

離隔周波数帯受信信号を用いた広帯域コヒーレント合成による 目標推定距離精度の評価

渡辺 一宏 秋田 学 稲葉 敬之

電気通信大学大学院情報理工学研究科 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

E-mail: watanabe.kazuhiro@inabalab.ee.uec.ac.jp

あらまし 近距離レーダにおいて超広帯域を活用可能な環境が整いつつあり、超広帯域を活用することでさらなる高分解能化が期待される。このような背景のもと、離隔した複数の周波数帯域の信号をコヒーレントに合成することで高い目標距離推定精度を実現する離隔周波数コヒーレント合成法を提案する。筆者らは、狭帯域受信により探知距離を確保した上で高距離分解能が得られる多周波ステップ CPC (Complementary Phase Code)方式を提案してきた。本稿では、超広帯域内を複数の離隔した狭帯域に分けて、各帯域において多周波ステップ CPC 方式で得られる信号をコヒーレントに合成する方法を示す。方式の提案では、レーダの周波数安定度を考慮に入れ二つの合成方式を提案する。また、提案方式の推定精度について CRLB による評価と計算機シミュレーションによる統計評価を行う。さらに、レーダの搬送波周波数誤差を変えたシミュレーションを行い、両方式の推定距離精度への影響について考察を行う。

キーワード コヒーレント合成, 離隔周波数帯域, 高距離分解能, 多周波ステップ CPC 方式

Evaluation of Range Estimation Accuracy by Wideband Coherent Processing for Sparse Frequency Bands

Kazuhiro WATANABE, Manabu AKITA and Takayuki INABA

Graduate school of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications

1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

E-mail: watanabe.kazuhiro@inabalab.ee.uec.ac.jp

Abstract Ultra-wideband is becoming available in short range radar, and further higher resolution is expected by utilizing ultra-wideband. In this background, we propose a sparsed frequency coherent combining method that achieves high target range estimation accuracy by coherently combining signals of multiple frequency bands separated from each other. The authors have proposed a multi-frequency step CPC(complementary phase code) method that can obtain high range resolution while maintaining the detection distance by narrowband reception. In this paper, we will show methods to coherently combine the signals of each band obtained by the multi-frequency step CPC method by dividing the ultra-wideband into a plurality of separated narrowband sub bands. In the proposal of the method, two combining methods are proposed in consideration of the frequency stability of the radar. The estimation accuracy of the proposed method is evaluated by CRLB and statistical evaluation is performed by computer simulation. Furthermore, a simulation is performed in which the carrier frequency error of the radar is changed, and we consider the effect of carrier frequency error on estimated distance accuracy by both methods.

Keywords coherent processing, sparse frequency bands, high range resolution, stepped multiple frequency CPC method

1. まえがき

限られた送信帯域幅と送信電力にて分解能と検知能力を両立させることはレーダ技術において恒久的な課題である。この課題に対し、筆者らは、周波数を時分割にて切り替え、瞬時の受信機帯域幅を狭帯域とし後の信号処理で合成して送信帯域幅に相当する分解能を得る合成帯域法を基本とした多周波レーダ変復調方

式を提案してきた。文献[1]において、合成帯域法に基づくレーダにおける移動目標対処のために、合成帯域処理の前に同じ周波数に対してFFTによる目標速度推定処理を前処理とし、周波数を切り替えるタイミングを考慮した位相補償を施すことで、目標速度・距離推定が簡易なFFTの組み合わせにより可能であることを示した。また、送信波をパルス化して時間遅延による距離ゲート化により合成帯域法の位相アンビギュイテ

の課題に対処する多周波ステップ ICW 方式を提案している[1][2]. 更にこの方式に対し, 送信デューティを高くして探知距離劣化を抑制するとともに電力アイソレーションを確保するために CPC (Complementary Phase Code)符号パルス圧縮方式を採用した多周波ステップ CPC 方式を提案し, 狭受信機帯域幅にて高い分解能を達成可能であることを実験的にも実証してきた[3][4][5].

一方, 近年 79GHz 帯近距離レーダにおいて 4GHz の超広帯域幅が活用可能な法整備が整いつつあり, 超広帯域を有効利用可能なレーダ技術研究開発が求められている. しかし, 通常のパルスレーダやパルス圧縮レーダでは, 超広帯域化に伴う受信機雑音増加による探知距離の劣化や処理負荷の増大という深刻な問題がある. 多周波ステップ CPC 方式は超広帯域化におけるこれら問題に対してその有効性がより顕著なものとなる. しかし, 数 GHz 以上の超広帯域では送受信系ハードウェアのコヒーレンスの確保が必要となり対策が課題である. このような背景のもと, 本稿ではコヒーレンスが確保される比較的狭い帯域幅を離隔した周波数に複数配置し, 互いにコヒーレンスが保証されていない各帯域信号をコヒーレントに合成することで上記課題解決に取り組む[6][7].

