

## 2つの初期周波数を用いた多周波 CW 方式の検討

渡邊 俊人 山下 遼 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.toshihito@inabalab.ee.uec.ac.jp

**あらまし** 筆者らは狭占有周波数帯域幅と低サンプリング周波数にて多目標対処可能な高距離分解能が得られる方式として多周波 CW 方式を提案してきた。しかし、多周波 CW 方式を例えば車載中距離レーダに応用する場合、限られた観測時間・占有周波数帯域幅かつ実用的な低サンプリング周波数にて、要求される速度分解能、距離分解能、速度視野、距離視野のすべてを満足させることが難しい。本稿では、2つの初期周波数を用いることで、これらの両立を図ることを目的とし、信号処理の検討および 24GHz ソフトウェアレーダを用いた実験的検証を実施したので、その結果について報告する。

**キーワード** レーダ, 多周波 CW 方式

## Multiple Frequency CW Radar using Two Initial Frequencies

Toshihito WATANABE Ryo YAMASHITA 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.toshihito@inabalab.ee.uec.ac.jp

**Abstract** We have proposed Multiple Frequency CW Radar, which can provide performance high range resolution in narrow occupation bandwidth and low sampling frequency even in multiple target. However, when Multiple Frequency CW Radar is applied to middle-range automotive radar, it is difficult to satisfy all the required performance, with an extremely short observation time, occupation frequency bandwidth and practical low sampling frequency. In this paper, we have studied the signal processing by using two initial frequencies in order to coexist those and have experimentally verified with 24GHz Software Defined Radar.

**Keyword** Radar, Multiple Frequency CW Radar

### 1. まえがき

車載レーダは、安全・安心な道路交通実現のため普及が急がれる。しかし電波は有限な資源であり車載近距離レーダへの割り当ては 24GHz 帯 UWB, 79GHz 帯 UWB, 24GHz 帯 NB に限られている。24GHz 帯 UWB は時限付き認可であり開発リスクが伴う。一方欧州では 79GHz 帯 UWB での開発が進められているが人物検知能力の確保のため高出力化が必要となると考えられ電波法令的またコスト的な課題とされている。

以上の背景より、これらの一解決案として筆者らは多周波 ICW 方式のパルス化を省略することで、より狭帯域での計測が可能な変調方式である、多周波 CW 方式を提案し、実験による車載近距離レーダへの適用検

討を実施してきた[1][2][3]。一方、多周波 CW 方式を例えば車載中距離レーダに応用する場合、限られた観測時間・占有周波数帯域幅かつ実用的な低サンプリング周波数にて、要求される速度分解能、距離分解能、速度視野、距離視野のすべてを満足させることが難しい。そこで本稿では、2つの初期周波数を用いることで、従来の多周波 CW 方式とほぼ同等の観測時間、占有周波数帯域幅、サンプリング周波数にて、これらの両立を図る、2初期周波数多周波 CW 方式に関してシミュレーションおよび実験的検証を実施したので、その結果について報告する。

### 2. 2 初期周波数多周波 CW 方式

図 2.1 に 2 初期周波数多周波 CW 方式の送信シーケ

ンス図を示す。

2 初期周波数多周波 CW 方式は、初期周波数  $f_0$  から始まる周波数ステップ幅  $\Delta f$ 、ステップ数  $N/2$  の多周波 CW 方式と、初期周波数が  $f_1 = f_0 + f_{step}$  から始まる周波数ステップ幅  $\Delta f$ 、ステップ数  $N/2$  の多周波 CW 方式を組み合わせ、1 ステップごとに交互に送信する方式である。以下、2 初期周波数多周波 CW 方式の測速、測距信号処理について述べる。

