

適応的モバイルネットワークにおける自律移動ノードの再配置

Relocation of Autonomous Moving Nodes in Adaptive Mobile Network Architecture

中山悠¹

Yu Nakayama

neko 9 Laboratories¹

丸田一輝¹

Kazuki Maruta

大阪大学 大学院工学研究科²
Graduate School of Engineering,
Osaka University

久野大介²

Daisuke Hisano

戸辺義人³

Yoshito Tobe

青山学院大学 理工学部³
College of Science and Engineering,
Aoyama Gakuin University

1 はじめに

モバイルトラフィックは爆発的な増大を続けている一方で、その時空間的な変動が顕著になっている [1]. その主な要因として、中心市街地から郊外にかけての昼夜間の人口動態変化や、イベント等によるホットスポット形成といった現象が挙げられる [2]. この変動に対して、従来のモバイルネットワークでは、設備効率の悪化やサービス品質の低下といった課題があった. すなわち、サービス品質を高めるためにはピークレートに合わせた設計を行う必要があるが、その場合、需要低下時には設備の利用効率が低下してしまう. この課題に対し、筆者らは有線バックホール通信を行う自律移動ノードにより需要変動に追従する適応的ネットワーク (ABSORB: Autonomous Base Station with Optical Reflex Backhaul) というコンセプトを提案した [3]. 本稿では、5G (第5世代移動通信システム) 以降を見据えて本コンセプトをより具体化した上で、自律移動ノードの再配置を行うためのスケジューリング手法を提案する.

2 Related work

2.1 C-RAN 構成

まず、本稿が前提とする C-RAN (Centralized Radio Access Network) 構成を図 1 に示す. 基地局機能は CU (Central Unit), DU (Distributed Unit), RU (Radio Unit) に分割配備される [4]. CU-DU を接続するリンクをミッドホール、DU-RU を接続するリンクをフロントホールと呼称する. CU には RLC (Radio Link Control) および PDCP (Packet Data Convergence Protocol) の機能が実装され、通信キャリアの局舎に集中配置される. RU にはアンテナ素子および物理層 (PHY) の一部機能を実装し、多数の RU を密集配置することで UHD-DAS (Ultra High-Density Distributed Antenna System) [5] を構成する. その上で、トラフィック量に応じて各 RU の ON/OFF を切り替えることでエネルギー効率を向上させることが提案されている [6]. ただし、各 RU の状態をどのように最適化するかについては、ここでは述べられていない. その他の PHY および MAC (Media Access Control) 機能は DU に実装されるが、フロントホール転送には厳しい低遅延性 (例えば $100\mu\text{s}$ [7][8]) が要求されることから、DU-RU 間の距離には制限が存在する.

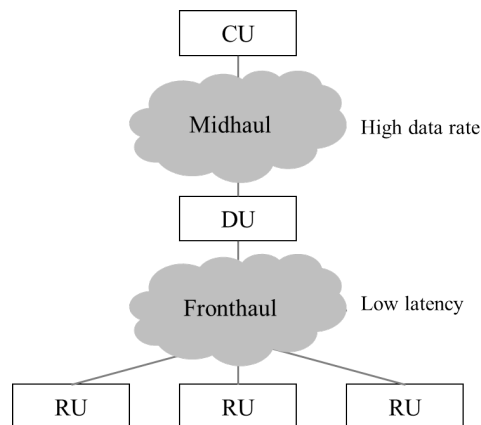


図 1: C-RAN architecture model.

2.2 フロントホールネットワーク

従来フロントホールは point-to-point の光リンクで構成されてきたが、フロントホールの転送データ量が可変となる [7] ことを踏まえ、近年ではそのネットワーク化の検討が多く行われている. 代表的なものとして、PON (Passive Optical Network) により光ファイバを共用することで低コスト化を目指す構成 [9] や、レイヤ 2 ブリッジを用いることで広範囲の RU を収容する構成 [10][11] がある. さらに、フロントホールを無線リンクで構成する検討も始まっている [12].

2.3 UAV セル

近年、基地局機能を UAV (Unmanned Aerial Vehicle) に搭載してモバイルネットワークを構成するアイデアが検討されている [13][14][15][16]. UAV を用いることで場所の制約が少なくなり、タイミング良く柔軟にトラフィックの多いホットスポットに基地局を配備でき、またユーザ近くに配備することで高いスループットを期待できる、といった特長がある.

