

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

塚田 渉 植松 大貴 坪田 光 矢野 公大 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: inaba@ee.uec.ac.jp

あらまし 本論文においては24GHz帯を使用するソフトウェアレーダの構築、及び当該装置を使用した各種レーダ方式の基礎実験結果を報告する。当該装置は、ソフトウェアにて作成した任意ベースバンド波を汎用ベクトル信号発生器にダウンロードし、24GHz帯特定小電力無線規格に準拠したRF部にてup/down-周波数変換および増幅することで各種レーダ変復調方式を実験することを可能としたレーダ装置である。本報告では、当装置を概説するとともに、特徴的ないくつかの変復調方式レーダとして動作させた実験結果を示す。

キーワード レーダ, FMCW, 2周波CW, FMSK, 多周波ステップCPC,

The development of 24GHz Software Defined Radar(SDR) and its experiment studies for various radar modulation

Tsukada Wataru Uematsu Hiroki Tsubota Hikaru Yano Takahiro and Inaba Takayuki

Graduate school of The University of Electro-Communications 1-5-1 Tyoufugaoka, Tyoufu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

E-mail: inaba@ee.uec.ac.jp

Abstract This paper presents the development of 24GHz Software Defined Radar(SDR) and its experiment studies for various radar modulation. The SDR which employ general measurement instruments such as SG, PSGs(vector signal generator), Digital Oscilloscope, can transmit and receive the various modulated baseband radar signals which download from computer. In this paper, we describe the outline of SDR and the experimental results for some characteristic radar modulation.

Keyword Radar, FMCW, Two frequency CW, FMSK, Steped Multiple frequency CPC

1. まえがき

レーダの変調方式として、FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) 方式, 2周波CW (Continuous Wave) 方式, パルス圧縮方式など, 多様な変調方式が知られている。これらは, それぞれ周波数差, 位相差, 時間遅延に基づき測距を行う。FMCW方式は比較的低速の信号処理で高距離分解能が得られるが, 複数目標時の分離が難しい。2周波CW方式は, きわめて狭い占有周波数帯域幅で距離と速度の推定が可能であるが等速目標の分離が困難である。パルス圧縮方式は, 不要波抑圧性能等に優れるが, 高距離分解能を得るためには送信周波数帯域幅と同等の受信機帯域幅が必要となる。

各種レーダに求められる運用条件に応じて, 巧みにレーダパラメータ設計・信号処理法を組み立てることで, これらの各種レーダの欠点を補い相互の利点を活

かす新しいレーダ変調方式が研究されている。たとえば, FMCW方式と2周波方式を融合したFMSK (Frequency Modulated Shift Keying)方式[1]。また, 筆者らの独自方式である合成帯域方式にパルス圧縮を融合させた多周波ステップCPC方式[2][3]などである。

このような測距原理の異なる各種レーダの実験的検証を行うためには, 従来は個別にレーダを開発しなければならず, 費用・期間等大きなリソースが必要であった。このような問題を解決するために, あるいは適応型レーダシステムの実験的研究を目的として, 今回我々は「ソフトウェアレーダ」を構築した。当装置は, ソフトウェアにて作成した任意ベースバンド波を汎用ベクトル信号発生器にダウンロードし, 専用開発のRF部にてup/down-周波数変換および増幅することで各種レーダ変復調方式を実験することを可能としている。

ソフトウェアレーダの RF 部開発においては、実験的に検証した方式が原理検証にとどまらず、実用化時において無免許で利用可能とするため、24GHz 特定小電力無線局規格に準拠させた。

