

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

秋田学, 稲葉敬之†

† 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: akita@uec.ac.jp

あらまし 次世代の車載レーダ等では、複数の目標が存在する環境下において距離、速度だけでなく角度の情報が得られることが求められる。しかし車載レーダでは小型・軽量かつ低コストが要求されるため用いることが可能なアレーアンテナの素子数は限定される。このような背景のもと、筆者らは、超分解能法である MUSIC による距離推定後に注目目標信号以外を距離により射影変換する処理を前処理として、近接目標の角度分離を簡素なモノパルス測角で可能とすることを示した。一方で筆者らは、多周波ステップ方式における距離推定法として、信号減算と周波数推定の両処理を再帰的に行う再帰的信号減算周波数推定法を提案している。本手法は MUSIC と比較して、低い S/N 環境下、また少ないスナップショットにおいても良好な距離推定精度が期待される。本稿では、モノパルス測定の前処理として行っていた MUSIC とシグナルコピーの処理を再帰的信号減算周波数推定法に置き換えた信号処理を提案する。本手法の有効性についてシミュレーションにおいて定量的に評価する。

キーワード 多周波ステップレーダ, 再帰的信号減算周波数推定法, 超分解能, モノパルス測角

Angle Estimation Method in Stepped Multiple Frequency Radar with Pre-processing of Iterative Signal Subtraction and Frequency Estimation Method

Manabu Akita, Takayuki INABA †

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

1-5-1 Choufugaoka, Choufu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

E-mail: akita@uec.ac.jp

Abstract It is required for automotive radar to obtain not only the target range and velocity but also angle information on the multiple target situations. However, the number of array elements is limited because the size and cost are hoped to be small and low for automotive radar. From the background, we have indicated that the angles of multiple targets existing in close angle were obtained by the simple mono-pulse angle estimation after the range estimation by MUSIC and the subsequent projection transform. We have also proposed the range estimation method of the iterative signal subtraction and frequency estimation that estimates the target range and signal subtraction iteratively in stepped multiple frequency modulation. This method is expected to obtain range estimation accuracy even in the relatively low S/N ratio situation and small number of snapshots. In this article, we propose the signal processing where the MUSIC and signal copy is replaced by the iterative signal subtraction and frequency estimation processing. The proposed method are verified by computer simulations.

Keywords Multiple Frequency Stepped Radar, Iterative Signal Subtraction and Frequency Estimation, Super Resolution, Mono-pulse Angle Estimation

1. まえがき

次世代の車載レーダ等では複数の車両や人物等が存在する環境において距離と速度だけでなく角度を高分解能でリアルタイム計測することが期待される。車載レーダ装置は小型・軽量かつ低コストが要求されるため、アレーアンテナの受信素子数は少なく、信号処理負荷が小さい構成が望ましい。このため、前方を走行する複数車両の角度分離を行う必要がある場合にも、ビーム幅の狭い、すなわち開口の大きいアンテナを採用することが難しい。このような背景のもと当研究室

では狭受信機帯域幅で高分解能を実現する独自の変復調方式である多周波ステップ CPC 方式[1]を用いたミリ波帯多周波ステップ CPC 方式リアルタイムレーダ（以下、多周波ステップ CPC ミリ波レーダ）[4]を開発している。多周波ステップ CPC 方式は、合成帯域法と CPC パルス圧縮を複合した方式である。本方式では測角の前処理として目標を距離と速度で分離することで、開口の小さいアンテナにおいても近接する目標の角度分離を可能とし、車載ミリ波レーダシステム全体における測角処理の計算負荷の低減が図られている[2]。多周波ステップ CPC 方式において、複数目標が同一ビー

