

## 369-20125330 車載用ミリ波レーダの開発と実験的評価\*

稲葉 敬之<sup>1)</sup>渡辺 優人<sup>2)</sup>

## Development and Evaluation of Millimeter wave Radar using Stepped Multiple Frequency CPC

Takayuki Inaba

Masato Watanabe

This paper describes a development of Millimeter wave Radar (Experimental model) for automotive. The radar is based on Stepped multiple-frequency CPC (complementary phase code) that is our proposed radar signal modulation to obtain high range resolution with the narrowband receiver. In this paper, the Stepped multiple frequency CPC modulation is explained. Next, the development procedures and the radar configuration is presented. Furthermore, it is shown that the expected good range resolution performance by Stepped multiple-frequency CPC is also obtained by means of experimental study in anechoic chamber. Furthermore, an experimental result for the Millimeter wave Radar (Experimental model) equipped in front of car is shown.

**KEY WORDS:** (Standardized) electronics and control, millimeter wave radar, test (Free) pulse compression [E1]

## 1. まえがき

現在、車載レーダは遠距離レーダ、近距離レーダと別々に開発が進められている。遠距離レーダは、車間距離制御 (ACC: Adaptive Cruise Control)、衝突被害軽減 (collision avoidance)、渋滞時などの低速時の先行車追従 (Stop & Go) 等の機能を実現するセンサとして 200m 以上の探知距離が要求される。これに対して近距離レーダは車の側方監視や左折時の巻き込み防止等の用途を実現するセンサとして、高い距離分解能が要求される。前者には FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave) 方式及び 2 周波 CW 方式という CW 方式が、後者にはパルス方式が多く採用されている<sup>(1)(4)</sup>。また近年、国内および欧州を中心に導入検討が進められている 79GHz 帯 (77-81GHz) は、76GHz 帯と比較して広い周波数帯域 (4 倍以上) が使用可能ため高距離分解能を実現だが、その送信電力は 76GHz と同様に 10mW であり、周波数帯域の増加により雑音が増加するため信号対雑音比の悪化による探知距離の低下が発生する。レーダは距離の 4 乗に従って信号電力が減衰するため、近距離と遠距離では非常に大きな目標信号電力差が発生するため、近距離に非常に強い目標信号が存在する環境において、より危険度が高い遠距離目標を分離・検知することができないという課題がある。

このような背景を踏まえ、車載レーダ等で要求される観測時間・周波数帯域幅の制約の中で遠近両用を可能とするため

に、CPC (complementary phase code) パルスを送信波とした多周波ステップ CPC 方式を提案している<sup>(5)</sup>。CPC は互に相補となる二つの符号を送信し、受信した各符号のパルス圧縮出力を加算することで、距離サイドローブを 0 とすることが可能である。しかし、CPC はドップラーシフトの影響によりサイドローブ特性が悪化することが知られている。これに対し多周波ステップ CPC 方式では、同じ送信周波数のパルス圧縮出力に対してフーリエ変換によるドップラー周波数 (すなわち目標速度) 検出とそれに基づくドップラー補正処理を、各 CPC のパルス圧縮とそれらの加算の間に挿入することを特徴としている。この結果、まず目標を速度で分離可能であり、かつ少ない符号長にて極めて低い距離サイドローブが得られ、等速遠近目標の距離分離が期待される。さらに CPC パルス圧縮の加算出力を距離ゲート信号とし、それを入力とし周波数ステップ方向にフーリエ変換することより狭受信機帯域にて高距離分離が得られる。高距離分解能化により距離ゲート信号では分離できない近距離の等速複数目標を分離することが可能である。さらに S/N 改善効果により探知距離の延伸が期待される。筆者らは、この多周波ステップ CPC 方式を変調方式とし、ミリ波帯の特定小電力無線局規格に準拠したミリ波リアルタイムレーダ (実験モデル) を開発している。本論文では、多周波ステップ CPC 方式の原理およびミリ波リアルタイムレーダ (実験モデル) の構成を説明するとともに、電波暗室内での基礎実験結果を示すとともに、ミリ波リアルタイムレーダ (実験モデル) を用いた車両搭載実験のオフライン信号処理結果について紹介する。

\*2012年05月25日自動車技術会春季学術講演会において発表。

1)・2) 電気通信大学 (182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1) inaba@ee.ucc.ac.jp

