

[依頼講演] 災害時におけるマルチホップD2D通信の到達性分析

上山 憲昭[†] 石橋 圭介[†] 星合 橋湖[†]

† 日本電信電話株式会社 NTT ネットワーク基盤技術研究所 〒180-8585 東京都武蔵野市緑3-9-11
E-mail: †{kamiyama.noriaki,ishibashi.keisuke,hoshiai.yoko}@lab.ntt.co.jp

あらまし 地震等の災害発生時には、基地局やバックホール等のセルラーネットワーク(NW)設備が損傷し、スマートフォン等の携帯端末が通信不能となる状況が予想される。またセラーナー NWは正常に稼動していても、安否確認等のため被災地の通信需要が爆発的に増加し、セラーナー NWの通信資源の不足が予想される。本問題に対し、セラーナー NWを経由しないで携帯端末間で直接通信を行うD2D(device-to-device)通信の併用が検討されている。特に複数の携帯端末を経由してデータ通信を行うマルチホップD2D通信は、到達範囲を拡大し災害時の接続性を確保する手段として有望であり、D2D通信端末数比率や最大ホップ長等の各種パラメータを最適制御するには、簡易な方法でマルチホップD2D通信成功確率を推定できることが望ましい。またその通信可能性は携帯端末の位置分布に依存することから、災害時の人々の避難行動を考慮した分析が必要となる。そこで本稿では、マルチホップD2D通信成功確率の簡易な近似式を導出し、地震発生時の人々の避難行動をマルチエージェントシミュレーションで再現し、地震発生時のマルチホップD2D通信成功確率を分析した結果を報告する。

キーワード 災害時通信, D2D通信, マルチエージェントシミュレーション

[Invited Talk] Reachability Analysis of Multi-hop D2D Communications at Disaster

Noriaki KAMIYAMA[†], Keisuke ISHIBASHI[†], and Yoko HOSHIAI[†]

† NTT Network Technology Laboratories, NTT Corporation 3-9-11, Midori, Musashino, Tokyo 180-8585
E-mail: †{kamiyama.noriaki,ishibashi.keisuke,hoshiai.yoko}@lab.ntt.co.jp

Abstract At disaster, users will not be able to communicate with their families and friends using mobile terminals, e.g., smartphones, in many cases because of failures of base stations and backhaul of cellular networks. Moreover, the cellular networks will be seriously congested by dramatically increased traffic demand although the cellular networks are normally operated without failures. To cope with these problems, D2D (device-to-device) communications in which mobile terminals directly communicate without taking cellular networks have been investigated. Especially, multi-hop D2D communication taking multiple mobile terminals as relay nodes will be effective to obtain the connectivity at disaster. It is desirable to estimate the acceptance probability of multi-hop D2D communication by a simple method to optimally control parameters, e.g., the ratio of mobile terminals using D2D communications and the maximum hop length. Moreover, when evaluating the reachability of multi-hop D2D communication, we need to consider the evacuation behavior at disaster because the acceptance probability depends on the geographical distribution of mobile terminals. Therefore, in this paper, we derive the estimate of acceptance probability of multi-hop D2D communication by a simple way and analyze its reachability using the multi-agent simulation reproducing the evacuation behavior at earthquake in Shinjuku ward.

Key words disaster communication, device-to-device communication, multi-agent simulation

1. はじめに

セラーナー NWでは、半径数百mから数十kmのマクロセル内では多数の端末が同一地域を共用するため、端末数が増加するとスループットが低下する。そのためセラーナー NWの帯域不足を解決するため、通常の基地局がカバーするマクロセルに重複する形で狭い範囲をカバーするピコセルやフェムトセルを配置するHETNETが3GPPリリース10で採用され、LTE-Advancedの主要技術となっている[5]。ところで震災などの大規模災害発生時には、セラーナー NWの基地局やバックホールに障害が発生し、スマートフォン等の携帯端末が使用不能となる可能性が高い。実際、東日本大震災の際は、バッテリーはソーラー発電で充電可能で携帯端末は使用可能であっても、セラーナー NWの障害のため通信不通となった[15]。堅牢なビルの屋上などに設置されるマクロセルの基地局と異なり、特にピコセルやフェムトセルの基地局は障害を受け使用不能となる可能性が高い。また通信設備容量の低下に加え、家族や知人の安否確認・状況連絡等のための通信需要が爆発的に発生し、通信可能性が極度に低下する可能性が高い。

ところでセラーナー NWの基地局を経由せずに携帯端末間で直接通信することで情報を伝達するD2D(device-to-device)通信が、セラーナー NW設備のトラヒック負荷を低減し、代替通信手

段としての接続性向上技術として注目されている[2]。D2D通信の形態としては、発着端末間で直接通信するシングルホップD2D通信と、他の携帯端末を経由して通信を行うマルチホップD2D通信が検討されている[10]。特に大規模災害時には、セラーナー NWの基地局やバックホールが障害を受け使用不能となる可能性が高く、代替手段としてマルチホップD2D通信が注目されている[1][15][19][26]。また通信需要の増大・セラーナー NW通信容量の低下で予想されるセラーナー NWの通信容量不足に対し、トラヒックをD2D通信にオフロードさせる効果が期待される。特に複数の携帯端末を経由してデータ通信を行うマルチホップD2D通信は、到達範囲を拡大し災害時の接続性を確保する手段として有望である。しかしその疎通性向上やトラヒック迂回効果を最大化するには、D2D通信端末数比率や最大ホップ長等の各種パラメータを最適制御する必要があり、簡易な方法でマルチホップD2D通信成功確率を推定できることが望ましい。これまでにも災害時のマルチホップD2D通信の性能評価に関する研究が見られるが[1][12][19][22][24]、携帯端末の位置として、ランダムに配置した状況や一定の間隔で並んだ状況を想定しており、災害時に携帯端末を持った人々の行動パターンを考慮した分析はない。一方、マルチホップD2D通信の到達性は中継する携帯端末の位置に依存し、災害時の人々の行動を考慮した評価が必要となる。本稿の貢献は以下の3点にまとめられる。

