

<基本計画書>

無人航空機の目視外飛行における周波数の有効利用技術の研究開発

1. 目的

小型無人航空機の安全な利活用の推進に向けて、官民一体となって 2020 年代以降に有人地帯（第三者上空）での目視外飛行（レベル 4）による小型無人航空機の利用の取り組みが進められている。

こうした中、現在、小型無人航空機が利用する電波と同一帯域／隣接帯域には様々な電波利用が混在し、これらが干渉を起こすことで飛行の安全が脅かされるリスクが想定され、これまで定性的な危険性は指摘されてきたが、定量的なデータ、電波環境モデルや基準がなく、第三者上空での飛行安全性が保証されていない。本研究開発では、都市部上空での定量的な電波環境調査及び干渉リスク並びに機上における電波干渉を評価し、そうした環境で使用される周波数帯の電波環境をモデル化し、第三者上空で小型無人航空機を安全に運用するための電波利用の指針策定に役立てるとともに、干渉リスクを検知・回避する技術を開発することで周波数の効率的な利用を促進する。

一方、小型無人航空機の目視外飛行については、第三者が存在する蓋然性が低い地域での荷物配送等の実現に向け、離島、洋上や山間部を含む広域における小型無人航空機の利活用が進められている。このような地域では通信インフラが十分でなく、高信頼で安定した通信の確保を図るため、高高度を飛行する無人航空機等（以下、「高高度無人航空機等」という。）による中継通信システムの利活用が有効であると考えられ、当該システムと既存インフラとの補完利用により、より安全な目視外飛行を確保する高信頼かつ安定した通信インフラの整備が可能となる。本研究開発では、高高度無人航空機等と低高度を飛行する多数の小型無人航空機の間との中継通信において、広角度かつ短距離から長距離までの通信エリアをカバーし、システム内の相互干渉や他業務との干渉を低減するとともに、高い秘匿性をもつ多元接続技術を確立する。さらに本研究開発の成果は、国際民間航空機関（ICAO）で検討している 5 GHz 帯の C2 リンク（Command and Control Link：航空機の機体を制御する無線通信）を想定するものであり、その周波数帯の利活用に向けての ICAO における国際標準化に向けた検討に資するものである。

上記 2 つの技術開発は、電波環境の複雑な都市部及び通信インフラの不十分な山間部や海洋部等において今後利用の拡大が期待される小型無人航空機の安全な運用と普及に資する課題として位置付けられている。

2. 政策的位置付け

(1) 「空の産業革命に向けたロードマップ 2018 ～小型無人機の安全な利活用のための技術開発と環境整備～」(「小型無人機に係る環境整備に向けた官民協議会」議長：内閣官房内閣審議官(内閣官房副長官補(内政担当)付)平成30年6月15日とりまとめ)

- ① ロードマップにおける災害対応分野の技術開発課題として、2020年代以降に、衛星、高高度無人機、LTE等の通信インフラの高度化により多数の小型無人航空機を一括即時管理する運航管理システムの確立と現場への導入が謳われている。
- ② ロードマップの中で、2020年代頃以降に有人地帯(第三者上空)での目視外飛行(レベル4)による小型無人航空機の利活用を本格化させるため、必要な技術開発及び環境整備を官民が一体となり推進していく方針が示された。

(2) 「未来投資戦略2017」(平成29年6月閣議決定) 抜粋

I Society 5.0に向けた戦略分野

2. 移動サービスの高度化、「移動弱者」の解消、物流革命の実現

(2) 新たに講ずべき具体的施策

iv) 小型無人機(ドローン)等の産業利用の拡大に向けた環境整備

- ・ 小型無人機について、来年には山間部などニーズの見込まれる地域で荷物配送を実施し、2020年代には人口密度の高い都市でも安全な荷物配送を本格化させるため、補助者を配置しない目視外飛行や第三者上空飛行など高度な飛行を可能とするための技術開発及び制度的対応を進める。福島浜通り地域の実証フィールドの活用を通じて機体の性能評価基準を本年度中に策定し、複数の機体の同時活動を可能とする運航管理システム・衝突回避技術等の開発や国際標準化を進めるとともに、目視外飛行の実現に向けた電波利用の在り方について、小型無人機の運航ルール・技術開発の進展も踏まえて、調査・検討を進める。あわせて、補助者を配置しない目視外飛行に係る機体や操縦者等の要件を本年度中に明確化し、航空法に基づく許可・承認の審査要領を来年度早期に改訂するとともに、関係者との合意形成・安全対策の策定に取り組む協議会を活用した申請手続の合理化を検討する。こうした小型無人機などロボット技術の活用により、物流効率化など産業利用の拡大を図る。

