

ミリ波高速チャープ変調レーダによるドローンのマイクロドップラ特性に関する実験的検討

防衛大学校理工学研究科電子工学専攻 黒崎将史 中村僚兵 葉玉寿弥

研究背景

- 小型無人航空機（ドローン）の**利活用**
- 軍事，産業インフラ等様々な分野で利用拡大
 - ➔ 今後もドローンの市場は急成長する見込み
- 技術の向上により，安価で高性能なものが普及
 - ➔ 誰でも気軽に入手可能，ドローンユーザーの増加
- 爆発物を搭載したドローンによるテロの発生

ドローンを取り巻く課題

- 墜落事故，イベント会場等への不法な侵入の増加
- 盗撮被害やプライバシー問題
- 爆発物を搭載したドローンによるテロの発生

ドローンの早期検出と多種雑多なドローンの識別は重要な課題

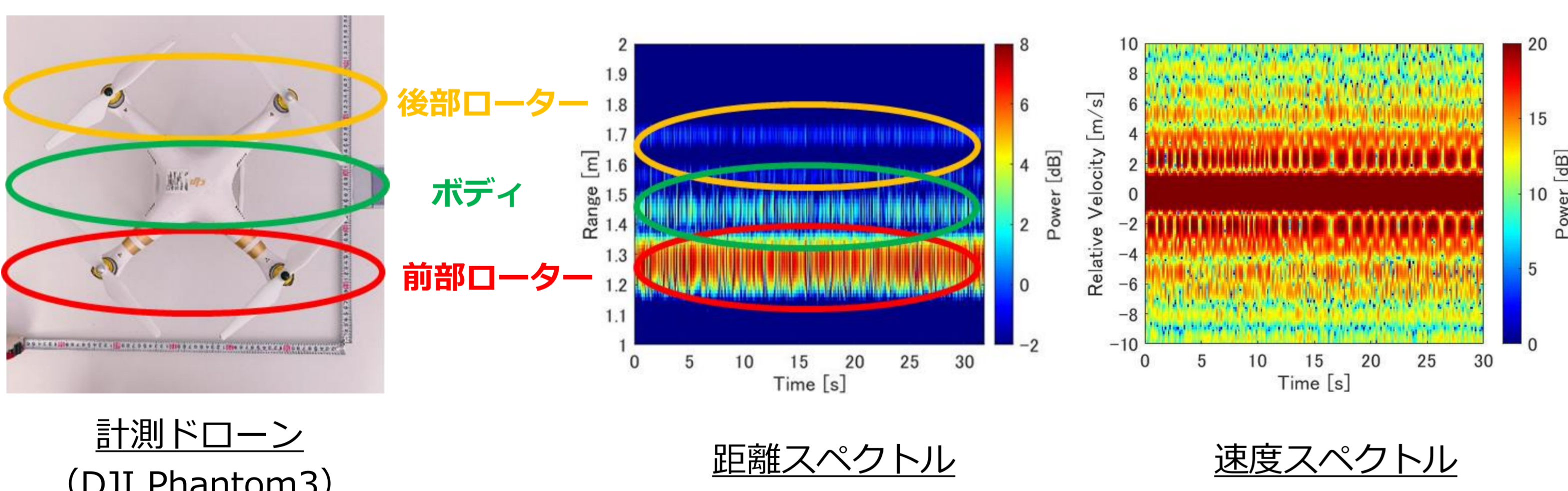
ドローンの検知・識別技術

- **カメラ**
 - ○検知・識別精度が高い ×夜間や天候に影響される
- **集音マイク**
 - ○安価 ×周囲の雑音等の影響を受ける
- **制御信号の検知**
 - ○検知距離が長い ×他システムによる精度の低下
- **レーダ**
 - ○全天候性且つ外乱の影響を受けづらい
 - ○比較的高精度に測距可能

ミリ波レーダの高分解性能によって各種ドローンの検知・識別を検討

研究内容

- 高速チャープ変調方式(Fast chirp modulation : FCM)のミリ波レーダによるドローン検知[1]
- 形状の異なる3種のドローンに対する検知実験
 - ➔ 距離スペクトル上で**ドローンの特徴的な反射波**を確認
 - ➔ 速度スペクトル上で**プロペラの回転によるマイクロドップラ特性**を検出可能



