

低出力ミリ波レーダで広範囲から読み取り可能な コーナーリフレクタ型チップレスRFID

飯塚 達哉^{1,2,a)} 笹谷 拓也^{2,b)} 小阪 尚子^{1,c)} 久田 正樹^{1,d)} 鳴海 紘也^{2,e)} 川原 圭博^{2,f)}

概要: 本稿では, 空中のドローンから視界不良下でも識別できる標識の実現に向けて, 低出力なミリ波レーダを用いて広範囲に読み取るためのコーナーリフレクタ型のチップレス RFID の信号処理手法およびタグ設計技術について述べる. Root-MUSIC を用いた周波数解析および, コーナーリフレクタ形状をアレー状に配置することにより, ドローンの空中の位置変化に対して精度を落とさずにビットを検出する手法を提案している. ミリ波レーダをドローンに搭載し, 屋外にてタグの読み取り実験を行い, タグから 14m 離れた空中に位置するドローンから 8 ビットのタグを読み取れることを確認した.

Corner-Reflector-Based Chipless RFID for Wide Range Readout with Low Power Millimeter Wave Radar

Tatsuya Iizuka^{1,2,a)} Takuya Sasatani^{2,b)} Naoko Kosaka^{1,c)} Masaki Hisada^{1,d)} Koya Narumi^{2,e)}
Yoshihiro Kawahara^{2,f)}

1. はじめに

UAV (Unmanned Aerial Vehicle) およびドローンは, これまで難しかった 3 次元の移動を伴う作業を簡単にし, 物流や農作業, インフラ点検, 環境計測といった様々な領域での活躍が期待される. ドローンがこれらの作業を人の操縦や管理なしに遂行できれば, 点検や監視作業の自動化が進み生産性が飛躍的に上昇する. しかし, 現時点では確固たる安全性を技術的に保証できないことから目視外や夜間の飛行が規制されているように, ドローンが人の手を介さずに作業を行うことは極めて稀であり, ドローンの操作やメンテナンスに要する人的労力は大きい. 自律的なドローンを実現するためには, 荷物の運搬や農薬散布など特定のタ

スクのみならず, 離着陸や保管場所への帰還など, 飛行制御や目的地設定を行えることが必要である. そこで, 空中から読み取れる標識により飛行を援助するシステムは, ドローンの自律制御に有用であると考えられる. ドローン向けの標識には, 例えば航空機の PAPI (Precision Approach Path Indicator) のような着陸地点への誘導, 保管・待機場所への帰還, 飛行経路に関する通知, 農薬散布地点等のランドマークといった活用が考えられる.

ドローンの主な利用場所は屋外であり, 長期間にわたる自律的な運用を前提とすると, 夜間は当然のこと, 雨や霧等の悪天候下でも機能する必要がある. ドローンにはカメラや LiDAR 等のセンサが搭載されている例が多いが, 悪天候下で認識精度が著しく低下するため標識の読み取り用途には適していない. 近年小型化・高分解能化が進んでいるミリ波レーダは, 車間距離の計測用途で自動車に搭載されており, 屋外環境をロボストに把握できるセンサとしての実績がある [1]. 一方で, 電力やペイロード等の制約からドローンに搭載できるミリ波レーダは低出力なものに限定される. そのため, ミリ波による標識を実現する場合, 読み取るために標識に接近することなく広範囲から読み取れる標識であることが望ましい.

¹ 日本電信電話株式会社宇宙環境エネルギー研究所
NTT Space Environment and Energy Laboratories, Tokyo
180-8585, Japan

² 東京大学大学院工学系研究科
Graduate School of Engineering, The University of Tokyo,
Bunkyo, Tokyo 113-8656, Japan

a) tatsuya.iiduka.bm@hco.ntt.co.jp

b) sasatani@akg.t.u-tokyo.ac.jp

c) naoko.kosaka.sn@hco.ntt.co.jp

d) masaki.hisada.kx@hco.ntt.co.jp

e) narumi@akg.t.u-tokyo.ac.jp

f) kawahara@akg.t.u-tokyo.ac.jp

そこで本稿では、図1に示すような、ミリ波レーダを用いて空中からIDを読み取れる標識の実現に向けて、コーナリフレクタ型のチップレスRFIDの設計技術および、広範囲からの読み取りを実現するレーダ信号処理技術の検討を行う。ICチップが含まれていないパッシブなタグから電波を用いてIDを読み取る技術はチップレスRFIDに分類され、これまでも多くの研究が行われてきた[2,3]。レーダをリーダとして用いる際には、SAR(Synthetic Aperture Radar)を応用した空間変調による高解像度なチップレスRFID手法がよく採用される。しかし、SARの場合リーダを搭載しているドローンの長距離移動が必要となるため、電力消費の観点から望ましくない。そこで本稿では、距離方向に散乱特性を変化させ、空中にあるドローンと照射対象を結ぶ対角線方向のスラントレンジからレーダで読み取ることでIDを特定する技術を提案する。スラントレンジ読み取り手法を採用する場合、角度変化により読み取り精度が落ちるという懸念がある。そこで、Root-MUSIC[4]という固有値解析を用いた周波数解析を行うことで、角度変化にロバストなビット検出手法を提案する。また、チップレスRFIDの設計にあたり、広い角度特性をもつコーナリフレクタを要素として採用した。これは、従来の研究でよく用いられているVan-Attaアンテナ型のチップレスRFID[5,6]よりも広い立体角にて高いレーダ散乱断面積(RCS)をもつため、ドローンのような3次元にリーダの位置が変化する場合に適している。本稿では、提案するコーナリフレクタの設計やアレー化による読み取り範囲の広域化技術を述べる。本手法の有効性を評価するために、電波暗室において実験を行い、読み取り性能を評価した。そして、ドローンに搭載して屋外で実験を行い、8ビットの読み取りに成功した。本稿の貢献は以下である。

