

多周波ステップ ICW 方式の測距性能評価実験

福島 冬樹[†] 原 照幸[†] 稲葉 敬之[‡]

[†] 三菱電機 (株) 情報技術総合研究所 〒247-8501 神奈川県 鎌倉市 大船 5-1-1

[‡] 電気通信大学 電子工学科 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

あらまし 本報告では、レーダ試作機を用いた多周波ステップ ICW(Interrupted Continuous Wave)方式の目標分離測距評価実験について述べた。多周波ステップ ICW 方式は、他のレーダ測距方式 (FMCW(Frequency Modulated CW)方式, パルス圧縮方式, 2周波 CW 方式) に比較して近接目標, 近距離目標, 多目標の測距を高精度に行えることが期待される。実験では、まず近接する静止 2 目標分離測距評価を行い 1m の距離差で設置した 2 つのコーナーリフレクタが 30~40cm の精度(掃引帯域幅から定まる距離分解能の約 0.05~0.07 倍の精度)で分離測距できることを確認した。次に、-1km/h と-3km/h で移動する 2 つのコーナーリフレクタをドップラー周波数分離し測距できることを確認した。また、多目標環境を想定し、超分解能測距による距離分離とドップラー周波数分離を組み合わせることで、移動または静止している 4 つのリフレクタが 20cm~80cm の精度(掃引帯域幅から定まる距離分解能の約 0.03~0.13 倍の精度)にて分離測距できた。さらに、近距離目標の測距精度を評価し、アンテナから 50cm の近距離に存在するコーナーリフレクタが 1cm 以下 (掃引帯域幅から定まる距離分解能の 0.002 以下) の精度にて測距できた。これらの結果から、多周波ステップ ICW 方式の有効性が確認された。

キーワード レーダ, 測距, 超分解能, 多周波パルス, 電波実験

Ranging Estimation Experiment of Stepped Multiple Frequency Interrupted CW Radar

Fuyuki FUKUSHIMA[†] Teruyuki HARA[†] and Takayuki INABA[‡]

[†] Information Technology R & D Center, Mitsubishi Electric Corporation, Kamakura-shi, 247-8501, Japan

[‡] Department of Electronic Engineering, The University of Electro-Communications

Abstract In this paper, we show the ranging estimation results of the stepped multiple frequency interrupted continuous wave (ICW) radar by using radar experimental model in radio wave anechoic chamber. Firstly, we estimate the range estimation accuracy of two corner reflectors with a short distance difference (about 1m). The distance of two reflectors is estimated with 30~40cm accuracy respectively. The length 30cm is equivalent to about 0.05 width of the range resolution. Secondly, we estimate the range estimation accuracy of two corner reflectors whose velocities are difference (-1km/h and -3km/h respectively). The distance of the two reflectors can be estimated. Thirdly, we estimate the range estimation accuracy of four corner reflectors. Two of four reflectors are moving, and the others are not moving. The distance of four reflectors is estimated with 20~80cm accuracy respectively. Fourthly, we estimate the range estimation accuracy of reflector whose distance from the radar is short (about 50cm). The short distance between reflector and radar is estimated with accuracy of 1cm or less. These results show the effectiveness of the stepped multiple frequency interrupted CW radar.

Keyword radar, range estimation, super resolution, stepped multiple frequency, Experiment of radio wave

1. まえがき

レーダ測距方式には、FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave)方式, パルス圧縮方式, 2周波 CW(Continuous Wave)方式などが知られており, それぞれ, 周波数, 時間遅延, 位相差で距離を計測するものである[1]. FMCW 方式は低コスト化が必要なレーダ装置において多く採用されている[2][3]. しかしながら, 波を送信するため直接波の漏れこみによるレンジサイドローブが発生して近距離目標の測距精度が劣化する

