

# BM法を用いた離隔周波数帯コヒーレント合成による 高分解能測距手法の検討

山口達輝<sup>†</sup> 渡辺優人<sup>†</sup> 秋田学<sup>†</sup> 稲葉敬之<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 電気通信大学大学院 情報理工学研究所 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1  
E-mail: yamaguchi.tatsuki@inabalab.ee.ucc.ac.jp

## あらまし

筆者らは、離隔した周波数帯で別々に運用されているレーダの計測信号をコヒーレント合成することで送信帯域幅を拡大する高分解能測距手法を検討している。本手法は、一般に送信帯域幅の拡大に伴って生じる最大探知距離の劣化やハードウェア負荷の増大を避け、また目標毎に異なるレーダ複素反射断面積の周波数依存性によるインコヒーレント性を補償することが期待される。本報告では、離隔した周波数帯で運用される CW 合成帯域レーダの受信信号を定式化し、Blocking Matrix 法による目標毎の信号分離およびコヒーレント合成測距を再帰的に実行する手法を提案する。また、シミュレーションにより、従来手法の推定値をインコヒーレントに合成した結果と比較し、本手法が高い目標分離性能を示すことが確認された。

**キーワード** レーダ, ultra-wide band, UWB, コヒーレント合成, 距離分解能, 合成帯域レーダ

## Coherently Combining Sparse-Multiband Processing for high resolution range estimation by using Blocking Matrix Method

Tatsuki YAMAGUCHI<sup>†</sup> Masato WATANABE<sup>†</sup> Manabu AKITA<sup>†</sup> and Takayuki INABA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate school of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications 1-5-1 Choufugaoka,  
Choufu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan  
E-mail: yamaguchi.tatsuki@inabalab.ee.ucc.ac.jp

## Abstract

Authors have been studying range estimation with a high resolution by Coherently Combining Sparse-Multiband Processing(CCSM). CCSM can be expected to avoid the degradation of the maximum detection range and increase of the hardware load caused by the expansion of the bandwidth. Furthermore, the method can compensate the incoherency between the sparse frequency bands due to the frequency dependence of complex radar cross section. In this paper, we formulated the signal model of sparse frequency band radars and proposed the recursive method that separates signals for each target by Blocking Matrix (BM) method and estimate the range for the targets with CCSM. It was also indicated that the method achieved a higher target separation performance than the incoherent processing of the conventional range estimation method under the simulation conditions.

**Keywords** Radar, ultra-wide band, UWB, coherent processing, range resolution, synthetic bandwidth radar

## 1. まえがき

近年、安全で安心な交通を実現するための ITS(Intelligent Transport Systems: 高度道路交通システム)の構築に際し、その主幹技術の一つとしてミリ波レ

ーダが注目されている。ITS 関連レーダの割り当て周波数帯域は、電波法の改正により従来の 76GHz 帯(1GHz 幅)および 79GHz 帯(3GHz 幅)がそれぞれ拡張され連なることで、合わせて 5GHz 幅におよぶ超広帯域

幅となる動向にある。レーダの距離分解能は、距離分解能[m]=光速度[m/s]/(2×送信帯域幅[Hz])の関係で決定されることから、送信帯域幅を超広帯域幅とすることで高い距離分解能を持つレーダが実現できる。しかし送信帯域幅の拡大は、一般に最大探知距離の劣化やハードウェア負荷増大の要因となる。

そこで筆者らは、離隔した周波数帯で別々に運用されている比較的狭送信帯域幅な複数のレーダの計測信号をコヒーレントに合成することで送信帯域幅を拡大する手法を検討している。この手法は、最大探知距離の劣化を回避し、また帯域内の送受信利得平坦性(振幅および位相)の確保を容易とするため、ハードウェア実現性の面で利点を持つ。また超広帯域幅とすることでその影響が顕著となると予想される、目標毎に異なるレーダ複素反射断面積の周波数依存性[1]によるインコヒーレント性を補償することも期待される。