- スラントレンジレーダによりリーダの動きを要せずに読み取る空間変調のチップレスRFIDの読み取り手法の提案。
- 広い立体角で読み取れるコーナリフレクタ型のチップレスRFID設計技術の提案。
- ペイロードや電力が限られたドローンに低出力なミリ波レーダを搭載し、14mの距離において複数ビットを読み取る実証。

本稿の構成は以下である。まず2章にて、スラントレンジ読み取りの手法を述べる。次に、3章で読み取り角度の変化に強くビット検出を行える信号処理手法について述べる。4章では、コーナリフレクタを用いたタグに空間変調を施す設計手法を述べる。5章にて、提案した手法の検証に向けて、電波暗室内での高精度な測定及びドローンを用いた屋外環境での測定を行った結果を記す。最後に、6章にて、本稿をまとめる。

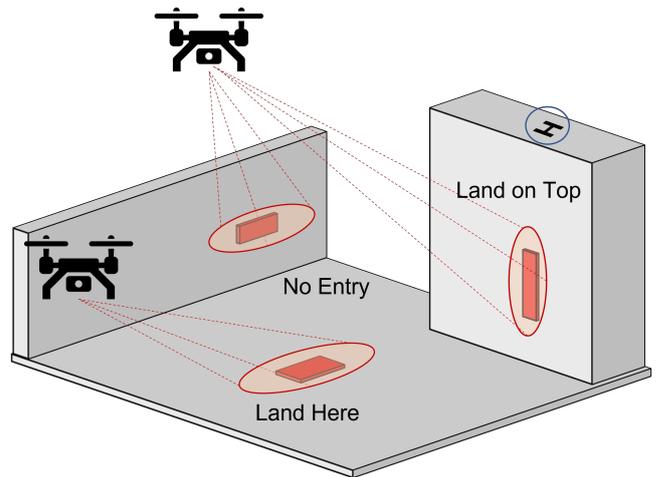


図1 ドローンから読み取る標識の活用例。

2. スラントレンジレーダによる空中からのタグ読み取り

ドローンは少ない電源容量により飛行可能距離や持続時間への厳しい制約を受けながら、所望のタスクを行っていく必要がある。そのため、タグを読み取るにあたり、ドローンに搭載するセンサは軽量かつ低出力でありながら、遠方に配置されているタグを認識する必要がある。そこで、スラントレンジからの読み取りによるチップレスRFIDタグのIDを検出する手法を提案する。スラントレンジからのレーダ読み取り技術は人工衛星に活用されており、グラウンド方向の散乱分布を得ることができる。ドローンが標識より高くに位置する場合に、スラントレンジレーダは有効となる。本章では、本手法の特徴および信号解析モデルを示し、従来のFFTを用いた解析では角度変化に弱い理由を説明する。

2.1 スラントレンジ読み取りのメリット

スラントレンジレーダは、空中に位置するドローンからタグが配置されている斜め下方向に向かってレーダを照射し、地面上の散乱分布を測定する技術である。タグの読み取りにスラントレンジレーダを活用する利点は複数ある。1つ目の利点として、SARを用いないためリーダに移動を必要とせず、一点からの計測値のみでIDを読み取れる。SARを適用するにはレーダとタグが相対的に位置変化する必要があるが[7-9]、電力等のリソースが限られているドローンにおいては、標識を読み取るための移動による電力消費量を少なくしたい。2つ目の利点として、SN比の高いタグを作成しやすい点がある。タグに後方散乱する素子の配置の有無によりビットを判定する時、平面部分を設ければ鏡面反射の原理により後方散乱RCSは非常に小さくなり、高いSN比を実現できる。また、ビルの壁や地面の後方散乱RCS積は一般的に弱いといった性質があるため、実環境においても背景ノイズのレベルは低

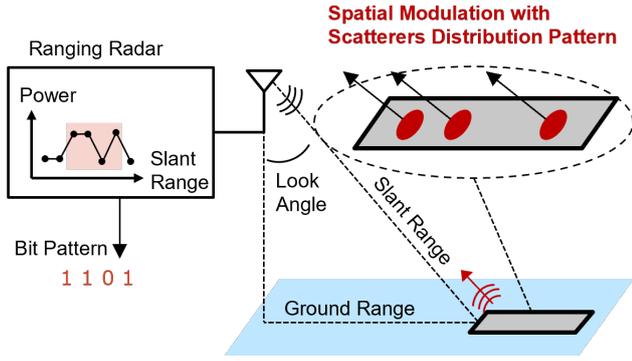


図 2 空間変調されたチップレス RFID をスラントレンジレーダにより読み取るシステムの構成図. タグ上に配置された電波散乱特性の空間分布を読み取ることで ID 認識を実現する.