3 適応的モバイルネットワーク

3.1 ネットワーク構成

本稿にて提案する適応的モバイルネットワークの構成を図 2 に示す. RU には最小限の機能としてアンテナ素子、ADC/DAC を搭載し、信号機や電柱といった既存の物体を利用して密に配置し UHD-DAS を構成する. 機能を最小化することで、従来基地局の設置が難しかった場所にも RU を設置することが可能と考えられる. 各 RU の ON/OFF 状態は、トラフィックの時空間分布に応

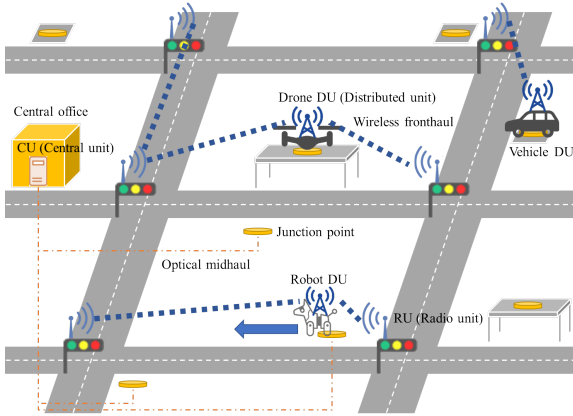


図 2: Conceptual architecture of proposed network.

じて切り替えられる。DU 機能はドローンや自動車等の自律移動体の実装され、各 DU が RU の状態すなわちトラフィック分布に応じて移動する。これは、RU 分布に合わせて多数の DU を固定設置した場合コストが高額化するためであるとともに、フロントホールは低遅延性が求められるためである。DU は、予め配備された光接続点 (JP: Junction Point) にて光ミッドホールに接続することで、局舎に集中配置された CU との通信を行う。光ミッドホールを用いることで、単純な UAV セルと比較して、高帯域かつ安定した通信を実現する。各 RU は、光ミッドホール接続された DU に対して無線マルチホップ通信することで、動的にフロントホール接続を行う。本構成を用いて、トラフィック需要分布に基づき、RU の ON/OFF、DU の移動スケジュール、およびフロントホールの転送ルートに適応的に最適化することで、効率的にモバイルネットワークを構成する。

3.2 DU 再配置スケジューリング

本節では、需要変動に応じて最適な DU 再配置を行うためのスケジューリング手法について述べる。以下の記述において用いる変数を表 1 に示す。

3.2.1 グラフ表現

ある時刻 t において、ON 状態にある RU の集合を \mathcal{R}_t とし、RU 識別子を r_t とする。RU を節点、RU 間の無線リンク接続可能性をエッジとする無向グラフ $G_t(\mathcal{R}_t, \mathcal{E}_t)$ を定義する。各エッジの重みは、RU 間の距離から定まる伝搬遅延時間として表される。例えば、図 3a に表される RU 配置において、そのグラフ表現は図 3b となる。

DU 全体の集合を \mathcal{D} 、JP と接続した DU の集合を $\mathcal{D}_t^{jp} \subset \mathcal{D}$ とし、識別子を $d_t \in \mathcal{D}_t^{jp}$ とする。さらに、JP 集合を \mathcal{J} とし、識別子を j とする。各 JP は、近隣 RU との間に候補エッジ \mathcal{C}_t (図 3b 中の点線) を生成する。そして DU が接続された JP は有効化されて節点となり、関連する候補エッジが有効化される (図 3c)。有効化された候補エッジ集合を $\mathcal{C}_t^{on} \subset \mathcal{C}_t$ とし、識別子を c とする。DU 接続時にアップデートされたグラフを $G'_t(\mathcal{R}_t + \mathcal{D}_t^{jp}, \mathcal{E}_t + \mathcal{C}_t^{on})$ と表記する。

表 1: Variables

Variable	Definition
t	Time period
\mathcal{R}_t	Set of active RUs at t
r_t	Active RU identifier at t , $r \in \mathcal{R}$
\mathcal{E}_t	Set of edges between RUs at t
\mathcal{D}	Set of DUs
\mathcal{D}_t^{jp}	Set of connected DUs at t
d_t	Connected DU identifier, $d_t \in \mathcal{D}_t^{jp}$
\mathcal{J}	Set of JPs
j	JP identifier, $j \in \mathcal{J}$
\mathcal{C}_t	Set of candidate edges at t
\mathcal{C}_t^{on}	Set of activated edges in \mathcal{C}_t
c	Activated edge identifier, $c \in \mathcal{C}_t^{on}$
M	Number of iterations for Monte Carlo simulations