ム内に存在し、通常のパルスドップラフィルタ処理と合成帯域処理により目標を速度と距離で分離できない場合の対処として、合成帯域法を超分解能法である MUSIC に置き換え、これによる距離推定後に注目目標信号以外を BM 減算する処理を前処理として、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[3][4][5]。一方で筆者らは、多周波ステップ方式における距離推定法として、信号減算と周波数推定の両処理を再帰的に行う再帰的信号減算周波数推定法を提案している[6][7][8]。本手法は MUSIC と比較して、低い S/N 環境下、また少ないスナップショットにおいても良好な距離推定精度が期待される。本稿では、モノパルス測定の前処理として行っていた MUSIC とシグナルコピーの処理を再帰的信号減算周波数推定法に置き換えた信号処理を提案する。本手法の有効性についてシミュレーションにおいて定量的に評価し、実験的に検証を行う。

2. 再帰的信号減算周波数推定法を前処理とした多周波ステップ CPC 方式における角度推定法

2.1. 信号処理ブロック図

筆者らが提案する多周波数ステップ CPC 方式は、CPC パルス圧縮と合成帯域法を複合した新しいレーダ変調方式である。時分割で2つの相補符号の送信と複数個の送信周波数切り替えを行う。時分割送信によるドップラシフトに対する位相補正処理を行い、相補の CPC 受信信号の加算により距離サイドローブを抑圧、さらに、複数ステップの周波数方向に合成帯域することにより、送信帯域幅と比較して狭受信機帯域幅で高距離分解能を得る。受信信号は、送信信号とミキシング後 LPF を通過した後、A/D 変換器でサンプリングされる。各 PRI の受信信号に対してパルス圧縮、同一レンジビンに対してパルスドップラフィルタ処理をした後、ドップラによる位相回転を補償する処理、CPC の加算処理を行う。CPC 加算処理処理結果を用いて周波数（距離）推定と信号減算の両処理を再帰的に行う再帰的信号減算周波数推定法を実施し、信号を各目標に

対応する信号成分に分離した後に、モノパルス測角処理を実施する。

2.2 2. 再帰的信号減算周波数推定法を前処理とした多周波ステップ CPC 方式における角度推定法信号処理

2.2.1 パルス圧縮

A/D 変換後の受信信号を各 CPC 符号系列 ($code=0,1$)、各周波数ステップ ($n=0,1,\dots,N-1$)、各パルス ($m=0,1,\dots,M-1$)、各レンジビン ($s=0,1,\dots,S-1$) に分割された受信信号 $R[code,n,m,s]$ に対して参照信号 $Ref[s]$ (送信パルス波の時間反転複素共役) による畳み込み (パルス圧縮) を行う。

$$PC[code,n,m,s] = \mathfrak{F}^{-1}(\mathfrak{F}(R) \cdot \mathfrak{F}(Ref)) \quad (1)$$

2.2.2 パルスドップラフィルタ

式(1)より PRI 毎に得られるパルス圧縮出力に対して、パルスヒット方向にフーリエ変換を施す。

$$PD[code,n,m,s] = \sum_{k=0}^{M-1} PC[code,n,m,s] \cdot \exp\left(-2\pi j \cdot \left(\frac{m}{M}k\right)\right) \quad (2)$$

2.2.3 位相補償と CPC 加算処理

距離サンプル信号に対し、ドップラによる位相回転を補正する位相補償 (Phase Compensation) 処理を行う。

$$PHC[code,n,m,s] = PD \cdot \exp\left\{2\pi j \frac{m}{2MN \cdot PRI} (s + PRI \cdot (2n + code))\right\} \quad (3)$$

周波数ステップ毎に得られる速度・距離マップについて CPC 符号系列の和をとる (CPC 加算処理)。

$$ADD[n,m,s] = \sum_{code=0}^1 PHC[code,n,m,s] \quad (4)$$

式(2)および式(3)より、ドップラ位相補償を備える CPC 符号のパルス圧縮より優れた距離サイドローブ特性をもつレンジプロファイルが得られる。

2.2.4. 再帰的信号減算周波数推定法

再帰的信号減算周波数推定法は最尤推定を基本とした多目標推定アルゴリズムであり、図1に示すように信号減算処理、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、複素振幅推定処理、目標数 Count Up ループからなる一連の処理で構成される。信号減算処理は、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

