

TWDM-PONにおける遅延及びサーバ性能制約を考慮した ベースバンド処理機能の配置最適化

長谷川 剛[†] 村田 正幸^{††} 中平 佳裕^{†††} 鹿嶋 正幸^{†††} 阿多 信吾^{††††}

[†] 東北大学 電気通信研究所 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

^{††} 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

^{†††} 沖電気工業株式会社 〒335-8510 埼玉県蕨市中央 1-16-8

^{††††} 大阪市立大学 大学院工学研究科 〒558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本 3-3-138

E-mail: †hasegawa@riec.tohoku.ac.jp, ††murata@ist.osaka-u.ac.jp, †††{nakahira523,kashima567}@oki.com,
††††ata@osaka-cu.ac.jp

あらまし 本報告では、TWDM-PON を用いて構築されるモバイルネットワークのフロントホールネットワークを対象に、トラフィック毎に遅延及びサーバ資源に制約がある場合における、ベースバンド処理の機能分割の最適化を行う枠組みについて議論する。具体的には、TWDM-PON のネットワーク資源量、基地局数、トラフィック量、サーバ資源量や消費電力、トラフィック毎の遅延制約などを考慮して、ベースバンド処理の各レイヤの処理を基地局サイトと局舎サイトで分割して実行することで、システム性能を最適化する最適化問題を定義した。数値例を示し、資源量を増強することが収容可能トラフィック量に与える影響を明らかにした。

キーワード 第5世代携帯電話、フロントホール、TWDM-PON、機能分割、ベースバンド処理

Delay- and server-resource-aware optimization of baseband processing functions

Go HASEGAWA[†], Masayuki MURATA^{††}, Yoshihiro NAKAHIRA^{†††}, Masayuki KASHIMA^{†††}, and Shingo ATA^{††††}

[†] Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan

^{††} Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

^{†††} Oki Electronics Industry Co., Ltd.

1-16-8, Chuo, Warabi-shi, Saitama 335-8510, Japan

^{††††} Graduate School of Engineering, Osaka City University

3-3-138, Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 565-0871, Japan

E-mail: †hasegawa@riec.tohoku.ac.jp, ††murata@ist.osaka-u.ac.jp, †††{nakahira523,kashima567}@oki.com,
††††ata@osaka-cu.ac.jp

Abstract In this report, the mathematical model for power consumption of 5G fronthaul network with functional splitting of baseband processing is constructed, with constraints on server resources and traffic latency, to make clear the performance characteristics in functional splitting. We formulate the integer linear programming problem for minimizing the total power consumption of 5G fronthaul network based on the capacity of DWDM-PON, the number of RRHs in each cell site, server resources, latency constraints, the amount of traffic from each RRH, physical/virtual server power consumption characteristics. The numerical examples are shown for confirming the effectiveness of the proposed model and exhibit effect of resource enhancement on the network system capacity.

Key words 5G, fronthaul network, TWDM-PON, functional splitting, baseband processing

1. はじめに

LTE や 5G ネットワークにおいては、ベースバンド処理を基地局で行わず、基地局を収容している局舎(セントラルオフィス)に設置された Base Band Unit (BBU) において行うことで、基地局の導入コストの低減や、複数基地局の協調制御が可能となる CRAN (Cloud RAN) 構成が用いられることがある [1, 2]。さらに、セントラルオフィスにおけるベースバンド処理をハードウェアではなく汎用サーバ上のソフトウェアや仮想サーバで行うことによって、トラフィック量やセル構成に応じてサーバ資源を適応的に利用することが可能となり、セントラルオフィス資源の利用効率の向上や消費エネルギーの削減が可能となる。この時、基地局とセントラルオフィス間のネットワークは Common Public Radio Interface (CPRI) と呼ばれるインタフェースによって接続され、ベースバンド処理が行われていない基地局のトラフィックが運ばれるが、CPRI の特性上、そのトラフィック量が大きく、かつ、モバイル端末からの実トラフィック量に依存しないため、フロントホールネットワークの敷設コストが増大する。5G ネットワークにおいてセルサイトの基地局の Massive MIMO 化が進展することで、この問題はさらに深刻化する。この問題に対しては、フロントホールネットワークをイーサネット等のパケットネットワークで構築する Next Generation Fronthaul Interface (NGFI) [3] や、TWDM Passive Optical Networks (TWDM-PON) による低コストなフロントホールネットワークの構築 [4, 5] 等が検討されている。

また、5G ネットワークにおいては、ベースバンド処理をレイヤ境界で分割し、低いレイヤの処理を基地局 (RRH) 側で行い、処理後のトラフィックをフロントホールネットワークで運び、残りの処理をセントラルオフィス側で行う、機能分割 (Function split) が検討されている [6, 7]。低レイヤ処理を基地局側で行うことにより、フロントホールネットワーク負荷が低減されることが期待される。また、処理を汎用サーバ上で動作する仮想サーバで行うことにより、機能分割の境界をアプリケーション要求やトラフィック量などに動的に変更することが可能となる。しかし、基地局側にベースバンド処理を行うためのサーバ機器が必要となるため、システム全体の消費電力や導入・運用コストは増大するため、それらを考慮した機能分割の決定が課題となる。

