

ミリ波搭載ドローン基地局群による臨時型超高速・低遅延通信網の構築に関する研究調査

研究代表者 タン ザカン 東京工業大学 工学院 准教授

1 まえがき

近年、モバイルネットワークの総トラフィックは動画配信サービスなどの各種アプリケーションの爆発的な増加に伴い、年平均 46% のペースで増加している [1]。この問題に対処するべく、2019 年より 5G (5th Generation 移動通信システム) サービスが世界中で開始されている。この 5G の時代では、人だけではなくモノもインターネットにつながる社会基盤となってきた。その流れは今後も続くと考えられ、Beyond 5G/6G においては移動通信システムが社会の基盤的インフラとして機能されることが期待されている [2]。それに伴い、これまで以上に「どの場所」でも、「どんな状況」でも”繋がる”ということが重要になってくる。また、近年 UAV (Unmanned Aerial Vehicle) が身近な存在となってきており、インフラ監視、配送、災害調査など様々な分野での活用が期待されている。そこで本稿では、無線ネットワークを展開するための一時的な基地局として UAV を用いること (UAV ネットワーク) に注目している [3]。

UAV ネットワークは基地局を上空に配置することが出来るため、いくつかの利点が存在する。一つは地上の制約に関わらず移動することが出来る点である。それによって、必要な際に迅速に基地局を配備することが出来るうえ、特定のユーザの分布に対して最適な基地局配置をすることが出来る。もう一つは上空からデータを提供することが出来る点である。これによって建物などが遮蔽となる確率が下がり、UAV とユーザ間の伝搬路が見通し内となる確率が上がる。

これらの利点によって UAV ネットワークは、いくつかのユースケースを考えることが出来るが、本研究では主に被災地をユースケースとして検討している。2011 年に発生した東日本大震災では、太平洋側沿岸部で大きな被害が発生した。この震災によって約 29,000 局の携帯電話基地局および PHS (Personal Handy-phone System) 基地局が停波した [4]。そのようになった際、安否情報や避難情報といった人命にかかわる情報を携帯電話端末で入手することができなくなってしまうため、無線通信インフラを迅速かつ安定的に供給することが出来る環境の構築は急務であると考えられる。そこで UAV の機動力を生かすことを検討した。

UAV ネットワークにおける UAV の配置はこれまで様々な観点から研究がなされてきた。文献 [5] では提供データレートが低くなってしまいうエリア端のユーザを優先的にカバーするように UAV を配置する手法を検討している。文献 [6] では、各ユーザの要求データレートを設定し、送信電力を削減しつつサービス要件を満たす配置を検討している。文献 [7] では、カバレッジを大きくするために、エリアに関するパッキング問題を解くことで UAV の配置を求めている。また、文献 [8] ではカバーエリアを最適化するために粒子群最適化問題を解くことで UAV 配置を決定している。

これらの研究も含め、UAV ネットワークの検討では接続性を重視してマイクロ波帯を用いることが多かった。しかし、被災地では今後遠隔制御機器による救助活動が活発になると考えられ、大容量伝送が必要になる。また、通信速度の増大と共に、年々 Web ページの容量は増大している [9] ため、被災地における情報収集の面でも大容量伝送が必要になる [10]。そういったユースケースに対応することを考えるうえで、マイクロ波帯の帯域幅では対応することが困難である。一方でミリ波帯を用いることで帯域幅を大きくとることが可能となる。また、UAV に搭載する上で機器の微細化は重要な事項であり、その点で波長の短い周波数を用いることは利点となる。これらの理由から、本研究ではミリ波帯を用いることを検討する。ミリ波帯は距離減衰や遮蔽の影響が大きいいため、より一層ユーザ分布に対しての UAV 配置が課題となってくる。しかし、ミリ波帯における UAV ネットワークの配置はあまり検討されていない。また、一部のミリ波帯における UAV ネットワークの配置を検討している文献 [11], [12] ではユーザの分布を一様分布としている。ユーザ分布に関して、一様分布で考える場合と現実環境に近い密集地が存在する分布で考える場合では、UAV 毎のユーザ収容数のばらつきなどが変化し、ユーザ配置に対する新たな課題が生じる。そこで、本稿ではミリ波帯 UAV ネットワークの配置について様々なユーザ分布で検討を行ったので、報告する。

本稿では、静止したユーザに対して、ダウンリンクでの提供データレートを大きくするように UAV の配置

問題を検討する。UAV 基地局は、地上基地局とは異なり動的な配置であるうえに、UAV 基地局間の間隔も一定ではないため、カバレッジの重なりも様々な状況が考えられる。そのため、他の UAV 基地局からの干渉が大きな問題となる。そこで配置手法検討後、干渉低減手法を導入する。

