

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

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.uec.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 方式を提案し実用化に取り組んでいる。本稿では、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する。画像の高精度化を実現するために、多周波ステップ CPC の周波数ステップ間でのドップラ周波数の周波数依存によるドップラ拡がりをはじめ、計測時間内で発生するレーダの移動にもなうレンジウォークとドップラウォークのすべてを補償可能とするドップラ補正法を提案する。提案法により、長時間計測においてもドップラ拡がりやレンジウォークを補償可能であり高合焦されたドップライメージングが可能となる。点目標を使った計算機シミュレーションと、CR (コーナリフレクタ) と車両を目標とした実測データへの適用により提案法の有効性を示す。

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 for Stepped Multiple Frequency CPC Rader

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.uec.ac.jp

Abstract This paper describes a method that can realize high resolution range-Doppler imaging for the front and lateral direction of an on-vehicle radar. A Doppler shift compensation method for millimeter wave radar using stepped multiple frequency CPC has been proposed. This method can compensate the spread of Doppler frequency due to multiple frequency transmission, range walk and Doppler walk caused by movement of the radar in a measuring period. A high focusing accuracy in range-Doppler image is achieved even when the measuring period is long using this method. The proposed method is verified by computer simulation and by applying it to a field experiment result using a corner reflector and a vehicle for targets of the radar.

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、現在車載レーダとして多く搭載されている FMCW 方式に比べ、多目標の分離が可能で狭受信機帯域にて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、多周波ステップ CPC ミリ波レーダを用い、静止車両、地面クラッタ、歩行者、ガードレールが存在する各種環境において計測実験を行い、本方式の特徴である多目標分離、高距離分解能、遠距離性を実環境で確認してきた。また、多周波ステップ CPC 方式で得られる高分解能な距離と速度の 2 次元画像 (RV マップ) を使ったドップライメージングの活用として、目標車両の 1CPI (Coherent Processing Interval = 28.6ms) の RV マップから目標の位置座標および速度ベクトルを推定する手法について検討を行っている[2]。ここで

は、計測時間 SPI(Signal Processing Interval)をコヒーレント処理が可能な時間である 1CPI としており、SPI を 1CPI より長くした場合ドップラ分解能の向上が期待できるが、一方でレーダの移動に伴うレンジウォークやドップラウォークが無視できなくなり RV マップ上で目標の合焦精度の劣化が問題となる。今回、多周波ステップ CPC 方式における長時間 SPI で発生する合焦精度の劣化対策法について検討したので報告する。

2. 多周波ステップ CPC ミリ波レーダ

2.1. 多周波ステップ CPC 方式

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。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。

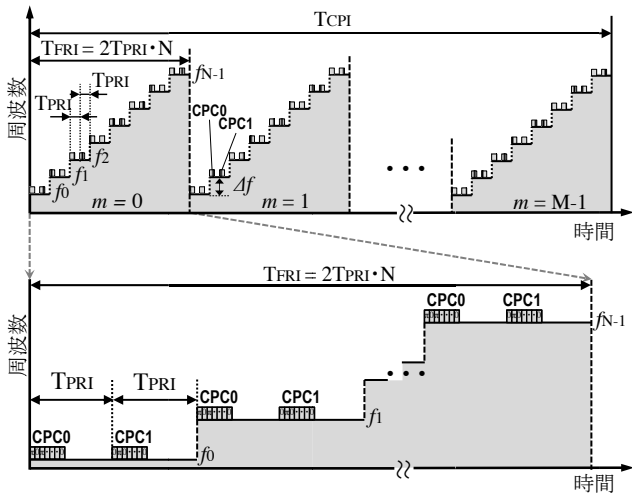


図1. 多周波ステップ CPC 方式送信シーケンス図

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。表 1 にレーダパラメータ、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。

表1. 多周波ステップ CPC ミリ波レーダパラメータ

送信周波数 f_c	60.5GHz
送信帯域幅 B_w	430MHz
周波数ステップ幅 Δf	50MHz
周波数ステップ数 N	8
パルス数 M	512
Coherent Processing Interval TCPI	28.6ms
距離分解能	0.35m
速度分解能	0.311km/h
最大速度視野	± 79.64 km/h