この問題に対しては、RRH 毎に CRAN/DRAN 構成を選択する手法 [8]、機能分割のパターンがパケットネットワークで構成されるフロントホールネットワーク負荷に与える影響の評価 [9]、ベースバンド処理とモバイル端末処理を合わせてクラウド/フォグノードへオフロードする手法 [10] などが既存研究として挙げられる。また、[11] では、仮想サーバ環境を用いて機能分割に関する実験を行い、フロントホールネットワークの伝播遅延時間の許容範囲に関する議論を行っている。我々の研究グループでは、[12] において、5G のベースバンド処理の機能分割パターンが、システム全体の消費電力やフロントホールネットワークに与えるトラフィック負荷などを考慮し、RRH から発生するセルラトラフィック (以下、RRH トラフィックと称する) を処理する際の機能分割を RRH 毎に決定することでシステムの最適化を図ることを目指し、そのための基礎的な数学モデルを構築した。しかし、現実的な機能分割結果を得るために必要な、アプリケーションの遅延時間制約や、セルサイト及びセントラルオフィスのサーバ資源量の制約が考慮されていない。

そこで本報告では、[12] の検討に基づき、アプリケーショントラフィックにとって重要な遅延時間制約や、セルサイト及びセントラルオフィスに設置されるサーバ資源量の制約を取り扱えるように数学モデルを拡張することにより、より現実的な機能分割の最適化を行うための手法を検討する。そのために、まず、TWDM-PON を利用して構成されるフロントホールネットワークを、TWDM-PON の容量、RRH の分布、各 RRH から発生するトラフィック量、システムを構成する各要素の消費電力特性などに加えて、アプリケーションの遅延時間制約やサーバ資源量を考慮してモデル化する。次に、RRH トラフィックのベースバンド処理を行うために必要となる消費電力を最小化するための最適化問題を、整数線形計画問題として定式化する。数値例を示すことによって、提案する数学モデルが適切な機能分割結果を与えることを示す。さらに、TWDM-PON の波長数やセルサイトのサーバ能力及び台数といった、システムの資源量を増強することが、収容可能なトラフィック量の増大にどのように寄与するかについて議論する。

2. 解析モデル

2.1 ネットワークモデル

図 1 に、本稿で用いるネットワークモデルを示す。本モデルは、文献 [8] に示されたものに基づき、拡張を行ったものであり、我々の研究グループにおける過去の検討 [12] において構築

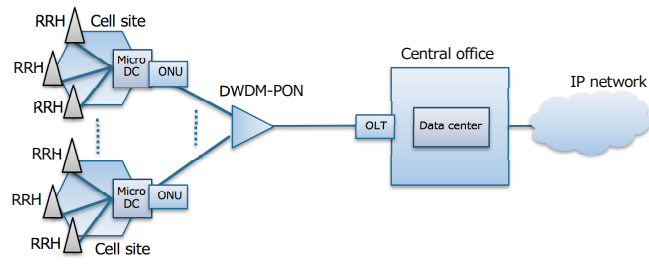


図 1: ネットワークモデル

したものである。

複数のセルサイト (Cell site) が TWDM-PON によってセントラルオフィス (Central Office) に接続されている。セルサイトには 1 つあるいは複数の Remote Radio Head (RRH) が収容されており、各 RRH で発生したトラフィックは、セルサイトの Optical Network Unit (ONU)、及びセントラルオフィスの Optical Line Terminal (OLT) を介して運ばれる。TWDM-PON は複数の波長を用いることができる Passive Optical Network (PON) であり、セルサイトの ONU は収容される波長を選択できるものとする。セルサイト及びセントラルオフィスにはベースバンド処理を行うためのサーバが収容されたデータセンター (Data center) が設置されており、セルサイトのそれを特にマイクロデータセンター (Micro DC) と呼ぶ。

各 RRH で発生したトラフィックに対して、セルサイトのマイクロデータセンター、セントラルオフィスのデータセンター、あるいはその両方でベースバンド処理が行われ、IP パケットが IP ネットワーク (IP network) へ送出される。

2.2 ベースバンド処理の機能分割モデル

本報告においては、[13, 14] を参考に構築したベースバンド処理の機能分割モデルを用いる。図 2 に、1 つの RRH から発生し、RRH がコアネットワークに向けて送信される上りセルラトラフィックのベースバンド処理が行われる際の、4 パターンの機能分割 (Split 1-4) における、セルサイト及びセントラルオフィスで行われる処理を示している。Split 1 は CRAN 構成、Split 4 は Distributed RAN (DRAN) 構成に相当する。表 1 に、各 Split を用いた場合における、RRH 及びセントラルオフィスにおいて消費される CPU 資源量、処理遅延時間、フロントホールネットワークを流れるトラフィック量をまとめている。本表における処理遅延時間は、[13] に示された実験結果に基づいている。CPU 使用率は、[14] における実験で用いられたサーバを低速サーバとし、その値は文献中に示されている値を、CPU コア 1 つ分を 100% として表している。高速サーバは、[13] における実験で用いられているものを想定し、[15] で示されている CPU のベンチマークスコアに基づき、CPU 使用率と処理遅延時間を決定している。

この表から、Split 1 から 4 に向かうにつれ、セルサイト側での処理量が増加、セントラルオフィス側での量が減少し、それにとりま、処理遅延時間が変化することがわかる。それぞれの処理量は、サーバ資源の使用量及び消費電力に影響を与える。また、それらの値はサーバ仕様大きく影響を受ける。一方、Split 1 から 4 に向かうフロントホールネットワークのトラフィック量が減少する。これは、TWDM-PON で構成されるフロントホールネットワークに与える負荷に影響を与える。したがって、システム全体の最適化を行うためには、セルサイト及びセントラルオフィスにおけるサーバ資源量、サーバの消費電力特性、フロントホールネットワークのキャパシティ及び消費電力特性などを考慮し、各トラフィックの機能分割を決定することが求められる。

