方、電力比例性が高い場合には、ネットワーク機器の消費電力は、収容しているトラフィックのビットレートに比例し、かつ、トラフィックが存在しない場合には電力を全く消費しないように設定している。

3.2 評価指標

端末のネットワーク性能を評価するために、エンド間パケット廃棄率及びエンド間遅延時間を用いる。これらは、端末からOLTまでの経路上に存在する各ノードのインターフェースにおけるパケット廃棄率及び系内時間から算出する。また、消費電力の評価のために、端末を含めたシステム全体の消費電力と、端末を除いたネットワーク部分のみの消費電力を用いる。消費電力は、対象となる全てのノードの消費電力と、ノードが持つ全てのインターフェースの消費電力の総和である。

3.3 評価結果

以降に示す評価結果においては、端末は領域内に均一に存在し、指定した割合の端末がマクロセル基地局に、残りの端末がスモールセル基地局に接続する。端末のマクロセル基地局への接続割合を0.1から0.9まで変化させる。端末の接続先は、指定された割合を用いてランダムに決定される。評価はそれぞれのマクロセル基地局への接続割合に対して、100回ずつ行った。端末のトラヒックモデルを、通信周期を10分、ON区間における送信パケット数を10、パケットサイズを1,500バイトとした。これは、少量のデータを定期的に送信するIoT端末を想定している。

また、以降の評価結果で用いる図における「pattern x」という表記は、以下に示す各パターンを表している。なお、端末の同期度が高い場合は $\sigma = 0.9$ 、低い場合は、 $\sigma = 0$ としている。 $\sigma = 0.9$ の場合は、全ての端末は10分の周期の最初の1分間にトラヒックを発生させる。一方、 $\sigma = 0$ の場合は、全ての端末が10分間にトラヒックを発生させる。

- パターン1: 端末の同期度が低く、電力比例性が低い
- パターン2: 端末の同期度が低く、電力比例性が高い
- パターン3: 端末の同期度が高く、電力比例性が低い
- パターン4: 端末の同期度が高く、電力比例性が高い

3.3.1 端末の同期度が与える影響

まず、端末の同期度が与える影響に関する評価結果を示す。ここでは、ネットワーク機器の電力比例性は低い場合の結果を示す。端末のマクロセル基地局への接続割合を変化させた場合の、平均パケット廃棄率とシステム全体の消費電力の関係を図6(a)に、また、平均エンド間遅延時間とシステム全体の消費電力の関係を図6(b)にそれぞれ示す。端末数は、同期度が低いパターン1は30,000、50,000、70,000台、同期度が高いパターン3は3,000、5,000、7,000台とした。なお、端末数がパターン1では30,000台、パターン3では3,000台よりもそれぞれ少ない場合においては、パケット廃棄率が無視できるほど小さい。また、本評価環境においては、端末数がパターン1では92,362台、パターン3では9,380台をそれぞれ超えると、パケット廃棄率が0.1を超える。本報告においては、パケット廃棄率が0.1を超える場合は、ネットワークが端末を収容できないと判断している。

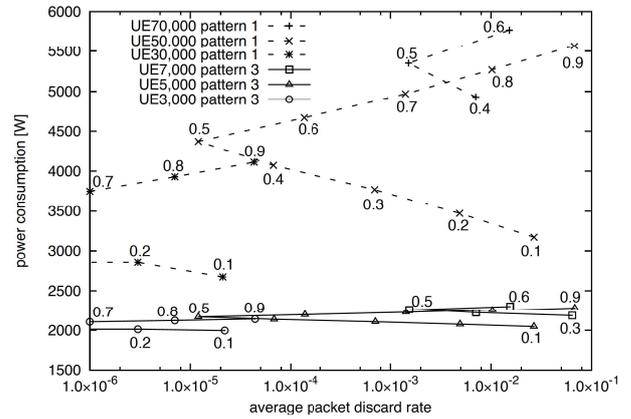
図6(a)及び図6(b)より、端末の同期度が低い場合は端末のマクロセル基地局への接続割合が極端に大きい、あるいは極端に小さい場合に、パケット廃棄率が大きく、エンド間遅延時間も大きいことがわかる。これは、多くの端末が接続された基地局のアップリンクインターフェースが輻輳するためである。また、端末の同期度にかかわらず、マクロセル基地局への接続割合が高くなると、システム全体の消費電力が大きくなることからわかる。これは、基地局へ端末が接続しパケット転送を行う際の消費電力、及び、基地局が端末を収容する際の消費電力が、スモールセル基地局に比べてマクロセル基地局のほうが大きいためである。