2.2. ミリ波レーダによるドップライメージング

図 3 に、右後方から 46.5km/h で接近する多周波ステップ CPC レーダによって 1CPI(28.6ms)の計測時間で、車幅 1.7m、車長 4m の静止車両を捉えた様子を示す。図 3 右は、計測された車両の速度と距離を RV マップで示したものである。車両の各部からのドップラ計測値はレーダから見込む角度に応じて変化し、速度に変換すると、車両の左後端は 39km/h、右後端は 42km/h、右先端は 44km/h と計測されている。本ミリ波レーダの高距離分解能によって車両各部が分離して観測され RV マップ上で車両の外形を確認することができる。

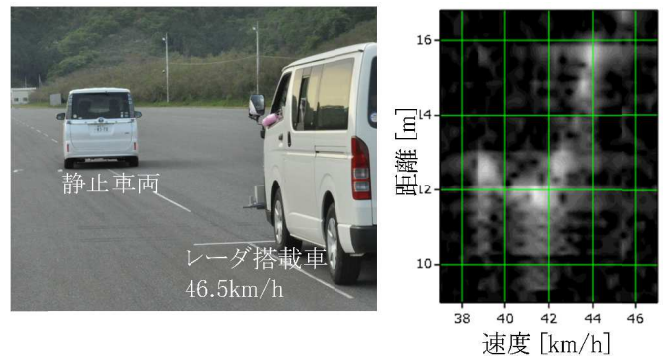


図3. 静止車両のミリ波レーダによるイメージング

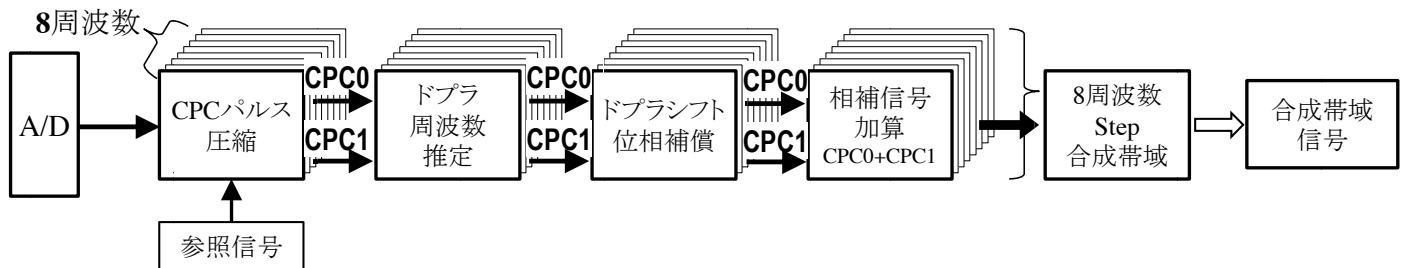


図2. 多周波ステップ CPC 方式の信号処理ブロック図

3. ドップライメージングの分解能の改善

3.1 周波数ステップ間ドップラ補正

多周波ステップ CPC レーダにおいて、各ステップの送信周波数を考慮した処理によるドップラに起因した誤差の低減の方法として、多周波ステップ ICW 方式[3]に対するドップラ補正法が提案されている[4]。これは多周波ステップ ICW 方式の送信周波数の違いによるドップラ周波数変化に起因する目標信号の位相回転を補正するドップラ補正法である。本補正法にもとづき多周波ステップ 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、 t_m (slow time)は、図 1 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
τ	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
Δf	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)

目標がレーダ正面にある場合、 $t_m = 0$ の時の目標距離を R_0 、目標速度を v_0 とすると、 $R(t_m) = R_0 - v_0 t_m$ となり、さらに計測時間が 1CPI 内である場合の受信信号は、下式のようになる。

$$\begin{aligned} s_{ic}(n, t_m, \tau) &= g \left(\tau - \frac{2R_0}{c} \right) \cdot \exp \left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f) \frac{2(R_0 - v_0 t_m)}{c} \right) \\ &= g \left(\tau - \frac{2R_0}{c} \right) \cdot \exp \left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f) \frac{2R_0}{c} \right) \\ &\quad \cdot \exp \left(j2\pi(f_0 + n\Delta f) \frac{2v_0}{c} t_m \right) \end{aligned} \quad (3)$$

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、

$$\alpha(n, t_m, \tilde{v}) = \exp \left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f) \frac{2\tilde{v}}{c} t_m \right) \quad (4)$$