く抑えられる. 3つ目の利点として, 汎用的なレーダデバイスにより本手法を実現できる点にある. ミリ波 FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) レーダ等, 軽量で低消費電力なレーダデバイスはリソースの限られたドローンにも搭載しやすく, 実際に多くの活用事例が期待されている [10, 11]. 搭載するセンサは標識を読み取るのみならず, 周囲の環境把握にも利用できるためドローンへの追加コストを下げやすい.

一方で, スラントレンジ読み取りの欠点として, 小型レーダで高い角度分解能を実現することが難しいため, 正対するタグには利用できないという点にある. しかし, ドローンは位置を制御できる上に, 図 1 に示すように, 地面や壁への設置を想定する場合, 移動するドローンは多くの場合スラントレンジ方向から侵入した後に, タグの正対位置に移動する. そのため, 読み取れない正面の位置に移動する前に, 読み取れる領域を通過している可能性が高い. このような特徴から, スラントレンジレーダによる標識の読み取りが有効であると考えられる.

2.2 受信信号のモデル

図 2 に示すように, 読み取り角度 θ からタグをレーダにより読み取ることを想定するときの受信信号のモデルを考える. ここでは帯域幅 B , 時間幅 T の FMCW チャープ信号を用いるとし, タグに対して斜め方向に電波を放射する. 本研究では, 多くの研究において採用されているように [3], タグの対応する位置の散乱体の有無でビット '1' および '0' を表現し, k ビット目と l ビット目のタグ内での距離差は $(k-l) \cdot d_{sc}$ となるように配置する.

タグまでの距離 R_s , 読み取り角度 θ , ビットパターン b_n ($1 \leq n \leq N$), 散乱体間距離 d_{sc} を用いた時間領域のビット信号 $s(t)$ は以下のようにモデル化される.

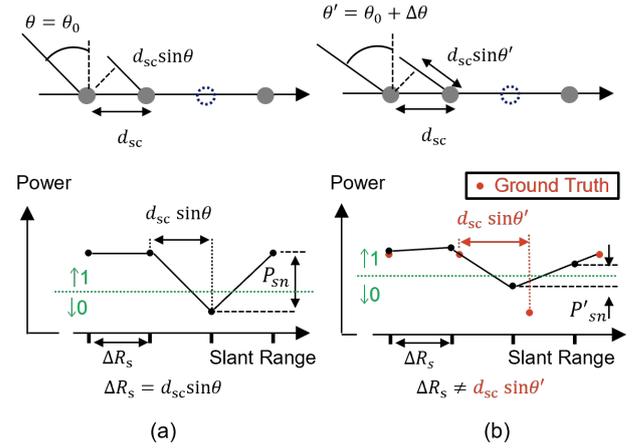


図 3 FFT を周波数解析として用いたときの, 読み取り角度と解析結果の関係を示した図. (a) 高い SN 比で正しくビットパターンを読み取れる状況. (b) 読み取り角度の変化により, SN 比が低下し, ビットの認識精度が低下している状況.

$$s(t) = \sum_{n=1}^N b_n \cdot c_n \cdot e^{j2\pi(f_s + n f_{sc})t} + w(t), \quad (1)$$

$$f_{sc} = \frac{1}{T} \cdot \frac{d_{sc}}{R_{res}} \sin \theta, \quad (2)$$

$$f_s = \frac{1}{T} \cdot \frac{R_s}{R_{res}} \sin \theta. \quad (3)$$

ここで, c_n は n 番目の散乱体からの反射信号に対応する複素振幅, $R_{res} = c/2B$ は FMCW レーダの距離分解能, $w(t)$ はノイズ信号である. 本手法の目的は, 読み取り角度 θ が様々な値をとっても, $s(t)$ 及び N を与えられた時に高精度に b_n および R_{res} を推定することである.

