

再帰的信号減算周波数推定法における目標数推定の基礎検討

宮崎 大知[†] 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: miyazaki.daichi@inabalab.ee.uec.ac.jp

あらまし 筆者らは多周波ステップパルスレーダにおける合成帯域処理として、少ない入力サンプルにおいてフーリエ変換よりも高分解能化が可能な再帰的信号減算周波数推定法を提案している。本研究では、再帰的信号減算周波数推定法において、目標数が未知の条件における有効な目標数推定法を検討する。そこで、再帰的信号減算周波数推定法の一連の処理で各目標の尤度値が算出されることに着目し、目標の尤度平均を目標数推定の評価指標に利用することを検討する。再帰的信号減算周波数推定法における目標距離推定誤差に対する目標数推定の性能について、目標数正答率により評価する。なお、本稿では、上記尤度平均が目標数推定の評価指標となりうるかに着目するために、再帰的信号減算周波数推定法の周波数推定処理において雑音の検出（目標の誤検知）はないものとし、目標の距離推定誤差は真値から各 S/N における CRLB(Cramer-Rao Lower Bound)に基づき与えるものとする。

キーワード 最尤推定法, 目標数推定

A Study on Number of Targets Estimation in Iterative Signal Subtraction and Frequency Estimation Method

Daichi MIYAZAKI 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:miyazaki.daichi@inabalab.ee.uec.ac.jp

Abstract Authors have proposed the iterative signal subtraction and frequency estimation method that can achieve higher resolution than Fourier Transform with a small number of input samples in synthetic bandwidth processing in multi-frequency step pulse radar. In this estimation method, the number of targets is assumed to be known. In this study, we consider the estimation method for the number of targets in the condition where the number of targets is unknown. Therefore, in this paper, we focus on the fact that the likelihood value for each target is calculated by the iterative signal subtraction and frequency estimation method. The estimation method for the number of targets that utilizes the mean of the likelihood values for the criteria is considered. The performance of the estimation method for range estimation error in the iterative signal subtraction and frequency estimation method is evaluated by correct answer rates. In this paper, in order to focus on whether the mean of the likelihood values is possible to be a criteria for the number of targets, it is assumed that there is no detection of noise in frequency estimation processing of the iterative signal subtraction and frequency estimation method. The target range estimation errors are given as random noise based on CRLB at each S/N.

Keywords maximum likelihood estimation, number of targets estimation

1. まえがき

レーダ技術において、限られた送信帯域幅にて分解能と検知能力を両立させることは恒久的な課題である。この課題に対する取り組みとして筆者らは、距離分解能と探知距離の相反する能力を兼ね備える「多周波ステップ方式」を提案 [1] [2]し、実験的にもその有効性を示してきた [3]。「多周波ステップ方式」とは送信周波数を時分割にて切り替え、のちに周波数方向のサブバンド信号をコヒーレントに合成すること（合成帯域処理）により、狭受信帯域幅で高距離分解能が得られる変復調方式である。合成帯域処理はフーリエ変換による距離を指定量としたスペクトル推定問題であるが、レーダでは実時間動作が求められるため、少ない入力サンプルにおける高分解能化が求められている。最尤推定 [4]はフーリエ変換より少ない入力サンプルで高

分解能化をするためには適合性は良いと考えられている [5]。このような背景から筆者らは、これまで最尤推定ベースの多目標推定アルゴリズムとして①信号減算処理、②目標ごとに分離した信号ベクトルから目標距離に対応した周波数推定処理、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で構成される再帰的信号減算周波数推定法をフーリエ変換と置き換える検討を行ってきた [6] [7]。再帰的信号減算周波数推定法は多目標信号の目標数を仮定し、仮定する目標数を1からはじめ1つずつ増やしていくことで、振幅の大きい順に目標の距離推定をしていく。既に推定した目標信号を減算することで目標の距離推定時に他の目標信号による干渉を抑えることが期待でき、またこのとき各目標の推定距離に対して尤度が算出される。