FMCW 方式では, CW 波を送信するため長時間にわたって周波数変動の少ない安定した電波を放射できる送信機が必要となる。また, アップチャープで検出された複数の目標信号とダウンチャープで検出された複数の目標信号の速度と距離を同時に推定してペアリングを行う必要があり, 特に多目標環境下ではペアリングを誤りやすく測距精度が劣化する[4]. その他にも CW こと, 受信機帯域幅の逆数相当の距離分解能しか得られないため距離分解能より短い距離で近接する目標

(近接目標)の分離測距が困難となるといった問題がある。パルス圧縮方式はクラッタ抑圧性能や干渉抑圧性能に優れる方式であるが、FMCW方式と同様に幅の長いパルスを送信するためレンジサイドローブが発生して近距離目標の測距精度が劣化する。また、距離分解能は受信機帯域幅の逆数相当であり近接目標の分離測距は困難である。次に、少しだけ離れた二つの周波数を用いる2周波CW方式は送受信系が簡素で信号処理負荷がFMCW方式と同等であるため低コスト化を優先するレーダ方式では有効であるが、等速の複数目標が存在する場合に誤動作が発生するという問題がある。

このような問題を解消できる方式として多周波ステップICW方式を提案した[5]。多周波ステップICW方式では、まず速度の違いにより複数目標を分離(ドップラー周波数分離)し、ドップラー周波数成分のステップ周波数方向に対する位相勾配の違いによりドップラー周波数分離できなかった複数目標を分離(距離分離)し各々超分解能測距する。混信する目標信号をドップラー周波数分離した後測距を行うため、FMCW方式で発生する多目標のペアリング問題が解消される。さらに、多周波を用いる効果により2周波CW方式では困難であった等速複数目標が分離可能となる。そのため、多目標の分離測距に優れていることが期待される。また、ドップラー周波数分離により混信する目標数を削減する効果と多周波ステップ+超分解能測距を行う効果により、距離分解能よりもはるかに短い距離差で近接する複数の目標を分離測距できる。このことから近接目標の測距に優れていることが期待される。さらに、パルス幅の短いパルスを送信するためパルス圧縮方式やFMCW方式で課題となる直接波の漏れこみで発生するレンジサイドローブによる近距離目標の測距精度劣化が解消でき、近距離目標の測距に優れていることが期待される。

本報告では、レーダ試作機を用いた多周波ステップICW方式の目標分離測距精度の評価実験について述べる。具体的には、近接する静止2目標の分離測距精度の評価、多目標環境下においてドップラー周波数分離した目標の測距精度評価、距離分離とドップラー周波数分離を組み合わせた測距の精度評価、近距離目標の測距精度評価を行う。ここで移動目標はアクチュエータにコーナーリフレクタを取り付け、これを移動させることで模擬する。

2. 多周波ステップICW方式

図1は文献[5]で提案した多周波ステップICW方式の処理ブロックを表している。

図2に示す時間チャートに従って図1の送信アンテナ(Transmitter)からパルスが送信される。目標で反射したパルスが受信アンテナ(Received antenna)で受信され、受信機(Receiver)を経てA/D変換器(A/D)でデジタル化された信号(A/D変換器出力信号)が出力される。送信周波数 $f_n(1 \leq n \leq N_f)$ 、パルスヒット番号 $n_p(1 \leq n_p \leq N_p)$ における $n_r(1 \leq n_r \leq N_r)$ レンジビンのA/D変換器出力信号を $s_{n_f,1,n_r}, s_{n_f,2,n_r}, \dots, s_{n_f,N_p,n_r}$ とする。A/D変換器出力信号 $s_{n_f,1,n_r}, s_{n_f,2,n_r}, \dots, s_{n_f,N_p,n_r}$ にパルスヒット方向FFT(FFT)を施し、ドップラー信号 $p_{n_f,n_d,n_r}(1 \leq n_d \leq N_p)$ を生成する。ドップラー信号絶対値 $|p_{n_f,n_d,n_r}|$ の中から、固定スレッショルドやCFAR(Constant False Alarm Rate)等を用いたピークサーチを行い目標信号を検出する(Target detection)。目標信号の検出されたドップラービンを \tilde{n}_d 、レンジビンを \tilde{n}_r として、Doppler compensationにおいて式(1)によりドップラー補正信号 $q_{n_f,\tilde{n}_d,\tilde{n}_r}$ を生成する。

$$q_{n_f,\tilde{n}_d,\tilde{n}_r} = p_{n_f,\tilde{n}_d,\tilde{n}_r} \exp \left[-j2\pi \frac{\tilde{n}_d - 1}{N_p N_f} (n_f - 1) \right] \quad (1)$$