となり、ドップラ周波数推定のためのコヒーレント積

分は下式のようになる。

$$\begin{aligned} dop_{ic}(n, t_m, \tau) &= \sum_{m=0}^{M-1} s_{icpc}(n, t_m, \tau) \cdot \alpha(n, t_m, \tilde{v}) \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} s_{ic}(n, t_m, \tau) \cdot \exp \left(-2\pi(f_0 + n\Delta f) \frac{2\tilde{v}}{c} t_m \right) \end{aligned} \quad (5)$$

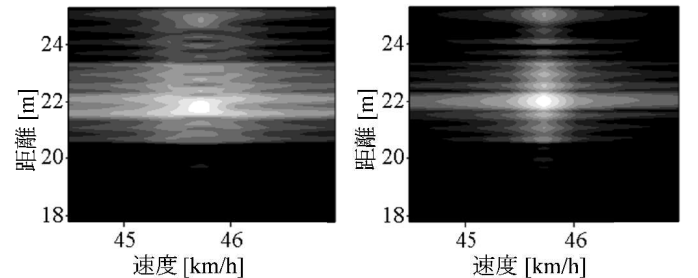
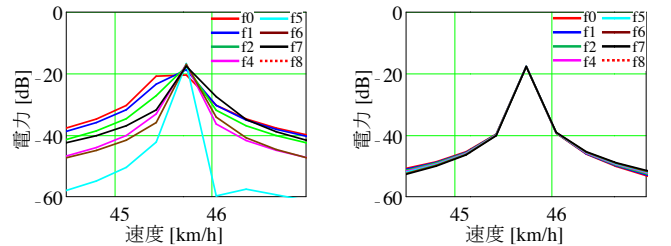
ドップラビンを m_d としたとき、推定目標速度は、

$$\tilde{v} = \frac{m_d}{2(2T_{pri}NM)} \frac{c}{f_c} \quad (6)$$

で与えられるため、式(2)、(5)、(6)より、周波数ステップ間のドップラ補正をしたコヒーレント積分は下式のようになる。

$$\begin{aligned} dop_{ic}(n, m_d, \tau) &= \sum_{m=0}^{M-1} s_{ic}(n, t_m, \tau) \\ &\quad \cdot \exp \left(-j2\pi \left(\frac{f_0 + n\Delta f}{f_c} \right) \frac{m}{M} m_d \right) \\ &\quad \cdot \exp \left(-j2\pi \left(\frac{f_0 + n\Delta f}{f_c} \right) \frac{2n + ic}{2NM} m_d \right) \end{aligned} \quad (7)$$

上式で、2番目の exp の項は時分割送信によるドップラシフトに対する位相補正となっている。図 4、図 5 に、式(7)に基づいて計測時間が 1CPI 内である場合の周波数ステップ間ドップラ補正の点目標に対するシミュレーション比較結果を示す。上記補正により各周波数ステップによるドップラ周波数の変化が同じ 1 周波数に集まり、ドップライメージングにおいてはドップラ方向の拡がりや抑えられ合焦効果が確認できる。



上：各ステップドップラ/電力 上：各ステップドップラ/電力
下：点目標の RV マップ 下：点目標の RV マップ

図4. ドップラ補正なし

図5. 周波数ステップ間ドップラ補正

3.2 分解能改善に向けた計測時間の拡大

計測時間 SPI をコヒーレント処理が可能な時間である 1CPI より長くした場合ドップラ分解能の向上が期待できる。しかし、一方でレーダの移動に伴うレンジウォークやドップラウォークの影響が大きくなりドップライメージングの合焦精度が劣化する。図7に示すようにレーダ正面から左に離れた位置に置かれた点目標を、1CPI(28.6ms)の8倍の計測時間 SPI(228.8ms)でとらえた RV マップ(シミュレーション)を図7示す。点目標は、前項で述べた送信周波数の違いによるドップラ周波数の拡がりに加え、レーダの移動に伴ってレンジ方向に拡がるとともに、点目標のレーダからの見込角度の変化によりドップラ周波数(速度)も拡がる。

