

## 2つのパッチアンテナを用いた簡易的な電波到来方向推定システムの開発

機械電子科 原口卓也 山田浩文

## Developing a Simple Direction-of-Arrival Estimation System for Radio Waves Using Two Fixed Patch Antennas

HARAGUCHI Takuya and YAMADA Hirofumi

Two fixed patch antennas were used to develop a small-scale, low-cost system capable of estimating the direction-of-arrival of 2.4 GHz radio waves within a  $180 \pm 15$ -degree range. The direction-of-arrival of the radio wave was estimated from the received signal strength difference (RSSD) at these antennas. In this study, various antenna types and placements were investigated, resulting in a new estimation technology that can estimate the direction-of-arrival of radio waves within a  $180 \pm 15$ -degree range. Additionally, by calculating the logarithmic power average over 200 ms for signals sampled at intervals less than 10 ms, it became possible to discriminate the target source, a drone, from other devices such as smartphones or Wi-Fi routers.

Keywords : direction-of-arrival estimation, patch antenna, drone

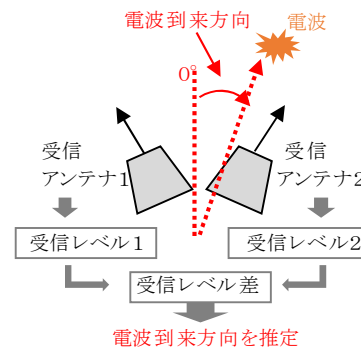
2.4GHz帯の電波の到来方向を $180^\circ$ の範囲において $\pm 15^\circ$ の誤差で推定できる小規模・低コストなシステムの開発を目的とし、2つの固定したパッチアンテナの受信レベル差から電波の到来方向を推定できる簡易的な推定技術を考案した。本研究では、考案した推定技術の更なる推定誤差の低減化と測定対象物の区別を可能とする独自手法の確立を目指し、アンテナの種類や配置等の検討を行った。その結果、誤差 $\pm 15.3^\circ$ で約 $90^\circ$ の範囲内で電波の到来方向を推定できる新たな推定技術が実現できた。さらに、測定周期を10ms以下とし、測定時間200msで対数電力平均をすることで、測定対象のドローンとスマートフォンやWi-Fiルーター等の他のデバイスを区別することが可能となった。

キーワード：電波到来方向推定、パッチアンテナ、ドローン

## 1 はじめに

電波の到来方向推定技術は様々な分野で利用されている。重要施設侵入等のトラブルが増加している無人航空機（ドローン等）を検知するシステムは、この技術を利用しているが、大規模で高額（数千万円程度）になるという課題がある。電波到来方向推定技術は、推定範囲の限定や構成の簡素化により、おおよその到来方向を推定するシステムとすることで、小規模・低コストでの作製が見込める。本研究ではシステムを物件の壁面等に取付けて使用すると想定して、推定範囲 $180^\circ$ （ $\pm 90^\circ$ ）を目標とした。構成の簡素化のため、2つの固定したアンテナを用いた電波到来方向の簡易的推定技術について検討しており、前

報では誤差 $\pm 20^\circ$ で推定できる可能性があることについて報告した<sup>1)</sup>。本報では、更なる誤差の低減化を図るとともに、この技術をドローン等の無人航空機

図1 電波到来方向推定の仕組み<sup>1)</sup>

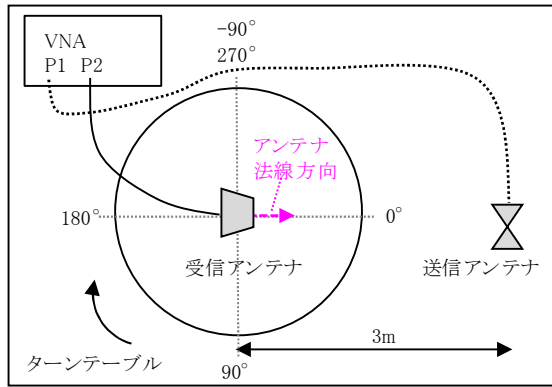


図2 受信レベルの角度依存性測定方法 (アンテナ選定)