表 1. パラメータの定義

記号	パラメータ名
c	光速度 (m/s)
Δf	周波数ステップ幅 (Hz)
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 (m)
V_k	目標相対速度 (m/s)
κ	仮定目標数

しかし、これまでの再帰的信号減算周波数推定法では目標数を既知としていることから、目標数が未知の条件に対して有効な目標数推定の検討が望まれる。また、S/Nが低いときには、目標数を既知としたとしても、雑音のスペクトルを検出し、誤った距離を推定(目標の誤検知)する可能性がある。さらにこのとき目標の検出漏れも発生する。

目標数推定として最尤推定を用いる場合、観測信号の全推定目標における尤度値(全目標尤度)を求めることが一般的といえるが、本稿では、再帰的信号減算周波数推定法の一連の処理で各目標の尤度値が算出されることに着目し、目標毎の尤度値の平均をとった尤度平均値(以下、一目標尤度平均)を目標数推定の評価指針に活用することを考える。一目標尤度平均の利点として、全目標尤度で用いる目標数を判別するしきい値を必要としない。

本稿では、再帰的信号減算周波数推定法そのものとは切り離して目標数推定の基本的構成の性能検討を行う。すなわち、連続波(CW波)のスペクトル推定問題として統計的基本特性の解析を行う。目標数推定の基本的構成の性能検討における誤差要因として、3つ挙げられる。1つ目は再帰的信号減算周波数推定法の周波数推定処理における各目標の推定距離誤差(以下、スペクトル推定誤差)である。スペクトル推定誤差に対し本稿では、S/Nによる推定誤差の標準偏差CRLB(Cramer-Rao Lower Bound)に基づいて、推定目標距離を真値からランダムにずらし誤差を与える。2つ目は目標数を既知とした場合における雑音検出(目標の誤検知)である。目標の誤検知に対し本稿では取り扱わず、再帰的信号減算周波数推定法の改善時の研究テーマとする。3つ目は仮定目標数を実際の目標数より大きくした場合における目標以外のスペクトル検出(以下、雑音スペクトル検出)である。本稿では、仮定目標数を実際の目標数より大きくした場合における推定目標(雑音)について、雑音のみの信号をフーリエ変換して、そのピークが大きいものから順に目標のスペクトルであるとする。つまり本稿では、スペクトル推定誤差と雑音スペクトル検出を考慮し目標数推定の計算機シミュレーションを行う。計算機シミュレーションより、目標の誤検知をしなかった場合における目標数推定の理論的性能を、目標数を正しく推定した割合をもとに評価する。

本稿では、第2章で再帰的信号減算周波数推定法における受信信号と信号処理を説明する。第3章で本稿の検討する目標数推定と性能検討方法について説明する。第4章で計算機シミュレーションより、検討する目標数推定の性能評価を行う。第5章で本稿における結論を述べる。

2. 再帰的信号減算周波数推定法

2.1. 受信信号モデル

本章では、再帰的信号減算周波数推定法の受信信号、つまり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コヒーレント合成を行うことで、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。ここでは、送信波を連続波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。表1にパラメータの定義を示す。

各周波数ステップにおいて、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、受信信号 $Z(n)$ は下式のようになる。

$$Z(n) = \sum_{k=0}^{K-1} \left\{ \alpha_k \exp \left[\frac{-j4\pi n \Delta f}{c} R_k \right] \right\} + ns(n) \quad (1)$$

送信周波数と目標距離 R で定義されるステアリングベクトル $\mathbf{a}(R) \in \mathbf{C}^N$ (式(2))とそれを目標数 K 分並べた行列 $\mathbf{A} \in \mathbf{C}^{N \times K}$ (式(3))から受信信号ベクトル $\mathbf{z} \in \mathbf{C}^N$ は式(4)のようになる。