2.3 ビット読み取りの難しさ

FFT (Fast Fourier Transform) は軽量でロバストな周波数解析手法であり, FMCW レーダにおける散乱体の反射電力の距離分布を求める際によく用いられる. この処理を Range FFT と呼び, 受信信号 $s(t)$ のパワースペクトルは以下のように求められる.

$$s(t) = \sum_{n=1}^N c_n \cdot e^{j2\pi n f_0 t}, \quad (4)$$

$$f_0 = \frac{1}{T}. \quad (5)$$

しかし, 散乱体間距離 d_{sc} が距離分解能 R_{res} と同程度であるとき, 読み取り角度の変化による散乱体経路差のわずかな変化から, Range FFT では精度が落ち得る. 式 (4) から分かるように FFT では求める周波数基底が固定である一方, 式 (2) によると読み取り角度の変化により f_{sc} は変化する. Range FFT の距離分解能と散乱体間の経路差が一致しているとき, $f_{sc} = f_0$, つまり $d_{sc} \cdot \sin \theta / R_{res} = 1$ となるときには, 精度高く解析できる. しかし, 読み取り角度 θ が変化すると, 両者の値が一致せず精度が落ちる. この状況を図 3 に示す. ビットを正確かつ確実に読み出す

ためには、図3のSN比 P_{sn} が重要な指標となる。ある角度で正常に読み取れるように設計されていても、角度が変わると P_{sn} の値が小さくなり、読み取り精度が低下してしまう。

3. 読み取り角度にロバストなビット検出手法

前節で記したように、距離方向に密にCRタグが埋め込まれているとき、散乱体の経路差が変化するために受信信号を構成する周波数差も変化するため、周波数基底を固定するFFTではビット検出精度が低下してしまう。そこで、Root-MUSICを用いた固有値解析により、受信信号を構成する周波数基底を求めることで、角度によって変化する周波数基底に対してもロバストにビットを検出することができる。

Root-MUSIC法の手続きおよび原理を述べる。まず、受信信号の自己相関行列 R の固有空間解析を行い、信号を構成する周波数成分を求める。自己相関行列 R のサイズ M と散乱体の可能な最大数 P が決まれば、以下のように R の固有値分解により $(M - P)$ 次数の多項式 $Q(z)$ を得られる。

$$Q(z) = \sum_{k=P+1}^M p^H(z^{-1})v_k v_k^H p(z) = 0, \quad (6)$$

ここで、 v_k は R の k 番目の固有ベクトル、 $p(z)$ はモードベクトルであり、 $p(z) = [1, z, z^2, \dots, z^{M-1}]^t$ として表される。根は z_m ($1 \leq m \leq M - P$) は $Q(z) = 0$ を解くことにより得られる。 z_m は複素数値であり、次のように表される。

$$z_m = e^{h_m \Delta t + j2\pi f_m \Delta t}, \quad (7)$$

ここで、 h_m は振幅の変化率、 f_m は周波数である。各周波数成分に対応する複素振幅は、 $s(t)$ を用いて最小二乗法で求める。次に、得られた周波数と複素振幅は、それぞれ $r_m = f_m \cdot cT/2B$ として距離に、 $P_m = |c_m|^2$ として信号電力に変換することができる。レーダ方向に強く反射する散乱体をタグ上に配置すると、各散乱体の位置に対応する根 (Root) が求まり、ビット情報として読み取ることができる。また、得られた根の精度は、周波数成分のわずかな変化の影響を受けにくいいため、読み取り角度の変動に強いビット検出を実現できる。

4. コーナーリフレクタ型のタグ設計

本手法の検討にあたり、空間変調のチップレスRFIDタグを構成する要素としてコーナーリフレクタ (CR) 構造を採用した。CRは3つの垂直に接続された反射板で構成されており、再帰性反射の原理により、幅広い角度にて高いRCSを有する [5,6]。高いRCSを保有する構造として、同じく再帰性反射の原理を活用したVan-Attaアレーアン