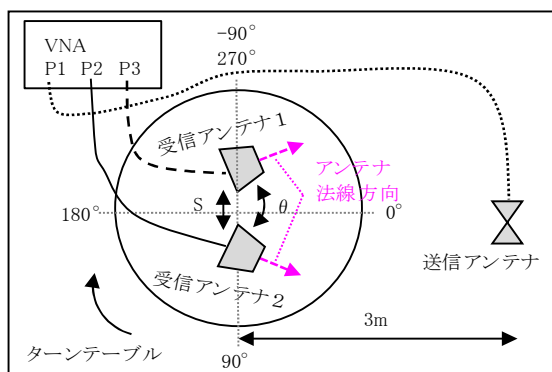


図3 受信レベルの角度依存性測定方法 (2つのアンテナ配置検討)

が発する 2.4GHz 帯の電波に対して適用して開発した小規模(人力で運搬可能)で低コスト(数十万円程度)な電波到来方向推定システムについても報告する。また、ドローン等の通信で使用される 2.4GHz 帯の電波はスマートフォン等の機器でも多く使用されている。これらと区別する方法についても報告する。

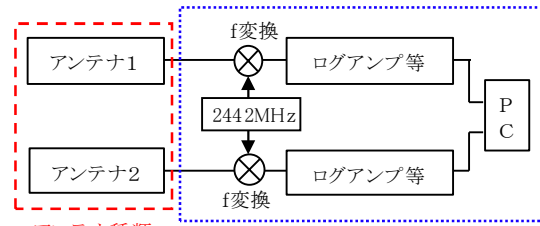
## 2 方法

### 2.1 電波到来方向推定方法

電波到来方向推定の仕組みを図1に示す。2つの受信アンテナを固定して設置する。受信アンテナに指向性のあるものを使用することで、電波の到来方向により各アンテナの受信レベルが変化する。この受信レベルの差から電波の到来方向を推定する仕組みである<sup>1)</sup>。

### 2.2 アンテナ種類、配置の検討方法

前報より更なる誤差の低減と推定範囲の拡大を図るため、アンテナ選定を行うとともに最適な配置についても検討した。測定にはベクトルネットワーク



アンテナ種類、配置の検討 共同研究先が試作した測定器

図4 共同研究先が試作した測定器

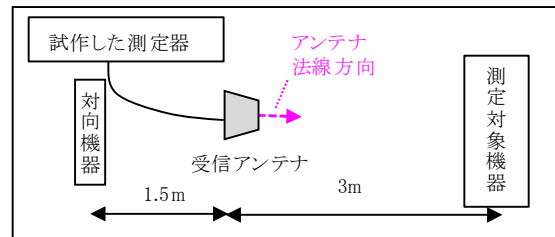


図5 ドローンとその他の機器の電波測定方法

アナライザ (Vector Network Analyzer : VNA) 5071C (Keysight Technologies 製)、小型バイコニカルアンテナ SBA9113 (Schwarzbeck Mess-Elektronik 製) を用いた。

#### (1) アンテナ種類の選定方法

システムは推定範囲以外から到来する電波の影響を受けないことが望ましい。前報で選定した八木・宇田アンテナと、比較的安価でアンテナ利得が安定した指向性アンテナであるパッチアンテナ<sup>2)</sup> MD24-12 (TE Connectivity Laird 製) の特性を比較した。

図2に示す配置で、3m法電波暗室内において受信アンテナを $-90^\circ$  から  $270^\circ$  までターンテーブルで  $360^\circ$  回転させ、受信レベルの角度依存性を測定した。測定には VNA のポート 1 (P1) に送信アンテナとして小型バイコニカルアンテナを接続し、ポート 2 (P2) に受信アンテナ (八木・宇田アンテナ、パッチアンテナ) を接続した。VNA で P1 端子から信号を発生し、P2 端子での減衰量を測定した<sup>3)</sup>。

