

多周波不等間隔ステップ CPC 方式の距離サイドローブ特性

渡辺 優人[†] 秋田 学[†] 稲葉 敬之[†]

[†] 電気通信大学大学院 情報理工学研究所 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

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

あらまし 現在、多周波ステップ CPC 方式では最大速度視野等を考慮し、周波数ステップ数 N を 8 としている。同じ観測時間内、同じ送信占有帯域幅にて 16, 32, 64 周波数ステップと合成帯域処理のサンプル点を増やした条件において、距離サイドローブを低減する方法に関して検討している。このとき速度アンビギュイティが課題となるが、別途検討中である。本稿では、過去提案しているメインローブ幅を維持しつつ低距離サイドローブを得るための不等間隔周波数ステップを与える CMSE(Constrained Minimum Square Error)周波数ステップに対して、不等間隔周波数ステップを与える関数を多次化とし、拘束条件を増やすとともに、メインローブ幅に対する制約を緩和した場合について検討し、その距離サイドローブ特性について報告する。

キーワード レーダ, パルス圧縮, 合成帯域法, サイドローブ

Range side lobe characteristic in Unequal Stepped Multiple Frequency CPC

Masato WATANABE[†] Manabu Akita[†] and Takayuki INABA[†]

Graduate school of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications 1-5-1 Choufugaoka,
Choufu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

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

Abstract Currently, considering Doppler ambiguity such as a multi-frequency step CPC scheme, have a frequency step number N is 8. In the same observation time, in conditions that increase the sample points of the synthetic-band processing and 16, 32, 64 frequency step at the same transmission occupied bandwidth, it is being discussed with respect to a method of reducing the range side lobe. In this case the velocity ambiguity is a problem, it is an additional consideration. In this article, a function that gives non-equal frequency steps, if you increase the constraint condition, consider the design of the non-equal frequency steps in the case of loosening the constraints of the main lobe width, the report side lobe suppression effect when using the proposed method which is CMSE (Constrained Minimum Square Error) frequency step.

Keywords Radar, Pulse Compression, Synthetic Wideband Processing, Side lobe

1. まえがき

狭受信機帯域幅で高い距離分解能を得るレーダ方式として合成帯域法[1][2]が知られている。合成帯域法は、送信周波数を一定の間隔で周波数ステップさせた送信信号を時分割で送受信し、送信周波数差に基づく受信信号の距離に関する位相の回転より距離プロファイルを得る。しかし、合成帯域法には、周波数ステップ幅によって決まる折り返し(グレーティングローブ)と距離サイドローブが発生するという課題がある。折り返し対策としては、送信波をパルス(もしくはパルス圧縮波)とし、折り返しの間隔を距離ゲート幅(パルス幅もしくは圧縮後パルス幅)以下とする周波数ステップ幅を選択することによりグレーティングローブを緩

和する方法が用いられている[3][4]。

一方、距離サイドローブ低減のためには、合成帯域処理(すなわち周波数ステップ方向のフーリエ変換)時に Hamming などの振幅ウェイトを適用する方法が一般に用いられるが、合成後のメインローブ幅が広がる(すなわち距離分解能が低下する)とともに、ウェイトにより信号の損失が発生するという問題が存在する。そこで、距離サイドローブを抑圧するため、送信周波数ステップに不等間隔周波数ステップを用いる方法が提案されている[5]。この方法では、周波数軸上にて適当なウェイトを与えるような不等間隔周波数ステップにて送信し、受信信号に対して信号損失が伴う振幅ウェイトを適用せずに合成帯域処理することで、出力波

形のサイドローブを低減しようという方法である。しかし一般に、レーダではドップラ周波数の推定が求められるとともに、その出力を用いて合成帯域処理時の距離バイアス誤差を補正することが必要となる。

このため、CPC(Complementary Phase Code)パルス圧縮[6][7]、パルスドップラフィルタ、合成帯域処理を融合した多周波ステップ CPC 方式[8]では、最大速度視野等を考慮し、周波数ステップ数は 8 程度としている。また多周波ステップ CPC 方式ミリ波レーダ[9]では、周波数ステップを複数の PLL(Phase Lock Loop)を切り替えることにより実現している。しかし、近年の PLL の周波数切り替え速度の高速化に伴い、将来的には送信周波数ステップを 1 つの PLL により実現することが期待される。すなわち多数の周波数ステップを用いてもハードウェア的な増強を伴わず、32, 64 周波数ステップにすることが期待される。このとき速度アンビギュイティが課題となるが、別途検討中である。

