

災害時のセルラーネットワークにおける 不確実な観測情報に基づくトラフィックエンジニアリング

佐竹 幸大[†] 大下 裕一[†] 石橋 圭介^{††} 星合 擁湖^{††} 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学 大学院情報科学研究科

^{††} 日本電信電話株式会社 NTT ネットワーク基盤技術研究所

E-mail: [†]{k-satake,y-ohsita,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}{ishibashi.keisuke,hoshiai.yoko}@lab.ntt.co.jp

あらまし 災害時には、安否状態の確認、災害状況、避難情報等による通信トラフィック需要が急増するとともに、通常との異なる人流発生が発生し、セルラーネットワークの基地局からのリンクが輻輳することが考えられる。このような輻輳を回避する方法として、人流が集中したエリア配下のトラフィックの一部を、近隣基地局経由で送受信するような制御が考えられる。災害時においては、人流の移動に伴い、人・トラフィックが集中した地域は、時間とともに変化するため、このような制御を効率的に動かすためには、輻輳の発生の可能性が高い箇所を瞬時に把握し、判断を行うことが求められ、トラフィック情報を観測・収集し、経路・資源割当の判断を行う周期を短く設定する必要がある。しかしながら、このような短周期で制御に必要なネットワーク全体のトラフィック情報を収集・解析することは大きな負荷がかかる。我々は、これまで、トラフィック情報の収集・解析にかかる負荷を増大させることなく、制御周期を短くするために、各時刻においては、ネットワーク内の一部のトラフィックのみしか観測できない環境下において、トラフィックの不確実性を確率として扱い、観測情報をもとに確率分布の更新を行うことによる状況把握、トラフィック量の確率分布をもとに輻輳を回避する経路制御、経路制御への影響が大きな箇所を次時刻の観測箇所としていする観測箇所選択を行う手法を提案してきた。本稿では、本手法をトラフィックの変化の激しい、災害直後のセルラーネットワークにおけるオフロード制御に適用し、その効果について議論を行う。

キーワード セルラーネットワーク、トラフィックエンジニアリング、ベイズ推定

Traffic engineering using incomplete information for cellular networks in case of disaster

Kodai SATAKE[†], Yuichi OHSITA[†], Keisuke ISHIBASHI^{††}, Yoko HOSHIAI^{††}, and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

^{††} NTT Network Technology Laboratories, NTT Corporation

E-mail: [†]{k-satake,y-ohsita,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}{ishibashi.keisuke,hoshiai.yoko}@lab.ntt.co.jp

Abstract In case of disaster, traffic may increase and people move in the different way from the normal behavior, which may cause congestions on the links from some base stations. One approach to mitigating such congestions is to relay the traffic from the congested area via the other base stations. In case of disaster, the congested area may change in time. That is, we should immediately know the congested areas and calculate the routes to mitigate the congestion. Therefore, the interval to perform the route reconfiguration should be short. However, measuring traffic information accurately of the whole network is difficult to be obtained in a short interval. We have proposed a method to perform the TE even in the case that only a part of traffic information can be obtained at each time slot. In this paper, we apply our method to the route control in the cellular network in case of disaster, and demonstrate that our method mitigates the congestion.

Key words Cellular network, Traffic engineering, Bayesian Estimation

1. はじめに

スマートフォンやタブレットといった高機能なモバイル端末の普及に伴い、ネットワークを流れるトラフィック量は、量・変動ともに大きくなっている。ネットワークを提供する通信事業者は、このような大きなトラフィック変動にも対応し、通信品質を維持することが求められる。従来、このような変動に対応した通信品質の維持は、各エリア内の人口に基づきトラフィック量を想定し、想定されたトラフィック量を収容するのに十分なリソースを用意することにより行われてきた。

しかしながら、災害時には、安否状態の確認、災害状況、避難情報等による通信トラフィック需要が急増することが予想され、また、通常との異なる人流発生・集中が発生し、結果として、あらかじめ準備されていたリソースでは、発生する通信を収容することが困難となると考えられる。ただし、このような輻輳は、人流が集中したエリアのみで発生し、人流が集中したエリア配下のトラフィックの一部を、近隣基地局経由で送受信することにより、当該基地局と集約局の間で発生した輻輳を解消することができると考えられる [1]。