## 2. 多周波ステップ CPC 方式

多周波ステップ CPC 方式は、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探知距離と距離分解能の両立を図るために、時分割で送信周波数切り替える周波数ステップを採用し、のちに周波数方向に受信信号を合成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。このとき周波数ステップ数  $N$  を 8 程度とし、これらを観測時間内で  $M$  回繰り返す送信周波数シーケンスを用いる。これにより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ー周波数(すなわち目標速度)を推定することが可能である。また遠近目標の距離分離を達成するため高い距離サイドローブ抑圧性能が要求されるが、限られた観測時間内においてパルス繰り返し周期は最大インストルメント距離を満足する範囲で短く設定しなければならず、デューティ比を低く抑えるため送信パルス幅(符号数)を増やすことが困難である。よって、少ない符号数で高い距離サイドローブ抑圧性能を有する CPC を送信パルスとして用いる。CPC は互いに相補となる 2 つの CPC パルス同士を加算することにより低距離サイドローブを得るが、ドップラーシフトの影響によりその距離サイドローブ性能が劣化することが知られている。そのため加算時の誤差が最小となるように、Fig1 に示すように同じ送信周波数にて時間軸に対して一定の時間遅延後に連続して 2 つの CPC パルスを送信する送信周波数シーケンスを用いる。これにより送信周波数切換による影響を回避し、かつドップラー周波数補正による補正誤差を低減することが可能である。

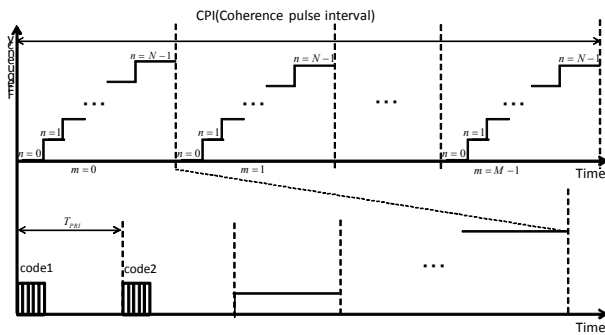


Fig.1 Transmission frequency sequence of Stepped multiple-frequency CPC

### 2.1. 多周波ステップ CPC 方式の計測信号

Fig.1 の送信周波数シーケンスを用いた多周波ステップ CPC 方式における計測信号モデルについて説明する。送信周波数  $f(n) = f + \Delta f \cdot n$  ( $n=0,1,\dots,N-1$ ) を  $2 \cdot T_{PRR}$  毎に切り替え、それらを搬送波とすし、2 つの CPC パルス(符号 1,2 とする)をパルス繰り返し間隔  $T_{PRR}$  で交互に送信する。尚、 $f$  とは送信開始周波数、 $\Delta f$  は周波数ステップ幅のことである。この送信

波に対する受信波は時間遅延  $\tau$  とドップラーシフトの影響を受けて、受信アンテナへと入射する。この受信波は、ローカル信号  $f(n)$  でミキシングされ、レンジビン(時間遅延  $\tau$ )での計測信号として CPC 符号 1, 2 それぞれ、

$$x(n, m) = \exp \left[ 2\pi j \left( -\frac{2R}{c} (f + \Delta f \cdot n) + f_d \cdot (2 \cdot T_{PRR} \cdot n + 2 \cdot T_{PRR} \cdot N \cdot m + t'_1) \right) \right] \cdot \exp [j\phi_1] \quad (1)$$

$$x(n, m) = \exp \left[ 2\pi j \left( -\frac{2R}{c} (f + \Delta f \cdot n) + f_d \cdot (2 \cdot T_{PRR} \cdot n + T_{PRR} + 2 \cdot T_{PRR} \cdot N \cdot m + t'_2) \right) \right] \cdot \exp [j\phi_2] \quad (2)$$

と表される。ここでドップラー周波数  $f_d (= 2vf/c)$ 、 $R$  は目標距離、 $v$  は目標との相対速度、 $c$  は光速、 $\phi_1$ 、 $\phi_2$  はそれぞれ

code1, code2 を表す。同一レンジビンに複数の目標が存在する場合、計測信号は式(1)(2)、それぞれの線形和として書き表すことができる。式(1)(2)から分かるように、 $m$  方向サンプリング信号の周波数から目標相対速度が得られ、 $n$  方向サンプリング信号の周波数は目標距離と相対速度の関数となることが分かる。