- (1) マルチホップ D2D 通信成功確率の簡易な近似式を導出
- (2) 新宿区を想定した震災発生時の人々の避難行動をマルチエージェントシミュレーション (MAS) で再現
- (3) MAS で得られた携帯端末の位置と通信データを用いて、マルチホップ D2D 通信成功確率を分析

以下、2 節では D2D 通信の概要と関連研究を述べ、3 節では携帯端末の位置分布からマルチホップ D2D 通信成功確率を推定する簡易な近似式を導出する。そして 4 節では震災発生時の人々の行動を模擬した MAS を用いた数値評価結果を示し、5 節にて全体をまとめる。

2. D2D 通信の概要と関連研究

2.1 使用周波数帯域

D2D 通信は、セルラー NW の周波数帯域 (ライセンスバンド) を使用するインバンド型と、WiFi Direct, Bluetooth, ZigBee, ISM (industry science medical) などの周波数帯域 (アンライセンスバンド) を使用するアウトバンド型が検討されている [2]。さらにインバンド型は、セルラー NW 経由で通信を行う携帯端末 (CC: conventional cellular) と帯域を共有するアンダーレイ型 [6] と、CC 用と D2D 用でチャネルを分離するオーバレイ型 [7] がある。またアウトバンド型は、セルラー NW が認証、コネクション管理、資源割当などの制御を集中的に実施する集中制御型 [8] と、携帯端末が自律的に通信を行う自律分散型 [21] [28] がある。

2.1.1 インバンド型 D2D 通信

直接通信を行う携帯端末間の通信距離は最大 300m 程度であり [19]、携帯端末はセルラー NW 用と送受信機を共有でき携帯端末の対応が容易であること、またセルラー NW が D2D 通信の使用チャネルを管理・制御することができ D2D 通信の品質管理が容易であることが長所として挙げられる。一方、アンダーレイ型は CC とチャネルを共用するため、CC との干渉を回避し CC に与える影響を抑制するためのチャネル割当制御 [10] [13]、送信電力制御 [23]、経路制御 [26] 等の機能が必要になること、オーバレイ型は固定的にチャネルを D2D 用に割当てるため、トラヒック需要量の時間変化が激しい場合には周波数資源の利用効率が低下することが短所として挙げられる。そのためアンダーレイ型とオーバレイ型を状況に応じて切り替える方式も提案されている [4]。

2.1.2 アウトバンド型 D2D 通信

携帯端末間の通信距離は最大 100m 程度であり [15]、5GHz 帯を用いるアウトバンド型 D2D が、LTE-U (LTE-Unlicensed) や LAA (Licensed Assisted Access using LTE) という名称で、3GPP release 13 に採用されたことから [27]、今後の普及が予想される。LTE-U や LAA では Wi-Fi 等のアンライセンスバンドを使用する既存機器との干渉を避けるため、CCA (Clear Channel Assessment) と呼ばれる MAC プロトコルを使用する。さらに D2D 通信の安定性を向上させるため、CCA を拡張し D2D 通信に対してチャネル割当を行なう Inter-system CSMA/CA が提案されている [28]。

Inter-system CSMA/CA では、送信端末は通信に先立ちチャネルをセンシングし、一定期間 (DIFS: distributed inter frame space) 空きであれば小サイズの RTS パケットを送信し、受信端末は応答として CTS パケットを返送する。CTS を受信した送信端末はデータを送信し、その期間中 RTS もしくは CTS を受信した全ての端末は NAV (network allocation vector) と呼ばれる状態となりデータ送信を見合わせることで、送信端末に対しデータ送信期間中のチャネル割当がなされる。本方式は IEEE 802.11 DCF プロトコルを用いて実現できるため、既存の無線 LAN の MAC プロトコルに影響を与えない。

アウトバンド型 D2D 通信の長所としては CC との干渉が無く干渉回避のための制御が不要なことが挙げられる。一方短所としてはセルラー NW 用と D2D 通信用で異なる送受信機が携帯端末に必要になること、またアンライセンスバンドを使用する Wi-Fi 等の既存機器との干渉を想定した MAC プロトコルが必要となり、スループットの低下が挙げられる [28]。従来は主にインバンド型を対象に D2D 通信が検討されてきたが、最近はアウトバンド型 D2D 通信に対する注目が高まってきており [2]、LTE-A で Wi-Fi Direct をサポートするテストベッド実装も行われている [17]。

2.2 経路制御

マルチホップ D2D 通信では、送信端末と各中継端末が D2D 通信を行う相手端末を各々自律的に決定することで経路が決まる。同様のルーティング問題はアドホック NW において広く検討されているが、マルチホップ D2D 通信での経路制御方式としては SPR (shortest path routing) が代表的である [25]。各携帯端末は GPS などにより自身の位置座標を把握でき [26] [22]、セルラー NW は全ての携帯端末の位置座標情報を取得して管理し、送信端末からの問合せに対して目的端末の位置座標を通知することで、送信端末は目的端末の位置座標を把握できるものとする [25]。SPR では各端末の位置座標に基づき、送信端末と各中継端末は受信端末に至る中継ホップ数が最小となるよう通信相手端末を自律的に選択する [22] [25] [26]。以下に SPR の手順の概略を述べる。

(1) 送信端末や中継端末は周囲に存在する D2D 通信可能な端末の位置座標を把握する (詳細については次節を参照)。

(2) 送信端末は取得した候補端末の中から、目的端末への距離が自身から目的端末への距離よりも近い端末を候補を絞り込む。

(3) さらに絞り込んだ候補の中から、自身から最も離れている端末を通信相手端末として選択してデータを送信する。

(4) これらの処理を目的端末に到達するまで反復する。

2.3 近隣に存在する端末の発見方法

前節で述べたように、D2D 通信では送信端末と各中継端末は D2D 通信を行う相手端末を自律的に発見する必要がある。まずアドホック NW と同様に、各端末が完全に自律的に通信相手端末を発見する場合について述べる。送信端末や中継端末は、周囲に存在する端末に対してビーコンをプロードキャストし、ビーコンを受信した端末は自身の位置座標を送信端末に返信することで、周囲に存在する D2D 通信可能な端末の位置座標を把握する [7]。また D2D 通信ではセルラー NW のサポートも可能であり、セルラー NW が集中的に全ての携帯端末の位置情報を管理する集中制御型も考えられる。この場合、D2D 通信を行う送信端末はセルラー NW に周囲に存在する携帯端末の位置情報を問合せ取得する [7]。3GPP release 12 はこれら二つのアプローチを用いた ProSe を採用している [11] [20]。