Super resolution target detectionでは、ドップラー補正信号 $q_{1,\tilde{n}_d,\tilde{n}_r}, q_{2,\tilde{n}_d,\tilde{n}_r}, \dots, q_{N_f,\tilde{n}_d,\tilde{n}_r}$ にMUSIC(Multiple Signal Classification)[6]やESPRIT(Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques)[7]を用いた超分解能処理を施し、目標の距離(\tilde{n}_r レンジビンの \tilde{n}_d ドップラービンに検出された目標の距離)を超分解能測距する。本実験では、MUSICを用いて超分解能測距を行う。

3. 電波実験

多周波ステップICW方式の距離分離測距を評価するため、静止2目標の分離測距精度評価、ドップラー周波数分離した目標の測距精度評価、距離分離とドップラー周波数分離を組み合わせた測距の精度評価、近距離目標の測距精度評価を行った。

多周波ステップICW方式では、まずドップラー周波数の違いにより複数目標を分離し、次にドップラー周波数の違いで分離できない目標を距離の違いにより分離する。ドップラー周波数分離した後に距離の違いによる分離を行うため、実用的には少数の目標を距離分離することが想定される。そこで静止2目標の分離測距精度評価を行った。また、ドップラー周波数の違い

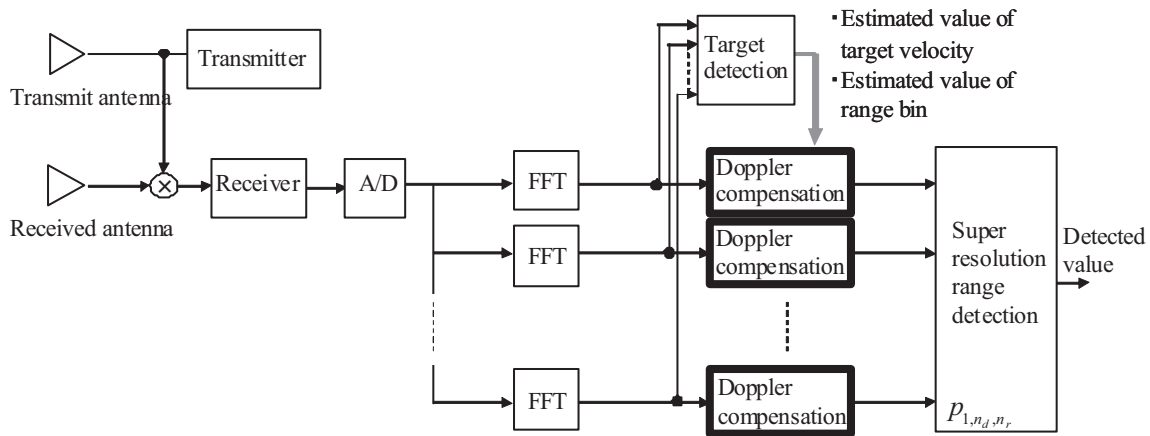


図 1 多周波ステップ ICW の処理ブロック

Fig.1 Block diagram of stepped multiple frequency interrupted CW.