24GHz 帯特定小電力無線局規格は、以下である。

- ①送信周波数 24.05~24.25GHz
- ②送信瞬時帯域幅 76MHz
- ③送信電力 10mW
- ④アンテナ利得 24dB

本論文においては、2. でソフトウェアレーダの概要、3. で各種レーダ方式の原理説明、4. にてソフトウェアレーダを用いた各種レーダ実験結果を紹介する。

2. ソフトウェアレーダ

構築したソフトウェアレーダの外観図を図 1 に示す。ソフトウェアレーダは、以下の構成部品からなる。

- ・ RF 部；24GHz 帯特定小電力無線局規格準拠
- ・ PSG(Programmable Vector Signal Generator) (1)；高速周波数切り替え機能に優れる
- ・ PSG (2)；パルス立上り立下り特性やパルス on/off 比特性に優れる
- ・ SG (RF Signal Generator)；低位相雑音特性を備える
- ・ デジタルオシロスコープ；高速 A/D 変換機能

また、PSG (1)、PSG (2)、およびデジタルオシロスコープは高精度な同期機能を有し、レーダとしての基本動作を可能としている。

図 2 にソフトウェアレーダの系統図を示す。周波数を高速ホッピングさせるための PSG (1) で作られた IF 信号は、SG の信号とミキシングされ 24GHz 帯にアップコンバージョンされる。次に、パルス波やパルス内変調波を作成する PSG(2)からの IF 信号とミキシングされ送信波としてアンテナから送信される。一方受信系では、PSG(1)と SG 信号をミキシングした 24GHz 帯信号でダウンコンバージョンさせる。次に、PSG(2)からの無変調 IF 信号を用いて I/Q 検波を行う。こうして、ベースバンド化された受信信号は、デジタルオシロスコープにて送信開始信号、パルス繰り返し、CPI (Coherent Pulse Interval) 等と同期したデジタル信号として計測される。このように、PSG (1) は周波数差や位相差で測距を行う方式のための送信源であり、

PSG (1) で作られた信号は、遅延時間で測距するパルス圧縮方式等の信号源となる。

ソフトウェアレーダでは、このように 2 つの PSG を同期させて同時に使用可能であることを特徴としている。これにより、以下に示すような各種レーダの変調方式に対応した各種実験を可能としている。

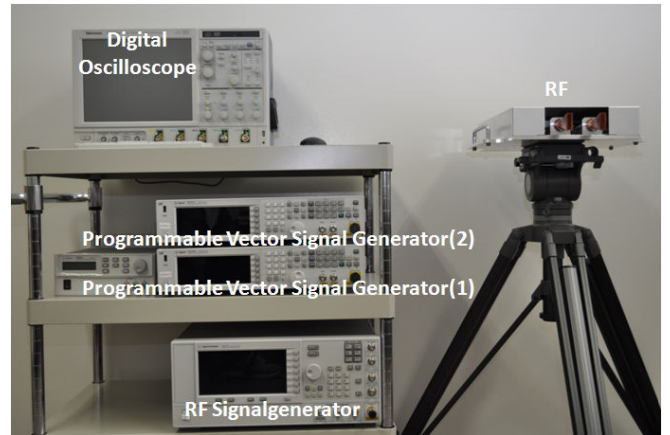


図 1 ソフトウェアレーダ外観図

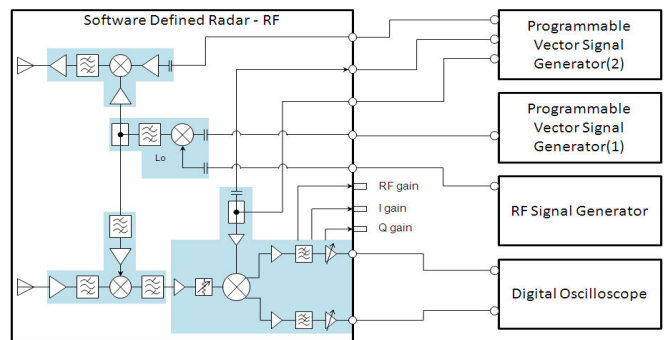


図 2 ソフトウェアレーダ系統図

<各種レーダの変調方式>

- 1) 周波数や位相で距離計測する方式
 - ・ FMCW 方式レーダ
 - ・ 2 周波 CW 方式レーダ
 - ・ 多周波ステップ ICW 方式等
- 2) 時間遅延で距離計測する方式
 - ・ パルスレーダ，各種パルス圧縮方式レーダ
 - ・ OFDM (直交周波数) 方式レーダ 等
- 3) 上記を複合し距離計測する方式
 - ・ 多周波ステップ CPC 方式レーダ等