2.3 消費電力モデル

RRH から発生したセルラトラフィックは、セルサイト及びセントラルオフィスに設置されたデータセンターの物理サーバ上で稼働する仮想サーバにおいてベースバンド処理が行われる。仮想サーバの稼働及びベースバンド処理に必要な消費電力は、文献 [16] のモデルに基づく、以下の消費電力モデルに基づいて決定する。 $P(x)$ は負荷が x の時の消費電力である。

$$P(x) = \begin{cases} 0 & x = 0 \\ \frac{M-I}{G}x + I & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 G は仮想サーバが処理できる最大の処理量を、 M はその時の消費電力を表す。 I は、仮想サーバは稼働しているが処

表 1: 機能分割パターンにおける各性能指標値

サーバ種別	低速サーバ				高速サーバ			
	Split 1	Split 2	Split 3	Split 4	Split 1	Split 2	Split 3	Split 4
セルサイトでの CPU 使用率 [%]	0	32.2	126.7	139.5	0	12.4	48.7	53.7
セルサイトでの処理遅延時間 [μ s]	0	111	1,772	1,972	0	43	682	758
セントラルオフィスでの CPU 使用率 [%]	139.5	107.3	12.8	0	53.7	41.3	4.9	0
セントラルオフィスでの処理遅延時間 [μ s]	1,972	1,861	200	0	758	716	77	0
TWDM-PON を流れるトラフィック量 [Gbps]	2.46	0.72	0.054	0.054	2.46	0.72	0.054	0.054

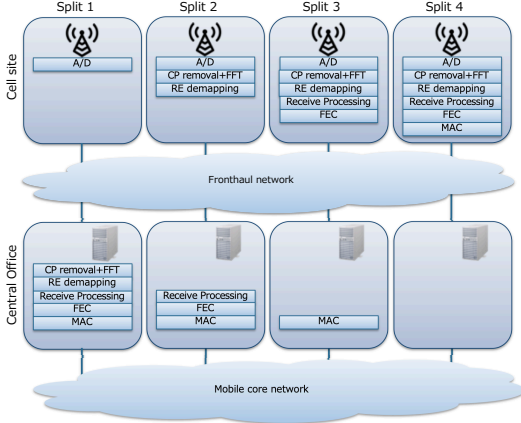


図 2: ベースバンド処理の機能分割パターン [14]

理を行っていない時の消費電力を表す。消費電力は処理量に応じて線形的に増加する。仮想サーバが処理を行わない際にその仮想サーバを停止できる場合には、消費電力は 0 となる。

TWDM-PON は、トラフィックを収容する波長数に応じて消費電力が発生するものとする。すなわち、全ての RRH から発生するトラフィックを少ない波長数で収容することによって、消費電力を抑えることができる。

3. 最適化問題の定式化

本章では、2. 章で示したネットワークにおいて、セルラトラフィックをベースバンド処理して IP ネットワークへ運ぶために必要となる総消費電力を最小化するための最適化問題を整数線形計画問題として定式化する。

3.1 変数定義

2. 章で示したモデルに基づいて以下のように変数を定義する。ネットワークに存在する RRH の総数を R とする。セルサイト及びセントラルオフィスをノードと総称し、その総数を N とする。ただし、セントラルオフィスをノード 1、セルサイトをノード 2-ノード N とする。RRH が収容されるノードを決定する変数 a_n^i を導入し、RRH i ($1 \leq i \leq R$) がノード n ($1 \leq n \leq N$) に収容されている時に $a_n^i = 1$ 、そうでなければ $a_n^i = 0$ とする。TWDM-PON の波長数を W とし、波長 w ($1 \leq w \leq W$) の帯域を B_w とする。機能分割のパターン数を K とし、Split k ($1 \leq k \leq K$) と記述する。RRH i のトラフィックがノード n で処理され、Split k が適用され、TWDM-PON の波長 w で運ばれる時の、TWDM-PON を流れるトラフィック量を $B_{n,k,w}^i$ とする。

$X_{n,k}$ ($2 \leq n \leq N, 1 \leq k \leq K$) を、RRH トラフィックに対して Split k を適用した際の、ノード n で発生する消費電力とする。 $X_{1,k}$ ($1 \leq k \leq K$) を、RRH トラフィックに対して Split k を適用した際の、セントラルオフィスのデータセンタで発生する消費電力とする。 $D_{n,k}$ ($2 \leq n \leq N, 1 \leq k \leq K$) を、RRH トラフィックに対して Split k を適用した際の、ノード n で発生する処理遅延時間とする。 $D_{1,k}$ ($1 \leq k \leq K$) を、RRH トラフィックに対して Split k を適用した際の、セントラルオフィスのデータセンタで発生する処理遅延時間とする。 C_n を、ノード n の物理サーバを稼働することで発生する消費電力とする。 L_w を、TWDM-PON の波長 w を用いることで発生する消費電力とする。 τ_n を、セントラルオフィスからノード n までの TWDM-PON の伝播遅

