

## UHF 帯パッシブ型 RFID による測角に関する検討

山口 諒\*

湯 素華\*

## 1 はじめに

現在、スマートフォンの普及に伴い、GPS やセンサーを用いた位置情報システムが広く活用されている。昨今では屋内での測位手法として RFID システム (Radio Frequency Identification System) による手法に関する研究が数多く行われている。

RFID による測位手法として、RSS(Received Signal Strength) 方式や ToA(Time of Arrival) 方式 [1] は、導入の難しさや環境的要因による精度低下などの欠点があるのに対して、AoA(Angle of Arrival) 方式はアンテナアレイまたはタグアレイによる複数の後方散乱信号による位相情報を用いることで環境の影響を低減させ、高精度な測位が可能になる。しかし、一般的に広く用いられる COTS(Commercial Off-The-Shelf) デバイスでの位相では、外的要因によるノイズや、内的要因による位相シフトにより、精度低下が懸念される。

本研究では、図 1 のように得られる、COTS デバイスの RFID システムによる後方散乱信号の位相情報をモデリングした上で、タグアレイによる MUSIC 法 [2] での高精度 AoA 推定手法を検討する。

## 2 COTS RFID での位相

RF タグ-アンテナ間の距離を  $R$ [m]、周波数を  $f$ [MHz] としたとき、COTS デバイス (本研究では Impinj Speedway R420[7] を実験器として利用している) で得られる送信波に対する後方散乱信号の位相差  $\varphi$ [rad](以降 RF 位相と呼称する) は式 1 のように定義される [3]。なお、 $\lambda = c/f$ [m] である ( $c$ [m/s] は光速)。

$$\phi = \text{mod} \left( 2\pi \cdot \left( \frac{2R}{\lambda} \right) + \phi_T + \phi_R + \phi_{TAG}, 2\pi \right). \quad (1)$$

ここで、 $\phi_T, \phi_R, \phi_{TAG}$  はそれぞれ、リーダーの送信回路、タグの反射特性、リーダーの受信回路による位相シフトである。位相  $\phi$  に対して、実測値では以下のようなノイズや位相シフトが発生する。

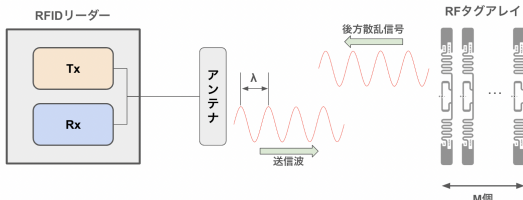


図 1: RFID(Radio Frequency Identification System)

2.1 変調方式に伴う  $\pi$ -RF 位相ジャンプ

タグからの後方散乱信号の復調の際に、信号空間ダイアグラムの回転対称性が原因で、COTS デバイスで報告される RF 位相値には  $\pi$ [rad] の曖昧性が生じ [4]、真の RF 位相に対して  $+\pi$  されたものが得られる。これは、利用する変調方式に依存するものであり、具体的には Miller エンコーダを用いている “Hybrid”、“Dense Reader M4”、“DenseReaderM4Two” として “DenseReaderM8” を使用した際に生じる可能性がある [5]。この RF 位相ジャンプによる影響はアレイ素子間の位相差に基づいて測角を行う AoA 方式に強く影響を及ぼす。これらに基づいて、実測 RF 位相は以下のようになる。

$$\varphi = \phi + k\pi \quad k \in \{0, 1\}. \quad (2)$$

なお、その他の符号化技術として、FM0 エンコーダを用いているものもあるが、これらは電波干渉による影響を強く受けやすいため、測角に対しては使用すべきではない [6]。