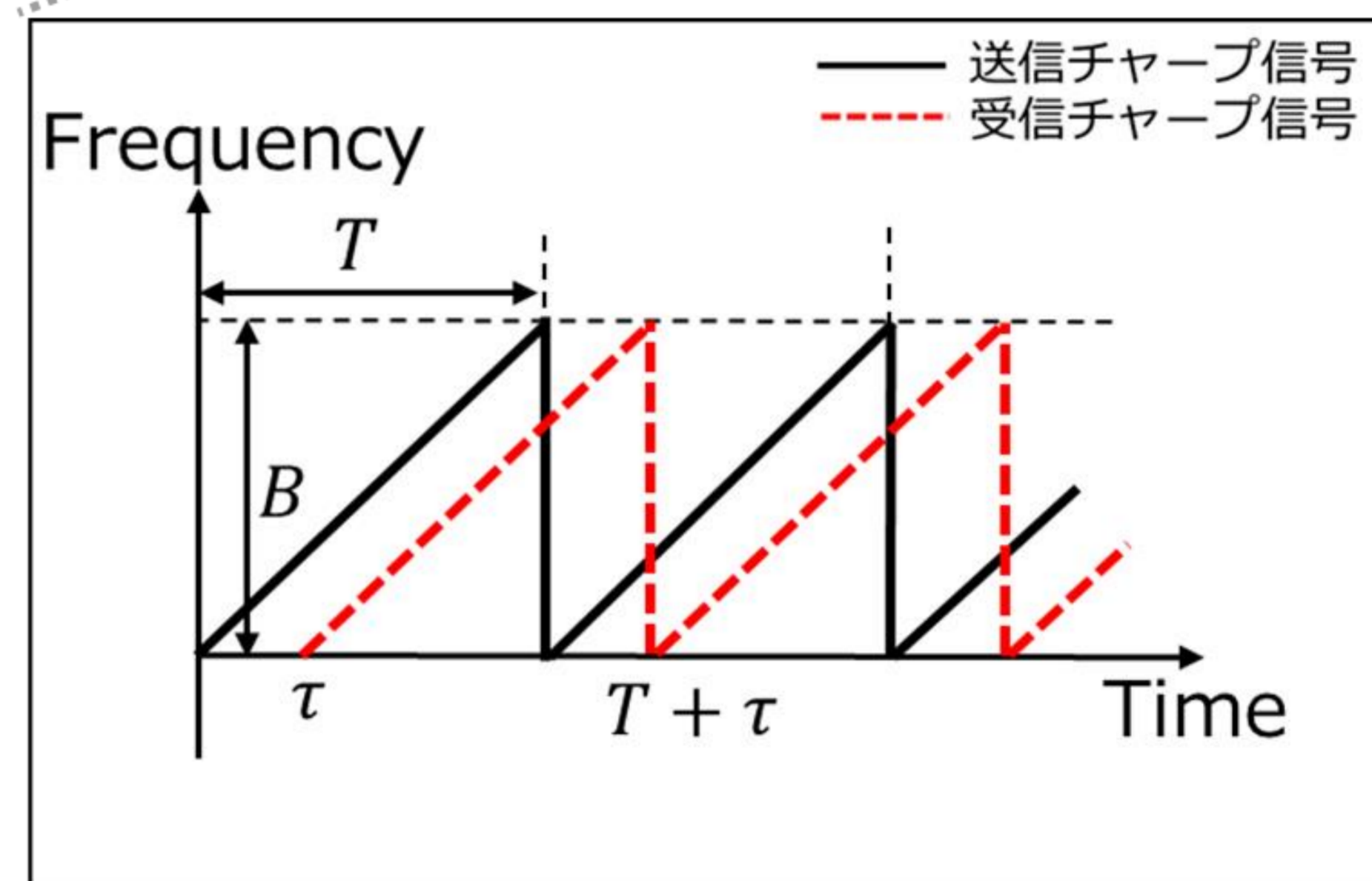
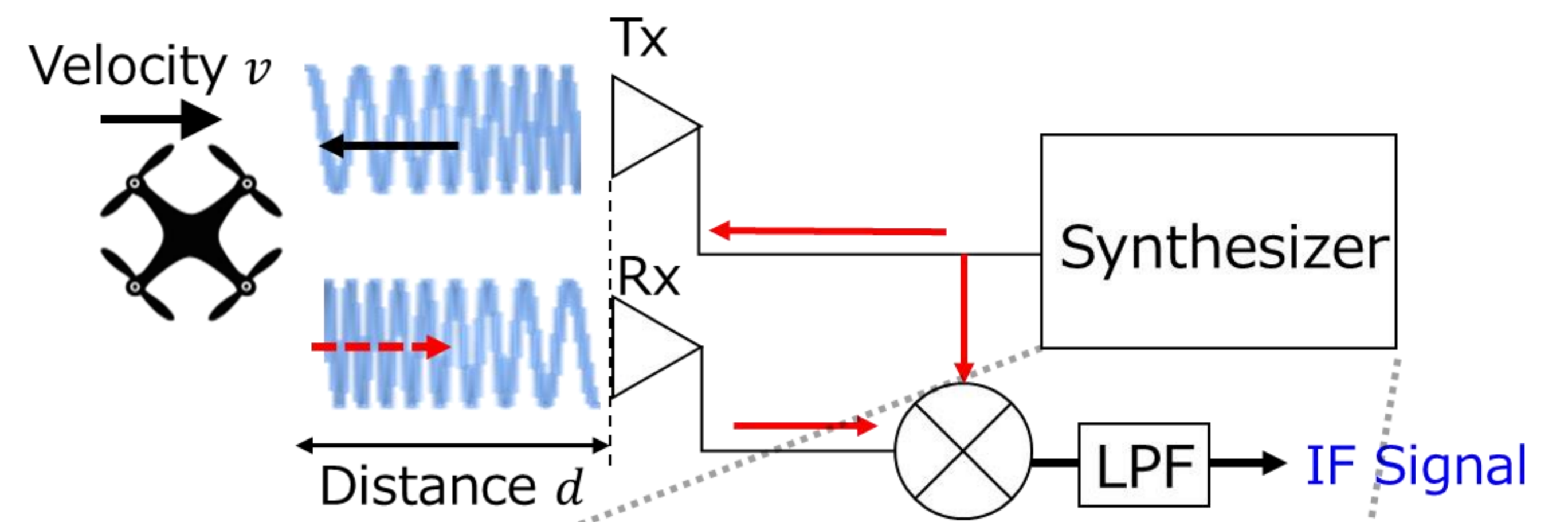
- これまでの検討内容
 - ドローンがレーダに対して水平且つ正面方向に対してのみの反射特性を検討

実際の運用環境では，様々な角度や高度からの反射特性を検討する必要がある

- 今回の検討内容
 - ドローンの**角度や仰角を変えた場合**でもドローンの特徴的な**マイクロドップラ特性**が得られるか
 - **マイクロドップラ特性の解析**を行い，ドローン識別への適用可能性について実験的に検討

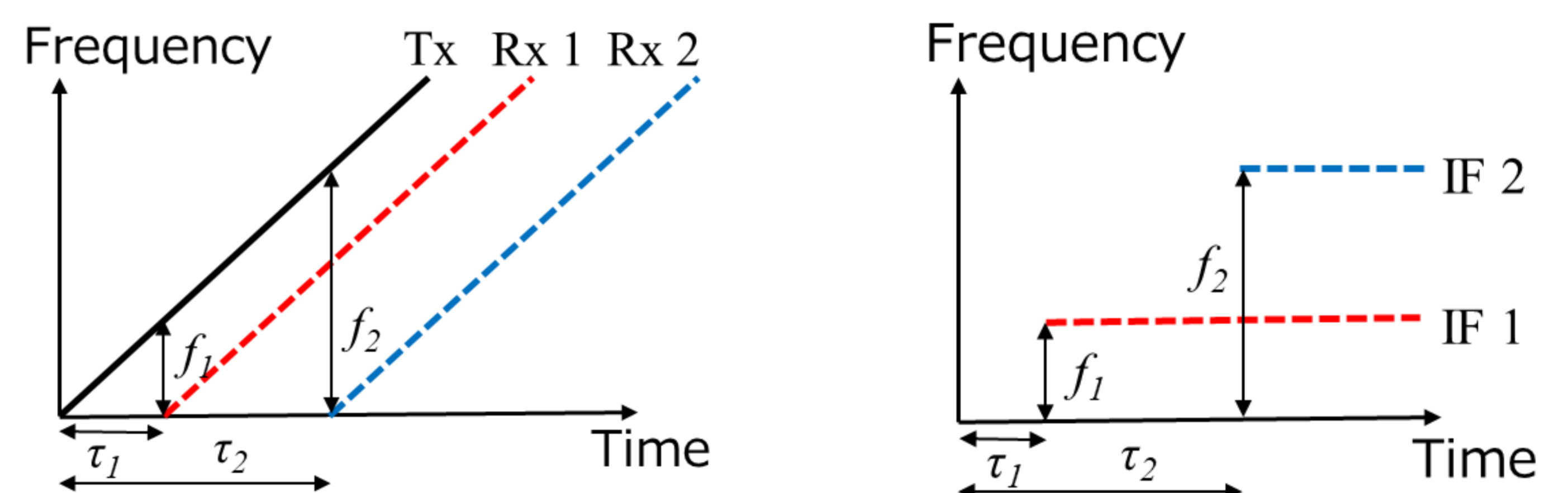
高速チャープ変調(FCM)方式[2]