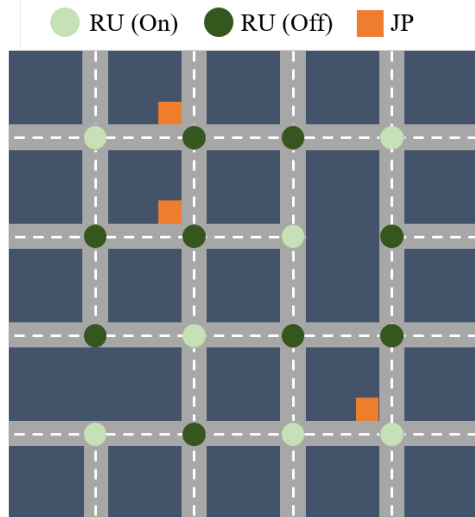
3.2.2 再配置アルゴリズム

時刻 t における JP j に対する DU 接続状態をバイナリ変数 x_{jt} を用いて表し、 $x_{jt} = 1$ のとき接続状態、 $x_{jt} = 0$ のとき非接続状態とする。各 JP への DU 接続状態を表す $X(t) = \{x_{1t}, x_{2t}, \dots\}$ を、マルコフ連鎖における状態として記述する。 $X(t)$ を用いることで、DU 接続状態の変化は、マルコフ連鎖における状態遷移として記述できる。

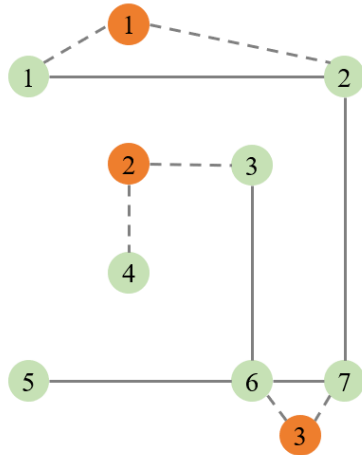
時刻 t における DU 配置 $X(t)$ を初期状態として、時刻 $t+1$ での需要分布予測をもとに、RU 集合 \mathcal{R}_{t+1} およびグラフ $G_t(\mathcal{R}_t, \mathcal{E}_t)$ を生成する。このとき、時刻 $t+1$ における DU 配置 $X(t+1)$ を、以下のマルコフ連鎖モンテカルロ法によって計算する。すなわち、 $X(t)$ からランダムに状態遷移させて、当該 DU 配置で全 RU を収容可能かを判定する。この収容アルゴリズムについては、3.2.3 にて詳述する。判定結果として、制約条件を満たし全 RU を収容可能なら、当該 DU 配置を解の候補に入れる。このプロセスを一定回数 M 繰り返し、解候補集合を生成する。その上で、アクティブな DU 数 ($\sum_j x_{jt+1}$) が最小である解のうち、DU 再配置数 ($(X(t), X(t+1))$ 間のハミング距離) が最小となる解を選択し、 $X(t+1)$ を算出する。これを異なる RU 集合 \mathcal{R}_{t+1} に関して繰り返し、上記を最小化する \mathcal{R}_{t+1} および $X(t+1)$ を解として出力する。

3.2.3 RU 収容判定

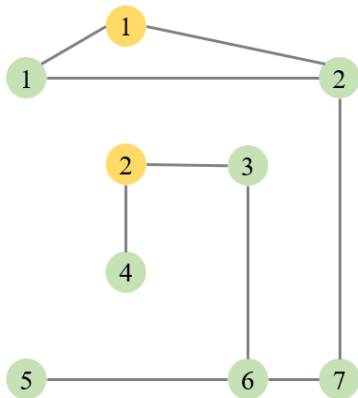
RU 収容アルゴリズムおよび判定に関して述べる。時刻 $t+1$ にて DU を配置し、アップデートされたグラフ $G'_{t+1}(\mathcal{R}_{t+1} + \mathcal{D}_{t+1}^{jp}, \mathcal{E}_{t+1} + \mathcal{C}_{t+1}^{on})$ を用いる。このグラフにおいて、ダイクストラ法により各 RU から近隣の DU までの転送ルートを生成する。また、マルチホップ転送における中継時の処理遅延およびタイムスロット割り当て待ち時間を考慮する。設定された転送ルートに基づき、



(a) Distribution of RUs and JPs



(b) Graph representation (W/O DUs)



(c) Graph representation (W/ DUs)

図 3: Graph representation of node distribution.

