

多周波ステップCPCミリ波レーダにおける 最尤推定法を用いた到来方向推定

山下 遼 渡辺 優人 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: yamashita.ryo@inabalab.ee.uec.ac.jp

あらまし レーダにおける到来方向推定法としてモノパルス測角処理がよく知られている。モノパルス測角処理は車載レーダにおいても多く用いられているが、遠方目標からの微小反射波を検知する必要がある一方で近距離側方のガードレールや建造物、並走車両などの広角強反射波を誤測角し、システムの誤作動を招く危険性がある。多周波ステップCPCミリ波レーダでは、速度検出しその信号から距離検出を行う。距離検出結果から最後に角度検出を行う処理構成であり、誤作動は確率的に起こりにくい変調方式である。しかし、本稿では多周波ステップCPCミリ波レーダにおける角度誤検知の低減を目的として、モノパルス測角処理に加え、最尤推定法を測角処理として組み込むことを提案し、実験的にその有効性を明らかにする。

キーワード 車載レーダ, 到来方向推定, モノパルス測角処理, 最尤推定法, 多周波ステップCPCミリ波レーダ

DOA Estimation Using Maximum Likelihood Estimation in Stepped Multiple Frequency CPC Radar

Ryo YAMASHITA Masato 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: yamashita.ryo@inabalab.ee.uec.ac.jp

Abstract Monopulse angle estimation is often used as a direction of arrival (DOA) estimation. Although monopulse angle estimation is often used also in automotive radar, lead to malfunction of the system by erroneous measurement that wide angle of strong reflectors such as guardrails buildings, and the parallel running vehicle of the side is a target of the front. Stepped multiple frequency CPC radar performs a range detection from the signal after it detects the velocity. Then it performs DOA estimation, so malfunction it is hardly modulation probabilistic. But, this paper describes angle measuring process using not only monopulse angle estimation but also maximum likelihood estimation which is intended to reduce false detection of a wide-angle objectives and experimental results by stepped multiple frequency CPC radar.

Keyword Automotive radar, DOA estimation, Monopulse angle estimation, Maximum likelihood estimation, Stepped Multiple Frequency CPC Radar

1. まえがき

衝突被害軽減ブレーキ用センサとして車載レーダが普及しようとしている。しかし車載用レーダ装置は小型・軽量かつ低コストが要求されるため、角度計測に柔軟性を持たせるためにアレーアンテナとさせる場合にも受信素子数は少なくなる。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。

そこで測角の前処理として目標の距離と速度検出を行い、目標を距離と速度で分離しておくことで、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すると共に、車載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[1]。これにより到来方向推定法として計算の簡素なモノパルス測角処理を用いても多目標環境下での角度計測が可能である。しかしながら車載レーダは遠方目標からの微小反射波を検知する必要がある一方で近距離側方のガードレールや建造物、並走車両などのモノパルス測角処理の覆域外となる広角の強反射波(以下、広角目標)の距離・速度を検出した場合に、正面の目標物として誤測角し、システムの誤作動を招く危険性がある。

筆者らが提案している多周波ステップ CPC 方式[2]は FMCW 方式と異なり, 多目標環境下においても高い振幅アイソレーションを保持しており, ペアリング誤作動なく遠近の多目標の距離・速度計測が可能であり, 送信帯域幅と比較して狭受信機帯域幅にて高距離分解能を得ることが可能である. また多周波ステップ CPC 方式を変調方式としてリアルタイムで計測可能な多周波ステップ CPC ミリ波レーダを開発している[3][4]. 多周波ステップ CPC ミリ波レーダは高距離分解能を持つことから, 同一距離の同一ビーム幅相当に存在する目標は1目標であることが多いと考えられ, モノパルス測角処理を用いているが, 同様に広角目標の誤測角が課題となりえる.