7. 「ロボット革命/バイオ・マテリアル革命」

i) ロボット革命

① ロボット新戦略の実行・進化

小型無人機について、来年には山間部などニーズの見込まれる地域で荷物配送を実施し、2020年代には人口密度の高い都市でも安全な荷物配送を本格化させるため、補助者を配置しない目視外飛行や第三者上空飛行など高度な飛行を可能とするための技術開発と制度的対応を進める。福島浜通り地域の実証フィールドの活用を通じて機体の性能評価基準を本年度中に策定し、複数の機体の同時活動を可能とする運航管理システム・衝突回避技術等の開発や国際標準化を進めるとともに、目視外飛行の実現に向けた電波利用の在り方について、小型無人機の運航ルール・技術開発の進展も踏まえて、調査・検討を進める。あわせて、補助者を配置しない目視外飛行に係る機体や操縦者等の要件を本年度中に明確化し、航空法に基づく許可・承認の審査要領を来年度早期に改訂するとともに、関係者との合意形成・安全対策の策定に取り組む協議会を活用した申請手続の合理化を検討する。こうしたドローンの産業利用の拡大に向けた技術開発・制度的対応を進め、これらを通じたドローン産業の活性化を図る。

3. 目標

(1) 小型無人航空機における他業務の電波等からの混信・干渉回避のための電波利用技術の研究開発

小型無人航空機を目視外飛行させる際に用いるコマンド及びテレメトリ、映像伝送用の無線通信（920MHz帯、2.4GHz帯、5.6GHz帯及び5.7GHz帯等）において、他の業務やシステムが用いる電波との間の混信・干渉を定量的に評価するとともに、これを回避するための電波利用技術を確立し、相互の干渉を空間的な手段等で低減することにより、従来の通信に比べて電波利用効率を少なくとも2倍以上改善するとともに、都市部上空等における電波利用の定量的な指針を得ることにより、都市部上空等で目視外飛行を行う際の通信の高信頼性、耐環境性及び周波数の有効利用に資する。

(2) 高高度を飛行する無人航空機等と衛星及び小型無人航空機間の無線通信における周波数有効利用技術に関する研究開発

通信インフラが十分でない離島、洋上や山間部を含む広域で今後利用が進むとみられる小型無人航空機の運用を管理するため、高高度無人航空機等の利用による中継システムを想定し、これを中心に従来の通信距離に比べて10倍以上の長距離の通信エリアをカバーするとともに、これまでの100倍以上の同時接続数を可能とし、かつ秘匿性の高い通信確保に向けた多元接続技術を確立する。さらに限られた5GHz帯の周波数帯域を地上通信、無人航空機間又は衛星

通信の利用形態が混在することから、帯域効率の高い共用を可能とする技術を実現することにより、周波数の共用利用を促進する。

4. 研究開発内容

(1) 概要

① 小型無人航空機における他業務の電波等からの混信・干渉回避のための電波利用技術の研究開発

都市部等の第三者上空で、低高度で運用される多数の小型無人航空機を想定し、そうした環境で使用される様々な周波数帯(920MHz 帯、2.4GHz 帯、5.6GHz 帯及び 5.7GHz 帯等)の電波環境をモデル化し、小型無人航空機の安全な飛行に影響を与え得る地上の無線業務からの干渉リスクを検知し、これを回避する技術の開発を行う。本技術は、既存技術をベースとし、ドローンの飛行特性、搭載環境及び電波利用環境に適応した技術として新たに開発する。

具体的には、

(ア) 都市部等上空における複数周波数帯を対象とした電波環境モデルの開発

(イ) 小型無人航空機に搭載した電波センサ(アレーアンテナ等)による電波環境の動的空間検知技術と干渉電波の動的空間分離技術

(ウ) 電波環境に適応した周波数帯間ハンドオーバー技術

の研究開発を行うとともに、周波数帯の切換えの他、複数周波数帯の同時利用の技術検討も併せて行う。

本研究開発の成果に基づき、第三者上空で無人航空機を安全に運用するための電波利用の指針策定及び運用に役立てることを目指すとともに、第三者上空での本格的な事業を安全に行うための無線技術のモデルとして確立する。

