

技術紹介

6 ドローン向け電波距離計 JRE-150VA の開発

The development of Radio Distance Meter JRE-30 for drones

栗原 寛典	Hironori Kurihara	航機事業部 第三技術部 マネージャー
小林 義幸	Yoshiyuki Kobayashi	航機事業部 第三技術部 主任
鈴木 浩行	Hiroyuki Suzuki	航機事業部 第三技術部 主任
和田 拓磨	Takuma Wada	航機事業部 第一技術部

キーワード：ミリ波、レーダー、FM-CW(周波数変調連続波)、ドローン、対地高度、障害物検知、相対速度、相対角度、防水性、防塵性、高信頼性

Keywords：Millimeter wave、Radar、FM-CW(Frequency Modulated Continuous Wave)、Drone、Altitude above ground level、Obstacle detection、Relative velocity、Relative Angle、Waterproof、Dustproof、High reliability

要 旨

ドローンの産業利用が本格化しており、特に、農薬散布、水上飛行、高所部点検等では、対地高度を安定して計測することが必要となってきています。

現在、ドローンにおける対地高度計測は、レーザーや赤外線を使用したものが主流ですが、天候(雨、霧等)、周辺環境(粉塵等)、水上、樹木上といった環境下にて、精度劣化や測定不能となる欠点を持っています。

そこで、2024 年に電波距離計 JRE-30 を開発し、全天候型のドローンに向けて信頼性の高い高度計測を提供してきました。

このたび、150 m 以上の遠距離から 0.1 m 付近までの近距離までを、天候や環境に左右されずに高精度に計測可能な電波距離計を開発しました。本稿では、今回開発した「Flight Brain™」JRE-150VA の特長、機能、性能等について紹介します。

SUMMARY

Industrial use of drones is gaining momentum, and it is becoming necessary to stably measure altitude above the ground, especially for purposes such as pesticide spraying, flying over water, and inspecting high places.

Currently, most ground altitude measurements by drones use lasers or infrared rays, but they have the disadvantage that the accuracy deteriorates and measurement becomes impossible in weather conditions (rain, fog, etc.), in the surrounding environment (dust, etc.), above the water, and above the trees.

In response, we developed the JRE-30 radio rangefinder in 2024, providing highly reliable altitude measurement for all-weather drones.

We have now developed a radio wave distance meter that can measure distances from over 150 m to close distances of around 0.1 m with high accuracy, regardless of weather or environment. This paper introduces the features, functions, and performance of the newly developed "Flight Brain™" JRE-150VA.

1. はじめに

近年ドローンは、建築、土木、農業などの産業用途にとどまらず、離島や山岳地帯への物資搬送などの商業利用や、災害時には被害状況調査や医薬品運搬などにも活用されており、今後さらに活用範囲が広がって行くと予測されます。

ドローンの高度などの距離計測では、従来レーザーや赤外線を利用した距離計を使用することが多くなっていましたが、天候や周辺環境による測定精度への影響が懸念されていました。一方で、電波方式の距離計は天候に左右されずに使用することが可能なため、耐環境性において優位性があります。当社では 2024 年にドローン向けの電波距離計 JRE-30 を開発し、多くのお客様にご利用頂いています。

近年、物資運搬や災害時のドローン基地局においては、航空法で許可されている高度 150 m 付近でドローンを運用するケースが増加しておりますが、従来製品の JRE-30 では測定レンジが 95 m であり、高度 150 m 付近での計測が困難なため、より遠距離の検出性能が求められていました。

さらに、目視外で飛行させる自律飛行ドローンの普及に伴って、衝突回避のための障害物検知がドローンの必須要件となっています。従来製品の JRE-30 は速度検出と角度検出が出来なかったため、障害物検知には能力不足となっていました。

こうした近年のニーズに対応するため、最大計測距離を 200 m に伸ばすとともに、速度と角度の検出機能を追加して障害物検知にも対応可能な電波距離計 「Flight Brain™」 JRE-150VA (図 1) を開発しましたので、概要と特長をご紹介します。



図 1 JRE-150VA 外観写真

2. JRE-150VA の仕様

電波距離計「Flight Brain™」 JRE-150VA 仕様と従来製品の対比を表 1 に示します。

2.1 距離

最大測定距離は 200 m として、ドローン機体の最大飛行高度 150 m における対地高度計測を可能としました。また最小測定距離は 0.1 m として、小さな機体でも着地状態で高度測定を可能としました。

2.2 速度

連続してチャープを送信し、位相差を求めることで、従来製品ではできなかった、相対速度の測定を可能としました。また、最大計測速度を 16.4 m/s (約 59 km/h) とすることにより、通常飛行時の上昇・下降速度や、対象物の相対速度を十分に測定可能としました。

2.3 角度

送信アンテナと受信アンテナをそれぞれ複数用意することで、従来製品ではできなかった、水平方向の角度の測定を可能としました。測定範囲を±60°以上として、斜め方向の建物や障害物等の測定を可能としました。

2.4 寸法、質量

ドローン搭載機器において、小型軽量は飛行距離/飛行時間と密接に関連する重要な要素です。JRE-150VA は従来製品よりも大幅に測定距離を延ばしたことに加え、速度検出と角度検出の機能も追加したうえで従来製品同等の寸法と質量を実現しました。

2.3 動作温度、環境条件

産業用ドローンは極寒地や真夏の炎天下で使用することが求められることから、従来製品の動作温度範囲と同じ-40～+85°C として、広い温度範囲を確保しました。

JRE-150VA は、通常、機体外部に露出して設置されることから、防水防塵規格を IP66 及び IP67 に準拠すると共に、耐環境性を担保するため、民間航空機向け耐環境性能基準である DO-160G 準拠の環境試験を実施して、製品としての高い耐環境性を実現しています。

表 1 JRE-150VA 仕様

項目	JRE-150VA	従来製品 (JRE-30)
周波数	60 GHz	24 GHz
バンド幅	移動体検知センサー用 : 3.96 GHz ミリ波レーダー用 : 460 MHz	190 MHz
距離/高度	0.1~200 m	0.1~95 m
速度	16.4 m/s	測定不可
角度	水平 : $\pm 60^\circ$ 以上	測定不可
寸法	75 × 77 × 19 mm (図 2)	75 × 77 × 19 mm
質量	110 g (ケーブル 0.3 m 込み)	110 g (ケーブル 1 m 込み)
温度	-40~+85°C	-40~+85°C
電波法	技術基準適合証明	技術基準適合証明
防水・防塵性	IP66、67 準拠	IP66、67 準拠
環境試験	- DO-160G 準拠 (振動、衝撃、温度、湿度、高度) 1000 H @ +85°C 高温耐久	- DO-160G 準拠 (振動、衝撃、温度、湿度、高度) 1000 H @ +85°C 高温耐久