本稿の構成は以下の通りである。2 章で本研究でのアーキテクチャとシステムモデルについて、3 章で提案手法の説明、4 章で数値解析の結果、5 章でまとめとする。

2 アーキテクチャとシステムモデル

2-1 アーキテクチャ

図 1 に全体のアーキテクチャを示す[10]。UAV は地上の制約に影響されることなく上空に敷設することができるため、ミリ波帯において重要となる見通し環境を確保することができる。また、基地局自体が移動可能であるため、被災地に対しても迅速にネットワークを構築することが可能になる。

本研究は図 1 に示すように、アクセス UAV とバックホール UAV の 2 種類の UAV でシステムを構成する。バックホール UAV は地上の基地局や他のバックホール UAV から送られてくるトラフィックを他の UAV に中継する役割を持っている。バックホール UAV を基地局-アクセス UAV 間の中継に用いることによって、基地局-アクセス UAV 間距離が一定で、通信伝送距離である UAV 間及び基地局-UAV 間の距離が短くなる。UAV 間の通信距離が短くなることでミリ波帯において問題となる距離減衰や雨による減衰の影響を軽減することができる。それにより、アクセス UAV と地上基地局の通信距離を長くすることが可能となり、様々なユースケースに対応することができる。アクセス UAV はバックホール UAV から送られるトラフィックを地上のユーザに提供する。アクセス UAV はユーザに直接データを提供するためその配置は提供データレートに大きく影響する。本稿では紙面の都合上、ユーザ分布に対するアクセス UAV の配置問題に着目して説明する。

2-2 システムモデル

前節の通り、本稿ではアクセス UAV に関して検討を行う。バックホールに関しては別検討を行うため、理想的であるとし、アクセスのみに着目して検討を進める。本稿では、ユーザが要求するデータレートは一定であり、ユーザの分布は既知であると仮定する。そのため、ユーザの特定のアプリケーションに限定せず、与えられた状況下での提供データレートの向上を目指す。本稿の数値解析に用いた計算モデルを以下に示す。

(1) 空対地パスロスモデル

上空の UAV と地上のユーザのパスロスモデルは[13]のモデルを使用する。[13]では、まず空対地の伝搬路に関して、見通し(LoS: Line of Sight)環境となる確率と見通し外(NLoS; Non Line of Sight)環境となる確率に分けて考える。その際の経路損失は以下ようになる。

$$L = P_{LoS} L_{LoS} + P_{NLoS} L_{NLoS} \quad (1)$$

ここで、 L は伝搬路損失、 P_{LoS} 、 P_{NLoS} は伝搬路が LoS, NLoS となる確率、 L_{LoS} 、 L_{NLoS} はそれぞれ LoS, NLoS となった場合の伝搬損失を表す。伝搬路が LoS となる確率は環境に応じて以下のように決定される。

$$P_{LoS} = \frac{1}{1 + a \exp(-b[\theta - a])} \quad (2)$$

ここで a, b は該当エリアの環境パラメータで決まる定数である[13]。 θ は地上のユーザから UAV への仰角を表す。伝搬路は LoS と NLoS の二通りに分類できるため NLoS 確率は以下ようになる。

$$P_{NLoS} = 1 - P_{LoS} \quad (3)$$

また、LoS の経路損失と NLoS の経路損失は自由空間とした時の伝搬損失と追加損失(η)に分けることができるため以下のように表すことができる。

$$L_{LoS/NLoS}[\text{dB}] = L_{\text{free}} + \eta_{LoS/NLoS} \quad (4)$$

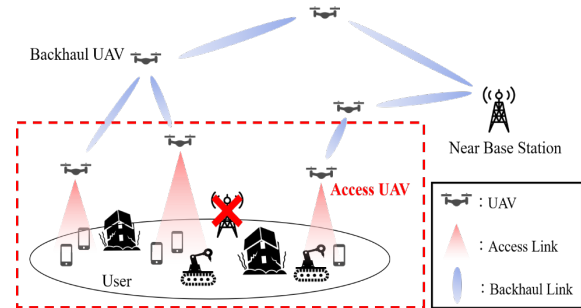


図 1 システムアーキテクチャ

Figure 1 System Architecture

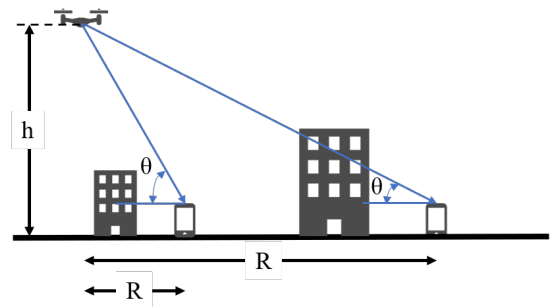


図 2 配置に関するパラメータ

Figure 2 Parameters related to positioning

ここで L_{free} は自由空間伝搬損失を表しており、以下のように表すことができる。

$$L_{\text{free}}[\text{dB}] = 20 \log d + 20 \log f + 20 \log \left(\frac{4\pi}{c} \right) \quad (5)$$

