

# 多周波ステップ CPC 方式における ドップライメージングの任意時刻合焦と高速化の検討

渡辺 一宏 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科 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

E-mail: watanabe.kazuhiro@inabalab.ee.ucc.ac.jp

あらまし 筆者らは、多目標の分離が可能であり狭受信機帯域にて遠距離性を確保しつつ高距離分解能を実現可能な多周波ステップ CPC 方式[1]を提案し実用化に取り組んでいる。これまで、この変調方式の車載レーダ等への応用を想定し、前側方の静止物に対する距離と速度の2次元画像(RVマップ)を高精度に生成する手法について提案してきた[2]。本稿では、多周波ステップ間ドップラ補正をはじめレンジウォークとドップラウォークのすべてを補償しつつパルス列の任意パルス時刻で合焦させる処理方法を提案する。提案法により、任意の指定合焦時刻において正しい合焦位置で合焦できることを示す。また、処理負荷の大きな多周波ドップラ補正とレンジウォーク補償において、FFTが利用できる手法を導入してカスケードに実行する高速化処理を提案しその結果を示す。

キーワード 多周波ステップ CPC ミリ波レーダ, ドップライメージング, レンジウォーク, ドップラウォーク

## High Resolution Doppler Imaging Processing for Stepped Multiple Frequency CPC Rader to Enable Focusing at the Arbitrary Time and Processing at High Speed

Kazuhiro WATANABE 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: watanabe.kazuhiro@inabalab.ee.ucc.ac.jp

**Abstract** This paper describes a processing method that enables focusing at arbitrary time in Doppler imaging in the front direction of automotive radar using multiple frequency CPC modulation method. This method enables focusing at any pulse time while compensating for Doppler frequency spreading due to multiple frequency transmissions and range walk and Doppler walk due to radar movement during the measurement period. And this paper also describes the fast processing by using FFT for Doppler frequency spreading correction and range walk compensation with large processing load, and shows the results of Doppler imaging by this method.

**Keyword** millimeter wave radar using stepped multiple frequency CPC, Doppler imaging, range walk, Doppler walk

### 1. まえがき

近年、障害物や人間を検知して衝突を回避する自動ブレーキ機能や、周辺車両の車間距離や速度を計測して自車の速度を制御する衝突予防システムが脚光を浴びている。これらを実現する技術としてミリ波レーダが活用されている。筆者らは、複数周波数ステップを用い狭受信機帯域幅で高距離分解能と遠距離性を両立

する多周波ステップ CPC 方式 [1]を提案し、実用化に取り組んでいる。これまで、この変調方式の車載レーダ等への応用を想定し、前側方の静止物に対する距離と速度の2次元画像(RVマップ)を、長時間計測によりドップラ周波数分解能を高めると同時にドップラ拡がりレンジウォークを補償することによって合焦精度の高いRVマップを生成できることを示した[2]。

そこでは、計測時間内において合焦する時刻を計測開始時刻に限定したものであったが、本稿では合焦時刻を任意に指定できる手法を提案する。長時間計測内の計測終了時刻に合焦時刻を設定することにより、直近の時刻に合焦した RV マップを得ることができ、衝突予防の応用において有用なものとなる。また、合焦時刻を変えながら複数の RV マップを生成することで、車載レーダが静止物に接近する様子を時系列で高分解能表示することも可能となる。さらに本稿では、本合焦処理の中で特に処理負荷の大きな多周波ステップ間ドップラ補正とレンジワーク補償において、FFT が利用できる手法を導入した高速化処理を提案する。

## 2. 多周波ステップ CPC ミリ波レーダ

筆者らが提案する多周波数ステップ CPC 方式は、CPC パルス圧縮と位相差を用いた距離推定（合成帯域法）を複合したレーダ変調方式である[1]。時分割で2つの相補となる CPC(Complimentary phase code)符号の送信と複数個の送信周波数切り替えを行い、受信時に送信周波数毎に復調する。受信信号をパルス圧縮処理した後ドップラ周波数推定を行う。時分割送信によるドップラシフトに対する位相補正処理を行い、相補の CPC 受信信号の加算により距離サイドローブを抑圧する。

さらに、複数ステップの周波数方向に受信信号を合成する合成帯域法により、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るとともに遠距離性も両立している。図1に送信シーケンス、図2に多周波ステップ CPC 方式の信号処理ブロック図を示す。