以上の背景より, 本稿ではモノパルス測角処理における広角目標の誤検知を低減するために, モノパルス測角処理に加え, 最尤推定法 (Maximum Likelihood Estimation, 以下 MLE) を併用する測角処理を提案する. 文献[1]においては通常の測角処理をモノパルス測角処理とし, ビーム内に多目標と判定された場合のみに MLE を用いているが, 本稿は MLE の出力値から広角目標の可能性を判断する. また多周波ステップ CPC ミリ波レーダを用いた電波暗室試験により, 本測角処理の性能確認を行う.

2. 多周波ステップ CPC ミリ波レーダ

多周波ステップ CPC ミリ波レーダの外観図を図1に示す. 本装置は送受信装置 RF 部, IF 部および信号処理装置から構成され, 表1, 表2に示すようにミリ波特定小電力無線機規格(送信周波数 60.0~61.0GHz の 500MHz 以内, 送信電力 10mW, アンテナ利得 40dBi)を満足する仕様である. RF 部および IF 部は送信アンテナにスロットアンテナ, 利得は 22dBi, 受信アンテナに4素子スロットアレーアンテナを備え, 偏波は水平偏波を採用している. IF は周波数ステップを実現するために送信周波数を高速で切り替える構成である.

図2に多周波ステップ CPC 方式の送信シーケンスを示す. 周波数ステップ数を N とし, これらを観測時間内に M 回繰り返す送信周波数シーケンスを用いる. 本方式は以下に示す(a)(b)(c)を特徴とする.

(a)同じ送信周波数同士の受信信号に対してフーリエ変換を適用することにより, 速度分解能の低下なくドップラ周波数(すなわち目標速度)を推定することが可能である.

(b)2つの相補となる CPC 符号(Complimentary Phase Code)を用いたパルス圧縮, ドップラ補正による高い距離サイドローブ抑圧性能を有する.

(c)周波数ステップ方向に受信信号を合成(合成帯域処理)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られる.

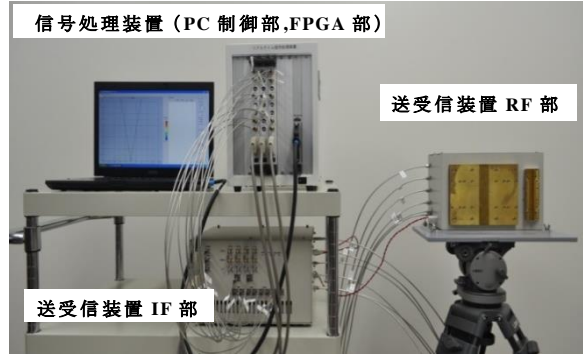


図1. 多周波ステップ CPC ミリ波レーダ外観図

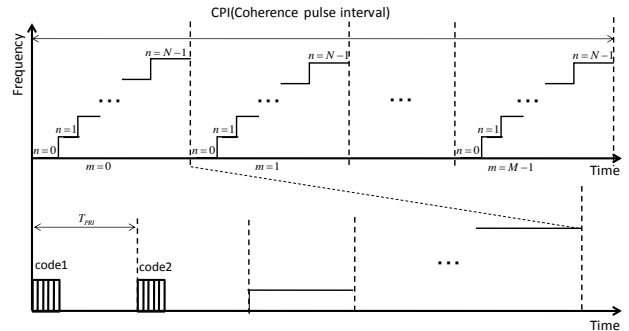


図2. 多周波ステップ CPC 方式送信シーケンス図

表1 レーダ装置構成・仕様

送信電力	10mW
切替周波数	8ch
周波数切替時間	100nsec 以下
アンテナ方式	送信: 1 素子導波管 スロットアンテナ (送信ファンビーム覆域: $\pm 20\text{deg}$) 受信: 4 素子導波管 スロットアレーアンテナ (素子間隔: $0.8\lambda=3.96\text{mm}$)