離隔配置された各帯域を活用する研究例として, 離隔した各帯域において複数の全目標距離を Root-MUSIC により求め, 推定した各目標距離を既知条件として帯域間の信号を補間する複素振幅を推定する手法が提案されている[8]. この手法は距離に相当する周波数を推定する「周波数推定処理」と帯域間の振幅と位相をつなぐ「複素振幅推定処理」から成る. しかし, 前段の処理である「周波数推定処理」における目標間の干渉による誤差が最終性能において誤差要因となることが課題である. この課題に対し, 本稿では周波数推定において信号減算処理を取り入れ, 各目標の周波数推定処理と複素振幅推定処理をイテレーションの枠組みの中で行うことで目標間干渉の回避に取り組む.

筆者らはこれまでに, MUSIC 等の固有空間に基づく推定法とは別のアプローチである上記「信号減算」に基づく手法開発に取り組んで来た. 具体的には, 注目目標信号以外の不要波信号の相関行列計測を既知条件とした MSN(Maximum Signal to Noise ratio), もしくは OP(Orthogonal Projection)に基づく射影変換による減算を前処理とした目標信号の周波数推定法[9]がある. また, 不要波の到来角に対応した周波数を既知条件とした射影行列 (BM: Blocking Matrix) による不要波減算 (以降, BM 減算) を前処理とした目標信号の周波数推定法[9] (文献[9]では角度推定問題として提案)

がある. 減算処理として射影変換を用いた周波数推定法については, FMCW 方式における呼吸・心拍計測応用においてビート周波数では分離できない環境雑音中で環境雑音信号空間を減算することで微弱生体信号を計測可能とすることを示した[10]. 一方, BM 減算を前処理とした周波数推定法については, MUSIC による距離推定後に注目目標信号以外を BM 減算することで, 近接目標の角度分離を簡素なモノパルス測定で可能とすることを示した [11][12]. しかし, これらは文献[7]と同様に事前に計測した周波数 (距離) 誤差が最終的な周波数推定誤差につながることから, 信号減算と周波数推定の両処理を CA (cyclic algorithm) イテレーション[13]で行うことを提案した[14][15][16]. さらに, 上述の多周波ステップ CPC 方式を用いた目標距離推定においてさらなる目標間干渉誤差の低減を目指し, イテレーションを多重化して推定目標数を限定する処理ループの中で CA イテレーションを行う方式を提案した[17] (本稿では「再帰的信号減算周波数推定法」と呼ぶ). 本再帰的信号減算周波数推定法は, 多重化したイテレーションを除くと SAGE アルゴリズム [18]に類似した処理となっている. 再帰的信号分離周波数推定法は, 注目目標の推定に必要な他目標の距離, 複素振幅をイテレーションの過程で順次求めていくため, SAGE アルゴリズムと異なり推定値の初期値を与えることなく目標距離推定が可能である. また, 目標振幅順に推定できることから他目標振幅の影響を緩和させることができるとともに, 収束した推定値が局所解になりにくく高精度の推定が可能である.

本稿では, 再帰的信号減算周波数推定法を基本にして複数の離隔帯域信号をコヒーレント合成するための複素振幅推定処理を加え, 目標間干渉誤差を回避しつつ複数帯域を使った高い距離推定精度を実現する「離隔周波数コヒーレント合成法」を提案する.

この合成法を適用した超広帯域多周波ステップ CPC 方式は, 上述の多周波ステップ CPC 方式を超広帯域内の複数の離隔狭帯域について用意し, 各帯域における合成帯域処理を統合し離隔周波数コヒーレント合成法による処理に置き換えたものである. このとき, 各帯域の多周波ステップ CPC 間ではコヒーレンスが確保されている必要はなく, 探知距離と目標分解能に優れた多周波ステップ CPC 方式を複数帯域で合成することでより高い分解能を実現することができる.

