

## ESPAR アンテナの RFID リーダへの適用の一検討

## Considerations for applying the ESPAR to the RF ID Reader

桑原 義彦  
Yoshihiko Kuwahara

静岡大学大学院理工学研究科  
Graduate School of Shizuoka University

甲斐 正義  
Masayoshi Kai

NEC システムテクノロジー(株)  
NEC System Technologies, Ltd

## 1. あらまし

RFID の通信品質を向上させるとともに通信距離を伸ばすため、近傍型の 2.4GHz 帯 RFID[1]リーダへの ESPAR アンテナ[2]の適用を提案する。高利得の指向性ビームを RFID タグに向けるため、RBF ニューラルネットワークにより RFID タグへの DOA を推定し[3]、直接探索法[4]により推定方向の利得を最大化するパラサイト負荷を決定する。干渉源のある環境では DOA 同時推定情報に基づき適応ビームを形成する。一般に DCMP のウェイトはラグランジェの未定係数法で求められるが、ESPAR アンテナでは未定係数を解析的に求めることが困難である。そこで、適応ビームのためのパラサイト負荷は干渉波の DOA も利用する拘束付 MSN を直接探索法により求める。

## 2. ビーム制御

ビーム走査は RFID の DOA を RBF ニューラルネットワークで推定し、推定した DOA 方向の電力指向性を最大化するリアクタンスベクトルを直接探索法で求める。

## 2.1 ニューラルネットワークによる DOA 推定

RFID は通信時間が短いので短時間で DOA を推定する必要がある。学習した RBF ニューラルネットワークを用いると積和計算のみで DOA が推定できるので、固有値分解法等に比較し大幅な演算時間の短縮が期待できる。また屋内などのマルチパスが発生する場所についても高い精度が期待できる[5]。

DOA を推定するため、 $X_1=[x_{11} \ x_{12} \ \dots \ x_{1N}]$ ,  $X_2=[x_{21} \ x_{22} \ \dots \ x_{2N}]$ , ...,  $X_6=[x_{61} \ x_{62} \ \dots \ x_{6N}]$  の 6 つのパラサイト負荷組み合わせを用意する。各組み合わせで時分割受信した信号を  $Y(t)=[y_1(t) \ y_2(t) \ \dots \ y_6(t)]^T$  と表し、相関行列  $R_{xx}=E[Y(t)Y(t)^H]$  を推定する。 $R_{xx}$  の上三角成分を実部、虚部に分けてベクトル化  $R=[\text{Re}(R_{xx_{12}}) \ \text{Im}(R_{xx_{12}}) \ \text{Re}(R_{xx_{13}}) \ \dots \ \text{Im}(R_{xx_{16}}) \ \text{Re}(R_{xx_{23}}) \ \dots \ \text{Im}(R_{xx_{56}})]^T$  してそのノルムで規格化する。DOA 推定範囲の複数の学習点  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_M$  を設定し  $\varphi_m$  に対応する入力ベクトル  $R_m$  と出力  $\cos(\varphi_m)$ ,  $\sin(\varphi_m)$  を用意してネットワークを学習させる。350°, 0° のように出力が不連続になる場合の推定誤差を小さくするため、ネットワーク出力には  $\varphi_m$  ではなく  $\varphi_m$  の正弦と余弦を用いる[3]。学習後のネットワークに DOA が未知である RFID からの信号に基づく入力ベクトルをネットワークに入力すると、ネットワーク出力  $\cos(\varphi)$ ,  $\sin(\varphi)$  から DOA  $\varphi$  が推定できる。

複数の到来波を同時推定するためには DOA 推定範囲の複数の学習点組  $[\varphi_m \ \theta_m]$ ,  $m=1, \dots, M$  を設定し  $[\varphi_m \ \theta_m]$  に対応する  $R_m$  と  $\cos(\varphi_m)$ ,  $\sin(\varphi_m)$ ,  $\cos(\theta_m)$ ,  $\sin(\theta_m)$  を用意してネットワークを学習させる。

複数波を扱う場合、到来波数によって使用するネットワークの構造が異なり、複数のネットワークを予め用意しておく。ネットワークの選択は既知波源に基づく手法[6]が利用できる。