ここで d [m]は UAV とユーザ間の直線距離、 f [Hz]は搬送波周波数、 c [m/s]は光速をそれぞれ表す。式(2)～(5)を式(1)に代入することで最終的に伝搬損失は以下ようになる。

$$L[\text{dB}] = \frac{\eta_{\text{LoS}} - \eta_{\text{NLoS}}}{1 + \alpha \exp \left(-b \left[\arctan \left(\frac{h}{R} \right) - a \right] \right)} + 10 \log(h^2 + R^2) + 20 \log f + 20 \log \left(\frac{4\pi}{c} \right) + \eta_{\text{NLoS}} \quad (6)$$

ここで h [m]は UAV の高度、 R [m]は UAV とユーザ間の水平距離をそれぞれ表す。また、これらを図 2 に示す。

(2) 通信容量の計算モデル

フリスの伝達公式[14]を用いて受信電力を dB 表記で以下のように計算を行う。

$$P_r[\text{dB}] = P_t + G_t + G_r - L \quad (7)$$

P_t と P_r はそれぞれ送信電力と受信電力を示す。また、 G_t 、 G_r はそれぞれ送信アンテナ、受信アンテナの利得を示す。ここで得られた受信電力を用いて以下のように信号対干渉雑音電力比 (SINR: Signal to Interference and Noise power Ratio)を求める。またこれ以降の計算式は真数表記で表す。

$$\gamma = \frac{P_r}{P_n + I} \quad (8)$$

ここで γ は SINR、 I [W]は干渉電力をそれぞれ表す。 P_n [W]は熱雑音電力で以下のように示す。

$$P_n = k_B T B \quad (9)$$

k_B [J/K]はボルツマン定数、 T [K]は絶対温度、 B [Hz]は該当システムの帯域幅を示す。

通信容量は、限界容量を示すシャノンの通信容量定理[15]に基づいて、以下の式で算出される。

$$C[\text{bps}] = B \log_2(1 + \gamma) \quad (10)$$

本稿では TDMA (Time Division Multiple Access) による通信方式を想定しているため、単一ユーザ当たりの通信容量は UAV あたりの通信容量をその UAV が収容しているユーザ数で割ることで求める。

3 提案手法

本章では時間的に切り取られた、瞬時的なユーザに関して検討を行う。まず、ユーザ分布が得られた後の UAV の配置手法の提案、次に配置決定後の周波数分割方法の提案を行う。

本稿では、UAV の高度の決定方法は文献[13]に記載の手法を用いる。この手法は UAV のカバレッジ円ごとに、サークルの端に存在しているユーザの伝搬損失が最小になるように UAV の高度を決定する。したがって、以下では UAV の水平方向における配置に関しての提案手法を述べる。

3-1 K-means 法および最小包含円問題

前述の通り、本研究ではアクセスリンクにミリ波帯を用いる。ミリ波帯はこれまで使用されてきたマイクロ波帯と比べて周波数が高いため、式(5)からもわかるように伝搬による損失が大きくなってしまふ。ユーザへの提供データレートを向上させるには伝搬損失を減少させる必要があり、それは式(5)よりユーザ-UAV 間距離を短くすることが必要であることがわかる。

ユーザ-UAV 間距離を短くするための先行手法として文献[16]では K-means 法を用いて UAV の水平位置を導いている。K-means 法はクラスタリングという手法の一つで、クラスタリングとは点群を複数の集合に分割する手法である。K-means 法はクラスタの中心と各クラスタ内の点群のユークリッド距離の和をなるべく最小にする。文献[16]では、ユーザ分布を点群とみなし、それを分割した結果のクラスタを各 UAV がカバーするユーザの集合、各クラスタの重心点となるクラスタ中心を UAV の水平位置とする。しかし、[16]における手法では、一様分布のようなユーザ分布であれば効果を発揮するが、実際の環境のようなばらつきのある分布では効果を発揮しない。なぜなら、該当エリアのユーザ分布が偏っていた際にはカバレッジ円が大きくなってしまい、無駄なカバレッジが多くなってしまふからである。無駄なカバレッジが多くなってしまふとカ

