

79GHz 帯における干渉波帯域を考慮した スパース周波数分割アダプティブレーダの基礎検討

谷口匠[†] 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: taniguchi.takumi@inabalab.ee.ucc.ac.jp

あらまし

筆者らは、遠距離性と高分解能性の両立させるレーダの変復調方式として多周波ステップ方式を提案している。また、さらなる周波数の有効利用を目指し多周波ステップ方式の周波数ステップをスパースな不等間隔へと間引くことで使用周波数幅を削減するスパース周波数設計法を検討している。本稿では、79GHz 帯において他レーダによる狭帯域干渉波帯域（周波数設計で選択できない周波数、以下ブラインド周波数帯域）があるときの対策として、スパース周波数分割アダプティブレーダの基礎検討を行う。スパース周波数分割アダプティブレーダの周波数ステップ選択法により得られた周波数ステップのサイドローブレベルおよび分解能の特性について考察する。周波数ステップのサイドローブレベルおよび分解能のブラインド周波数帯域の位置依存性および複数のブラインド周波数をランダムに配置したときの総帯域幅依存性を示す。ブラインド周波数の総帯域幅が 2GHz（使用帯域幅 1.2GHz）以下では、距離分解能はほぼ一定に維持されることが確認され、ピークサイドローブ特性はブラインド周波数の総帯域幅の増加により劣化するものの 20dB 程度以上が維持されることが確認された。

キーワード 多周波ステップレーダ, 合成帯域法, サイドローブ, 人工蜂コロニー法

A Study on Sparse Frequency Division Adaptive Radar with Interference Bandwidth in 79GHz band

Takumi Taniguchi[†] Manabu AKITA[†] Takayuki INABA[†]

[†]The University of Electro-Communications 1-5-1 Choufugaoka, Choufu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan
E-mail: taniguchi.takumi@inabalab.ee.ucc.ac.jp

Abstract

Authors have proposed a multi-frequency step pulse radar, which can obtain the high range resolution and the long range detection performance by a narrowband receiver. Authors have been proposed a sparse frequency-step design method in multiple stepped pulse radar for obtaining a good side-lobe characteristics by less frequency steps without ambiguity in synthetic wideband processing based on Discrete Fourier Transform (DFT). In this article, the side-lobe and range resolution characteristics are investigated with interference bandwidth, in which we could not select the frequency step. As a result, it was confirmed that the range resolution keep the resolution corresponding to 3.2 GHz of bandwidth up to a total blind bandwidth of 2 GHz, which is equivalent to available bandwidth of 1.2 GHz. It was also confirmed that the peak side lobe level was maintained more than 20dB.

Keywords Stepped Multiple Frequency Radar, Synthetic Wideband Processing, Side lobe, Artificial Bee Colony (ABC)

1. まえがき

筆者らは、周波数を時分割にて切り替え瞬時の受信機帯域幅を狭帯域とし、後の信号処理で合成して送信帯域幅に相当する高分解能を得る合成帯域法に基づく多周波ステップ方式^[1]を提案してきた。この多周波ステップ方式では、合成帯域原理に基づくため高距離分解能性と狭受信機帯域（すなわち遠距離性）を両立可能であることを特徴としている。79GHz 帯のように周波数帯域幅が 4GHz にもおよぶ超広帯域への適用を考えた場合、距離分解能と遠距離性の両立という観点で

多周波ステップ方式の有効性がより顕著となるものの、観測時間を一定にすると周波数時分割切り替えのため距離視野の狭小化が生じる。この対策としてスパースでランダムな周波数ステップを採用し、距離方向の合成帯域処理として圧縮センシングを適用する方法^[2]、また再帰的周波数推定法を用いた自動検知法^[3]などの対策について提案している。さらに筆者らは周波数ステップを単にランダムとする方法ではなく、通常の離散フーリエ変換による合成帯域処理の低サイドローブ化を図る周波数ステップ選択法について研究を進めて

いる^{[4][5]}。本稿では、79GHz帯において他レーダによる狭帯域干渉波帯域（周波数設計で選択できない周波数、以下ブラインド周波数帯域）があるときの対策として、スパース周波数分割アダプティブレーダの基礎検討を行う。スパース周波数分割アダプティブレーダの周波数ステップ選択法により得られた周波数ステップのサイドローブレベルおよび分解能の特性についてシミュレーションにより考察する。なお、本稿で用いる他レーダのひとつあたりの干渉波占有帯域幅を24GHz帯および60GHz/76GHz帯においてそれぞれ過去に報告のある帯域幅200MHz^{[6][7]}および500MHz^{[8][9]}を用いる。また79GHz帯において今後主流となると思われる1GHz^[10]の3パターンを用いる。