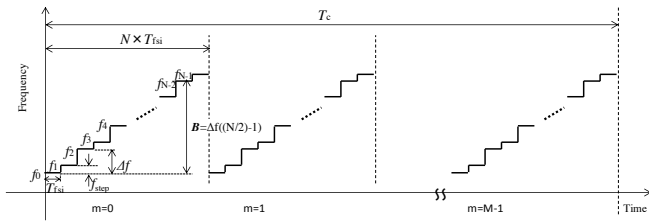


図 2.1.2 初期周波数多周波 CW 方式

### 2.1.2 初期周波数多周波 CW 方式の測速方式

目標相対速度検出は、線形多周波 CW 方式と同じく、各周波数ステップ  $n$  に対する  $m$  方向（時間方向）のサンプルをフーリエ変換することで行う。速度視野  $V_{max}$  はステップ数  $N$  と周波数切替間隔  $T_{fsi}$  より、式 2.1.1 で与えられる。

$$V_{max} = \frac{\lambda}{4N \cdot T_{fsi}} \quad (2.1.1)$$

速度分解能  $\Delta v$  は、フーリエ変換の周波数分解能をフーリエ変換による周波数分解能を  $1/T_c$  とすると、式 2.1.2 で与えられる。

$$\Delta v = \frac{c}{2T_c \cdot f_0} \quad (2.1.2)$$

### 2.2.2 初期周波数多周波 CW 方式の測距方式

2 初期周波数多周波 CW 方式の測距信号処理として、以下の 2 つの方式を検討した。

- (i) 位相差でゲーティング、ビート周波数で測距
- (ii) MUSIC により測距

以下、これらの信号処理について述べる。

- (i) 位相差でゲーティング、ビート周波数で測距  
信号処理ブロック図を図 2.2.1 に示す。

目標の相対速度検出後、周波数ステップ  $n$  毎の FFT 結果の検出速度ビンに対し、目標相対速度による位相回転の補正を行う。

補正した FFT 結果を初期周波数が同じ組（偶数番目のステップ、奇数番目のステップ）で  $n$  方向に FFT し、ビートスペクトルを求める。

次に、それぞれの FFT 結果のビートスペクトルのピークの位相差を求め、位相差からゲーティングに用いる距離を求める。

ビート周波数と検出速度から代数的に求められる目標距離と、先ほど求めた位相差による推定距離を用いてゲーティングを行い、距離推定を行う。

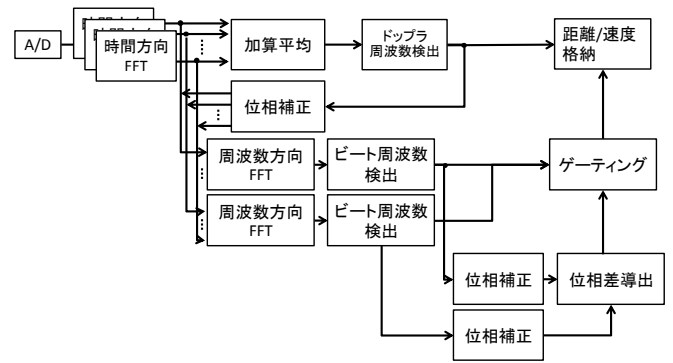


図 2.2.1 (i)信号処理ブロック図

- (ii) MUSIC により測距

信号処理ブロック図を図 2.2.2 に示す。

目標の相対速度検出後、周波数ステップ  $n$  毎の FFT 結果の検出速度ビンに対し、目標相対速度による位相回転の補正を行う。

補正した周波数ステップごとの FFT 結果から相関行列を作成する。この際、線形多周波 CW 方式同様に、MUSIC や ESPRIT などの超分解能法を適用するには事前に周波数平均を行い相関抑圧する必要がある。

しかし、周波数ステップ幅が 2 種類あることから、相関行列の要素間の関係は 2 種類発生する。通常の周波数平均を適用するとこれら異なる要素間の関係を持つ相関行列を平均してしまい、正しく周波数平均がなされない。そこで、偶数番目と奇数番目それぞれの相関行列とステアリングベクトルを作成し、これらの MUSIC スペクトルの加算平均から距離推定を行う。