#### (2) 最適なアンテナ配置の検討方法

図3に示す2つの受信アンテナ間の距離  $S$  及び角度  $\theta$  を変更しながら測定を行った。2つの受信アンテナの受信レベル差から電波到来方向を推定した際に、推定範囲を広く、誤差を小さくできるアンテナの配置を検討した。

図3に示す配置で、3m法電波暗室内において受信アンテナ 1 及び 2 を  $-90^\circ$  から  $270^\circ$  までターン

表1 測定対象機器

測定対象機器	対向機器
ドローン Inspire2 (DJI 製)	専用コントローラ
ノートPC Ideapad (Lenovo 製)	モバイルWi-Fi ルーター FS030W (富士ソフト(株)製)
据置型Wi-Fi ルーター AX4 (株)バッファロー製)	スマートフォン iPhone15 (Apple 製)

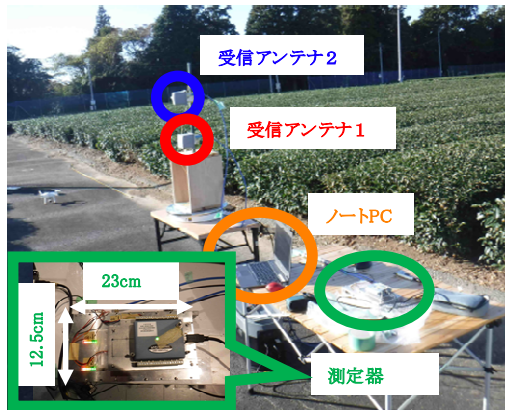


図6 試作したシステムの全景

テーブルで360°回転させ、2つのアンテナの受信レベル及びその差の角度依存性を測定した。測定はVNAのポート1(P1)に送信アンテナとして小型バイコンカルアンテナを接続し、ポート2(P2)、ポート3(P3)にそれぞれ受信アンテナを接続した。VNAでP1端子から信号を発生し、P2端子及びP3端子での減衰量を測定した<sup>3)</sup>。

### 2.3 測定対象外電波の区別

ドローン等の通信に使用される2.4GHz帯電波はそれ以外の機器でも多く使用されるため、これらの区別方法を検討した。測定には、図4に示す共同研究先が試作した測定器を使用した。この測定器は2442MHzを中心とした80MHzの帯域の受信レベルを取得し、ノートPC上の専用ソフトウェアに表示するものである。本節の測定では測定器のアンテナ1の入力のみを使用し、次節でアンテナ1及び2の入力を使用した。表1に示す機器の発する電波を図5に示す配置で3m法電波暗室内で測定した。測定時においてドローンは専用コントローラとペアリングし、カメラオン、飛行させない状態とした。その他の測定対象機器については対向機器と2.4GHz帯でWi-Fi接続状態とした。測定対象機器と対向機器を入れ替えた測定