本稿では, 本離隔周波数コヒーレント合成法で得られる目標距離の推定精度について CRLB (Cramer-Rao Lower Bound) による評価と計算機シミュレーションによる統計評価により本合成法の有効性を示す. また, 離隔した複数帯域を用いたときに生じる搬送周波数誤差の影響を考慮して提案の離隔周波数コヒーレント合

成について二つの合成方式を提案する．一つの方法は帯域搬送波周波数誤差の影響を受けない方式，もう一方は帯域搬送波周波数の情報を使いより高い精度で目標距離推定を行う方式を提案する．

2. 離隔周波数合成

2.1. 超広帯域多周波ステップ CPC 方式

筆者らが提案する超広帯域多周波ステップ CPC 方式は，図 1 に示すように上記 1 帯域分の多周波ステップ CPC を，複数の帯域について並列動作させ，各帯域での相補加算後の信号を離隔周波数信号として離隔周波数コヒーレント合成処理を行う．この時，各帯域の多周波ステップ CPC 間ではコヒーレンスは確保されている必要はない．離隔周波数コヒーレント合成処理において，複数目標の各帯域間の複素振幅を推定しながらコヒーレントに合成していく．

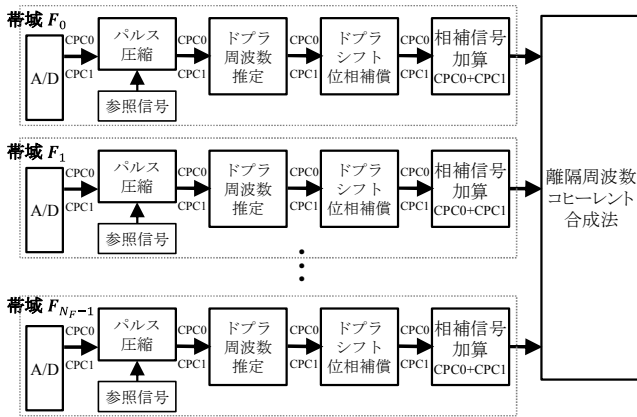


図 1. 超広帯域多周波ステップ CPC 方式の信号処理

2.2. 離隔周波数受信信号モデル

図 1 に示す離隔周波数合成処理の入力となる信号は，各離隔周波数帯での CPC 相補信号の加算後の信号で，簡単化のため連続波としてモデル化する．離隔周波数受信信号モデルを図 2 に示し，変数定義を表 1 に示す．

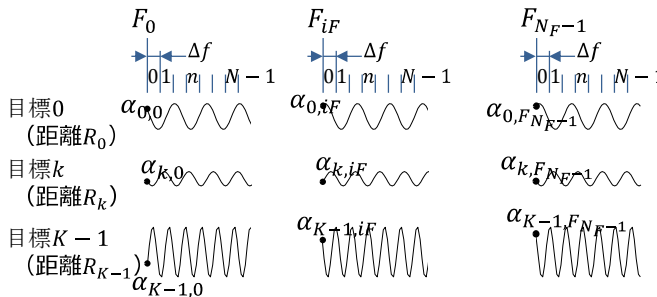


図 2. 離隔周波数受信信号モデル

表 1. 変数定義

N_F	帯域数
iF	帯域番号 ($iF = 0 \dots N_F - 1$)
F_{iF}	帯域周波数

f_{iF}	離隔周波数合成基準周波数
Δf	周波数ステップ幅
N	周波数ステップ数
n	周波数ステップ番号 ($n = 0 \dots N - 1$)
K	目標数
k	目標番号 ($k = 0 \dots K - 1$)
R_k	目標距離
$\alpha_{k,iF}$	各目標・帯域受信信号の複素振幅
ns	雑音

各帯域の各周波数ステップにおいて，受信アンテナに入力される観測信号は，各目標からの信号の和とガウシアン雑音 $ns(n)$ との和となっているため，観測信号 $z_{iF}(n)$ は式(1)のようになる．

$$z_{iF}(n) = \sum_{k=0}^{K-1} \alpha_{k,iF} \cdot \exp\left(\frac{-j4\pi(f_{iF} + n\Delta f)}{c} R_k\right) + ns(n) \quad (1)$$