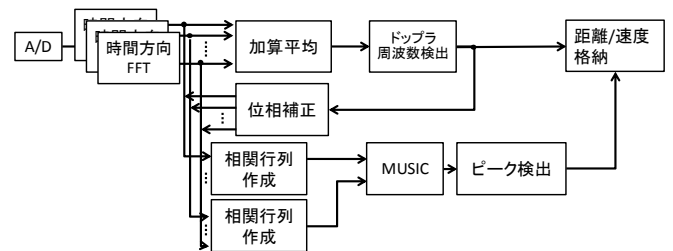


図 2.2.2 (ii)信号処理ブロック図

これら(i)(ii)の信号処理による距離視野  $R_{max}$  は、2 つの初期周波数の差である  $f_{step}$  より、式 2.2.1 で与えられる。

$$R_{max} = \frac{c}{2 \cdot f_{step}} \quad (2.2.1)$$

### 3. シミュレーション

シミュレーションにて2初期周波数周多周波CW方式の各信号処理案による距離推定を確認する。今回のシミュレーションでは表3.1のパラメータを用いた。目標条件として表3.2の等速3目標を設定した。目標相対速度は近づく速度を正とし遠ざかる速度は負とした。雑音はガウス雑音とし、各目標のRCSは共通とした。目標相対速度検出は各信号処理で共通である。図3.1に目標条件1の時間方向フーリエ変換結果を示す。

表 3.1 送信信号パラメータ

	2 初期周波数 多周波 CW 方式
送信周波数 $f_0$	24.15 GHz
周波数切替間隔 $T_{fsi}$	3 $\mu$ s
ステップ数 $N_{step}$	32
シーケンス数 $M_{seq}$	512
周波数ステップ幅 $\Delta f$	5 MHz
初期周波数差 $f_{step}$	1.5 MHz
総帯域幅 $B$	76.5 MHz
観測時間	49 ms
CPI 数	1
$\Delta f$ による距離視野	30 m
$f_{step}$ による距離視野	100 m
速度視野	116.46 km/h
速度分解能	0.455 km/h

表 3.2 目標条件 1

	距離 [m]	速度 [km/h]
目標 1	55	80
目標 2	65	80
目標 3	75	80

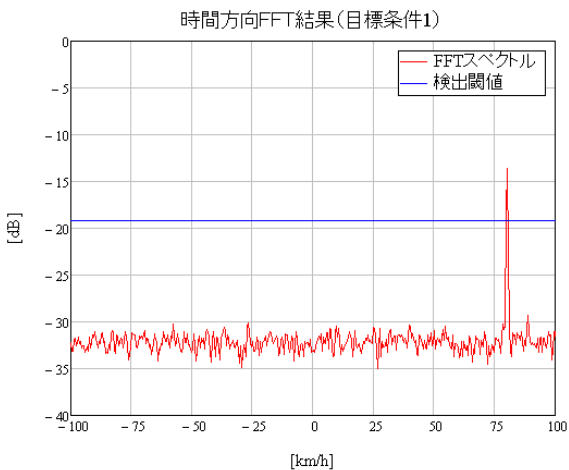


図 3.1 時間方向 FFT 結果(目標条件 1)

相対速度検出結果は 80.066[km/h]と、正しく検出された。次に、目標距離検出について信号処理毎に述べる。

#### 3.1. 位相差でゲーティング、ビート周波数で測距

検出された速度に対応する各周波数ステップの FFT スペクトルを、位相補正およびゼロパディングをしたのち、周波数方向 FFT を行った結果を図 3.1.1 に示す。なお、青線が偶数番目のステップの組の FFT 結果、赤線が奇数番目のステップの組の FFT 結果である。

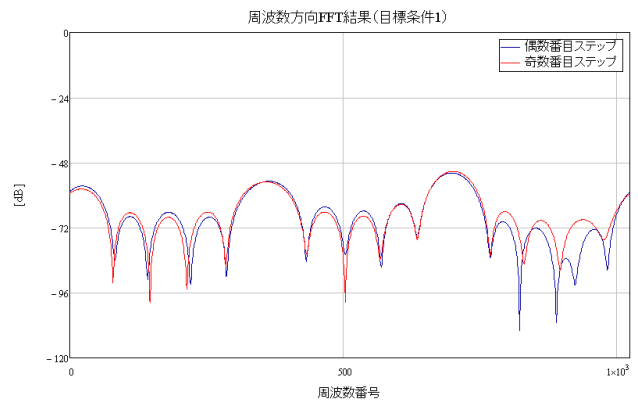


図 3.1.1 周波数方向 FFT 結果 (目標条件 1)