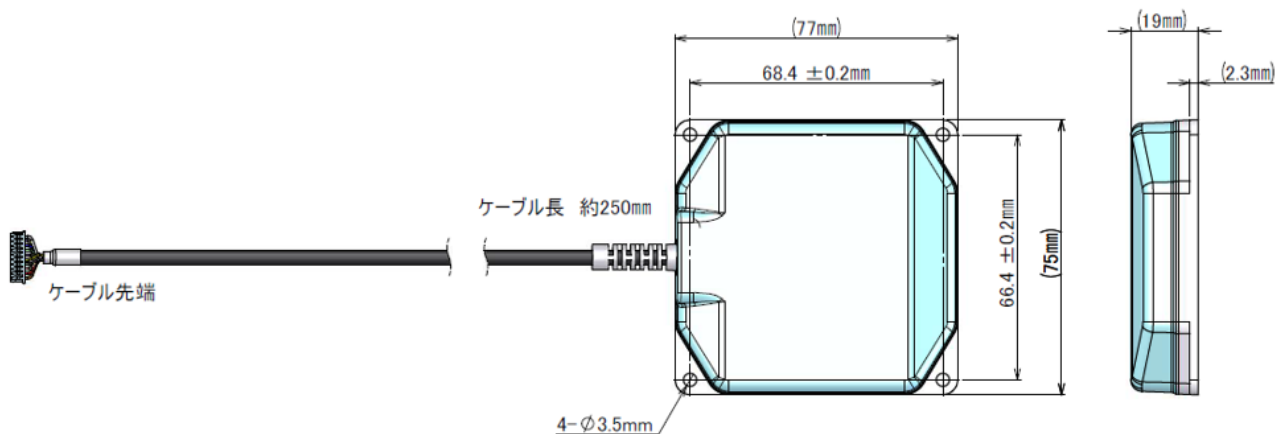


図 2 外観図

3. 開発のポイント

3.1 周波数帯

24 GHz 帯では 24.05~24.25 GHz の 200 MHz を帯域幅として使用可能ですが、60 GHz 帯における電波法上の移動体検知センサーに分類される規格では 57~64 GHz の 7 GHz を帯域幅として使用することができます。帯域幅が広がることで距離分解能が上がるため、距離精度を向上させることができます。

さらに、60 GHz 帯は、他の周波数帯と比較して、国際的な運用制限が極めて少なく、用途が限定されないワールドワイドに利用可能な周波数帯として整備されている点も大きな利点です。77 GHz 帯や 79 GHz 帯に関しては、自動車の車外センシング用途のみに利用制限されている国もあるのに対し、60 GHz 帯は全世界で用途制限がないことを踏まえ、グローバル市場に向けた製品開発に適しています。本製品ではグローバル適合性と、広帯域による距離精度向上が可能な点を重視し、60 GHz 帯を使用することとしました。

60 GHz 帯では、移動体検知センサーの他に、ミリ波レーダーに分類される規格も用意されており、60~61 GHz の 1 GHz を帯域に使用することができます。60 GHz 帯におけるミリ波レーダーの規格では、等価等方輻射電力（EIRP）と呼ばれる空中線電力とアンテナ利得を合計した電波の強さを示す指標の制限がないため、電波の出力を強くすることができ、遠距離を測定しやすくなるメリットがあります。このため JRE-150VA では2つのカテゴリの電波を時分割で同時に出力することにより遠距離と近距離での精度向上の両立を可能にしました。

3.2 アンテナ開発

基板の部品面とアンテナ面を図 3 に示します。60 GHz の電波の送受信には、パッチアンテナと呼ばれるアンテナを使用します。アンテナ面の四角いパッドが電波を送受信する部分です。アンテナのパッチの数を増やすと、電波のビーム幅が絞られてアンテナゲインが高くなり、測定できる距離/高度が伸びますが、製品が大きくなってしまいます。しかし、60 GHz 帯は 24 GHz 帯と比較して波長が短いため、アンテナの小型化が可能であり、従来製品と同じ大きさの基板に受信アンテナ 4 つと、送信アンテナを 3 つ（移動体検知センサー用に 2 つ、ミリ波レーダー用に 1 つ）実装することができました。送信アンテナ 3 つのうち 2 つ（TX1、TX2）からは、近距離計測用チャープ（最大距離 25 m）、残りの 1 つ（TX3）からは、遠距離計測用チャープ（最大距離 200 m）を送信します。軸定義を図 4、送信アンテナ特性一覧を表 2、受信アンテナ特性一覧を

表 3、アンテナ特性詳細を図 5~図 11 に示します。図 5~図 11 における m1 はアンテナゲインのピークを示しており、X は最大ゲイン角度、Y は最大アンテナゲインを示します。TX1、TX2 では、アンテナゲインより半値角を優先し、Azimuth 方向の半値角を約 64~67°、Elevation 方向の半値角を約 27° としました。TX3 では、半値角よりアンテナゲインを優先し Azimuth、Elevation それぞれ最大アンテナゲイン 24 dBi とし、従来製品より 9 dBi 高い値を実現しました。2 種類の電波の測定結果を使用することで、遠距離計測・近距離高精度計測が同時に可能となりま

した。また、Rx1～Rx4 では、アンテナゲインより Azimuth 方向の半値角を優先し、約 81～107° としました。さらに、Azimuth 方向に 4 つ同じアンテナを配置することで、角度分解能 30°以下で角度測定を可能にしました。角度分解能とは、同距離にある 2 つの対象物を分離できる最小の角度差となります。