## 2.2 直接探索法を用いたビーム走査

既知方向  $\varphi$  への電力指向性を最大化するリアクタンスベクトル  $\vec{X}=[0 \ x_1 \ \dots \ x_6]$  を直接探索法で解く問題は

$$\min_{\vec{X}} \{-0.5 |D(\varphi, \vec{X})|^2\} \quad (1)$$

と表される。 $D(\varphi, \vec{X})$  は ESPAR アンテナの指向性利得で

$$D(\varphi, \vec{X}) = [(U + YZ)^{-1} y_0]^T a(\varphi) \quad (2)$$

と表される。 $U$  は単位行列、 $Y$  はアンテナ開口のアドミタンス行列、 $Z=\text{diag}(\vec{X})$ ,  $y_0$  は  $Y$  の第 1 列のベクトル、 $a(\varphi)$  はステアリングベクトルである。(1)の最小化問題を直接探索法により解く。

## 2.3 干渉除去

既知方向  $\theta$  への指向性利得を保ちつつ干渉波を除去する問題(DCMP)はラグランジェの未定係数法で解くことができる。この問題はつぎのように定式化される。

$$\min_{\vec{X}} \{E[0.5 y(t)^* y(t)] + \lambda \{G_0 - 0.5 |D(\varphi, \vec{X})|^2\}\} \quad (3)$$

$$y(t) = [(U + YZ)^{-1} y_0]^T AS(t) \quad (4)$$

$A=[a(\varphi_1) \ \dots \ a(\varphi_D)]$  は方向行列で  $a(\varphi_d)$  は第  $d$  波のステアリングベクトル、 $S(t)=[s_1(t) \ \dots \ s_D(t)]^T$  は信号ベクトル、 $G_0$  は既知方向  $\varphi$  の期待電力指向性利得である。

ESPAR アンテナではアレー相関行列が未知であることから未定係数  $\lambda$  を解析的に決定できない。そこで最大 SN 法(MSN)に基づく次の最小化問題を定義する。

$$\min_{\vec{X}} \left\{ \sum_{d=2}^D |D(\varphi_d, \vec{X})|^2 + \sigma^2 \right\} / |D(\varphi_1, \vec{X})|^2 + G_0 - 0.5 \lambda |D(\varphi_1, \vec{X})|^2 \quad (5)$$

$\sigma^2$  は雑音電力である。(5)を直接探索法により解く。

## 3. シミュレーション

アンテナ、パラサイト素子とも半波長ダイポールとした半径  $0.25\lambda$  の 7 素子 ESPAR アンテナを用い、到来波がダイポールのボアサイト方向( $\theta_d=90^\circ$ )から入射すると仮定シミ

ュレーションを行った。

### 3.1 ニューラルネットワークによる DOA 推定

ここでは、同一振幅の 2 波が到来する雑音のないモデルでのシミュレーション結果を紹介する。水平面推定範囲  $0\sim 360^\circ$  の  $20^\circ$  ごとの組み合わせ  $(0^\circ, 20^\circ), (0^\circ, 40^\circ), \dots, (0^\circ, 340^\circ), (20^\circ, 40^\circ), \dots, (320^\circ, 340^\circ)$  でネットワークを学習させ、学習点の中間  $(10^\circ, 30^\circ), (10^\circ, 50^\circ), \dots, (10^\circ, 350^\circ), (30^\circ, 50^\circ), \dots, (330^\circ, 350^\circ)$  に対応する  $Y$  を作成し到来方向を推定した。推定精度は  $0.01^\circ$  未満であった。

### 3.2 ビーム走査

指定した方向の電力指向性を最大化するリアクタンスベクトルを直接探索法で求める。直接探索法の繰り返し数を最大 200, mesh の拡大・縮小係数を 1.4 の倍数とした[4]。

図 1 はビームステアリングの一例で、 $0^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  の指向性利得を最大化する指向性である。図 2 はビーム走査角と指向性利得の関係である。全周にわたって 8dB 程度の利得が期待できる。モノポールアンテナを用いた RFID リーダに比較し 12dB システム利得が向上して到達距離が延長するほか、ビームの反対方向に利得が小さいので、干渉も受けにくくなると考えられる。

### 3.3 干渉除去

図 3 は(5)式により指向性形成した一例である。ここで拘束(所望波到来)方向は  $0^\circ$ 、拘束方向における利得  $G_0$  は 8dB、干渉波 DOA は  $30^\circ$  と  $60^\circ$  である。比較のため、(3)式の  $\lambda$  を 1 としたときの指向性を図 4 に示した。(3)式では干渉波の振幅が所望波に対し 10 倍程度の場合適応ビームが形成できるが所望波と同程度の強さの干渉波では図 4 のように適応ビームが形成できない場合がある。提案の(5)式では所望波方向にビームを向け干渉波方向にヌルを向ける適応ビームが形成されている。提案の方法では、若干の DOA 推定誤差がある場合干渉除去能力は低下するものの、DCMP のような所望波相殺は回避できると考えられる。