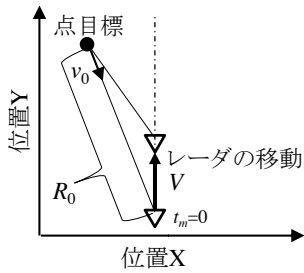


図6. 移動レーダによる点目標の計測

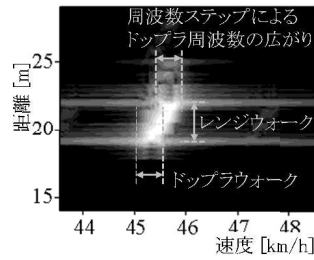


図7. 長時間計測による点目標の RV マップ

(1) レンジウォーク補償

長時間計測時のレンジウォークに対するドップラ補正を考えるにあたり、ここでは点目標はレーダ正面にあるとし、前項と同じく目標距離を $R(t_m) = R_0 - v_0 t_m$ とする。(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 short time τ でのフーリエ変換 $S_{ic}(n, t_m, f_\tau)$ は下式のようにになる。ここで、 f_τ は各周波数ステップ帯域内の short time 方向の周波数で、 $G(f_\tau)$ は $g(\tau)$ のフーリエ変換である。

$$\begin{aligned} S_{ic}(n, t_m, f_\tau) &= G(f_\tau) \cdot \exp\left(-j2\pi f_\tau \frac{2R(t_m)}{c}\right) \\ &\quad \cdot \exp\left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f) \frac{2R(t_m)}{c}\right) \\ &= G(f_\tau) \cdot \exp\left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f + f_\tau) \frac{2R(t_m)}{c}\right) \quad (8) \\ &= G(f_\tau) \cdot \exp\left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f + f_\tau) \frac{2R_0}{c}\right) \\ &\quad \cdot \exp\left(j2\pi(f_0 + n\Delta f + f_\tau) \frac{2v_0}{c} t_m\right) \end{aligned}$$

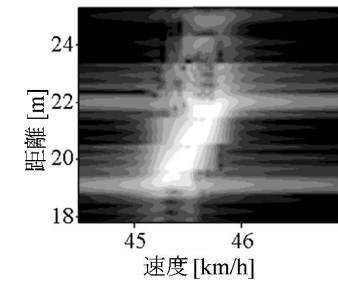
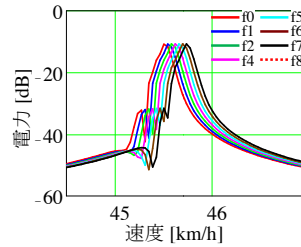
式(7)の周波数ステップ間ドップラ補正と同じ考え方で、周波数ステップ間と各周波数ステップ帯域内のドップラ補正を同時に行うドップラ補正因子は、

$$\alpha(n, t_m, \tilde{\nu}) = \exp\left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f + f_\tau) \frac{2\tilde{\nu}}{c} t_m\right) \quad (9)$$

となり、前項と同じく式(6)を使って、周波数ステップ間ドップラ補正とレンジウォークに対するドップラ補正をした short time 周波数領域におけるコヒーレント積分は下式のようにになる。

$$\begin{aligned} Dop_{ic}(n, m_d, f_\tau) &= \sum_{m=0}^{M-1} S_{ic}(n, t_m, f_\tau) \\ &\quad \cdot \exp\left(-j2\pi\left(\frac{f_0 + n\Delta f + f_\tau}{f_c}\right) \frac{m}{M} m_d\right) \quad (10) \\ &\quad \cdot \exp\left(-j2\pi\left(\frac{f_0 + n\Delta f + f_\tau}{f_c}\right) \frac{2n + ic}{2NM} m_d\right) \end{aligned}$$

図8および図9に、式(10)に基づいて計測時間 SPI(228.8ms)である場合の点目標に対する周波数ステップ間と各周波数ステップ帯域内のドップラ補正を同時に行ったシミュレーション結果を示す。上記補正により各周波数ステップによるドップラ周波数の変化が同じ1周波数に集まり、ドップライメージングにおいてはレンジ方向の拡がりも抑えられていることが確認できる。ドップラ方向については、周波数ステップ間補正を行っているものの図5より拡がった結果になっている。これは、レーダ移動にともなうドップラウォークによるものである。



上: 各ステップドップラ/電力上: 各ステップドップラ/電力
下: 点目標の RV マップ 下: 点目標の RV マップ

図8. ドップラ補正なし

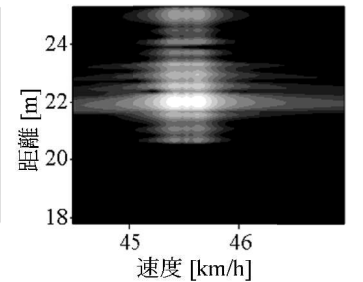
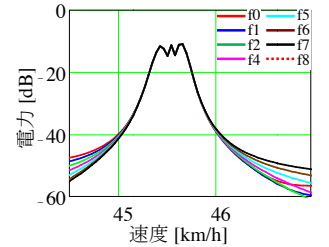