帯域 iF について，離隔周波数合成に使用する基準周波数 f_{iF} と，以下の(2)(3)式に示す目標距離 R で定義されるモードベクトル $\mathbf{a}_{iF}(R) \in \mathcal{C}^N$ を全目標数並べた行列 $\mathbf{A}_{iF} \in \mathcal{C}^{N \times K}$ と，(4)式に示す複素振幅ベクトル $\boldsymbol{\alpha}_{iF} \in \mathcal{C}^K$ から，観測信号ベクトル $\mathbf{z}_{iF} \in \mathcal{C}^N$ は(5)式のようになる．

$$\mathbf{a}_{iF}(R) = \begin{bmatrix} \exp(-j4\pi(f_{iF})R/c) \\ \exp(-j4\pi(f_{iF} + \Delta f)R/c) \\ \vdots \\ \exp(-j4\pi(f_{iF} + (n-1)\Delta f)R/c) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{A}_{iF} = [\mathbf{a}_{iF}(R_0), \mathbf{a}_{iF}(R_1), \dots, \mathbf{a}_{iF}(R_{K-1})] \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\alpha}_{iF} = [\alpha_{0,iF}, \alpha_{1,iF}, \dots, \alpha_{K-1,iF}]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{z}_{iF} = \mathbf{A}_{iF} \boldsymbol{\alpha}_{iF} + ns \quad (5)$$

3. 離隔周波数合成の合成方式

本稿では，離隔周波数コヒーレント合成の合成方式として以下の 2 つの方式を提案する．

(1) 合成方式 A

合成方式 A のモードベクトルを定義する離隔周波数合成基準周波数 f_{iF} を(6)式で与える．

$$f_{iF} = 0, N\Delta f, \dots, iF \cdot N\Delta f, \dots, (N_F - 1) \cdot N\Delta f \quad (6)$$

図 3 は，モードベクトル周波数に対する位相を示したものであり，位相は目標距離に対応した傾きで変化する．目標距離 R_k を推定するにあたり，各目標に対して各帯域の先頭複素振幅 $\alpha_{k,iF}$ を推定する．このとき，推定する複素パラメータ振幅の数は，目標数と帯域数の積となる．合成方式 A は，モードベクトルを定義する基準周波数 f_{iF} に各帯域の搬送波周波数 F_{iF} が含まれないため，使用する搬送波の周波数安定度の影響を受けることなく各目標の距離を推定することができる．

(2) 合成方式 B

合成方式 B のモードベクトルを定義する離隔周波数合成基準周波数 f_{iF} を(7)式で与える.

$$f_{iF} = F_0, F_1, \dots, F_{iF}, \dots, F_{N-1} \quad (7)$$

図 4 は, 図 3 と同様にモードベクトル周波数に対する位相を示したものである. 図 4 に示すように, 目標距離 R_k を推定するにあたり, 各目標の複素振幅 s_k と各帯域間の複素係数 β_{iF} を推定する. このとき, 推定する複素パラメータの数は, 目標数と帯域数-1 の和となり, 合成方式 A に比べて減らすことができ高い距離推定精度が期待できる. 一方, モードベクトルを定義する基準周波数 f_{iF} が帯域搬送波周波数 F_{iF} となるため, 使用する搬送波の周波数安定度により各目標の推定距離精度に影響が出る可能性がある.

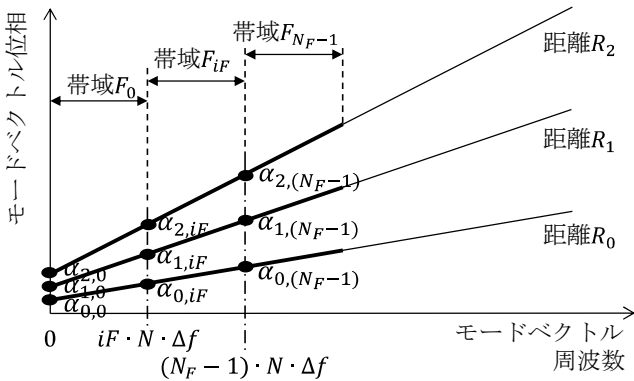


図 3 合成方式 A

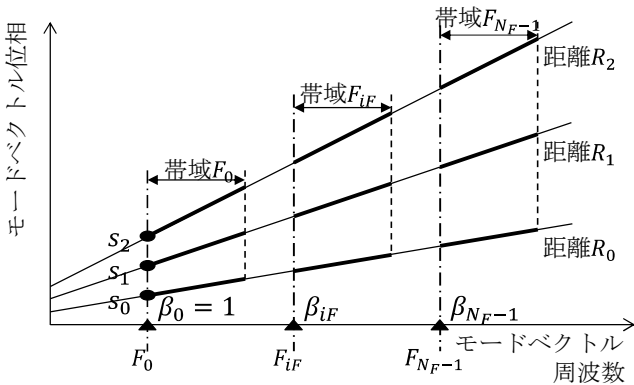


図 4 合成方式 B

(3) 離隔周波数コヒーレント合成の処理

離隔周波数コヒーレント合成は, 多目標の距離推定を各離隔帯域で得られた観測信号から 1 目標ずつ信号を分離しながら分離目標の距離と複素振幅をイテレーションにより推定を行う. このイテレーション処理は, ①信号減算処理, ②目標距離推定処理, ③複素振幅推定処理, ④目標数 Count Up ループからなる一連の処理(再帰的信号減算周波数推定法)で構成される. 処理ブロック図を図 5 に示す. この方法では, 推定する目