バレッジ間の重なりも増え、干渉が増加してしまうといった問題点がある。

そこでミリ波の特性を考慮して使用する K-means 法を用いた手法に存在する問題点を解決すべく、手法を提案する。それは K-means 法を用いた手法に、最小包含円問題を導入する手法である。ここで、最小包含円問題とは対称の点群を内包することができる最小の円を決定する幾何学問題である。特定のユーザ分布に対して K-means 法のみを用いてカバレッジ円を導出したものと K-means 法に加えて最小包含円問題を適応した時のカバレッジ円を図 3 に示す。図 3 において x, y 軸は 100m×100m のエリアを示している。エリア内の点群はユーザの分布で、色分けは K-means 法によるクラスタリングを表している。また、示している円は UAV のカバレッジを表しており、その中心に UAV が位置する。図からわかる通り、最小包含円問題を導入することによって、カバレッジ円が小さくなり、無駄となるカバレッジが減少し、カバレッジ間の重なりが少なくなったことで干渉の減少も期待できる。

3-2 UAV 毎の周波数分割

アルゴリズム 1: UAV 毎の周波数割り当て

Input: UAV の数 K , UAV の水平配置 (x_k, y_k) , k 番目の UAV のカバレッジ円半径 r_k , k 番目の UAV がデータを提供するユーザの数 N_k , システムの全帯域幅 B

Output: k 番目の UAV に割り当てる帯域幅 B_k

1. $\{B_k\} \leftarrow \emptyset$
2. 他のカバレッジと重なっている UAV を特定する
3. カバレッジが重なっている数で UAV をソートし、以下の手順を重なるの多い UAV から順に行う。
4. $\{B_k\} \leftarrow k$ 番目の UAV のカバレッジに重なっている UAV の中で、すでに帯域幅(B_k)が決定している UAV の帯域幅
5. **If** $\{B_k\}$ の要素数 = k 番目の UAV に重なっている UAV の数
6. $B_k = B - \sum\{B_k\}$
7. **Else**
8. $B_k = (B - \sum\{B_k\}) \times \frac{N_k}{N_k + \sum\{N_k\}}$
9. **End**

本節および次節では UAV の配置やそれぞれの UAV がどのユーザをカバーするかが決定した後の周波数

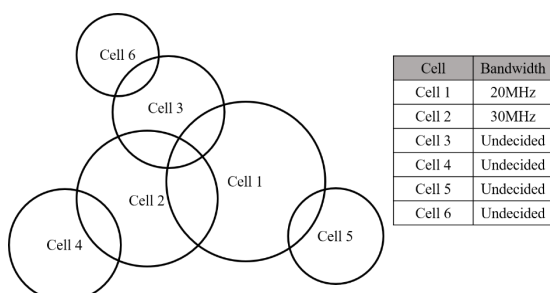


図 5 アルゴリズム 1 の例
Figure 4 Example of Algorithm 1

分割について検討を行う。先行研究として、文献[17]には地上/衛星共用携帯電話システムにおいて、周波数分割およびトラフィックが増大しているエリアに対して大きく帯域を割り当てる技術が記載されている。本研究で検討している UAV ネットワークは先行研究[17]や地上基地局と異なり柔軟なセル構成をとることが可能であるため、カバレッジの状況が変化してしまう。そのため、本節及び次節には UAV ネットワークに適した帯域割り当てのアルゴリズムを提案する。

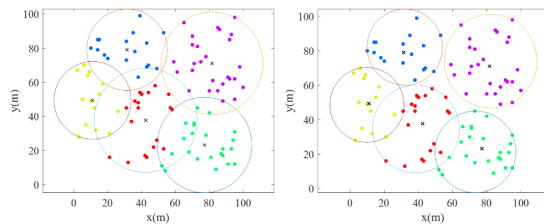


図 3 最小包含円問題を適用していないカバレッジ円(左)と適用したカバレッジ円(右)

Figure 3 Coverage circle with (left) or without (right) adaptation to smallest-circle problem

また、示している円は UAV のカバレッジを表しており、その中心に UAV が位置する。図からわかる通り、最小包含円問題を導入することによって、カバレッジ円が小さくなり、無駄となるカバレッジが減少し、カバレッジ間の重なりが少なくなったことで干渉の減少も期待できる。