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

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

$$\mathbf{z} = \mathbf{A}\boldsymbol{\alpha} + ns \quad (4)$$

2.2. 信号処理

再帰的信号減算周波数推定法は最尤推定ベースの多目標推定アルゴリズムであり、①信号減算処理、②目標ごとに分離した信号ベクトルから目標距離に対応した周波数を推定する処理、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で構成される。ブロック図を図1に示す。

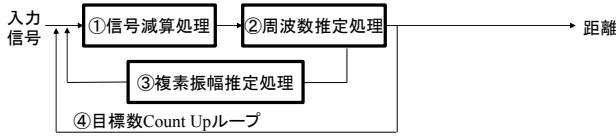


図 1. 再帰的信号減算周波数推定のブロック図

```

1  for  $\kappa = 1, 2, \dots, K$ 
2    repeat
3      for  $k = \kappa, \dots, 1$ 
4         $\hat{\mathbf{x}}\mathbf{c}_k = \mathbf{z} - \sum_{i, i \neq k}^K \mathbf{a}(\hat{R}_i) \alpha_i$ 
5         $\hat{R}_k = \operatorname{argmax} RLH_k(r)$ 
6         $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\hat{R}_1) \quad \mathbf{a}(\hat{R}_2) \quad \dots \quad \mathbf{a}(\hat{R}_\kappa)]$ 
7         $\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \cdot \mathbf{z}$ 
8      end for
9    until (convergence)
10  end for

```

図 2. 再帰的信号減算周波数推定の処理フロー

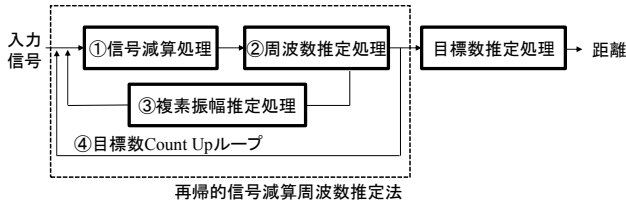


図 3. 再帰的信号減算周波数推定における目標数推定処理の位置を示したブロック図

信号減算処理は、式(2)(4)を用いて式(5)のようにして、入力信号から所望する目標 i 以外の目標からの信号を減算する。

$$\hat{\mathbf{x}}\mathbf{c}_k = \mathbf{z} - \sum_{k, k \neq i}^{K-1} \mathbf{a}(\hat{R}_k) \alpha_k \quad (5)$$

周波数推定処理では式(5)で求めた減算後の信号 $\hat{\mathbf{x}}\mathbf{c} \in \mathbf{C}^N$ と式(2)を用い、式(6)によって与えられる尤度関数 $RLH(r)$ を最大にするように距離 r を探索することで、所望する目標 i の距離 R_i を最尤推定する(式(7))。

$$RLH_k(r) = \operatorname{tr} \left[\frac{\mathbf{a}(r) \cdot (\mathbf{a}(r)^H \cdot \mathbf{a}(r))^{-1} \cdot \mathbf{a}(r)^H \cdot \hat{\mathbf{x}}\mathbf{c}_k \cdot \hat{\mathbf{x}}\mathbf{c}_k^H}{\hat{\mathbf{x}}\mathbf{c}_k^H \cdot \hat{\mathbf{x}}\mathbf{c}_k} \right] \quad (6)$$

$$\hat{R}_k = \operatorname{argmax}_r RLH_k(r) \quad (7)$$

複素振幅推定処理では、式(7)で求めた目標の推定距離 \hat{R} を用いて式(3)の \mathbf{A} を更新させ、全目標の複素振幅 $\alpha \in \mathbf{C}^K$ を推定する。

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \cdot \mathbf{z} \quad (8)$$

目標数 Count Up ループは、目標数を 1 と仮定してからはじめ、その推定距離が収束した後に順次仮定する

目標数を 1 ずつ増やしながら複数目標の推定を行い、これによって振幅の大きい目標から順に距離を推定する。既に推定した目標信号を減算することで、振幅の大きい目標に埋もれた振幅の小さい目標の距離推定の精度を向上させることができる。具体的な処理フローを図 2 に示す。処理フローにおける 6 行目より、再帰的信号減算周波数推定法は 1~ κ 番目までの目標推定距離 \hat{R}_k およびその尤度値 $RLH_k(\hat{R}_k)$ が出力可能となっている。