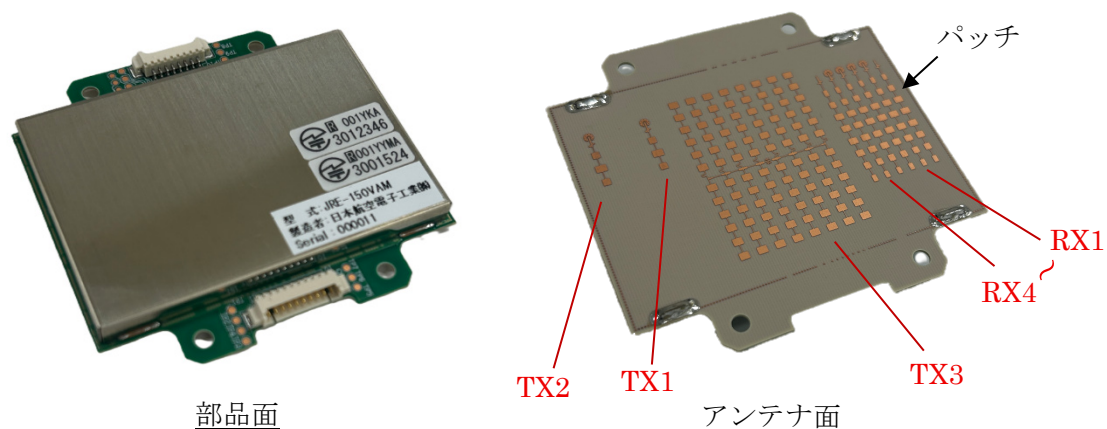


図 3 アンテナ一体のレーダーモジュール基板

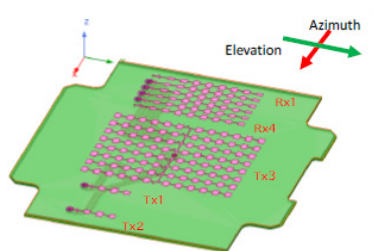


図 4 軸定義

表 2 送信アンテナ 特性一覧

項目		Tx1 (1×3)		Tx2 (1×3)		Tx3 (8×12)	
		Azi	Ele	Azi	Ele	Azi	Ele
最大アンテナゲイン	dBi	9.64	9.64	9.72	9.58	24.70	24.70
最大ゲイン角度	deg	+1	-1	-2	0	0	0
半値角	deg	66.92	27.22	64.51	27.08	9.15	6.70
θ マイナス側	deg	-32.58	-14.45	-32.91	-14.52	-4.62	-3.47
θ プラス側	deg	+34.34	+12.77	+31.60	+12.56	+4.53	+3.23

表 3 受信アンテナ 特性一覧

項目		Rx1 (1×8)		Rx2 (1×8)		Rx3 (1×8)		Rx4 (1×8)	
		Azi	Ele	Azi	Ele	Azi	Ele	Azi	Ele
最大アンテナゲイン	dBi	11.86	10.56	12.89	12.59	12.90	12.71	12.23	10.55
最大ゲイン角度	deg	+30	0	+8	0	-6	0	-27	0
半値角	deg	106.45	11.07	83.27	11.15	81.95	11.16	100.49	11.10
θ マイナス側	deg	-52.94	-5.49	-41.95	-5.59	-40.21	-5.58	-52.68	-5.55
θ プラス側	deg	+53.51	+5.58	+41.32	+5.56	+41.74	+5.58	+47.81	+5.55