本報告では、上記コヒーレント合成の実現手段として、合成帯域レーダの帯域合成前の周波数方向信号を入力とした、BM法を用いたコヒーレント合成による高分解能測距手法を提案する。本手法は Blocking Matrix(BM)法[2]を用い個別の目標に信号を分離することで目標毎のレーダ複素反射断面積の周波数特性を推定し、コヒーレント合成および高分解能測距を行う。

## 2. 離隔周波数帯レーダ受信信号モデル

本章では、離隔周波数帯で運用される合成帯域レーダの受信信号について、定式化を行う。

合成帯域方式は、送信周波数を段階的に変化させ(周波数ステップ)、得られた受信信号の周波数方向に合成帯域処理(IDFT)を行うことで、狭受信帯域幅で高距離分解能を実現する測距方式である[3]。ここでは、例として送信波を連続波(CW)とした場合において得られる受信信号について定式化を行う。

基準周波数 $f_c$ [Hz]、周波数ステップ幅 $\Delta f$ [Hz]のCW合成帯域レーダにおいて、距離 $R$ [m]、相対速度 $V$ [m/s]の目標からの受信信号をローカル信号とミキシングした信号 $S_r$ は、式(1)で表される。

$$S_r(t) = a e^{-j2\pi(fc+n\Delta f)(\frac{2R}{c}-\frac{2V}{c}t)} \quad (1)$$

ここで $a$ は目標の複素反射断面積である。

ある観測時間 $t = T$ に注目した場合において、式(1)は周波数ステップ番号 $n$ に注目して式(2)のように表される。

$$S_r(n) = a e^{-j2\pi\{n\Delta f(\frac{2R}{c}-\frac{2V}{c}T)+fc(\frac{2R}{c}-\frac{2V}{c}T)\}} \quad (2)$$

式(2)より、受信信号 $S_r(n)$ は周波数ステップ $n$ 方向に、目標距離に比例した位相勾配を持つことが分かる。通

常の合成帯域レーダでは、式(2)の周波数ステップ $n$ 方向に離散フーリエ変換(IDFT)処理を行うことで目標距離 $R$ が推定される。

なお式(2)より、周波数ステップ間の位相勾配は目標の相対速度 $V$ によって変化する。よって合成帯域レーダでは、前段の処理としてパルスドップラフィルタ等の目標速度推定処理を行い、目標の相対速度 $V$ に起因する位相勾配を補償する。以降はこの処理については触れず、正しい処理が行われたものとして、目標の相対速度 $V$ が0の場合について議論を進める。

離隔した $L$ 個の周波数帯 $f_{c_l}$ [Hz] ( $l = 1, \dots, L$ )で運用される合成帯域レーダの受信信号 $S_{r_l}$ は、式(2)を複数の目標に拡張し、それぞれ式(3)のように表せる。

$$S_{r_l}(n) = \beta_l \sum_{i=1}^P \left\{ a_i \left( \frac{f_{c_l} + n\Delta f}{f_0} \right)^{\alpha_i} e^{-\frac{4\pi j R_i}{c}(f_{c_l} + n\Delta f)} \right\} \quad (3)$$

ここで、 $i$ は目標番号、 $P$ は目標数、 $f_0$ は基準送信周波数、 $a_i$ および $R_i$ はそれぞれ目標番号 $i$ に対応した複素反射断面積および目標距離、 $\alpha_i$ は目標の複素反射断面積の周波数特性をあらわす項、 $\beta_l$ はスナップショット毎に変化する任意の複素振幅である。

なお、目標の複素反射断面積の帯域内周波数依存性を無視できるものとする、式(3)を $\left( \frac{f_{c_l} + n\Delta f}{f_0} \right)^{\alpha_i} = \alpha_{i,l}$ として式(4)のように表される。

$$S_{r_l}(n) = \beta_l \sum_{i=1}^P \left\{ a_i \alpha_{i,l} e^{-\frac{4\pi j R_i}{c}(f_{c_l} + n\Delta f)} \right\} \quad (4)$$