### 2.2. 多周波ステップ CPC 方式の信号処理

Fig.2 に多周波ステップ CPC 方式の信号処理構成を示す。このとき A/D サンプリング後の計測信号は式(1), (2)に示す通りである。まずこれらに対し各  $m$ ,  $n$ , 符号毎にパルス圧縮を行う。尚、参照信号には各符号の複素共役信号を用いることとする。次に各周波数ステップ、符号毎にパルス圧縮出力に対して  $m$  方向にフーリエ変換を適用し、目標ドップラー周波数を推定する。ここでは各符号毎に目標ドップラー周波数を推定する方法について説明したが、各符号のパルス圧縮出力の絶対値に対し、不等間隔サンプリングによるフーリエ変換を適用することも可能であり、それにより周波数視野、すなわち速度視野が拡大する。得られた各ドップラー周波数を用いて、各符号毎にドップラーシフトによる影響、各周波数ステップおよび各符号間の遅延時間差に起因する位相差を補正する。このときドップラーシフトによるパルス圧縮出力における距離バイアス誤差は微小であり、パルス圧縮後にドップラー推定・補正処理を行うことが可能である。これら位相補正処理後の信号に対して、加算を行うことで計算量を低減しつつ、低距離サイドローブを実現する。その加算結果を距離ゲート信号とし、それを入力として周波数ステップ方向に合成することにより高距離分解能化した距離プロファイルを得る。得られた距離プロファイルに対し、距離方向に検出処理を行う。検出された  $r_{det}$  が目標距離であり、それに対応する周波数

チャンネルの番号を  $k_{det}$  より目標相対速度が得られる。以上説明した多周波ステップ CPC 方式では、1 回の観測時間  $T_C$  のみの計測時間で多目標環境における目標距離・速度計測を可能とする。

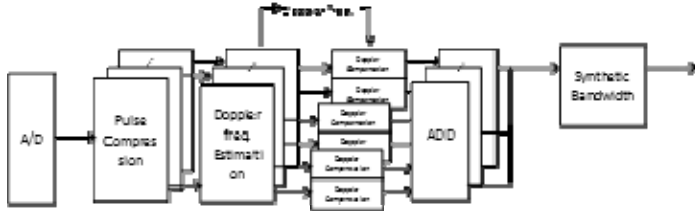


Fig.2 Schematic diagram of Stepped multiple frequency CPC

### 3. ミリ波レーダ

Fig.3, 4 に多周波ステップ CPC 方式ミリ波リアルタイムレーダ (実験モデル) の外観図, 構成図それぞれを示す。本装置は RF, IF および信号処理装置から構成され, Table1 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 40dB) を満足する仕様である。RF, IF 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, 編波は水平編波を採用している。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となっている。また信号処理装置は A/D ボード 2 枚, D/A ボード 1 枚およびインターフェイスボードから構成される。各 A/D は 160MHz で動作し, A/D ボードに搭載された FPGA (Virtex5 FPGA) によりリアルタイムにて実施可能である。さらに各アンテナ毎に OS-CFAR にて検出された目標信号は信号処理装置制御装置へと送られ, 振幅モノパルス測角処理, しきい値処理を経て画面上へと表示される。またリアルタイムモードに加えて, A/D 後の信号を出力するオフラインモードも有する。

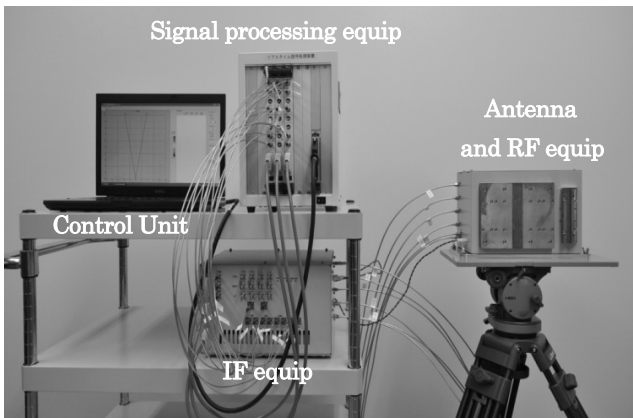


Fig.3 Outline view of the radar

Table 1 Radar parameter

Transmit frequency	60.25-60.75GHz
Pulse bandwidth	80MHz
Pulse width	0.2μsec(30m)
Code length	16
PRI	3.5μsec
Pulse number: M	512
Frequency step width	60MHz
Frequency step number: N	8
Transmission bandwidth	500MHz
Observation time	29msec
A/D sampling frequency	160MHz