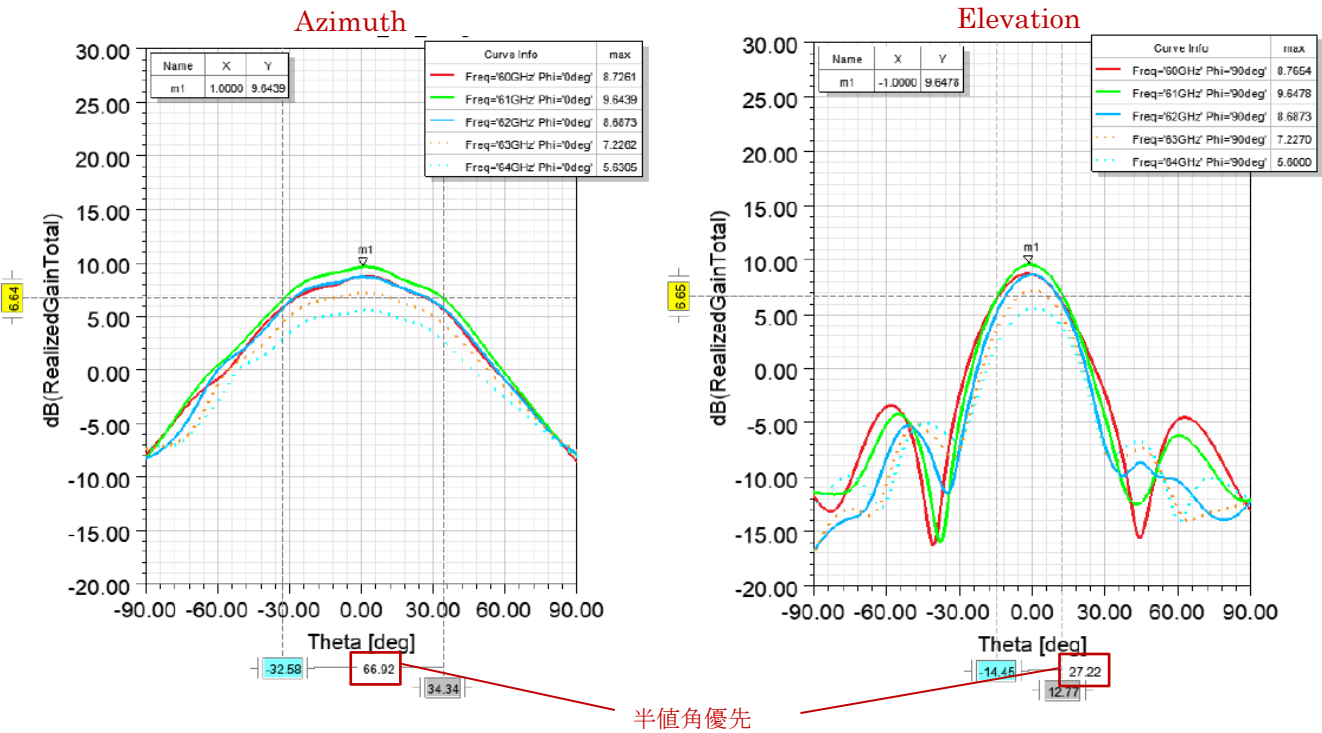


図 5 TX1 アンテナ特性

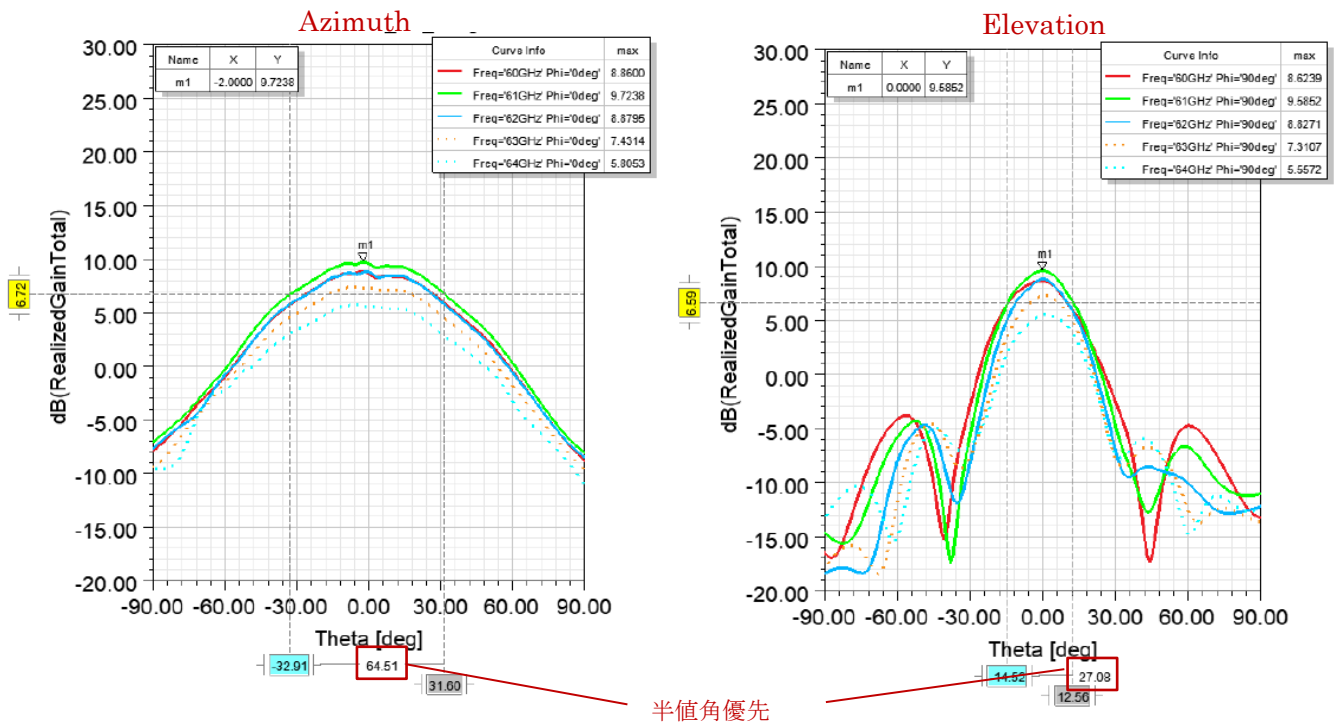


図 6 TX2 アンテナ特性

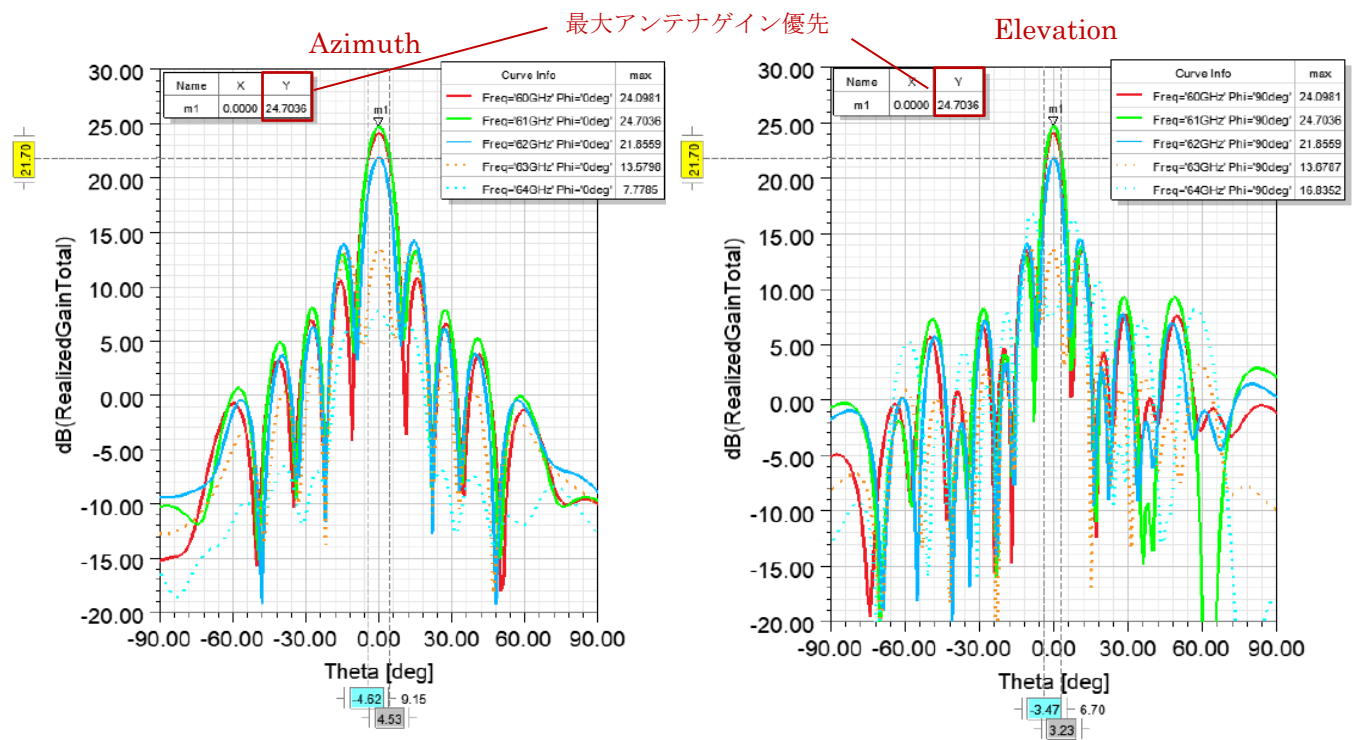


図 7 TX3 アンテナ特性

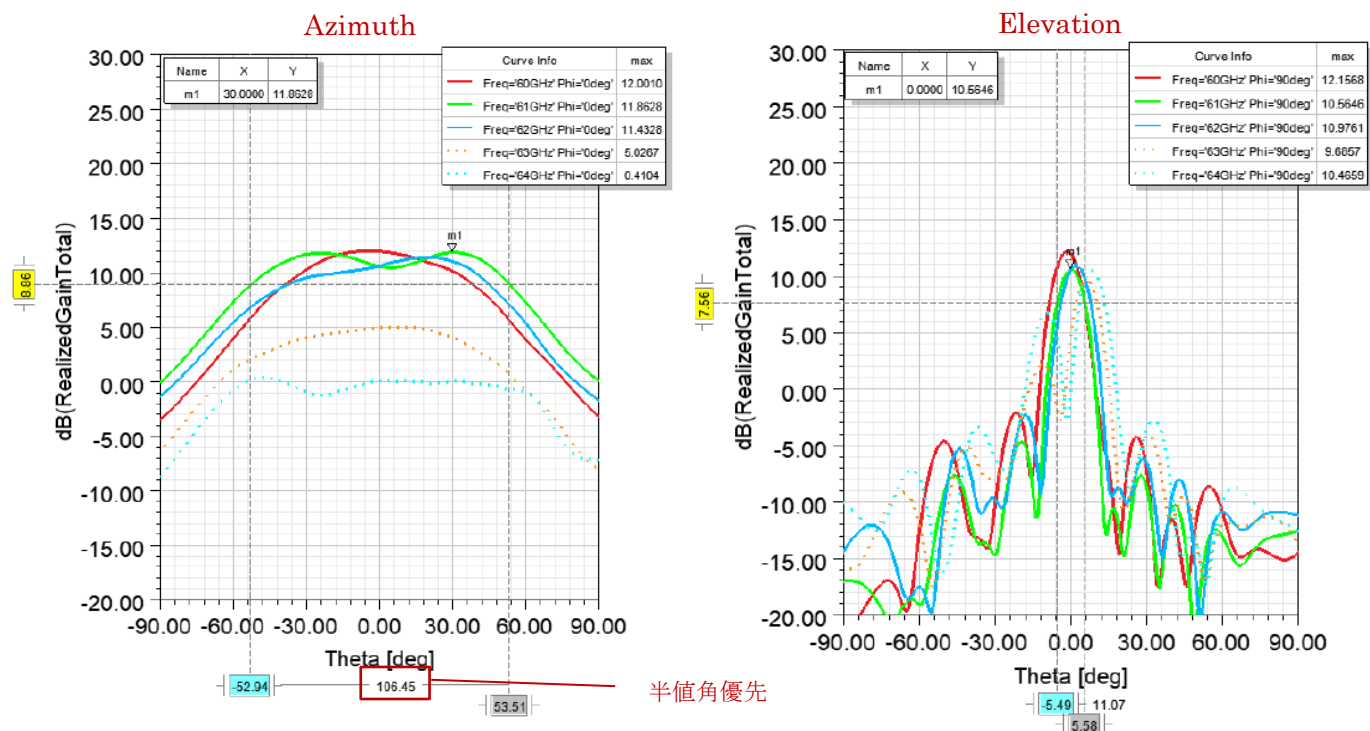


図 8 RX1 アンテナ特性

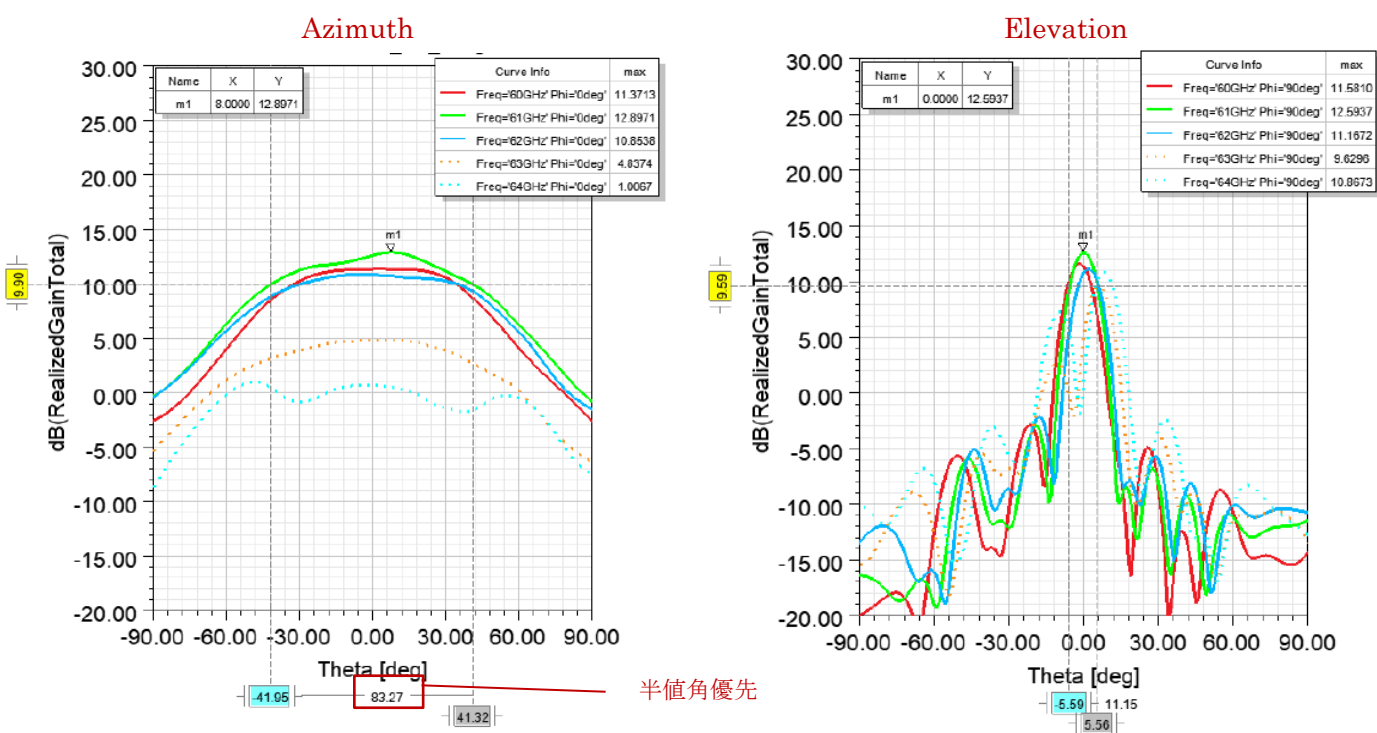


図 9 RX2 アンテナ特性

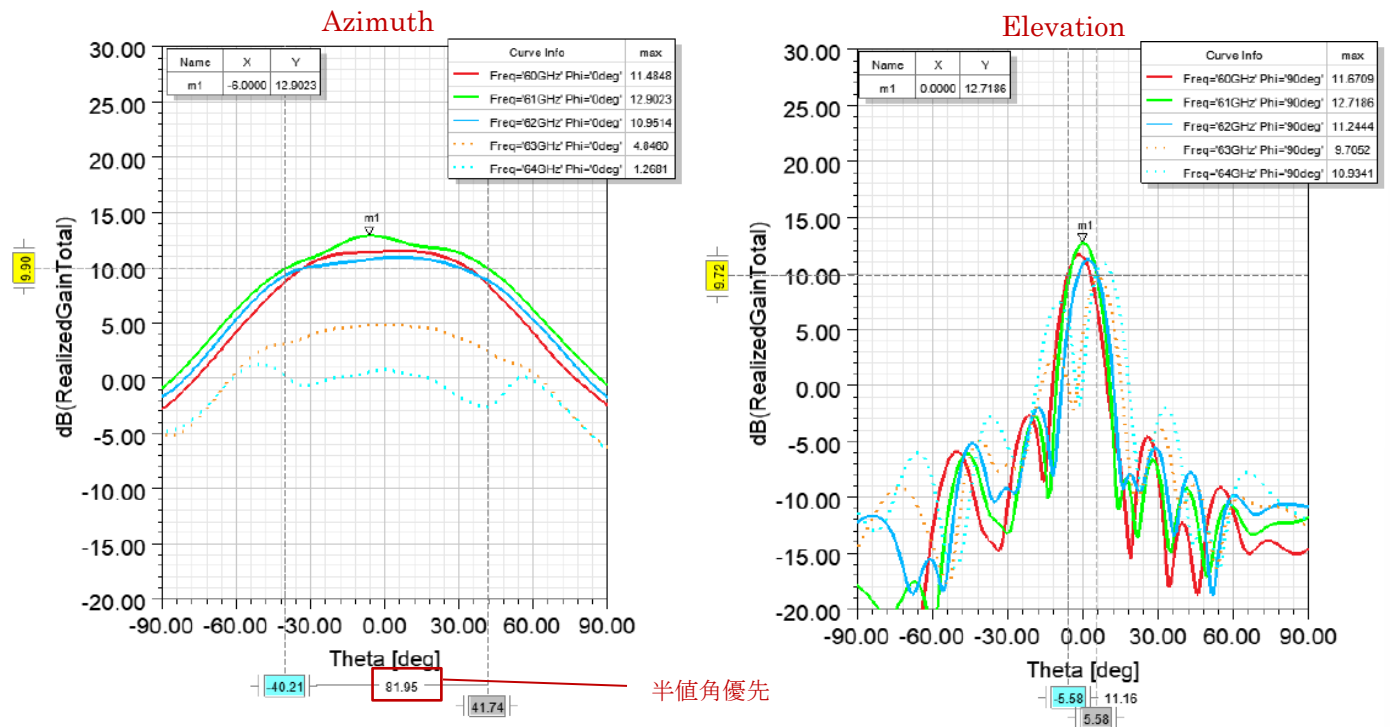


図 10 RX3 アンテナ特性