上記のオフロード制御においては、どのエリアのトラフィックを、どの基地局にオフロードするのかを、状況に応じて決定することが重要となる。このような、ネットワークの資源を効率的に利用するために、経路や資源割当を動的に制御する技術はトラフィックエンジニアリングと呼ばれ、広く研究されている [2,3]。トラフィックエンジニアリングでは、トラフィックの状況に応じて、動的にネットワークの資源割当を変更することで、トラフィックの輻輳を防ぎ、トラフィックを安定して収容することを可能とする。これらの方法では、トラフィックに関する観測情報を定期的に収集・解析し、その観測情報に基づいて経路や資源割当の変更を行う。

災害時においては、人流の移動に伴い、人・トラフィックが集中した地域は、時間とともに変化すると考えられ、輻輳の発生の可能性が高い箇所を瞬時に把握し、オフロード方法を決定することが求められる。輻輳の発生の可能性の高い箇所を瞬時に把握するためには、トラフィック情報を観測・収集し、経路・資源割当の判断を行う周期を短く設定する必要がある。しかしながら、このような短周期で制御に必要なネットワーク全体のトラフィック情報を収集・解析することは大きな負荷がかかる。

我々は、トラフィック情報の観測・収集、経路・資源割当の判断を短い周期で実現するため、各時刻では、一部のトラフィック情報のみが観測可能であるという状況下で、トラフィックエンジニアリングを適切に行う手法について検討を進めてきた [4]。本手法では、ネットワークを制御するコントローラにおいて、トラフィック状況を確率として保持する。そして、ネットワークの一部のトラフィック情報が取得できる度に、ベイズ推定により、確率の更新を行う。このような更新を繰り返すことにより、各時刻において、一部のトラフィックのみが観測可能な状況下においても、ネットワーク内のトラフィック状況を把握できる。また、本手法においては、把握しているトラフィック状況の確率モデルにもとづき、輻輳が発生する確率を一定以下に抑えることができるように、経路・リソース割り当てを行う。これにより、把握したトラフィック情報が不完全であったとしても、輻輳を避ける制御が可能となる。さらに、把握した確率をもとに、次の時

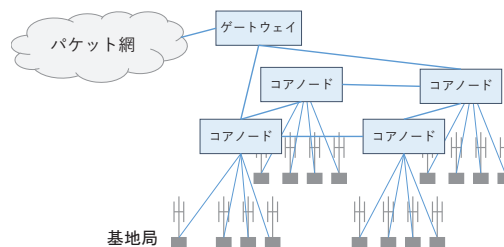


図1 想定するセルラネットワークの概略

刻に観測情報を収集する箇所を選択する。これにより、各時刻に収集可能な観測情報が限られていた場合であっても、制御に大きく影響を与える可能性のある個所の観測が可能となる。

我々は、上記の手法について、これまでバックボーンネットワークにおける動的な経路制御に適用し、有効性を評価してきた。本稿では、上記の手法を、バックボーンネットワークよりも、環境の変化の激しい、災害時のセルラネットワークに適用し、その有効性について議論する。

2. 災害発生時のセルラネットワークにおけるオフロード制御

図1に、本研究で想定するセルラネットワークを示す。セルラネットワークは、基地局から集約局までのアクセスネットワーク、集約局とゲートウェイ間を接続するコアネットワークからなる。このようなセルラネットワークにおける基地局設備や基地局からのトラフィック収容回線などのリソース設計は、当該エリアの人口等に基づいてトラフィック量を想定して行われている。

しかしながら、災害時には、安否状態の確認、災害状況、避難情報等による通信トラフィック需要が急増することが予想される。さらに、災害時は通常との異なる人流発生・集中が発生する。その結果、人が集中した地域の基地局からは多量のトラフィックが流入することとなり、当該基地局・集約局間のリンクに輻輳が発生すると考えられる。ただし、このような輻輳は、人流が集中したエリアのみで発生する。人流の集中が発生していない近隣の基地局では、資源に余裕がある。この場合、人流が集中したエリア配下のトラフィックの一部を、近隣基地局経由で送受信することにより、当該基地局と集約局の間で発生した輻輳を解消することができる。このような基地局間の負荷を分散させる方法としては、配下の端末をハンドオーバーさせ、近隣の基地局に接続させる方法 [1] など、様々な手法が提案されている。本稿では、輻輳の発生した基地局配下のトラフィックを近隣基地局にオフロードさせる手法としては、任意の手法を用いることができるとし、ネットワークを管理するコントローラにおいて、輻輳の発生を予期した時点で、当該エリアから流入するトラフィックを指定した割合で、近隣基地局にオフロードできるものとする。