- 短い周期で周波数を変調した連続波信号を送受信



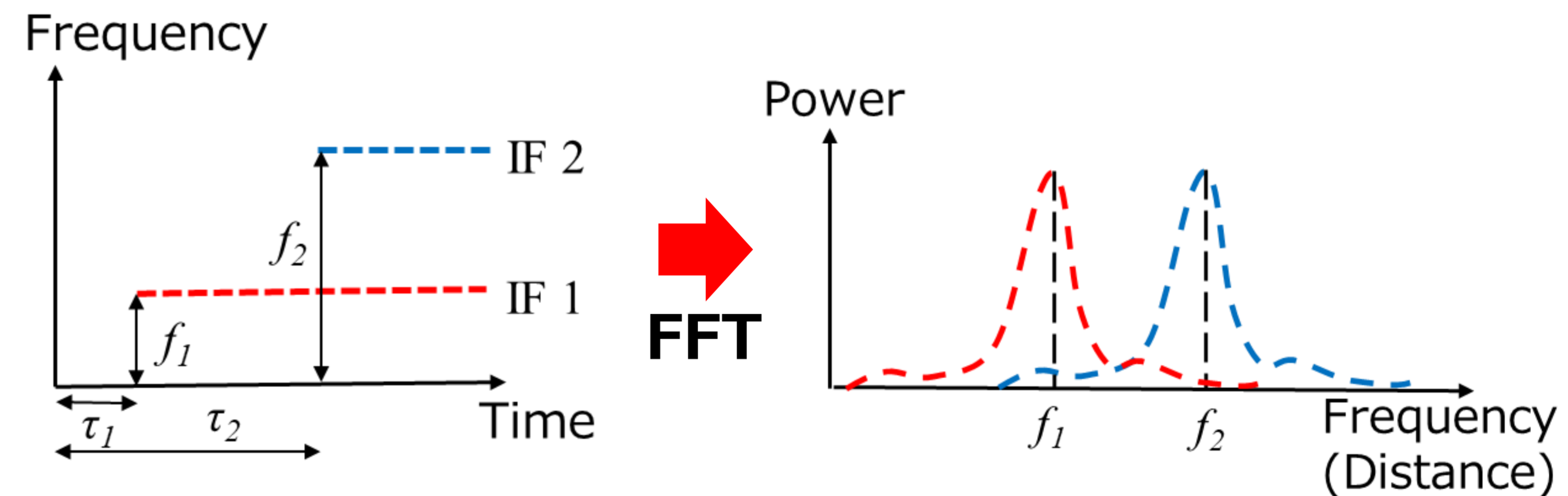
B : 変調帯域幅
T : チャープの送信周期
f : 周波数差
tau : 時間遅延
v : 目標物の相対速度
d : 目標物の距離
Tx : 送信チャープ
Rx : 受信チャープ