## 3. BM法を用いた離隔周波数帯コヒーレント合成

### 3.1 単帯域における処理

本章では、離隔周波数帯コヒーレント合成を前提とした単帯域での測距処理について述べる。

式(4)から分かるように、合成帯域レーダにおける測距とは、受信信号の周波数ステップ $n$ 方向に含まれる正弦波(位相勾配)の周波数推定問題である。提案法では複数目標の信号が含まれる信号に対してBM法を用い、目標毎の信号として分離した後に測距を行う処理を再帰的に実行する。なお提案法では入力として、受信信号に含まれる目標数が必要である。目標数推定法には、AIC(Akaike Information Criteria)やMDL(Minimum Description Length)などがある[4]が、本稿では目標数は既知であるものとする。提案法の単帯域における測距処理を図1に示す。

#### 3.1.1 BM法による信号減算

初めに、周波数ステップ数を $N$ としたときの信号ベクトル $\mathbf{x}^{N \times 1} = S_r(n)$ に、前回の処理で得た推定距離により生成したBM行列 $\mathbf{P}_i$ を式(5)のように作用し、距離を

推定する目標*i*以外の目標信号を減算する.

$$\mathbf{x}_i = \left[ \mathbf{I} - \sum_{k,k \neq i} \frac{\mathbf{s}(R_k)\mathbf{s}(R_k)^H}{\mathbf{s}(R_k)^H\mathbf{s}(R_k)} \right] \mathbf{x} = \mathbf{P}_i \mathbf{x} \quad (5)$$

ここで $\mathbf{s}(R)$ は式(6)で表されるステアリングベクトルである.

$$\mathbf{s}(R) = \left[ 1 \quad \dots \quad e^{-\frac{4\pi jR}{c}(n\Delta f)} \quad \dots \quad e^{-\frac{4\pi jR}{c}((N-1)\Delta f)} \right]^T \quad (6)$$

なお初めの処理では, 前回の処理で得た推定距離が存在しないため初期値の入力が必要となるが, 本稿のシミュレーションによる評価ではこれを一様乱数とした.

### 3.1.2 距離推定

次に, BM法による信号減算により1目標の信号 $\mathbf{x}_i$ に対して, 最尤推定法[5](Maximum Likelihood estimation: ML)を行い, 式(7)のように目標距離を推定する.

$$R_i = \arg \max_R \frac{|\mathbf{s}'_i(R)^H \mathbf{x}_i|^2}{|\mathbf{s}'_i(R)|^2} \quad (7)$$

$$\mathbf{s}'_i(R) = \mathbf{P}_i \mathbf{s}(R) \quad (8)$$

なお最尤推定法で用いるステアリングベクトル $\mathbf{s}'_i(R)$ は, 信号同士が直交でない場合にBMによる信号減算時に生じる信号歪みを考慮したステアリングベクトルであり, 信号歪みによる推定距離のバイアスを抑制する.

### 3.2 振幅位相補正係数推定

式(4)より, 離隔した周波数帯で運用される合成帯域レーダの受信信号は, 複素反射断面積の周波数特性 $\alpha_{i,l}$ やスナッフショット毎に変化する任意の複素振幅 $\beta_l$ , により振幅および位相がインコヒーレントとなる. よってこれらをコヒーレントに合成するためには, 目標毎に異なる帯域間振幅位相差を補正する必要がある. 振幅位相差の補正係数は, 推定目標距離 $R_i (i = 1, \dots, P)$ を用いて式(9)のように求まる.

$$\alpha'_i = \frac{\alpha_{2,i}}{\alpha_{1,i}} \quad (9)$$

$$\alpha_{l,i} = [(\mathbf{S}^H \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^H \mathbf{x}_l]_i \quad (10)$$

$$\mathbf{S} = [\mathbf{s}(R_1) \quad \dots \quad \mathbf{s}(R_P)] \quad (11)$$

### 3.3 離隔周波数帯コヒーレント合成

本章では, 式(9)から求まる帯域間振幅位相差の補正係数を用いて, 上述の単帯域の合成帯域レーダにおける測距処理を拡張した, 離隔周波数帯コヒーレント合成による測距手法を提案する.