表2 レーダパラメータ一覧

送信周波数	60.5GHz
パルス帯域幅	80MHz
パルス幅	0.2 μsec (30m)
符号長	16
パルス繰り返し間隔 (PRI)	3.5 μsec
パルス数 M	512
周波数ステップ幅	50MHz
周波数ステップ数 N	8
(最大速度視野)	($\pm 79.64\text{km/h}$)
送信帯域幅	430MHz
(距離分解能)	(0.35m)
観測時間	28.6msec
(速度分解能)	(0.311km/h)
A/D サンプリング周波数	160MHz

以上より車載レーダ等で要求される観測時間および周波数帯域幅の制約の中で高い振幅アイソレーションを保持しつつ、ペアリングなく複数目標の距離・速度が計測可能であり、送信帯域幅と比較して狭受信機帯域幅で高距離分解能が得られる。

図3に多周波ステップCPC方式の信号処理概要を示す。多周波ステップCPCミリ波レーダでは、各アンテナ素子の受信信号はA/D変換され、FPGA部(Virtex5 FPGA)にて、ドップラ推定処理、CPCパルス圧縮、合成帯域処理を経て、アンテナ素子毎に距離-ドップラマップが作成され、このマップに対しCFAR等の閾値処理が施される。全アンテナで閾値を超えた距離・ドップラビンおよび各アンテナの複素振幅に対し、アンテナ校正を行ったものが多周波ステップCPCミリ波レーダの測角処理の入力信号となる。

3. モノパルス測角処理と最尤推定法を併用した到来方向推定

3.1. モノパルス測角処理

距離・速度検出処理後に、特定の距離と速度の目標数が1のとき、目標反射波(到来角 θ)を各アンテナ素子で計測した素子方向データベクトルは

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t) \ x_2(t), \ \dots, \ x_L(t)]^T = \mathbf{a}(\theta)S(t) \quad (1)$$

と書かれる。ここで $\mathbf{a}(\theta)$ は到来方向による信号位相差を表すベクトルであり、アンテナがリニアアレーである場合

$$\mathbf{a}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d\sin\theta} & \dots & e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(L-1)d\sin\theta} \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

と書かれる。ここで、 L 、 d 、 λ はそれぞれアレー素子数、素子間隔、送信波波長を表す。また $S(t)$ は目標反射波、 \mathbf{T} は行列の転置を表す。

式(1)の素子方向データベクトルを用いて送信ファンビームの覆域内に受信マルチビームを形成する(MBF; Multi-Beam Forming)。ビーム指向方向の番号を b とすると

$$\mathbf{w}_{\Sigma_b} = \mathbf{a}(\theta_b) \quad (3)$$

をウェイトベクトルとして

$$\Sigma_b(t) = \mathbf{w}_{\Sigma_b}^H \mathbf{X}(t) \quad (4)$$

にて、各和ビーム信号が得られる。ここで H は複素共役転置を表す。これら各和ビーム $\Sigma_b(t)$ に対し閾値処理を行い、閾値を超えたビーム指向方向 b の $\mathbf{a}(\theta_b)$ を用い、

$$\mathbf{w}_{\Delta_b} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}}_{L/2} \underbrace{\begin{bmatrix} -1 & -1 & \dots & -1 \end{bmatrix}}_{L/2} \circ \mathbf{a}(\theta_b) \quad (5)$$

をウェイトベクトルとして、式(6)に示す差ビーム $\Delta_b(t)$ を合成する。なお \circ はSchur Hadamard Productである。