FCM方式の構成



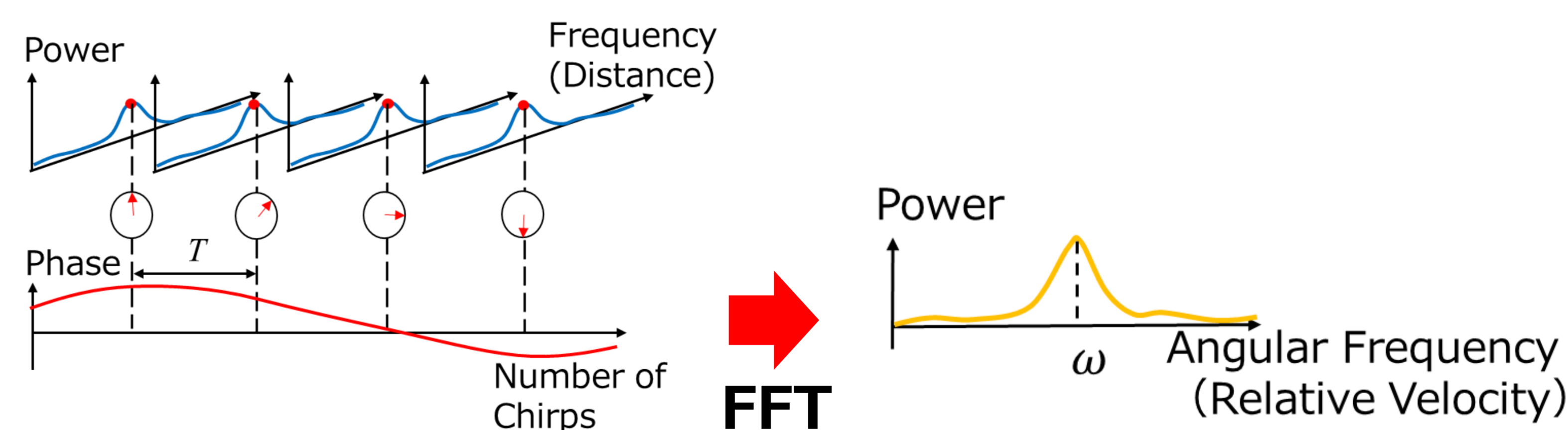
送受信チャープ間の周波数差とIF信号

- IF信号をフーリエ変換し，距離スペクトルを得る



対象の距離dは右式で求められる $d = \frac{cT}{2B} f$

- 距離スペクトルをチャープ方向にフーリエ変換し，速度（ドップラ）スペクトルを得る



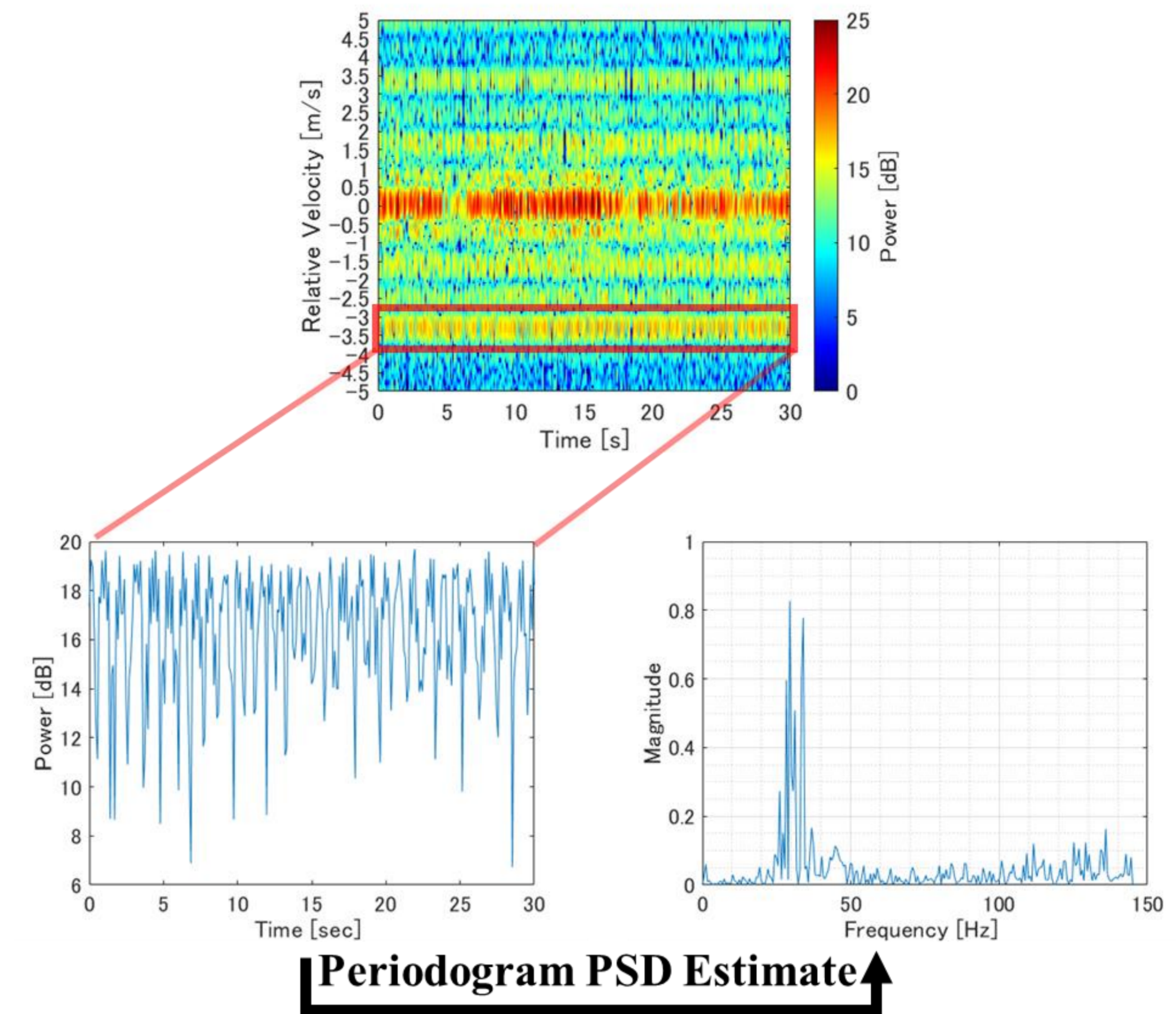
対象の相対速度vは右式で求められる $v = \frac{\lambda}{4\pi T} \omega$

ドローンの反射信号の計測実験

- ① 2種のドローンの**角度**に対する反射特性の測定
レーダに対してドローンを正面から45度まで5度刻みで回転
- ② 2種のドローンの**仰角**に対する反射特性の測定
レーダに対してドローンを15度見上げるように設置

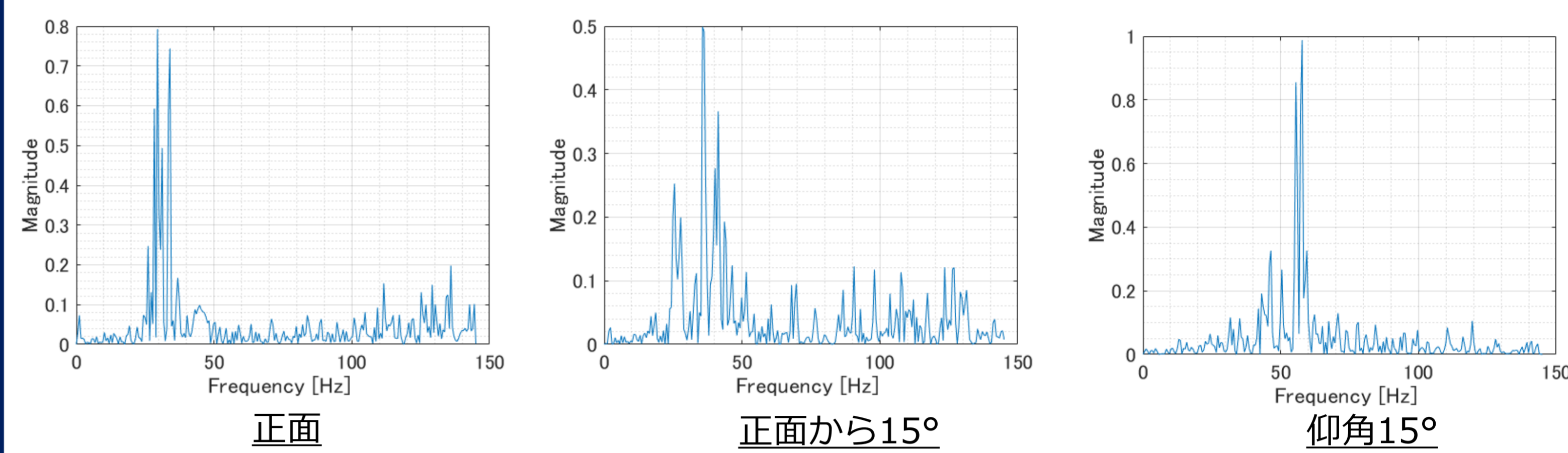
マイクロドップラ特性の解析

- 速度スペクトルの周期的な変動に着目
 - ➔ 周期解析の一つにピリオドグラム法[3]
 - ➔ 周期的な変動のある速度成分について観測時間方向にピリオドグラム法を適用