本稿では、第2章で手法の定式化を行うとともに、第3章では計算機シミュレーションにより、まず評価パラメータ（サイドローブレベルおよび分解能）のブラインド周波数帯域の79GHz帯域内における位置に関する依存性について示す。次に、同上の総ブラインド周波数帯域幅に関する依存性について示す。

2. 多周波ステップレーダにおけるスパース周波数分割アダプティブ設計

2.1 信号処理

多周波ステップレーダにおいて、送信帯域幅 B を最大 N 周波数ステップに分割する。 $\Delta f = B/N$ であり、最大の距離視野 R_{amb} は $c/2\Delta f$ となる。ここで、合成帯域処理である DFT のサイドローブを低減するために N 個の $f(n) = f_0 + n\Delta f$ で書かれる等間隔の N ステップからブラインド周波数帯域に相当する周波数ステップ番号を除いた N' ステップの周波数の中から任意の K 個のステップを選ぶ。選ばれた周波数ステップは不等間隔となる（この不等間隔ステップを $g(k)$ ($k=0,1,2,\dots,K-1$) とする）。また、周波数番号 k の複素振幅をここでは $a(k)=1$ として固定する。ここで、周波数ステップ $f(n)$ での、距離 r に目標が存在するときの r から Δr 離れた距離での合成帯域 DFT 出力は、

$$W(\Delta r) = \sum_{k=0}^{K-1} a(k) \exp\left(-2\pi j\left(\frac{2\Delta r}{c} g(k)\right)\right) \quad (1)$$

となる。よって、距離 Δr_m での出力値を $\varepsilon_m K$ とおく。ここで、多周波ステップレーダでは、パルスの帯域幅が

距離ゲートとなるので、サイドローブを下げるべき領域はこの距離ゲート内となる。サイドローブ領域の Δr_m

($m=0, \dots, M-1$) で、 ε_m を十分小さい値として $\varepsilon_m K$ と出力に制約を与える。上記を行列形式で書くと、

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_0 K \\ \varepsilon_1 K \\ \vdots \\ \varepsilon_{M-1} K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-2\pi j \frac{2\Delta r_0}{c} g(0)} & e^{-2\pi j \frac{2\Delta r_0}{c} g(1)} & \dots & e^{-2\pi j \frac{2\Delta r_0}{c} g(K-1)} \\ e^{-2\pi j \frac{2\Delta r_1}{c} g(0)} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & \\ e^{-2\pi j \frac{2\Delta r_{M-1}}{c} g(0)} & \dots & & e^{-2\pi j \frac{2\Delta r_{M-1}}{c} g(K-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

となる。また、簡易に $E = F \cdot A$ と書くと、以下の評価式を評価関数とし、これを最小とする g を求める。

$$g = \arg \min_g \left(\|E - FA\|^2 \right) \quad (3)$$

A は、 K 次元の振幅1のベクトルである。この不等間隔周波数ステップ g （振幅はすべて1）を用いて送信を行う。このとき、目標距離を $Rtgt$ とすると受信信号は以下で表される。

$$S(k) = \exp\left(2\pi j \frac{2Rtgt}{c} g(k)\right) \quad (4)$$

受信信号に対する合成帯域処理では以下に示す不等間隔 DFT による合成を行う。

$$BF(r) = \sum_{k=0}^{K-1} S(k) \exp\left(-2\pi j \frac{2r}{c} g(k)\right) \quad (5)$$

2.2 評価パラメータ

図3に合成帯域出力の一例を示す。本稿では、図3中に示す式(3)のサイドローブ領域（メインビーム幅の外側から距離ゲート幅）の電力の平均値 (a) と分解能（メインビームの半値（3dB）幅）(b) を評価パラメータとする。

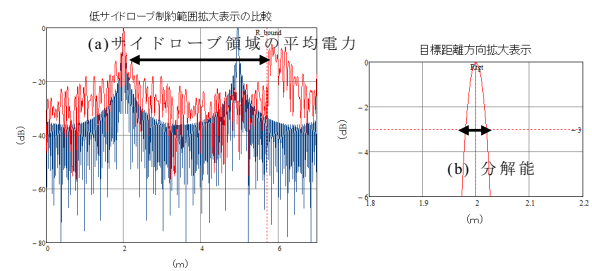


図1. 評価パラメータ ((a)サイドローブ平均値, (b)分解能 (ビーム幅))