3. 各種レーダ方式

構築したソフトウェアレーダの検証実験として、今回以下に示す各種レーダ方式を採用した。これら各種レーダ方式の原理について概説する。

3.1. FMCW 方式

FMCW 方式は、比較的低速の信号処理で高距離分解能が得られるレーダ方式である[4]。FMCW 方式は、図 3 に示すように、一般的に Up と Down という 2 つの LFM (Linear Frequency Modulated) 波で掃引する。

受信波と送信波をミキシングし LPF を通す事でそれぞれの掃引において、式 (1) (2) という 2 つの Beat 周波数が得られる。c、v 及び R はそれぞれ、光速、目標速度、目標距離を表している。

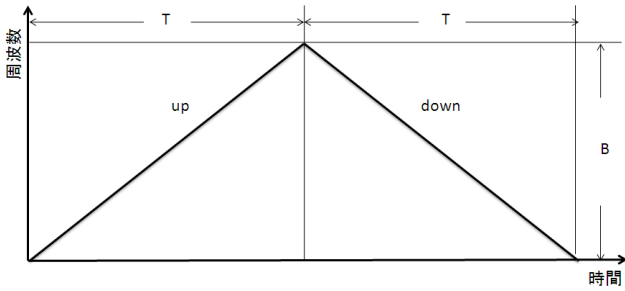


図 3 FMCW 方式送信タイミング図

$$f_{up} = -\frac{2B}{cT}R - \frac{2}{\lambda}v \quad (1)$$

$$f_{down} = \frac{2B}{cT}R - \frac{2}{\lambda}v \quad (2)$$

上式から分かるように 2 つの Beat 周波数は、それぞれ距離・速度からなっている。よって 2 つの Beat 周波数から式 (3) (4) が得られる。

$$R = -\frac{cT}{4B}(f_{up} - f_{down}) \quad (3)$$

$$v = -\frac{\lambda}{4}(f_{up} + f_{down}) \quad (4)$$

このように FMCW 方式は、代数的に目標の距離と速度を求める方式である。FMCW 方式は、比較的低速の信号処理で高距離分解能が得られるレーダ方式であるが、目標の距離及び速度推定のために、up と down において 1 つずつの Beat 周波数を使用してペアリングを行うため、複数目標において、Beat 周波数のペアリングが難しいという問題が存在する。

3.2.2 周波 CW 方式

2 周波 CW 方式は、きわめて狭い占有周波数帯域幅において、距離と速度が得られるレーダ方式である。

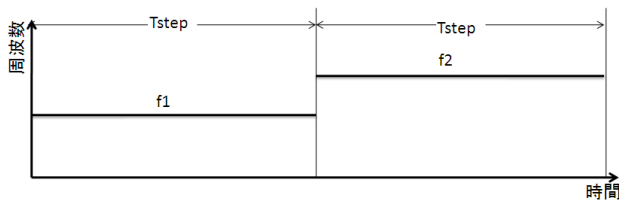


図 4 FMCW 方式送信タイミング図

2 周波 CW 方式の送信シーケンスは、図 4 に示すように、少しだけ周波数の離れた二つの周波数 f1, f2 を時分割で送信する。目標からの受信波と送信波をミキシングして、LPF をとおすことで、式 (5) (6) という Beat 信号が得られる。

$$Beat_{f_1}(n) = \exp\left\{-j\left[2\pi\left(\frac{2}{\lambda}vT_{step}n + \frac{2R}{c}f_1\right)\right]\right\} \quad (5)$$

$$Beat_{f_2}(n) = \exp\left\{-j\left[2\pi\left(\frac{2}{\lambda}vT_{step}n + \frac{2R}{c}f_2\right)\right]\right\} \quad (6)$$

この時、送信周波数の周波数差は、非常に小さいので、同じドップラ周波数として観測される。よって、各 Beat 信号をフーリエ変換することによって目標速度が得られる。また、上式の位相差 $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ から、