上記のオフロード制御においては、どのエリアのトラフィックを、どの基地局にオフロードするのかを、状況に応じて決定することが重要となる。特に、災害時においては、人流の移動に伴い、人・トラフィックが集中した地域は、時間とともに変化すると考えられ、輻輳の発生の可能性が高い箇所を瞬時に把握し、

オフロード方法を決定することが求められる。しかしながら、ネットワーク内には、多数の基地局が配置されるため、全基地局から流入するトラヒックに関する情報を、頻繁に収集することは困難であり、各時刻においては、限られた数の基地局からのみトラヒック情報を収集することが現実的である。

我々は、各時刻において、限られた地点からの観測情報しか取得できない場合に、観測されなかった箇所のトラヒック量の不確実性を考慮に入れた上で経路制御、次の時刻に観測情報を収集するノードの決定を行う手法を提案している。そこで、本稿では、上記のモバイルネットワークにおけるオフロード制御にも、これまでに我々が提案した不確実性を考慮したネットワーク制御手法を適用し、その有効性について議論を行う。

3. 不確実なトラヒック観測情報にもとづくトラヒックエンジニアリング

本節では、我々が提案している、不確実なトラヒック観測情報にもとづくトラヒックエンジニアリング手法について説明する。本手法では、観測、収集、推定、予測、制御のループによって、観測負荷を抑えた中で、制御に必要な情報を取り出し、時々刻々と変動するトラヒックに追従した経路設定を行う。トラヒック予測の結果、将来のトラヒックの予測分布が得られると、制御モジュールは、予測分布が示唆する様々なトラヒックパターンを収容可能な経路を一通りに決定する。また、各タイムスロットにおいて、次の経路制御への利用を意識した観測箇所の決定を行う。すなわち、各観測箇所です得られる観測値を推定し、その推定分布と将来トラヒックの予測分布を用いて制御性能を行った場合に、予想される制御性能の損失を最小化するように、観測箇所を決定する。観測はネットワーク上のルータに複数配置された観測器が独立して局所的に行い、観測データが要求に答えられるように観測データを一時的に保持しておく。以下に各モジュールについて説明する。

以降、時刻 t におけるトラヒック量をベクトル X_t とあらわし、そのうち、フロー f のトラヒック量を $x_{t,f}$ とする。また、時刻 t において観測されたトラヒック量を X'_t とし、そのうち、フロー f のトラヒック量を $x'_{t,f}$ とする。時刻 t における経路を R_t とし、時刻 t において観測されたフローの集合を O_t とする。 $X_{t:t+k}$ は $(X_t, X_{t+1}, \dots, X_{t+k})$ を表す。同様に、 $X'_{t:t+k} = (X'_t, X'_{t+1}, \dots, X'_{t+k})$ 、 $O_{t:t+k} = (O_t, O_{t+1}, \dots, O_{t+k})$ とする。

3.1 推定モジュール

推定モジュールでは、 X'_t が観測された際に、 X_t の事後分布を計算する。本稿では、 O_t の観測により、 O_t に含まれないフローに関する情報は一切得られないとし、また、 O_t に含まれるフローについては、誤差なく観測できるものとする。その場合、 $P(X'_t|X_t; O_t)$ は、以下のように定義できる。

$$P(x'_{t,f}|x_{t,f}; O_t) = \begin{cases} \delta(x'_{t,f} - x_{t,f}) & (f \in O_t) \\ \mathcal{U}(0, \infty) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 $\delta(x)$ は、ディラックのデルタ関数であり、 $\mathcal{U}(a, b)$ は、値域が a から b の一様分布を示す。

式 (1) を用いて、 $P(x_t|X'_{0:t}; O_{0:t})$ は、以下のように推定することができる。

$$P(x_t|X'_{0:t}; O_{0:t}) = \begin{cases} \delta(x'_{t,f} - x_{t,f}) & (f \in O_t) \\ P(x_t|X'_{0:t-1}; O_{0:t-1}) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

3.2 予測モジュール

予測モジュールでは、観測・推定されたトラヒックから、将来のトラヒック量 $P(X_{t+k}|X'_{0:t}; O_{0:t})$ を予測する。本稿では、本予測において、以下のようなモデルを用いる。

$$x_{t+1,f} = x_{t,f} + \epsilon_{t,f} \quad (3)$$

ただし、 $\epsilon_{t,f}$ は正規乱数とする。このモデルを用いることにより、 $P(X_{t+1}|X_t; \theta)$ は、以下のようにあらわすことができる。

$$P(x_{t+1,f}|x_{t,f}; \sigma_{t,f}) = \mathcal{N}(x_{t+1,f}, \sigma_{t,f}^2) \quad (4)$$