本稿では、同じ観測時間内で 16, 32, 64 周波数ステップを利用することで 8 周波数ステップを用いた多周波数ステップ CPC 方式の課題であった距離サイドローブを低減する方法に関する検討として、過去提案しているメインローブ幅を劣化させずに低距離サイドローブ化を得るための不等間隔周波数ステップを与える CMSE(Constrained Minimum Square Error)周波数ステップ法[10]の一例と等間隔周波数ステップに対して SWW ウェイトを適用し、サイドローブおよびメインローブについて比較する。さらに、CMSE 周波数ステップに対して、不等間隔周波数ステップを与える関数を 7 次の多項式とし、拘束条件を増やすとともに、メインローブ幅に対する制約を緩めた場合について検討し、そのサイドローブ低減効果について報告する。

2. 多周波ステップ CPC 方式のパラメータスタディ

本検討では、16, 32, 64 周波数ステップを利用することで 8 周波数ステップを用いた多周波数ステップ CPC 方式の課題であった距離サイドローブを低減する方法について検討するために、同じ観測時間 T_s 内で 16, 32, 64 周波数ステップを用いた多周波ステップ CPC 方式を 60/76GHz 特定小電力無線規格[11]へ適用した場合のパラメータスタディについて示す。

多周波ステップ CPC 方式において、観測時間 T_s を一定としたとき、周波数ステップ数 N を変数とした距離視野 $R_{max}[m]$ と速度視野 $V_{max}[km/h]$ の関係を式(1)に示す。なお、 c は光速、 f は送信周波数を表す。

$$N \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{c^2}{8 \cdot |V_{max}| \cdot (R_{max})} \cdot \frac{1}{f} \quad (1)$$

パルス繰り返し間隔 T_{pri} を $2.5 \mu s$ としたときの最大距離視野および速度視野の関係を図 1, 2 に示す。図中

の縦点線は、パルス繰り返し間隔から決まるインストゥルメント距離 R_{inst} を表す。周波数ステップ数を $N=8$ から $N=16$ へと増やすと最大速度視野は半減する。送信周波数 f を 76.5GHz では、期待される最大速度視野は 60.5GHz と比較して低下する。

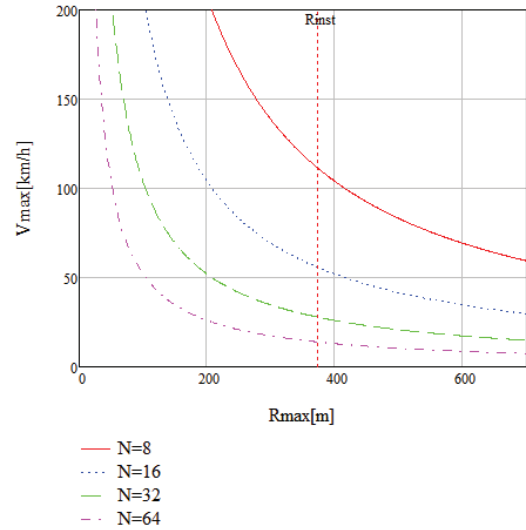


図 1 最大距離視野と最大速度視野 ($f=60.5GHz$)

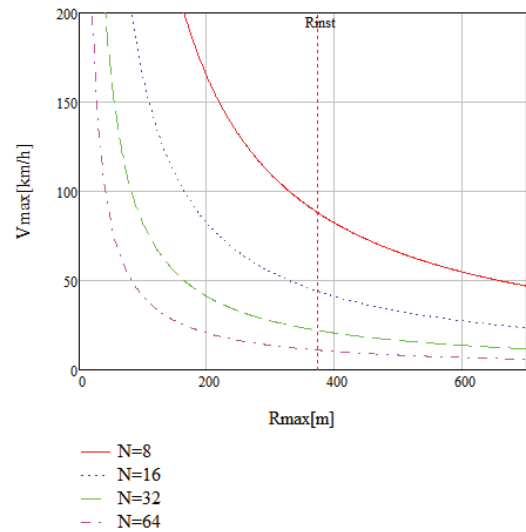


図 2 最大距離視野と最大速度視野 ($f=76.5GHz$)