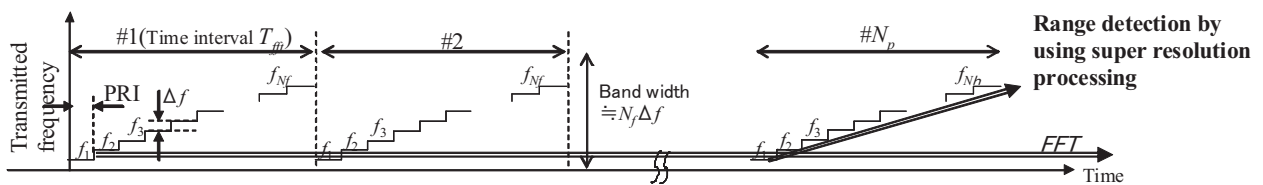
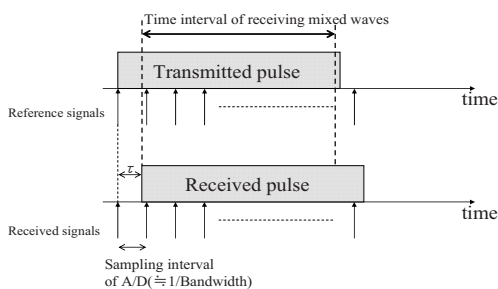
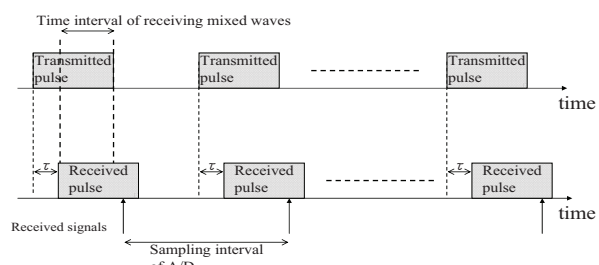


図 2 多周波ステップ ICW のパルス送信の時間チャート

Fig.2 Time chart of stepped multiple frequency interrupted CW processing.



(a) Situation of FMCW or pulse compression processing



(b) Situation of stepped multiple frequency interrupted CW processing

図 3 送受混信の比較

Fig.3 Comparison of interference in received pulse of transmitted pulse

による分離性能を評価するため、ドップラー周波数分離した目標の測距精度評価を行った。さらに、速度の異なる複数目標が存在する状況を想定し、距離分離とドップラー周波数分離を組み合わせた測距精度評価を行った。

また、多周波ステップ ICW 方式では短パルスの送受信を行うため、長パルスを用いる FMCW やパルス圧縮方式に比較して送受の混信による測距精度劣化を回避できることが期待できる。図 3(a)は FMCW やパルス圧縮を想定した送受の混信を表しており、送信パルス(Transmitted pulse)の送信時刻を基準として時間遅延 τ で受信パルス(Received pulse)が受信されている。信号間の相関を調べるためのサンプリング間隔

(Sampling interval of signal processing)は帯域幅の逆数相当であり、パルス幅は通常それより長くなる。そのため送受混信時間(Time interval of receiving mixed waves)が長くなり、直接波漏れこみによるレンジサイドローブの上昇が懸念される。一方、図 3(b)は多周波ステップ ICW 方式における状況を表しており、送受混信時間の範囲外となるパルスの立下り部分をサンプリングすることで測距処理が行え、時間遅延 τ の小さい近距離目標に対しても送受混信の影響が少なく高い測距精度が期待できる。本実験ではこのような近距離目標に関する測距精度評価も行った。

以下、3.1で実験機材の構成、3.2でパラメータの設定、3.3で実験結果を述べる。

3. 1 実験機材の構成

図 4 は実験で使用した電波暗室の平面図を表している。長さ約 8m, 幅が約 4m となっている。また, レーダ試作機を図 4 に示す位置に設置した。図 5 に実験で使用した機材の構成を示す。多周波ステップ ICW のレーダ試作機からは図 2 に示す時間チャートに従ってパルスが送信される。信号発生器(Signal generator)からは, パルス生成のためのローカル信号やリファレンス信号が伝達される。送信パルス(Transmitted pulse)と目標を模擬したコーナーリフレクタ(Corner reflector)で反射して受信された受信パルスは A/D 変換されてデジタルオシロ(Digital oscilloscope)に伝達される。これらの A/D 変換信号はパソコン(PC)に取り込まれ, パソコン上ではパルスヒット方向 FFT から超分解能測距処理までが行われる。