② 高高度を飛行する無人航空機等と衛星及び小型無人航空機間の無線通信における周波数有効利用技術に関する研究開発

災害対応等で山間部や離島、洋上等の広域にわたって小型無人航空機が運用されることを想定し、本研究開発では、高高度無人航空機等とそれより低い高度を飛行する多数の小型無人航空機の間において、5GHz 帯の周波数帯を活用し、広角度かつ短距離から長距離までの通信エリアをカバーし、相互の干渉や他業務との間の干渉を低減するとともに、秘匿性の高い通信を確保した多元接続技術を確立する。本技術は、既存技術をベースとし、高高度無人航空機等の飛行条件、搭載条件及び電波利用環境に適応した技術として新たに開発する。

具体的には、

- (7) 高高度無人航空機等に搭載される長距離広角度のアレーアンテナによる多元接続技術
- (イ) 高高度無人航空機等と小型無人航空機間、高高度無人航空機等と衛星間、高高度無人航空機等とその地上制御局間の通信を同一の5 GHz 帯の周波数帯で効率よく共用するための技術条件と共用技術
- (ウ) それらの通信に用いる秘匿性の高い暗号化技術の研究開発を行う。

本研究開発の成果は、並行して開発が進むと想定される高高度無人航空機等技術の進展をはじめ、国際的な周波数利用との調和、並びにそれらの制度化を考慮しつつ、高高度無人航空機等へ統合化したシステムの開発を経て、実用化を目指すこととする。

(2) 技術課題及び課題内容

技術課題

- ① 小型無人航空機における他業務の電波等からの混信・干渉回避のための電波利用技術の研究開発

- (7) 都市部等の上空における電波環境モデルの開発

小型無人航空機にて主に利用されている周波数帯とその周辺には、無線局免許不要バンド（920MHz 帯、2.4GHz 帯、5.6GHz 帯）及び無線局免許バンド（無人移動体画像伝送システム、DSRC、LTE、アマチュア局）がある。飛行レベル4（目視外、第三者上空）の環境では、小型無人航空機の運航に必要な通信に影響を与える可能性がある様々な既存無線局が存在する。しかしながら、第三者上空（特に、都市部上空等）における定量的・統計的な電波環境データは存在せず、小型無人航空機の通信の安全性評価のための手法が確立していない。

- (イ) 電波環境の動的空間検知技術及び他業務の電波からの混信・干渉の動的分離技術

飛行レベル4（目視外、第三者上空）のような飛行環境では、具体的な電波環境の状況を高精度かつ動的に把握することにより、既存業務と同一又は隣接周波数帯域を共用しつつ干渉リスクを回避するための飛行計画の作成や干渉回避技術の導入による周波数利用の更なる効率化が考えられる。しかしながら、搭載重量や消費電力が制限されている小型無人航空機における搭載無線設備に地上系の既存無線設備で用いられているような空間検知技術、動的分離技術を実装し、それぞれの手法の特徴・性能を比較評価し、用途による適用性の違いは明確化されていない。特に、飛行レベル4

(目視外、第三者上空)のような飛行環境にて、小型無人航空機を飛行しながら動的空間検知、動的分離する場合、手法によっては、動的に変化するマルチパスの影響や飛行特性の影響を受け、検知性能や分離性能が劣化する等の課題を有している。

(ウ) 環境適応周波数帯域利用技術

都市部等の上空では、インフラ型通信が利用可能な場合があるが、インフラ型通信のカバレッジ外に飛行するような場合や災害時等では非インフラ型通信を利用する必要性が生じる場合がある。そのため、利用可能な周波数帯に応じて周波数帯間をハンドオーバーすることや干渉に耐性があるよう周波数帯間をハンドオーバーし、小型無人航空機が利用する通信の信頼性を高めることが望まれているが、そのための環境適応周波数帯域利用技術が確立されておらず、またそのハンドオーバー基準やその効果について十分に検証されていない。