本項では、多周波ステップ CPC ミリ波レーダパラメータをベースとし、60/76GHz 特定小電力無線局規格内を想定する。これより、A/D を 16bit, 160MHz とし、使用する送信パルスの帯域幅 b を 80MHz とする。また多周波ステップ CPC 方式では、合成帯域処理において発生するグレーティングローブを CPC パルス圧縮を距離ゲートとすることで緩和している。よって、CPC パルス帯域幅 b に対して、周波数ステップ幅 Δf は式(2)の関係を満たす必要がある。

$$\frac{c}{2 \cdot b} > \frac{c}{2 \cdot \Delta f} \quad (2)$$

ここで式(2)の左辺は CPC パルス圧縮後のパルス幅(距離ゲート幅)を表し、右辺は合成帯域処理におけるアンビギュイティ距離を表す。

60/76GHz 特定小電力無線局規格内において、送信占有帯域幅を 1GHz とし、より高距離分解能を狙うことも可能であるが式(2)より CPC パルスの帯域幅 b を 80MHz としたとき $N=16$ 以下ではグレイティングローブが発生することが懸念される。今回設定した条件は、 $N=16, 32, 64$ としたときの比較であることから、使用する送信占有帯域幅を 500MHz、パルス繰り返し間隔を $2.5 \mu s$ とし、観測時間 T_s は 20msec とする。本稿で使用パラメータは表 1 に示す通りである。

表 1 レーダパラメータ

	No.1	No.2	No.3
f[GHz]	60.5	60.5	60.5
Δf [MHz]	26.25	13.125	6.5625
b[MHz]	80	80	80
N	16	32	64
T_{pri} [μs]	2.5	2.5	2.5
T_{chip} [nsec]	12.5	12.5	12.5
符号長	16	16	16
パルス幅 T_p [μs]	0.2	0.2	0.2
M	256	256	256
B[MHz]	500	500	500
T_s [msec]	20	20	20

さらに今回の検討には用いないが、使用する送信占有帯域幅を 500MHz、パルス繰り返し間隔を $2.5 \mu s$ とし、観測時間 T_s は 20msec という条件では、 $N=32$ 以上であれば式(2)より使用する送信パルスの帯域幅 b を 80MHz から 40MHz へと減らすことが可能である。このとき必要とされる A/D の変換速度は 160MHz から 80MHz となり、ハードウェア負荷を低減することが期待される。

3. 振幅ウェイトを適用した場合の距離サイドローブ特性

メインローブ幅を劣化させずに低距離サイドローブ化を得るための不等間隔周波数ステップを与える CMSE(Constrained Minimum Square Error)周波数ステップ法[10]の一例と等間隔周波数ステップに対して SWW ウェイトを適用し、サイドローブおよびメインローブについて比較する。上記の条件をもとに実施したシミュレーション結果において、ウェイト損失、メ

表 2 結果一覧

N	間隔	SWW ウェイト	ウェイト 損失[dB]	メイン ローブ幅 (-3dB)	PSL[dB]
16	等間隔	なし	0	0.35	-13.2
16	等間隔	Hamming	4.9	0.41	-43.0
16	不等間隔	なし	0	0.35	-25.4
16	不等間隔	Hamming	4.9	0.52	-40.2
16	不等間隔 (5次)	なし	0	0.35	-25.0
16	不等間隔 (5次)	Hamming	0	0.52	-38.4
32	等間隔	なし	0	0.35	-13.4
32	等間隔	Hamming	5.1	0.47	-45.9
32	不等間隔	なし	0	0.35	-25.4
32	不等間隔	Hamming	5.1	0.53	-37.3
32	不等間隔 (5次)	なし	0	0.35	-30.9
32	不等間隔 (5次)	Hamming	5.1	0.53	-41.9
64	等間隔	なし	0	0.35	-13.7
64	等間隔	Hamming	5.2	0.49	-47.8
64	不等間隔	なし	0	0.35	-25.6
64	不等間隔	Hamming	5.2	0.61	-37.1
64	不等間隔 (5次)	なし	0	0.35	-31.5
64	不等間隔 (5次)	Hamming	5.2	0.61	-41.2