## 3 提案手法

前節で述べた様々な RF 位相シフトをモデリングした上で位相を補正し、タグアレイに対する MUSIC 法による測角を行う。

## 3.1 変調方式に伴う位相ジャンプのモデリング

変調方式に伴う RF 位相ジャンプについて、本手法では各タグにおける位相差に対する  $\pi$  剰余演算により RF 位相シフトの除去を行う。これに基づいたタグ  $m$  における位相差  $\Delta\varphi_m$  を以下のように表す。なお、この補正はタグの間隔  $D$  が  $D < \lambda/8$  である必要がある。

$$\Delta\varphi_m = \varphi_m - \varphi_1 + \Delta k\pi. \quad (3)$$

$$\Delta k = \begin{cases} 1, & \varphi_m - \varphi_1 \in [-\pi, -\frac{\pi}{2}) \\ 0, & \varphi_m - \varphi_1 \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}) \\ -1, & \varphi_m - \varphi_1 \in [\frac{\pi}{2}, \pi) \end{cases}. \quad (4)$$

## 3.2 MUSIC(Multiple Signal Classification) 法

MUSIC 法 [2] はフェーズドアレイアンテナにて取得した複数位相を基に信号処理を行い、到来角度を推定する手法である。そのアルゴリズムは、フェーズドアレイの間隔  $D$  が  $D < \lambda/4$  であるという条件下で、受信信号の共分散行列の固有ベクトルの雑音部分空間を求めたうえで、真の到来方向に対する伝搬遅延ベクトルとの直交性を利用して、到来方向を推定する。各タグ  $m$  における受信信号  $x_m(t)$  は、基準タグとの位相差  $\Delta\phi_m = \phi_m - \phi_1$  に基づき式 5 のように表される。なお、今回の場合の受信信号情報はタグ間の RF 位相の位相差のみとなるので送信信号は省略される。

$$x_m(t) = e^{-j\Delta\phi_m} \quad (5)$$

また、受信信号ベクトル  $X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]^T$  の共分散行列  $S_{XX}$  は以下のようになる。

$$S_{XX} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T X(t)X^H(t). \quad (6)$$

\* 電気通信大学大学院 情報理工学専攻 情報・ネットワーク工学専攻, Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications

これに対する固有値のソートに基づき、固有ベクトルも同様にソートする。アンテナの数を  $L$ 、タグ数を  $M$  としたとき ( $M > L + 1$ )、その固有ベクトルの上位  $M - L$  個のベクトルを雑音部分空間  $E_N$  とする。以上に基づいて、MUSIC スペクトルを以下のように算出する。なお、 $a(\theta)$  は任意の角度  $\theta$  に対するステアリングベクトルである。

$$P(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta)E_N E_N^H a(\theta)}. \quad (7)$$

このスペクトルに対してピークサーチを行うことで到来角度の推定が可能である。

#### 4 実験

測角の精度を検証するために、COTS デバイスとしてリーダーは Impinj Speedway R420[7] を、タグは Alien-9840[8] を使用し、実験を行った。アンテナ ( $L = 1$ ) とタグアレイ ( $M = 3$  で、基準タグは  $m = 1$ ) の垂直距離を 2m とし、またタグ因子間の距離を 0.03m とした。また、今回は簡易化のため、タグ因子同士が近すぎることにより発生するタグ間の相互結合 [9] による影響を回避するために、各タグを一つずつ配置しその度に RF 位相を計測した。図 2 この環境下で基準タグの位置をアンテナと水平方向に基準タグの位置を 0.0m から 1.0m まで 0.1m ずつ動かしながら各位置に対する AoA を推定した。なお、エンコーダ方式は比較的干渉に体制を持つ “Dense Reader M8” を使用した。

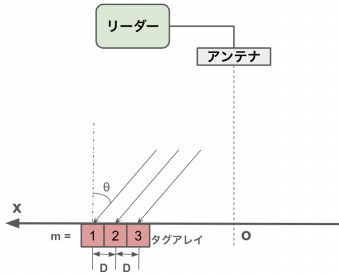


図 2: 実験環境

##### 4.1 結果

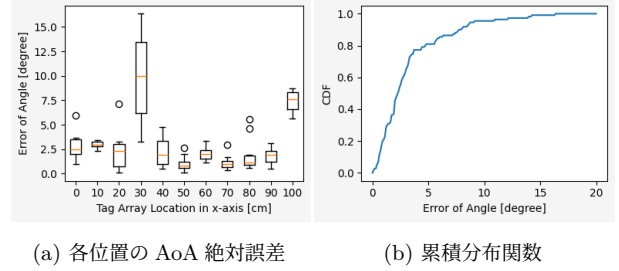
図 3 はそれぞれ、(a) タグアレイの各位置における推定 AoA の絶対誤差を示した箱ひげ図、(b) すべての位置に対する誤差の累積分布関数の結果を示している。