延時間とする。 P_n を、ノード n におけるサーバ資源量とする。

3.2 最適化問題

総消費電力を最小化するための最適化問題を以下のように定義する。

Minimize :

$$\sum_{n=2}^N \sum_{i=1}^R \sum_{k=1}^K \sum_{w=1}^W y_{n,k,w}^i (X_{n,k} + X_{1,k})$$

$$+ \sum_{n=1}^N x_n C_n + \sum_{w=1}^W l_w L_w \quad (2)$$

Subject to :

$$y_{k,n,w}^i \in \{0, 1\} \quad (3)$$

$$y_{k,n,w}^i \leq a_n^i \quad \forall i, n, k, w \quad (4)$$

$$\sum_{n=2}^N \sum_{k=1}^K \sum_{w=1}^W y_{n,k,w}^i = 1 \quad \forall i \quad (5)$$

$$\sum_{n=2}^N \sum_{i=1}^R \sum_{k=1}^K y_{n,k,w}^i B_{n,k,w}^i \leq B_w \quad \forall w \quad (6)$$

$$y_{n,k,w}^i \{D_{n,k} + \tau_n + D_{1,k}\} \leq \Delta_i \quad \forall i, n, k, w \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^R \sum_{w=1}^W y_{n,k,w}^i \rho_k < 100 \cdot P_n \quad \forall n \quad (8)$$

ここで、決定変数は $y_{k,n,w}^i, x_n, l_w$ であり、 $y_{k,n,w}^i$ は RRH i のトラフィックに Split k を適用し、ノード n で処理され、TWDM-PON の波長 w で運ばれる時に 1、そうでないなら 0 である。 x_n はノード n のデータセンタの物理サーバが稼働するなら 1、そうでないなら 0 である。 l_w は TWDM-PON の波長 w が用いられるなら 1、そうでないなら 0 である。ただし、 x_n, l_w は $y_{k,n,w}^i$ によって以下のように決定される。

$$x_n = \begin{cases} 1 & \text{if } \sum_{i=1}^R \sum_{k=1}^K \sum_{w=1}^W y_{n,k,w}^i \geq 1 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

$$l_w = \begin{cases} 1 & \text{if } \sum_{n=2}^N \sum_{i=1}^R \sum_{k=1}^K y_{n,k,w}^i \geq 1 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

最小化する式 (2) の第 1 項は RRH トラフィックのベースバンド処理を行う、マイクロデータセンタ及びセントラルオフィスの仮想サーバの消費電力であり、第 2 項はマイクロデータセンタ及びセントラルオフィスの物理サーバの消費電力であり、第 3 項は TWDM-PON の波長を用いることで発生する消費電力である。制約式 (3) は、決定変数が 0 あるいは 1 のみを取ることを表す。制約式 (4) は、RRH トラフィックの処理が、その RRH が収容されているセルサイト以外のマイクロデータセンタでベースバンド処理が行われないことを表す。制約式 (5) は、全ての RRH トラフィックは、いずれか 1 つのマイクロデータセンタ、あるいはセントラルオフィスのデータセンタでベースバンド処理が行われることを表す。制約式 (6) は、TWDM-PON の各波長が収容するトラフィックの総量が、各波長のキャパシティを超えない

ことを表す。制約式 (7) は、RRH トラヒックのセルサイト及びセントラルオフィスにおける処理遅延時間と、TWDM-PON における伝播遅延時間の和が、トラヒックに設定された上限を超えないことを表す。制約式 (8) は、セルサイト及びセントラルオフィスにおけるベースバンド処理負荷が、それぞれに設置されたサーバ資源量を超えないことを表す。

4. 数 値 例

本章では、3. 章において定式化した最適化問題の数値例を示し、消費電力が最小化される機能分割パターンが導出されることを示す。また、システムの資源増強を行うシナリオを想定し、資源増強の種類が収容可能なトラヒック量に与える影響について検討する。

最適化問題の解は CPLEX [17] を用いて得た。最適解が複数存在する、すなわち、総消費電力が最小となる機能分割パターンが複数存在する場合には、そのうちの 1 つの解を用いた。

4.1 パラメータ設定

図 1 において、セルサイト数を 1 とし、 $N = 2$ とする。TWDM-PON の 1 波長あたりのキャパシティは 10 [Gbps] とする。1 つの RRH から発生するトラヒック量は表 1 に基き 0.054 [Gbps] とした。

TWDM-PON の 1 つの波長を稼働するのにかかる消費電力は波長によらず $L_w = 20$ [W] とする。機能分割パターンの総数は $K = 4$ とし、各機能分割パターンにおける、低速サーバ及び高速サーバを用いた場合の CPU 使用率、処理遅延時間および TWDM-PON に与えるトラヒック負荷は表 1 に従う。セルサイト及びセントラルオフィスのデータセンタのサーバにおけるベースバンド処理は、物理サーバ上で動作する仮想サーバによって行われるものとする。セントラルオフィスの物理サーバは常に動作しているものとし、その消費電力 (C_1) は 200 [W] とする。セルサイトにおいては、1 つ以上の仮想サーバを稼働する際には物理サーバが稼働する。

また、セルサイト及びセントラルオフィスで稼働する仮想サーバの消費電力は 2.3 節で示した式 (1) に従うものとする。ただし、式 (1) における x は CPU 使用率 [%] とし、その上限はセルサイト及びセントラルオフィスで稼働することができるサーバ数 (P_n) に 100 [%] を乗じた値である。消費電力値は [15] に示された各サーバの CPU の Thermal Design Power (TDP) 値、および CPU コア数に基づき、全ての CPU コアの使用率が 100 [%] である時の消費電力が TDP 値に相当すると仮定する。さらに、[18] に基づき、サーバ全体の消費電力のうち CPU が占める割合を 30 [%] と仮定してサーバの最大消費電力を決定し、CPU 使用率が 0 [%] の時の消費電力はその 50 [%] とする。