周波数方向 FFT では距離分解能は送信帯域幅で与えられ、距離視野は距離分解能とサンプル数に依存する。各目標の周波数方向 FFT スペクトルを検出し、距離推定を行った結果を表 3.1.1 に示す。

表 3.1.1 距離推定結果

目標条件	真値[m]	推定値[m]
条件 1	55	54.13
	65	64.771
	75	75.208

結果より、 $\Delta f$  による距離視野をこえる距離をもつ等速 3 目標の分離および測距を確認した。

#### 3.2. MUSIC により測距

検出された速度に対応する各周波数ステップの FFT スペクトルを、位相補正をしたのち相関行列の作成を行う。周波数平均処理の際、相関行列の要素間の関係が等しくなるように偶数番目と奇数番目を分けそれぞれで相関行列を作成する。2種類の相関行列からそれぞれ固有値の大きさによる目標数判定を行い、MUSIC を行う。それぞれの MUSIC 処理によって得られた MUSIC スペクトルを加算平均し、強度の大きいピークから目標数分だけ選択することで距離推定を行う。

目標条件 1 での MUSIC スペクトルを図 3.2.1 に示す。

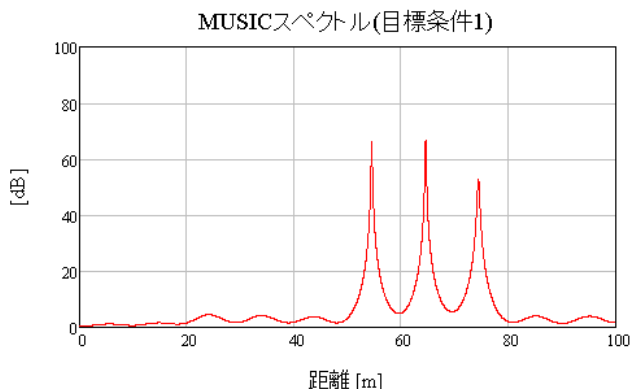


図 3.2.1 MUSIC スペクトル (目標条件 1)

MUSIC スペクトルのピーク検出を行い、推定された距離を表 3.2.1 に示す。

表 3.2.1 距離推定結果

目標条件	真値[m]	推定値[m]
条件 1	55	54.48
	65	64.54
	75	74.38

信号処理(i)同様、MUSIC による距離推定においても等速 3 目標の分離および測距を確認した

## 4.2 初期周波数多周波 CW 方式の課題

2 初期周波数多周波 CW 方式における課題点について、シミュレーションを通して示す。シミュレーションでは表 3.1 のパラメータを用いた。目標条件 2, 3 として表 4.1 および表 4.2 を設定する。

表 4.1 目標条件 2

	距離 [m]	速度 [km/h]
目標 1	35	80
目標 2	65	80

表 4.2 目標条件 3

	距離 [m]	速度 [km/h]
目標 1	10	80
目標 2	35	80
目標 3	75	80

### 4.1. 位相差でゲーティング、ビート周波数で測距

信号処理(i)での目標条件 2 に対する周波数方向 FFT 結果を図 4.1.1 に示す。信号処理(i)では周波数方向 FFT における距離視野が  $\Delta f$  による距離視野となるため、今回用いたパラメータでは 30m ごとに折り返しが生じる。

従って、目標間の距離差が距離分解能未満の場合だけでなく、折り返しによって同じビート周波数内に複数目標が含まれる場合が生じる。このとき、ビート周波数による目標分離はできず、ゲーティングに用いる位相差による距離推定も誤った値を推定してしまうという課題がある。