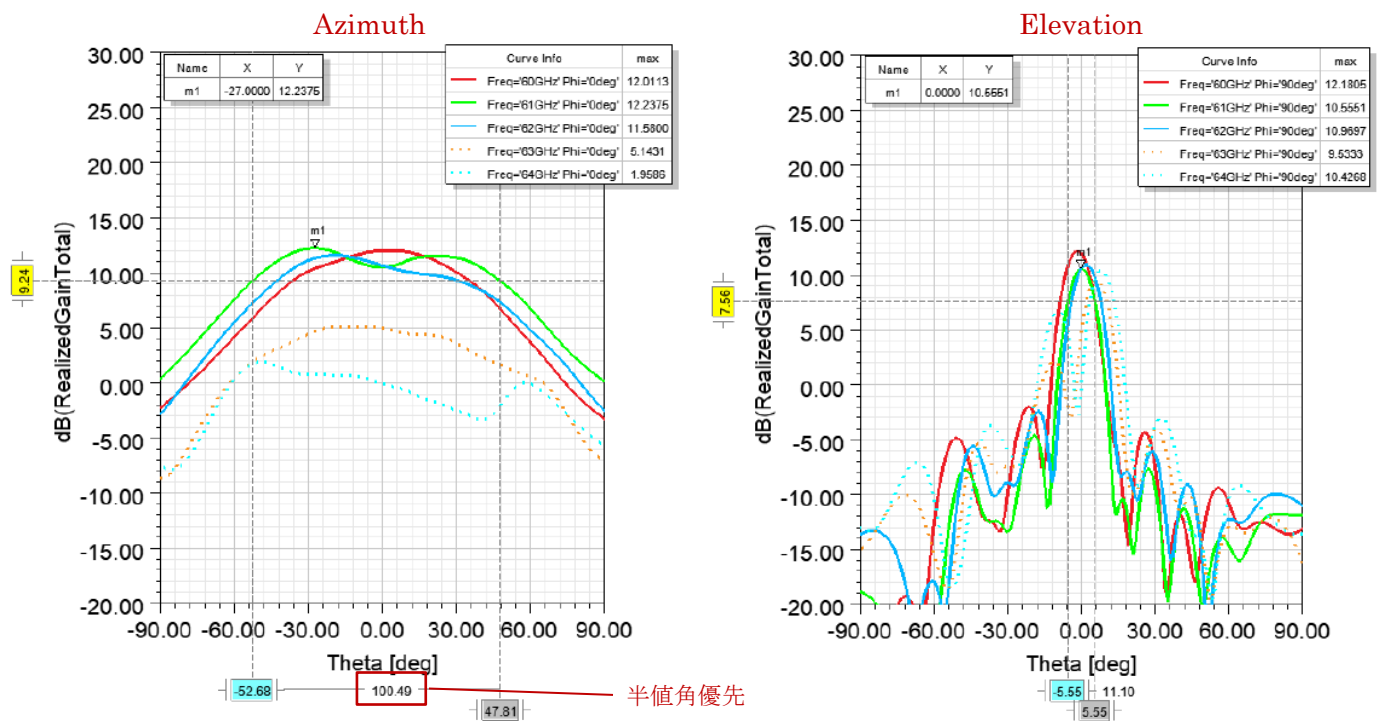


図 11 RX4 アンテナ特性

3.3 測定アルゴリズム開発

JRE-150VA で新しく開発した測定アルゴリズムを図 12 に示します。

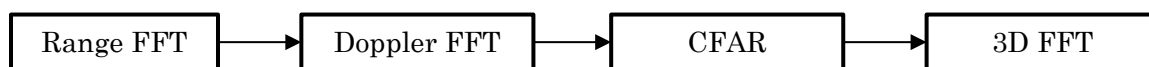


図 12 測定アルゴリズム

① Range FFT

A/D 入力で取得したビート信号に対し、**Fast-time** 方向（サンプル方向）に FFT を行い、各周波数にどれほどの振幅が存在するかを検出します（図 13）。Range FFT のピークの位置から、距離を算出することができます。

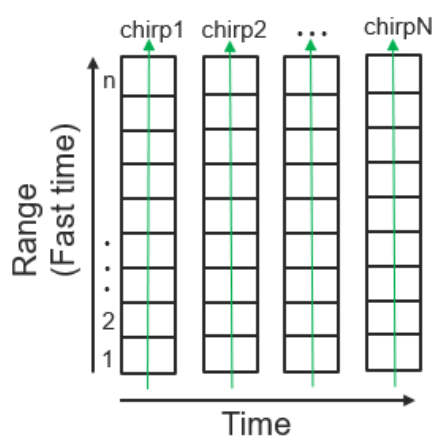


図 13 Range FFT

② Doppler FFT

Range FFT の同一 bin に対し、複数チャープ間（**Slow-time** 方向）で FFT を行い、同一 Range bin の連続チャープ間における位相変化を解析します（図 14）。Doppler FFT のピークの位置から速度を算出することができます。

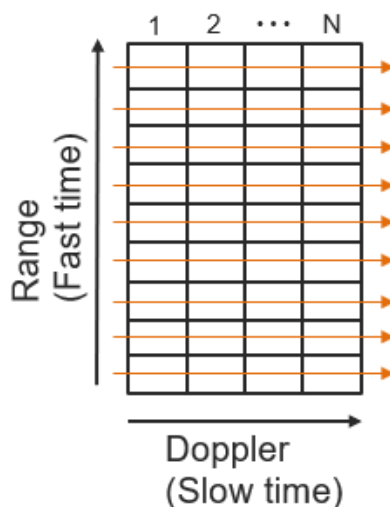


図 14 Doppler FFT

③ CFAR

Range FFT、Doppler FFT を行った結果に対して、Range 方向、Doppler 方向にそれぞれ CFAR (Constant False Alarm Rate : 一定誤警報率) と呼ばれる、検出するしきい値を動的に設定する処理を行います (図 15)。CFAR によって余分なノイズやクラッタを除去することができます。