ただし、 $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ は、平均 μ 、分散 σ の正規分布である。

$P(x_{t+1,f}|x_{t,f}; \sigma_{t,f})$ を用い、以下のように $x_{t+1,f}$ を予測することができる。

$$P(x_{t+1,f}|X'_{0:t}; O_{0:t}, \sigma_{t,f}) = \sum_{x_{t,f}} P(x_{t+1,f}|x_{t,f}; \sigma_{t,f}) P(x_{t,f}|X'_{0:t}; O_{0:t}) \quad (5)$$

ただし、 $P(x_{t,f}|X'_{0:t}; O_{0:t})$ は、推定モジュールにより推定された現在のトラヒック量の分布である。上記の予測を繰り返すことにより、以下のように将来のトラヒック量を予測することも可能である。

$$P(x_{t+k,f}|X'_{0:t}; O_{0:t}, \sigma_{t,f}) = \sum_{x_{t+k-1,f}} P(x_{t+k,f}|x_{t+k-1,f}; \sigma_{t,f}) P(x_{t+k-1,f}|X'_{0:t}; O_{0:t}, \sigma_{t,f}) \quad (6)$$

本モデルにおいて、 $\sigma_{t,f}$ はパラメータであり、事前の観測やシミュレーションをもとに定める。

3.3 制御モジュール

3.3.1 経路制御モジュール

経路制御モジュールにおいては、予測された将来のトラヒック量にもとづいて、経路を決定する。

ここで、事前に各送信元・宛先のペアについて、複数の経路候補を計算しておき、経路制御時には、その各送信元・宛先のトラヒックのうち、各経路候補に流すトラヒック量の割合を定める問題を解くものとした。時刻 t における経路 R_t を、その要素 $R_t^{i,j}$ が、フロー j が経路 i を経由する場合に 1 となる行列として定義する。また、行列 G を、その要素 $G^{i,j}$ が、経路 j がリンク i を経由する場合に 1 となる行列として定義する。これにより、時刻 t に、リンク l を経由するトラヒック量は $\sum_{f,j} G^{l,j} R_t^{f,j} x_{t,f}$ とあらわすことができる。

上記の定義を用い、経路の決定は、以下の最適化問題により、定式化される。

$$\text{minimize: } E \left[\sum_{i=t+1}^{t+h} \{(1-w)f(X_i, R_i) + w\|R_i - R_{i-1}\|^2\} \right] \quad (7)$$

$$\text{subject to: } \forall l \leq k \leq h, \forall l, P \left[\sum_{f,j} G^{l,j} R_{t+k}^{f,j} x_{t+k,f} > c_l \right] \leq p_k \quad (8)$$

$$\forall 1 \leq k \leq h, \forall i, \forall j, R_{t+k}^{i,j} \in [0, 1] \quad (9)$$

$$\forall 1 \leq k \sum_{i \in \varphi(j)} R_{t+k}^{i,j} = 1 \quad (10)$$

ただし、 $f(X_i, R_i)$ はコスト関数であり、 $\|R_i - R_{i-1}\|^2$ は経路を R_{i-1} から R_i に変更する際にかかるコストである。また、 h は制御の際に考慮する将来の時刻の長さを示し、 w は経路変更のコストにかかる重み、 c^l は、リンク l を経由するトラヒック量に対する閾値であり、 p_k は、許容可能なトラヒック量が閾値を超える確率を示す。 $P[\sum_{i,l} G^{l,j} R_{t+k}^{f,j} x_{t+k,f} > c_l]$ は、リンク l を経由するトラヒック量が閾値 c_l を超える確率であり、予測されたトラヒック量 $P(X_{t+k} | X'_{0:t}; O_{0:t})$ から求めることができる。上記の最適化により、 R_{k+1}, \dots, R_{k+h} を得たのちに、 R_{k+1} を設定として投入する。

実際の経路制御においては、必ずしも最適解を求める必要はなく、輻輳を解消した経路さえ得られれば十分である。そこで、我々は、以下の関数を小さくするような R_{k+1}, \dots, R_{k+h} を計算により得る方法をとる。

$$\begin{aligned} L(R_{t+1:t+h}) = & \sum_{i=t+1}^{t+h} (1-w)f(X_i, R_i) + \sum_{k=1}^h w \|R_{t+k} - R_{t+k-1}\| + \\ & \sum_{k=1}^h \sum_l \lambda_{l,h} \left(P \left[\sum_j G^{l,j} R_{t+k}^{f,j} x_{t+k,f} > c_l \right] - p_k \right)^+ + \\ & \sum_{k=1}^h \sum_l \Lambda_{l,h} \left(E_{X_{t+k}} \left[\sum_j G^{l,j} R_{t+k}^{f,j} x_{t+k,f} \right] - c_l \right)^+ \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 $(x)^+$ は $x \geq 0$ の場合 x 、それ以外の場合 0 とする。 $\lambda_{l,h}$ と $\Lambda_{l,h}$ は、制約条件に対する重みである。