3. 目標数推定構築における基礎検討

3.1. 目標数推定の基本的構成

再帰的信号減算周波数推定法では目標数を既知としていることから、図 3 のように目標数が未知の条件に対して有効な目標数推定の追加が望まれる。

一般に最尤推定は目標の推定距離 \hat{R} を用いて式(3)の $\mathbf{A} \in \mathbf{C}^{N \times \kappa}$ を更新させ、式(9)のように全目標尤度 $all_RLH[\kappa]$ としきい値を用いる。

$$all_RLH[\kappa] = \operatorname{tr} \left[\frac{\mathbf{A} \cdot (\mathbf{A}^H \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^H \cdot \mathbf{z} \cdot \mathbf{z}^H}{\mathbf{z}^H \cdot \mathbf{z}} \right] \quad (9)$$

2.2 節で述べたように、再帰的信号減算周波数推定法の中で各目標番号 k に対する尤度値 $RLH_k(\hat{R}_k)$ が出力される。よって本稿では、式(10)のように各目標の尤度値を平均した(一目標尤度平均)値 $KLH[k]$ を目標数推定の評価指針に活用することを考える。

$$KLH[\kappa] = \frac{1}{\kappa} \sum_{k=1}^{\kappa} RLH_k(\hat{R}_k) \quad (10)$$

ゆえに、式(11)を原理として目標数推定結果 \hat{K} を求める。

$$\hat{K} = \operatorname{argmax}_K KLH[K] \quad (11)$$

具体的には、 K が目標数の真値とするならば、 K より十分大きな値 M まで尤度 $KLH[\kappa]$ ($\kappa = 1, \dots, M$) を求め、 $KLH[\kappa]$ が最大となる仮定目標数 κ を目標数推定結果 \hat{K} とする。一目標尤度平均の利点として、全目標尤度で用いる目標数を判別するしきい値を必要としない。

3.2. 性能検討

本稿では、再帰的信号減算周波数推定法そのものとは切り離して基本的構成の性能検討を行う。すなわち、連続波のスペクトル推定問題として統計的基本特性の解析のみを基礎検討として行う。目標数推定の基本的構成における誤差要因として、以下の 3 つが挙げられる。

I 距離尤度値 $RLH_k(r)$ に基づく各目標の推定距離誤差

(スペクトル推定誤差)

各目標において再帰的信号減算周波数推定法による推定距離 \hat{R}_k の誤差は、式(10)より目標数を推定するための尤度 $KLH[\kappa]$ の値に影響する。本稿では評価にあたり、S/Nに依存する推定誤差値の標準偏差CRLB(理論的標準偏差の下限)に基づいて、目標距離の真値 R_k にランダムな値で負荷を与え、各目標においての推定距離 \hat{R}_k とする。

II 目標番号 $k(\leq K)$ の段階で雑音検出(目標の誤検知)

S/Nが低いときには、目標番号 $k(< K)$ で振幅の大きい雑音を検出されることがある。本稿での基本的構成の性能検討では、この誤検知は発生しないものとし、この課題への対応は再帰的信号減算周波数推定法の改善時の研究テーマとする。

III 目標番号 $k(> K)$ の尤度値(雑音スペクトル検出)

仮定目標数を $\kappa = M(> K)$ まで増やし尤度 $KLH[\kappa]$ を求めるため、 $k > K$ の場合における距離推定値 \hat{R}_k を与える必要がある。本稿での評価では、受信信号の疑似作成時における雑音のみの信号 ns にFFTを行い、スペクトル値が大きいものから順に $k(= K+1, K+2, \dots)$ 番目の目標であるとする。このとき、目標の距離推定値 \hat{R}_k について、 ns のFFT時のスペクトル値を用いて式(1)より求める。