距離 R が

$$R = \frac{c\Delta\phi}{4\pi(f_2 - f_1)} \quad (7)$$

として得られる。ただし、距離アンビギュイティを回避するためには、最大距離視野が

$$R_{max} < \frac{c}{2(f_2 - f_1)} \quad (8)$$

を満たす必要がある。

2 周波 CW 方式は、きわめて狭い占有周波数帯域幅及び比較的低速の信号処理にて、相対速度および距離が計測できる方式である。しかし、等速目標が存在する場合、式 (7) では、目標が分離できないという問題がある。

3.3. FMSK 方式

FMSK 方式は、FMCW 方式と 2 周波 CW 方式を組み合わせた方式であり、ペアリングを行うことなく目標の距離と速度の導出が可能であるレーダ方式である。

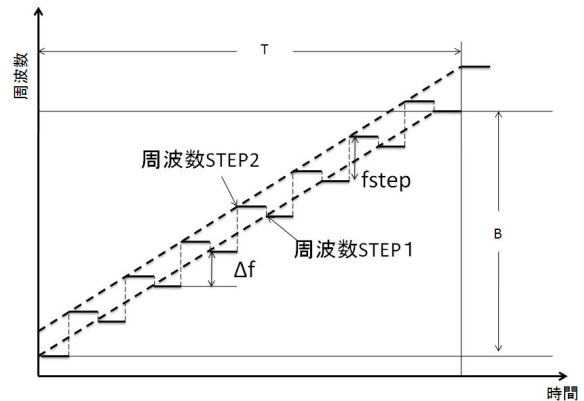


図 5 FMSK 方式送信タイミング図

FMSK 方式の送信シーケンスは、図 5 に示すように、ステップ状に周波数が変化する周波数 STEP を時分割で複数送信する。

各周波数 STEP において、受信波と送信波をミキシングし LPF を通す事で式 (9) という Beat 周波数が得られる。

$$f_{Beat} = -\frac{2B}{cT}R - \frac{2}{\lambda}v \quad (9)$$

ここで、二つの Beat 周波数の位相差 $\Delta\phi$ は式 (10) と表わされる。

$$\Delta\phi = 2\pi \left(-\frac{2R}{c} f_{step} - \frac{2Tv}{\lambda} \right) \quad (10)$$

目標の距離と相対速度が式 (9) (10) から代数的に求めることが出来る。

FMSK 方式は、ビード周波数を求めそのビード周波数の位相から距離・速度情報を得るため、FMCW 方式で問題となる掃引間で得られたビード周波数のペアリングを必要せず、観測時間を長くすることなく多目標環境への適合性を向上させた方式である。

3.4. パルス圧縮方式

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。[5]

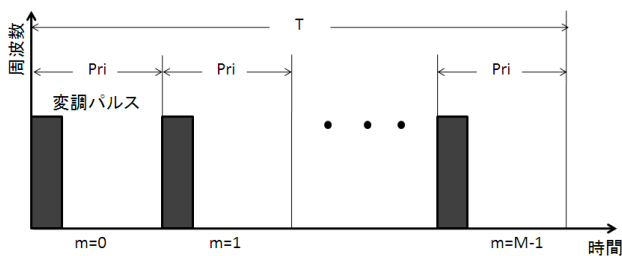


図 6 パルス圧縮方式送信タイミング図

パルス圧縮方式の送信シーケンスは、図 6 に示すように、LFM による周波数変調や、P4 符号などの変調符号による位相変調されたパルスを PRI (Pulse Repeat Interval) ごとに送信する。

受信信号に対し相関処理 (パルス圧縮) を行うことで、送信パルスと受信パルス間の遅延時間 τ が得られる。この遅延時間 τ より距離 ($=c\tau/2$) を得る方式である。また、PRI 間 FFT によるパルスドップラ処理を使うことにより、速度を求めることが可能である。

