

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 (東北大)
 村田 正幸 (大阪大)
 中平 佳裕・鹿嶋 正幸 (沖電気)
 阿多 信吾 (阪市大)

1

C-RAN (Centralized Radio Access Network)

D-RAN (Distributed RAN)

- ベースバンド処理
 - アナログ無線信号 <-> IPパケット
- D-RAN: RRH側でベースバンド処理を行う

C-RAN (Centralized RAN)

- ベースバンド処理をセントラルオフィスにあるBBU (BaseBand Unit) で行う
 - RRH-BBU間は CPRI (Common Public Radio Interface) 等で接続

2

C-RAN (2)

- セントラルオフィスにあるBBU poolが複数RRHのベースバンド処理を行う
- メリット
 - 基地局の簡素化
 - BBU処理の集約による効率化
 - 基地局間の協調制御 (CoMP等)
- デメリット
 - フロントホールネットワークの負荷
 - (例) 1 RRH あたり2.46Gbps (20MHz)
 - ユーザーデータ量に依存せずに発生
 - LTE → 5Gによって、より増大
 - 基地局稠密化
 - Massive MIMO

3

TWDM-PONに基づくC-RANフロントホールネットワーク

- フロントホールネットワークにTWDM-PONを適用
 - フロントホールネットワークの低コスト化
 - 各ONUの使用波長、タイムスロット割り当てによる柔軟な資源配分
 - イーサネット等と異なり、遅延時間の抑制が比較的容易
 - トラフィックが少ない場合は使用波長数を抑え、消費電力低減
- RRHからのトラフィックを適応的にTWDM-PONに収容することで、収容効率の高いフロントホールネットワークを実現可能

4

機能分割 (function split)

- BBU処理の機能を分割し、セルサイトとセントラルオフィスで実行
 - (+) フロントホールネットワークの負荷低減
 - (+) 各機能に適した実装が可能
 - (-) 基地局間協調制御の難化
- 適切なオフロード割合は様々な要素によって変動
 - フロントホールネットワーク容量と消費電力特性
 - ユーザートラフィック量
 - セルサイト、COそれぞれのサーバの処理能力、消費電力特性
 - 各機能の処理負荷
 - セルサイト-CO間の距離
 - ...

5

本研究の目的

- TWDM-PONに基づくセルラネットワークにおけるベースバンド処理の機能分割の最適化フレームワークの提案
 - システム全体の消費電力を最小化する最適化問題として定式化
 - 分割されたベースバンド処理によるサーバ負荷
 - TWDM-PONのキャパシティ、波長数
 - PONのネットワーク制約
 - サーバ、ネットワークの消費電力特性
 - サーバ能力、処理時間に関する制約
 - ネットワークトポロジ
- 数値例を示し、手法の有効性を検証
 - 収容トラフィック量を増加させるための設備増強方法によって、適切な機能分割やシステム総消費電力が変化することを確認

6

7

ネットワークモデル

- セルサイト-セントラルオフィス間は TWDM-PON で接続
- セルサイトには1つあるいは複数のRRH (基地局) が存在
- セルサイトにはマイクロデータセンタ (Micro DC)、セントラルオフィスにはデータセンタがある
 - 物理マシン上の仮想マシンがベースバンド処理 (の一部) を行う
- 各セルサイトのONUは複数波長を同時に使用可能
 - RRHごとにONUが存在することに相当
- RRHから発生するトラフィックのベースバンド処理を、マイクロデータセンタとセントラルオフィスでどう分割するかを決定する
 - 制約条件: サーバ処理能力、TWDM-PONのキャパシティ、処理遅延時間等

7

8

変数定義 (1)

- RRH数, N : ノード (セルサイト+BBU pool) 数
- a_n^i : ネットワークポロジ (RRH がNode n に存在すれば1、そうでなければ0)
- W : TWDM-PONの波長数, B_w : TWDM-PONの波長 w のキャパシティ
 - PONの制約を考慮
- K : RRHトラフィックの総処理段階数
- C_n, P_n : Node n の物理サーバの消費電力と処理能力
- L_w : TWDM-PONの波長 w を使う際の消費電力
- Δ_i : RRHからのトラフィックの遅延時間制約

8

9

変数定義 (2)

- $X_{n,k}$: ($n \geq 2, k \geq 1$) Node n (=Micro DC)で1つのRRHトラフィックを k 段階目まで処理する時の仮想マシンの消費電力
- $X_{1,k}$: ($k \geq 1$) MicroDCで k 段階目まで処理されたトラフィックを、Node 1 (=BBU pool)で残りの処理を行う際の仮想マシンの消費電力
- $D_{n,k}$: ($n \geq 2, k \geq 1$) Node n (=Micro DC)において1つのRRHトラフィックを k 段階目まで処理する時の仮想マシンの処理時間
- $D_{1,k}$: ($n \geq 2, k \geq 1$) Node n (=Micro DC)において1つのRRHトラフィックを k 段階目までMicroDCで処理した時の、BBU poolにおける残りの処理時間
- $B_{n,k,w}^i$: RRH i のトラフィックをNode n で k 段階までBBU処理をして、COまで波長 w で運ぶ時のフロントホールネットワークを流れるトラフィックレート
- $y_{n,k,w}^i$: RRH i のトラフィックをNode n で k 段階までBBU処理をして、COまで波長 w で運ぶなら1、そうでないなら0 (決定変数)