$R_{t+1:t+h}$ は、 $L(R_{t+1:t+h})$ が小さくなるように定める。我々は、以下のように、勾配降下法を用いて $R_{t+1:t+h}$ を定める。

- $L(R_{t+1:t+h})$ が小さくなるように、 $R_{t+1:t+h}$ を更新

$$R_{t+k}^{i,j} \leftarrow \left(R_{t+k}^{i,j} - \alpha \frac{\partial L(R_{t+1:t+h})}{\partial R_{t+k}^{i,j}} \right)^+$$

- 式 (10) を満たすように $R_{t+k}^{i,j}$ を調整

$$R_{t+k}^{i,j} \leftarrow \frac{1}{\sum_n R_{t+k}^{n,j}} R_{t+k}^{i,j}$$

3.3.2 観測スケジュール決定モジュール

観測箇所の決定では、トラヒックを観測するノードを決定するものとする。ここで、ネットワーク内のノードの集合を N とする。ノード n によって観測可能なフローの集合を F_n とする。ノード n が観測対象として選択された場合は、 F_n に含まれるフローは、すべて観測対象フローの集合 O_t に追加されるものとする。本研究では、以下の最適化問題にもとづいて、観測箇所を決定する。

$$\text{minimize} : L^{\text{opt}}(O_{t+1}) \quad (12)$$

$$\text{subject to} : C(O_{t+1}) \leq W \quad (13)$$

ここで、 $L^{\text{opt}}(O_{t+1})$ は、 O_{t+1} が観測され、 O_{t+1} で選択された

フローの値が予測されたトラヒック量の期待値であった場合に達成可能な $L(R_{t+1:t+h})$ の最小値であり、 $C(O_{t+1})$ は O_{t+1} を観測する際にかかるコストである。 $L^{\text{opt}}(O_{t+1})$ の取得には、最適化問題を解くことが必要となり、計算時間がかかる。そのため、我々は以下の発見的な手法を用いる。

(1) $N - N^{\text{selected}}$ を観測を行うノードの候補の集合とする。ただし、 N^{selected} は観測を行うノードとして選択済みのノードの集合である。

(2) すべての $n \in N - N^{\text{selected}}$ について、当該ノードが観測対象として追加された際の O_{t+1} 、 $C(O_{t+1})$ 、 $L^{\text{opt}}(O_{t+1})$ を計算する。

(3) 対応する $C(O_{t+1})$ が W より小さいノードの中で、 $L^{\text{opt}}(O_{t+1})$ が最小のノードを選択する。

(4) 手順3でノードが選択された場合は、選択されたノードを選択済みノードの集合に加え、手順1に戻る。それ以外の場合は、終了する。

4. 不確実なトラヒック観測情報にもとづくトラヒックエンジニアリングのセルラーネットワークにおける災害時のオフロード制御への適用

本稿では、各基地局において、当該基地局からの流入トラヒック量を観測できているものとする。ただし、ネットワーク配下の基地局数が非常に多い場合は、短い時間間隔で、全基地局からの情報を収集することは困難である。そのため、各時刻で、観測情報収集元の基地局を選択し、選択した基地局から観測データを収集する。そして、収集した観測データをもとに、現在の各地点からのトラヒック量を推定し、将来のトラヒック量を予測する。予測したトラヒック量をもとに、各基地局配下のトラヒックのうち、近隣の基地局にオフロードするトラヒックの割合を決める。

上記の制御は、我々の提案している不確実なトラヒック観測情報にもとづくトラヒックエンジニアリングと同じ手順である。ただし、近隣の基地局にオフロードするトラヒックの割合を決める問題を、トラヒックの経路を定める問題に置き換えることが必要である。この置き換えのために、我々は、以下の手順で経路計算用グラフを構築した。