距離アンビギュイティを発生させないためには式 (11) を満たす必要がある。

$$R_{\max} < \frac{PRI \cdot c}{2} \quad (11)$$

パルス圧縮方式は、送信周波数帯域幅と同等の受信機周波数帯域幅が必要である。そのため、高距離分解能を得るには高速の A/D 変換器や、高速な相関処理が必要な方式である。

3.5. 合成帯域方式

合成帯域方式は、占有周波数帯域幅と比較して少ない受信機帯域幅で高距離分解能を得ることが出来るレーダ方式である。

合成帯域方式は、図 7 に示すように、周波数 STEP させた合計 N ($n=0, \dots, N-1$) の周波数を時分割で送信する。目標からの受信波と送信波をミキシングして、LPF により高周波成分を除去することで、式 (12) という受信信号が得られる。

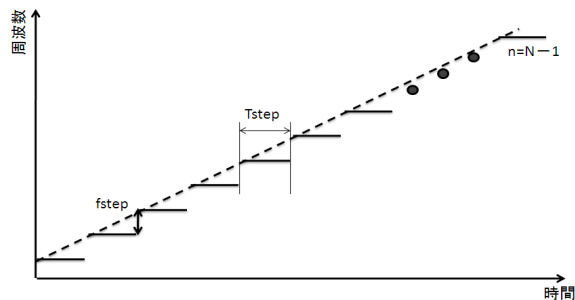


図 7 合成帯域方式送信タイミング図

$$u(t, n) = \exp \left\{ -j \left[2\pi \left(\frac{2R}{c} f_{step} n + \frac{2v}{\lambda} (t - T_{step} n) \right) \right] \right\} \quad (12)$$

合成帯域方式は、式 (12) に対し、IDFT による合成帯域処理を行うことにより測距を行う。

合成帯域方式は、比較的少ない受信機帯域幅で高距離分解能を得られる方式であるが、距離アンビギュイティが発生するという問題がある。また、比較的高い距離サイドローブが発生する。

3.6. 多周波ステップ CPC 方式

多周波ステップ CPC (Complementary Phase Code) 方式は、合成帯域方式とパルス圧縮方式を融合した方式である。CPC は、二つの相補となる符号を加算処理することにより距離サイドローブの抑圧を可能とする。多周波ステップ方式は、図 6 のように、同周波数において、CPC によって変調されたパルスを、時分割で送信する。同一周波数において、パルス圧縮波形を加算する事により、距離サイドローブが 0 になったパルス圧縮加算波形が得られる。この加算波形の各サンプルの位相に対し、合成帯域処理を行うことで測距を行う。

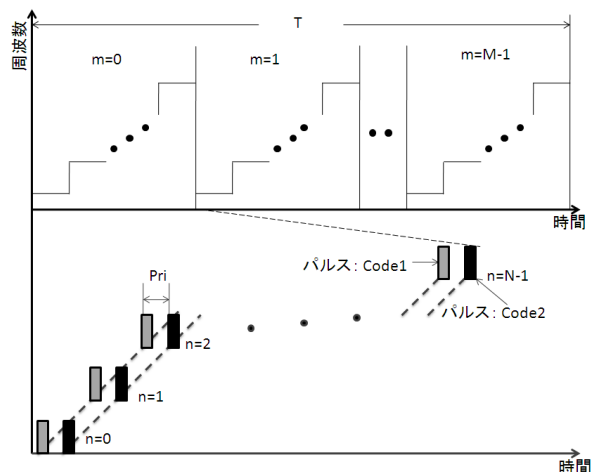


図 8 多周波ステップ CPC 方式送信タイミング図

多周波ステップ CPC 方式は、パルス圧縮加算波形の距離サイドローブが 0 になるため、高い距離ピークサイドローブ電力比が得られる。また、合成帯域処理を行うことで、パルス圧縮方式と違い、占有帯域幅と比較して少ない受信機帯域幅で高距離分解能を得られる。