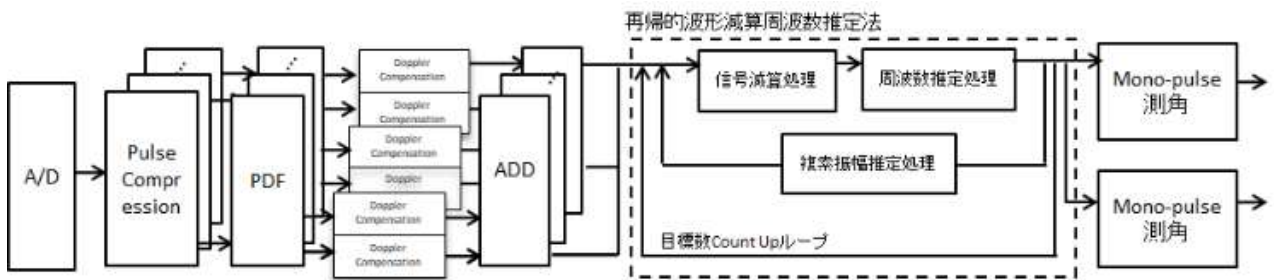


図1 再帰的信号減算周波数推定法を前処理とした多周波ステップレーダにおける近接角度分離法信号処理ブロック図

減算する.

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

周波数推定処理では式(5)で求めた減算後の信号 $\widehat{\mathbf{xc}} \in \mathbf{C}^N$ を用い、式(6)によって与えられる尤度関数 $LH(r)$ 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)).

$$LH(r) = \frac{\mathbf{a}(r)^H \cdot \widehat{\mathbf{xc}} \cdot \widehat{\mathbf{xc}}^H \cdot \mathbf{a}(r)}{\mathbf{a}(r)^H \cdot \mathbf{a}(r)} \quad (6)$$

$$\widehat{R}_i = \underset{r}{\operatorname{argmax}} LH(r) \quad (7)$$

複素振幅推定処理では、式(7)で求めた \widehat{R} を用いて更新した式 \mathbf{A} により、全目標の複素振幅 $\alpha \in \mathbf{C}^K$ を推定する.

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

目標数 Count Up ループは、目標数を 1 と限定してからはじめ、その推定距離が収束した後に順次目標数を 1 ずつ増やしながら複数目標の推定を行う。これによって振幅の大きい目標の推定誤差が、振幅の小さい目標に与える影響を回避することが期待できる。具体的な処理フローを 2 に示す。

for $K = 1, 2, \dots, K_{max}$

repeat

for $k = 0, 1, \dots, K - 1$

$i = K - k$

$$\widehat{\mathbf{xc}} = \mathbf{z} - \sum_{p, p \neq i}^{K-1} \mathbf{a}(\widehat{R}_p) \alpha_p$$

$$\widehat{R}_i = \underset{r}{\operatorname{argmax}} LH(r)$$

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\widehat{R}_0), \mathbf{a}(\widehat{R}_1), \dots, \mathbf{a}(\widehat{R}_{K-1})]$$

$$\widehat{\alpha} = (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \cdot \mathbf{z}$$

end for

until (convergence)

end for

図 2 再帰的信号減算周波数推定の処理フロー

2.2.5 モノパルス測角処理

角度推定は一般的なモノパルス測角処理で行われる。 $\Sigma_b(t)$ 、 $\Delta_b(t)$ を用いて目標の角度推定値を算出する。

$$\Delta \hat{\theta}_b \cong k \operatorname{Im} \left(\frac{\Delta_b(t)}{\Sigma_b(t)} \right) \quad (9)$$

3. 計算機シミュレーション

3.1 レーダパラメータと目標条件

本手法の有効性について定量的に評価するために計算機シミュレーションを行う。本シミュレーションでは、表 1 に示すように筆者らの研究グループが開発した 60GHz/79GHz 帯多周波ステップ CPC ミリレーダのレーダパラメータを用いる。表 2 に、本シミュレーションに用いた目標パラメータを示す。シミュレーションでは、ADC 入力時の S/N (目標の振幅) および解析に用いるスナップショットを表中に示すように変化させる。なお、各目標に与える位相は、各スナップショット間、各試行間でランダムとする。