標数を目標数 Count Up ループで限定しその数を 1 目標, 2 目標と順に増加させながら距離推定の CA イテレーション[13]をすることで, 各目標の距離や複素振幅の推定初期値を不要としている.

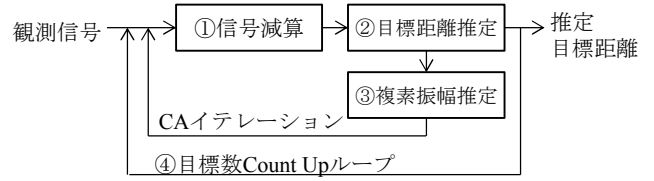


図 5 離隔周波数コヒーレント合成の処理ブロック図

4. 推定距離精度の評価

4.1. 推定精度の CRLB

ここでは, 合成方式 A による推定精度の CRLB を示す. 前章の(2)~(4)式で定義したモードベクトル \mathbf{A} , 複素振幅 α から, M をスナップショット数, m をスナップショット番号とした観測信号 $\mathbf{z} = \{\mathbf{z}_{iF}(m) : 0 \leq iF < N_F, 0 \leq m < M\}$ の距離 R を推定する対数尤度関数 $L(R)$ は(8)式で与えられる. ここで(5)式の雑音ベクトル \mathbf{ns} は, 平均 0 で分散 σ^2 のガウス分布と仮定する.

$$L(R) = - \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{iF=0}^{FN-1} \left[N \log \pi + N \log \sigma^2 + \frac{1}{\sigma^2} (\mathbf{z}_{iF}(m) - \mathbf{A}_{iF}(R) \alpha_{iF}(m))^H (\mathbf{z}_{iF}(m) - \mathbf{A}_{iF}(R) \alpha_{iF}(m)) \right] \quad (8)$$

このとき, 推定距離の分散に対する CRLB は(9)式で与えられる[19]

$$CRLB(R) = \frac{\sigma^2}{2} \left\{ \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{iF=0}^{FN-1} \text{Re}(\mathbf{X}_{iF}(m)^H \cdot \mathbf{D}_{iF}^H \mathbf{\Pi}_{iF} \mathbf{D}_{iF} \cdot \mathbf{X}_{iF}(m)) \right\}^{-1} \quad (9)$$

ここで, $\mathbf{\Pi}_{iF}$, \mathbf{D}_{iF} , \mathbf{X}_{iF} は(10)~(12)式で与えられ, \mathbf{I} は単位行列である.

$$\mathbf{\Pi}_{iF} = \mathbf{I} - \mathbf{A}_{iF} (\mathbf{A}_{iF}^H \mathbf{A}_{iF}) \mathbf{A}_{iF}^H \quad (10)$$

$$\mathbf{D}_{iF} = \left[\frac{d\alpha_{iF}(R_0)}{dR_0}, \frac{d\alpha_{iF}(R_1)}{dR_1}, \dots, \frac{d\alpha_{iF}(R_{K-1})}{dR_{K-1}} \right] \quad (11)$$

$$\mathbf{X}_{iF}(m) = \text{diag}(\alpha_{iF}(m)) \quad (12)$$

多周波ステップ CPC 方式によるレーダが, 複数の帯域において並列動作しているものとして, 離隔周波数合成処理による推定距離の二乗平均誤差 RMSE (Root Mean Square Error) を(27)式の $CRLB(R)$ の平方根から求める. 使用するレーダパラメータを表 2 に示す.