また, 移動目標はアクチュエータにコーナーリフレクタを取り付け, コーナーリフレクタを移動させることで模擬する。

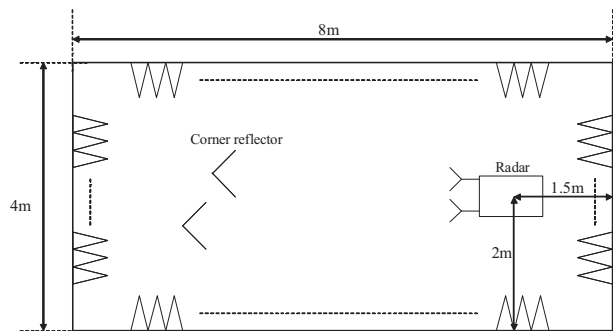


図 4 電波暗室の平面図

Fig.4 Plain view of radio wave anechoic chamber

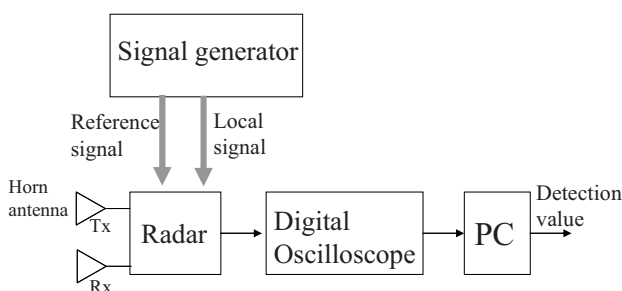


図 5 レーダ処理系の構成

Fig.5 Composition of test radar system

3. 2 パラメータの設定

本実験では, 表 1 に示すレーダパラメータを使用した。サンプリング点数はサンプリング周波数 25MHz で 40ms サンプリングしパルス繰り返し周期 T_{PRI} ごとに間引いた点数 (近距離目標の評価時はサンプリング周波数 25MHz で 200ms サンプリングしパルス繰り返し周期 T_{PRI} ごとに間引いた点数) を表している。

表 1 パラメータの設定

Table 1 Simulation Parameters

送信周波数 f_1	5GHz
掃引帯域幅	25MHz
パルス幅 T_W	100ns
パルス繰り返し周期 T_{PRI}	1.8 μ s
サンプリング点数	約22000点 (近距離目標の評価時のみ約110000点)
受信機の雑音指数	15dB
受信機の帯域幅	19.8 MHz
絶対温度	294°C
ホーンアンテナの利得	15dB

3. 3 実験結果

多周波ステップ ICW 方式のレーダ試作機を用いて目標分離測距評価を行った。静止 2 目標の分離測距評価, ドップラー周波数分離した目標の測距精度評価, 距離分離とドップラー周波数分離を組み合わせた測距の精度評価, 近距離目標の測距精度評価を行った結果, それぞれ次のようになった。

3. 3. 1 静止 2 目標の分離測距精度評価

近接した静止 2 目標の分離測距精度を評価するため, 2.3m と 3.3m の位置に静止コーナーリフレクタを設置して超分解能測距を行った。2.3m に設置したコーナーリフレクタをリフレクタ 1, 3.3m に設置したコーナーリフレクタをリフレクタ 2 とする。

フーリエ変換後の信号強度を調べた結果, 0km/h にピークが見られコーナーリフレクタが検出された。信号電力とノイズフロアを比較して S/N は約 60dB であった。そこで, 0km/h の位置に見られるピークに MUSIC 処理を施したときの MUSIC スペクトルを調べた。