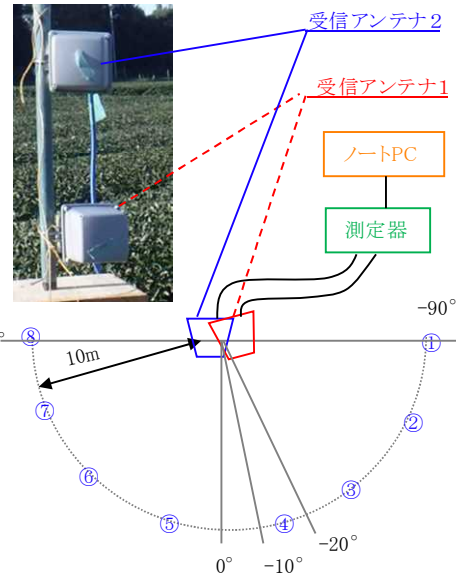


図7 推定精度評価方法

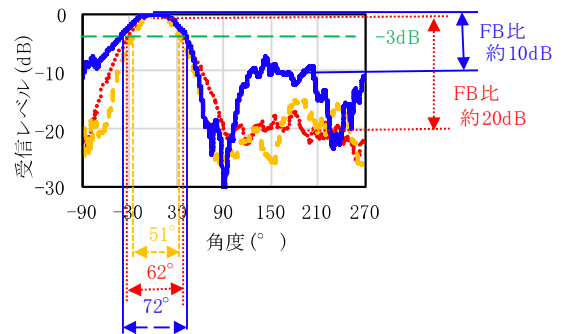


図8 各アンテナの受信レベルの角度依存

- ..... パッチアンテナ(加工有)
- - - - - パッチアンテナ(加工無)
- 八木・宇田

も実施した。

### 2.4 試作システムでの屋外測定・評価方法

図6に試作した測定システムを使用した屋外測定の様子を示す。受信アンテナ1及び2を図4に示す測定器に接続し、測定器とノートPCを接続した。ノートPCの専用ソフトウェアで各アンテナの受信レベルを測定した。図7に示す8点(①~⑧)において距離10m、高さ5mでドローンを飛行させ、実際の角度とシステムから推定される角度の比較により、システムの推定範囲及び誤差の評価を行った。受信アンテナ2の正面を0°の基準にして設置した。測定場所は静岡県農林技術研究所茶業研究センター。天候は晴れ、風速5m/sであった。測定対象のドローンの機種はPhantom 4 Pro (DJI 製)。

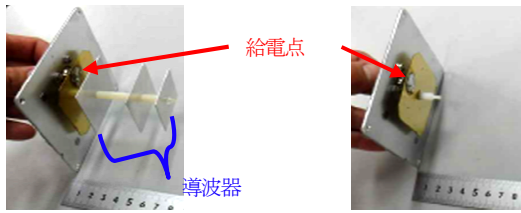


図9 パッチアンテナの内部構造  
加工無 (左)、加工有 (右)

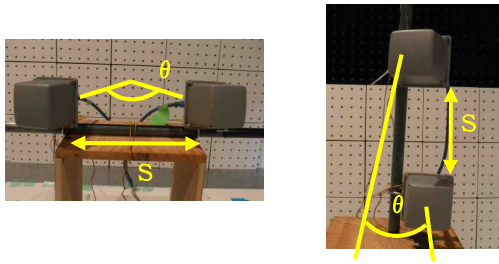


図10 アンテナ水平配置 (左)  
アンテナ垂直配置 (右)

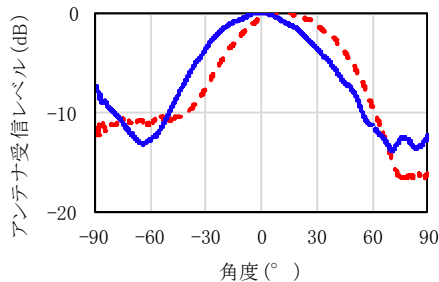


図11 パッチアンテナ水平配置における  
各アンテナの受信レベルの角度依存性

--- アンテナ1(水平)    — アンテナ2(水平)

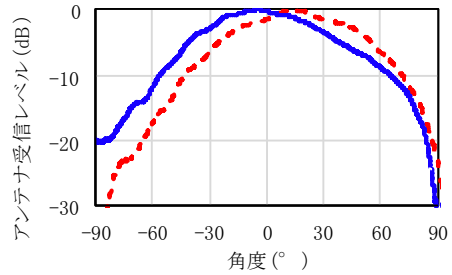


図12 パッチアンテナ垂直配置における  
各アンテナの受信レベルの角度依存性

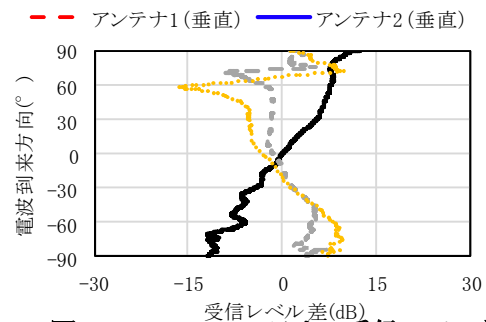


図13 2つのアンテナの受信レベル差と  
電波到来方向の関係 ( $\theta=20^\circ$  固定)