② 高高度を飛行する無人航空機等と衛星及び小型無人航空機間の無線通信における周波数有効利用技術に関する研究開発

(ア) 長距離・広角度の多元接続技術

高高度無人航空機等から低高度を飛行する小型無人航空機間において、テレメトリ情報やコマンド情報等の通信を行うためには、約130度～180度の広角範囲を通信エリアとして均一にカバーする必要があり、かつ無人航空機の旋回による電界変動を抑制したアンテナ技術及びビーム形成技術が必要となる。また、これらのアンテナの特性に整合した効率のよい空間・周波数多元接続技術の実現が必要となっている。

(イ) 5 GHz 帯の周波数共用技術

高高度無人航空機等から低高度を飛行する小型無人航空機間、高高度無人航空機等から地上制御局間、更には高高度無人航空機等と衛星間の利用形態が想定され、同一の5 GHz 帯の周波数帯内をこれらの利用形態で共用するために相互干渉低減技術を検討し、相互に通信品質を維持しながら限られた帯域にできるだけ多くの小型無人航空機の通信需要を収容する必要がある。

(ウ) 高秘匿性暗号化技術

小型無人航空機の運航においては、飛行の安全性の確保や機体の乗っ取り・盗難対策の観点から、より信頼性やセキュリティの高い通信が求められている。高高度無人航空機等と低空を飛行する小型無人航空機間の通信

において、通信の認証及び暗号化を図る必要があるとともに、通信に使用する暗号鍵の発行・更新等は、より、効率的かつセキュリティの高いものでなくてはならない。

到達目標

① 小型無人航空機における他業務の電波等からの混信・干渉回避のための電波利用技術の研究開発

(ア) 都市部等の上空における電波環境モデルの開発

ビルや小型無人航空機等に設置した電波環境モニタ等により、小型無人航空機等において使用が想定される周波数帯（920MHz 帯、2.4GHz 帯、5GHz 帯、5.6GHz 帯及び 5.7GHz 帯等）について、都市上空における様々な電波発信源によるマクロな電波環境の計測を行い、干渉評価用途に耐えられるような、統計的に十分な特性が得られるデータを蓄積し、それを基に都市上空における 3次元電波環境のモデルを構築する。

(イ) 電波環境の動的空間検知技術及び他業務の電波からの混信・干渉の動的分離技術

小型無人航空機が飛行しながら、その運航に影響する可能性のある既存無線局の位置を動的に検知する技術として、シングルアンテナやマルチアンテナ等による動的空間検知技術を開発し、装置単体の性能として角度誤差±1度以下で検知可能な技術を確立する。さらに、マルチアンテナ技術によるビームフォーミングを用いることで、動的な空間分離を実現し、電波の到達距離の長距離化及び同一チャンネルで2台以上の共用を実現する。

(ウ) 環境適応周波数帯域利用技術

小型無人航空機が利用する無線通信の信頼性を維持するために、場所や状況により利用可能な周波数帯に応じ、周波数帯間をシームレスにハンドオーバーすることや耐干渉性のある最適な周波数帯域を利用する技術を確立する。

なお、上記の目標を達成するに当たっての年度毎の目標については、以下の例を想定している。

(例)

<2019年度>

(ア) 都市部等の上空における電波環境モデルの開発

- ・都市部等の上空における電波環境モデル構築のために、電波環境モニタを設計し、構築する。

- (イ) 電波環境の動的空間検知技術及び他業務の電波からの混信・干渉の動的分離技術
 - ・電波環境の動的検知技術のための信号処理技術を検討し、机上検討において角度誤差±1度以下となることを確認する。
 - ・電波環境の動的検知技術のためのハードウェアの基本設計を完了する。
- (ウ) 環境適応周波数帯域利用技術
 - ・小型無人航空機が飛行しながら利用可能な環境適応型周波数帯域利用技術の概念設計を行う。