2.4 D2D 通信で期待される効果

セルラー NW に D2D 通信を併用することで、以下の効果が期待される。

(1) カバーエリアの拡大: セルラー基地局の電波到達範囲外に存在する携帯端末を、電波到達範囲内に存在する携帯端末を中継端末として利用し D2D 通信で接続することでセルラー NW へ収容でき、セルラー NW のカバーエリアが拡大 [7]

(2) スループットの向上: D2D 端末は通信距離が最大でも 100m から 300m 程度と短く、同一周波数チャネルを地理的に繰り返し利用できるため、システム全体のスループットが向上 [9]

(3) 携帯端末の消費電力の低減: 通信距離が短くなる結果、携帯端末の送信電力を低減することができ携帯端末のバッテリー持続時間が増大 [12]。

(4) セルラー NW 基地局とバックホールの負荷低減: 通信相手の位置情報をセルラー NW に問い合わせることで目的端末の位置情報を取得するため制御信号はセルラー NW に発生するが、データ通信パケットはセルラー NW 設備を経由しないで直接端末間で交換されるためセルラー NW 設備のトラヒック負荷が低減 [7]

(5) 新しいサービス (ローカルデータサービス) の創出: D2D 通信は通信可能な距離が数 100m 程度と短くシングルホップ D2D 通信は近隣に存在する携帯端末間での情報交換に限定されるため、近隣の飲食店情報の配信などユーザの場所に関係した (context-aware) データを効果的に配信 [10]

(6) 災害時の通信手段の確保: 大規模災害時のセルラー NW 障害の代替通信手段として、マルチホップ D2D 通信を用いることで疎通性を確保 [15]

2.5 関連研究

災害時にセルラー NW の全体もしくは一部に障害が発生した場合の代替通信手段としてマルチホップ D2D 通信を活用する研究がこれまでにも見られる。例えば Nishiyama らは経路制御方式として MANET と DTN を併用し、アウトバンド型で 20 ホップといった多段のマルチホップ D2D 通信を行うフィールド実験を報告している [15]。また Yuan らは災害時の代替通信手

段としてインバンド・アンダーレイ型のマルチホップ D2D 通信を用いる場合に、CC との干渉を避けるためにセルの外円を経由させるルーティング方式 IAR (interference aware routing) を提案している [26]。Alhourani らや Tanha らは災害時のインバンド・オーバレイ型のマルチホップ D2D 通信成功確率を解析している [1] [19]。

またマルチホップ D2D 通信成功確率の性能評価を行った研究も見られる。例えば Wang らはインバンド・アンダーレイ型での CC との干渉を考慮し、SPR を用いたマルチホップ D2D 通信到達確率をポアソン点過程を用いて導出している [22]。また Wei らはインバンド・オーバレイ型で携帯端末が等間隔で並んだ状態での到達率を、計算機シミュレーションにより評価しており [24]、前述したように Alhourani らや Tanha らはインバンド・オーバレイ型のマルチホップ D2D 通信の成功確率をポアソン点過程を用いて解析している [1] [19]。さらに Melki らはインバンド・アンダーレイ型マルチホップ D2D 通信の消費電力低減効果や収容ユーザ数拡大効果を、携帯端末をランダムに配置した計算機シミュレーションにより評価している [12]。しかしこれら既存研究は携帯端末の位置をランダム配置やポアソン点過程で定めており、避難行動など災害時に人々がとる行動を考慮した評価がなされていない。一方、マルチホップ D2D 通信の到達性能は中継携帯端末の位置に依存し、災害時のユーザ行動を考慮した評価が必要である。

3. マルチホップ D2D 通信成功確率の簡易近似式の導出

本節では、携帯端末の位置の分布から、簡易な方法でマルチホップ D2D 通信の成功確率を推定するため、マルチホップ D2D 通信成功確率の近似式を導出する。

3.1 想定条件

本稿では D2D 通信としてインバンド型とアウトバンド型の両方を想定し、全ての場所で W 個の周波数チャネルが D2D 用に使用可能とする。アウトバンド型の場合は、Wi-Fi 等のアンライセンスバンドを使用する機器との干渉を避けるため Inter-system CSMA/CA [28] 等の MAC プロトコルを用い、通信開始時に W 個の全てのチャネルが使用中の場合は通信失敗とする。またチャネル確保後の D2D 通信で達成される平均スループットを G とする。シングルホップ D2D 通信の最大通信可能距離を r とし、最大で H ホップ以下のマルチホップを許容する。一般にアドホック NW やマルチホップ D2D 通信ではユーザが中継処理に協力させる動機付けが課題となるが、震災等の非常時であり全てのユーザが協力する状況を想定する。そのため携帯端末の電源が入っており、バッテリー残量が十分にあり、アウトバンド型の場合はアウトバンド D2D 通信機能を備えている条件を全て満たす携帯端末を D2D 通信可能な携帯端末と定義し、全携帯端末に占める D2D 通信可能な携帯端末の割合を s とする。

各携帯端末からは、到着率入のポアソン過程に従い、平均サイズ L の幾何分布に従うサイズのデータ通信要求が発生する。このとき各携帯端末の発生呼量 A は $A = \lambda L / G$ となる。セルラー NW のマクロセルの基地局とマクロセル間のバックホールは正常に稼働していること、また携帯端末は GPS 等により自身の位置座標を取得できることを想定し、セルラー NW は一定周期で全ての携帯端末に位置座標を問合せ、携帯端末は自身の位置座標をセルラー NW に回答する。以後、通信を要求する携帯端末を発端末 (ST: source terminal), 最終的な受信端末で発端末にとっての通信目的の相手となる携帯端末を着端末 (DT: destination terminal), ST と DT との間を中継する携帯端末を中継端末 (RT: relay terminal) と呼ぶ。ST は通信に先立ちセルラー NW に問い合わせることで DT の位置座標情報を取得する。マルチホップ D2D 通信のルーティングは SPR を想定し [26], ST と RT は D2D 通信を行う相手端末を ProSe により選択する [11]。