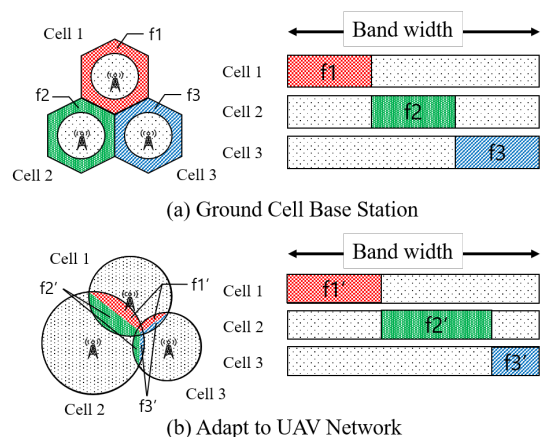


図 4 FFR の概要

Figure 5 FFR Overview

UAV ネットワークの構築は地上のマクロ基地局とは異なり、基地局間間隔が時間によってまばらで、カバレッジ間の重なりも大きくなることもある。そのため、隣接 UAV からの干渉電力を低減する必要がある。干渉の低減手法として本稿では周波数分割を用いる。本節では、隣接 UAV 間の干渉を低減するために UAV 毎に周波数を分割する。すべての UAV 間で周波数を完全に分割することが最も干渉を少なくすることが出来るが、周波数利用効率が悪くなってしまうため現実的ではない。そこで、干渉の多いユーザを内包する UAV、つまりはカバレッジ円が重なっている UAV のみに周波数分割を用いることを検討する。しかし、UAV ネットワークの構築では UAV の可動性によってカバレッジの重なりが時間や場所などの状況によって変化するため、明確な周波数分割の規則が必要となる。そのルールをアルゴリズム 1 に示す。ここで $\{B_{\bar{k}}\}$ は k 番目の UAV と重なっている UAV の中ですでに帯域幅が決定しているものの集合を表す。例として、図 4 における $k=3$ の場合を考える。現状、cell 1 と cell 2 の帯域幅は決定していて、cell 6 の帯域幅はまだ決定していないため、 $\{B_{\bar{k}=3}\} = \{20M, 30M\}$ となる。また、 $\{N_{\bar{k}}\}$ は k 番目の UAV に重なる UAV のうち、まだ帯域が決定されていない UAV が収容しているユーザ数の集合を表す。アルゴリズム 1 のプロセス 6 では、周波数利用効率を向上させるために、 k 番目の UAV に重なっているすべての UAV の帯域幅が既に割り当て済みのとき、残っているすべての帯域を k 番目の UAV の帯域幅に割り当てる。プロセス 8 では、残っている帯域幅を重なっている UAV のなかで割り当てが完了していない UAV のユーザ数で分割して割り当てる。

3-3 繰り返し周波数再利用

アルゴリズム 2:FRR を導入した際の周波数割り当て

Input: UAV の数 K , UAV の水平配置 (x_k, y_k) , k 番目の UAV のカバレッジ円半径 r_k , k 番目の UAV がデータを提供するユーザの数 N_k , システムの全帯域幅 B

Output: k 番目の UAV の高干渉エリアでの帯域幅 B_{k_in} , k 番目の UAV の低干渉エリアでの帯域幅 B_{k_out}

1. $\{B_{\bar{k}_in}\} \leftarrow \emptyset$
2. 他のカバレッジと重なっている UAV を特定する
3. カバレッジが重なっている数で UAV をソートし、以下の手順を重なるの多い UAV から順に行う。
4. $\{B_{\bar{k}_in}\} \leftarrow k$ 番目の UAV のカバレッジに重なっている UAV の中で、すでに高干渉エリアの帯域幅(B_{k_in})が決定している UAV の帯域幅
5. **If** $\{B_{\bar{k}_in}\}$ の要素数 = k 番目の UAV に重なっている UAV の数
6. $B_{k_in} = B - \sum\{B_{\bar{k}_in}\}$
7. **Else**
8. $B_{k_in} = (B - \sum\{B_{\bar{k}_in}\}) \times \frac{N_k}{N_k + \sum\{N_{\bar{k}}\}}$
9. **End**
10. $B_{k_out} = B - B_{k_in}$

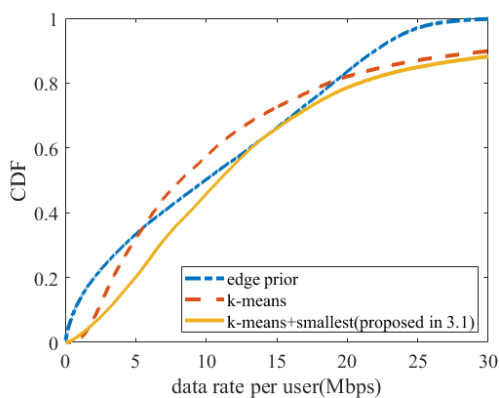


図 6 各 UAV 配置手法における提供データレート CDF

Figure 6 CDF of data rate for each UAV deployment method

前節での UAV 毎の周波数分割では個々の UAV からユーザへの帯域幅が減少してしまうため、干渉の多いユーザに対しては大きな効果を発揮するが、干渉が少ないユーザに対しては提供データレートの低下を招くことが考えられる。そのため、周波数利用効率を上げることで、干渉の少ないユーザへの帯域を減らすことなく、干渉の多いユーザへの干渉を低減する手法を検討する必要がある。

その課題を解決するために地上セルラで検討されてきた繰り返し周波数再利用 (FRR: Fractional Frequency Reuse) を UAV ネットワークに導入することを考える。図 5 (a) に FRR の概略を示す。この図より、Cell 1 において基地局から遠いエリアでは他基地局との干渉が懸念されるため、他の基地局と干渉しない f1 を用いる。一方で他基地局との干渉が少ないと考えられる、基地局周辺のエリアでは使用しているすべての帯域を使用する。このように FRR では、基地局付近のユーザつまりは他の基地局からの干渉が少ないユ