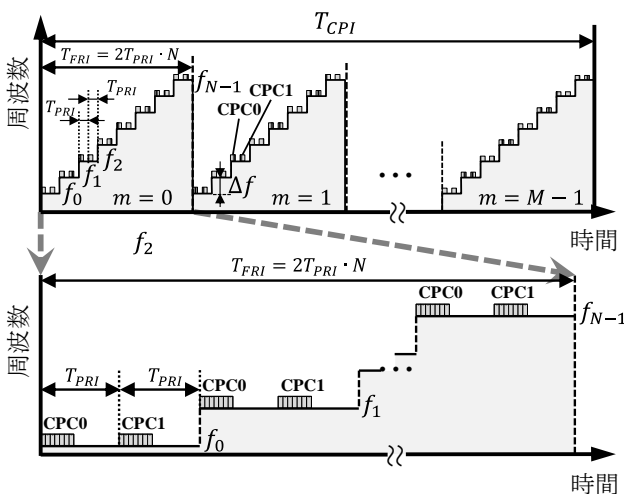


図1. 多周波ステップ CPC 方式送信シーケンス図

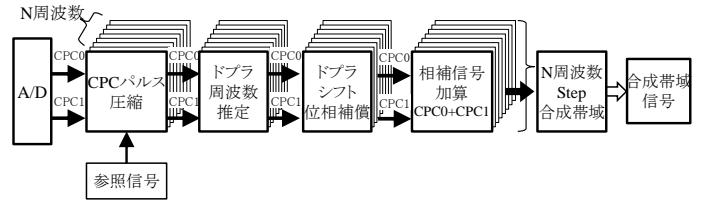


図2. 多周波ステップ CPC 方式の信号処理ブロック図

## 3. ドップライメージング

### 3.1 周波数ステップ CPC 方式の受信信号

多周波ステップ CPC 方式の各ステップで送信周波数が異なることを考慮した受信信号は以下ようになる。

$$s_{ic}(n, t_m, \tau) = g \left( \tau - \frac{2R(t_m)}{c} \right) \cdot \exp \left( -j2\pi(f_0 + n\Delta f) \frac{2R(t_m)}{c} \right) \quad (1)$$

また、受信パルス番号  $m$  における slow time  $t_m$  は、図1の送信シーケンスより下式で与えられる。

$$t_m = 2T_{pri}(N \cdot m + n) + T_{pri} \cdot ic \quad (2)$$

ここで、式内の各変数は下記のとおりである。

$c$	光速
$\tau$	fast time
$t_m$	slow time
$g$	信号複素振幅
$R$	目標距離
$f_0$	ステップ0の送信周波数
$\Delta f$	送信周波数ステップ間隔
$T_{pri}$	パルス繰返し周期
$N$	送信周波数ステップ数
$n$	送信周波数ステップ番号(0...N-1)
$M$	パルス数
$m$	パルス番号(0...M-1)
$ic$	CPC 符号番号(0,1)

### 3.2 ドップライメージングの定式化

図3に示すような前側方の静止目標の横を速度  $V$  で接近するレーダを考え、 $M$  回の多周波ステップ送受信で得られる計測時間  $t_0 \sim t_{M-1}$  の受信信号パルス列から計測開始時刻  $t_0$  における目標位置に合焦させるコヒーレント

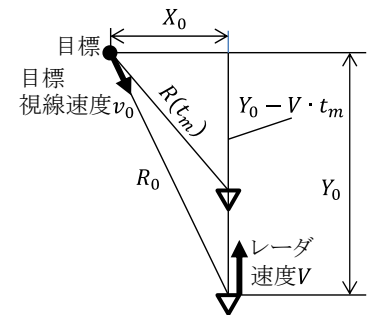


図3. 移動レーダによる点目標の計測

積分の定式化を行う。

(1)式で与えられる多周波ステップ CPC の受信信号  $s_{ic}(n, t_m, \tau)$  の fast time  $\tau$ でのフーリエ変換  $S_{ic}(n, t_m, f_\tau)$  は(3)式ようになる。ここで、 $f_\tau$ は各周波数ステップ帯域内の fast time 方向の周波数で、 $G(f_\tau)$ は  $g(\tau)$ のフーリエ変換である (図4)。