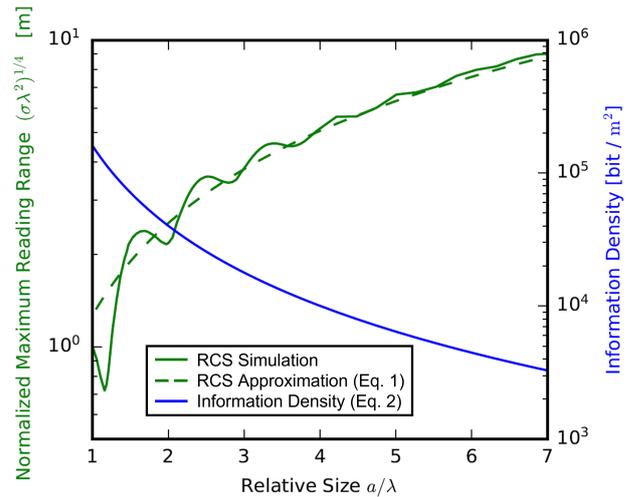


図4 CR 一辺の長さ a を変化させたときの最大読み取り距離 (緑) および情報密度 (青)。

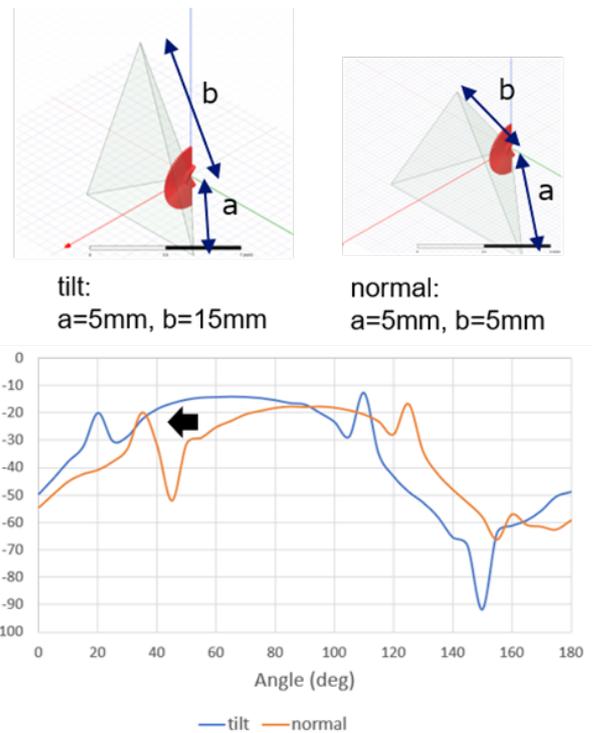


図5 CRの辺長の比率を変化させたときの角度特性の変化。

テナを用いたチップレスRFIDのタグ構造がこれまでによく提案されている [1,3,12]。しかし、Van-Attaアレー構造を含む平面内では再帰性反射を有し広い角度にて高いRCSを誇るが、それに垂直な平面におけるRCSの角度特性は低い。ドローンのような3次元位置に自由度を持つリーダからの読み取りを想定した場合、ロール、ピッチ、ヨー方向の全ての回転角に関して広い角度にて高いRCSを有するCRの構造が適していると考えられる。本稿では、屋外の検知に向けてCR構造を配置した構造のタグを設計・作成し、提案手法の評価に利用した。

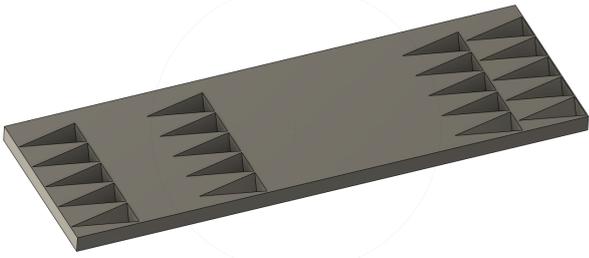


図 6 設計したビット ‘101000101’ を表現する CR アレータグの外観。横方向に複数の CR が配列されていることで RCS を増加させる。

4.1 レーダ散乱断面積

CR の RCS σ は、CR 一辺の長さを a 、照射する電波の波長を λ として、 $a \gg \lambda$ のとき、以下の近似式で表せる。

$$\sigma \approx 4\pi a^4 / 3\lambda^2. \quad (8)$$

レーダにより物体を検知できる最大の距離 R_{\max} はレーダ方程式より求められ、CR 一辺の長さが与えられたときに下記の式で表せる。

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 S_{\min}} \right]^{1/4} \approx a \left[\frac{P_t G^2}{48\pi^2 S_{\min}} \right]^{1/4}. \quad (9)$$

ここで、 P_t はレーダ送信出力、 G はレーダのアンテナゲイン、 S_{\min} はレーダにより検知できる最小の電力である。 R_{\max} は a に比例して大きくなるのが分かる。

4.2 共振現象を考慮した CR のサイズの下限

CR の一辺のサイズが小さいほど、情報密度（単位面積あたりのビット数）は高まり、またタグ内に配置するときにもタグの厚みが小さくなるというメリットがある。一方で、波長程度に小さくなると開口面積の減少や共振現象の影響により、式 8 で表現される高い RCS は得られない。

そこで、CR のサイズの下限を求めるため、3次元電磁界シミュレータの Ansys HFSS を用いて一辺のサイズに対する RCS を求め、式 8 との比較を行った結果を図 4 に示す。 $a/\lambda > 4$ の範囲では近似式と解析値がよく一致していることが分かり、チップレス RFID タグを CR 一辺の長さ a から設計すれば良いことが分かる。

4.3 角度特性の設計

スラントレンジからの読み取り角度を広くするために、より浅い角度から読み取れるようにタグを設計することが望ましい。3面の垂直構造を保ったまま、図 4 のように辺長を変化させることで角度特性を変化できるため、想定する読み取り位置から設計を変更できる。本検討では、最も浅い読み取り角度 θ_w を 60° とするため、図 5 における辺長 a, b の比率を $b = 3a$ として設計した。