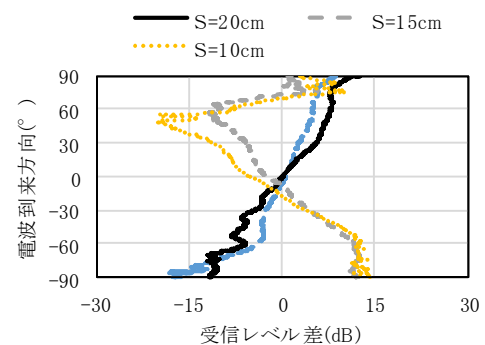


図14 2つのアンテナの受信レベル差と  
電波到来方向の関係 (S=20cm 固定)

—  $\theta=10^\circ$     —  $\theta=20^\circ$   
- -  $\theta=30^\circ$     ···  $\theta=40^\circ$

### 3 結果

#### 3.1 アンテナ種類の選定

図8にパッチアンテナと八木・宇田アンテナにおける受信レベルの角度依存性を示す。パッチアンテナの正面(図8中、角度 $0^\circ$ )と背面(図8中、角度 $180^\circ$ )の受信レベル比(FB比)は約20dBと八木・宇田アンテナのFB比の約10dBに比べて大きくなった。このことは、パッチアンテナの方が背面からの電波の影響が少なく、本システムに適していることを示している。

一方で半値幅(ピークから3dB低下する点)は八木・宇田アンテナの $72^\circ$ に比べてパッチアンテナは $51^\circ$ と狭いことが分かった。半値幅を広げることにより、到来方向の推定範囲の拡大が期待できるため、この効果を期待して図9のとおりパッチアンテナの

導波器3本を取り外す加工を行った。その結果、取り外し前に比べて取り外し後は、半値幅が $51^\circ$ から $62^\circ$ へ広がった。これらのことから、導波器を取り外したパッチアンテナが最もシステムに適していることが分かった。

#### 3.2 最適なアンテナ配置の検討

図10(左)に示すように2つのパッチアンテナを水平方向にS=1cm、5cm、20cm、30cmで配置し、 $\theta$ を $20^\circ$ から $160^\circ$ まで $20^\circ$ ステップまで変更して測定をした。図11にS=20cm、 $\theta=20^\circ$ で配置した場合の各アンテナの受信レベルの角度依存性を示す。各アンテナとも側面( $\pm 60^\circ$ から $\pm 90^\circ$ 付近)ではアンテナ

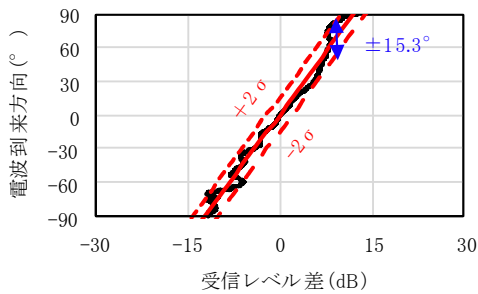


図15 2つのアンテナの受信レベル差と電波到来方向の関係 (S=20cm、 $\theta=20^\circ$ )

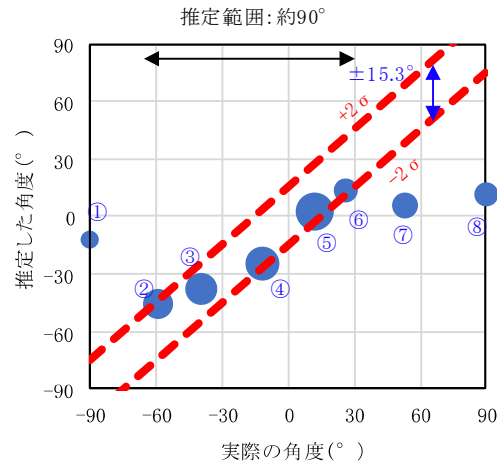


図17 屋外測定評価結果

20cm、 $\theta=20^\circ$  における受信レベル差と電波到来方向の関係を図15示す。電波の到来方向 $180^\circ$ の範囲において、 $\pm 2\sigma$ で $\pm 15.3^\circ$ となった。