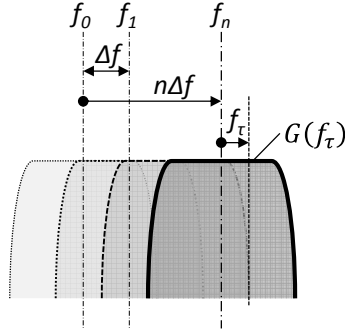


図4. fast time 時間領域での受信信号

$$S_{ic}(n, m, f_\tau) = G(f_\tau) \cdot \exp\left(-j2\pi f_\tau \frac{2R(t_m)}{c}\right) \cdot \exp\left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f) \frac{2R(t_m)}{c}\right) \quad (3)$$

$$= G(f_\tau) \cdot \exp\left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f + f_\tau) \frac{2R(t_m)}{c}\right)$$

ここで、 $t_0$ における距離を  $R_0$ 、目標視線速度を  $v_0$ とし、新しい slow time 時間変数  $t'_m$ を導入し、

$$R(t_m) = R_0 - v_0 t'_m \quad (3) \quad t'_m = \frac{R_0 - R(t_m)}{v_0} \quad (4)$$

とすれば、 $t'_m$ を使った fast time 周波数領域での受信信号  $S'_{ic}$ は式(5)のようになる。

$$S'_{ic}(n, m, f_\tau) = G(f_\tau) \cdot \exp\left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f + f_\tau) \frac{2(R_0 - v_0 t'_m)}{c}\right)$$

$$= G(f_\tau) \cdot \exp\left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f + f_\tau) \frac{2R_0}{c}\right) \cdot \exp\left(j2\pi(f_0 + n\Delta f + f_\tau) \frac{2v_0 t'_m}{c}\right) \quad (5)$$

受信信号パルス列  $S'_{ic}$ をパルス方向にコヒーレント積分してドップラ周波数推定を行う。式(5)においてドップラ周波数が送信周波数に依存しないように、中心周波数  $f_c$ での推定ドップラ周波数  $2\tilde{v}f_c/c$ を用いて位相回転の補正を考えると、ドップラ補正因子は、

$$\alpha(n, t_m, \tilde{v}) = \exp\left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f + f_\tau) \frac{2\tilde{v}}{c} t'_m\right) \quad (6)$$

となり、fast time 周波数領域におけるコヒーレント積分によるドップラ信号  $Dop_{ic}$ は式(7)のようになる。

$$Dop_{ic}(n, f_\tau) = \sum_{m=0}^{M-1} S'_{ic}(n, m, f_\tau) \cdot \alpha(t'_m, \tilde{v}) \quad (7)$$

式(4),(5),(6),(7)より、 $Dop_{ic}$ は式(8)のようになる。

$$Dop_{ic}(n, v_0, R_0, f_\tau) = \sum_{m=0}^{M-1} S_{ic}(n, m, f_\tau) \cdot \exp\left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f + f_\tau) \frac{2\tilde{v}}{c} \cdot \frac{R_0 - R(t_m)}{v_0}\right) \quad (8)$$

図3より、 $t_m$ における目標距離  $R(t_m)$ は式(9)のように

なる。

$$R(t_m) = \sqrt{R_0^2 - 2R_0 v_0 t_m + V^2 t_m^2} \quad (9)$$

推定目標視線速度  $\tilde{v}$ が  $v_0$ に等しくなるようにドップラ補正を行うと fast time の周波数領域におけるドップラ信号  $Dop_{ic}$ は式(10)のようになる。

$$Dop_{ic}(n, v_0, R_0, f_\tau) = \sum_{m=0}^{M-1} S_{ic}(n, m, f_\tau) \cdot \exp\left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f + f_\tau) \frac{2(R_0 - \sqrt{R_0^2 - 2R_0 v_0 t_m + V^2 t_m^2})}{c}\right) \quad (10)$$

式(10)を fast time で逆フーリエ変換を行い、時間軸でのドップラ信号  $dop_{ic}$ は式(11)のようになる。

$$dop_{ic}(n, v_0, R_0, \tau) = IFFT\left(Dop_{ic}(n, v_0, R_0, f_\tau)\right) \quad (11)$$