3.2 中継端末位置のモデル

図 1 に示すように任意の ST a と DT b 間の直線上に ST a が R_1 の端に DT b が R_K の中に存在するよう半径が $r/4$ の K 個の円領域 R_k ($1 \leq k \leq K$) に分割する。ST a は R_1 の任意端末 m_1 と、 m_1 は R_2 内の任意端末 m_2 と、以降同様に R_k 内の RT m_k は R_{k+1} 内の任意端末 m_{k+1} と、そして最後に R_{K-1} 内の RT m_{K-1} は DT b と各々 D2D 通信を行う。ST a と DT

b の位置座標を各々 \mathbf{X}_a , \mathbf{X}_b とすると、各円領域 R_k の中心の位置座標 C_k は次式で得られる。

$$\mathbf{C}_k = \mathbf{X}_a + \left\{ r + 2r(k-1) \right\} \frac{\mathbf{X}_b - \mathbf{X}_a}{|\mathbf{X}_b - \mathbf{X}_a|} \quad (1)$$

C_k は $r/2$ の間隔で直線上に並ぶことから最大で H ホップ以下のマルチホップを許容する場合、D2D 通信可能な端末間距離の最大値は $rH/2$ となる。

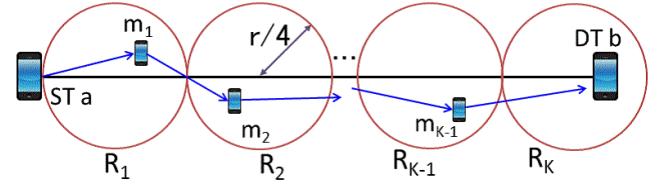


図 1 Position model of relay terminals

3.3 シングルホップ D2D 通信成功確率

領域 R_{k-1} 内の RT m_{k-1} ($k=1$ の場合は ST) と、 R_k 内の RT m_k ($k=K$ の場合は DT) との間のシングルホップ D2D 通信成功確率を Q_k とする。 m_{k-1} と m_k との間の D2D 通信が成功するのは、 m_{k-1} と m_k との間の空間上で D2D チャネルが確保できる場合であるが、近似的に R_k にて空きチャネルが確保できることを条件と考える。全携帯端末数を N 、D2D 通信フローが R_k を経由する確率を Z_k とすると、 R_k の D2D 通信トラヒック負荷は $sNAZ_k$ となる。 R_k における D2D 通信チャネル使用数の時間変化は使用チャネル数を状態とする出生死滅過程でモデル化できるが、 R_k で D2D 通信チャネルに空きがある場合でも R_k 内に中継可能な端末が存在しない場合や経路上の他ホップで D2D 通信が確立できない場合は、 R_k においてもチャネルが確保されない。そのため R_k を経由する D2D 通信要求の成功確率を P_k とすると、 R_k の実効的なトラヒック負荷は $sNAZ_k P_k$ となる。

m_{k-1} と m_k との間の D2D 通信が成功するのは R_k で空きチャネルを確保できることに加えて、 $k \leq K-1$ の場合は R_k 内で D2D 通信可能な携帯端末 RT m_k が 1 つ以上存在する場合であるため、 R_k 内の移動端末数を N_k とすると回線数 W で呼量 $sNAZ_k P_k$ のアーラン B 式 $E_b(W, sNAZ_k P_k)$ を用いて Q_k は次式で得られる。

$$Q_k = \begin{cases} \left\{ 1 - (1-s)^{N_k} \right\} \left\{ 1 - E_b(W, sNAZ_k P_k) \right\}, & 1 \leq k \leq K-1 \\ 1 - E_b(W, sNAZ_k P_k), & k = K \end{cases} \quad (2)$$

Z_k や P_k を各 R_k に対してセルラー NW が得ることがコストや処理負荷の観点から難しい場合も予想される。そこでマルチホップ D2D 通信の平均ホップ長 h に対し各 D2D 通信によって平均的には h 個の領域に負荷が発生すると考え、さらに R_k の周囲の領域のユーザ数も N_k に近似して考え、 $Z_k = N_k h / N$ で近似する。また P_k については全体の平均値 P で代用する。このとき Q_k は次式で近似される。

$$Q_k = \begin{cases} \left\{ 1 - (1-s)^{N_k} \right\} \left\{ 1 - E_b(W, sN_k h AP) \right\}, & 1 \leq k \leq K-1 \\ 1 - E_b(W, sN_k h AP), & k = K \end{cases} \quad (3)$$

3.4 マルチホップ D2D 通信成功確率

領域集合 $\mathbf{R} = \{R_1, R_2, \dots, R_K\}$ を経由する K ホップ D2D 通信の成功確率を $P(\mathbf{R})$ とする。 \mathbf{R} を経由するマルチホップ D2D 通信が成功するのは \mathbf{R} に含まれる全ての R_k でシングルホップ D2D 通信が成功する場合であり、

$$P(\mathbf{R}) = Q_1 \times Q_2 \times \cdots \times Q_K \quad (4)$$

となる。ただし Q_k は式 (2)(3) に示すように P_k もしくはその平均値 P に依存することから、ブレンド法 [3] などの求根アルゴリズムを用いて $P(\mathbf{R})$ を算出する。

4. MAS を用いた数値評価

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歩く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(MAS)で再現することで各時点での被災者の位置分布や通信要求発生パターンを再現する。そして得られた位置分布と通信要求発生パターンを前節で導出したマルチホップD2D通信成功確率式に適用した結果を述べる。