以降の評価では、以下に示すシナリオ 1 を基本とする。

シナリオ 1 $W=3, N=2, P_1=\infty, P_2=3, D_n=2,000$ [μ s] ($2 \leq n$), $\tau_n=10$ [μ s] ($2 \leq n$), セルサイトのサーバは低速サーバ、セントラルオフィスのサーバは高速サーバ
さらに、システムの資源増強を行うことを想定し、3 つのシナリオを比較する。各シナリオにおける、シナリオ 1 との相異点は以下の通りである。なお、このパラメータ変更内容は、シナリオ 2-4 における収容可能な RRH トラヒック数がほぼ同じとなるように決定している。

シナリオ 2 セルサイトのサーバを高速サーバに変更

シナリオ 3 P_2 を 3 から 8 に変更

シナリオ 4 W が 3 から 6 に増加

4.2 評価結果

図 3 に、シナリオ 1 における、収容する RRH 数に対する、選択された機能分割パターンと、システムの総消費電力の関係を示す。機能分割パターンの図における縦軸は、消費する TWDM-PON の帯域を表しており、Split 1、2、3、4 はそれぞれ黄、青、緑、紫でプロットしている。収容する RRH トラヒック数に対して、存在する複数のプロットは、TWDM-PON の異なる波長における収容の様子を表している。

シナリオ 1 においては、収容可能な RRH トラヒック数は 18 であった。図から、収容する RRH トラヒック数が少ない場合には、Split 3 あるいは 4 が多く選択されるが、収容する RRH トラヒック数が増加すると Split 1 あるいは 2 が多く選択されていることがわかる。これは、セルサイトにおけるサーバ資源が不足するため、セルサイトにおける CPU 使用量が大きい Split 3 や 4 を用いることができないためである。また、システムの総消費電力は、収容する RRH トラヒック数に応じて増加すると共に、使用する波長数が増えた際にも増加していることがわかる。

図 4-6 に、シナリオ 2-4 における、収容する RRH 数に対する、選択された機能分割パターンと、システムの総消費電力の関係を示す。システムの総消費電力の図においては、比較のた

めに、シナリオ 1 の結果を合わせてプロットしている。Split 2、3、4 において、収容することができる RRH トラヒック数はそれぞれ 29、29、30 であった。

シナリオ 2 においては、シナリオ 1 に比べ、Split 3 が多く選択されることがわかる。これは、セルサイトのサーバが高速サーバになったため、多くの処理を行うことが可能となり、Split 3 を選択できるようになったためである。一方で、消費電力は、シナリオ 1 に比べて大きくなっている。これは、セルサイトのサーバが高速サーバになり、消費電力が増加したためである。

シナリオ 3 においては、シナリオ 1 に比べ、Split 3、4 が多く選択されることがわかる。これは、シナリオ 2 と同様に、セルサイトのサーバ台数の増加によってサーバ資源量が潤沢になったため、多くの処理を行うことが可能となり、Split 3、4 を選択できるようになったためである。また、消費電力は、収容 RRH トラヒック数が 10 以上の場合には、シナリオ 1 よりも小さくなっている。これは、Split 3、4 が多く選ばれるため、フロントホールネットワークである TWDM-PON の使用波長数が抑えられるためである。

シナリオ 4 においては、シナリオ 1 に対してサーバ資源量は変化しないため、選択される Split はシナリオ 1 と同じになる。しかし、TWDM-PON の波長数が大きいいため、より多くの RRH トラヒックを収容できる。

最後に、シナリオ 2、3、4 におけるシステムの総消費電力を比較すると、システム 2 のそれが最も大きく、シナリオ 3 のそれが最も小さいことがわかる。その差はおよそ 140 [W] であり、シナリオ 3 の消費電力の約 25% に相当する。この結果から、ほぼ同数の RRH トラヒックを収容可能なシステムであっても、その構成によって、システムの総消費電力は大きく異なることがわかる。これは、収容トラヒック量を増加するために資源量の増強を行う際には、本稿で提案した手法によって増強方法を決定することが効果的であることを示している。

5. 関連研究

5G ネットワークにおける機能分割問題に関しては、既存研究が多数存在する。文献 [9] では、ベースバンド処理の機能分割が、フロントホールネットワーク負荷に与える影響を、セル構成や多重化の影響を考慮して評価している。フロントホールネットワークにはイーサネット等のパケットネットワークを想定し、トラヒックのパケット化が与える影響に着目している。しかし、パケットネットワークでは回避することができないキューイング遅延の影響が考慮されていない。本報告では、Dynamic Bandwidth Allocation (DBA) によって各サイトが使用できる帯域が確保され、かつ遅延時間の保証も可能な DWDM-PON を前提としてしている。

文献 [19] においては、機能分割問題を Virtual Network Embedding (VNE) 問題としてとらえ、整数計画問題として定式化し、Mobile Virtual Network Operator (MVNO) からのネットワーク構築要求に対して適切な機能分割を行った仮想ネットワークを構築する手法を提案している。しかし、機能分割を適用した際にセルサイト及びセントラルオフィスで必要となるサーバ資源量についても単純なモデルが用いられており、現実的ではないと考えられる。また、フロントホールネットワークに具体的なネットワーク技術を想定しておらず、消費電力も考慮されていない。本報告では物理/仮想サーバの消費電力をベースバンド処理量に応じて決定している。また、DWDM-PON を用いてフロントホールネットワークを構築することを想定し、その消費電力も考慮して機能分割を決定する最適化問題を定式化している。