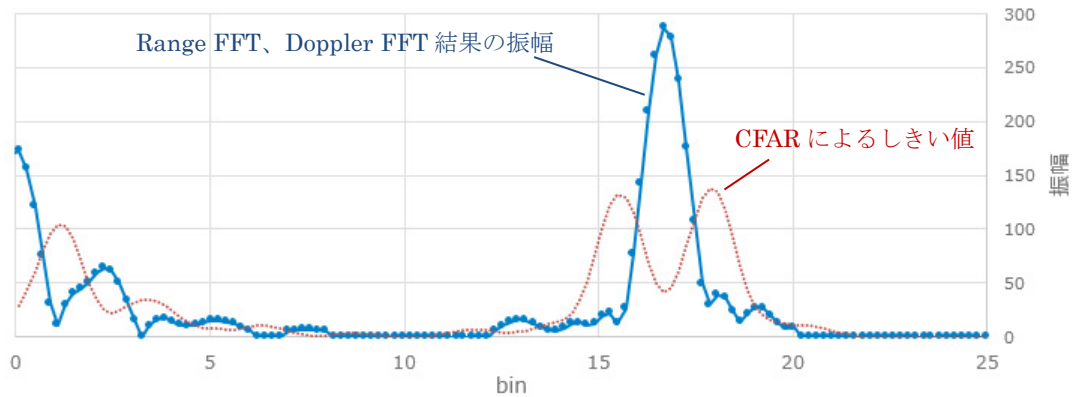


図 15 CFAR によるピーク検出

④ 3D FFT

Range 方向・Doppler 方向の両方の CFAR によって検出されたピークに対して、3D 方向 (Azimuth 方向) に FFT を行い、アンテナ間の位相変化を解析します。3D FFT のピークの位置から角度や 3 次元情報 (x、y、z 座標) を算出することができます (図 16)。

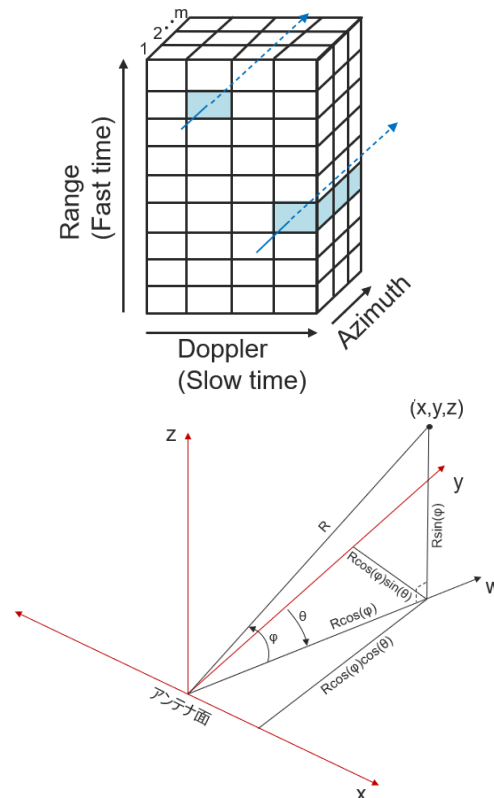


図 16 3D FFT

4. JRE-150 の性能

4.1 距離性能

屋外の開けた場所で遠距離を測定したときの結果を図 17 に示します。送信アンテナのビームを絞り、送信アンテナ利得を向上させた結果、測定可能距離が従来比で大幅に向上しました。最大 375 m の棟を高い強度でピークとして捉えており、測距能力が高いことが分かります。

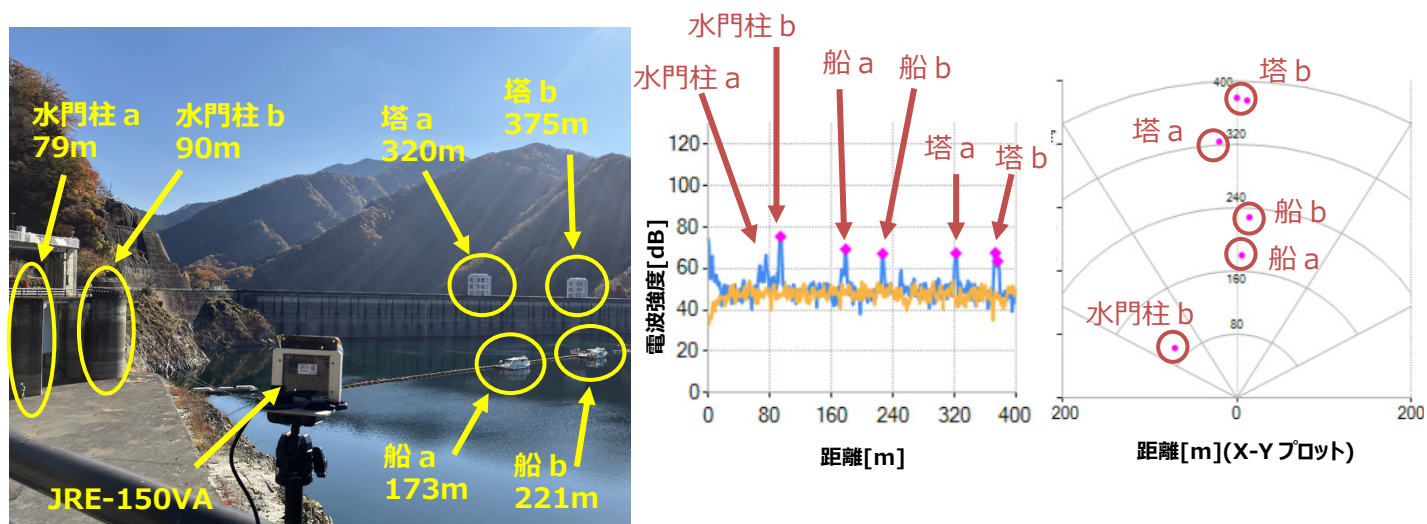


図 17 距離測定結果（アンテナ照射：水平方向）

次に、ドローンに JRE-150VA のアンテナ面を下向きにして搭載し、土と芝生の上空を飛行させて距離を測定したときの結果を

図 18、Lidar の測定結果をに示します。JRE-150VA では、土、芝生の両方において 110 m 付近まで測定できており、Lidar に対する優位性を確認できました。