また、帯域合成処理において問題となる距離アンビグイティは、パルス圧縮加算波形の距離ピークサイドローブ電力比から回避する事が出来る。

4. 各種レーダ方式による原理検証実験

電波暗室において、各種レーダの変調方式を使用し、構築したソフトウェアレーダに対し原理検証実験を行った。実験時のパラメータは、すべて 24GHz 帯特定小電力無線局に準拠している。

4.1.2 周波 CW 方式

2 周波 CW 方式を使用した、電波暗室内において人体の運動検知実験結果を以下に示す。

パラメータ

- 送信周波数：24.15GHz
- 周波数ステップ幅(最大距離視野)：15MHz (10m)
- 周波数切替え間隔 Tstep(最大速度視野)：20 μ s (279.503km/h)
- A/D 変換速度：100kHz
- 観測時間 (速度分解能)：81.92ms (0.273km/h)
- 人物の運動：約 1.0m～約 3.3m を往復歩行



図 9 2 周波 CW 方式実験風景

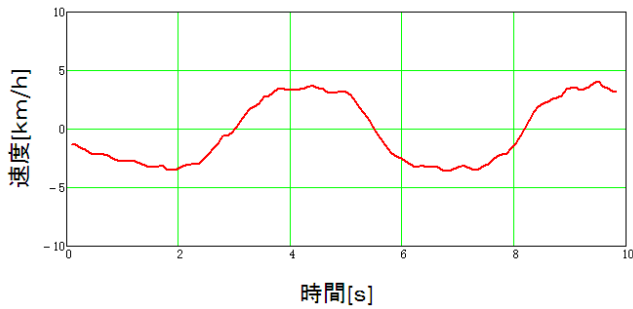


図 10 2 周波 CW 方式実験結果 (速度)

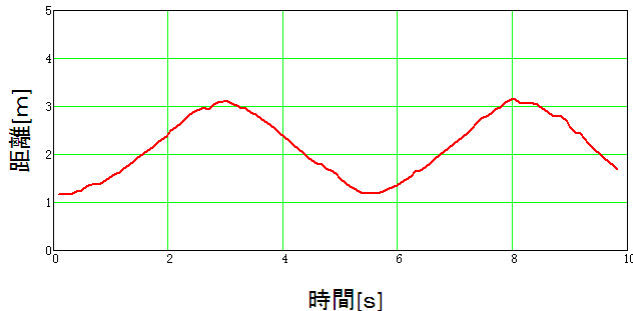


図 11 2 周波 CW 方式実験結果 (距離)

実験結果を図 10,11 に示す。

A/D 変換速度 100kHz という狭帯域かつ低速信号処理にて、またデジタルオシロの制約により帯域制限フィルタが 20MHz にも関わらず、数十 cm 程度と思われる距離推定が可能であることが確認できた。ソフトウェアレーダ装置を使用し、2 周波 CW 方式にて人物の運動検知が可能であることを確認した。

4.2. FMSK 方式

FMSK 方式を使用した、遠距離車載レーダセンサ用途を想定したパラメータを使用した、電波暗室内で複数目標環境下での距離・速度推定実験結果を以下に示す。

パラメータ

- 送信周波数：24.15GHz
- 送信帯域幅：71MHz
- 周波数ステップ幅 Δf ：0.0695MHz
- 周波数 STEP 間隔 fstep(最大距離視野)：0.8MHz(188m)
- ステップ数 N：2048
- 観測時間(速度分解能)：40.96ms(0.5km/h)
- A/D 変換速度：100kHz
- 目標数：2
- 目標 距離，速度：0.97~2.57m, 4km/h で往復 4m, 静止