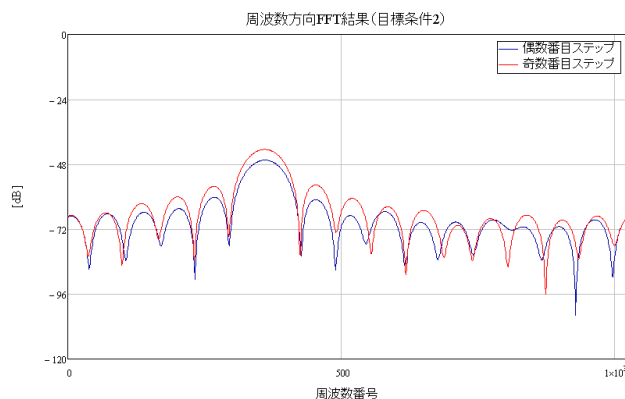


図 4.1.1 周波数方向 FFT 結果 (目標条件 2)

次に、目標条件 3 に対する周波数方向 FFT 結果を図 4.1.2 に示す。

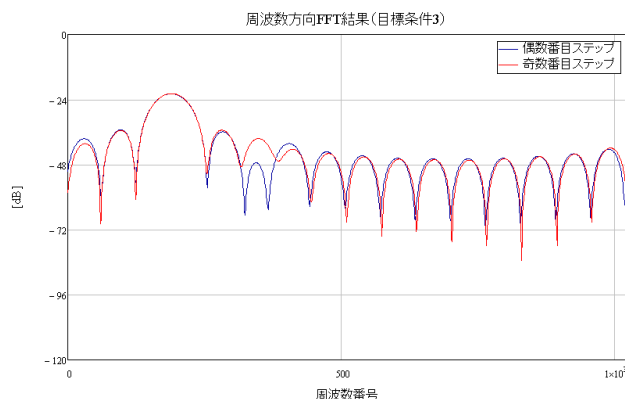


図 4.1.2 周波数方向 FFT 結果 (目標条件 3)

図 4.1.2 では、目標 1 に相当するビート周波数は確認できるが、目標 2 および目標 3 に相当するビート周波数が確認できない。これは、信号処理(i)において、周波数方向 FFT での信号処理利得は  $10\log(N\text{step}/2)$  であることから、目標間の信号強度差が大きい場合、サイドローブに埋もれてしまうためである。

従って、等速複数目標の内、他の目標に比べ近距離にあるため距離減衰の小さい目標や、RCS が大きい目標が含まれているときの距離検出に課題がある。

### 4.2. MUSIC による測距

信号処理(ii)での目標条件 2 に対する MUSIC スペクトルを図 4.2.1 に示す。信号処理(ii)での相関行列は周波数平均を行っているものの、 $\Delta f$  による距離視野を超

える目標の折り返しが MUSIC の分解能以下となる場合、信号間の相関抑圧が充分に行われず、相関行列の固有値の内、雑音の固有値よりも大きい固有値が目標数より少なくなってしまう。そのため、信号強度の大きい目標のみ検出されるという課題がある。

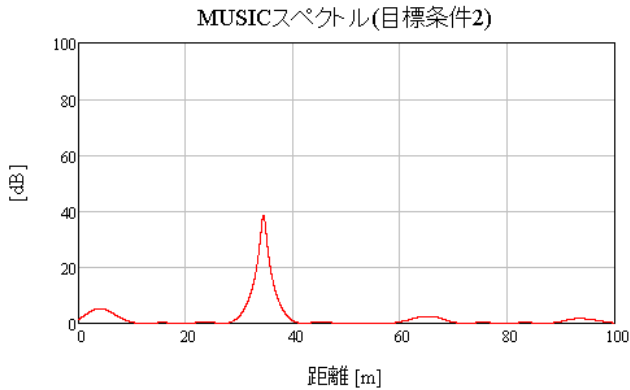


図 4.2.1 MUSIC スペクトル (目標条件 2)