図9. 周波数ステップ間 & 帯域内ドップラ補正

帯域内ドップラ補正によるレンジウォーク補償として Keystone 変換が知られている[5]。式(10)のコヒーレント積分変数 m を含む1番目の \exp 項に着目すると、各周波数ステップ $f_0 + n\Delta f$ においてレンジウォークを補償する Keystone 変換では以下の項となる。

$$\exp\left(-j2\pi\left(\frac{(f_0+n\Delta f)+f_r}{(f_0+n\Delta f)}\right)\frac{m}{M}m_d\right) \quad (11)$$

一方、周波数ステップ間ドップラ補正は式(7)より、

$$\exp\left(-j2\pi\left(\frac{(f_0+n\Delta f)}{f_c}\right)\frac{m}{M}m_d\right) \quad (12)$$

であり、上で示した式(10)内の1番目のexp項は、Keystone変換と周波数ステップ間ドップラ補正をカスケードに処理した結果と等価になる。

(2) ドップラワーク補償

図6に示すように、静止目標がレーダの正面から離れたところにある場合、レーダの移動にともなう目標見込み角の変化によるドップラワークが生じる。周波数ステップ間と各周波数ステップ帯域内ドップラ補正によりレンジワークを補償した信号をあらためて $s'_{ic}(t_m, \tau)$ とすると以下ようになる。 R_0 , v_0 は、 $t_m = 0$ の時の静止目標の距離、速度で、 V はレーダの移動速度である。

$$s'_{ic}(t_m, \tau) = g\left(\tau - \frac{2R_0}{c}\right) \cdot \exp\left(-j2\pi f_c \frac{2R(t_m)}{c}\right) \quad (13)$$

$$R(t_m) = \sqrt{R_0^2 - 2R_0v_0t_m + V^2t_m^2} \quad (14)$$

$$\approx R_0 - v_0t_m + \frac{V^2}{2R_0}t_m^2$$

式(14)において、 $R(t_m)$ は目標距離で、近似式において t_m^2 を含む項がドップラワークを引き起こす。そこで、あらたな時間変数 t_m' を導入しこの項を含まない目標距離を(15)式で与えると、(13)式の信号は(16)式になる。

$$R(t_m) = R_0 - v_0t_m' \quad (15)$$

$$s'_{ic}(t_m', \tau) = g\left(\tau - \frac{2R_0}{c}\right) \cdot \exp\left(-j2\pi f_c \frac{2(R_0 - v_0t_m')}{c}\right) \quad (16)$$

$$= g\left(\tau - \frac{2R_0}{c}\right) \cdot \exp\left(-j2\pi f_c \frac{2R_0}{c}\right) \cdot \exp\left(j2\pi f_c \frac{2v_0}{c}t_m'\right)$$

このとき、式(6)を用いてドップラビン m_d で書き直したドップラ補正因子は下式ようになる。

$$\alpha(t_m', \tilde{v}) = \exp\left(-j2\pi f_c \frac{2\tilde{v}}{c}t_m'\right) \quad (17)$$

$$= \exp\left(-j2\pi \frac{m_d}{2T_{pri}NM}t_m'\right)$$

そこで、式(15)の関係よりドップラ補正因子は、

$$\alpha(t_m, m_d) = \exp\left(-j2\pi \frac{R_0 - R(t_m)}{v_0} \frac{m_d}{2T_{pri}NM}\right) \quad (18)$$

で与えられ、レンジワークを補償した信号 $s'_{ic}(t_m, \tau)$ に対してドップラワークを補償するコヒーレント積分は、目標距離、速度(R_0 , v_0)を与えることにより下式ようになる。

$$dop'_{ic}(m_d, \tau) = \sum_{m=0}^{M-1} s'_{ic}(t_m, \tau) \cdot \alpha(t_m, m_d) \quad (19)$$

$$= \sum_{m=0}^{M-1} s'_{ic}(t_m, \tau) \cdot \exp\left(-j2\pi \frac{R_0 - R(t_m)}{v_0} \frac{m_d}{2T_{pri}NM}\right)$$