インローブ幅(-3dB)、ピークサイドローブ(PSL)についてまとめた結果を表 2 に示す。メインローブ幅を拡大することなく、またウェイト損失がない条件における不等間隔化によりサイドローブ抑圧については第 1, 2 サイドローブを抑圧する条件で設計した不等間隔周波数ステップ(3次関数)では、第 1 サイドローブについては十分抑圧する傾向を示すが、第 2 サイドローブでは拘束条件が十分に反映されていない傾向を示し、ピークサイドローブが第 1 ではなく、第 2 サイドローブとなる。これの要因として、周波数ステップ間隔を与える周波数ステップ関数を 3 次関数としており、実現できる不等間隔の自由度の限界が疑われる。これに対し、不等間隔周波数ステップを与える関数を 5 次関数とすると、周波数ステップ数 $N=16$ までは 3 次関数と同様の傾向を示すが、 $N=32, 64$ では自由度の増加により拘束条件を満たすような形状に近くなり、ピークサイドローブが約 -30dB 程度まで低下する。 $N=8$ 程度

では不等間隔周波数ステップを与える関数を 5 次関数にする効果は薄かったが、 $N=32$ 以上に増やした場合は一定の効果期待される。ウェイトによる損失は、等間隔、不等間隔周波数ステップともほぼ同じ値となった。一方、メインローブ幅は、ウェイトを適用した場合不等間隔周波数ステップの方が広がる傾向を示した。ウェイト適用後のピークサイドローブについては等間隔周波数に対して、周波数ステップ数 N が 64 のときが、最も良好な性能を示している。一方、不等間隔周波数ステップ(3 次関数)に対して振幅ウェイトを適用すると、レンジゲート内(CPC パルス圧縮)にサイドローブが表れなくなる。表 2 では、ピークサイドローブはレンジゲートのエッジにあたるレベルを記載している。不等間隔周波数ステップ(5 次関数)の場合、 $N=16$ では 3 次関数と同様の傾向を示すが、 $N=32, 64$ ではレンジゲート内にサイドローブが表れる。

4. メインローブ幅の制約を緩めた場合の不等間隔周波数ステップの設計・サイドローブ抑圧効果

4.1 CMSE 周波数ステップ

不等間隔周波数ステップを与える関数を任意の関数(これまで 3 次, 5 次の多項式)とし、これらの係数を未知数と置く。関数を拘束する条件として、送信占有帯域幅 B が小さくならないように、周波数ステップの始点と終点を固定する。次に合成帯域処理後の距離波形における任意の距離 Δr とその振幅 ϵ を拘束条件とし、これらを満たすような不等間隔周波数ステップを与える関数の未知数を最小二乗法により求める。

(1)不等間隔周波数ステップを与える関数

不等間隔周波数ステップを与える関数として、以下の 7 次の多項式を用いる。

$$f(n) = a7 \cdot n^7 + a6 \cdot n^6 + a5 \cdot n^5 + a4 \cdot n^4 + a3 \cdot n^3 + a2 \cdot n^2 + a1 \cdot n + a0 \quad (3)$$

上記に加えて等間隔周波数と比較して、距離の分解能が低下しないように、周波数の始点と終点を決め、帯域幅を制約する条件式 2 つを与える。ここで B は送信周波数占有帯域幅を表す。

$$f(0) = 0 \quad (4)$$

$$f(N-1) = B \quad (5)$$

文献[10]と異なり、帯域の中心に対して拘束を与えないとする。さらに 5 つの距離および振幅に対する拘束条件式から、最小二乗法により未知数を推定する。こ

のとき、推定する未知数は $a7 \sim a1$ までの 7 つとなる。

(2)拘束条件

多周波ステップ CPC 方式には、CPC パルス圧縮出力をレンジゲートとして用いることから、LFM パルス圧縮等と比較して、レンジゲート外の合成帯域波形のサイドローブ、グレーティング抑圧性能が高い。このため、拘束条件もレンジゲート内のサイドローブ抑圧するように、第 1, 2 サイドローブのピークに設定している。過去の検討において、第 1 サイドローブに対する拘束は比較的良好に働き、第 1 サイドローブを -30dB 以下まで抑圧し、深いヌルを形成するなどしている。一方で、第 1 サイドローブに対して、振幅を小さくするように働かせると第 2 サイドローブ以降に皺寄せが表れ、ピークサイドローブが移動する等の現象が見られている。以上より、本検討ではメインローブ幅をやや犠牲にすることで、ピークサイドローブをより低減するために下記に示す拘束条件を用いる。