表 2. レーダパラメータ

帯域搬送波周波数 F_{iF}	$F_0 = 79\text{GHz}$	$F_1 = 79.5\text{GHz}$
	$F_2 = 80\text{GHz}$	$F_3 = 80.5\text{GHz}$
	$F_4 = 81\text{GHz}$	$F_5 = 81.5\text{GHz}$
	$F_6 = 82\text{GHz}$	$F_7 = 82.5\text{GHz}$
周波数ステップ幅 Δf	13.438MHz	
周波数ステップ数 N	32	

図 6 に離隔周波数コヒーレント合成した時の、合成帯域数に対する RMSE を示す。横軸は観測データの総ベクトル数で、観測データベクトル長（周波数ステップ数 N ）を合成帯域数 N_F で連結拡張した数 $N \cdot N_F$ である。横軸については、総ベクトル数に加えて対応する合成帯域数を併記している。目標は、距離間隔 $\Delta R=0.16\text{m}$ で等間隔に配置した 3 目標である。SNR=30,40,50dB の場合の RMSE を示す。合成帯域数すなわち総ベクトル長の長さとともに RMSE は減少していく。この傾向は、SNR によらず同じである。合成方式 A により複数帯域をコヒーレント合成することで目標距離推定精度を向上できることを示している。

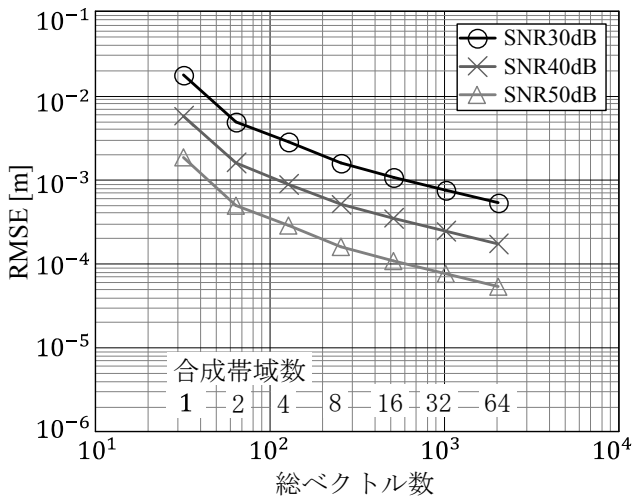


図 6 合成方式 A による総ベクトル数に対する RMSE

5. 計算機シミュレーション

提案する合成方式 A と合成方式 B における推定精度の計算機シミュレーション結果を示す。合成方式 A については、シミュレーション結果と CRLB の比較を行う。また、両合成方式において、搬送波の周波数安定度に対する各目標の推定距離精度を示す。シミュレーションは、4 章の表 2 で示したものと同一レーダパラメータを用いて行った。目標は、各複素振幅の絶対値が等しく距離間隔 $\Delta R=0.16\text{m}$ で等間隔に配置した 3 目標とした。各帯域の先頭位相にランダムな値を与えた上で、各目標複素振幅位相にランダムな値を与えた 100 回の試行を行い目標推定距離の RMSE を計算した。

(1) 合成方式 A

SNR を 20,30,40dB として、合成帯域数を 1,2,4,8 帯域に変化させた場合の合成方式 A のシミュレーションによる RMSE を図 7 に示す。また、理論下限値として CRLB も同図に合せて示す。合成帯域数を増加させるにつれ RMSE は減少する。この傾向は、CRLB による理論下限によく一致したものとなった。

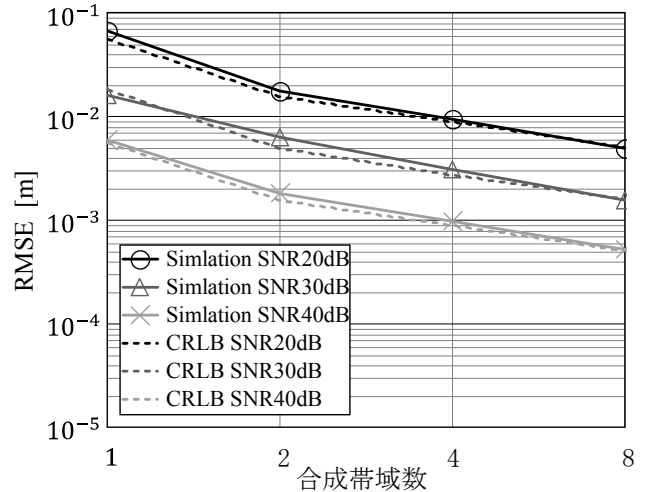


図 7 合成方式 A による総ベクトル数に対する RMSE

(2) 合成方式 B

合成方式 A と同条件で、合成方式 B についてシミュレーションを行った RMSE を図 8 に示す。合成帯域数の増加とともに合成方式 A よりも大きく RMSE を減少させることができている。特に、離隔周波数コヒーレント合成しない場合（合成帯域数 1）に比べ、合成帯域数を 2 とすることで、RMSE をおおよそ 1/10 にできている（合成方式 A ではおおよそ 1/3）。合成方式 B は、搬送波周波数 F_{IF} の情報を使うことで、目標距離推定に使うパラメータ数が削減できるため推定精度が向上するものと考えられる。