4. 計算機シミュレーション

4.1. シミュレーション条件と方法

本稿では、表2のレーダパラメータを用いてシミュレーションを行った。試行回数は各目標数に対して1000回である。目標の設定距離について目標同士の距離間隔が最低でもDFT分解能の半分(0.175m)以上になるように、距離アンビギュイティ内(0~11.15m)で試行とS/N毎にランダムで設定した。目標の複素振幅について位相は試行とS/N毎に各目標ランダムに変化させ、目標電力の大きさはすべての目標に対し同じとした。仮定する目標数の最大値 M について本稿では $M = 16$ とした。再帰的信号減算周波数推定法は本来目標の誤検知が生じる可能性があるが、本稿では目標の誤検知が発生しないものとして目標数推定の計算機シミュレーションを行い、理想的性能を示すことを目的としている。

表2 レーダパラメータ

パラメータ	設定値
送信帯域幅(MHz)	430
周波数ステップ幅(MHz)	13.4
周波数ステップ数	32
スナップショット数	1
距離アンビギュイティ(m)	11.15
DFT分解能(m)	0.35

4.2. シミュレーション結果

目標数を1,5,10,15とした場合の一目標尤度平均(仮定目標数に対する尤度)をそれぞれグラフとして図4, 図5, 図6, 図7に示す。ここで、S/Nが10dB, 20dB, 30dB, 40dBのときの一目標尤度平均を同じ図に同時に示す。再帰的信号減算周波数推定法の目標の誤検知を発生しないものとしているため、本稿での一目標尤度平均は再帰的信号減算周波数推定法における一目標尤度平均の理想値である。図4~図7より、すべての目標数において一目標尤度平均のピークはS/Nによらず目標数の真値と一致していることが確認できる。

目標数1,5,10,15に対しての一目標尤度平均の尤度のピーク値を図8に示す。図8よりS/Nが低くまた目標数が多いほど尤度が減少していることが確認される。尤度の減少にスペクトル推定誤差が関係あるかを調べるため、図8とは対照的にスペクトル推定誤差を考慮せず目標の真値のみを用いて一目標尤度平均のピーク値を求めた結果を図9に示す。図9よりスペクトル推定誤差を考慮した場合と違い、目標数を多くしても尤度のピークは下がらないことが確認される。よって図8と図9より、目標数を増やすと尤度が下がる原因はスペクトル推定誤差である。

一目標尤度平均による目標数推定の結果について、目標数を正しく推定できた割合すなわち正答率を基準として評価した結果を図10に示す。また全目標尤度の目標数推定の結果を図11に示す。図10より一目標尤度平均は目標数が10以下かつS/Nが30dB以上のとき、目標数推定の正答率がほぼ1となることが確認される。また、図10と図11を比較すると一目標尤度平均の正答率は全目標尤度より最大で8%程度減少していることが確認される。正答率が減少している理由について、全目標尤度のしきい値は一般にS/Nによって決めるが、本稿では目標数推定の正答率が一番高くなる理想的なしきい値を使って目標数推定をしているからだと考えられる。