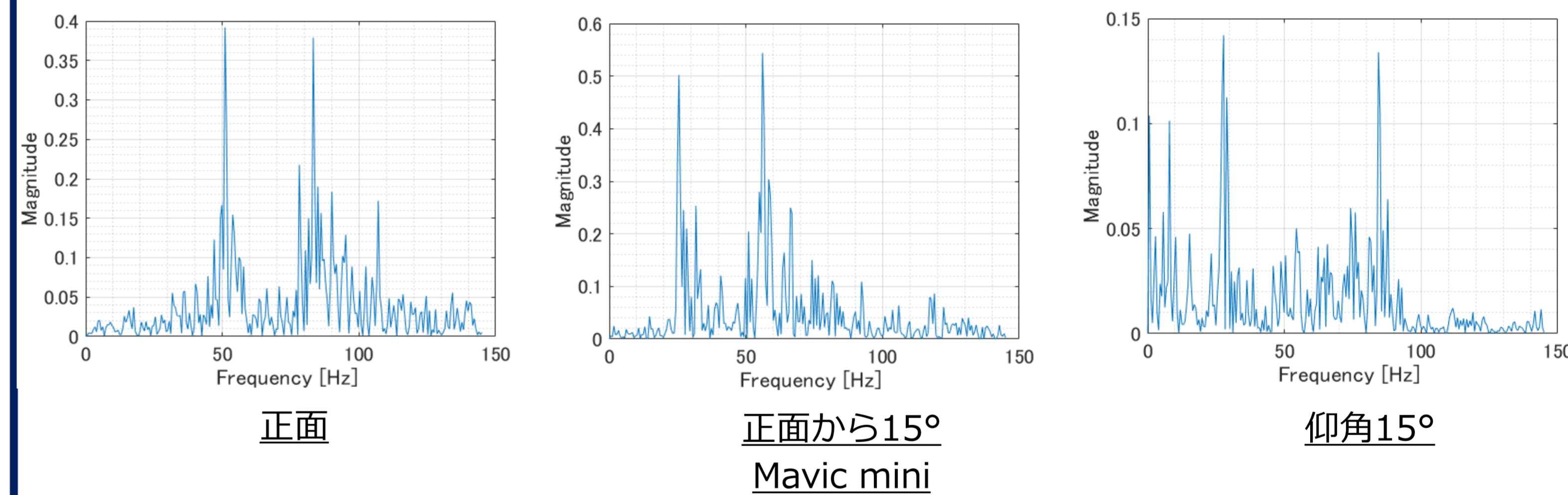
Periodogram PSD Estimate

特徴抽出の一例



- 特定の周波数において1本の強いピークを確認

➔ 角度や仰角を変えてもピークの本数や形状が類似



- 特定の周波数において2本の強いピークを確認

➔ ピークが現れる周波数は異なるものの形状が類似

まとめ

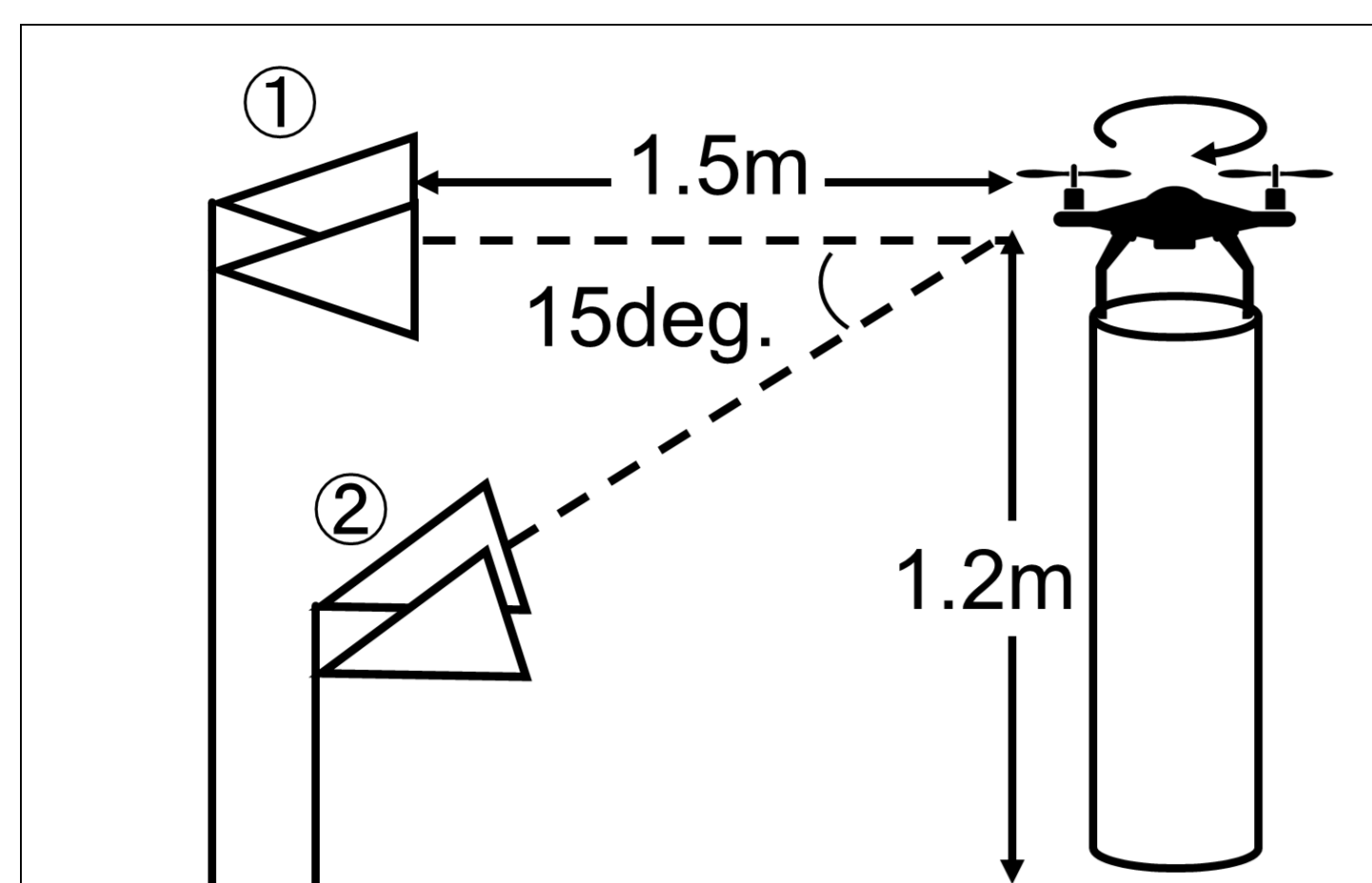
- FCM方式を用いたミリ波レーダによるドローンのマイクロドップラ特性について実験的に検討
- 対象の角度やレーダの仰角が変わってもドローンの特徴的なマイクロドップラが検出可能
- 各機種でマイクロドップラ特性が異なることを確認
- マイクロドップラの解析により速度成分の周期性を確認、各機種でその周期性が異なる