文献 [10] においては、ベースバンド処理の機能分割と、モバイル端末上で実行される負荷の大きいタスクの両方を、フォグノードあるいはクラウドノードへオフロードすることで、モバイルアプリケーションの遅延制約を考慮しながら消費エネルギーを最小化するための最適化問題を定式化している。その際、文献 [20] で提示されているベースバンド処理の各プロセスに必要となる処理量を用いている。しかし、フロントホールネットワーク及びバックホールネットワークに具体的なネットワーク技術を想定しておらず、その消費エネルギーモデルも現実と合っていないと考えられる。本報告における解析モデルはサーバ、ネットワークノード等の消費電力モデルとしてよく用いられる文献 [16] に示された線形モデルを用いており、またフロントホールネットワークを構成する DWDM-PON の消費電力についても具体的な装置構成に基づいてモデル化している。

文献 [8] では、DWDM-PON によって接続された複数のセルサイトで発生するセルトラヒックのベースバンド処理を、セルサイトに設置されたフォグノード、あるいはセントラルオフィスに設置した BBU pool のいずれで行うかを決定するかを、消費電力を最小化するように選択する問題を定式化している。

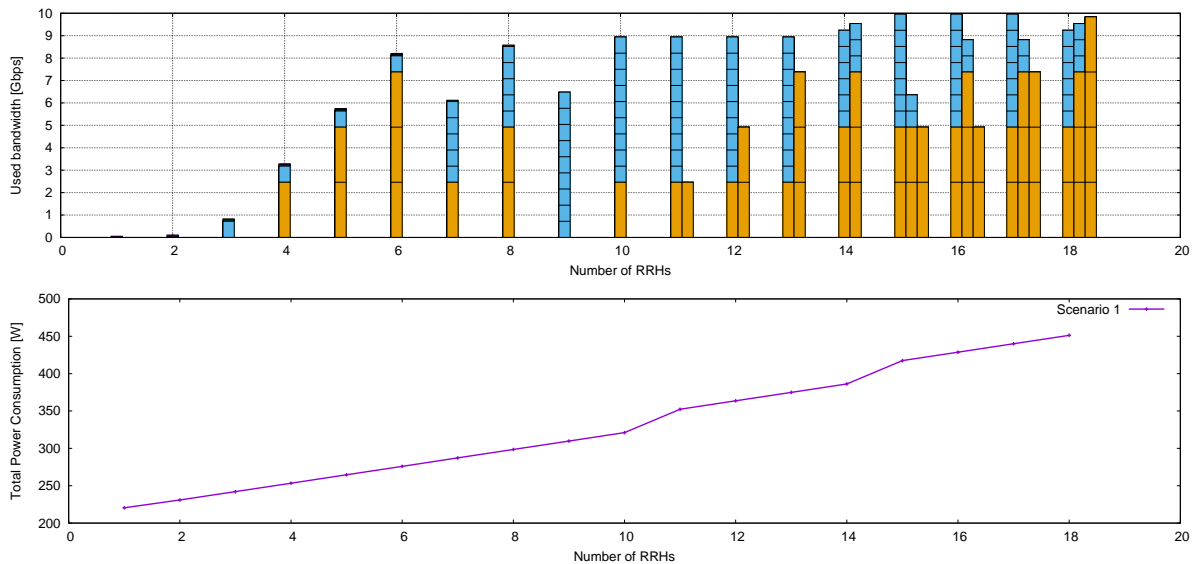


図3: シナリオ1の評価結果 (上: 選択された機能分割の分布 下: 総消費電力)

しかし、示されているモデルはネットワークポロジ制約を表現できていない、などの点で不完全であり、またベースバンド処理を行われた後のIPトラフィックを無視している。また、5Gにおける機能分割を考慮していない。

6. まとめと今後の課題

本稿では、TWDM-PONによって構築される5Gフロントホールネットワークにおける、ベースバンド処理の機能分割の特性を明らかにするために、システム全体の消費電力を最小化するための機能分割の選択問題を、整数線形計画問題として定式化し、数値例を示した。特に、サーバ資源量の制約と、トラフィックの遅延制約を問題に組み込むことで、より現実的な状況を反映した。その結果、提案した最適化問題を解くことで、システムの総消費電力が最小化される機能分割パターンを導出できることを示した。また、応用例として、ネットワークキャパシティを拡大するためのシステム資源の増強方法によって、システムの総消費電力が大きく異なることを示した。

今後の課題として、より大規模かつ現実的なネットワーク環境を想定した数値評価を行い、機能分割戦略を検討することが挙げられる。そのためには、定式化した最適化問題が持つ多くのパラメータを適切に設定することが重要となる。また、ILPソルバによる計算時間の評価も重要である。

文献

- [1] J. Wu, Z. Zhang, Y. Hong, and Y. Wen, "Cloud radio access network (C-RAN): a primer," *IEEE Network*, vol. 29, pp. 35–41, Jan. 2015.
- [2] M. Peng, Y. Sun, X. Li, Z. Mao, and C. Wang, "Recent advances in cloud radio access networks: System architectures, key techniques, and open issues," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, pp. 2282–2308, Mar. 2016.
- [3] IEEE Standards Association, "P1914.1 - IEEE draft standard for packet-based fronthaul transport networks," available from <https://standards.ieee.org/project/1914.1.html>.
- [4] S. Zhou, X. Liu, F. Effenberger, and J. Chao, "Low-latency high-efficiency mobile fronthaul with TDM-PON (mobile-PON)," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 10, pp. A20–A26, Jan. 2018.
- [5] I. A. Alimi, A. L. Teixeira, and P. P. Monteiro, "Toward an efficient C-RAN optical fronthaul for the future networks: A tutorial on technologies, requirements, challenges, and solutions," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, pp. 708–769, Nov. 2017.
- [6] L. M. P. Larsen, A. Checko, and H. L. Christiansen, "A survey of the functional splits proposed for 5G mobile crosshaul networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, pp. 146–172, Oct. 2018.
- [7] M. A. Habibi, M. Nasimi, B. Han, and H. D. Schotten, "A comprehensive survey of RAN architectures toward 5G mobile communica-

tion system," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 70371–70421, May 2019.