## 4. 実験結果

### 4.1. 電波暗室実験

目標はアクチュエータ上にコーナリフレクタを取り付け移動目標とした。アクチュエータは設定速度を最高速度とし, 1.6m の範囲内を往復する。目標緒元は目標距離 3.2-4.8m, 目標速度 4km/h である。Fig.4,5,6 に電波暗室内で実施したミリ波レーダオフライン試験結果をそれぞれ示す。Fig.4 は目標ドップラー推定処理結果を示し, -4km/h 近傍にピークが得られている。これより, 目標を速度で分離することが可能である。Fig.5 は, Fig.4 のピークとなる周波数チャンネルに対応する距離ゲート信号を示し, 符号長が 16 と比較的短いにも関わらず 20~200m 以上にわたり -60dB 以下の距離サイドローブが得られている。また Fig.6 は Fig.5 を入力とした周波数ステップ方向の合成出力である距離プロファイルを示し, A/D サンプリング周波数 160MHz にて送信帯域幅 500MHz に相当するメインローブ幅約 0.3m が得られている。以上より, RCS を一定としたとき 1m と 200m の信号レベル差は 92dB となり, 多周波ステップ CPC 方式では目標の距離, 速度が異なれば, 最大で 110dB のアイソレーションを実現することが期待される。

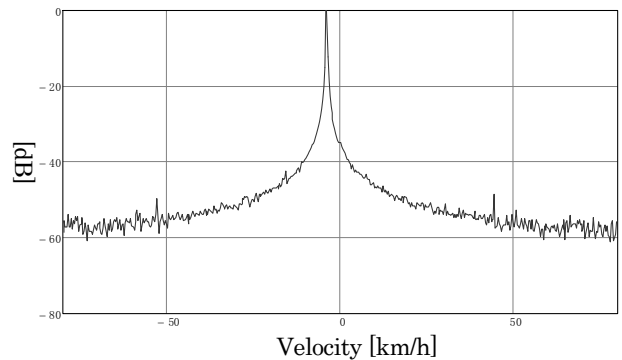


Fig.4 Velocity estimation result

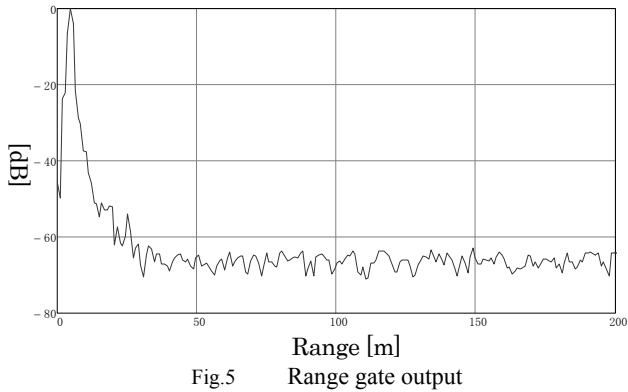


Fig.5 Range gate output

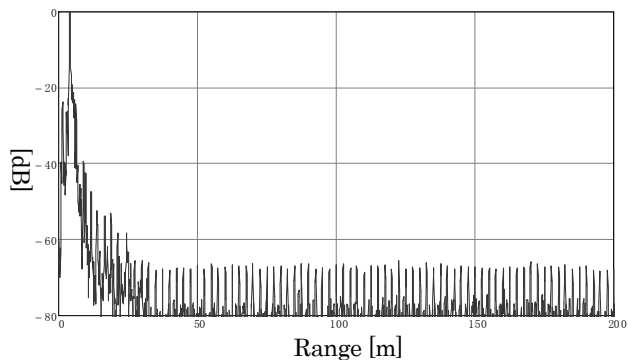


Fig.6 Range estimation result (Synthetic bandwidth processing output)