(1) コアネットワーク、基地局を含むネットワークトポロジをグラフに挿入

(2) 各基地局に対してノードを1つ追加、追加したノードと対応する基地局をリンクで結ぶ

(3) 2で追加された各ノードに対して、当該基地局配下の端末のオフロード先となりうる基地局とのリンクを追加する

(4) 1、2で追加されたリンクの重みを0（あるいは、非常に小さい値）に設定、3で追加されたリンクの重みを1と設定する。

このグラフにおいて、2で追加されたノードは、各基地局配下の端末集合に該当する。そこで、2で追加された各ノードから流入するトラヒックを収容する経路を計算することにより、各基地局配下の端末が近隣基地局にオフロードするトラヒックの割合を決めることができる。また、各トラヒックについて、経由したリンクのコストの和を求め、その総和を最小化すること

により、可能な限り端末間通信によるオフロードを行わないようにすることができる。このような経路計算は、経路計算モジュールにおけるコスト関数 $f(X_i, R_i)$ を以下のように定義することににより達成可能である。

$$f(X_i, R_i) = \sum_{f,j} G^{l,j} R_{t+k}^{f,j} x_{t+k,f}$$

5. 評価

5.1 災害時の人流・通信量データの生成

本評価においては、東京都新宿区に震災が発生した場合を想定し、震災発生時に新宿区内にいた人々が自宅や避難所に向けて徒歩で移動しながら携帯端末を使用する行動をマルチエージェントシミュレーションで再現したデータ [5] を用いた。以下に本稿における人流・通信量の生成方法について述べる。

5.1.1 道路・避難所・被災者初期配置

OpenStreetMap [6] で取得可能な道路の位置座標に関する公開情報を利用する。本稿では、自動車専用路以外の道路を使用する。各道路に対して交差点とカーブ点をノードと定義し、公開情報として取得可能なノード座標に対し各道路を經由するノード間で分割した各部位をエッジと定義し、エッジを単位に避難者の人数や移動速度を管理する。また新宿区の Web サイトで公開されている 49 か所の一次避難所の位置座標を避難所の位置として使用する。さらに東京都総務局統計部が公開している町丁単位の昼間人口と夜間人口を被災者とみなし、各町丁のエリア内に一様分布で初期配置する。

5.1.2 セルラーネットワーク

本評価では、新宿駅周辺の甲州街道、青梅街道、新宿通り、十二社通りに囲まれたエリアを密集地域、他のエリアを通常地域と定義し、OpenStreetMap から抽出した trunk、primary、secondary の道の各エッジの midpoint を基地局設置候補に設定し、基地局設置候補をランダムな順に選択して最も距離の近い既設基地局までの距離が 100m 以上 (密集地域の場合) か、300m 以上 (通常地域の場合) であれば基地局を配置する処理を反復することで、基地局を配置し、各基地局は、コアネットワークを形成するコアノードに直接接続するものとした。また、本稿では、コアノード間には十分な帯域が確保できていることを想定し、各基地局に収容可能なトラフィック量の最大値が 150Gbps とした。また、全 492 か所の基地局のうち、各時刻に観測可能な基地局は、5 か所のみとして評価を行った。

5.1.3 避難行動

シミュレーション開始時点 (震災発生時点) で各被災者に対し移動パターンを以下の割合で設定する。マンションやオフィスビルなど耐震強度に優れた建造物に居住する住民が多くを占めることが予想されることから、各町丁の夜間人口のうち 80% は動かないでそのまま待機し、残る 20% は各被災者から各避難所 i までの最短道路上の距離の逆数を効用値 V_i に設定した多項ロジットモデル $\exp(1000V_i) / \sum_j \exp(1000V_j)$ に従う確率でランダムに選択した避難所に向けて避難する。ただし避難所の収容キャパシティは考慮せず、最初に選択した避難所に到達した後は到着避難所に待機する。また各町丁の昼間人口から夜間人口を引いた人口 (新宿区外から日中、新宿区内に就業や就学のために来ている人々) に対しては、やはり 80% は動かないでそのまま待機し、残る 20% は新宿区外の自宅に帰宅するものとし

各々 1/4 の確率で東西南北の各方向を選択し、新宿区外に出る最短道路上の出口に向けて移動する。ただし新宿区外に出た被災者はその時点でシミュレーション対象から除外する。避難所もしくは新宿区からの出口に向けて移動する際に被災者がとる経路は、ノードとエッジから構成される道路トポロジ上の最短経路を用いる。