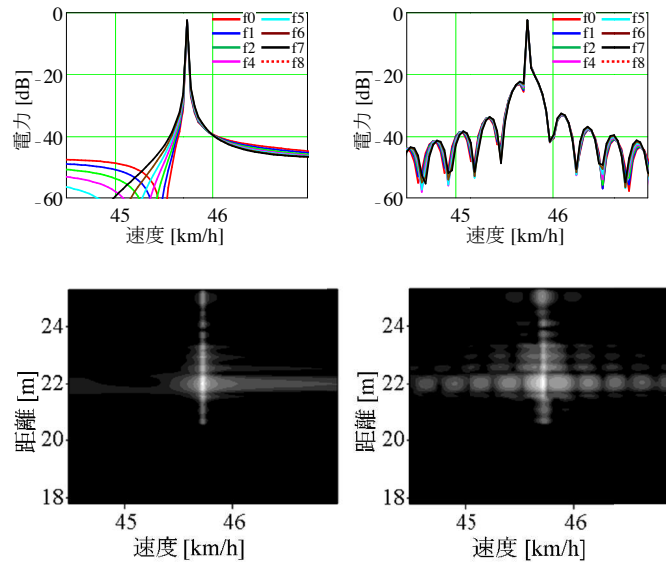
$$= \sum_{m=0}^{M-1} s'_{ic}(t_m, \tau) \cdot \exp\left(-j2\pi \frac{R_0 - \sqrt{R_0^2 - 2R_0v_0t_m + V^2t_m^2}}{v_0} \frac{m_d}{2T_{pri}NM}\right)$$

図10に、計測時間SPI(228.8ms)である場合の、各周波数ステップ間と各ステップ帯域内のドップラ補正でレンジワーク補償を行った信号に、式(19)に基づいてドップラワーク補償を行ったシミュレーション結果を示す。(a)は目標距離、速度(R_0 , v_0)を既知として与えた場合、(b)は R_0 , v_0 の値をレンジ/ドップラの各ビンから式(20)のように与えた場合である。

$$R_0 = \Delta R \cdot k \quad k, \Delta R: \text{レンジビン, ビン間隔} \quad (20)$$

$$v_0 = \Delta v \cdot m_d \quad m_d, \Delta v: \text{ドップラビン, ビン間隔}$$

図8に示したドップラ補正を行わない結果と比較して明らかなように、レンジワークおよびドップラワーク補償により、点目標が1点に合焦されていることが確認できる。 R_0 , v_0 について既知の値を使わずにレンジ/ドップラビンから与えた場合、サイドローブの上昇が認められるが約20dB以下に抑えられている。また、図5に示した計測時間1CPI(28.6ms)の結果と比較して、計測時間の拡大(8倍)によりドップラ(速度)分解能が向上している。



上: 各ステップドップラ/電力上: 各ステップドップラ/電力
下: 点目標のRVマップ 下: 点目標のRVマップ
(a)既知の距離・速度を利用 (b)レンジ/ドップラビン利用

図10. レンジワーク補償+ドップラワーク補償

(3) 今回の提案法

提案法は、図 2 に示したブロック図内の CPC パルス圧縮処理とドップラ周波数推定処理で行う (図 11)。受信信号と参照信号をレンジ方向で FFT して乗算した後、式(10)に従って周波数ステップ間ドップラ補正およびレンジウォーク補償を行い、レンジ方向およびパルス方向で逆 FFT を行うことで、ドップラ補正とレンジウォーク補償がされたパルス圧縮信号となる。この信号に対して、式(19)に従ってコヒーレント積分を行うことでドップラウォークが補償されたドップラ信号を得ることができる。その後は、図 2 の通常の多周波ステップ CPC の信号処理を行い合成帯域信号に変換することでドップライメージを生成することができる。

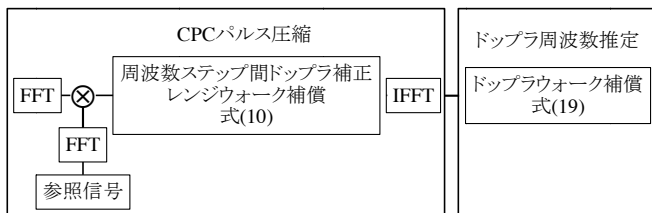


図 11. 提案法のブロック図

4. 実測データによる検証

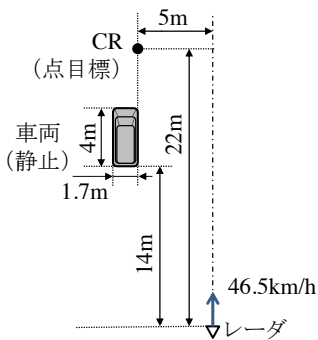


図 12. 計測環境

上述の今回の提案法を検証するために、多周波ステップ CPC ミリ波レーダの前側方に CR と静止車両を配置し、46.5km/h でレーダをこれらに接近させて計測を行い (図 12)、ドップライメージングを行った。