#### 4.2. 車両搭載実験

見通しの良い直線道路に目標(コーナリフレクタ RCS:18dB)を設置し、アクチュエータにて4 km/hで移動させた。これに対し、Fig 7に示すようにレーダRFを自動車前面に取り付け、時速約25 km/hで走行中の車両から計測を行った。このときのオフライン処理結果をFig. 8に示す。Fig 8において相対速度24 km/hの位置に距離方向に広がりを持つ出力が地面など静止物(クラッタ)を表し、静止物と目標を速度で分離することを確認した。また大気減衰 15dB/km(60±3GHz)という条件下において目標距離 145mでの信号処理後の S/N比は約30dBであり、ミリ波特定小電力規格内で車両に対して200m以上の探知距離が期待される。今後の課題として、CFARやSTAPなどのクラッタ抑圧処理の追加が課題である。

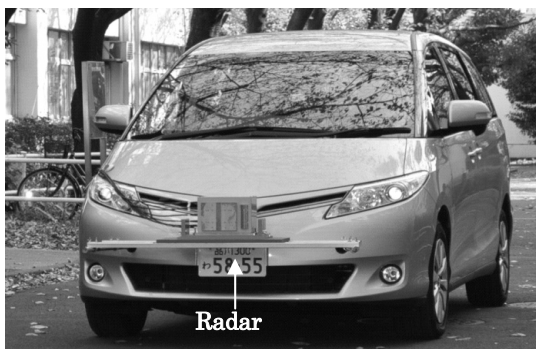


Fig.7 Car equipped with the Radar

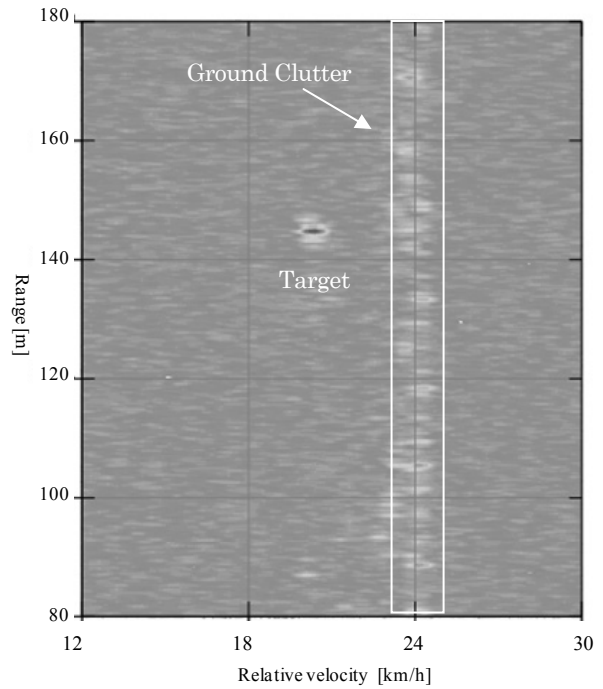


Fig.8 Range and velocity estimation result

#### 5. まとめ

本論文では、多周波ステップCPC方式の原理およびミリ波リアルタイムレーダ(実験モデル)の構成を説明するとともに、電波暗室内での基礎実験結果を示すとともに、ミリ波リアルタイムレーダ(実験モデル)を用いた車両搭載実験のオフライン信号処理結果について紹介した。本研究は、鉄道・運輸機構基礎研究制度(No.2009.02)により行われた。

#### 参考文献

- (1)Eriksson, L. H., As, B., "A high performance automotive radar for automatic AICC", Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, vol.10, no.12, pp.13, Dec. 1995
- (2)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.
- (3)小川 勝, 浅野 孔一, 大島 繁樹, 原田 知育, 山田 直之, 渡辺 俊明, 西川 訓利, "送受アンテナ切換式電子スキャンミリ波レーダ", 信学論(A), vol. J88-A, no. 2, pp. 237-246, Fri. 2005.
- (4)稲葉敬之, 桐本哲郎, "車載用ミリ波レーダ", 自動車技術 vol. 64, no. 2, pp. 74-79, Feb. 2010. 89.
- (5)Masato Watanabe, Takayuki Inaba, Hikaru Tsubota, Takahiro Yano, "Development of Millimeter wave Radar using Stepped Multiple Frequency Complementary Phase Code Modulation, ICSANE2011, SANE2011-81, Oct. 2011.