一般に、道路上に存在する避難者の密度が増加するほど歩行速度は低下することが予想される。そこで全ての道路幅を 1m とし、各エッジ e の長さで e 上に存在する避難者数を除した避難者密度 d_e に対し e 上の避難者の移動速度 v_e を次式で与える。

$$v_e = \begin{cases} -0.204d_e + 1.48 & d_e < 1.5 \\ \max(1.32 \log \frac{0.16}{d_e}, v_{min}) & d_e \geq 1.5 \end{cases}$$

5.1.4 通信行動

被災者は (i) 震災発生時点に存在した場所から移動しない待機者、(ii) 避難所や新宿区外への出口に向けて移動中の避難者、(iii) 目的の避難所に到着した避難所持機者、(iv) 目的出口に到着して新宿区外に流出した流出者、の 4 種類に分けられる。この中で (iv) 流出者を除く、(i) 待機者、(ii) 避難者、(iii) 避難所持機者、の各々から平均 10 分の指数分布に従う時間間隔で通信要求を発生させた。

5.2 比較対象

本評価では、以下の手法を比較対象とした。また、本評価において、提案手法を Stochastic Control Considering Uncertainty (SCCU) と呼ぶ。

Stochastic Control Considering Uncertainty (SCCU)

提案手法により、観測箇所の決定、経路の決定を行う。本評価において、 σ_f は、評価に用いるトラフィック生成とは異なるシードで行われたトラフィック生成シミュレーションの結果をもとに定める。これにより、トラフィック量の変動しやすい基地局を把握することができ、以後の制御、観測箇所の決定に生かすことができる。

Control Based on Expected Rate (CBER)

本手法では、確率を考慮せずに経路を決定する。本手法は、各タイムスロットで以下のように動作する。

- (1) ランダムに選択したノードにおいてトラフィック量を観測し、観測されたトラフィック量を収集する
- (2) SCCU と同様の手順で、トラフィック量を推定・予測する
- (3) 推定・予測されたトラフィック量の期待値を用いて、次のタイムスロットの経路を研鑽する。その際、経路は、各リンクを流れるトラフィック量が以下となるように計算される。つまり、以下の最適化問題を解く。

$$\text{minimize} : \sum_l \left(E_{X_{t+k}} \left[\sum_j G^{l,j} R_{t+k}^{f,j} x_{t+k,f} \right] - (c_l - \Delta c) \right)^+ \quad (14)$$

ただし、 $(x)^+$ は $x \geq 0$ であれば x 、それ以外は 0 となる。本手法では、 Δc を大きな値に設定することにより、各リンクを經由するトラフィック量を小さく抑えることが可能となる。本評価では、 Δc を異なる値に設定した複数の結果を示す。本評価では、CBER と比較することにより、トラフィック量の確率分布を考慮して経路を設定することの効果を示すことができる。

Stochastic Control with Random Select (SCRS)

本手法では、コントローラはトラフィックを観測するノードを

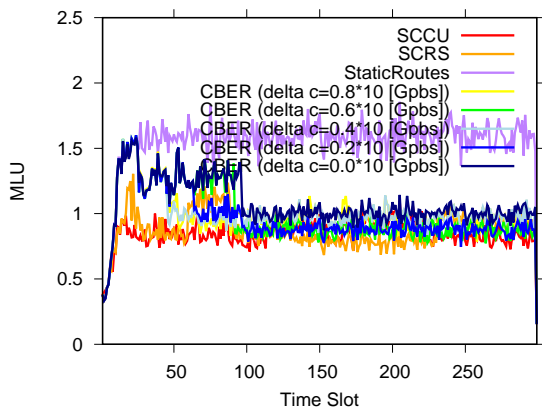


図2 最大リンク使用率の時間変化

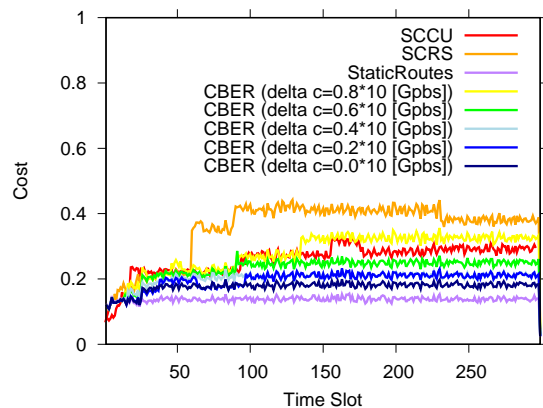


図3 近隣基地局にオフロードされたトラフィック総量の時間変化

各タイムスロットでランダムに選択する。そして SCCU と同じ手順で、トラフィック量を推定・予測し、トラフィック量の予測分布を考慮して経路を計算する。本手法と比較することにより、各タイムスロットでトラフィックを観測するノードを選択することの効果を示すことができる。

