

Khatri-Rao 積拡張アレー処理による 多周波ステップ CPC レーダ距離分解能改善に関する研究

B-2

A Study on the Improvement of the Resolution of Stepped Multiple Frequency Complementary Phase Code Modulation Rader using Khatri-Rao Product Array Processing

小林 弘佳 稲葉 敬之

Hiroyoshi Kobayashi Takayuki Inaba

電気通信大学 知能機械工学科

Department of Intelligent Machinery Engineering, The University of Electro-Communications

1. まえがき

多周波ステップ CPC レーダ[1]は、狭受信機帯域幅でありながら高距離分解能を実現するレーダである。しかし、実環境において 2 目標の距離間隔が分解能の限界に近づくと、2 目標を分離できない場合が想定される。そこで本稿では、仮想的にアレー素子数を増加させ分解能を改善する Khatri-Rao 積(以降、KR 積)拡張アレー処理[2]を多周波ステップ CPC レーダの合成帯域処理前に適用し、実験による検証から距離分解能が改善されることを確認する。

2. KR 積拡張アレー処理

KR 積は同じ列数を有する $N \times K$ の複素行列 A と、 $M \times K$ の複素行列 B に対して次式で定義される演算である。

$$A \odot B = [a_1 \otimes b_1, \dots, a_k \otimes b_k] \quad (1)$$

ここで、 a_k 、 b_k はそれぞれ行列 A 、 B の k 番目の列ベクトルである。また、 \odot は KR 積の演算子であり、 \otimes は次式で定義されるクロネッカ積である。

$$a \otimes b = [a_1 b \quad a_2 b \quad \dots \quad a_N b]^T \quad (2)$$

素子数 L 、素子間隔 Δd の ULA (Uniform Linear Array) において、KR 積拡張アレー処理を適用することにより実効素子数は $(2L - 1)$ に増加し、アレー開口長は $(L - 1)\Delta d$ から $(2L - 2)\Delta d$ となる。これにより、DBF (Digital Beam Forming) において分解能を改善できる。図 1 に、KR 積拡張アレー処理を適用しない DBF 結果と KR 積拡張アレー処理を適用した DBF 結果を示す。2 目標の角度間隔は角度分解能の 1.3 倍である 17.2 度である。図 1 より、KR 積拡張アレー処理を適用しない DBF は 2 目標を分離していないが、KR 積拡張アレー処理を適用した DBF は 2 目標を分離している。

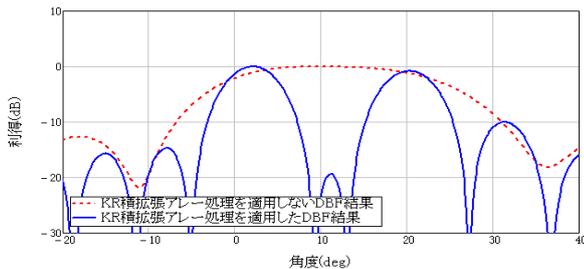


図 1 KR 積拡張アレー処理を適用しない DBF 結果と
KR 積拡張アレー処理を適用した DBF 結果

3. KR 積拡張アレー処理を適用した多周波ステップ CPC レーダ

図 2 に、KR 積拡張アレー処理を適用した多周波ステップ CPC レーダの信号処理ブロック図を示す。図 2 で示すように、KR 積拡張アレー処理を多周波ステップ CPC レーダの合成帯域処理前に適用する。これにより、周波数ステップ数は N から $(2N - 1)$ となり、帯域幅が広がるため、距離分解能の向上が期待される。

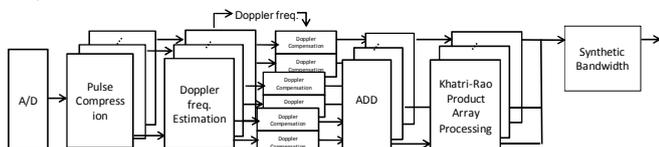


図 2 KR 積拡張アレー処理を適用した多周波ステップ CPC
レーダの信号処理ブロック図

4. 実験による検証

KR 積拡張アレー処理を適用した多周波ステップ CPC レーダの距離分解能が改善されることを確認するため、近接等速 2 目標の目標分離実験を行い、KR 積拡張アレー処理を適用しない合成帯域処理結果と KR 積拡張アレー処理を適用した合成帯域処理結果を比較した。

本実験では、コーナリフレクタを取り付けた 2 台のアクチュエータを目標とした。アクチュエータはどちらも 4km/h で直線上を往復運動し、2 台のアクチュエータの距離間隔は距離分解能の 1.3 倍である 0.4m で、センサからの距離は 5.0m ~ 6.6m と 5.4m ~ 7.0m である。また、表 1 に本実験における多周波ステップ CPC レーダパラメータを示す。

表 1 多周波ステップ CPC レーダパラメータ

送信周波数	60.5GHz	周波数ステップ幅	60MHz
アンテナ数	4	周波数ステップ数:N	8
素子間隔	0.8λ (4mm)	送信帯域幅	500MHz
パルス帯域幅	80MHz	全観測時間	29msec
パルス幅	0.2μsec(30m)	最大距離視野	524.65m
符号長	16	距離分解能	0.3m
PRI	3.5μsec	最大速度視野	79.64km/h
パルス数:M	512	速度分解能	0.311km/h

図 3 に、KR 積拡張アレー処理を適用しない合成帯域処理結果と KR 積拡張アレー処理を適用した合成帯域処理結果を示す。この図より、KR 積拡張アレー処理を適用しない合成帯域処理では 2 目標を分離していないが、KR 積拡張アレー処理を適用した合成帯域処理では 2 目標を分離していることが分かる。よって、KR 積拡張アレー処理を多周波ステップ CPC レーダの合成帯域処理前に適用することで、距離分解能が改善されることを確認した。

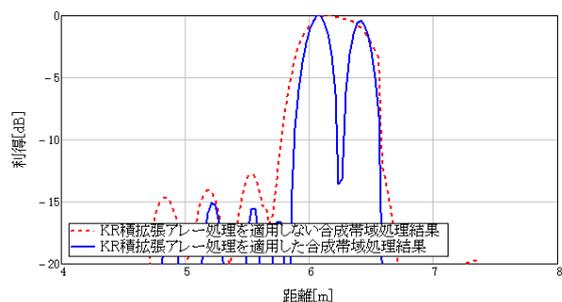


図 3 KR 積拡張アレー処理を適用しない合成帯域処理結果と
KR 積拡張アレー処理を適用した合成帯域処理結果

5. むすび

本稿では、KR 積拡張アレー処理を多周波ステップ CPC レーダの合成帯域処理前に適用し、実験による検証から距離分解能が改善されることを確認した。

参考文献

- [1] Masato Watanabe, Takayuki Inaba, Hikaru Tsybota, Takahiro Yano, "Development of Millimeter wave Radar using Stepped Multiple Frequency Complementary Phase Code Modulation", ICSANE2011-81, Oct.2011.
- [2] W. K. Ma, T. H. Hsieh, and C. Y. Chi, "DOA Estimation of Quasi-Stationary Signals With Less Sensors Than Sources and Unknown Spatial Noise Covariance: A Khatri-Rao Subspace Approach" IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, VOL.58, NO.4, pp.2168-2180, APRIL 2010