4.1 MASのモデル

4.1.1 道路と避難所と被災者初期配置

OpenStreetMap[16]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。OpenStreetMapでは、幹線道路(motorway, trunk等)や住宅道路(residential等)など、21種類の道路(way)が定義されているが、motorway(自動車専用路)以外のwayを使用する。各way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wayを経由するノード間で分割した各部位をエッジと定義し、MASでは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。図2に、これら避難所の位置を赤色の点で示す^(注1)。さらに図3に示す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。ただし昼間人口は就業者と就学者の人口で夜間の就業者・就学者も含む。そのため各町丁の昼間人口から夜間人口を引くことで、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口を算出する。

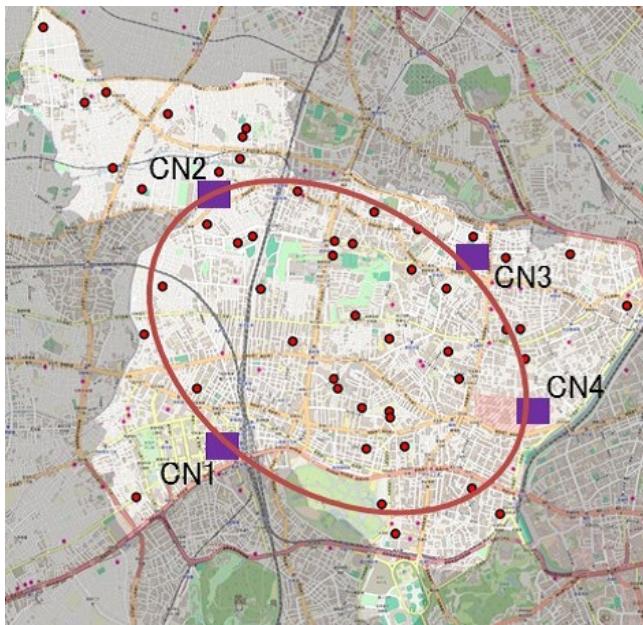


図2 Location of 49 shelters and four core nodes

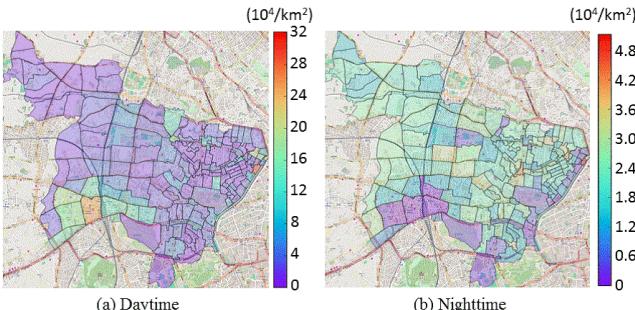


図3 Population density of each town and area in Shinjuku ward

4.1.2 セルラーネットワーク

国内移動通信キャリア3社の新宿区内の基地局配置は新宿駅周辺は100m程度の間隔で面的に、その他のエリアは主要道路沿いに300m程度の間隔で線上に配置されている傾向が見

(注1)：本稿の地図画像は全てOpenStreetMapから取得し使用している。

られる。そこで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wayの各エッジの中点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全ての候補に対して反復することで、基地局を配置する。

そして新宿区全域を周回するリングを考え、図2に紫色の四角で示す位置にリング上の配置位置がおよそ等間隔となるよう4つのコアノード(CN: core node)を、新宿駅付近(CN1), 落合中高公園付近(CN2), 早稲田キャンパス付近(CN3), 防衛省付近(CN4)に設置する。バックホールはこれら4つのCNをリンクトポロジーで接続し各基地局を最近接CNにスター構成で接続する。そして新宿区外に繋がるGW機能を新宿駅付近のCN1に設置する。

4.1.3 避難行動

震災発生時点(MAS開始時点)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%は動かないそのまま待機し、残る20%は各被災者から各避難所まで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MAS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ー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[14]。ただし[14]の歩行速度モデルは歩行者密度が大きくなると負の速度となるため v_e は下限値 $v_{min} = 0.1$ 以上の値をとるよう修正を加える。

$$v_e = \begin{cases} -0.204d_e + 1.48, & d_e < 1.5 \\ \max\{1.32 \log \frac{9.16}{d_e}, v_{min}\}, & d_e \geq 1.5 \end{cases} \quad (5)$$

4.1.4 通信行動とD2D通信

MASでは被災者をエージェントとして扱うが、被災者は(i)震災発生時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)目的的避難所に到着した避難所待機者、(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)避難所待機者、の各々から平均10分の指數分布に従う時間間隔で通信要求を発生し、通信相手を確率1/2で新宿区内から、確率1/2で新宿区外から選択する。通信相手が新宿区内の場合にのみ、ランダムに選択した他の被災者に対し平均が4MBの幾何分布に従うサイズのデータ転送要求を発生させる。通信相手が新宿区外の場合はD2D通信の対象外とする。D2D通信の平均転送スループットは $G = 100\text{kbps}$ に、最大通信可能距離は $r = 100\text{m}$ とする。また特に断らない限り、D2Dチャネル数を $W = 50$ 、D2D通信可能端末数比率を $s = 0.5$ 、最大ホップ数を $H = 10$ に各々設定する。各領域 R_k のシングルホップD2D通信成功確率 Q_k は式(3)を用いて算出する。

4.2 避難者の密度と移動速度の時間変化

図4に震災発生時点からの経過時間に対して、エッジ上の避難者の平均密度と平均歩行速度をプロットする。ただし各エッジ e に存在する避難者数 d_e で重みづけた平均値であり、避難者の体感する平均的な密度と速度に相当する。震災発生直後は道路上に避難者がいないため密度は低く移動速度は大きいが、時間の経過に伴い道路上の避難者数が増加する結果、密度は増

加し移動速度は低下する。このような傾向は震災発生後8,000秒程度まで続き、徐々に避難所や新宿区外への出口に到達する避難者が増えてくるため、以後は時間の経過に伴い避難者密度は減少し移動速度は増加する。