3. 計算機シミュレーション

79GHz 帯の 4GHz 帯域幅での利用を想定しシミュレーションにおけるパラメータは表 1 に示す値を採用する^[4]。大局的探索アルゴリズムは人工蜂コロニー法 (ABC) を用いる。全送信帯域ステップ幅 $B=3.2\text{GHz}$ を最大 $N=256$ ステップに分割する。 $\Delta f=B/N=12.5\text{MHz}$ であり、最大の距離視野 $R_{amb}=c/2\Delta f$ は 12m となる。ここで、周波数ステップの数を選択した結果 $N_s=64$ となると仮定すると、平均 $\Delta f=B/N=50\text{MHz}$ であり、距離視野 $R_{amb}=c/2\Delta f=3\text{m}$ である。ここでは、パルス帯域幅が 40MHz のとき (パルス幅 3.75m) を想定し、平均周波数ステップ幅の距離視野 3m より大きく合成帯域処理において、線形ステップでは折返し (アンビギュエイティ) が発生する条件とする。

表 1. シミュレーションにおける条件パラメータ

| 変数の説明 | 変数名 | 設定値 |
|-----------------|-----------|-------------------|
| 周波数 | f0 | 77×10^9 |
| 周波数ステップ範囲 | B | 3.2×10^9 |
| 周波数ステップ候補の総数 | N | 256 |
| 周波数数の制約 | Ns | 64 |
| Near_bound 値(m) | sld | 0.046 |
| Far_bound 値(m) | Far_bound | 3.75 |
| 低サイドローブ制約値 | epsilon | 0.000001 |
| 低サイドローブ制約数 | N_ST | 256 |
| 目標距離 | Rtgt | 2 |

3.1 評価パラメータのブラインド周波数位置との関係

本節では、評価パラメータのブラインド周波数の位置との関係を示す。

3.1.1 ブラインド帯域幅 200MHz のとき

評価パラメータのブラインド周波数の位置との関係を示すため、図 2 に示すように 3.2GHz の帯域幅に 9 種類の 200MHz のブラインド帯域幅を設定する (帯域幅の前側半分のみとしているのは、対称性から後側半分の結果が前側半分のときと同様の結果が得られることが自明なためである)。図 3 にサイドローブレベルと分解能のブラインド周波数 (帯域幅 200MHz) の位置との関係を示す。ブラインド周波数帯が端にあるとき (ケース①), 分解能が劣化し、サイドローブレベルが低くなる傾向が見られる。ブラインド周波数が④の位置よりも中央になる (ケース④~⑨) と評価パラメータは同様の結果を示すことがわかる。ブラインド帯域がない場合のサイドローブレベルおよび分解能はそれぞれ -24.3dB および 0.042m であり、サイドローブレベルの劣化はケース①~⑨において最大で 0.7dB 程度であることがわかる。

3.1.2 ブラインド帯域幅 500MHz のとき

図 4 に設定された 9 種類の 500MHz のブラインド帯域幅を図 2 と同様に示す。図 5 に各評価パラメータのブラインド周波数 (帯域幅 500MHz) の位置との関係を示す。ブラインド周波数帯が 3.2GHz の帯域内で端の方にあるとき、分解能が劣化し、サイドローブレベルが低くなる傾向が見られる。ブラインド周波数が④の位置よりも中央になる (ケース⑥~⑨) と評価パラメータは各ケースで同様の結果を示すことがわかる。ブラインド帯域がない場合のサイドローブレベルと比べてサイドローブレベルの劣化はケース①~⑨において最大で 1.2dB 程度であることがわかる。

3.1.3 ブラインド帯域幅 1GHz のとき

図 6 に設定された 9 種類の 1GHz のブラインド帯域幅を図 2 と同様に示す。図 7 に各評価パラメータのブラインド周波数 (帯域幅 1GHz) の位置との関係を示す。ブラインド周波数帯が端にあるとき、分解能が劣化し、サイドローブレベルが低くなる傾向が見られる。その傾向は図 3 および図 5 に示す 200MHz および 500MHz のときよりも顕著に確認される。ケース①とケース⑨のレンジプロファイルを図 8 に示す。ブラインド帯域がない場合のサイドローブレベルと比べてサイドローブレベルの劣化はケース①~⑨において最大で 2.1dB 程度であることがわかる。