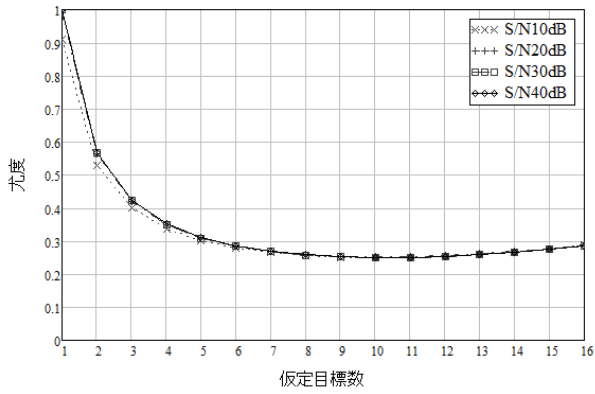


図 4. 目標数 1 のときの一目標尤度平均

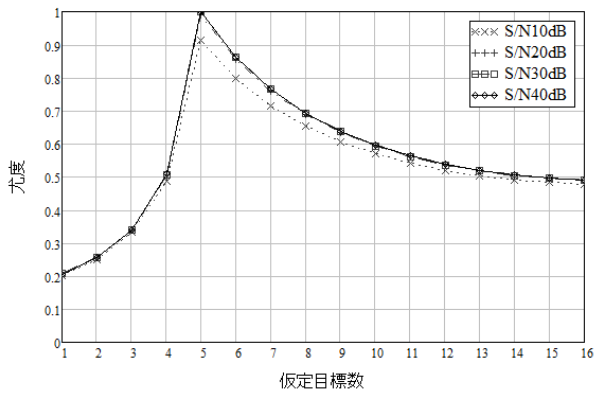


図 5. 目標数 5 のときの一目標尤度平均

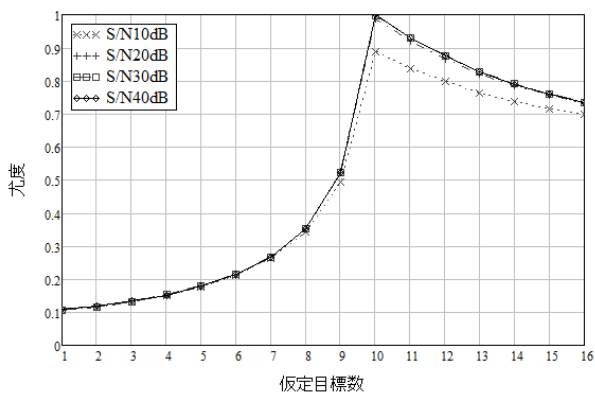


図 6. 目標数 10 のときの一目標尤度平均

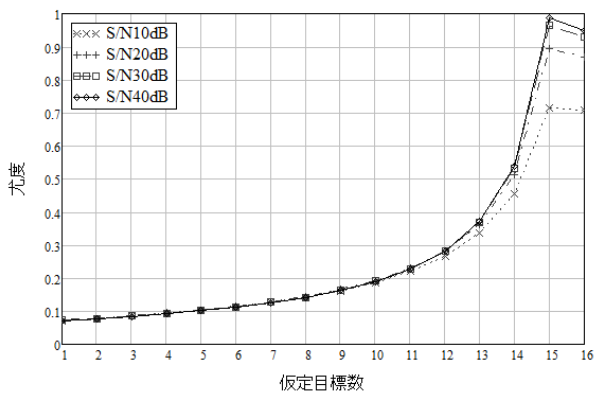


図 7. 目標数 15 のときの一目標尤度平均

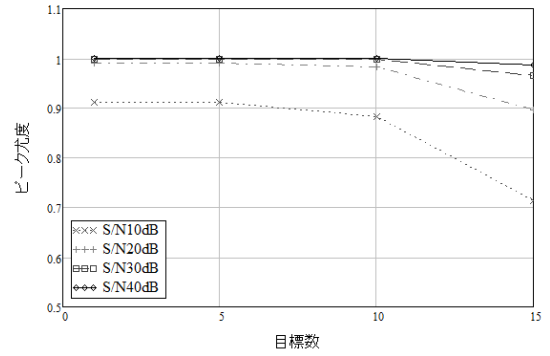


図 8. 一目標尤度平均のピーク尤度 (スペクトル推定誤差考慮あり)

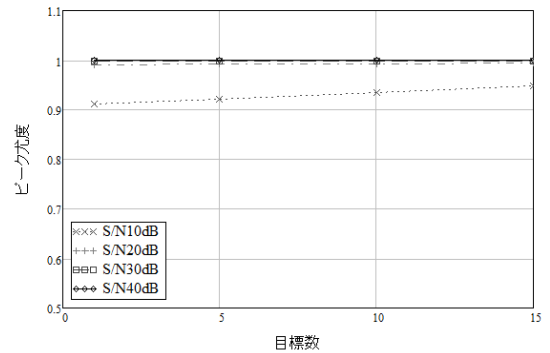


図 9. 一目標尤度平均のピーク尤度 (スペクトル推定誤差考慮なし)