提案法は, 目標距離の推定を行う第一イテレーションと帯域間振幅位相補正係数の推定を行う第二イテレーションからなる再帰処理となる. 本稿では, 例として2つの離隔周波数帯の合成帯域レーダの信号処理について述べる. なお同様の適用で複数の周波数帯に対してコヒーレント処理が可能である. 処理フローを図

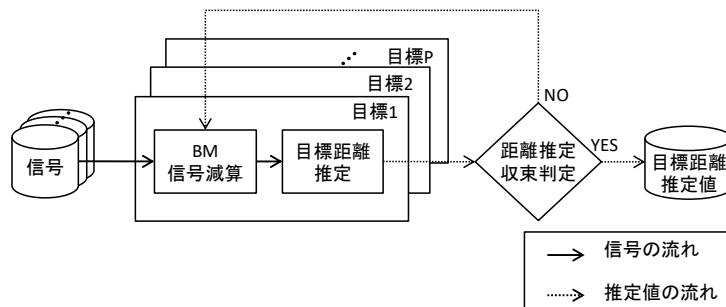


図1. 単帯域における測距処理フロー

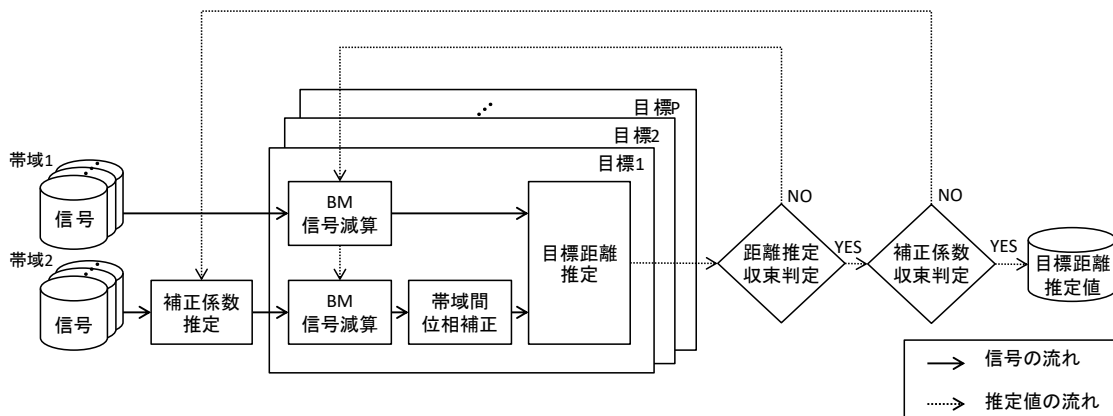


図2. 提案法の処理フロー

2に示す.

### 3.3.1 BM法による信号減算

3.1.1において述べたBM法による信号減算処理を、各周波数帯の受信信号 $\mathbf{x}_i$ に対して適用する.

### 3.3.2 帯域間振幅位相差の補正

次に、第二イテレーションで求めた帯域間振幅位相差の補正係数 $\alpha'_i$ を用いて、各周波数帯でBMにより抽出された信号毎の受信信号 $\mathbf{x}_{i,l}$ を、式(12)のようにコヒーレント合成する.

$$\mathbf{xc}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{1,i} \\ \frac{1}{\alpha'_i} \mathbf{x}_{2,i} \end{bmatrix} \quad (12)$$

コヒーレント合成により受信信号のベクトル長が拡大し、距離推定において距離分解能の向上が期待される.