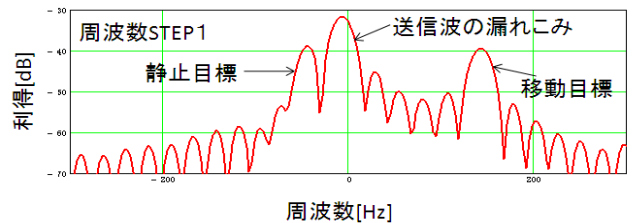


図 12 FMSK 方式周波数 STEP1__Beat 周波数

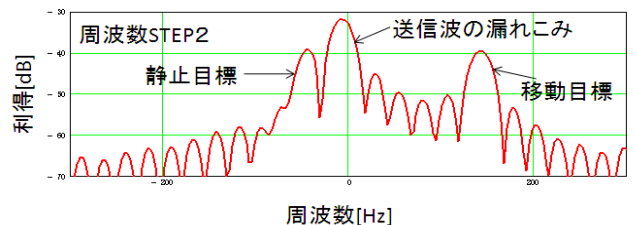


図 13 FMSK 方式周波数 STEP2__Beat 周波数

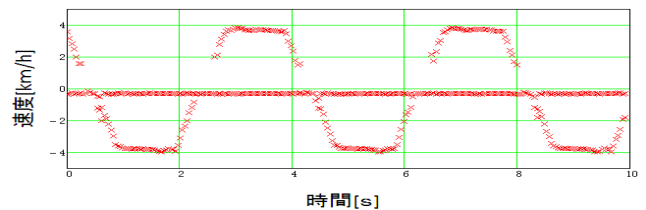


図 14 FMSK 方式実験結果 (速度)

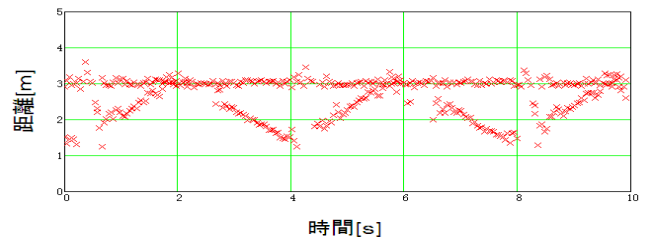


図 15 FMSK 方式実験結果 (距離)

周波数 STEP1/2 時のフーリエ変換の出力結果を図 12,13 に、距離・速度の推定結果を図 14,15 に示す。図 12,13 より、FMSK 方式は、FMCW 方式で課題となるペアリング誤作動なく移動目標(4km/h で往復運動)と静止目標の双方の速度推定が可能であることが確認できた。今回、遠距離車載レーダセンサ用途を想定したパラメータを採用し、距離アンビギュイティ(位相差= 2π)を 188m に設定しているため、90cm のバイアス誤差は位相誤差に換算すると約 1.7deg というわずかなものである。ソフトウェアレーダ装置を使用し、FMSK 方式を用いて物体の速度と距離を計測することが可能であることを確認した。なお、送信波の漏れこみが観測されるが、ソフトウェアレーダは各種方式の実験を行うことを目的としており、送受周波数差=0 の目標測距も可能とするために、RF 部 (IF 部) 設計において、あえて除去しない構成としたためである。

4.3. 多周波ステップ CPC 方式

多周波ステップ CPC 方式に対し、車載レーダセンサ用途等を想定したパラメータを使用した、1 目標環境下での距離・速度推定実験結果を示す。

パラメータ

- 送信周波数：24.15GHz
- サブパルス帯域幅：10MHz
- サブパルス幅(符号長)：1.6 μ s (16chip)
- 周波数ステップ幅：8.857MHz
- ステップ数(最大速度視野)N：8 (± 215 km/h)
- 占有周波数帯域幅(距離分解能)：72MHz (2.083m)
- PRI(最大距離視野)：3.25 μ s (487.5m)
- パルス数 M：1024
- 観測時間(速度分解能)：53msec(0.42km/h)
- 目標(距離, 速度)：1 目標 (1.2m \sim 2.8m, -4km/h)

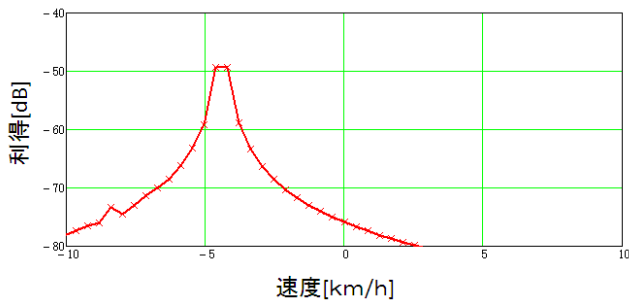


図 16 多周波ステップ CPC 方式実験結果 (速度)