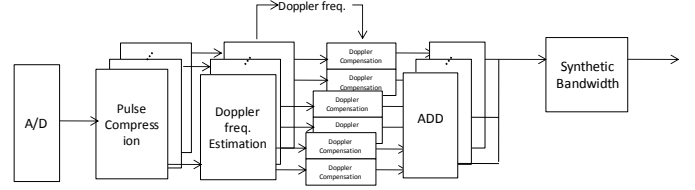


図3. 多周波ステップCPC方式信号処理概要

$$\Delta_b(t) = \mathbf{w}_{\Delta_b}^H \mathbf{X}(t) \quad (6)$$

(位相比較)モノパルス測角処理ではこの $\Sigma_b(t)$ 、 $\Delta_b(t)$ を用いて目標の角度推定値を算出する。ビーム指向方向に1目標である場合、

$$\Delta \hat{\theta}_b \cong k \operatorname{Im} \left(\frac{\Delta_b(t)}{\Sigma_b(t)} \right) \quad (7)$$

のモノパルス測角値から目標の角度推定値が、ビーム指向方向 θ_b からの角度差 $\Delta \hat{\theta}_b$ として得られる。ここで

k は比例定数である。式(4)の合成はアレーの前半と後半の加算であり、式(6)の計算はそれらの差であるため、計算としては簡素なものである。また式(7)の計算量は無視できるほど小さなものである。

3.2. 最尤推定法(MLE)に基づく測角処理

特定の距離と速度の目標数が K であるとする、このときの受信信号データベクトル $\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{L \times T}$ は、

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S} = [\mathbf{a}(\theta_1) \ \mathbf{a}(\theta_2), \ \dots, \ \mathbf{a}(\theta_K)] \cdot \mathbf{S} \quad (8)$$

と書かれる。ここで $\mathbf{S} \in \mathbb{C}^{K \times T}$ は信号行列を表し、 T はスナップショット数である。MLEではこの受信信号データベクトル \mathbf{X} を用いて、以下の評価関数の最大値(尤度)探索から目標の角度を求めることができる[5]。

$$\Theta(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K) = \arg \max_{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K} \left[\operatorname{trace} \left[\mathbf{A}(\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{X} \mathbf{X}^H \right] \right] \quad (9)$$

ここで $\operatorname{trace}[\mathbf{M}]$ は行列 \mathbf{M} の対角要素の和を返す関数であり、また $\mathbf{A}(\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H$ の部分は事前に計算しておきテーブルとして準備でき、リアルタイムでの演算は不要である。

3.3. 提案する到来方向推定

図4に本稿で提案するモノパルス測角処理とMLEを併用する到来方向推定の系統図を示す。本測角処理は、受信素子数の少なくビーム幅の広いアレーアンテナを用いる車載レーダにおいて、距離・速度検出を前処理とすることで多くの場合に同一距離・速度の同一ビーム幅内には1目標であることを前提とし、簡素な計算処理にて送信ファンビーム覆域外の広角目標を誤