距離と速度の2次元画像である RV マップのピクセル座標を  $(Vbin, Rbin)$ とした時、式(10)中の  $t_m$ を式(2)で与え、 $v_0$ および  $R_0$ を式(12),(13)で与える。

$$v_0 = Vbin \cdot \Delta v \quad \Delta v : Vbin \text{間隔} \quad (12)$$

$$R_0 = Rbin \cdot \Delta R \quad \Delta R : Rbin \text{間隔} \quad (13)$$

式(11)の  $dop_{ic}(n, v_0, R_0, \tau)$ の  $\tau = Rbin$ での値(振幅)をピクセル値とすることにより  $t_0(m=0)$ において合焦させた RV マップを生成することができる。

こうして得られる RV マップは、多周波ステップによるドップラ拡がり、計測時間  $t_0 \sim t_{M-1}$ におけるレンジウォークとドップラウォークを補償し、計測開始時刻  $t_0$ における目標位置に合焦させたものとなっている。

図5に、上述の定式に基づく多周波ステップ CPC 方式におけるドップライメージング処理のブロック図を示す。 $N$ 個の周波数ステップの各2つの相補となる CPC 符号の受信信号に対して、fast time 領域で FFT を行い周波数領域においてパルス圧縮のための参照信号との乗算を行った後、式(10)のコヒーレント積分処理を行う。ここで、図2で示したドップラ推定処理および時分割送信によるドップラシフトに対する位相補正処理は完了する。その後、式(11)の IFFT 処理で fast time 領域に変換し、相補の CPC 信号の加算により距離サイドローブを抑圧し合成帯域処理の後 RV マップを得る。

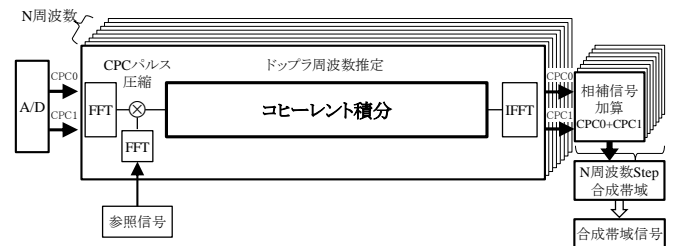


図5. 多周波ステップ CPC 方式の信号処理ブロック図

### 3.3 任意時刻における合焦

計測時間  $t_0 \sim t_{M-1}$  内の任意時刻  $t_q$  すなわちパルス番号  $m = m_q$  における合焦は、式(2)の slow time を式(14)で与え、前述と同じく式(10)でコヒーレント積分したのち式(11)による時間軸ドップラ信号  $dop_{ic}$  から RV マップを得ることで可能である。

$$t_m = 2T_{pri}(N \cdot (m - m_q) + n) + T_{pri} \cdot ic \quad (14)$$

以下に、本ドップライメージングの定式に基づいた RV マップの生成例を示す。5 点の静止目標をレーダの前側方に配置し (図 6)、その横を速度  $V = 50\text{km/h}$  で接近しながら  $M = 4096$  回の多周波ステップ送受信で得られる受信信号パルス列を使い、丁度中間のパルス番号  $m = m_q = 2048$  で合焦させた RV マップを生成する (図 7)。コヒーレント処理が可能な時間  $1\text{CPI}(28.6\text{ms})$  内の計測を想定した通常のドップラ推定による RV マップを図 8 に示す。1CPI を越える長時間計測 (8CPI 分,  $228.8\text{ms}$ ) のため、目標像がレンジ・ドップラウォークにより流れたものになっている。一方、図 9 に示す本ドップライメージングによる合焦処理を行った RV マップでは、5 目標ともに図 7 で予定していた位置に点像として合焦できている。