条件 A: メインローブ近傍にエネルギーを集めるためにヌルの形成を抑制し、メインローブを太らせる。

条件 B, C: 第 2, 3 サイドローブには -35dB よりを取るような拘束を与え、エネルギーをメインローブ近傍およびレンジゲート外(ピークから 1.875m 以上離れた距離)へ誘導する。

条件 D, E: 第 4, 5 サイドローブについてもレンジゲート外ではあるが、ゲートのエッジで振幅が大きくなるように、フラットな特性を狙って拘束を与える。図 3 は、合成帯域処理結果を拡大図であり、縦軸を振幅 $[\text{dB}]$ 、横軸を距離 $[\text{m}]$ としており、上記の拘束条件のイメージを表したものである。

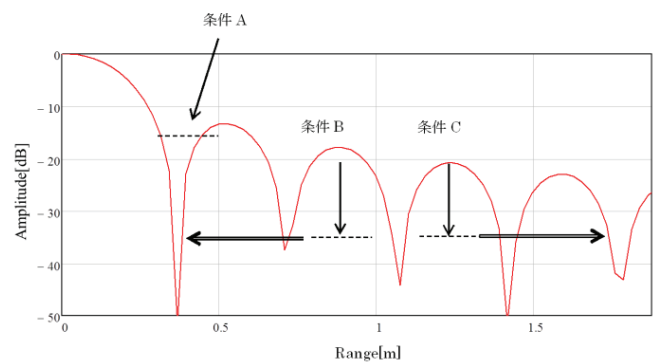


図 3 拘束条件(条件 A,B,C)

4.2 距離サイドローブ特性

サイドローブ特性を見るために、目標条件は静止 1 目標(距離 $= 1.405\text{m}$)とする。表 3 にシミュレーション結果のまとめを示す。また 2. で示した拘束条件のコンセプトを用いて作成した不等間隔周波数ステップを図 2, 4, 6 に、それらの合成帯域出力の距離波形を図 3,

表 3 結果一覧

N	間隔	ビーム幅 (-3dB) [m]	PSL [dB]
16	等間隔	0.35	-13.2
16	不等間隔	0.35	-25.4
16	不等間隔 (5次)	0.35	-25
16	不等間隔 (7次)	0.35	-27.9
32	等間隔	0.35	-13.4
32	不等間隔	0.35	-25.4
32	不等間隔 (5次)	0.35	-30.9
32	不等間隔 (7次)	0.41	-35.0
64	等間隔	0.35	-13.7
64	不等間隔	0.35	-25.6
64	不等間隔 (5次)	0.35	-31.5
64	不等間隔 (7次)	0.41	-35.1

5, 7 にそれぞれ示す。

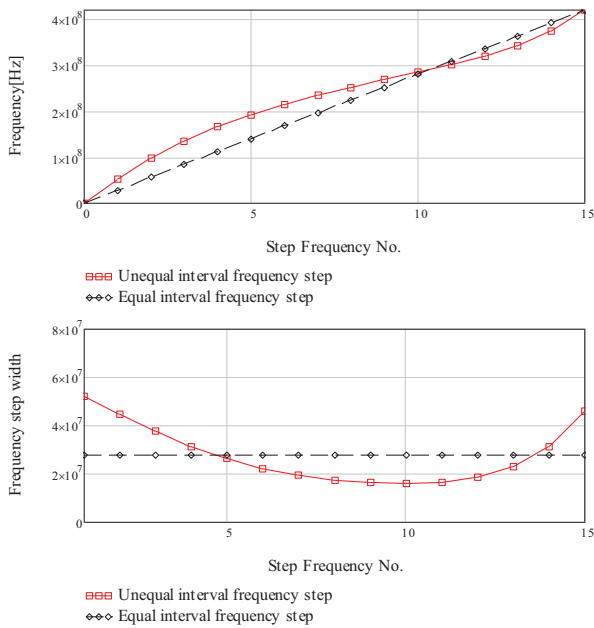


図 4 不等間隔周波数ステップ (N=16)

