

BM法を前処理とした離隔周波数帯コヒーレント合成処理による高距離分解能化

Coherent Processing for Sparse Frequency Bands with Pre-processing of Blocking Matrix Method

秋田 学
Manabu Akita

山口 達輝
Tatsuki Yamaguchi

渡辺 優人
Masato Watanabe

稲葉 敬之
Takayuki Inaba

電気通信大学大学院情報理工学研究所
Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems, The University of Electro-Communications

1. まえがき

電波は限られた資源でありレーダで利用できる帯域は電波法により定められている。一般にレーダの距離推定精度は、送信帯域幅の3/2乗、計測回数(スナップショット数)の1/2乗、S/Nの1/2乗で決まる[1]。離隔した周波数帯域で別々に観測された計測信号をコヒーレントに合成することができれば、距離推定精度の向上が期待されるため、離隔周波数帯域コヒーレント合成処理を検討している。本稿では、各周波数帯域においてBlocking Matrix (BM法) [2]による距離推定を前処理とし、その推定結果を用いて離隔帯域間の位相補正係数を推定し位相補正後、コヒーレント信号処理により目標距離の再推定を行う信号処理を検討する。

2. 計測信号モデル

パルス圧縮レーダの出力(周波数領域で参照関数の複素共役と乗算したもの)または合成帯域レーダの帯域合成前の周波数方向の信号は、式(1)のように目標距離が周波数として表される信号が得られる[3]。

$$X_l(n, m) = \beta_{l,m} \sum_{k=0}^{K-1} \left(\frac{f_c}{f_0} \right)^{\alpha_k} \cdot a_k \cdot e^{\frac{4\pi R_k}{c}(f_c + \Delta f \cdot n)} \quad (1)$$

$$X_l(n, m) = \beta_{l,m} \sum_{k=0}^{K-1} \alpha_l \cdot a_k \cdot e^{\frac{4\pi R_k}{c}(f_c + \Delta f \cdot n)} \quad (2)$$

f_0 : 基準送信周波数, f_c : 搬送波周波数, l : 帯域番号, n : 帯域内周波数番号, m : スナップショット番号, k : 目標番号, α , β はそれぞれ目標反射電力の周波数依存性, スナップショット毎に変わる任意の複素振幅である。ここで簡単のため、目標間の反射電力の周波数の異存性は一定であり、各帯域内では無視できるものとする。式(1)は、式(2)で表され、以降の議論では目標数を2としたモデル、搬送波周波数として、60GHz($l=0$), 76GHz($l=1$)の2帯域を用いることとする。

3. 離隔帯域コヒーレント合成処理

コヒーレント合成の前処理としてのBM法による距離推定(インコヒーレント)は、①射影行列作成、②射影変換、③目標距離推定・更新を目標毎に交互に繰り返す、推定距離の収束値を目標推定距離とする。射影行列 P は、各周波数帯域のレーダから得られる減算対象の目標距離 R_l とモードベクトル $a(R)$ を用いて表され、各スナップショットのデータベクトル x_l に左から掛けられる(射影変換)。

$$x'_l = \left[I - \frac{a(R_l)a(R_l)^H}{a(R_l)^H a(R_l)} \right] x_l = P x_l \quad (3)$$

$$a(R) = \left[1 \dots e^{\frac{4\pi R}{c}(\Delta f \cdot n)} \dots e^{\frac{4\pi R}{c}(\Delta f \cdot (N-1))} \right]^T \quad (4)$$

ここで R_l は減算対象の目標距離である。射影変換された信号に対して目標距離推定・更新を行う(最尤推定法)。ここで最尤推定法に用いるステアリングベクトル $B(R)$ は射影行列 P を考慮したステアリングベクトル(= $Pa(R)$)である。式(5)で表される評価関数の最大値探索から目標距離を推定・更新する。

$$R_k = \arg \max_R \left(\sum_{l=0}^1 \text{tr} [B^H (B^H B)^{-1} B^H x'_l x'_l{}^H] \right) \quad (5)$$

上記①~③を目標毎に交互に繰り返す、収束値から目標推定距離を得る。次に、BM法による距離推定(コヒーレント)ではまず、得られた目標推定距離から、帯域間の位相

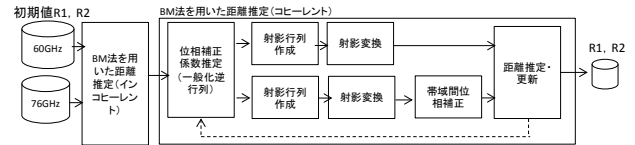


図1. 離隔帯域コヒーレント合成処理ブロック図
補正係数 α_k を一般化逆行列より推定する。BM法による距離推定(コヒーレント)においては帯域間位相補償として α_k により x'_l を除算(帯域間位相補正)後、各周波数帯の計測信号をスタック(式(7))し、距離推定・更新においては B をスタックしたステアリングベクトルを用いる。

$$\alpha_k = \frac{\alpha 76_k}{\alpha 60_k} \quad (6) \quad x'_{2L} = \begin{pmatrix} x'_0 \\ \frac{1}{\alpha_k} x'_1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$(\alpha 60 = (A^H A)^{-1} A^H x_0, \alpha 76 = (A^H A)^{-1} A^H x_1, A = (a(R_0) a(R_1)))$$

4. 計算機シミュレーション

BM法を前処理とした離隔周波数帯域コヒーレント合成処理による距離推定についての計算機シミュレーションを実施した。シミュレーション条件は以下の通りである。

- 離隔周波数帯: 60GHz, 76GHz
- 周波数サンプリング間隔: 50MHz
- サンプリング点数: 8 (距離分解能 0.34m に相当)
- 目標数2 (両目標の振幅は同じ、周波数依存性一定)
- 目標距離: 100.000m, 100.170m (SN=20dB)
- スナップショット数: 4

本条件において50回試行し、推定値の平均と標準偏差を求めた結果を表1に示す。本シミュレーションにおける設定条件において、コヒーレント合成処理による推定精度の向上が確認される。

表1. シミュレーションによる目標距離推定結果

	平均値 [m]		標準偏差	
	R1	R2	R1	R2
BM法による距離推定(インコヒーレント)	100.001	100.172	8.479 $\times 10^{-3}$	9.063 $\times 10^{-3}$
BM法による距離推定(コヒーレント)	99.999	100.172	6.200 $\times 10^{-3}$	6.275 $\times 10^{-3}$

5. むすび

本稿では、BM法を前処理とした離隔帯域コヒーレント合成処理を検討した。インコヒーレント処理と比較し、本シミュレーション条件において、推定精度の向上が確認された。今後、目標間の振幅差、周波数依存性の違いを考慮し、多目標環境の条件における評価検討を進める。また、当研究室により提案されている多周波ステップCPC方式[3]の合成帯域前データへ適用することが考えられる。

参考文献

- P. Stoica and A. Nehorai, MUSIC, Maximum Likelihood, and Cramer-Rao Bound, IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. 37, No.5, 1989
- 稲葉敬之, 荒木純道, 干渉波環境での車載用レーダ信号処理構成の検討, 信学論 B, Vol. J87-B, No.2, pp.199-212, 2004
- 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, 多周波ステップCPCレーダの提案と原理検証実験, 電学論 C, Vol. 135, No. 3, pp.285-291, 2015