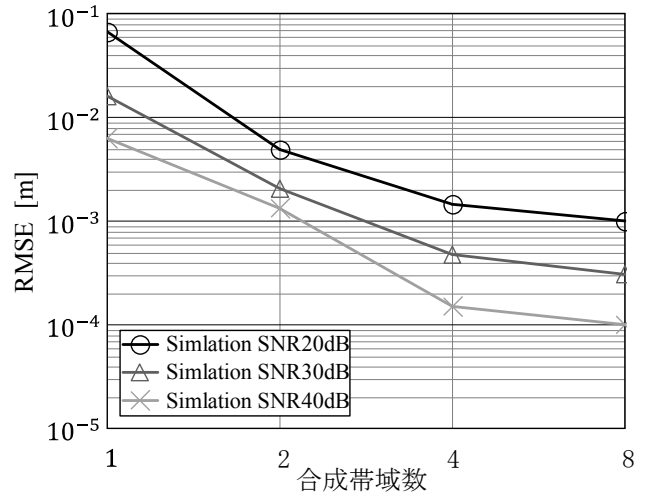


図 8 合成方式 B による合成帯域数に対する RMSE

(3) 搬送波の周波数安定度による影響

搬送波周波数誤差を $10^{-10} \sim 10^{-5}$ の間で変化させ、合成方式 A と合成方式 B の目標推定距離の RMSE を計算機シミュレーションにより評価した。シミュレーションにおけるレーダパラメータ、目標条件は、本章(1),

(2)項と同じ値を使い SNR は 30dB とした. 合成帯域数 8 におけるシミュレーション結果を図 9 に示す.

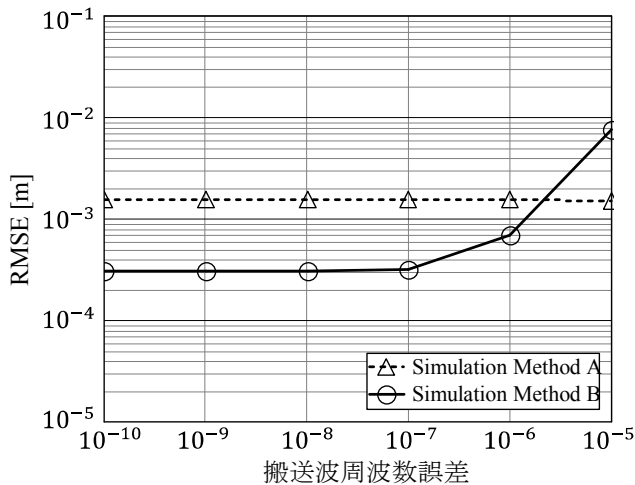


図 9 搬送波周波数誤差に対する RMSE

合成方式 A は, モードベクトルを定義する基準周波数 f_{if} に各帯域の搬送波周波数 F_{if} が含まれないため, 搬送波周波数誤差にかかわらず一定の RMSE となった. 一方, 合成方式 B は, 推定する複素パラメータの数を合成方式 A に比べて減らすことができ高い距離推定精度が得られるが, モードベクトルにおいて各帯域の搬送波周波数 F_{if} を使用するため, 周波数誤差が $10^{-10} \sim 10^{-7}$ の間では合成方式 A より低い一定の RMSE となるが, 10^{-5} になると合成方式 A より大きい値となる. すなわち, 提案する離隔周波数コヒーレント合成は, 搬送波周波数誤差が 10^{-7} 以下の安定度が得られる場合は合成方式 B を用い, 誤差が 10^{-5} 以上の場合は合成方式 A を用いるのが望ましいという結果となった.