また、端末の同期度が低い場合は、高い場合と比較して、収容可能な端末数が多い。これは、同期度が低い場合、端末から発生するトラヒックの到着が時間的に分散するため、リンクを通過するトラヒックのビットレートが低くなり、より多くの端末を収容できるためである。

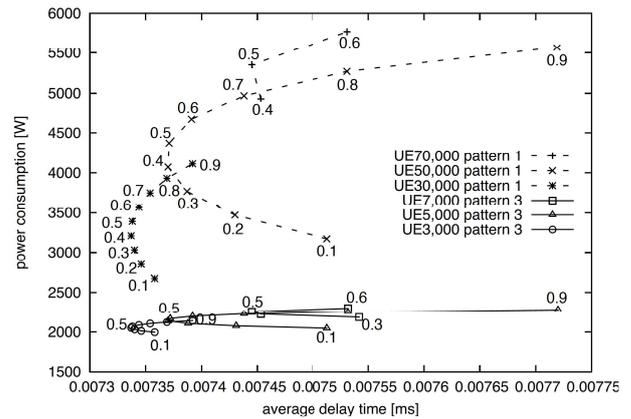
3.3.2 ネットワーク機器の電力比例性が与える影響

次に、ネットワーク機器の電力比例性が与える影響に関する評価結果を示す。収容する端末数と平均パケット廃棄率の関係を図7(a)に、また、収容する端末数とネットワーク部分の消費電力の関係を図7(b)にそれぞれ示す。端末数は、同期度が低い場合は500、2,000、8,000、32,000、92,362台、同期度が高い場合は500、1,000、2,000、4,000、9,380台とした。

図7(a)より、パターン1とパターン2、及び、パターン3とパターン4の結果がほぼ同一であることがわかる。これは、ネットワーク機器の電力比例性が、パケット廃棄率にほとんど影響を与えないことを示している。また、図7(b)より、ネッ



(a) 平均パケット廃棄率とシステム全体の消費電力の関係



(b) 平均エンド間遅延時間とシステム全体の消費電力の関係

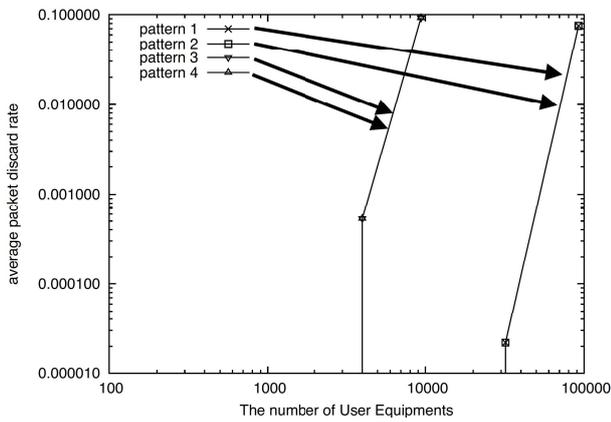
図6: 端末の同期度が与える影響

トワーク機器の電力比例性が低い場合（パターン1及びパターン3）は、ネットワーク部分の消費電力は、端末の同期度や端末数によらずほぼ一定であること、また、電力比例性が高い場合（パターン2及びパターン4）は、ネットワーク部分の消費電力は端末数の増加に伴って増大する一方で、端末の同期度には影響を受けないことがわかる。これは、ネットワーク機器の電力比例性が低い場合は、トラヒックのビットレートや、トラヒックの有無に対して消費電力が変化しないこと、また、電力比例性が高い場合は、端末数の増加にともない、ON区間におけるトラヒックのビットレートが増加し、消費電力が増大するためである。端末の同期度は、ON区間及びOFF区間の長さに影響を与えるため、一般的には消費電力が変化する要因となり得る。しかし、表3に示した消費電力特性から、ON区間におけるトラヒックのビットレートの変化と、スリープ動作が可能となるOFF区間の長さの変化が相殺されるため、消費電力は端末の同期度によらずほぼ一定となる。