### 3.3 測定対象外電波の区別

測定器の測定周期を1ms、測定時間を200msとした時のドローンとWi-Fiルーターの2.4GHz帯電波測定結果を図16に示す。ドローンとWi-Fiルーターでは電波の強さには大きな違いが見られないものの、周期には違いが見られ、平均値演算をすることで約40dBの差があることが分かった。また、測定データ数を少なくするために、測定周期を10ms、測定時間を200msとしても平均値演算で約20dBの差があることが分かった。これは測定周期を10ms以下とし、測定時間200msで対数電力平均をすることでドローンとそれ以外の機器の区別が可能であることを示している。なお、表1のドローン以外の機器についてはほとんど同じ傾向の電波であったため、据置型Wi-Fiルーターのみ図16に示す。

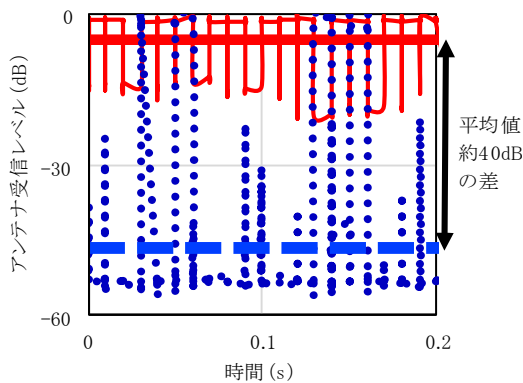


図16 ドローンとWi-Fiルーターの電波測定結果

— ドローン測定値      — ドローン平均値  
 ●●● Wi-Fiルーター測定値      — Wi-Fiルーター平均値

ナの受信レベルが左右非対称となった。これは、水平方向から到来する発信源の電波に対し、水平方向に配置したアンテナ等が干渉していることが原因と考えられる。この水平配置では、Sや $\theta$ の値に関わらず、同様の傾向が見られた。

これを回避するため、図10(右)に示すように2つのパッチアンテナを垂直方向にS=20cm、 $\theta=20^\circ$ で配置し、測定した結果を図12に示す。垂直配置では左右対称な受信レベルを得ることができた。

この垂直配置において、最適なSと $\theta$ を検討した。はじめに、 $\theta$ を固定してSを10cmから5cmステップで20cmまで変更して測定した結果を図13に示す。S=15cm以下ではアンテナ間の距離が足りず、期待する受信レベル差が得られなかったため、S=20cmが最適であると考えられる。次にS=20cmで固定し、 $\theta$ を $10^\circ$ から $10^\circ$ ステップで $40^\circ$ まで変更して測定した結果を図14に示す。測定の結果、 $\theta=20^\circ$ の時に、電波到来方向の標準偏差 $\sigma$ が最小となった。S=

### 3.4 試作システムでの屋外測定・評価結果

図7の8点でドローンを飛行させた時の実際の角度とシステムで受信した電波から推定する角度の比較を図17に示す。アンテナの正面付近の推定範囲約 $90^\circ$ (②~⑥)では $\pm 15.3^\circ$ の誤差で推定できたが、アンテナの側面付近(①、⑦、⑧)では電波の受信レベルが15dB以上低下し、推定ができなかった。図17中のマーカーサイズは、各測定ポイントでドローンが飛行している際に各アンテナで受信した電波の強さに対応しており、推定できなかった①、⑦、⑧においては、受信レベルは低い結果となった。なお、推定できた正面付近の約 $90^\circ$ においては10dB受信レベ