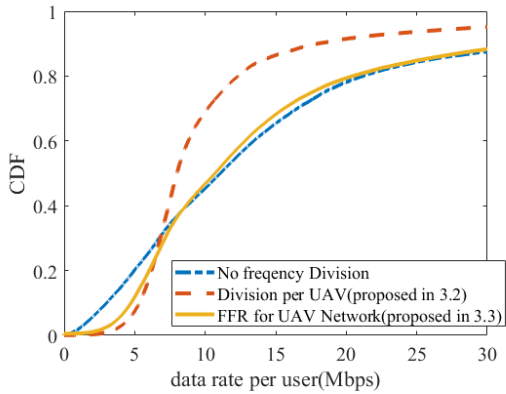


図 7 各周波数分割手法における提供データレートの CDF

Figure 7 CDF of data rate for each Frequency Division method

UAV からデータを提供する。この規則を用いることで、カバレッジが複雑に絡み合ってもどの UAV で提供するかを明確にすることが出来る。アルゴリズムの詳細はアルゴリズム 2 に示す。 $\{B_{k-in}\}$ は k 番目の UAV のカバレッジに重なっている UAV における高干渉エリアの帯域幅の集合である。 $\{N_k\}$ は k 番目の UAV のカバレッジに重なっている UAV が高干渉エリアで収容しているユーザ数の集合を表す。

4 数値解析

本章では、既存手法と 3 章で提案した手法をユーザ毎のスループットの観点で比較する。比較としては、まず UAV 配置手法の比較としてエリア端優先法(既存手法), K-means 法(既存手法), K-means 法に最小包含円問題を導入した手法(本稿 3.1 にて提案)の 3 手法を比較する。次に周波数割り当ての比較として周波数割り当てを行わない手法(既存手法), UAV 毎の周波数分割手法(本稿 3.2 にて提案), FFR を導入した手法(本稿 3.3 にて提案)の 3 手法を比較する。この際、UAV の配置手法は K-means 法に最小包含円問題を導入した手法(本稿 3.1)を用いる。表 1 に本稿で使用したパラメータを示す。

ここで、追加損失 η は文献[18]に記載されている(700MHz, 2000MHz, 5800MHz)の場合の追加損失からフィッティングによって 28GHz の追加損失を導出した。また、環境変数とは対象エリアの環境を表す変数である。

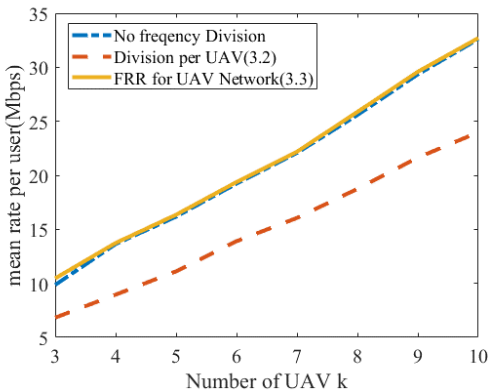


図 8 各 UAV 台数における平均データレート

Figure 8 Mean data rate for each Number of UAVs

ユーザに対して、他の基地局と同じ帯域を繰り返し使用することによって周波数効率の低下を防ぐ。これによって、基地局付近のユーザは基地局ごとに周波数を分割するよりも広い帯域を確保することが出来る。

この技術を UAV ネットワークに適用することを考える。UAV ネットワークは、前節で述べたように重なるカバレッジの数や大きさが状況に応じて変化するため、地上のように干渉の少ないユーザが基地局付近に存在しているとは限らない。そのため様々な状況に対応可能な規則が必要となる。

図 5 (b) は 3 つのセルが重なり合っている状況を示している。この手法では基地局との距離ではなく、カバレッジの重なりで使用帯域を設定する。この図のように、Cell 1 ではカバレッジの重なっていないエリア、つまり、干渉が少ないエリアで全帯域を使用している。また、カバレッジが重なっている、つまりは干渉が大きいエリアでは f_1' を用いている。

また、重なっているエリアに存在しているユーザは最も近い

表 1 数値解析パラメータ

パラメータ	値
搬送波周波数	28[GHz]
帯域幅	100[MHz]
EIRP [*]	36[dBm]
送信アンテナ半値幅	45[degrees]
受信アンテナ利得	0[dBi]
受信点絶対温度	298[K]
環境定数(α, β, γ)[13]	0.3,500[km ⁻²],15[m]
追加損失(η_{LoS}, η_{NLoS})	3.5[dB],47[dB]