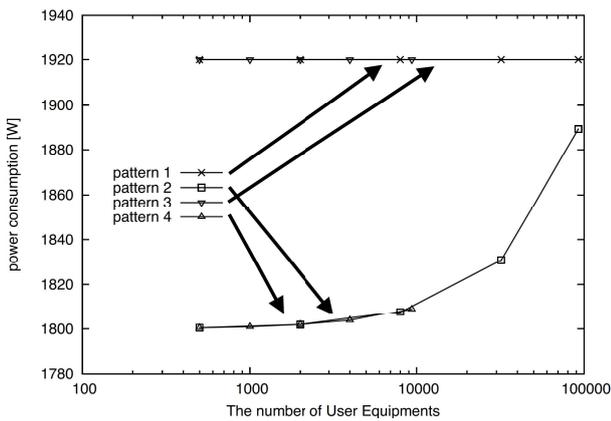
3.4 考察

評価結果より、マクロセル基地局への接続割合が極端に大きい、あるいは極端に小さい場合には、パケット廃棄率が大きく、エンド間遅延時間も大きいことがわかった。このことから、マクロセル基地局への接続割合は、今回の評価環境においては、0.3から0.6程度が良いと考えられる。さらに、今回の評価環境においては、端末数が、同期度が低い場合は30,000台、同期度が高い場合は3,000台以上となると、端末数の増大にともなうパケット廃棄率や遅延時間の増大が無視できなくなることがわかった。

一般的に、ネットワーク機器の電力比例性が高まることで、ネットワークが収容するトラヒック量が少ない場合に消費電力が低くなる。また、端末が発生させるトラヒックの同期度が高い場合は、同期度が低い場合に比べて、トラヒックが発生せず、スリープ動作が可能となる時間が長くなる一方で、トラヒックが発生する時間においては、ビットレートが高くなり、消費電力が高くなる。したがって、ネットワーク機器の電力比例性の



(a) 端末数と平均パケット廃棄率の関係



(b) 端末数とネットワーク部分の消費電力の関係

図 7: ネットワーク機器の電力比例性が与える影響

特性が、消費電力に大きな影響を与える。

また、今回の評価環境においては、ネットワーク機器の電力比例性が低い場合は、同期度や端末数にかかわらずネットワーク部分の消費電力はほとんど変わらないことがわかった。また、電力比例性が高い場合は、端末数に応じて消費電力が増加するが、同期度にはほとんどよらないことがわかった。これは、電力比例性が低く、トラフィックが存在しない場合であってもスリーブなどによる電力削減ができない場合においては、トラフィック量やその時間的変動に消費電力が影響を与えないこと、また、理想的な電力比例性を持つ場合には、消費電力はトラフィック量にのみ依存し、その時間的な変動には影響を受けないことを示している。

現在のネットワークにおける機器の電力比例性は極めて低い。一方で、トラフィックが発生していない時間帯にスリーブを行うことは現在の機器においても比較的容易である。したがって、現在のネットワークにおいて間欠的にトラフィックを発生させるような端末を収容する場合には、トラフィックの同期度を高めたうえで、トラフィックが発生しない時間帯にスリーブを行うことで、消費電力を低く抑えることができると考えられる。一方で、トラフィックの同期度を過度に高めることは、パケット廃棄率や遅延時間の増加を引き起こすことも明らかとなった。そのため、端末が発生させるトラフィックの性能要求に応じた、同期度の調整が必要である。さらに、将来的に機器の電力比例性が向上した場合は、トラフィックの同期度が消費電力に与える影響は小さくなるため、トラフィック性能を考慮すると、トラフィックの同期度を低く設定すべきと考えられる。