9

10

最適化問題 (ILP) としての定式化

Minimize :

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

(2) 消費電力の総和の最小化 - 仮想マシンのベースバンド処理 + 物理サーバ+TWDM-PONの波長

Subject to :

$$y_{n,k,w}^i \in \{0, 1\}$$

(3) y はバイナリ変数

$$y_{n,k,w}^i \leq a_n^i \forall i, n, k, w$$

(4) ネットワークポロジ制約

$$y_{n,k,w}^i = 1 \rightarrow x_n = 1, l_w = 1$$

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

(5) RRH i のトラフィックは1つのノードで必ず処理される

$$\sum_{n=2}^N \sum_{k=1}^K \sum_{w=1}^W y_{n,k,w}^i B_{n,k,w}^i \leq B_w \forall w$$

(6) ネットワークキャパシティ制約

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

(7) 遅延時間制約

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

(8) サーバ処理能力制約

10

11

数値例: パラメータ設定 (1)

- LTEのネットワークを想定
- セルサイト数: 1
- RRH数: 1~
- 1 RRHあたりのユーザトラフィック: 54Mbps
- TWDM-PONの波長1つあたりの帯域: 10Gbps、消費電力: 20W
- 物理サーバのベース消費電力: 200W
- TWDM-PONの伝搬遅延時間: 10us
- トラフィックの遅延時間制約: 2,000us

11

12

数値例: パラメータ設定 (2)

- LTEネットワークの機能分割の実験結果より、各Splitのパラメータ (CPU利用率、処理時間) を決定
- サーバは低速/高速の2種類を想定

表1: 機能分割パターンにおける各性能指標値

Split option	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利用率 [%]	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 [μs]	0	111	1372	1972	0	43	682	758
セントラルオフィスでのCPU利用率 [%]	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 [μs]	1972	1861	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

[13] N. Nadeem, "Processing radio access network functions in the cloud: Critical issues and modeling," in Proceedings of MCS 2015, Sept. 2015.

[14] M. Kol, 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.

12

13

数値例: パラメータ設定(3)

- サーバの消費電力特性: 線形モデル (右図)
- 評価シナリオ: 収容トラフィック量を増加させるための設備増強方法による特性の違いを検証
 - シナリオ 1: ベースライン
 - 波長数=3, MicroDCのCPUコア数=3, セルサイトは低速サーバ, COは高速サーバ
 - シナリオ 2: セルサイトのサーバを高速化
 - 波長数=3, MicroDCのCPUコア数=3, セルサイトは高速サーバ, COは高速サーバ
 - シナリオ 3: セルサイトのサーバ台数を増加
 - 波長数=3, MicroDCのCPUコア数=8, セルサイトは低速サーバ, COは高速サーバ
 - シナリオ 4: TWDM-PONの波長数を増加
 - 波長数=6, MicroDCのCPUコア数=3, セルサイトは低速サーバ, COは高速サーバ
- 収容トラフィック量がほぼ同数となるようにパラメータを設定
- ILPソルバ: IBM CPLEX

図2 消費電力モデル (13)

13

14

シナリオ1: 選択されるsplitの分布と使用波長数

- 波長数=3, MicroDCのCPUコア数=3, セルサイトは低速サーバ, COは高速サーバ

14

15

シナリオ2: MicroDCのサーバ高速化の効果

- 波長数=3, MicroDCのCPUコア数=3, セルサイトは高速サーバ, COは高速サーバ

15

16

シナリオ3: MicroDCのサーバ台数増加の効果

- 波長数=3, MicroDCのCPUコア数=8, セルサイトは低速サーバ, COは高速サーバ

16

17

シナリオ4: PONの波長数増加の効果

- 波長数=6, MicroDCのCPUコア数=3, セルサイトは低速サーバ, COは高速サーバ

17

18

まとめと今後の課題

- まとめ
 - TWDM-PONに基づくセルネットワークのベースバンド処理の適切な機能分割の最適化
 - 数値例による評価
 - 消費電力を最小化する構成を導出可能
 - 収容トラフィック増加のための設備増強方法により選択される機能分割とシステム総消費電力が変化
- 今後の課題
 - パラメータ設定の精密化
 - コアネットワーク、アプリケーションサーバの配置を含めた最適化
 - 大規模ネットワークでの検証、計算時間の評価

18