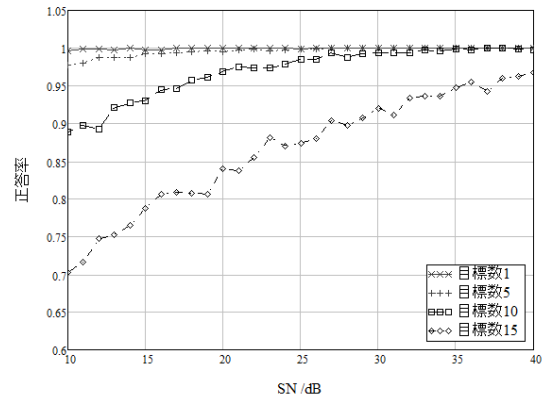


図 10. 一目標尤度平均における目標数の正答率

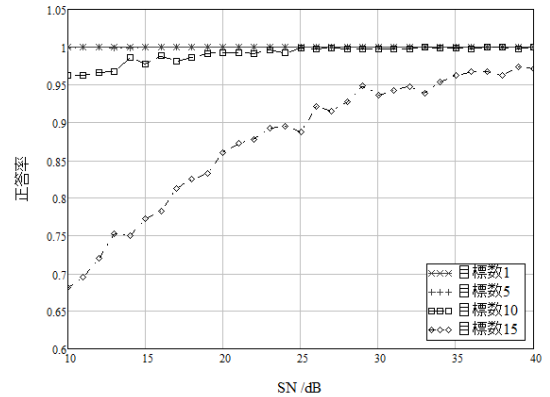


図 11. 全目標尤度における目標数の正答率

5. むすび

本稿では、再帰的信号減算周波数推定法の一連の処理で各目標の尤度値が算出されることに着目し、目標毎の尤度値の平均をとった尤度平均値（一目標尤度平均）を目標数推定の評価指針に活用する手法を検討した。また、再帰的信号減算周波数推定法そのものとは切り離して目標数推定の基本的構成の性能検討を行った。性能検討を行った結果、目標数が10以下かつS/Nが30dB以上のとき、目標数推定の正答率がほぼ1となった。また、目標の誤検知をする再帰的信号減算周波数推定法の改善時における一目標尤度平均の理想値を示した。

今後は、本稿での目標数推定を再帰的信号減算周波数推定法と組み合わせて性能検討し、理想値をもとに再帰的信号減算周波数推定法を改善する予定である。

謝辞

本研究開発は総務省 SCOPE(受付番号 195003009)の委託を受けたものです。

引用文献

- [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, 2006.
- [2] 福島冬樹, 稲葉敬之, “多周波ステップ ICW 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, 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, no.3, pp.285-291, 2015.
- [4] 稲葉敬之, 荒木純道, “マルチパス環境での低高度レーダ目標の高度推定法の検討,” 信学論(B), vol.J86-B, no.8, pp.1620-1628, 2003.
- [5] 山口和樹, 渡辺一宏, 秋田学, 稲葉敬之, “再帰的信号減算周波数推定法の基本特性の評価と多周波ステップ CPC への適用の検討,” 信学技報 SANE2018-48, vol. 118, no. 239, pp. 23-28, 2018.
- [6] 渡辺一宏, 秋田学, 稲葉敬之, “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高分解能測距方式の検討,” 信学技報, vol.117, no.346, WBS2017-67, pp.179-184, 2017.
- [7] 秋田学, 稲葉敬之, “再帰的波形減算周波数推定法を前処理とした多周波ステップレーダにおける近接角度分離法,” 信学技報 WBS2019-8, vol. 119, no. 26, pp. 41-45, 2019.