5.3 結果

図2に、最大リンク使用率の時間変化を示す。横軸は、災害発生後の経過タイムスロット数で縦軸は最大リンク使用率である。図中の StaticRoutes は、最初のタイムスロットの状態に合わせて経路を設定し、その経路のまま維持した場合を示す。図より、CBER や StaticRoutes の場合は、シミュレーション開始直後に最大リンク使用率が急激に悪化し、1より高い状況がしばらく続いている。これは、人の移動、移動の結果発生する局所的な人の集中により、一部の基地局からの通信量が急激に増大したためである。しかしながら、CBER では、トラフィックが増大しやすい箇所にあらかじめ多くの資源を割くような経路設定はしておらず、また、一部の観測情報からはトラフィックの増大を検出することができず、過負荷を削減するような制御ができていない。それに対して、SCRU では、事前に設定した基地局から流入するトラフィック量の分散をもとに、過負荷に陥りやすい箇所にあらかじめ多めの資源を割くようなオフロードの設定を行うことができる。その結果、過負荷が生じやすい基地局の配下では、早めにオフロードをさせることができ、過負荷状態を削減できている。さらに、SCCU では、観測箇所の決定の際に、トラフィック量の不確かさを考慮することにより、トラフィック変動が発生しやすい基地局を重点的に観測することができている。その結果、負荷の上昇を早めに検知することができ、対応することができる。また、図3-1-12に、各タイムスロットにおいて、オフロードされたトラフィック量を示す。図より、SCCU は、 Δc を 0.6、0.8 と設定した CBER と同程度のトラフィックしかオフロードしていない。それにも関わらず、過負荷状態を解消することができるのは、SCCU が基地局から流入するトラフィック量の分散を考慮し、観測箇所を決定することにより、早めに過負荷の発生を認識するとともに、トラフィック量の分散を考慮し、過負荷の発生がしやすい基地局については、早めにトラフィックはオフロードを行うのに対して、過負荷状態に陥りにくい基地局については、オフロードを行うことを避けているためだと考えられる。

6. まとめと今後の課題

我々は、これまで、トラフィック情報の収集・解析にかかる負荷を増大させることなく、制御周期を短くするために、各時刻においては、ネットワーク内の一部のトラフィックのみしか観測できない環境下において、トラフィックの不確か性を確率として扱い、観測情報をもとに確率分布の更新を行うことによる状況把握、トラフィック量の確率分布をもとに輻輳を回避する経路制御、経路制御への影響が大きな箇所を次時刻の観測箇所としていする観測箇所選択を行う手法を提案してきた。本稿では、本手法をトラフィックの変化の激しい、災害直後のセルラーネットワークにおけるオフロード制御に適用し、環境変動が激しい、災害時のセルラーネットワークにおいても我々の手法が有効に動作することを示した。

今後は、より大規模なネットワークにおいて、提案手法の有効性の評価を行う予定である。

謝辞

本研究成果の一部は、国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究「未来を創る新たなネットワーク基盤技術に関する研究開発」により得られたものである。

文献

- [1] H. Wang, L. Ding, P. Wu, Z. Pan, N. Liu, and X. You, "Dynamic load balancing and throughput optimization in 3GPP LTE networks," in *Proceedings of the 6th international wireless communications and mobile computing conference*, pp. 939–943, ACM, 2010.
- [2] I. F. Akyildiz, A. Lee, P. Wang, M. Luo, and W. Chou, "A roadmap for traffic engineering in SDN-OpenFlow networks," *Computer Networks*, vol. 71, pp. 1–30, 2014.
- [3] T. Otoshi, Y. Ohsita, M. Murata, Y. Takahashi, N. Kamiyama, K. Ishibashi, K. Shiimoto, and T. Hashimoto, "Traffic engineering based on model predictive control," *IEICE Transactions on Communications*, vol. 98, no. 6, pp. 996–1007, 2015.
- [4] K. Satake, T. Otoshi, Y. Ohsita, and M. Murata, "Traffic engineering cooperating with traffic monitoring for the case with incomplete information," in *Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC), 2017 27th International*, pp. 1–7, IEEE, 2017.
- [5] 上山憲昭, 石橋圭介, 星合擁湖, "災害時におけるマルチホップ D2D 通信の到達性分析," 電子情報通信学会技術研究報告 (IN2017-10), May 2017.
- [6] "Openstreetmap." <http://www.openstreetmap.org>.