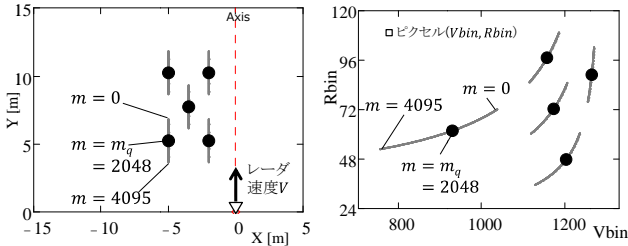


図 6. 静止目標位置

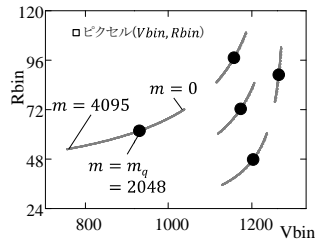


図 7. 合焦位置

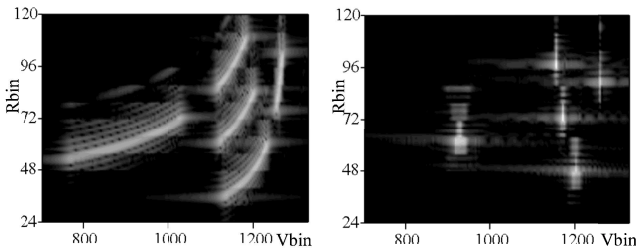


図 8. 合焦処理前

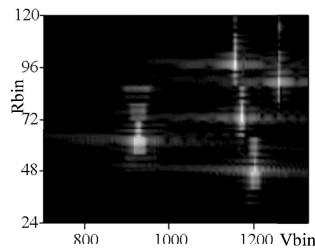


図 9. 合焦処理後

### 3.4 合焦処理の高速化

前項の式(10)によるコヒーレント積分は、一つの定式で多周波ステップによるドップラ拡がり補正、レンジ・ドップラウォーク補償の全てが完結しているが、FFT 等の高速演算が利用できない形であるため合焦の処理時間が大きいものとなっている。そこで、合焦処

理を複数の処理に分割し、部分的に FFT が使える処理に置き換えてそれらの処理をカスケードに処理することによる高速化を図った。具体的には、下記の通り処理を分割した。

- 1) 多周波ドップラ補正とレンジウォーク補償
- 2) 合焦位置シフトとドップラ位相補正
- 3) ドップラウォーク補償

まず、1)の処理で多周波ステップによるドップラ拡がり補正を行うと同時に合焦時刻を  $t_0$  ( $m = 0$ ) としたときのレンジウォーク補償を行う (距離方向の合焦)。次に、2)の処理で距離方向の合焦位置を指定時刻  $t_{m_q}$  ( $m = m_q$ ) へシフトする。最後に、3)の処理でドップラウォーク補償を行う (速度方向の合焦)。

#### 3.4.1 多周波ドップラ補正とレンジウォーク補償

多周波ステップによるドップラ拡がり補正とレンジウォーク補償は式(15)で同時に処理可能である。しかし、fast time 周波数領域の各周波数  $f_\tau$  に対してコヒーレント積分 (slow time) を行うため処理量は大きくなる。

$$Dop_{ic}(n, Vbin, f_\tau) = \sum_{m=0}^{M-1} S_{ic}(n, m, f_\tau) \cdot \exp\left(-j2\pi\left(\frac{f_0 + n\Delta f + f_\tau}{f_c}\right)\frac{m}{M}Vbin\right) \quad (15)$$

そこで、式(15)の  $S_{ic}$  について slow time の離散時間  $m$  を式(16)のようにスケール変換することにより FFT が使える形にすることができる。

$$\begin{aligned} Dop_{ic}(n, Vbin, f_\tau) &= \sum_{m=0}^{M-1} S_{ic}(n, m, f_\tau) \cdot \exp\left(-j2\pi\left(\frac{f_0 + n\Delta f + f_\tau}{f_c}\right)\frac{m}{M}Vbin\right) \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} S_{ic}\left(n, \left(\frac{f_c}{f_0 + n\Delta f + f_\tau}\right)m, f_\tau\right) \cdot \exp\left(-j2\pi\frac{m}{M}Vbin\right) \\ &= FFT\left(S_{ic}\left(n, \left(\frac{f_c}{f_0 + n\Delta f + f_\tau}\right)m, f_\tau\right)\right) \end{aligned} \quad (16)$$