※EIRP: Equivalent isotropic Radiated Power

α, β, γ はそれぞれ、エリアの総面積に対する建物が建っている割合、単位面積当たりの建物の平均数 $[/km^2]$ 、建物の高さの分布におけるスケールパラメータとなる[13]。これらは式(2)で用いる a, b を求める際に用いる[13]。ここで本稿では 100m 四方のエリアに対して 200 のユーザを配置した。配置方法は以下の通りである。まず、ユーザが密集するホットスポットの数と全体のユーザに対するホットスポットのユーザ割合をランダムに決定する。その後に全体の一様分布とホットスポットを重ねることでユーザ分布を得る[19]。また図 6, 図 7 はそのユーザ分布に対して UAV を 5 台配備した。図 8, 図 9 では UAV 台数を変化させてシミュレーションを行った。

図 6 は UAV 配置の各手法に関してユーザ毎の提供データレートを累積分布関数(CDF: Cumulative Distribution

Function)で表したものである。この図より、K-means 法に最小包含円問題を導入することで既存手法に対して提供データレートが向上したことがわかる。しかし、提供データレートが低いユーザに対しては性能が良くなっていないため、次に周波数分割手法の性能を確認する。

図 7 は周波数分割の各手法に関してユーザ毎の提供データレートを CDF で表したものである。この際、UAV 配置手法は K-means 法+最小包含円問題の手法を導入している。この図から UAV 毎に周波数分割を行うことで、干渉の大きいユーザに対して提供データレートを向上させることが出来たことがわかる。しかし、干渉の少ないユーザに対しても帯域幅が狭くなってしまうため、全体としては提供データレートが低くなっている。しかし、UAV ネットワークに適応させた FFR を用いることで全体的な提供データレートの減少をおさえつつ、干渉の大きいユーザに対して提供データレートを向上させることができた。

図 8, 図 9 は UAV 台数を増減させたときの平均データレートと outage 5% のデータレートを示している。これらの図からわかるように、FFR を UAV ネットワークに導入することで、台数に関係なく平均データレートの減少を抑えつつ、提供データレートの低いユーザへのデータレートを向上させることができた。

5 まとめ

本稿では、災害によって地上の基地局が停波してしまった被災地に対して、UAV ネットワークを用いることでデータを提供することを検討した。その中でも本稿は UAV ネットワークにおけるアクセス UAV の配置手法と周波数分割手法に関して報告をした。

静的ユーザに関して、K-means 法に最小包含円問題を導入することにより、K-means 法を用いない従来手法に対しては 50%、K-means 法のみを用いた従来手法に対しては 17%提供データレートが向上した。また、周波数分割手法に関して、UAV 毎に周波数を分割した際、outage5%のユーザのデータレートを 124%向上させるものの平均提供データレートが 28%減少していたが、FFR を UAV ネットワークに導入する手法を用いることで平均提供データレートを 1%向上させつつ、outage5%のユーザに対して 101%向上した。

紙面の都合上、上述のように本研究調査の成果の一部として、アクセスリンクの有効性を示すことができたが、バックホールリンクに関する検討、実証実験による検証など、様々な研究成果についての学会を介した情報発信をも実施してきたので、詳細は発表資料のリストをご覧いただきたい。

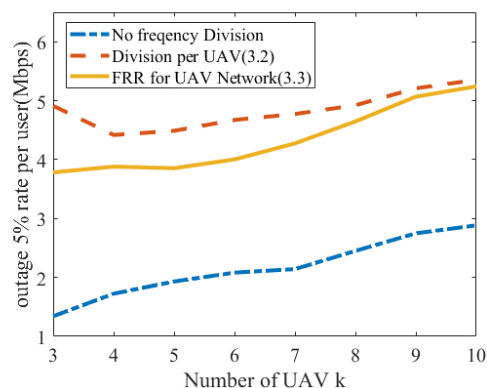


図 9 各 UAV 台数における outage 5% データレート
Figure 9 Outage 5% data rate for each Number of UAVs