- [8] R. I. Tinini, L. C. M. Reis, D. M. Batista, G. B. Figueiredo, M. Tornatore, and B. Mukherjee, "Optimal placement of virtualized BBU processing in hybrid cloud-fog RAN over TWDM-PON," in *Proceedings of GLOBECOM 2017*, Dec. 2017.
- [9] C.-Y. Chang, R. Schiavi, N. Nikaiein, T. Spyropoulos, and C. Bonnet, "Impact of packetization and functional split on C-RAN fronthaul performance," in *Proceedings of ICC 2016*, May 2016.
- [10] Z. Cheng, Y. Tang, and H. Wu, "Joint task offloading and flexible functional split in 5G radio access network," in *Proceedings of ICOIN 2019*, Jan. 2019.
- [11] F. Giannone, H. Gupta, K. Kondepudi, D. Manicone, A. Franklin, P. Castoldi, and L. Valcarengi, "Impact of RAN virtualization on fronthaul latency budget: An experimental evaluation," in *Proceedings of GLOBECOM 2017*, Dec. 2017.
- [12] 長谷川剛, 村田正幸, 中平佳裕, 鹿嶋正幸, 阿多信吾, "TWDM-PONに基づくフロントホールネットワークの機能配置の最適化に関する一検討," *電子情報通信学会技術研究報告 (NS2019-95)*, vol. 119, pp. 35–40, September 2019.
- [13] N. Nikaiein, "Processing radio access network functions in the cloud: Critical issues and modeling," in *Proceedings of MCS 2015*, Sept. 2015.
- [14] M. Kist, J. A. Wickboldt, L. Z. Granville, J. Rochol, L. A. DaSilva, and C. B. Both, "Flexible fine-grained baseband processing with network functions virtualization: Benefits and impacts," *Computer Networks*, vol. 151, pp. 158–165, Mar. 2019.
- [15] IBM, "CPU benchmarks," available from <https://www.cpubenchmark.net/>.
- [16] P. Mahadevan, P. Sharma, S. Banerjee, and P. Ranganathan, "A power benchmarking framework for network devices," in *Proceedings of Networking 2009*, May 2009.
- [17] IBM, "IBM ILOG CPLEX optimization studio," available from <https://www.ibm.com/jp-ja/products/ilog-cplex-optimization-studio>.
- [18] K. Kumar, K. Doshi, M. Dimitrov, and Y.-H. Lu, "Memory energy management for an enterprise decision support system," in *Proceedings of IEEE/ACM International Symposium on Low Power Electronics and Design*, Aug. 2011.
- [19] D. Harutyunyan and R. Riggio, "Flexible functional split in 5G networks," in *Proceedings of CNSM 2017*, Nov. 2017.
- [20] C. Desset, B. Debaillie, V. Giannini, A. Fehske, G. Auer, H. Holtkamp, W. Wajda, D. Sabella, F. Richter, M. J. Gonzalez, H. Klessig, I. Gódor, M. Olsson, M. A. Imran, A. Ambrosy, and O. Blume, "Flexible power modeling of LTE base stations," in *Proceedings of IEEE WCNC 2012*, Apr. 2012.

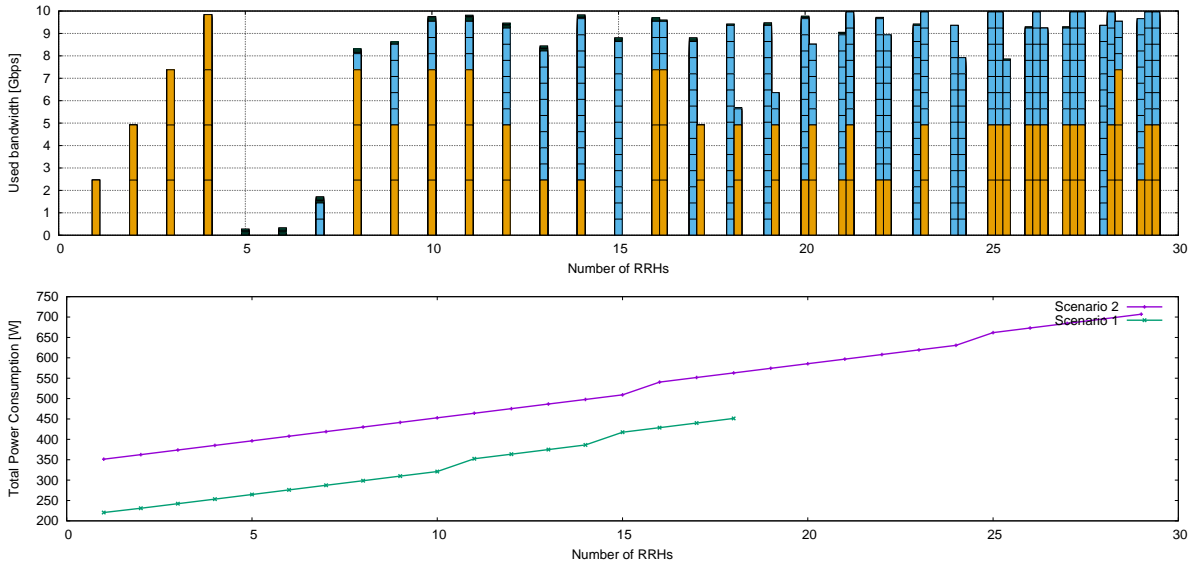


図 4: シナリオ 2 の評価結果 (上: 選択された機能分割の分布 下: 総消費電力)