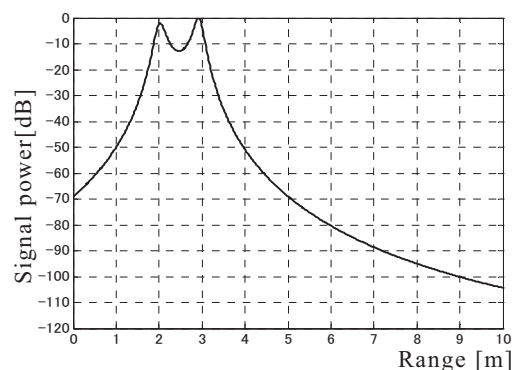


図 6 MUSIC スペクトル

Fig.6 MUSIC spectrum

その結果, 図 6 の MUSIC スペクトルが得られた。図 6 で横軸は距離[m], 縦軸は信号強度[dB]を表している。縦軸の信号強度は最大値で正規化している。

図 6 を参照すると, 2.92m と 2.02m の位置に MUSIC

スペクトルのピークが見られる。リフレクタ1の距離真値は2.30mなので2.02mはリフレクタ1の測距値であり0.28mの測距誤差が発生している。また、リフレクタ2は距離真値3.30m、測距値2.92mであり0.38mの測距誤差が発生している。以上の結果より、S/N60dBのとき、30~40cmの精度(掃引帯域幅から定まる距離分解能6mの0.05~0.07倍の精度)で2つのコーナーリフレクタが分離測距できた。表2は以上の結果を表している。

表2 静止2目標の分離測距評価結果
Table. 2 Results of the detection performance

	距離真値[m]	測距値[m]	測距誤差[m]
リフレクタ1	2.30	2.02	0.28
リフレクタ2	3.30	2.92	0.38

3. 3. 2 ドップラー周波数分離した目標の測距精度評価

ドップラー周波数分離した目標の測距精度を評価するため、距離2.4m~3.9mを速度-1km/hで移動するコーナーリフレクタ(リフレクタ1)と、距離4.1m~5.6mを速度-3km/hで移動するコーナーリフレクタ(リフレクタ2)を測距した。フーリエ変換後の信号強度を調べた結果、-1.03km/hと-3.08km/hにピークが見られコーナーリフレクタが検出された。信号電力とノイズフロアを比較してS/Nは約40dBであった。そこで、-1.03km/hの位置に見られるピークにMUSIC処理を施したときのMUSICスペクトル、及び-3.08km/hの位置に見られるピークにMUSIC処理を施したときのMUSICスペクトルを調べた。その結果、図7のMUSICスペクトルが得られた。図7で横軸は距離[m]、縦軸は信号強度[dB]を表している。縦軸の信号強度は最大値で正規化している。

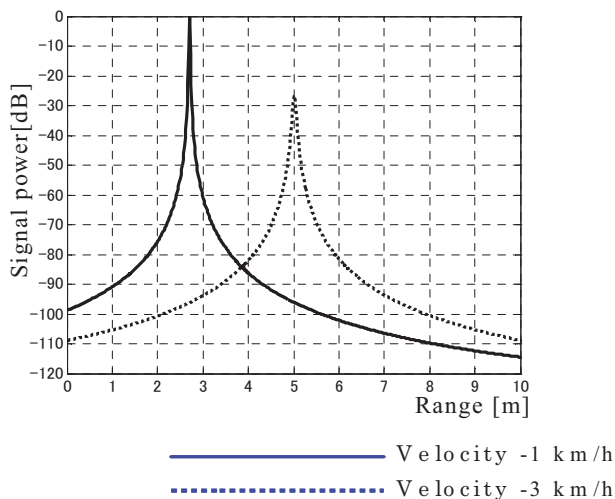


図7 MUSIC スペクトル

Fig.7 MUSIC spectrum

3. 3. 3 距離分離とドップラー周波数分離を組み合わせた測距の精度評価

距離分離とドップラー周波数分離を組み合わせた測距の精度を評価するため、移動または静止している4目標の分離実験を行った。4つのコーナーリフレクタを表3のように配置して測距精度を評価した。