➔ ドローンの識別のための特徴として期待できる

- 今後の課題
 - 飛行中にも同様の特徴を得ることができるか
 - 複数目標の同時検出

参考文献

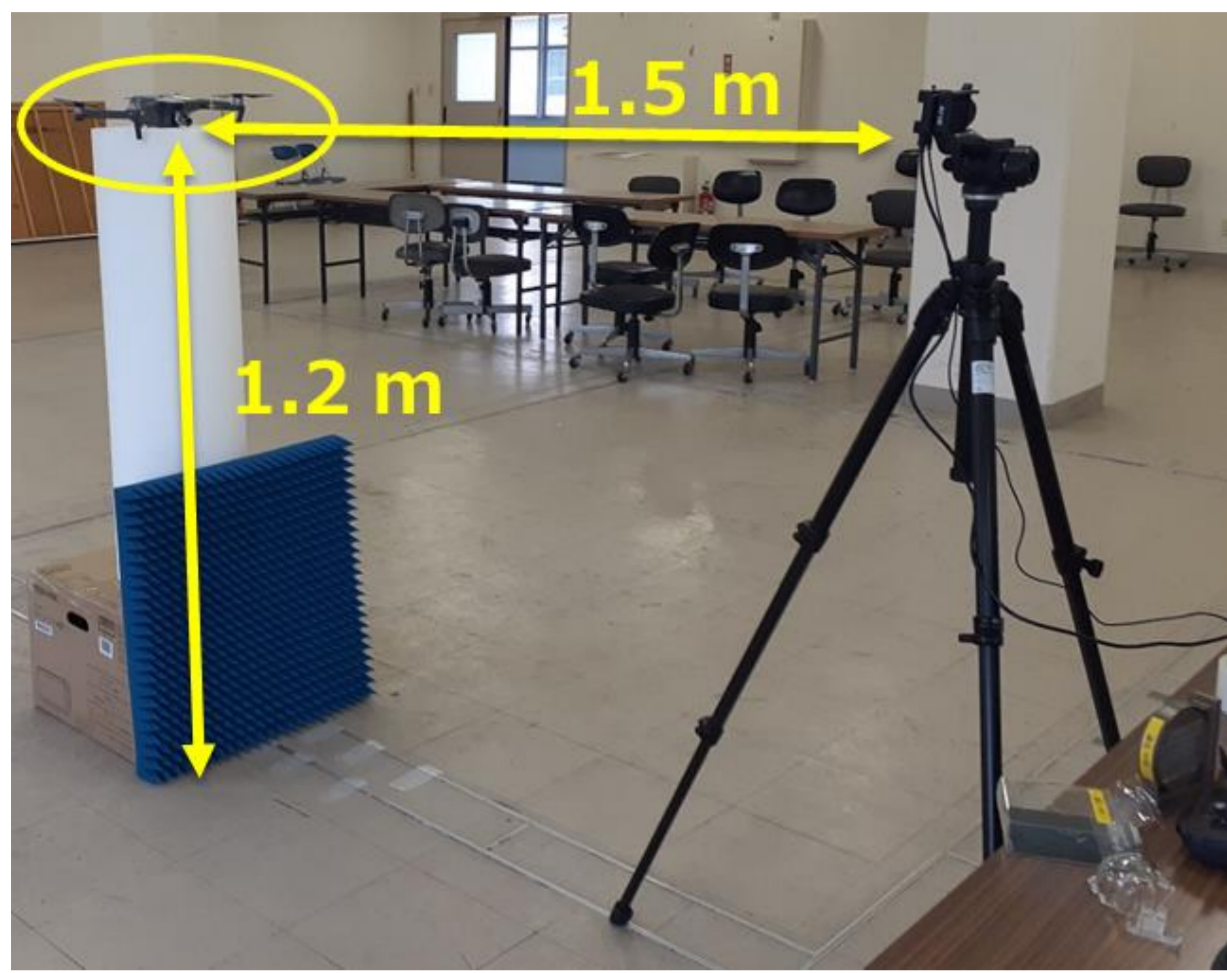
[1] 平山尚幸, 中村僚兵, 葉玉寿弥, “ミリ波高速チャープ変調レーダによるドローン検知の基礎検討,” 信学会東京支部学生会, Mar.2021.
 [2] Cesar Iovescu, Sandeep Rao, “The fundamentals of millimeter wave radar sensors,” Texas Instruments, July.2020.
 [3] 尾崎統, 北川源四郎, “時系列解析の方法,” 朝倉書店, pp.54-47, Sep.1998.