その際、 $S_{ic}$  のスケール変換の処理量が問題になるが、式(17)で示す関数を定義することにより、式(18)に示すように  $S(m)$  から  $S(\beta \cdot m)$  へのスケール変換を FFT と IFFT を使って高速処理することができる [3][4]。

$$\begin{cases} \beta = \frac{f_c}{f_0 + n\Delta f + f_\tau} \\ H_1(m) = \exp\left(j2\pi\frac{M-1}{2M}m\right) \\ H_2(m) = \exp\left(-j2\pi\frac{M-1}{2M}\beta m\right) \cdot \exp\left(j\pi\frac{\beta}{M}m^2\right) \\ H_3(m_d) = \exp\left(j\pi\frac{\beta}{M}m_d^2\right) \\ H_4(m_d) = \exp\left(-j\pi\frac{\beta}{M}m_d^2\right) \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} S(\beta \cdot m) &= \frac{1}{M} \cdot H_2(m) \cdot \left[FFT(S(m)) \cdot H_1(m)\right] \cdot H_3(m) \otimes H_4(m) \\ &= \frac{1}{M} \cdot H_2(m) \cdot IFFT\{FFT\{FFT(S(m)) \cdot H_1(m)\} \cdot H_3(m)\} \cdot FFT\{H_4(m)\} \end{aligned} \quad (18)$$

図 10 に、多周波ステップによるドップラ拡がり補正とレンジワーク補償を行った RV マップを示す。図 8 で距離方向に流れている静止目標像が、合焦時刻  $t_0$  のそれぞれの位置に距離方向で合焦する。

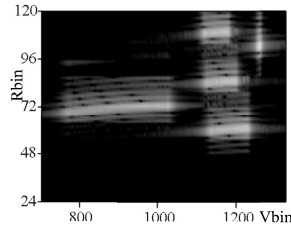


図 10. 多周波ドップラ補正とレンジワーク補償

### 3.4.2 合焦位置シフトとドップラ位相補正

$t_0$  ( $m = 0$ ) の位置にレンジワーク補償した結果を、距離方向 (fast time 方向) で合焦位置である  $t_{m_q}$  ( $m = m_q$ ) の位置にシフトする。合焦位置のシフトは、fast time 周波数領域の信号  $Dop_{ic}$  に対して式(19)の位相回転を与えることで行う。また、その時同時に図 1 の送信シーケンスに示す時分割送信によるドップラシフトに対する位相補正を式(20)の位相回転を与えることで行う。

$$\phi_q = -2\pi \left( \frac{f_0 + n\Delta f + f_r}{f_c} \right) \cdot -m_q \cdot \frac{Vbin}{M} \quad (19)$$

$$\phi_{cpc} = -2\pi \left( \frac{f_0 + n\Delta f + f_r}{f_c} \right) \cdot \frac{2n + ic}{2N} \cdot \frac{Vbin}{M} \quad (20)$$

その結果、上記合焦位置シフトとドップラ位相補正をしたドップラ信号  $Dop'_{ic}$  は式(21)となり、時間軸でのドップラ信号  $dop'_{ic}$  は式(22) のようになる。

$$\begin{aligned} Dop'_{ic}(n, Vbin, f_r) &= Dop_{ic}(n, Vbin, f_r) \cdot \exp(j(\phi_q + \phi_{cpc})) \\ &= Dop'_{ic}(n, Vbin, f_r) \cdot \exp\left(-j2\pi \left( \frac{f_0 + n\Delta f + f_r}{f_c} \right) \left( -m_q + \frac{2n + ic}{2N} \right) \frac{Vbin}{M} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

$$dop'_{ic}(n, Vbin, Rbin) = IFFT(Dop'_{ic}(n, Vbin, f_r)) \quad (22)$$

図 11 に、図 10 に示す結果に  $t_{m_q}$  ( $m_q = 2048$ ) への合焦位置シフトとドップラ位相補正を行った RV マップを示す。図 10 の  $t_0$  での目標像が、距離方向で指定した指定したそれぞれの位置 (図 7) に移動する。

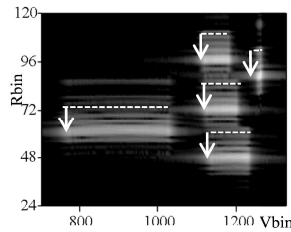


図 11. 合焦位置シフトとドップラ位相補正

### 3.4.3 ドップラワーク補償

$t_{m_q}$  の位置にレンジワーク補償した結果の  $dop'_{ic}$  に対し、ドップラワーク補償を行い速度方向の合焦を行う。これに先立ち、式(23)に示すようにレンジワーク補償したドップラ信号  $dop'_{ic}$  を逆 FFT することで slow time のパルス列信号  $s'_{ic}$  に変換する。

$$s'_{ic}(n, m, Rbin) = IFFT(dop'_{ic}(n, Vbin, Rbin)) \quad (23)$$

ここまでの処理で、すでに合焦位置シフトと時分割送信によるドップラシフトに対する位相補正が完了しているので、以下のドップラワーク補償における slow time は式(24)で与えられ、ドップラ補正因子を  $\alpha'(t_m)$  とするとドップラワーク補償のコヒーレント積分は、式(25)となる。

$$t_m = 2T_{pri}N \cdot m \quad (24)$$

$$Dop''_{ic}(n, Vbin, Rbin) = \sum_{m=0}^{M-1} s'_{ic}(n, m, Rbin) \cdot \alpha'(t_m) \quad (25)$$