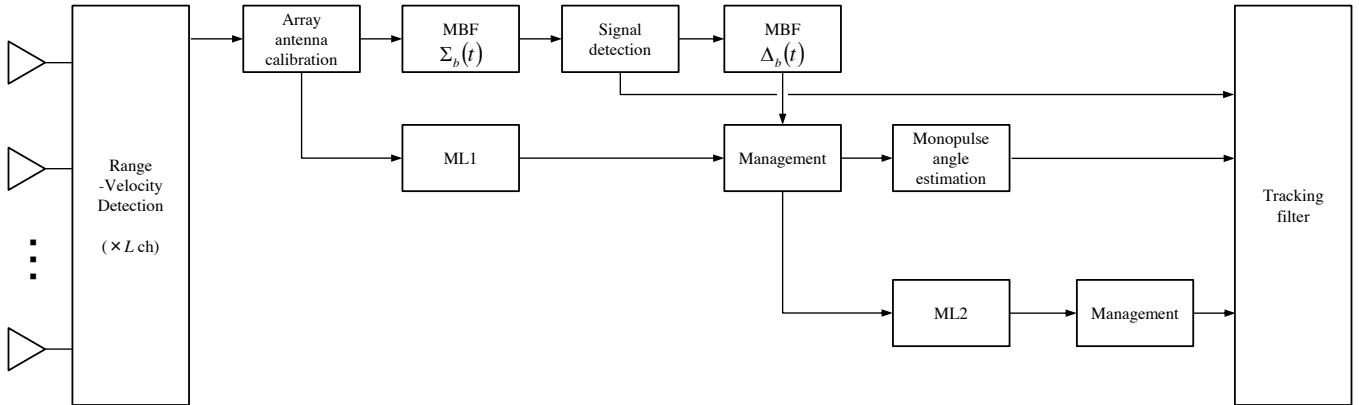


図 4. 提案する到来方向推定の系統図

検知せず、正面方向の目標を検出する処理である。以下、提案する到来方向推定を説明する。

(i) 和ビーム形成と目標検出

距離と速度の特定された L チャンネルの複素振幅に対しアンテナ校正行列を乗算した後に、式(4)に表されるように送信ファンビーム覆域内にて和ビーム形成を行い、各和ビーム $\Sigma_b(t)$ に対し閾値処理を行う。目標検出の閾値設計に関しては文献[1]で述べられている。閾値処理にて検出が無かった場合、覆域外の広角目標として判断し、角度を不定状態として目標の距離-速度を後段の追尾フィルタへと入力する。閾値を超えた場合、そのビーム指向方向の差ビーム $\Delta_b(t)$ を式(6)より合成する。

(ii) 1 目標を探索する MLE(ML1)と目標判定処理

モノパルス測角覆域内 $\varphi_p < \theta < \varphi_q$ に 1 目標が存在すると仮定し、式(9)の MLE を行う (ML1)。ML1 により探索した $\varphi_p < \theta < \varphi_q$ の尤度により範囲内に目標が存在する可能性を、(i)にて計算した $\Sigma_b(t)$ 、 $\Delta_b(t)$ から

$$\text{Re} \left(\frac{\Delta_b(t)}{\Sigma_b(t)} \right) \approx 0 \quad (10)$$

により多目標判定処理[1]を行う。ML1 の尤度により広角目標と判定、または式(10)から多目標と判定された場合に (iii) の処理へ移行する。正面方向の 1 目標と判定された場合、位相比較モノパルス測角処理を行い、距離-速度-角度の情報を後段の追尾フィルタへと入力する。

(iii) 2 目標を探索する MLE(ML2)

モノパルス測角覆域内に 2 目標が存在すると仮定した MLE(ML2)を行う。ML2 の最大尤度に対し閾値処理を施し、閾値を超えた場合に最大尤度に対応する角度を出力する。閾値処理にて検出がない場合、覆域外の広角 1 目標あるいは 3 目標以上と判定し、角度を不定状態として目標の距離-速度を後段の追尾フィルタへと入力する。

以上に示したように、提案する到来方向推定は MLE をモノパルス測角処理と併用させることにより、距離と速度が特定された目標信号が覆域外からの到来波であるか、多目標であるかを判定し、判定結果毎に異なる測角処理を行うことで正面方向の目標のみを検知するよう動作する。また計算量が大きいことを課題にされる MLE を処理に組み込んでいるが、探索する目標数及び範囲を限定し、計算テーブルを事前に用意しておくことで、計算量の低減が図られる。また 3 目標以上への対処に関してだが、車載レーダの運用環境では目標との相対距離・速度・角度は時々刻々と変化し、ある CPI(Coherent Pulse Interval)において等距離・等速の多目標となったとしても、数 CPI 後には距離・速度の異なる独立した目標となる場合が多く、また距離と速度は測角の前処理で検出されているために追尾フィルタにより補間することが可能であるため、本稿の測角処理では 2 目標までの探索とする。

4. 実験的検証

図 5 に示すように電波暗室にてアンテナ回転台に多周波ステップ CPC ミリ波レーダを設置し、計測毎にアンテナ回転台を回転させることで移動 1 目標 (プラスチック製ボール) に対して提案する測角処理の性能確認実験を行った。目標の設置条件を表 3 に示す。またモノパルス測角処理及び MLE で使用したパラメータを表 4 に示す。