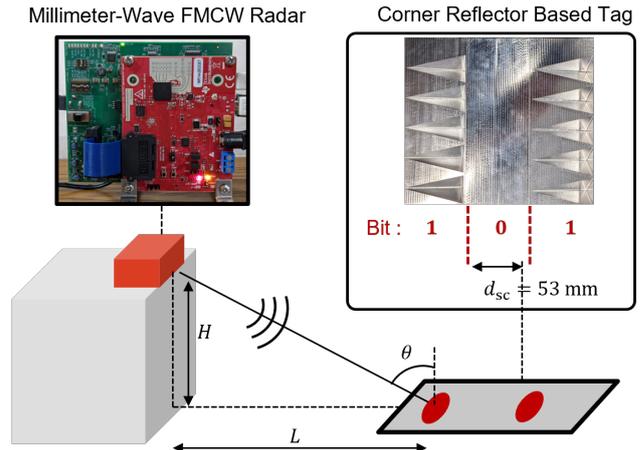


図 7 ミリ波レーダとコーナリフレクタ型のタグを用いた読み取り実験の概要図。

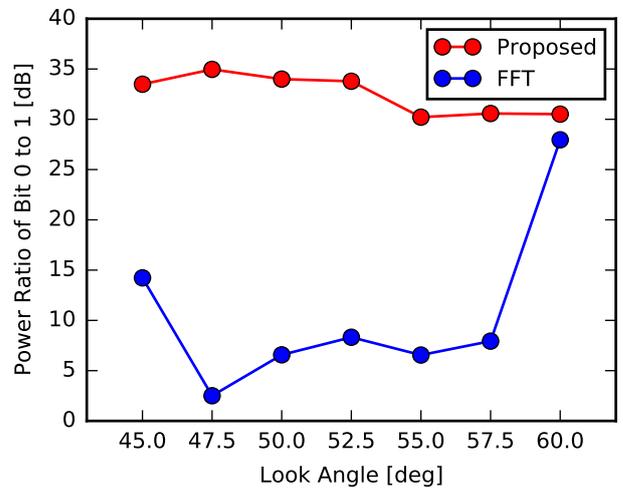


図 8 様々な角度におけるビット ‘0’ と ‘1’ の受信電力比の比較。

4.4 作成した CR アレータグ

4.2 節で述べたように、CR の変調は波長の 4 倍程度まで小さくすることができる。一方で、小さい CR を遠方のミリ波レーダより検知することは難しい。そこで、アレー化により、RCS を高めることで読み取り範囲を広域化させることができる。CR アレータグの設計の外観を図 6 に示す。この構造により広い立体角および長距離から読み取れる。

5. 実験による評価

5.1 電波暗室での測定による角度変化耐性の評価

提案手法の角度変化耐性を検証するために、電波暗室においてコーナリフレクタを用いたタグの実験を行った。実験の構成を図 7 に示す。FMCW レーダは高さ $H = 860$ mm の台の上に固定されている。各実験では、搬送波周波数 $f_c = 79$ GHz、チャープ帯域幅 $B = 4.0$ GHz であり、距離分解能 R_{res} は 37.5 mm に相当する。タグ内の散乱体の間隔は d_{sc} は 53 mm となるようにすることで、 $d_{\text{sc}} = R_{\text{res}} / \sin \theta_0$ となり、 $\theta_0 = 45 \text{ deg}$ のときにスラントレンジ方向の距離

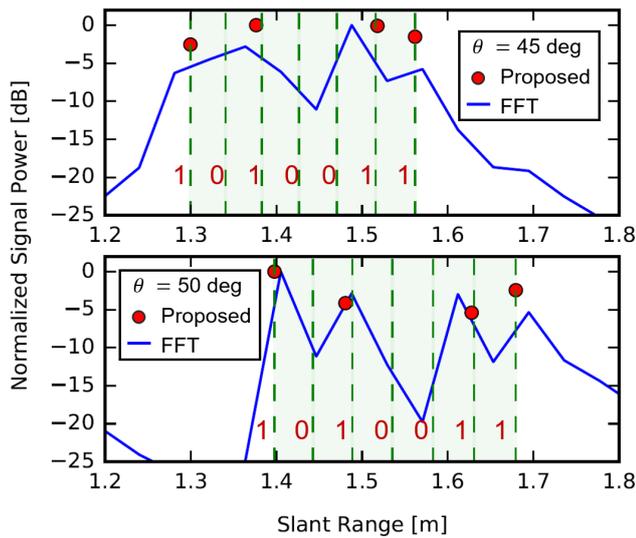


図 9 ビットパターン '1010011' のタグの 45° と 50° における読み取り結果.

差がレーダの距離分解能と等しくなる。タグは台底部から水平方向に距離 L だけ離れた位置に配置し、 L は所望の角度 θ が得られるように設定する。

θ を 45° から 60° の範囲で 2.5° 間隔で変化させ、測定を行った。図 3 に記載されている P_{sn} を角度変化耐性の指標として用い、ビットパターンは '101' とした。 P_{sn} は、ビット '0' とビット '1' の受信電力の比で求める。ここで、ビット '1' はビット '0' の前後に 2 つ存在するため、今回は受信電力の弱いビット '1' との電力比より、 P_{sn} を求めた。また、提案手法ではビット '0' に相当する根を見つけられないため、ビット '0' に相当する周波数の波と受信信号の相関値を振幅として受信電力を算出した。図 8 に様々な角度における提案手法と FFT による手法の電力比 P_{sn} を示す。従来の FFT では、いくつかの角度で P_{sn} が著しく低下しているのに対し、提案手法は全ての角度にて高い SN 比を維持していることが分かる。