図 13 は、1CPI である 28.6ms で計測した RV マップである。図 14 は、1CPI の 8 倍の 228.8ms で計測し、ドップラ補正を行っていないもので、計測時間が長くなったことでドップラ分解能は向上するが、レンジウォークおよびドップラウォークが発生している。図 15 は、提案法によりレンジおよびドップラウォークを補償した結果で、既知の CR の距離、速度の値を与えたことで CR については良く合焦している。一方、車両部分については合焦が不十分でドップラ拡がりが生じている。図 16 は、提案法を使いレンジ/ドップラピン利用して全体にわたって合焦させた結果である。図 15 の CR と比べると若干サイドローブが上昇するが、車両部分についても良く合焦している。これらは、これまでのシミュレーション結果とよく合致し、実測データでも提案法の有効性が確認できた。

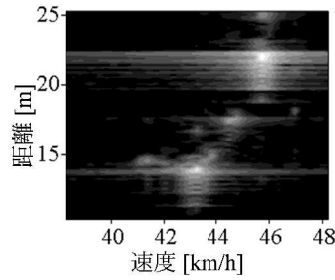


図 13. 計測時間 28.6ms
ドップラ補正なし

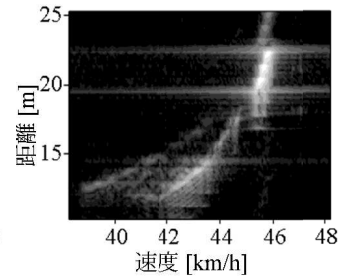


図 14. 計測時間 228.8ms
ドップラ補正なし

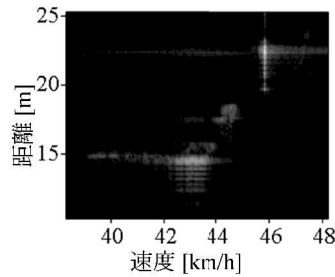


図 15. 計測時間 228.8ms
レンジウォーク+ドップラウォーク補償
点目標のみに合焦

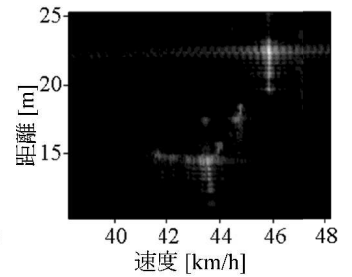


図 16. 計測時間 228.8ms
レンジウォーク+ドップラウォーク補償
全体に合焦

むすび

本稿では、複数周波数ステップを用いた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 方式において、前側方の静止物に対するドップライメージングを高精度に行う手法を提案した。高精度画像化に向けて、計測時間を拡大してドップラ分解能を高め、送信周波数の違いによるドップラ周波数の拡がり、計測時間内のレーダの移動によって発生するレンジウォーク及びドップラウォークを補償するドップラ補正法を提案した。点目標を使ったシミュレーションと、実際に多周波ステップ CPC ミリ波レーダで計測したデータへの本手法の適用において合焦効果を確認し本提案法の有効性を示した。

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 優人, 秋田 学, 中村真帆, 稲葉 敬之, "多周波ステップ CPC レーダを用いた目標車両位置・速度ベクトル推定法の検討", 信学総大, B-2-36, 2016-03.
- [3] 稲葉敬之, "多周波 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)信, Vol. J89-B No.3, pp.373-383, Mar.2006.
- [4] 福島冬樹, 原沢康弘, 原照幸, 稲葉敬之, "相対速度による影響が大きい場合の多周波ステップ ICW 方式におけるドップラ補正法の一検討", 信学技報, SANE2009-48, pp.7-12, 2009-07
- [5] R. P. Perry, R. C. DiPietro, and R. Fante, "Coherent Integration With Range Migration Using Keystone Formatting", Proceedings 2007 IEEE Radar Conference, pp.863-868, 2007.