表3 コーナーリフレクタの配置と移動速度
Table 3 Position and velocity of the corner reflectors

	距離[m]	速度[km/h]
リフレクタ1	1.9	0
リフレクタ2	5.8	0
リフレクタ3	2.4~3.9	-1
リフレクタ4	4.1~5.6	-3

フーリエ変換後の信号強度を調べた結果、-1.03km/h、-3.08km/h、0km/hにピークが見られた。信号電力とノイズフロアを比較してS/Nは約50dBであった。そこで、-1.03km/hの位置に見られるピークにMUSIC処理を施したときのMUSICスペクトル、及び-3.08km/hの位置に見られるピークにMUSIC処理を施したときのMUSICスペクトル、0km/hの位置に見られるピークにMUSIC処理を施したときのMUSICスペクトルを調べた。その結果を図8のMUSICスペクトルが得られた。図8で横軸は距離[m]、縦軸は信号強度[dB]を表している。縦軸の信号強度は最大値で正規化している。

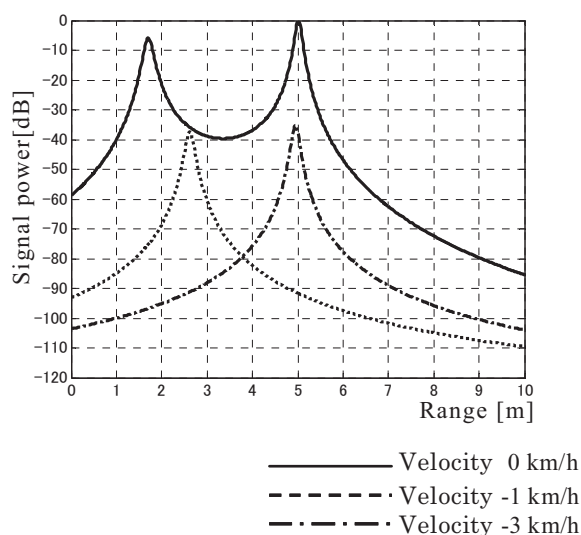


図8 MUSIC スペクトル

Fig.8 MUSIC spectrum

図8を参照すると、リフレクタ1の測距値は1.70mであり、リフレクタ1の距離真値が1.9mなので20cmの測距誤差(掃引帯域幅から定まる距離分解能の0.03倍)

が発生している。リフレクタ2の測距値は5.02mであり、リフレクタ2の距離真値が5.8mなので80cmの測距誤差(掃引帯域幅から定まる距離分解能の0.13倍)が発生している。リフレクタ2は遠距離なので多少測距精度が劣化したことが予想される。リフレクタ3の測距値は2.62mであり距離範囲内2.4~3.9mで得られている。リフレクタ4の測距値は4.91mであり距離範囲内4.1~5.6mで得られている。表4は以上の結果を表している。ただし、リフレクタ3とリフレクタ4は観測開始時のリフレクタ位置が不明なので測距誤差については評価していない。

表4 多目標の測距の精度評価結果

Table 4 Results of Detection performance of many targets

	距離真値(距離範囲)[m]	速度[km/h]	測距値[m]	測距誤差[m]
リフレクタ1	1.9	0	1.70	0.2
リフレクタ2	5.8	0	5.02	0.8
リフレクタ3	2.4~3.9	-1	2.62	—
リフレクタ4	4.1~5.6	-3	4.91	—

3. 3. 4 近距離目標の測距精度評価

送信パルスと受信パルスの混信が懸念される近距離目標の測距精度を評価した。近距離0.455mの位置にコーナーリフレクタを設置して測距精度を調べた。

フーリエ変換後の信号強度を調べた結果、0km/hにピークが見られ静止コーナーリフレクタが検出された。信号電力とノイズフロアを比較してS/Nは約60dBであった。そこで、0km/hの位置に見られるピークにMUSIC処理を施したときのMUSICスペクトルを調べた。その結果を図9のMUSICスペクトルが得られた。