図 6~9 に、横軸を目標反射波の到来方向として、位相比較モノパルス処理の入力となるビーム指向方向の $|\text{Re}(\Delta/\Sigma)|$ 、位相比較モノパルス処理による角度推定結果、ML1 探索範囲内の最大尤度及びその最大尤度に対する ML1 角度推定結果を示す。

位相比較モノパルス処理の入力となるビーム指向方向の $|\text{Re}(\Delta/\Sigma)|$ について、図 6 より $-20 \leq \theta$ 、 $\theta \leq 20 \text{deg}$ に目標が存在するとき、 $|\text{Re}(\Delta/\Sigma)|$ が 0.1 より大きな値を取ることが分かる。3 章ではビーム内に多目標が存在する場合に $|\text{Re}(\Delta/\Sigma)|$ が 0 とならないと述べたが、これ



図 5. 実験風景 (アンテナ回転台設定 : 0deg)

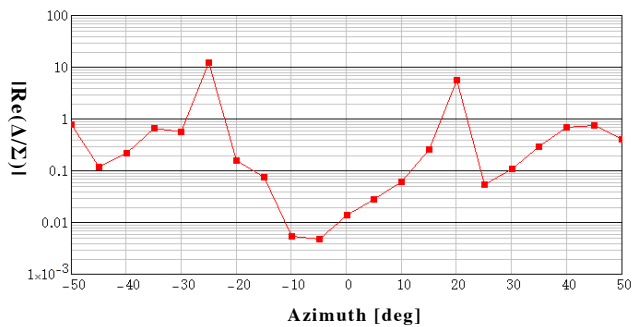


図 6. 位相比較モノパルス処理の入力となる
ビーム指向方向の $|Re(\Delta/\Sigma)|$

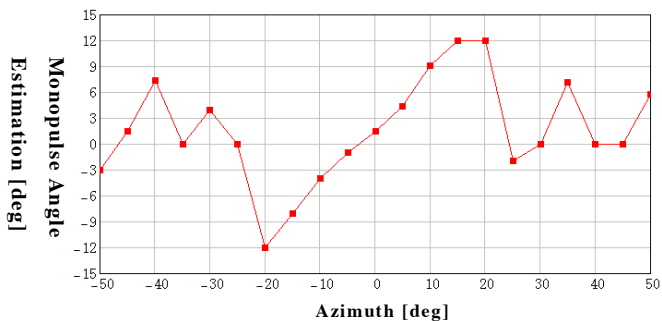


図 7. 位相比較モノパルス処理による角度推定結果

は多周波ステップ CPC ミリ波レーダ受信素子の振幅パターンが広角になるほど、素子間の振幅値に差が生じ、式(4)(6)の性質上、目標数が 1 である場合にも $|Re(\Delta/\Sigma)|$ が 0 に近づかないためである。

位相比較モノパルス処理による角度推定結果について、図 7 より $\theta = -20, 20\text{deg}$ 付近ではモノパルス測角覆域のリミットとなる値を算出しているが、それ以上の広角目標についてはモノパルス測角の折り返しが生じている。これよりモノパルス測角処理のみによる到来方向推定では、広角目標にも関わらず正面の目標として誤検知し、システムの誤作動を誘発する可能性があることは明白である。

ML1 探索範囲内の最大尤度について、図 8 より探索

表 3 実験諸元

目標距離	4~5.6 m
速度	4 km/h
角度 (到来方向)	-50~50 deg (5deg 刻み)

表 4. 測角処理パラメータ

ビーム指向方向	(-12, -6, 0, 6, 12) deg
モノパルス測角処理	位相比較モノパルス処理
モノパルス測角覆域	-12~12 deg
スナップショット数	1
ML1 探索範囲	-12~12 deg (1 目標, 1deg 刻み)
ML2 探索範囲	(-12~12 \wedge -12~12) deg (2 目標, 1deg 刻み)