式(19), (21)による周期  $M$  のサイクリックな位相回転により  $m = M - m_q$  において信号  $s'_{ic}$  の位相曲線が折り返す。  $m < M - m_q$  における  $\alpha'(t_m)$  は、式(12), (13)による  $v_0$ ,  $R_0$  と式(9)の  $R(t_m)$  により式(26)のようになる。

$$\alpha'(t_m) = \exp\left(-j4\pi f_c \frac{R_0 - R(t_m)}{c}\right) \quad (26)$$

一方、  $m \geq M - m_q$  では、信号  $s'_{ic}$  の位相曲線の折り返しを考慮することにより  $\alpha'(t_m)$  は式(27)のようになる。

$$\alpha'(t_m) = \exp\left(-j4\pi f_c \frac{R_0 - R(t_{m-M}) - \{R(t_{M-m_q}) - R(-t_{m_q})\}}{c}\right) \quad (27)$$

最終的に、多周波ステップによるドップラ拡がり補正、レンジ・ドップラワーク補償の全てを行った時間軸でのドップラ信号  $dop''_{ic}$  は式(28) で与えられる。

$$dop''_{ic}(n, Vbin, Rbin) = IFFT(Dop''_{ic}(n, Vbin, f_r)) \quad (28)$$

図 12 に、図 11 に示す結果にドップラワーク補償を行った RV マップを示す。図 11 で速度方向に流れていた目標像が、指定したそれぞれの位置 (図 7) に点画像として合焦する。

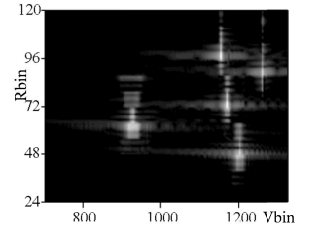


図 12. ドップラワーク補償

図 13 に、上述のカスケード処理のブロック図を示す。fast time 周波数領域においてパルス圧縮を行った後、1) 多周波ドップラ補正とレンジワーク補償を行い、fast time 時間領域に変換後、2) 合焦位置シフトとドップラ位相補正を行い、3) ドップラワーク補償をカスケードに行う。

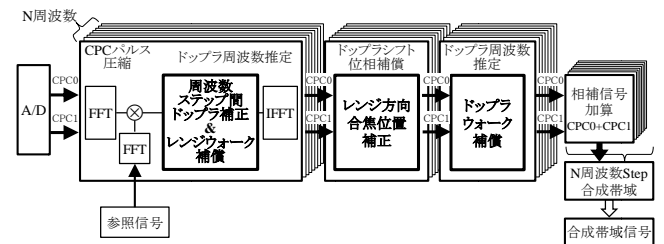


図 13. カスケード処理のブロック図

### 3.5 定式による処理とカスケード処理の結果

3.2 項で示した定式による処理と、3.4 項で示した高速処理であるカスケード処理の合焦結果を図 14 に示す。レーダが 5 つの静止目標に接近した時の RV マップを、合焦時刻を  $m_q=0,1024,2048,2072,4095$  と変化させてそれぞれの時刻で生成した。各時刻において両処理で同じ結果が得られることが確認できる。また、両結果共に予定した合焦位置に点画像として合焦できていることが確認できる。