各位置に対する推定角度の絶対誤差は、 $x = 0.3[m], 1.0[m]$  のとき、誤差平均が  $5^\circ$  を超えている。特に、 $x = 0.3[m]$  のときは誤差最大値も  $20^\circ$  を超え、誤差平均も  $10^\circ$  を超えている。その他の位置については分散も平均誤差も比較的小さく、全体の平均誤差は  $3.23^\circ$  と高精度を示した。

また同様に累積分布関数からもわかるように、全体での誤差は  $5^\circ$  以下が大半を占めている。さらに、累積分布関数が誤差閾値  $0^\circ$  から  $5^\circ$  まで急激に増加していることもわかる。

##### 4.2 考察

$\pi$ -RF 位相補正のためにタグの間隔を  $D = 0.03 < \lambda/8$  とした。この場合、距離に対する角度推定の感度が非常に高くなるため、非常に僅かな誤差でも測角結果に影響を及ぼす。また、誤差が 1 から  $5^\circ$  付近に集中しているが、RF 位相が  $0.1[\text{rad}]$  の誤差を持つとき、測角結果に約  $5^\circ$  の誤差が生じたため、実環境の場合、環境の影響による僅かなノイズによる精度低下が懸念される。



(a) 各位置の AoA 絶対誤差 (b) 累積分布関数

図 3: 実験結果

#### 5 まとめと今後の課題

実験結果から、タグ間隔に従って推定角度の感度が上昇することがわかった。また、実験では相互結合の影響を環境的に除外したため、実環境でのタグアレイではこれによる精度に対する影響を加味する必要がある。従って、タグの間隔と  $\pi$ -RF 位相ジャンプ補正の最適化、そして相互結合の影響低減手法の検討をしていきたい。加えて、MUSIC 法の近似的測角の難しい範囲での測位や、今回の手法を用いた具体的な二次元測位の実装も行っていきたい。

#### 参考文献

- [1] T. Sanpechuda and L. Kovavisaruch, “A review of RFID localization: Applications and techniques,” 2008 5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Krabi, Thailand, 2008, pp. 769-772,
- [2] R. Schmidt, “Multiple emitter location and signal parameter estimation,” in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 34, no. 3, pp. 276-280, March 1986
- [3] Impinj Support, “Application Note - Low Level User Data Support,” <https://support.impinj.com/hc/en-us/articles/202755318-Application-Note-Low-Level-User-Data-Support>
- [4] R. Miesen, A. Parr, J. Schleu and M. Vossiek, “360° carrier phase measurement for UHF RFID local positioning,” 2013 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications (RFID-TA), Johor Bahru, Malaysia, 2013, pp. 1-6,
- [5] Z. Wang, J. A. Zhang, F. Xiao and M. Xu, “Accurate AoA estimation for RFID tag array With mutual coupling,” in IEEE Internet of Things Journal, vol. 9, no. 15, pp. 12954-12972, 1 Aug.1, 2022
- [6] Impinj Support, “Reader Modes (RF Modes) Made Easy,” 2020, <https://support.impinj.com/hc/en-us/articles/360000046899-Reader-Modes-Made-Easy>.
- [7] Impinj, Impinj Speedway, <https://www.impinj.com/ja/products/readers/impinj-speedway>
- [8] Alien, “ALN-9840 Squiggle Higgs-EC,” <https://www.alientechnology.com/products/-tags/squiggle/>
- [9] S. E. Asl, M. T. Ghasr, M. Zawodniok and K. E. Robinson, “Preliminary study of mutual coupling effect on a passive RFID antenna array,” 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Minneapolis, MN, USA, 2013, pp. 138-141