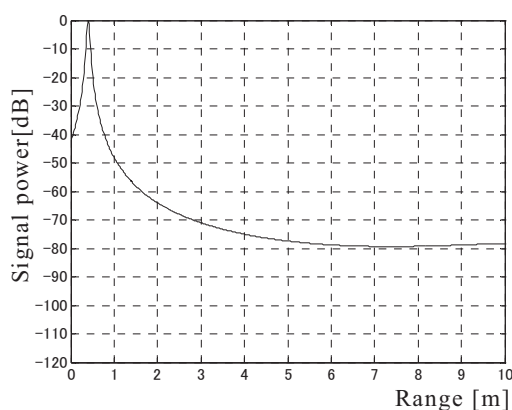


図9 MUSIC スペクトル

Fig.9 MUSIC spectrum

図9で横軸は距離[m]、縦軸は信号強度[dB]を表している。縦軸の信号強度は最大値で正規化している。図19を参照すると、0.455mの位置にMUSICスペクトルのピークが見られ、真値が0.455mなので1cm以下(掃引帯域幅から定まる距離分解能の約0.002以下)の精度が発生している。表5は以上の結果を表している。

表5 近距離目標の測距精度評価結果

Table 5 results of Detection performance of short range

	距離真値[m]	測距値[m]	測距誤差[m]
リフレクタ	0.455	0.455	0.001以下

4. まとめ

本報告では、多周波ステップICWのレーダ試作機を用いて行った多周波ステップICW方式の目標分離測距評価実験について述べた。実験では、まず静止2目標分離測距評価を行い1mの距離差で設置した2つのコーナーリフレクタが30~40cmの精度(掃引帯域幅から定まる距離分解能の0.05~0.07倍の精度)で分離測距できることを確認した。次に、ドップラー周波数分離した目標の測距精度を評価した。その結果、-1km/hと-3km/hで移動する2つのコーナーリフレクタが分離測距できた。また、超分解能測距による距離分離とドップラー周波数分離を組み合わせた4目標の測距精度を評価した。その結果、移動または静止している4つのリフレクタが20cm~80cmの精度(掃引帯域幅から定まる距離分解能の0.03~0.13倍の精度)にて分離測距できた。さらに、近距離目標の測距精度を評価し、アンテナから50cmの近距離に存在するコーナーリフレクタが1cm以下(掃引帯域幅から定まる距離分解能の0.002以下)の精度にて測距できた。これらの結果から、多周波ステップICW方式の有効性が確認された。

文 献

- [1] M.I.Skolnik, Introduction to Radar System, McGraw-Hill, New York, 1962.
- [2] 大槻智洋, 田野倉保雄, “クルマで瞬き始める電子の「眼」, カメラとミリ波レーダ, 目指すは全車標準装備,” 日経エレクトロニクス, 2003.8.4, pp.756-759, Sept.2004
- [3] 堀松哲夫, 一津屋正樹, “実用化を迎えたミリ波レーダシステム,” 信学誌, vol.87, no.9, pp.756-759, Sept. 2004
- [4] 稲葉敬之, 平井俊之, “FMICWレーダにおける移動目標検出法,” 電子情報通信学会論文誌(B), Vol. J88-B No.4, pp.795-803, Apr. 2006.
- [5] 稲葉敬之, “多周波ステップICWレーダによる多目標分離法,” 電子情報通信学会論文誌(B), Vol. J89-B No.3, pp.373-383, Mar. 2006.
- [6] R.O. Schmidt, “Multiple emitter location and signal parameter estimation,” IEEE Trans. Antennas Propagat., vol.AP-34, no.3, pp.276-280, 1986.
- [7] R. H. Roy, T.Kailath, “ESPRIT - Estimation of Signal Parameter via Rotational Invariance Techniques,” IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol.37, no.7, pp. 984-995, July, 1989.