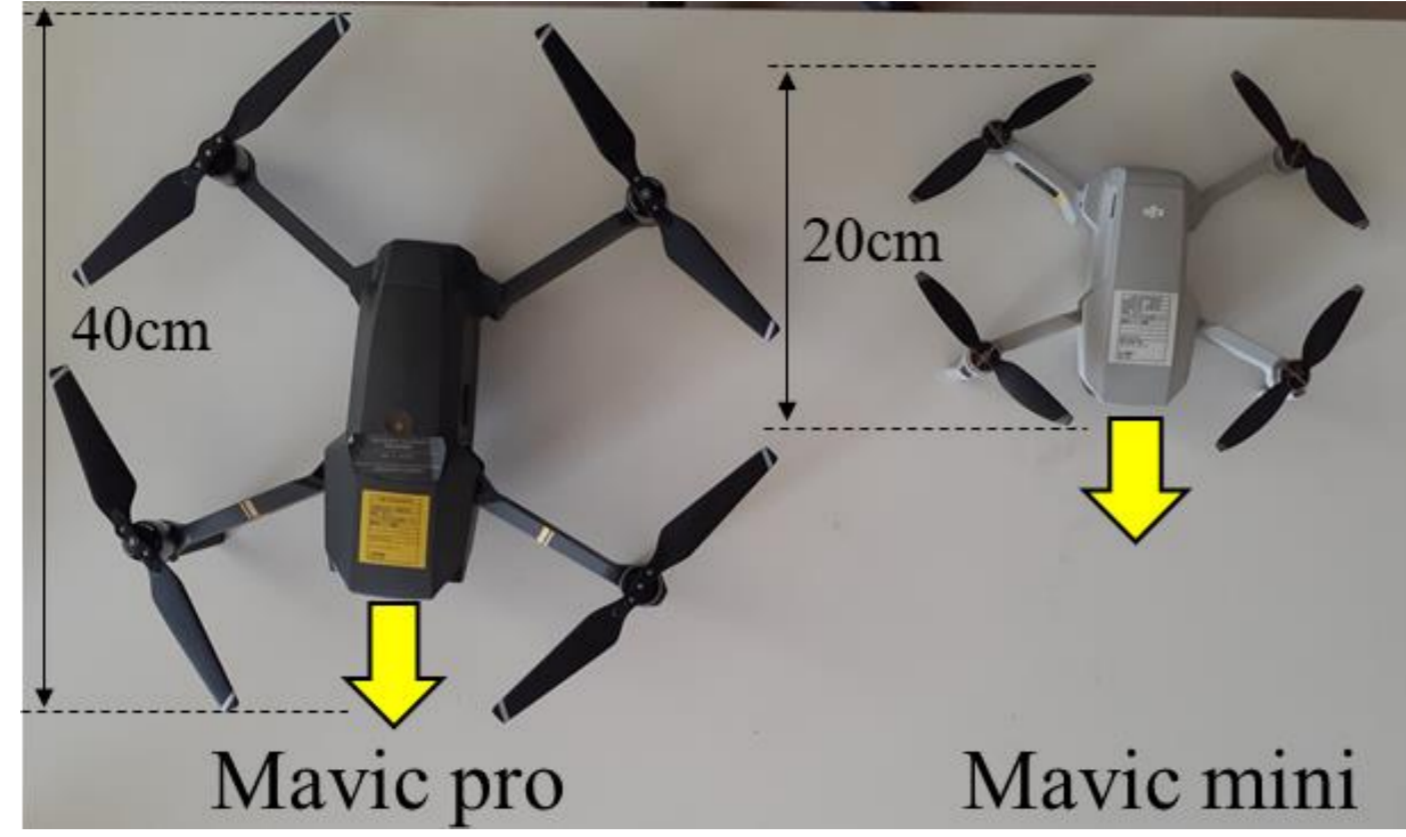
実験諸元

レーダモジュール	IWR1443 (Texas Instruments製)
変調開始周波数	77 GHz
変調帯域幅 B	1.2 GHz
チャープ送信時間 T	0.2 μ s