3.2 シミュレーション結果

図 3 に、モノパルス測角前段の MUSIC および再帰的波形減算周波数推定法による距離推定結果の標準偏差を示す。図 3 より、S/N が良好かつスナップショット数が多いとき、両者は同程度の距離推定精度であることがわかる。一方、低 S/N またはスナップショット数が小さい条件では、再帰的波形減算周波数推定法が MUSIC と比較して良好な距離推定精度であることがわかる。図 4 に、MUSIC+MP および再帰的波形減算周波数推定法+MP の両手法による角度推定結果の標準偏差を示す。角度推定結果の標準偏差も、距離推定結果の標準偏差と同様の傾向が確認される。

表 1 計算機シミュレーションにおけるレーダパラメータ

Radar Parameters	Specifications
Transmit frequency	79.00-79.35GHz
Pulse bandwidth	80MHz
Code length	16
Number of codes	2
consisting sequence set :CODE	
Pulse Repetition Interval (PRI)	3.5μsec
Number of Sequence Repetition: M	128
Frequency step width	50MHz
Frequency step number: N	8
Transmission bandwidth	430MHz
Observation time (CPI)	7.5msec × Snapshot(1-8)
A/D sampling frequency	160MHz
Range Resolution (Transmission bandwidth)	0.34m
Number of Transmission	1
Number of Receivers	4
Interval of Receivers	0.8λ

表 2 計算機シミュレーションにおける目標パラメータ

Target Parameters	Range	Velocity	Angle	S/N (@ADC)
Target 1	18.75m	4km/h	1deg	-34~-19dB
Target 2	18.92m	4km/h	-1deg	-34~-19dB