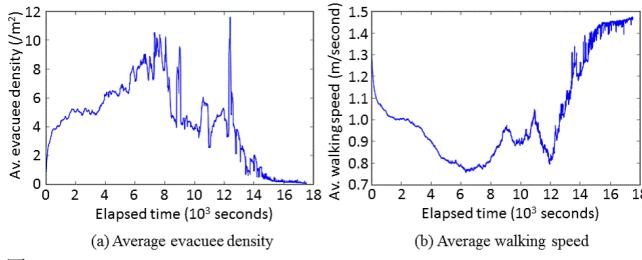


図 4 Time series of average density and walking speed of evacuee

4.3 発生通信要求数

セルラー NW を使用する場合、各携帯端末は最も距離が近い基地局にアクセスすると考え、4つの各コアノード(CN) x に接続した基地局のカバーする領域の総和を CN x のカバー領域(CNZ: core node zone)と定義する。以後の評価結果は全て MAS 開始時点から 10 分が経過する時点 t ごとに、 t から 1 分間に発生した通信要求を時点 t における統計値とする。震災発生直後から 5 時間経過時点まで MAS を行ったことから、30 のサンプル時点が存在する。表 1(a) に 30 の全サンプル時点における発生通信要求数の平均値を、ST と DT が存在する CNZ の組み合わせごとに算出した結果を ST の存在 CNZ を行に DT の存在 CNZ を列にまとめる。新宿駅周辺の CNZ 1 の人口が他の CNZ より大きいため CNZ 1 を発もしくは着とする通信要求数が多い。

3.2節で述べたように直線距離が $rH/2$ 以下の ST・DT 間でのみマルチホップ D2D 通信が可能となるが、この条件を満たす通信要求数を表 1(b) に示す。ホップ数制約を $H = 10$ 程度とすると通信可能な距離が数 100m～1km 程度と短かく、表の対角成分以外は 0 に近く、D2D 通信可能な要求のはほとんどは ST と DT とが同一の CNZ に存在する。セルラー NW の基地局やバックホール障害に対する接続性向上やトラヒック負荷低減効果を効果的に得るには H の更なる増加が必要となる。

図 5(a)に各サンプル時点において各 CNZ に存在する被災者数(待機者、避難者、避難所待機者の合計)を経過時間順にプロットする。また図 5(b)に各 CNZ に存在する被災者から同一 CNZ に存在する被災者に対する通信要求の中で、ホップ数制約を満たす通信要求数を同様に示す。図 2 に示すように CNZ 1 には避難所が少ないため時間の経過に伴い両特性が減少しているが、80%の被災者を待機状態としたため他の CNZ は時間の変化に対する両特性の変化量は小さい。以後の評価は全期間の平均値で評価する。

	CN1	CN2	CN3	CN4		CN1	CN2	CN3	CN4
CN1	6894	3669	2116	3405	CN1	1276	12	8	11
CN2	3778	1976	1094	1802	CN2	8	202	11	0
CN3	2160	1132	602	916	CN3	9	11	151	8
CN4	3384	1819	1058	1651	CN4	6	0	15	248

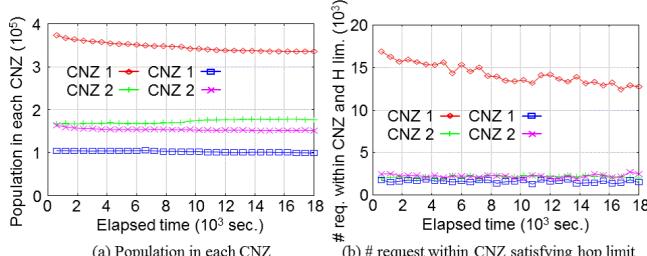


図 5 Time series of (a) population in each CNZ and (b) request count within same CNZ satisfying hop count limit

4.4 シングルホップ D2D 通信成功確率

各領域 R_k のシングルホップ D2D 通信成功確率 Q_k の各 CNZ の全サンプル時点にわたる平均値を表 2 に示す。ただし基本パラメータは表 1 に示す。

ラメタセット ($s = 0.5$, $H = 10$, $W = 50$) に対し, s , H , W のいずれか一つを変えた場合の結果を各々示す. CNZ 1 は人口が多く携帯端末が多く存在するため空きチャネルが不足する傾向が高く, 他の CNZ と比較して Q_k が小さい. D2D 通信可能端末数比率 s が増加するほど, 最大ホップ長 H が増加するほど, D2D チャネル数 W が減少するほど, D2D チャネルあたりの通信負荷が増大するため Q_k は低下する.

表 2 Average acceptance probability of single-hop D2D communication in each CNZ on various parameter sets

s	CN1	CN2	CN3	CN4	H	CN1	CN2	CN3	CN4
0.1	0.973	1.000	1.000	1.000	2	1.000	1.000	1.000	1.000
0.3	0.866	0.998	1.000	1.000	10	0.791	0.996	1.000	0.998
0.5	0.791	0.996	1.000	0.998	20	0.468	0.928	0.968	0.852
0.7	0.734	0.993	0.999	0.993	W	CN1	CN2	CN3	CN4
0.9	0.695	0.991	0.998	0.986	10	0.596	0.934	0.961	0.910
					50	0.791	0.996	1.000	0.998

表 3 Average acceptance probability of multi-hop D2D communication within hop limit in each CNZ

s	CN1	CN2	CN3	CN4	H	CN1	CN2	CN3	CN4
0.1	0.825	0.999	1.000	1.000	2	1.000	1.000	1.000	1.000
0.3	0.392	0.987	1.000	0.998	10	0.247	0.970	0.999	0.986
0.5	0.247	0.970	0.999	0.986	20	0.012	0.435	0.697	0.398
0.7	0.177	0.954	0.995	0.951	W	CN1	CN2	CN3	CN4
0.9	0.140	0.944	0.990	0.906	10	0.069	0.639	0.764	0.606
					50	0.247	0.970	0.999	0.986
					100	0.465	0.993	1.000	1.000