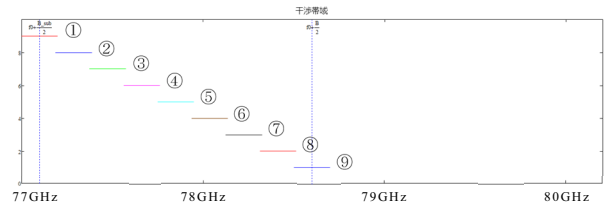


図 2. ブラインド帯域幅 200MHz の設定条件 (①~⑨)

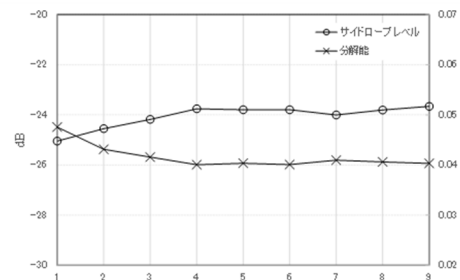


図 3. 評価パラメータのブラインド周波数 (帯域幅 200MHz) の位置依存性

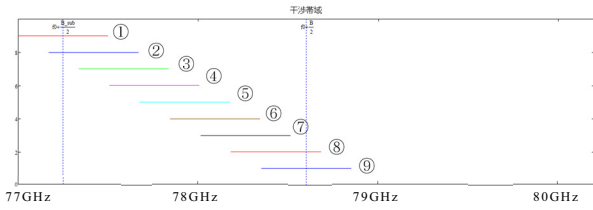


図 4. ブラインド帯域幅 500MHz の設定条件 (①～⑨)

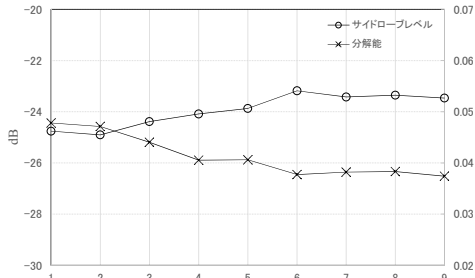


図 5. 評価パラメータのブラインド周波数 (帯域幅 500MHz) の位置依存性

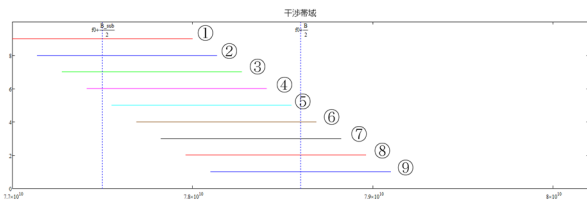


図 6. ブラインド帯域幅 1GHz の設定条件 (①～⑨)

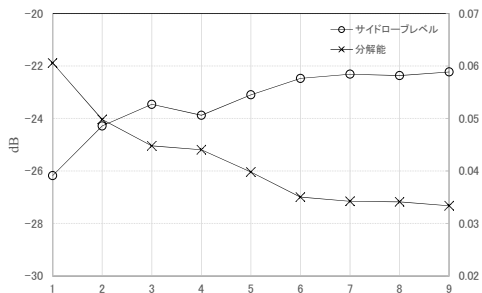


図 7. 評価パラメータのブラインド周波数 (帯域幅 1GHz) の位置依存性

3.2 評価パラメータと総ブラインド周波数帯域幅との関係

本節では、評価パラメータと総ブラインド周波数帯域幅との関係を最小ブラインド帯域幅毎に示す。

3.2.1 最小ブラインド帯域幅 200MHz のとき

図 9 に最小ブラインド帯域幅 200MHz を 3.2GHz の帯域幅内にランダムに配置 (各 200MHz のブラインド周波数に重なりはないものとする) したときの評価パラメータの総ブラインド周波数帯域幅との関係を示す。図 9 より、総ブラインド帯域幅 2GHz (使用帯域幅 1.2GHz) までは、総ブラインド帯域幅に依らず、分解能はほぼ一定であることがわかる。一方で、ピークサイドローレベルについては、ブラインド周波数帯域