実験環境



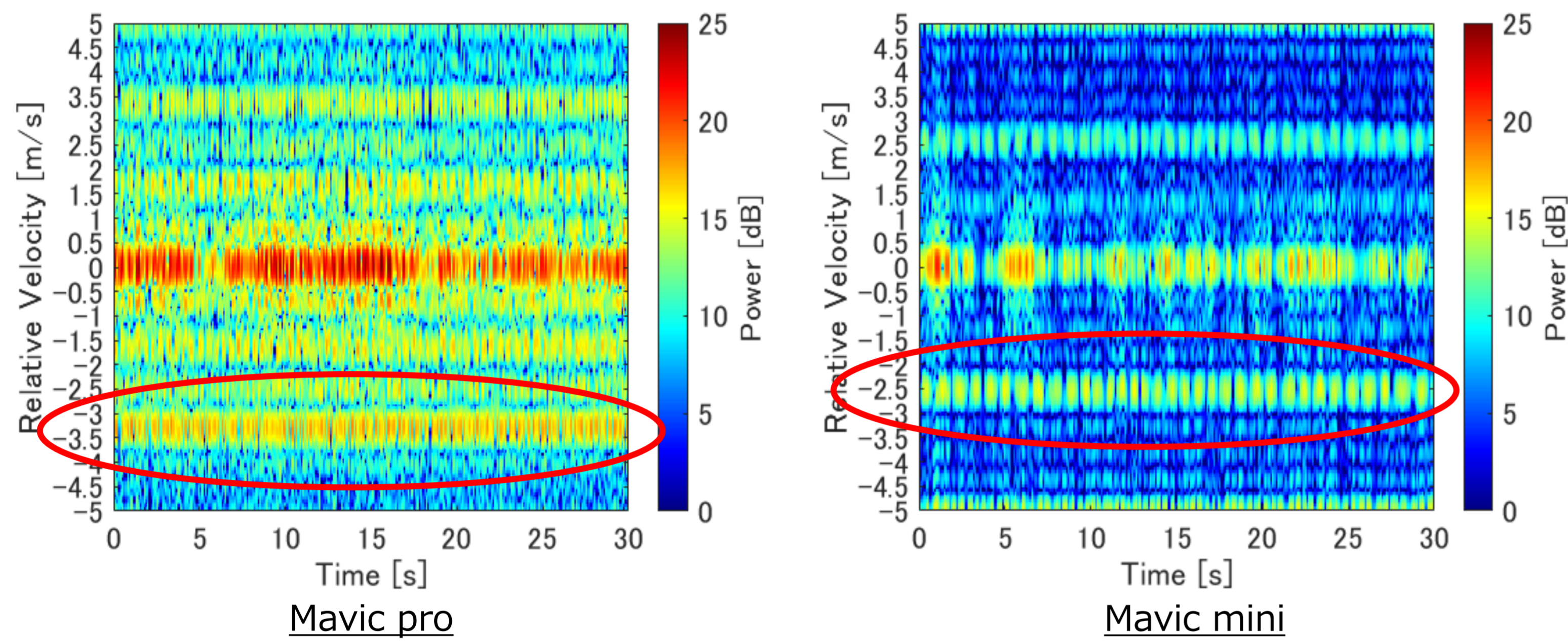
実験風景



使用機種

実験結果

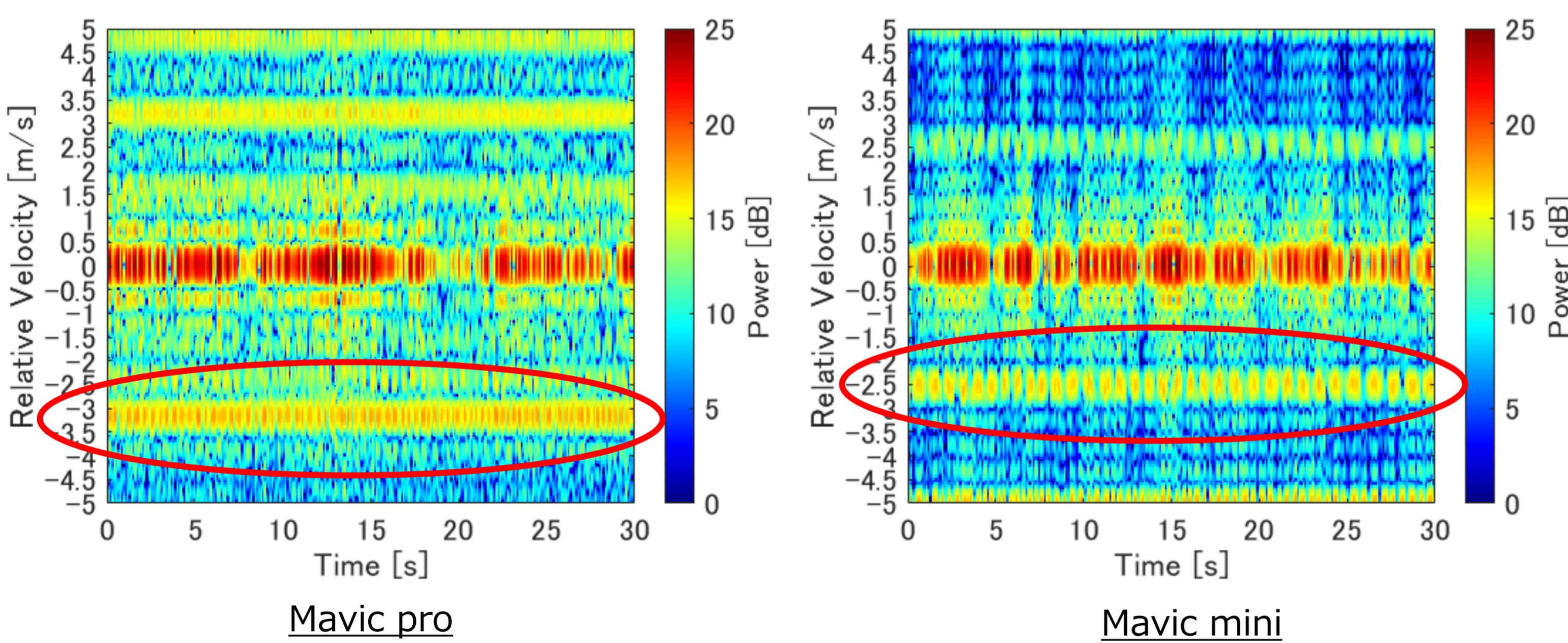
ドローンの水平方向が0°の場合



速度スペクトル (ドローン水平方向: 正面, アンテナ仰角: 0度)

- プロペラによるマイクロドップラが検出
- Mavic proは-3~-3.5m/s付近に強いスペクトル
- Mavic miniは-2.5m/s付近に強いスペクトル

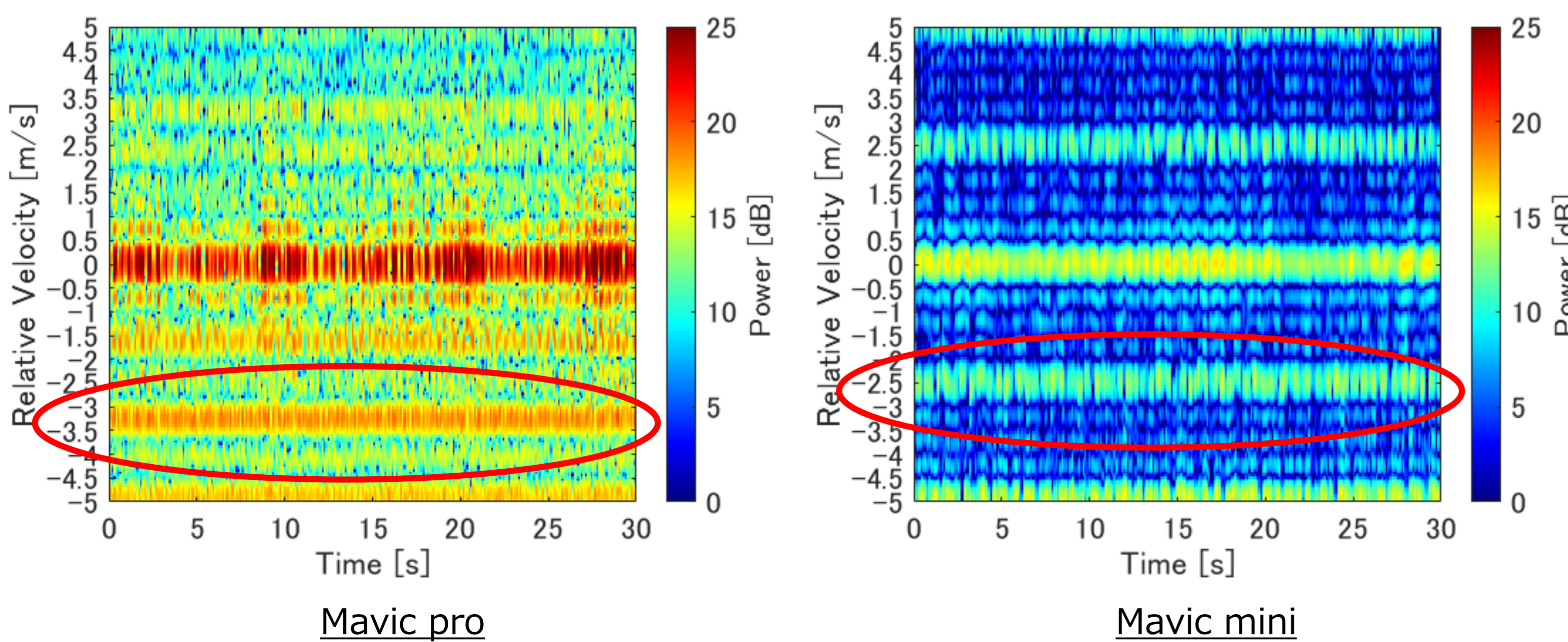
ドローンの水平方向が15°の場合



速度スペクトル (ドローン水平方向: 15度, アンテナ仰角: 0度)

- 水平方向が変化しても同様のマイクロドップラ特性が検出
- 角度に関わらずマイクロドップラの検出が期待

アンテナ仰角が15°の場合



速度スペクトル (ドローン水平方向: 正面, アンテナ仰角: 15度)

- アンテナの仰角が変化しても同様のマイクロドップラ特性が検出
- 各機種で速度成分の分布や変動の周期, 強度が異なる
 - ➔ 対象の識別のための特徴として期待