各 RU について転送遅延を算出し、全 RU の転送遅延が要求条件を持たしていれば、この DU 配置により全 RU を収容可能であるとみなす。

4 評価

提案した適応的モバイルネットワークにおける DU 再配置アルゴリズムについて、シミュレーションにより評価を行った。

4.1 評価条件

シミュレーションに使用したグリッド状街区モデルを図 4a に示す。各交差点に RU を設置し、各道路に沿って JP を 4 個ずつランダム配置した。転送遅延の要求条件を $100\mu\text{s}$ 、各 RU の処理遅延およびタイムスロット長を $20\mu\text{s}$ とした。時刻 $t = 1$ で 100%、 $t = 2$ で 75%、 $t = 3$ で 50% の RU が ON 状態となるものとした。本条件にて、提案手法により RU の ON 率に応じて RU 状態および DU 配置を最適化し、各時刻にて必要となる DU 数を求めた。このとき、図 4a 中に点線で示すように RU は近隣の 4 ノード同士でグループを組み、ON 率に応じてグループごとに各 RU の ON/OFF 状態を切り替えることとした。本提案の有効性を評価するため、従来の静的構成との比較を行った。静的構成では、RU および DU を固定的に配置し、特に状態変化を考慮しない。

4.2 評価結果

まず静的構成による RU、DU 配置を図 4b に示す。これに対して、提案構成を用いた場合の各時刻におけるアクティブな RU および DU の配置を図 4c~4e に、各時刻でのアクティブノード数の比較を図 4f に示す。提案構成では、需要に応じて RU 状態および DU 配置を変化させてフロントホール接続を行うことで、アクティブノード数を大幅に低減することが可能である。

5 まとめ

本稿では、5G 以降を見据えた適応的モバイルネットワークの構成および、自律移動ノードの再配置を行うためのスケジューリング手法を提案した。提案構成により、RU の状態や DU の位置を適応的に最適化することで、時空間的に変動するモバイルトラフィックを効率的に転送することが可能となる。今後の課題として、無線フロントホールのルーティングアルゴリズムや転送方式の検討や、自律移動ノードの実装等が挙げられる。

参考文献

- [1] T. Louail, M. Lenormand, O. G. C. Ros, M. Picornell, R. Herranz, E. Frías-Martínez, J. J. Ramasco, and M. Barthelemy, "From mobile phone data to the spatial structure of cities," *Scientific reports*, vol. 4, 2014.
- [2] M. Lenormand, M. Picornell, O. G. Cantú-Ros, A. Tugores, T. Louail, R. Herranz, M. Barthelemy, E. Frías-Martínez, and J. J. Ramasco, "Cross-checking different sources of mobility information," *PloS one*, vol. 9, no. 8, p. e105184, 2014.