次に、複数ビットパターンの読み取り能力の検証のため、7 ビットのタグを配置し、 $\theta = 45^\circ$ および 50° にて測定を行った。結果を図 9 に示す。図中の緑のドット線は提案手法により検知された散乱体の最初と最後の位置およびビット長 7 の情報をもとに推定された散乱体の位置を表す。提案手法はビット '1' の位置を高精度に検知できていることが分かる。FFT では $\theta = 45^\circ$ にていくつかのビットの推定が失敗しているのに対して、提案手法では両方の角度にて成功していることが分かる。

5.2 ドローンを用いた評価実験

最後に、実際にドローンを用いて空中からのタグの読み取り性能の検証を行うため、TI のミリ波レーダ [13] をドローンに搭載し実験を行った。実験は砂地のグラウンドで実施し、タグを発泡スチロール製の円柱に埋め込むんで設

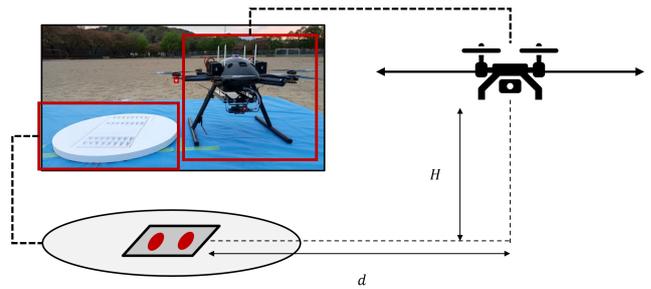


図 10 ドローンによるタグ読み取りの屋外実験の様子。作成したドローンおよびタグを用いて砂地のグラウンドにて測定を行った。

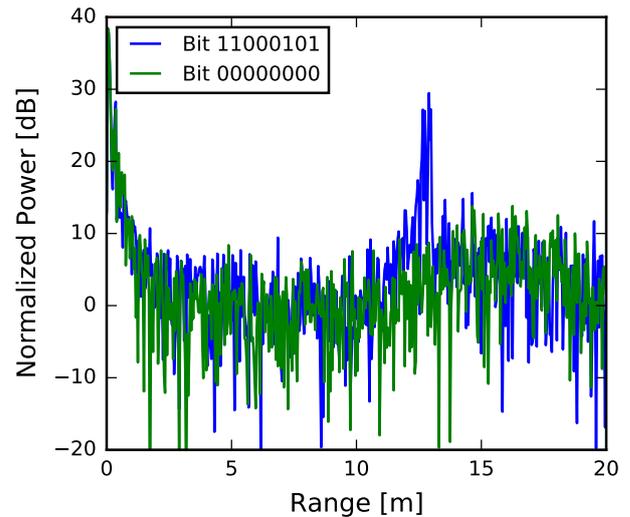


図 11 空中のドローンからのレーダ計測の結果。同一地点のドローンより、2 パターンのタグ配置に対して計測した結果を示している。

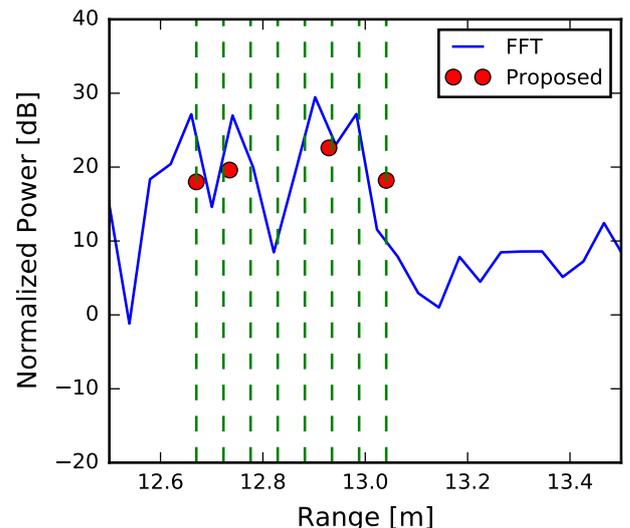


図 12 ドローンからのミリ波レーダ計測値の周波数解析した結果。ビットパターンは '11000101' であり、提案手法によりビットを推定していることが分かる。

置した。ドローンによる計測実験の概要を図 10 に示す。

高さ $H = 10\text{ m}$ 、水平距離 $d = 10\text{ m}$ の地点よりドローンが

タグへ向けてレーダを照射したときの測定データを図 11 に示す。図に示すタグのビットパターンは'11000101' および '00000000' である。ここで、パターン '00000000' は鏡面反射によりほとんどドローン方向へ後方散乱しないことから、背景ノイズとして捉えることができる。14m 付近で電力レベルが 5dB ほど増加しているが、これは砂地の地面の後方散乱によるものだと考えられる。一方で、パターン '11000101' は、14m 付近で電力レベルが急峻に上昇している。これは、まさしくコーナーリフレクタ型チップレス RFID の反射によるものであり、背景ノイズより十分高い反射を起こしていることが分かる。ピークの付近を拡大し、ビット推定を試みた結果を図 12 に示す。図 9 と同様に、従来の FFT では正確なビットパターンの識別は難しいが、提案手法を用いることで、ビットを高精度に検出できていることが分かる。これにより空中のドローンから 14m 離れた地上に設置してある 8 ビットのタグを読み取れることを実証した。