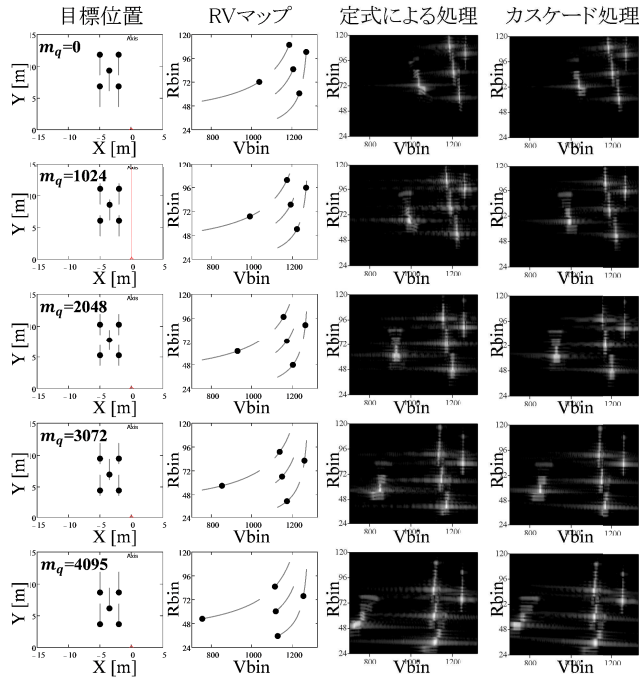


図 14. 定式による処理とカスケード処理の結果比較

### 3.6 合焦処理速度

定式による処理と、高速処理であるカスケード処理の処理量オーダーを表 1 に示す。また、同表に数式ソフトウェア Mathcad を使った図 9 の RV マップの生成に要した実際の処理時間を示す。ここで、処理オーダーの各変数と図 9 の RV マップ生成時の各値は表 2 の通りである。

表 1. 合焦処理量

処理内容		処理量オーダー	実処理時間(秒)	
定式による処理		$O(N_R \cdot N_V \cdot M \cdot N_{f_r})$	15688	
カスケード処理	1) 多周波ドップラ補正&レンジウォーク補償	$O(N_{f_r} \cdot M \log_2 M)$	11	303
	2) 合焦位置シフト&ドップラ位相補正	$O(M \cdot N_{f_r} \log_2 N_{f_r})$	4	
	3) ドップラウォーク補償	$O(N_R \cdot N_V \cdot M)$	288	

表 2. 処理オーダーの変数

距離方向 bin 数	$N_R$	13
速度方向 bin 数	$N_V$	625
パルス数	$M$	4096
fast time 周波数領域 bin 数	$N_{f_r}$	64

カスケード処理により合焦処理速度は定式処理に比べ  $O(N_{f_r})$  倍となり、図 9 の RV マップ生成での実計測では約 54 倍となった。特に、多周波ドップラ補正とレンジウォーク補償は、式(15)に従った処理では slow time のコヒーレント積分を fast time 周波数領域の各周波数  $f_r$  に対して行うため  $O(N_V \cdot N_{f_r} \cdot M)$  の処理量が必要であるが、3.4.1 項で示した FFT を導入できる形にすることで  $O(N_{f_r} \cdot M \log_2 M)$  となり処理量を大きく削減できている。

### むすび

本稿では、前側方の静止物に対する多周波ステップ CPC 方式によるドップライメージングにおいて、多周波ステップ間ドップラ補正をはじめレンジウォークとドップラウォークのすべてを補償しつつパルス列の任意パルス時刻で合焦させる処理方法を定式化した。また、処理負荷の大きな多周波ドップラ補正とレンジウォーク補償において、FFT が利用できる形式を導入してカスケードに実行する高速化処理を提案した。定式による処理と高速処理であるカスケード処理で、共に指定した合焦位置に点画像として合焦できていることを確認した。さらに、両処理の合焦処理速度の考察を行い提案のカスケード処理によって処理量が大きく削減できることを示した。

### 文献

- [1] 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, "多周波ステップ CPC レーダの提案と原理検証実験", 電気学会論文誌 C, Vol. 135 (2015) No. 3, pp.285-291, 2015.
- [2] 渡辺一宏, 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, 多周波ステップ CPC 方式におけるドップライメージングの高精度化の検討, 信学技報, vol. 116, no. 115, pp. 37-42, 2016.
- [3] Lv Jing, Gu Hong, Su Weimin, Zhu Mojun, "A fast range migration compensation method", Signal Processing Systems (ICSPS), 2010 2nd International Conference on 5-7 July 2010, V2-139-143, 2010.
- [4] D. Y. Zhu, Y. Li, Z. D. Zhu, "A keystone transform without interpolation for SAR ground moving-target imaging," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol.4, no.1, pp.18-22, 2007.