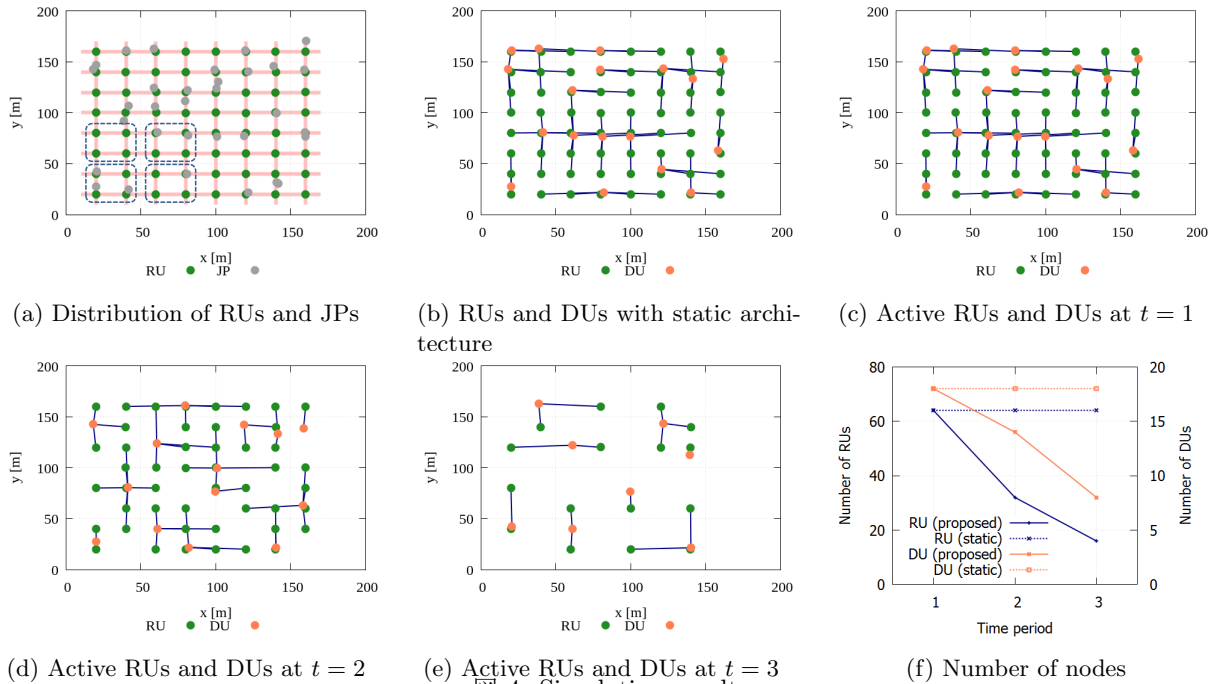


図 4: Simulation result.

- [3] Y. Nakayama, T. Tsutsumi, K. Maruta, and K. Sezaki, "ABSORB: Autonomous base station with optical reflex backhaul to adapt to fluctuating demand," in *IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*. IEEE, May 2017.
- [4] P. Chanclou, L. A. Neto, K. Grzybowski, Z. Tayq, F. Saliou, and N. Genay, "Mobile fronthaul architecture and technologies: A RAN equipment assessment," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 10, no. 1, pp. A1–A7, 2018.
- [5] T. Okuyama, S. Suyama, J. Mashino, and Y. Okumura, "Flexible antenna deployment for 5G distributed Massive MIMO in low SHF bands," in *10th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*. IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [6] 3GPP TR 36.872, "Small cell enhancements for E-UTRA and E-UTRAN - Physical layer aspects," 2013.
- [7] CPRI, "eCPRI specification v1.1.," January 2018.
- [8] 3GPP TR 38.801, "Study on new radio access technology: Radio access architecture and interfaces," 2017.
- [9] Y. Nakayama, H. Uzawa, D. Hisano, H. Ujikawa, H. Nakamura, J. Terada, and A. Otaka, "Efficient DWBA algorithm for TWDM-PON with mobile fronthaul in 5G networks," in *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, December 2017.
- [10] *Time-Sensitive Networking for Fronthaul*, IEEE Standard 802.1CM (Draft 2.2), May 2018.
- [11] Y. Nakayama, D. Hisano, T. Kubo, Y. Fukada, J. Terada, and A. Otaka, "Low-latency routing scheme for a fronthaul bridged network," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 10, no. 1, pp. 14–23, 2018.
- [12] H. Zhang, Y. Dong, J. Cheng, M. J. Hossain, and V. C. Leung, "Fronthauling for 5G LTE-U ultra dense cloud small cell networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 6, pp. 48–53, 2016.
- [13] Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, "Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 5, pp. 36–42, 2016.
- [14] Z. Xiao, P. Xia, and X.-G. Xia, "Enabling UAV cellular with millimeter-wave communication: Potentials and approaches," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 5, pp. 66–73, 2016.
- [15] E. Kalantari, M. Z. Shakir, H. Yanikomeroglu, and A. Yongacoglu, "Backhaul-aware robust 3D drone placement in 5G+ wireless networks," in *IEEE International Conference on Communications (ICC) Workshops*. IEEE, 2017, pp. 109–114.
- [16] M. Alzenad, M. Z. Shakir, H. Yanikomeroglu, and M.-S. Alouini, "FSO-based vertical backhaul/fronthaul framework for 5G+ wireless networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 1, pp. 218–224, 2018.