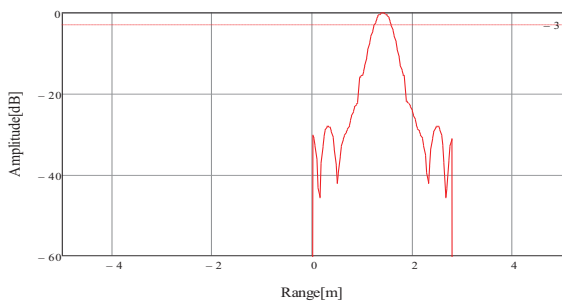


図 9 距離サイドローブ特性 (N=64)

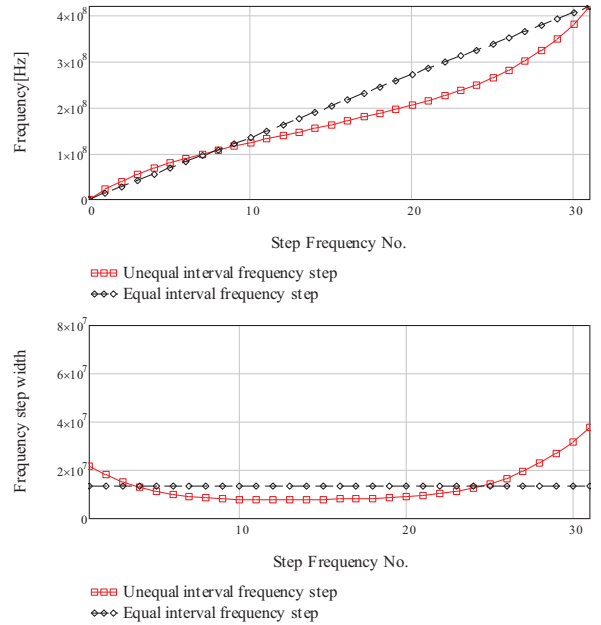


図 6 不等間隔周波数ステップ (N=32)

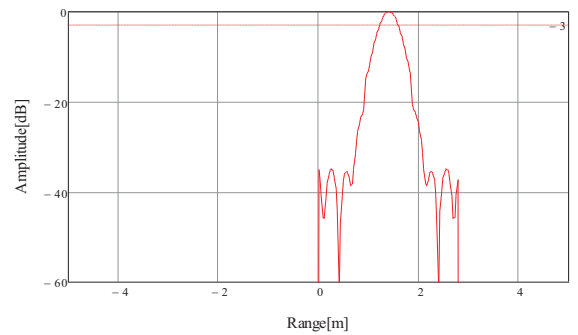


図 7 距離サイドローブ特性 (N=32)

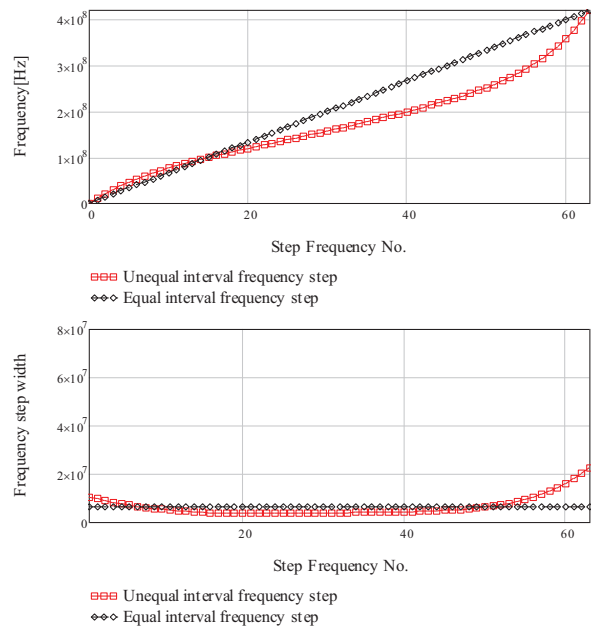


図 8 不等間隔周波数ステップ (N=64)

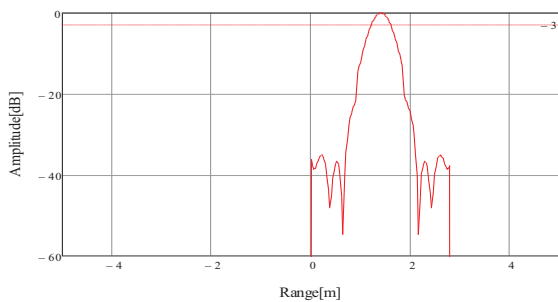


図 9 距離サイドローブ特性(N=64)