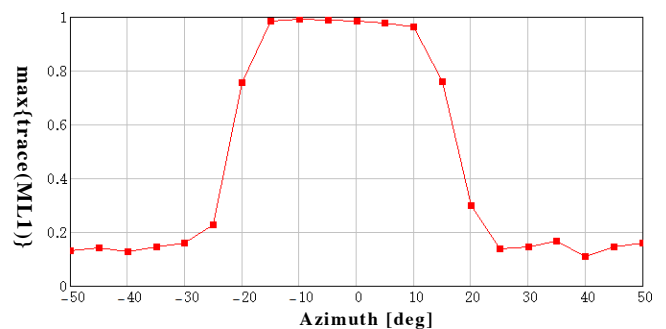


図 8. ML1 探索範囲内の最大尤度

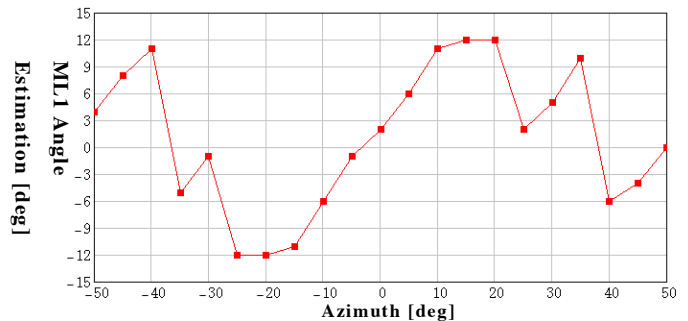


図 9. 図 8 の最大尤度に対する ML1 角度推定結果

範囲をモノパルス測角覆域に限定することで、広角目標の距離-速度が検出された場合においても、最大尤度から覆域内に目標が存在するか否かの判定が可能であることが分かる。

図 10, 11 に、横軸を目標反射波の到来方向として、ML2 探索範囲内の最大尤度及びその最大尤度に対する ML2 角度推定結果を示す。

図 10 より $-20 \leq \theta \leq 20\text{ deg}$ に目標が存在するとき、ML2 探索範囲内の最大尤度が 0.9 以上という大きな値を取っていることがわかる。図 11 より ML2 で推定される角度は目標到来方向付近の 1 目標を示していることから、ML2 探索範囲内に 1 目標が存在するとき高い尤度が目標到来方向付近に分布することが分かる。