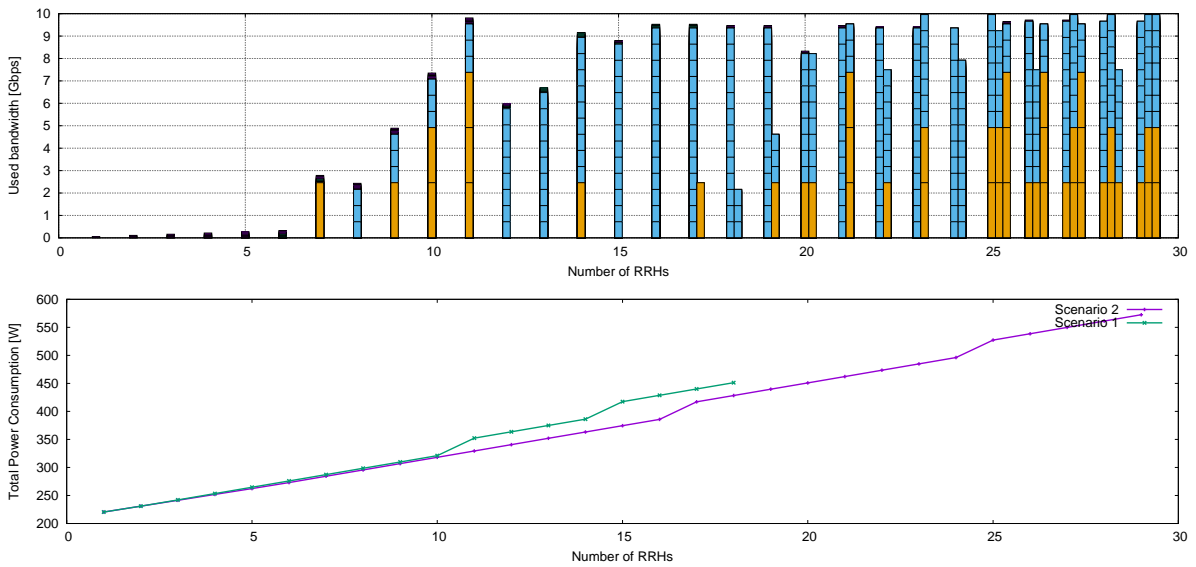


図 5: シナリオ 3 の評価結果 (上: 選択された機能分割の分布 下: 総消費電力)

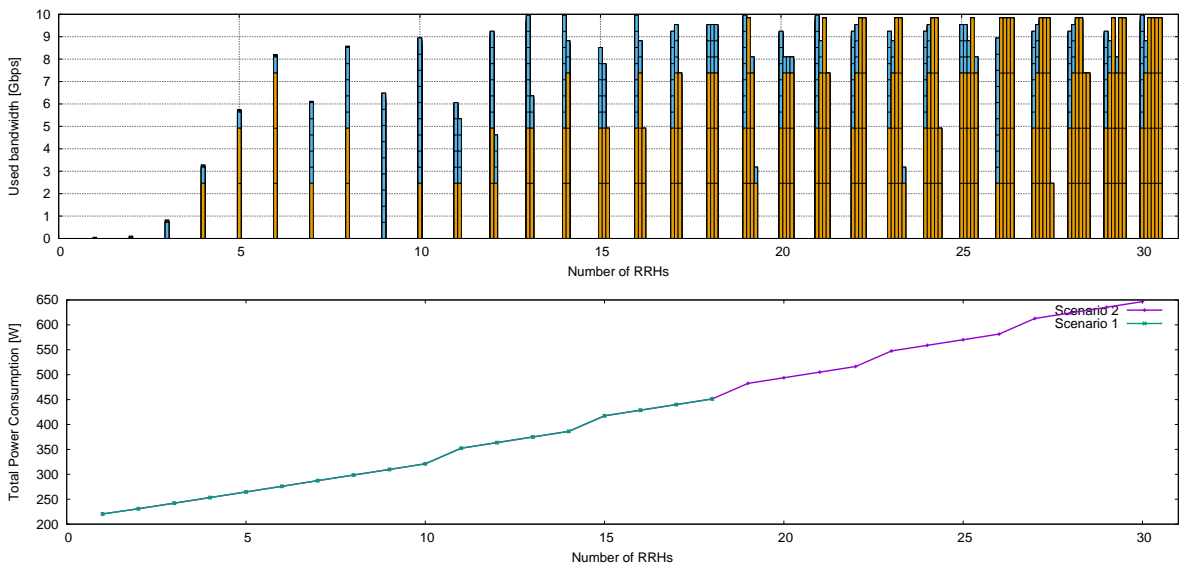


図 6: シナリオ 4 の評価結果 (上: 選択された機能分割の分布 下: 総消費電力)