## 4. まとめ

RFID システムの到達距離の延長と耐干渉性の向上のため ESPAR アンテナを RFID リーダに適用するための基礎的な検討を行った。ESPAR アンテナで DCMP を実現するため方向拘束付 MSN 評価関数を提案しその有効性を確認した。

文献

- [1]河内健, 非接触 IC カード/RFID 用アンテナ設計技術, トリケップス, 2004.
- [2]大平孝, 電子走査導波器アレーアンテナ, 信学論 C, pp12-31.2004.
- [3]松本拓洋, 桑原義彦, パラサイト素子切り替え型ビーム走査アンテナと RBF ニューラルネットワークを用いた二次限到来方向推定, 信学論 B, pp.1500-8, 2005.
- [4]桑原義彦, 直接探索法による ESPAR アンテナのウェイト制御, 信学論 B, pp.39-44, 2006.
- [5]羽切健悟ほか, 屋内環境における到来方向推定, 2006 信学総大.
- [6]橋本康史, 桑原義彦, RBF ニューラルネットワークによる到来方向推定-修正 MDL 法による波数推定アルゴ

リズム, 2005 信学ソ大 B-1-253.

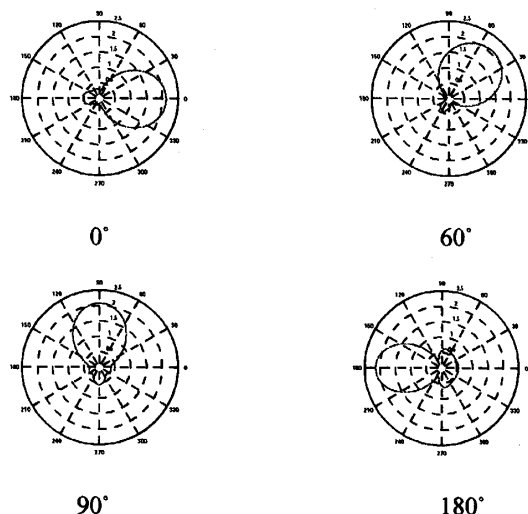


図 1 ビームステアリング

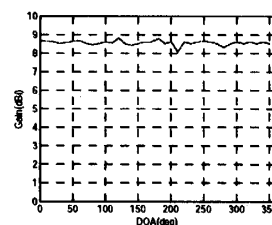


図 2 指向性利得

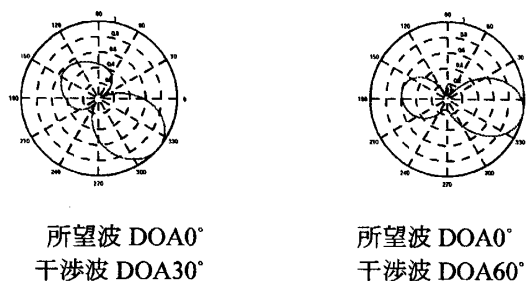
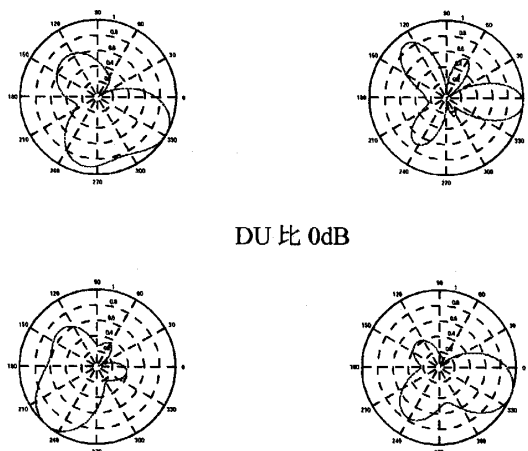


図 3 提案法による干渉除去



DU 比 -10dB

所望波 DOA  $0^\circ$  干渉波 DOA  $30^\circ$  所望波 DOA  $0^\circ$  干渉波 DOA  $60^\circ$

図 4 式(3)による干渉除去