目標数を正しく推定できた場合においても、相関の抑圧がなされていないため、図 4.2.2 のようにスペクトルに折り返しが生じる。

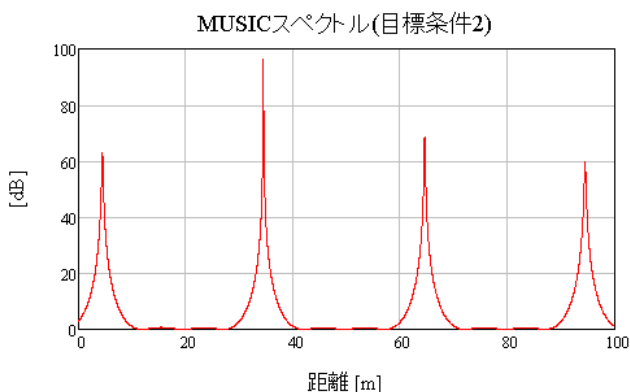


図 4.2.2 正しい目標数を判定した場合の MUSIC スペクトル

次に、目標条件 3 に対する周波数方向 FFT 結果を図 4.2.3 に示す。

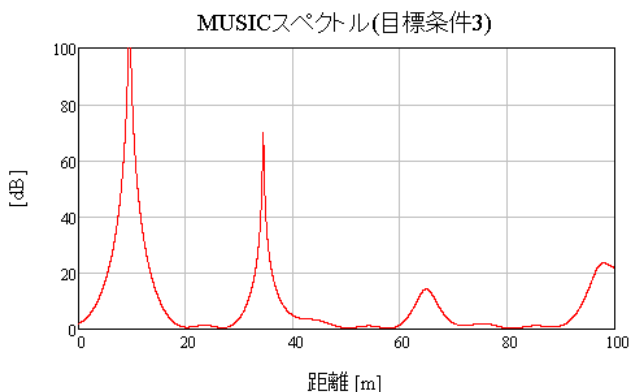


図 4.2.3 MUSIC スペクトル (目標条件 3)

目標間の信号強度に大きな差がある場合、MUSIC スペクトルに虚像が生じる場合がある。図 4.2.3 では虚像が 97.9m に生じており、目標 3 のスペクトルよりも強度が強い。このような虚像と、信号強度の弱い目標とを判定することが課題として残る。

## 5. 実験的検証

一般道路の歩道橋で走行車両監視実験を行った。この実験では 24GHz ソフトウェアレーダ装置[4]を使用し、送信パラメータはシミュレーションと同じ表 3.1 のパラメータを用いた。