6. むすび

本稿では, 多周波ステップ CPC 信号を用いた離隔した複数の周波数帯域の観測信号をコヒーレントに合成することで高い目標距離推定精度を実現する離隔周波数コヒーレント合成法を提案した. 提案方式として, 帯域搬送波周波数誤差の影響を受けない合成方式 A と, 帯域搬送波周波数の情報を使いより高い精度で目標距離推定を行う合成方式 B の二方式を提案した. 合成方式 A の推定精度については CRLB による評価と計算機シミュレーションによる統計評価を行い, 両者で目標推定距離の RMSE がほぼ一致することを示した. 合成方式 B については, 計算機シミュレーションのみによる評価であるが, 合成方式 A よりも高い目標距離推定精度が得られることを示した. また, レーダの搬送波周波数誤差を変えたシミュレーションを行い, 両方式の推定距離精度への影響を考察した. 離隔周波数コヒーレント合成法は, レーダシステムの周波数安定度に

よって, 二つの合成方式を選択することで, 離隔した複数帯域の信号を活用した高い推定距離精度の実現に有効な手段と考える.

謝辞

本研究開発は総務省 SCOPE(受付番号 175003002)の委託を受けたものです.

文献

- [1] 稲葉 敬之, "多周波ステップ ICW レーダによる多目標分離法", 信学論(B), vol.J89-B, no.3, pp.373-383, Mar.2006
- [2] 稲葉 敬之, 福島 冬樹, "多周波ステップ ICW レーダによる距離・角度の超分解能推定法", 信学論(B), vol.J91-B,no.7, pp.756-767, Jul.2008
- [3] 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", 電気学会論文誌 C, Vol. 135 (2015) No. 3, pp.285-291, 2015
- [4] 渡辺優人, 稲葉敬之, 坪田光, 矢野公広, "Development of Millimeter wave Radar using Stepped Multiple Frequency Complementary Phase Code Modulation", 信学技報, SANE2011-81, 2011-10
- [5] 秋田学, 太田裕也, 渡辺優人, 稲葉敬之, "多周波ステップ CPC 方式とパルス圧縮方式の探知距離性能比較実験", 信学技報, vol. 116, no. 252, pp. 51-56, 2016
- [6] 稲葉敬之, 秋田学, 渡辺一宏, "狭受信機帯域による超広帯域コヒーレントレーダ技術", 2017年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, BI-1-2, 2017. (招待講演)
- [7] 稲葉敬之, 秋田学, 渡辺優人, "超広帯域 (79GHz 帯域 4GHz 幅等) に向けた狭受信機帯域レーダ方式の提案", 信学技報 SANE2017-20, vol. 117, no.107, 43-48, 2017
- [8] Cuomo, K. M., J. E. Piou, and J. T. Mayhan, "Ultrawide-band coherent processing," IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 47, No. 6, 1094-1107, 1999.
- [9] 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
- [10] 蔵田 真彦, 稲葉 敬之, "マイクロ波による微小変位計測の基礎検討", 信学技報 SANE2012-130, 2013-01
- [11] 秋田学, 梅村昇平, 渡辺優人, 稲葉敬之, "超分解能法を用いた多周波ステップ CPC 方式における近接角度分離法", 2015年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-2-25, 2015
- [12] Manabu Akita, Takayuki Inaba, "Angle Estimation using Super Resolution and Blocking Matrix in Stepped Multiple Frequency Complementary Phase Code Radar", 2018 IEEE Radar Conference(RadarConf18), 23-27 April 2018
- [13] J. Ling, P. Stoica, J. Li, Y. Abramovich, "On using cyclic algorithms for sinusoidal parameter estimation", Electron. Lett., vol. 44, pp. 1160-1161, Sep. 2008.
- [14] 新田大輔, 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, "等価時間サンプリング符号変調 CW 方式における目標検出性能改善法", 信学技報 SANE2013-114,2014-01
- [15] 秋田学, 新田大輔, 渡辺優人, 稲葉敬之, "等価時間サンプリング符号変調 CW 方式の提案", 信学論(B), vol.J98-B, no.10, 2015
- [16] 秋田学, 廣瀬太亮, 渡辺優人, 稲葉敬之, "多周波ステップ CPC 方式における目標自動検知法の検討", 信学技報 SANE2017-13, vol. 117, no.107, 2017
- [17] 山口和樹, 渡辺一宏, 秋田学, 稲葉敬之, "Relax イテレーションを用いた BMML アルゴリズムの提案と評価", 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, 97, 2018
- [18] Fessler, J., Hero, A., "Space-alternating Generalized Expectation-Maximization algorithm", IEEE Trans. Signal Process.,1994, 42, (10), pp. 2664-2677
- [19] P. Stoica and A. Nehorai, MUSIC, Maximum Likelihood, and Cramer-Rao Bound, IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. 37, No.5, 198