4. まとめと今後の課題

本報告では、仮想化技術に基づいた集中制御を前提としたモバイルアクセスネットワークに着目し、数学的解析手法に基づいて、その性能を評価した。

今後の課題として、構築した性能評価モデルを利用して、仮

想化技術に基づいてネットワーク全体を集中制御することの有効性を検証することが挙げられる。また、モバイルアクセスネットワーク以外のネットワーク環境への適用も重要な課題である。

文献

- [1] P. Marsch and G.P. Fettweis, Coordinated Multi-Point in Mobile Communications: From Theory to Practice, Cambridge University Press, July 2011.
- [2] G. Yuan, X. Zhang, W. Wang, and Y. Yang, "Carrier Aggregation for LTE-Advanced Mobile Communication Systems," IEEE Commun. Mag., vol.48, no.2, pp.88–93, Feb. 2010.
- [3] D. Gesbert, M. Shafi, D. Shiu, P.J. Smith, and A. Naguib, "From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.21, no.3, pp.281–302, April 2003.
- [4] C. I, Y. Yuan, J. Huang, S. Ma, C. Cui, and R. Duan, "Rethink Fronthaul for Soft RAN," IEEE Commun. Mag., pp.82–88, Sept. 2015.
- [5] A.D.L. Oliva, X.C. Pérez, A. Azcorra, A.D. Giglio, F. Cavaliere, D. Tiegelbekkers, J. Lessmannm, T. Haustein, A. Mourad, and P. Iovanna, "Xhaul: Toward an Integrated Fronthaul/Backhaul Architecture in 5G Networks," IEEE Wireless Communications, pp.32–40, Oct. 2015.
- [6] A. Checko, H.L. Christiansen, Y. Yan, L. Scolari, G. Kardaras, M.S. Berger, and L. Dittmann, "Cloud RAN for Mobile Networks - A Technology Overview," IEEE Communications Surveys Tutorials, vol.17, no.1, pp.405–426, Firstquarter 2015.
- [7] D. Kreutz, F.M.V. Ramos, P.E. Verissimo, C.E. Rothenberg, S. Azodolmolky, and S. Uhlig, "Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey," Proc. IEEE, vol.103, no.1, pp.14–76, Jan. 2015.
- [8] R. Mijumbi, J. Serrat, J.L. Gorricho, N. Bouten, F.D. Turck, and R. Boutaba, "Network Function Virtualization: State-of-the-Art and Research Challenges," IEEE Communications Surveys Tutorials, vol.18, no.1, pp.236–262, Firstquarter 2016.
- [9] R. Martínez, A. Mayoral, R. Vilalta, R. Casellas, R. Muñoz, S. Pachnicke, T. Szyrkowicz, and A. Autenrieth, "Integrated SDN/NFV Orchestration for the Dynamic Deployment of Mobile Virtual Backhaul Networks over a Multilayer (Packet/Optical) Aggregation Infrastructure," IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, vol.9, no.2, pp.A135–A142, Feb. 2017.
- [10] C.F. Lam, Passive Optical Networks: Principles and Practice, Academic Press, 2011.
- [11] P. Mahadevan, P. Sharma, S. Banerjee, and P. Ranganathan, "A Power Benchmarking Framework for Network Devices," NETWORKING 2009, pp.795–808, May 2009.
- [12] D. Gross, J.F. Shortle, J.M. Thompson, and C.M. Harris, Fundamentals of Queueing Theory, 4th Edition, John Wiley and Sons, Inc., 2008.
- [13] A.A.A. Haija and C. Tellambura, "Small-Macro Cell Cooperation for HetNet Uplink Transmission: Spectral Efficiency and Reliability Analyses," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.35, no.1, pp.118–135, Jan. 2017.
- [14] J.G. Andrews, S. Singh, Q. Ye, X. Lin, and H.S. Dhillon, "An Overview of Load Balancing in HetNets: Old Myths and Open Problems," IEEE Wireless Communications, vol.21, no.2, pp.18–25, April 2014.
- [15] H. Ramazanali, A. Mesodiakaki, A. Vinel, and C. Verikoukis, "Survey of User Association in 5G HetNets," 2016 8th IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM), pp.1–6, Nov. 2016.