<2020 年度>

- (ア) 都市部等の上空における電波環境モデルの開発
 - ・都市部、地方都市等の環境毎にそれぞれ代用的な複数箇所（例：高層等密集環境、低層ビル環境、低層住宅環境、住宅・山野混在環境など）を選定し、代表的な時間帯におけるデータを電波環境モニタにより収集し、定量的・統計的なモデルの構築法を検討する。なお、それぞれの場所では、小型ドローンの利用が想定される 150m 以下から 3 高度程度を選び、1 キロ平方メートルの範囲内（携帯電話の基地局間距離が 200m（都市部）、500m（地方都市）であることを踏まえ、比較可能なメッシュサイズとする。）で代表的な場所、時間帯を設定しデータを収集する。
- (イ) 電波環境の動的空間検知技術及び他業務の電波からの混信・干渉の動的分離技術
 - ・実際に小型無人航空機が飛行しながら電波環境の動的検知技術の精度を検証し、角度誤差±1度以下となることを確認する。
 - ・マルチアンテナ技術による空間分離技術を設計し、開発を完了する。
- (ウ) 環境適応周波数帯域利用技術
 - ・2019 年度の概念設計に基づき、環境適応周波数帯域利用技術を実装する。
 - ・周波数間をハンドオーバーする場合に要する時間や干渉への耐性を評価検証する。
- (エ) 総合実証実験
 - ・フィールド評価のための機器の選定、フィールド評価場所を選定する。
 - ・必要に応じて小型無人航空機の飛行許可・承認申請等の準備をする。

<2021 年度>

- (ア) 都市部等の上空における電波環境モデルの開発
 - ・電波環境データを引き続き蓄積し、時間帯毎に変化する電波環境モデルの構築、及び電波利用指針に資するデータを取りまとめる。
- (イ) 電波環境の動的空間検知技術及び他業務の電波からの混信・干渉の動的分

離技術

- ・実際に小型無人航空機が飛行し、マルチアンテナ技術による空間分離技術の性能を検証する。
- ・実際に小型無人航空機が飛行しながら、その運航に影響する可能性のある既存無線局の位置を動的に検知し、同一チャネルの空間分離を実現する。

(ウ) 環境適応周波数帯域利用技術

- ・通信途絶を生じず、場所や状況により利用可能な周波数帯を選択し、環境適応周波数帯域利用が実現できることを実証する。

(I) 総合実証実験

- ・課題(ア)～(ウ)の各技術を組み合わせることによる電波の有効利用やリスク回避に対する実効性を検証する。

② 高高度を飛行する無人航空機等と衛星及び小型無人航空機間の無線通信における周波数有効利用技術に関する研究開発

(ア) 長距離・広角度の多元接続技術

高高度無人航空機等から見た電波の覆域が従来の通信距離（約5 km）に比べ10倍以上の長距離となり、これまでの同時接続数（50台）に比べ100倍以上の同時接続数を実現する長距離・広角度の多元接続技術を開発する。

a) 長距離・広角度対応アレーアンテナ技術の開発

高高度無人航空機等に搭載可能な長距離・広角度対応アレーアンテナを開発する。特に、無人航空機等の旋回による電界変動を抑制したアンテナ技術を実現する。

b) 広角度複数可変ビーム形成技術の開発

角度が約130度～180度の広域を達成するためのビーム形成技術を開発する。

c) 空間・周波数多元接続技術の開発

国際標準化動向を考慮しながら、高高度無人航空機等と低空を飛行する多数の小型無人航空機との間の通信の確保が実現できるよう空間・周波数多元接続技術を開発する。

(イ) 5 GHz 帯の周波数共用技術

以下の各種利用形態における無線回線間の相互干渉低減技術を開発し、定量的な指針（帯域分割、ガードバンド、アンテナ指向性、時刻同期等）を得る。

a) 無人航空機間の回線（高高度無人航空機等～小型無人航空機等間）

b) 衛星回線（高高度無人航空機等～衛星間）

c) 高高度無人航空機等の C2 リンク（高高度無人航空機等～地上制御局）

(ウ) 高秘匿性暗号化技術

高高度無人航空機等と低空を飛行する小型無人航空機間の通信において、秘匿性の高い安定した通信を実現するため、認証局に複合のための鍵の割符を預け、鍵の失効確認を行わなければ復号できない仕組み等、認証及び暗号化技術を開発する

なお、上記の目標を達成するに当たっての年度毎の目標については、以下の例を想定している。

(例)

<2019 年度>

(ア) 長距離・広角度の多元接続技術

- ・ 無人航空機等の旋回による電界変動を抑制したアンテナ技術を用いて、高高度無人航空機等に搭載可能なアレーアンテナの設計を完了する。
- ・ 角度約 130 度～180 度の広域を達成するビーム形成技術を検討し、設計を完了する。
- ・ 国際標準化動向等を考慮しながら、空間・周波数多元接続技術を設計する。