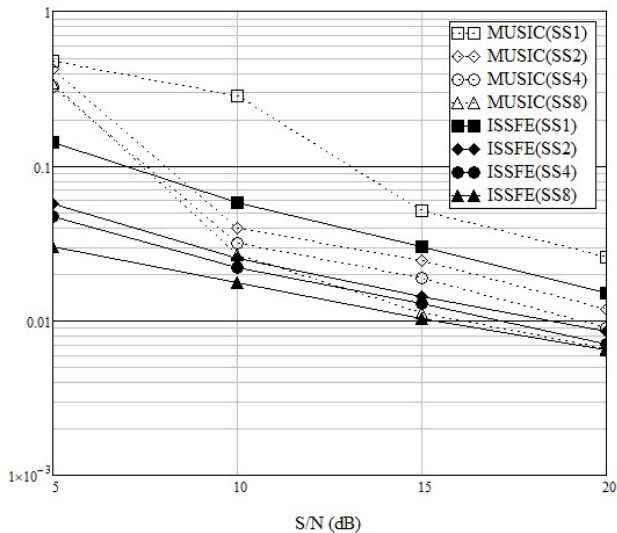


図 3 MUSIC および再帰的波形減算周波数推定法による距離推定結果の標準偏差

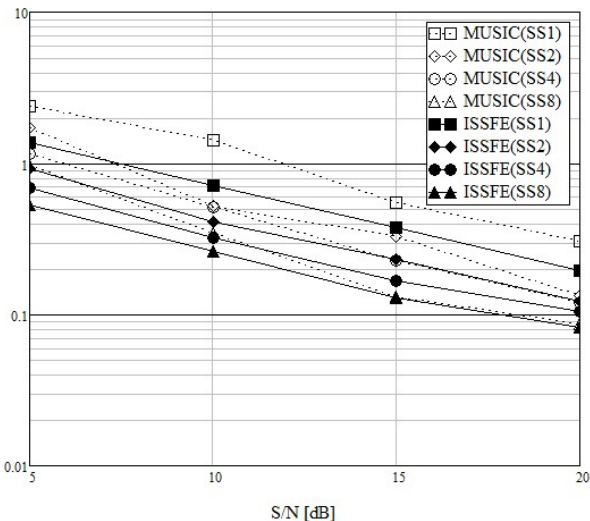


図 4 各手法による角度推定結果の標準偏差

実験的検証

3章で示したシミュレーションと同様のレーダパラメータを使用して電波暗室で実施した。実験で使用した多周波ステップCPCレーダは4個の受信素子からなるアレイアンテナを有する。DBFによる4つの要素のビーム幅は13度である。実験では、10 dBsmの2つのコーナリフレクターを用いる。目標条件を表6に示す。図5に示すように、アクチュエータを用いて2つのコーナリフレクタをシミュレーションと同様に17cmの同じ距離差を保ちながら4km/hの同じ速度で移動させる。本実験条件におけるA/D入力S/Nは約-3dB(再帰的波形減算周波数推定法の入力段におけるS/Nは信号処理利得39dBにより36dB)となる。上記の実験は同じ条件において32回計測した。

図6に実験データに対する再帰的波形減算周波数推定法による距離推定結果の一例を示す。図6から、2つの目標が、それぞれ19.290mと19.092mと推定される。再帰的波形減算周波数推定法の出力を用いて、2つの目標の角度はモノパル

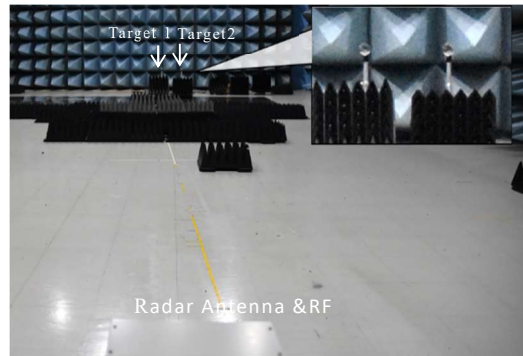


図 5 多周波ステップCPCミリ波レーダを用いた電波暗室における実験

表 6 実験における目標パラメータ

Target Parameters	Range	Velocity	Angle
Target 1	18.67-20.27m	4km/h	-1.0 deg
Target 2	18.50-20.10m	4km/h	1.0deg

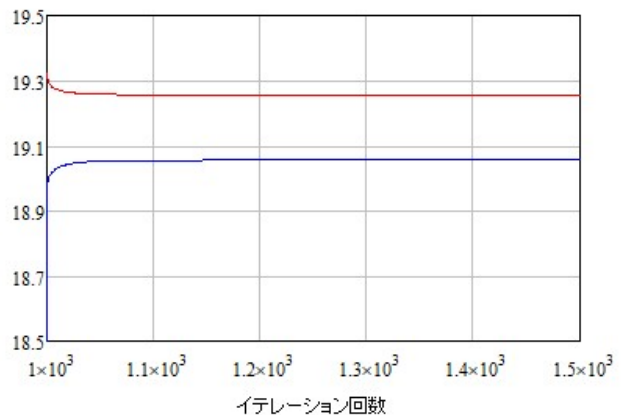


図 6 実験データに対する再帰的波形減算周波数推定法による距離推定結果の一例

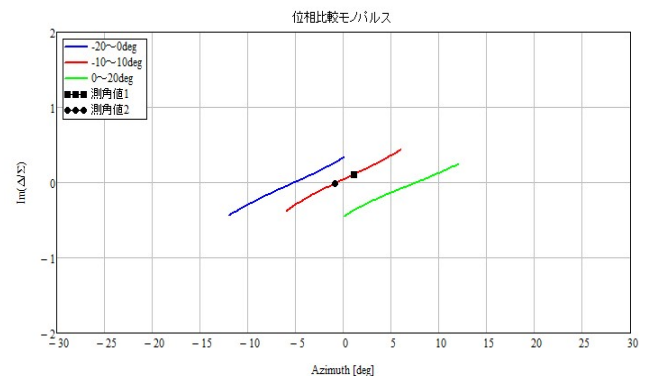


図 7 実験データに対するモノパルス測角結果の一例

表 7 実験による再帰的波形減算周波数推定法+MP による距離および角度推定結果

距離推定精度	
推定距離差平均値	0.188 m
推定距離差標準偏差	0.027
角度推定精度	
推定角度差平均値	2.08 deg
推定角度差標準偏差	0.23