表 3 により, 4.1 で示した拘束条件を与え, 作成した不等間隔周波数ステップにより, 3.で示したように第 1,2 サイドローブに対して拘束を与える場合と比較して, ピークサイドローブに対する抑圧効果が向上する傾向が見られた. これは周波数ステップを多次化し, 拘束条件を増やしたことによる効果と考えられる. ここで, 多周波ステップ CPC 方式における距離ゲート幅は約 1.875m であり, この距離ゲートを超える距離では, 多周波ステップ CPC 方式のドップラ補正処理により, CPC 本体の高い電力アイソレーションを確保可能である. 距離ゲート内で距離サイドローブ-30dB 以下を達成したことは, 車と人物の RCS 差が 20dB であることより, 車の脇の人物が完全静止しておりドップラ周波数で分離不可能であっても距離分離により検知が期待されることを意味する. さらに N=32, 64 の場合では図 5,7 に示すようにメインローブにエネルギーを誘導することにより効果が表れる. よって, 振幅ウェイトに比べて比較的小さな分解能の低下(メインローブ幅が 1.2 倍程度太くなる)を許容することで, 信号に損失なくピークサイドローブ-35dB 以下となる結果が得られた.

5. むすび

本稿では, 同じ観測時間内で 16, 32, 64 周波数ステップを利用することで 8 周波数ステップを用いた多周波数ステップ CPC 方式の課題であった距離サイドローブを低減する方法に関する検討として, CMSE 周波数ステップ法に対して, 不等間隔周波数ステップを与える関数を 7 次の多項式とし, 拘束条件を増やすとともに, メインローブ幅に対する制約を緩めた場合について検討し, そのサイドローブ低減効果について報告した. その結果, N=32, 64 の場合では, 振幅ウェイトに比べて比較的小さな分解能の低下(メインローブ幅が 1.2 倍程度太くなる)を許容することで, 信号に損失なくピークサイドローブ-35dB 以下となる結果が得られた. 本稿に示す研究内容は, 総務省の委託研究「電波資源拡大のための研究開発(狭帯域・遠近両用高分

解能小型レーダー技術の研究開発)」により実施されたものである.

文 献

- [1] 原 照幸, 関口 高志, 千葉 勇, 和高 修三, “ドップラ周波数の影響を受けない合成帯域レーダ”, 電子情報通信学会論文誌(B), vol.J89-B No.7, pp.1131-1140, Jul.2006
- [2] 福島智恵, 山岡建夫, “合成帯域レーダにおけるレンジプロファイル計測”, 電子情報通信学会論文誌(B), vol.J89-B No.6, pp.999-1006, Jun.2006
- [3] Nadav Levanon, “Stepped-Frequency Pulse-Train Radar Signal,” IEE Proc- Radar Sonar Navigation, vol. 149, no.6, pp198-309, Dec. 2002.
- [4] Gladkova, I.; “Analysis of Stepped-Frequency Pulse Train Design”, Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on , vol.45, no.4, pp.1251-1261, Oct. 2009
- [5] D. J. Rabideau, “Nonlinear synthetic wideband waveforms,” Proceeding of the IEEE International Radar Conference, pp. 212-219, California, USA, Apr. 2002.
- [6] M.I.Skolnik “Introduction to Radar System”, McGraw-Hill, New York, 1962.
- [7] Donald R. Wehner, “High Resolution Radar Second ed.”, Artech House, Boston, 1994
- [8] 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, No. 3, pp.285-291, 2015.
- [9] 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, “多周波ステップ CPC レーダの鉄道環境への応用のための基礎実験”, 電気学会論文誌 D, Vol. 135, No. 5, pp.513-520, 2015
- [10] 渡辺 優人, 稲葉敬之, “多周波非線形ステップ LFM 法における周波数ステップ非線形化法”, 信学技報, vol.109, no.349, SANE2013-42, pp.1-6, Dec, 2009.
- [11] 電波産業会, “ARIB STD-T48 ver2.1”, 電波産業会, 2006.