(イ) 5 GHz 帯の周波数共用技術

- ・ 高高度無人航空機等の直下から半径 50 km以上の覆域における共用検討周波数共用について机上検討を行い、指標を明らかにする。
- ・ 相互干渉低減技術を検討し、効果を机上検証する。

(ウ) 高秘匿性暗号化技術

- ・ 秘匿性の高い暗号化技術を実現するために、暗号モジュールの設計及び開発を行い、暗号モジュール単機能の動作を検証する。
- ・ 低空を飛行するような小型無人航空機間の通信の暗号化機能及び小型無人航空機・サーバ間通信の暗号機能を設計する。
- ・ 機器登録、鍵発行機能、失効登録、認証機能の概念設計を行う。

<2020 年度>

(ア) 長距離・広角度の多元接続技術

- ・ 高高度無人航空機等に搭載可能なアレーアンテナの開発を完了する。
- ・ 広角度複数ビーム形成技術を実装し、単体評価にて角度が 130 度、通信距離 50km を達成することを確認する。
- ・ 空間・周波数多元接続技術を実装し、単体評価にて性能を検証する。

(イ) 5 GHz 帯の周波数共用技術

- ・相互干渉低減技術を開発し、性能を評価する。
- ・実機等による検討を行い、机上検討した共用結果の妥当性を検証する。
- (ウ) 高秘匿性暗号化技術
 - ・小型無人航空機間の通信の暗号化機能を開発し、動作を検証する。
 - ・小型無人航空機・サーバ間の通信の暗号機能の開発し、動作を検証する。
 - ・機器登録、鍵発行機能、失効登録、認証機能を開発し、動作を検証する。
- (I) 総合実証実験
 - ・最終年度の総合実証実験に向けて、機材の準備、必要な許可承認手続きの準備を完了する。

<2021 年度>

- (ア) 長距離・広角度の多元接続技術
 - ・高高度無人航空機等に搭載可能なアレーアンテナを用いて、広角度複数ビーム形成技術、空間・周波数多元接続技術の動作検証し、性能を評価する。
- (イ) 5 GHz 帯の周波数共用技術
 - ・共用のための技術条件等を整理し、国際標準化団体等へ情報提供を行う。
- (ウ) 高秘匿性暗号化技術
 - ・前年度までに開発した各機能を搭載した複数小型無人航空機を同時稼働させて動作を検証する。
- (I) 総合実証実験
 - ・課題(ア)～(ウ)を組み合わせることによる総合実証実験を行い、性能評価を実施する。

5. 実施期間

2019 年度から 2021 年度までの 3 年間

6. その他

(1) 成果の普及展開に向けた取組等

① 国際標準化等への取組

国際競争力の強化を実現するためには、本研究開発の成果を研究期間中及び終了後、速やかに関連する国際標準規格・機関・団体へ提案を実施することが重要である。このため、研究開発の進捗に合わせて、国際標準への提案活動を行うものとする。なお、提案を想定する国際標準規格・機関・団体及び具体的な標準化活動の計画を策定した上で、提案書に記載すること。

② 実用化への取組

研究開発期間終了後も引き続き取り組む予定の「本研究開発で確立した技術の普及啓発活動」及び 2024 年度までの実用化・製品展開等を実現するために必要な取組を図ることとし、その活動計画・実施方策については、提案書に必ず具体的に記載すること。

(2) 提案及び研究開発に当たっての留意点

提案に当たっては、基本計画書に記されている目標に対する達成度を評価することが可能な具体的な評価項目を設定し、各評価項目に対して可能な限り数値目標を定めること。また、従来技術との差異を明確にした上で、技術課題及び目標達成に向けた研究方法、実施計画及び年度目標について具体的かつ実効性のある提案を行うこと。

研究開発の実施に当たっては、関連する要素技術間の調整、成果の取りまとめ方等、研究開発全体の方針について幅広い観点から助言を頂くと共に、実際の研究開発の進め方について適宜指導を頂くため、学識経験者、有識者等を含んだ研究開発運営委員会等を開催する等、外部の学識経験者、有識者等を参画させること。

なお、本研究開発において実用的な成果を導出するための共同研究体制又は研究協力体制について、研究計画書の中にできるだけ具体的に記載すること。