ス測角処理によりそれぞれ図 7 に示すように -0.8 度と 1.1 度と求められる。表 7 に、32 回の計測データに対する再帰的波形減算周波数推定法+MP による距離および角度推定結果を示す。以上より、本手法は実験においても近接角度および距離にある 2 つの目標を分離できていることが示される。

図 8 に、表 1 に示すレーダパラメータと同一のパラメータを採用して試作した 79GHz 帯ミリ波レーダにおける再帰的波形減算周波数推定法による距離推定結果(目標距離差 17cm)の一例を示す。79GHz 帯においても 60GHz 帯レーダと同様に 2 つの目標が同法により、同法におけるイテレーションの最終段において分離されていることが確認される。

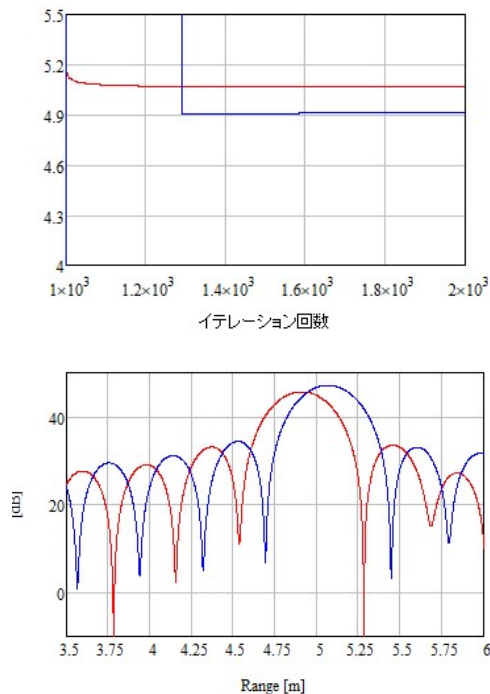


図 8 79GHz 帯ミリ波レーダの計測データに対する再帰的波形減算周波数推定法適用結果

4. むすび

本稿では、モノパルス測定の前処理として行っていた MUSIC とシグナルコピーの処理を再帰的的信号減算周波数推定法に置き換えた信号処理を示した。本手法の有効性についてシミュレーションにおいて定量的に評価した。計算機シミュレーション結果より、S/N が良好かつスナップショット数が多いとき、MUSIC+MP および再帰的波形減算周波数推定法+MP は同程度の距離推定精度および角度推定精度であることがわかる。一方、低 S/N またはスナップショット数が小さい条件では、再帰的波形減算周波数推定法が MUSIC と比較して良好な距離推定精度および角度推定精度を有することを示した。また、電波暗室における基礎実験結果を示した。

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] 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
- [2] 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, "多周波ステップ CPC レーダの鉄道環境への応用のための基礎実験", 電気学会論文誌 D, vol135, no.5, 2015
- [3] 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
- [4] M. Watanabe, M. Akita, T. Inaba, "Angle Estimation Method using Blocking Matrix in Stepped Multiple Frequency Complementary Phase Code Modulation", IEICE Technical Report, vol.116, no.319, pp.121-126, 2016
- [5] Manabu Akita, and Takayuki Inaba, "Angle Estimation using Super Resolution and Blocking Matrix in Stepped Multiple Frequency Complementary Phase Code Radar", 2018 IEEE Radar Conference, Oklahoma City, USA, April, 2018
- [6] 稲葉敬之, 渡辺一宏, 秋田学 "超広帯域多周波ステップレーダにおける再帰的的信号減算周波数推定法を用いた自動検知法", 信学技報 SANE2018-114, vol. 118, no. 441, pp. 25-30, 2019/02
- [7] 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目標推定距離精度の評価", 信学技報 SANE2018-49, vol. 118, no. 239, pp. 29-34, 2018/10
- [8] 山口和樹, 渡辺一宏, 秋田学, 稲葉敬之, "再帰的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, 2018/10