表 4 Average acceptance probability of multi-hop D2D communication in each CNZ

s	CN1	CN2	CN3	CN4	H	CN1	CN2	CN3	CN4
0.1	0.154	0.113	0.249	0.147	2	0.012	0.007	0.019	0.011
0.3	0.073	0.111	0.247	0.143	10	0.046	0.109	0.246	0.143
0.5	0.046	0.109	0.246	0.143	20	0.006	0.150	0.446	0.166
0.7	0.033	0.108	0.246	0.140	W	CN1	CN2	CN3	CN4
0.9	0.026	0.104	0.242	0.133	10	0.013	0.072	0.189	0.088
					50	0.046	0.109	0.246	0.143
					100	0.087	0.113	0.251	0.146

表 5 Average ratio of requests supported by multi-hop D2D communications in each CNZ for various values of s

s	CN1	CN2	CN3	CN4
0.1	0.083	0.100	0.100	0.100
0.3	0.118	0.296	0.300	0.299
0.5	0.124	0.485	0.500	0.493
0.7	0.124	0.668	0.697	0.666
0.9	0.126	0.850	0.891	0.815

4.5 マルチホップ D2D 通信成功確率

ST と DT が距離制約 $rH/2$ を満たす通信要求におけるマルチホップ D2D 通信成功確率を P_{reach} と定義する。表 3 に、各 CNZ の全サンプル時点にわたる P_{reach} の平均値を示す。各パラメタが P_{reach} に与える影響は Q_k と同様の傾向であり、CNZ 1 の P_{reach} は他 CNZ と比較して小さい。経由する全ての領域においてシングルホップ D2D 通信が成功した場合にのみマルチホップ D2D 通信は成功するため全体的に Q_k と比較して P_{reach} は小さくなるが、特に Q_k が小さい場合に P_{reach} の低下度合いが大きい。また 4.4 節で述べたように H の増加に伴い D2D 通信チャネルの負荷が増加するため Q_k が低下するが、さらに経由ホップ数が増加するため P_{reach} の Q_k 対する低下度合いも増加する結果、 P_{reach} は H の増加に伴い急激に低下する。

全ての通信要求におけるマルチホップ D2D 通信成功確率を P_{all} と定義する。表 4 に、各 CNZ の全サンプル時点にわたる P_{all} の平均値を示す。CNZ 1 内の携帯端末数が多いため CNZ 1 内で発生する通信要求は DT がマルチホップ D2D 到達範囲 $rH/2$ 内に存在する可能性が他の CNZ よりも大きい。そのため他の CNZ と比較して CNZ 1 は P_{all} と P_{reach} との差異が小さく、特に s が小さい場合には他の CNZ よりも P_{all} が大きい。表 3 で見たように H の増加に伴い P_{reach} は単調に低下するが、マルチホップ D2D 到達範囲内の通信要求数の比率は増加する結果、 H の増加に伴い P_{all} は H の小さい領域では増加する。そのため P_{all} を最大化させる H の最適値の存在が予想される。

ところで P_{all} は D2D 通信を試みた通信要求の中で D2D 通信が成功した確率なので、 P_{all} に s を乗じることで全通信要求の中で D2D で通信を行うことができた通信要求数の割合が得られる。表 5 に sP_{all} をまとめると、新宿駅周辺の CNZ 1 以外は s の Q_k に対する影響が小さいため s の増加に伴い sP_{all} は大きく増加する。一方、端末密度の高い CNZ 1 は s の Q_k に対する影響が大きいため $s=0.1$ の場合を除き s の増加に対して sP_{all} はほぼ同じ値となっている。このように端末密度が高い場合には s の増加に対して D2D 通信比率は単調に増加するとは限らず、D2D 通信の適用数を最大化させる s の最適値の存在が予想される。

5. まとめ

災害時にはセルラー NW に障害や輻輳が生じる可能性が高く、災害時の代替通信手段として接続性を確保したりセルラー NW のトラヒックをオフロードさせる技術として、携帯端末間で直接マルチホップで通信を行うマルチホップ D2D 通信が注目されている。マルチホップ D2D 通信の効果を最適化させるには D2D 通信選択比率や最大ホップ長等のパラメタを適切に制御する必要があり、そのためには簡易な方法でマルチホップ D2D 通信の成功確率が推定できることが望ましいことから、本稿では通信成功確率を簡易な近似推定式で導出し、新宿区を想定した震災発生時の被災者の行動を MAS で再現することで震災時のマルチホップ D2D 通信の成功確率を分析した。数値評価により主に以下の知見を得た。

- 新宿駅周辺など被災者密度が高いエリアほど D2D 通信用チャネルあたりの負荷が大きくシングルホップ D2D 通信成功確率 Q_k は小さい。

- マルチホップ D2D 通信の許容ホップ数 H を 10 程度とした場合、通信可能な距離が数 100m～1km 程度と短かく、多くの D2D 通信は発着端末が同一コアノード収容エリアに限定されるため、バックホールの障害に対する接続性向上やトラヒック負荷低減効果を十分に得るには H の更なる増加が必要となる。

- H の増加に伴い D2D チャネル負荷が増加し Q_k は低下し、マルチホップ D2D 通信到達範囲内の成功確率 P_{reach} は低下するが、D2D 到達範囲が広がる結果、全 D2D 通信要求に対する成功確率 P_{all} は単調には減少せず、 H の最適値の存在が予想される。

- D2D 通信可能端末数比率 s が増加するほど、D2D 通信チャネルの負荷が増加するため Q_k 、 P_{reach} 、 P_{all} は減少するが、携帯端末密度が小さい場合は s の P_{all} に対する影響は小さく、全通信要求に対しての D2D 通信比率 sP_{all} は s の増加に対して増加する。一方、新宿駅周辺など端末密度が高いエリアでは s の Q_k に対する感度が高く s の増加に対して D2D 通信比率は単調に増加するとは限らず、D2D 通信の適用数を最大化させる s の最適値の存在が予想される。

以上のことから、本稿で導出したマルチホップ D2D 通信成功率の近似式を用いて D2D 通信携帯端末の比率や最大許容ホップ長を制御することで、災害時のマルチホップ D2D 通信の接続性やトラヒックオフロード効果を最大化させる最適制御方式の検討に、今後、取り組む予定である。