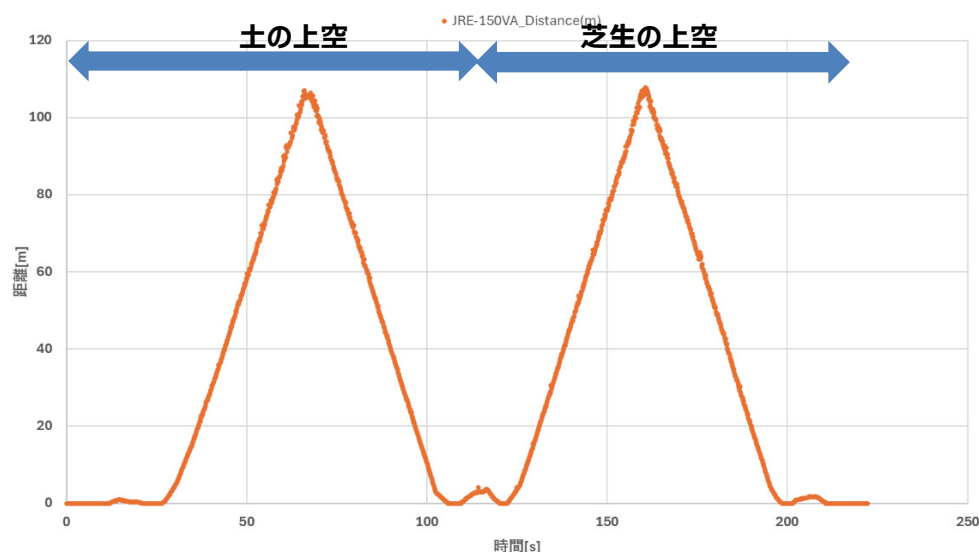


図 18 距離測定結果（アンテナ照射：地面方向）

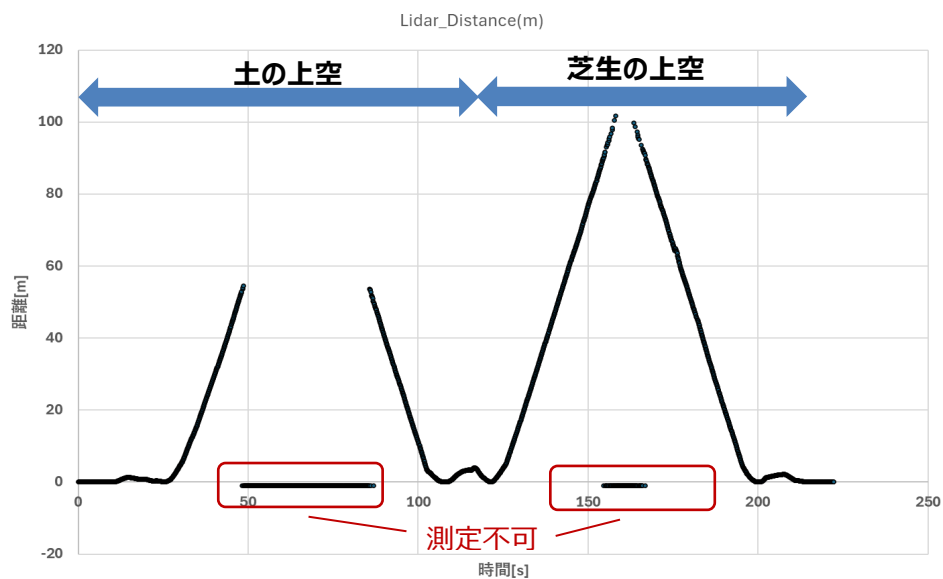


図 19 Lidar による距離測定結果（参考）

4.2 速度性能

0 dBsm のリフレクタを 0.5、1、2 m/s で移動させたときの結果を図 20 に示します。実速度 0.5、1、2 m/s に対し、測定誤差は 3%以下となり、安定して測定できていることが分かります。

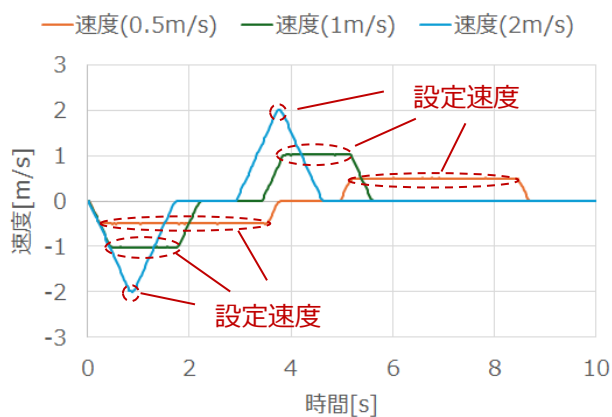


図 20 速度測定結果

4.3 角度性能

0 dBsm のリフレクタを JRE-150VA と 1 m の距離に設置し、JRE-150VA を 1°ごとに回転させて角度の測定を行った結果を図 21 に示します。角度測定範囲は $\pm 60^\circ$ で、角度誤差は 5° 以下となり、安定して測定できていることが分かります。

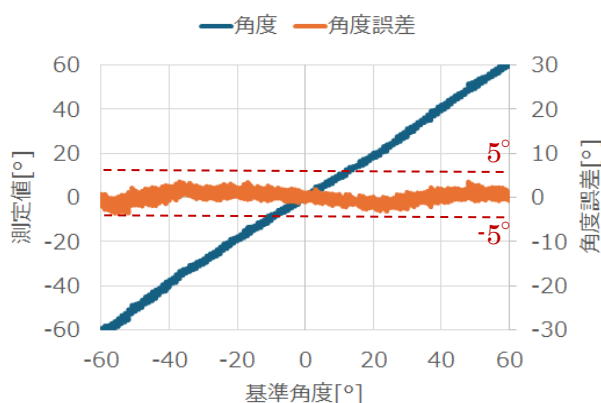


図 21 角度測定結果

5. 今後の計画

高所インフラや閉所空間などの点検用ドローンでは、構造物や壁などへの接触を回避するために機体近傍の障害物検知が必要となり、小型・軽量で広い検出角度を有するセンサーのニーズも多くあります。

そこで、今回紹介したモデルに加えて親指サイズの超小型近接レーダー JRE-10 も開発しております。機体の四隅に設置することで 360°全方向の障害物検知が可能となり、衝突リスクの低減が図れます。アンテナ構造を簡素化し、コストを抑えたモデルとして 2026 年度の製品リリースを予定しております。

6. まとめ

当社は、今回ご紹介しました電波距離計の JRE シリーズ、フライトコントローラーの JFB シリーズといったドローン向け製品の開発を行ってきました。

ますます活用の方が広がることが見込まれるドローン市場に向けて、今後も新製品をリリースし続けて行くと共に、産業用ドローンユーザーが安心して使用できる製品ラインナップを拡充させ、空の安心、安全に貢献していきます。

Flight Brain は、日本航空電子工業株式会社の登録商標です。