### 3.3.3 距離推定

次に、コヒーレントに合成した目標毎の受信信号 $\mathbf{xc}_i$ に対して、拡大したステアリングベクトルを用いて、式(13)のようにMLによる目標距離の推定を行う.

$$R_i = \arg \max_R \frac{|\mathbf{sc}'_i(R)^H \mathbf{xc}_i|^2}{|\mathbf{sc}'_i(R)|^2} \quad (13)$$

$$\mathbf{sc}'_i(R) = \begin{bmatrix} \mathbf{s}'_i(R) \\ \mathbf{s}'_i(R) \end{bmatrix} \quad (14)$$

## 4. 計算機シミュレーション

本章では、提案法および比較手法として各周波数帯の信号にMUSIC[5]を適用して得た推定値の周波数帯平均を出力としたものを、計算機シミュレーションにより評価した結果を比較する.

### 4.1 設定諸元

表1に、シミュレーションで使用した2つの離隔周波数帯で運用される合成帯域レーダのパラメータを示す. また表2に、シミュレーションで使用した疑似信号のパラメータを示す.

表1. レーダパラメータ

パラメータ名	諸元
周波数帯 $f_c$ [GHz]	60 および 76
周波数ステップ数 $N$	8, 32, 64
周波数ステップ間隔 $\Delta f$ [MHz]	50, 12.5, 6.25
送信帯域幅 [MHz]	400
距離分解能 [cm]	37.5

表2. 疑似信号パラメータ

パラメータ名	諸元
目標数 $P$	2
2目標間距離差 $\Delta R$ [cm]	34, 21.25, 17, 12.75, 8.5
SNR [dB]	20, 15, 10, 5, 0

なお今回のシミュレーションにおいて、複素反射断面積の周波数特性 $\alpha_{i,l}$ およびスナップショット毎に変化する任意の複素振幅 $\beta_l$ は、試行毎に位相がランダムに変化する振幅1の複素振幅とした.

各シミュレーション条件につき、100回ずつ試行し、2目標の分離成功率および推定値の標準偏差 $\sigma$ を求めた結果を示す.

### 4.2 SNR特性の評価

初めに、提案法および比較手法の2目標の分離成功率および推定値の平均二乗誤差(RMSE)のSNR特性を図3~5に示す. なお以下の図において提案法は赤、比較手法は青で示す. 図3~5より、提案法は比較手法に対し、低SNR条件においてロバストに動作することが示唆された.

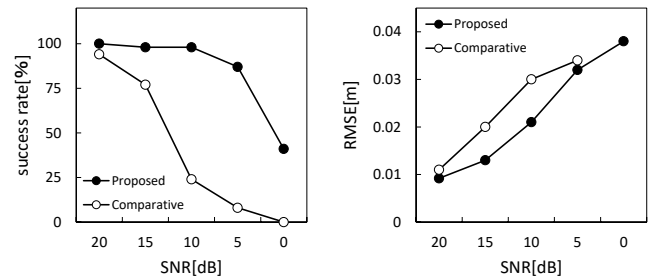


図3. 分離成功率および推定値の標準偏差  
( $N = 8, \Delta R = 17$ [cm])

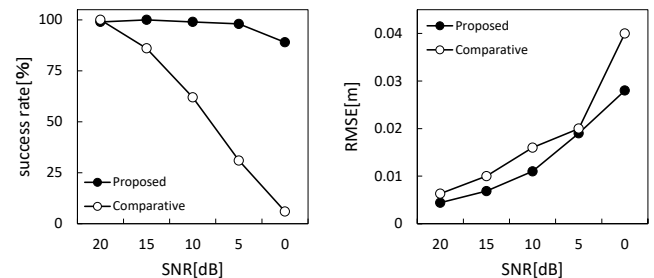


図4. 分離成功率および推定値の標準偏差  
( $N = 32, \Delta R = 17$ [cm])