謝辞 本研究成果は、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」による。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and A. Jamalipour, Stochastic Geometry Study on Device-to-Device Communication as a Disaster Relief Solution, IEEE Trans. Vehicular Tech., Vol. 65, No. 5, pp. 3005-3017, May 2016.
- [2] A. Asadi, Q. Wang, and V. Mancuso, A Survey on Device-to-Device Communication in Cellular Networks, IEEE Communication Survey & Tutorials, Vol. 16, No. 4, Fourth Quarter 2014.
- [3] R. P. Brent, Algorithms for Minimization without Derivatives, Dover Publications, Apr. 2013.
- [4] Y. Cao, T. Jiang, and C. Wang, Cooperative Device-To-Device Communications in Cellular Networks, IEEE Wireless Communications, Vol. 22, Issue 3, pp.124-129, June 2015.
- [5] A. Damnjanovic, J. Montojo, Y. Wei, T. Ji, T. Luo, M. Vajapeyam, T. Yoo, O. Song, and D. Malladi, A survey on 3GPP heterogeneous networks, Wireless Communications, IEEE, vol. 18, no. 3, pp. 10-21, Jun. 2011.
- [6] K. Doppler, M. Rinne, C. Wijting, C. Ribeiro, and K. Hugl, Device-to-Device Communication as an Underlay to LTE-Advanced Networks, IEEE Communications Magazine, Vol. 47, Issue 12, pp.42-49, Dec. 2009.
- [7] G. Fodor, E. Dahlman, G. Mildh, S. Parkvall, N. Reider, G. Miklos, and Z. Turanyi, Design Aspects of Network Assisted Device-to-Device Communications, IEE Communications Magazine, Vol. 50, Issue 3, pp.170-177, Mar. 2012.
- [8] N. Golrezaei, P. Mansourifard, A. Molisch, and A. Dimakis, Base-Station Assisted Device-to-Device Communications for High-Throughput Wireless Video Networks, IEEE Trans. Wireless Communications, Vol. 13, No. 7, pp.3665-3676, July 2014.
- [9] Y. Kawamoto, J. Liu, H. Nishiyama, and N. Kato, An Efficient Traffic Detouring Method by Using Device-to-Device Communication Technologies in Heterogeneous Network, IEEE WCNC 2014.
- [10] L. Lei, Z. Zhong, C. Lin, and X. Shen, Operator Controlled Device-To-Device Communications in LTE-Advanced Networks, IEEE Wireless Communications, Vol. 19, Issue 3, pp.96-104, June 2012.
- [11] X. Lin, J. Andrews, A. Ghosh, and R. Ratasuk, An Overview of 3GPP Device-to-Device Proximity Services, Communications Magazine, Vol. 52, Issue 4, pp.40-48, Apr. 2014.
- [12] L. Melki, S. Najeh, and H. Besbes, System Performance of Cellular Network underlaying D2D Multi-hop communication, ComNet 2015.
- [13] L. Melki, S. Najeh, and H. Besbes, Interference Management Scheme for Network-Assisted Multi-Hop D2D Communications, IEEE PIMRC 2016.
- [14] 毛利正光, 塚口博司, 歩行路における歩行者挙動に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 268 号, pp.99-108, 1977 年 12 月
- [15] H. Nishiyama, M. Ito, and N. Kato, Relay-by-Smartphone: Realizing Multihop Device-to-Device Communications, Communications Magazine, Vol. 52, Issue 4, pp.56-65, Apr. 2014.
- [16] OpenStreetMap Japan, <https://openstreetmap.jp>
- [17] A. Pyattaev, J. Hosek, K. Johnsson, R. Krkos, M. Gerasimenko, P. Masek, A. Ometov, S. Andreev, J. Sedy, V. Novotny, and Y. Koucheryavy, 3GPP LTE-Assisted Wi-Fi-Direct: Trial Implementation of Live D2D Technology, ETRI Journal, Vol. 38, No. 5, pp.877-887, Nov. 2015.
- [18] Statistics Division, Bureau of General Affairs, 2010 Tokyo Statistical Yearbook.
- [19] M. Tanha, D. Sajjadi, F. Tong, and J. Pan, Disaster Management and Response for Modern Cellular Networks using Flow-based Multi-hop Device-to-Device Communications, VTC 2016-Fall
- [20] Study on Architecture Enhancements to Support Proximity Services (ProSe) (Release 12), 3GPP TR 23.703 V12.0.0, Feb. 2014.
- [21] Q. Wang and B. Rengarajan, Recouping opportunistic gain in dense base station layouts through energy-aware user cooperation, IEEE WoWMoM 2013.
- [22] S. Wang, W. Guo, Z. Zhou, Y. Wu, and X. Chu, Outage Probability for Multi-Hop D2D Communications With Shortest Path Routing, IEEE Communications Letters, Vol. 19, No. 11, Nov. 2015.
- [23] L. Wei, R. Hu, Y. Qian, and G. Wu, Enable Device-to-Device Communications Underlaying Cellular Networks: Challenges and Research Aspects, IEEE Communications Magazine, Vol. 52, Issue 6, pp.90-96, June 2014.
- [24] L. Wei, A. Papathanassiou, Q. Li, and G. Wu, System-Level Simulations for Multi-hop D2D Communications overlay LTE Networks, ICIN 2016.
- [25] Y. Wu, W. Guo, H. Yuan, L. Li, S. Wang, X. Chu, and J. Zhang, Device-to-Device Meets LTE-Unlicensed, IEEE Communications Magazine, Vol. 54, Issue 5, pp.154-159, May 2016.
- [26] H. Yuan, W. Guo, and S. Wang, Emergency Route Selection for D2D Cellular Communications During an Urban Terrorist Attack, IEEE ICC 2014.
- [27] R. Zhang, M. Wang, L. Cai, Z. Zheng, X. Shen, and L. Xie, LTE-Unlicensed: The Future of Spectrum Aggregation for Cellular Networks, IEEE Wireless Communications, Vol. 22, No. 3, pp.150-159, June 2015.
- [28] B. Zhou, S. Ma, J. Xu, and Z. Li, Group-Wise Channel Sensing and Resource Pre-allocation for LTE D2D on ISM Band, IEEE WCNC 2013.