【参考文献】

- [1] Cisco VNI Forecast, "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022 White Paper," Feb. 2019.
- [2] NICT, "Beyond 5G/6G White Paper," Mar. 2021
- [3] Y. Zeng, R. Zhang and T. J. Lim, "Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 5, pp. 36-42, May 2016.
- [4] 総務省, "情報通信白書 平成 23 年度版" 2011.
- [5] J. Qin, Z. Wei, C. Qiu and Z. Feng, "Edge-Prior Placement Algorithm for UAV-Mounted Base Stations," 2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/WCNC.2019.8885992.
- [6] C. Lai, C. Chen and L. Wang, "On-Demand Density-Aware UAV Base Station 3D Placement for Arbitrarily Distributed Users with Guaranteed Data Rates," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 3, pp. 913-916, June 2019, doi: 10.1109/LWC.2019.2899599.
- [7] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis and M. Debbah, "Efficient Deployment of Multiple Unmanned Aerial Vehicles for Optimal Wireless Coverage," in *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 8, pp. 1647-1650, Aug. 2016
- [8] E. Kalantari, H. Yanikomeroglu and A. Yongacoglu, "On the Number and 3D Placement of Drone Base Stations in Wireless Cellular Networks," 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Montreal, QC, 2016
- [9] "Report: Page Weight", http archive (online), available from, <https://httparchive.org/reports/page-weight> (accessed 2021-09-02)
- [10] 平田孝佑, "UAVを用いたミリ波メッシュバックホールの設計", 東京工業大学大学院電気電子系修士論文
- [11] T. Sivalingam, K. B. Shashika Manosha, N. Rajatheva, M. Latva-aho and M. B. Dissanayake, "Positioning of Multiple Unmanned Aerial Vehicle Base Stations in Future Wireless Network," 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9129398.
- [12] Z. Xiao, H. Dong, L. Bai, D. O. Wu and X. Xia, "Unmanned Aerial Vehicle Base Station (UAV-BS) Deployment With Millimeter-Wave Beamforming," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 1336-1349, Feb. 2020, doi: 10.1109/JIOT.2019.2954620.
- [13] A. Al-Hourani, S. Kandeepan and S. Lardner, "Optimal LAP Altitude for Maximum Coverage," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 3, no. 6, pp. 569-572, Dec. 2014
- [14] 唐沢好男, デジタル移動通信の電波伝搬基礎, コロナ社, 2016, p.16.
- [15] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication," in *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 379-423, July 1948
- [16] H. Jian et al, "Machine Learning based Network Planning in Drone Aided Emergency Communications", National Key Research and Development Program of China, 2016
- [17] 三浦周, 織笠光明, 辻宏之, 藤野義之, 小石洋一, 小林 直樹, 熊谷 健夫, 松崎 敬臣, "地上/衛星共用携帯電話システム用 DBF/チャネライザの開発," 信学論 (B), Vol.J97-B, No.11, pp.1032-1042, Nov. 2014.
- [18] A. Al-Hourani, S. Kandeepan and A. Jamalipour, "Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments," 2014 IEEE Global Communications Conference, 2014, pp. 2898-2904, doi: 10.1109/GLOCOM.2014.7037248.
- [19] J. Nakazato, M. Nakamura, T. Yu, Z. Li, K. Maruta, G. K. Tran, K. Sakaguchi, "Market Analysis of MEC-Assisted Beyond 5G Ecosystem," *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 53996-54008, April 2021.
- [20] Welzl, Emo, "Smallest enclosing disks (balls and ellipsoids)", in Maurer, H. (ed.), *New Results and New Trends in Computer Science*, Lecture Notes in Computer Science, 555, Springer-Verlag, pp. 359–370, 1991.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
NFV/SDN as an Enabler for Dynamic Placement Method of mmWave Embedded UAV Access Base Stations	MDPI Network	2022年9月
Construction and Demonstration of Access Link for Millimeter Wave UAV Base Station Network	IEEE ICUFN 2023	2023年7月
Study on the construction of mmWave based IAB-UAV networks	ACM AINTEC 2022	2022年12月
A Study on Antenna Polarization Plane for UL/DL Drone Access Network	IEEE ICUFN 2021	2021年8月
Research on the Placement Method of UAV Base Stations for Dynamic Users	IEEE APWCS 2021	2021年8月
Design of Millimeter-wave UAV Base Station for Access Link	IEEE VTC2020-Fall	2020年10月
【依頼講演】UAVを活用するスマートワイヤレスシステムに関する研究	信学技報 SR研究会	2023年7月
ミリ波 UAV 無線局ネットワークの低消費電力化に関する検討	IEICE 2022年ソサイエティ大会	2022年9月
UAV 基地局における無線アクセスバックホール統合の検討	IEICE 2022年ソサイエティ大会	2022年9月
【依頼講演】ミリ波搭載ドローン基地局群による臨時型通信網構築に関する研究	信学技報 SAT研究会	2022年8月
上下回線を有するドローンネットワークにおけるアンテナ偏波面に関する検討	信学技報 RCS研究会	2022年3月
ミリ波ドローン基地局の実験系構築に関する研究	信学技報 RCS研究会	2022年3月
上下回線を有するドローンアクセスネットワークにおけるアンテナ偏波面に関する検討	信学技報 RCS研究会	2021年6月
動的ユーザ分布に対する UAV 基地局の配置手法に関する検討	IEICE 2021年総合大会	2021年3月
UAV による動的ミリ波メッシュバックホールの設計	信学技報 SR研究会	2020年11月
隣接 UAV 間干渉を考慮したアクセス用ミリ波帯 UAV 基地局の設計	信学技報 RCS研究会	2020年6月