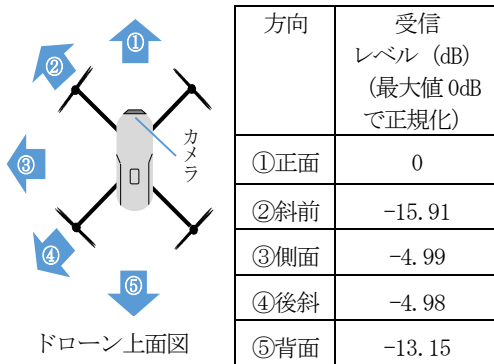


図 18 ドローンが水平方向に発する電波

ルが低下する約 33m先の電波でも推定可能なことを確認した。

航空法で定められる無人航空機と人及び物件との離隔距離は 30m である。本システムはこの離隔距離を保たずに人や物件に接近する無人航空機を検知する性能を有していると考えられる。

#### 4 考察

推定範囲が 90° (±45°) となった原因を考察する。図 15 は VNA での測定結果であり、VNA はダイナミックレンジが広く、小さい信号から大きい信号まで正しく測定できる<sup>3)</sup>。また送信アンテナから発する電波も強いいため、受信アンテナの側面方向でも正確に測定できた。

一方、ドローンが水平方向に発する電波については、図 18 のとおりであり、ドローン斜め前方向では発する電波が正面に比べて約 16dB 弱いことが分かった。開発したシステムではこの範囲の受信感度が不足しており、本来期待される受信レベルが得られなかったものと考えられる。

推定範囲 90° において、最も受信レベルの低下する値は約 -10dB であり、これが推定に必要な最低限の受信レベルと考えられる。ドローンの向きによる受信レベルの低下を考慮すると斜め前 (60° 付近) 方向では最大約 -30dB 受信レベルが低下するため、測定器の受信可能な最小信号レベルを 20dB 程度下げることによって推定範囲 180° を達成できる見込みが得られた。

図 18 と同様の測定を、別機種 of ドローン mini 3 (DJI 製) でも実施したところ、発する電波の最も強い方向と弱い方向の差は 5dB 程度であり、機種による違いが大きいことが分かった。ドローンの操縦や

通信の観点からは各方向に発する電波の強さは一定であることが望ましいため、新しい機種ほど方向による電波の強さの差が少なくなると想定される。その場合、推定範囲 90° より広い範囲で電波到来方向の推定が可能になると考えられる。

#### 5 まとめ

屋外で距離約 30m (高さ 5 m) で飛行中のドローンを、推定範囲約 90° において誤差約 ±15° で推定できる小規模・低コストなシステムを構築した。またドローンとそれ以外の機器の発する電波の周期に着目し、区別することができた。

測定器において受信可能な最小信号レベルを約 20dB 下げることによって推定範囲 180° を達成できると見込まれる。

システムは、アンテナ全体の寸法が約: 20cm×20cm×40cm、測定器の寸法が約: 12.5cm×23cm×5cm 及びノート PC の小規模な構成で、費用は数十万円程度と想定される。人力で運搬できるため、従来設置できなかった場所への設置や設置費用削減も可能であると考えられる。

#### 謝辞

本研究を行うにあたり、屋外測定に御協力いただきました静岡県農林技術研究所茶業研究センター長谷川主任研究員、電波暗室内での測定用にドローンを貸与いただいた静岡県農林技術研究所森林・林業研究センター様に深く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 上野貴康 他: 2つの固定アンテナを用いた電波到来方向の簡易的推定. 静岡県工業技術研究所研究報告, 17, 112-113 (2024).
- 2) 谷口慶治: 各種のアンテナ, 「アンテナと電波伝搬」, 初版 (共立出版(株), 東京), pp. 156-160 (2005).
- 3) 石井望: パターン・利得測定, 「アンテナ基本測定法」, 初版 (株)コロナ社, 東京), pp. 145-155 (2011).