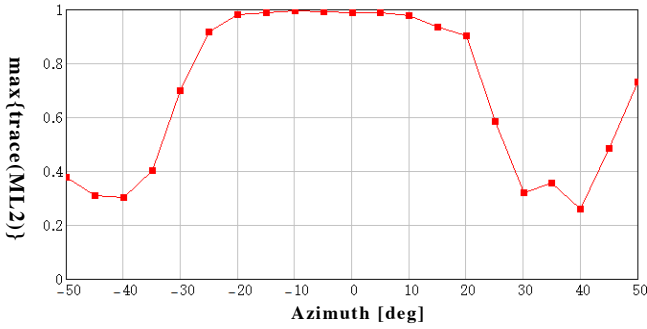


図 10. ML2 探索範囲内の最大尤度

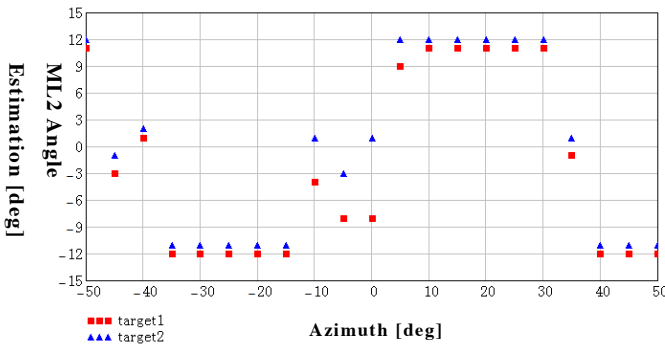


図 11. 図 10 の最大尤度に対する ML2 角度推定結果

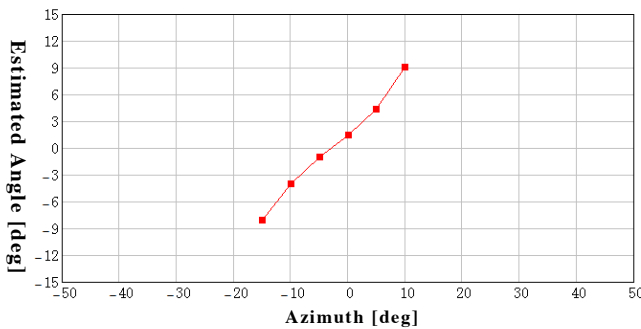


図 12. 最終推定結果

$|\text{Re}(\Delta/\Sigma)|$ に対する閾値として 0.2, ML1 の最大尤度に対する閾値として 0.96, ML2 の最大尤度に対する閾値として 0.99 を用いた場合の最終推定結果を図 12 に示す. 図 12 より提案する到来方向推定は, 広角目標の距離-速度が検出された場合に, モノパルス測角処理による正面目標としての誤検知を低減し, 正面目標のみの検出が期待されることが分かる.

本実験において図 7, 9 より, 位相比較モノパルス測角処理および ML1 において最大 8deg 程度の誤差が生じていることが分かる. 誤差要因としては多周波ステップ CPC ミリ波レーダのキャリブレーション誤差が考えられ, キャリブレーション精度向上により到来方向の推定精度の向上が期待される.

5. むすび

本稿ではモノパルス測角処理における広角目標の誤検知を低減するために, モノパルス測角処理に加え,

MLE を併用する到来方向推定を提案した. 提案法は, 距離と速度が特定された目標信号が覆域外からの到来波であるか, 多目標であるかをモノパルス測角処理の入力実部および覆域内を探索した MLE の尤度から判定し, 判定結果毎に異なる測角処理を行うことで正面方向の目標のみを検知するよう動作する. また多周波ステップ CPC ミリ波レーダを用いた電波暗室における性能確認実験により, モノパルス測角処理のみによる到来方向推定に対し提案法は広角目標誤検知の低減が期待されることを示した.

今後の取り組みとして, キャリブレーション精度の向上による到来方向の推定精度の向上が必要とされる. また多目標環境下及び実フィールド上での計測により提案法の定量的評価, 閾値設計に取り組んでいく.

本稿に示す研究内容は, 総務省の委託研究「電波資源拡大のための研究開発 (狭帯域・遠近両用高分解能小型レーダー技術の研究開発)」により実施されたものである.

文 献

- [1] 稲葉敬之, 荒木純道, “車載用レーダのための 2 段階測角方式”, 信学論 (B), vol.J86-B, no.8, pp.1652-1658, Aug.2003.
- [2] 稲葉敬之, 木島壮氏, “ミリ波車載レーダへの適用した Hybrid-CFS”, 信学総大, B-2-21, 2009-03
- [3] 稲葉敬之, 坪田光, “多周波ステップ CPC レーダ方式の実験的検証”, 信学総大, B-2-36, 2010-03
- [4] Masato Watanabe, Takayuki Inaba, Hikaru Tsubota, Takahiro Yano, “Development of Millimeter wave Radar using Stepped Multiple Frequency Complementary Phase Code modulation”, ICSANE2011-81, Oct.2011.
- [5] I. Ziskind and M. Wax, “Maximum likelihood localization of multiple sources by alternating projection” IEEE Trans. On Acoustics Speech and Signal Processing, vol.36, no.10, pp.1553-1560, Oct.1988.