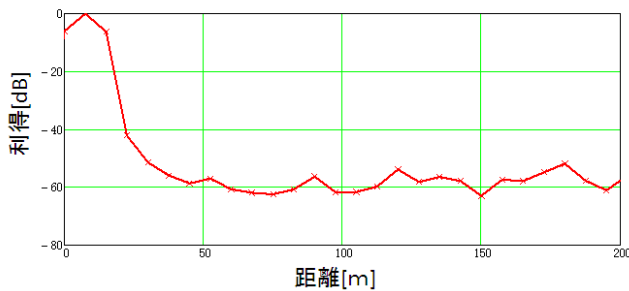


図 17 パルス圧縮加算結果

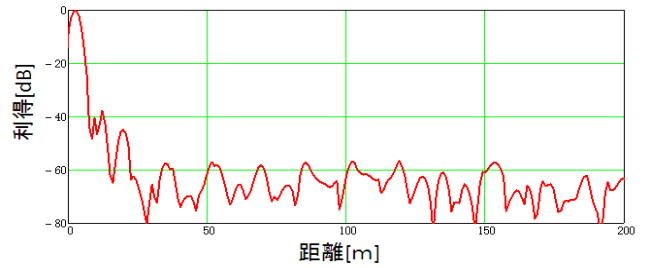


図 18 多周波ステップ CPC 方式実験結果 (距離)

目標速度推定(パルスドップラ処理出力:MTI 使用)結果を図 16 に、パルス圧縮加算波形及び、合成帯域結果を、それぞれ図 16, 図 17 に示す。図 15 より目標反射波の相対速度(-4km/h)が観測されていることが分かる。また図 17 より符号長が 16 と比較的短いにも関わらず 0 \sim 200m 以上にわたり距離サイドローブが平均 -60dB 以上まで低減されたパルス圧縮加算波形が得られた。このパルス圧縮加算波形の各サンプル点においてハミングウェイトを適用した合成帯域処理を行うことにより、距離アンビギュイティを回避できることを図 18 より確認できた。また、図 17 のパルス圧縮加算後のパルス幅は、受信機帯域が 10MHz と狭帯域であるため 15m である。合成帯域処理により図 18 に示すように約 2.5m の距離分解能が得られることも確認できた。ソフトウェアレーダ装置を使用し、多周波ステップ CPC 方式にて、移動目標の距離と速度を計測することが可能であることを確認した。

5. むすび

本論文においては、複数の汎用機材を使用することにより、各種レーダ変調方式を実験することが可能なソフトウェアレーダの構築について報告した。また、暗室実験にて構築したソフトウェアレーダは、各種変復調方式のレーダとして動作することを確認した。一例として多周波ステップ CPC 方式においては、符号長 16, 受信機帯域幅 10MHz にも関わらず -60dB 程度の低サイドローブと、特定小電力無線局規格での最大周波数幅 76MHz 相当の高距離分解能が得られることを確認できた。本研究の一部は科研費(課題番号:21246062)によりなされた。

参考文献

- [1] 廣川裕祐, 稲葉敬之, “FMSK 方式の 24GHz 車載レーダへの適用”, 信学総大, B-2-39, Mar. 2010
- [2] 木島壯氏, 稲葉敬之, “ミリ波車載レーダへの適用を想定した Hybrid-CFS 法”, 信学総大 B-2-21, Mar. 2009
- [3] 坪田光, 稲葉敬之, “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, Mar. 2010
- [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, April 2005.
- [5] Donald R. Wehner, High Resolution Radar Second ed., Artech House, Boston, 1994
- [6] 岩間佑介, 稲葉敬之, “ソフトウェアレーダの構築と 2 周波 CW 方式の人物運動検知レーダへの適用”, 信学総大, B-2-35, Mar. 2010