レーダ装置のセットアップ図を図 5.1 に、実験環境を図 5.2 に示す。



図 5.1 レーダ装置セットアップ図



図 5.2 実験環境

計測時間内の車両数がおおよそ 4 台程度の複数車両走行時のデータに関して解析を行う。また、目標距離推定には信号処理(i)と信号処理(ii)をそれぞれ用いた。

全観測時間の速度推定結果を図 5.3 に示す。

また、信号処理(i)、信号処理(ii)それぞれの距離推定結果を図 5.4、図 5.5 に示す。

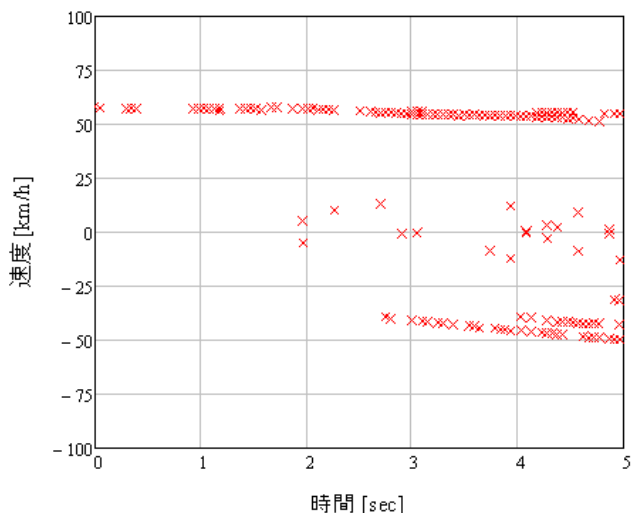


図 5.3 歩道橋実験速度推定結果

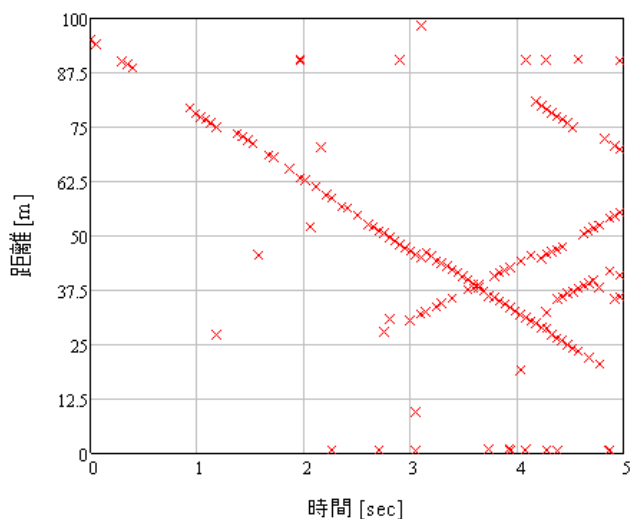


図 5.4 歩道橋実験距離推定結果(信号処理(i))

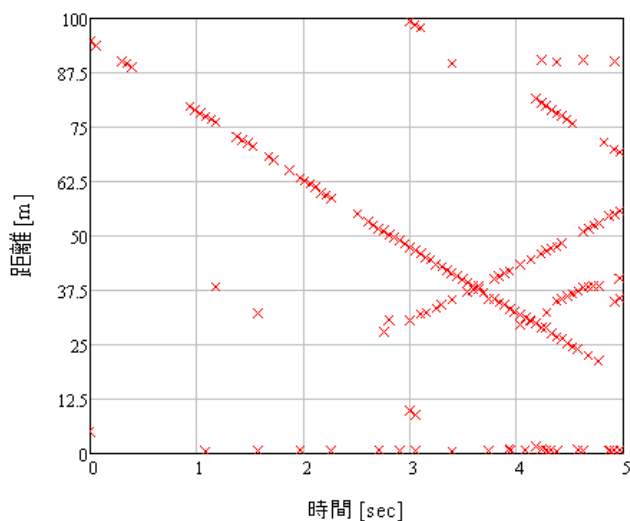


図 5.5 歩道橋実験距離推定結果(信号処理(ii))

図 5.3 より、レーダに向かって接近してくる車両と、その反対車線のレーダから離れる車両の速度推定が成されているのを確認した。速度推定結果に加えて図 5.4 および図 5.5 より、接近してくる車両を約 95m の地点から検知していることを確認した。0m 付近に検知があるのは速度推定時の誤検知と、目標数判定の誤りによるものである。

信号処理(i)および信号処理(ii)による推定距離の際に関しては今回の実験データでは大きな差異が見られなかった。今回の計測では等速複数目標である場面がほぼなかったため、今後それぞれの課題となる状況での実験データを計測し、検討を続ける。

## 6. むすび

本稿では、従来の多周波 CW 方式とほぼ同等の観測時間、占有周波数帯域幅、サンプリング周波数にて、要求性能を満たす方式として、2 初期周波数周多周波 CW 方式について検討し、距離推定における信号処理案とその課題についてまとめた。また、東八道路歩道橋での走行車両監視実験を実施し、複数目標の分離、および、約 95m 先の走行車両を検知していることを確認した。

今後距離推定における信号処理の検討を続け課題点の解決を図る。

## 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”, 電子情報通信学会論文誌 (B), vol. J89-B No.3. pp.373-383, Mar.2006.
- [2] 渡邊俊人, 稲葉敬之, “多周波 CW 方式の近距離レーダへの適用検討”, 信学総大, B-2-51, Mar.2012.
- [3] 渡邊俊人, 稲葉敬之, “多周波 CW 方式の後方監視レーダへの適用検討”, 信学ソ大, B-2-7, Sept.2012.
- [4] 塚田渉, 植松大貴, 坪田光, 矢野公大, 稲葉敬之, “ソフトウェアレーダの構築と各種レーダ方式の実験的検証”, 信学技報 SANE2010-117, Nov.2010.