6. おわりに

本稿では、ドローンから認識可能な空中標識の実現に向けて、ミリ波レーダを用いたスラントレンジのレーダ読み取り手法および、コーナーリフレクタ型のチップレス RFID 構造の提案を行った。読み取り角度にロバストに検出できる信号処理手法として Root-MUSIC を用いた手法を提案し、実験により高精度な認識が可能であることを確認した。また、ドローンにミリ波レーダを搭載し、14m の距離から識別可能であることを確認した。

参考文献

- [1] Soltanaghaei, E., Prabhakara, A., Balanuta, A., Anderson, M., Rabaey, J. M., Kumar, S. and Rowe, A.: Millimetro: MmWave retro-reflective tags for accurate, long range localization, *Proceedings of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MOBICOM*, pp. 69–82 (online), DOI: 10.1145/3447993.3448627 (2021).
- [2] Vena, A., Perret, E. and Tedjini, S.: Chipless RFID tag using hybrid coding technique, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 59, pp. 3356–3364 (online), DOI: 10.1109/TMTT.2011.2171001 (2011).
- [3] Nolan, J., Qian, K. and Zhang, X.: RoS: Passive smart surface for roadside-to-vehicle communication, *SIGCOMM 2021 - Proceedings of the ACM SIGCOMM 2021 Conference*, pp. 165–178 (online), DOI: 10.1145/3452296.3472896 (2021).
- [4] Rao, B. D. and Hari, K. S.: Performance analysis of root-MUSIC, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. 37, No. 12, pp. 1939–1949 (1989).
- [5] Lazaro, A., Lorenzo, J., Villarino, R. and Girbau, D.: Modulated corner reflector using frequency selective surfaces for FMCW radar applications, *European Microwave Week 2015: "Freedom Through Microwaves"*, *EuMW 2015 - Conference Proceedings; 2015 45th European Microwave Conference Proceedings, EuMC*, pp. 111–114 (online), DOI: 10.1109/EuMC.2015.7345712 (2015).
- [6] Brinker, K. R. and Zoughi, R.: Corner Reflector Based Misalignment-Tolerant Chipless RFID Tag Design Methodology, *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, Vol. 5, pp. 94–105 (online), DOI: 10.1109/jr-fid.2020.3034483 (2020).
- [7] Azarfar, A., Barbot, N. and Perret, E.: Chipless RFID Based on Micro-Doppler Effect, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 70, pp. 766–778 (online), DOI: 10.1109/TMTT.2021.3131593 (2022).
- [8] Costa, F., Borgese, M., Gentile, A., Buon cristiani, L., Genovesi, S., Dicandia, F. A., Bianchi, D., Monorchio, A. and Manara, G.: Robust Reading Approach for Moving Chipless RFID Tags by Using ISAR Processing, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 66, pp. 2442–2451 (online), DOI: 10.1109/TMTT.2017.2779801 (2018).
- [9] Zomorodi, M. and Karmakar, N. C.: Optimized MIMO-SAR Technique for Fast EM-Imaging of Chipless RFID System, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 65, pp. 661–669 (online), DOI: 10.1109/TMTT.2016.2616865 (2017).
- [10] Lu, C. X., Rosa, S., Zhao, P., Wang, B., Chen, C., Stankovic, J. A., Trigoni, N. and Markham, A.: See Through Smoke: Robust Indoor Mapping with Low-cost mmWave Radar, *ACM*, p. 14 (online), available from <https://doi.org/10.1145/3386901.3388945> (2020).
- [11] Ludeno, G., Fasano, G., Renga, A., Esposito, G., Gennarelli, G., Noviello, C. and Catapano, I.: UAV radar imaging for target detection, Vol. 11059, *SPIE*, p. 14 (online), DOI: 10.1117/12.2525364 (2019).
- [12] Hester, J. G. and Tentzeris, M. M.: Inkjet-printed flexible mm-wave van-atta reflectarrays: A solution for ultralong-range dense multitag and multi-sensing chipless RFID implementations for IoT smart skins, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 64, pp. 4763–4773 (online), DOI: 10.1109/TMTT.2016.2623790 (2016).
- [13] Instruments, T.: TI IWR1443 single-chip 76-GHz to 81-GHz mmWavesensor evaluation module. , <https://www.ti.com/tool/IWR1443B00ST> (2019). [Online; accessed 20-May-2022].