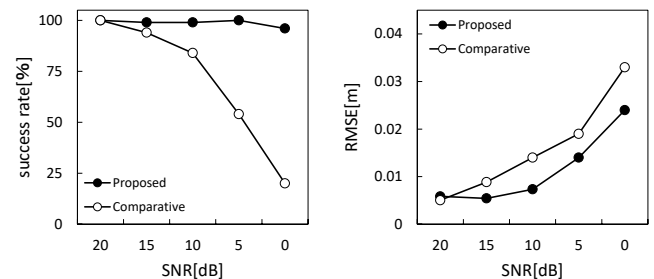


図5. 分離成功率および推定値の標準偏差  
( $N = 64, \Delta R = 17$ [cm])

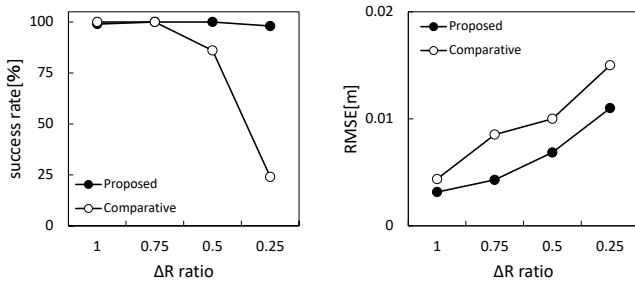


図 6. 分離成功率および推定値の標準偏差  
( $N = 32, SNR = 15[\text{dB}]$ )

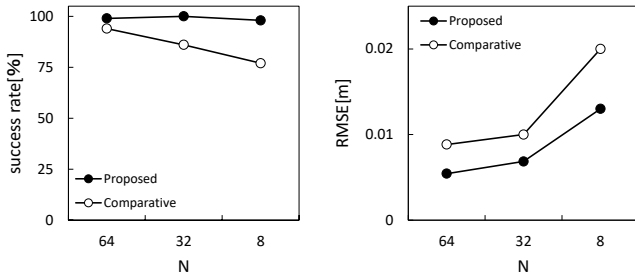


図 7. 分離成功率および推定値の標準偏差  
( $SNR = 15[\text{dB}], \Delta R = 17[\text{cm}]$ )

### 4.3 目標間距離特性の評価

次に、提案法および比較手法の2目標の分離成功率および推定値 RMSE の目標間距離特性を図 6 に示す。なお図 6 において、横軸は目標間距離と送信帯域幅から決定される DFT による距離分解能の比である。図 6 より、提案法は比較手法に対し、近接目標の分離性能が優位であることが示唆された。

### 4.4 周波数ステップ数特性の評価

次に、提案法および比較手法の2目標の分離成功率および推定値 RMSE の周波数ステップ数特性を図 7 に示す。図 7 より、提案法は比較手法に対して、よりロバストに動作することが示唆された。

## 5. まとめ

本稿では、BM 法を用いた目標毎のコヒーレント合成と測距処理を再帰的に実行する高分解能測距手法を提案した。また提案法が、MUSIC を各周波数帯に適用して得た値をインコヒーレント合成した推定値と比較して、今回のシミュレーション条件において、2 目標の分離成功率および推定値の標準偏差において優位な性能を示すことを確認した。今後は、多目標環境を念頭に置いた更なるアルゴリズムの改良を行う。

### 参考文献

- [1] George T Ruck, Donald E Barrick, William D Stuart, Radar Cross Section Handbook Volume 1, Peninsula

Publishing, 2002

- [2] Richard Klemm, Space-Time Adaptive Processing Principles and Applications, IEE Press, 1998.  
 [3] Nadav Levanon, Stepped-Frequency Pulse-Train Radar Signal, Radar, Sonar and Navigation, IEE Proceedings, vol.149, No.6, pp.198-309, 2002  
 [4] Wax, T. Kailath, Detection of signals by information theoretic criteria, IEEE Trans, Vol.ASSP-33, No.2, 1985  
 [5] 菊間信良, アレーアンテナにおける適応信号処理, 科学技術出版, 1999