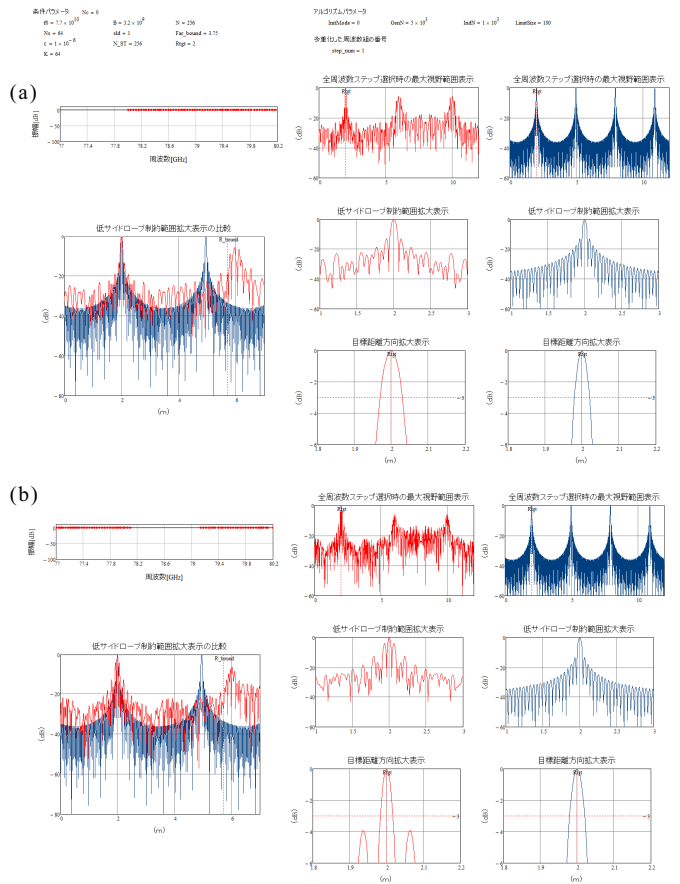


図 8. 選択されたスパース周波数ステップとレンジプロファイル (a)ケース①, (b)ケース⑨

がない場合と比べて、ブラインド周波数の総帯域幅が 1GHz 以下では、サイドローレベルの劣化は 1.5dB 程度であることがわかる。また、ピークサイドローレベルはブラインド周波数の総帯域幅の増加により劣化するが、ピークサイドローレベル 20dB 程度が維持されることが確認される。

4.2.2 最小サブバンド帯域幅 500MHz

図 10 に最小ブラインド帯域幅 500MHz を 3.2GHz の帯域幅内にランダムに配置 (各 500MHz のブラインド周波数に重なりはないものとする) したときの評価パラメータの総ブラインド周波数帯域幅との関係を示す。図 10 より、総ブラインド帯域幅 2GHz (使用帯域幅 1.2GHz) までは、総ブラインド帯域幅に依らず、分解能はほぼ一定であることがわかる。一方で、ピークサイドローレベルについては、ブラインド周波数帯域がない場合と比べて、ブラインド周波数の総帯域幅が 1GHz 以下では、サイドローレベルの劣化は 1.8dB 程度であることがわかる。また、ピークサイドローレベルはブラインド周波数の総帯域幅の増加により低下するが、ピークサイドローレベル 20dB 程度が最小ブラインド帯域幅 200MHz および 500MHz のときと同様に維持されることが確認される。

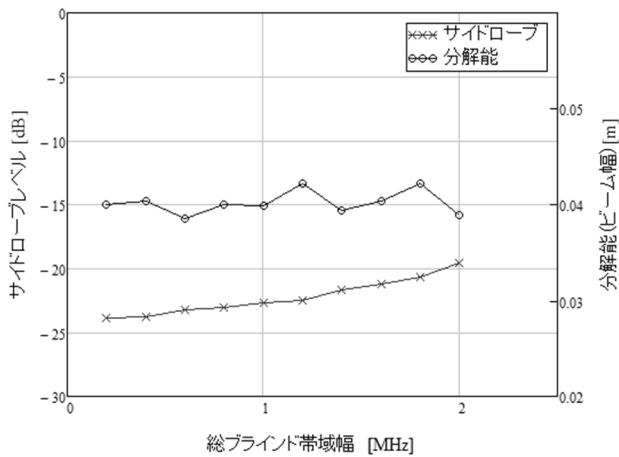


図 9. 評価パラメータの総ブラインド帯域幅（最小ブラインド帯域幅 200MHz）依存性

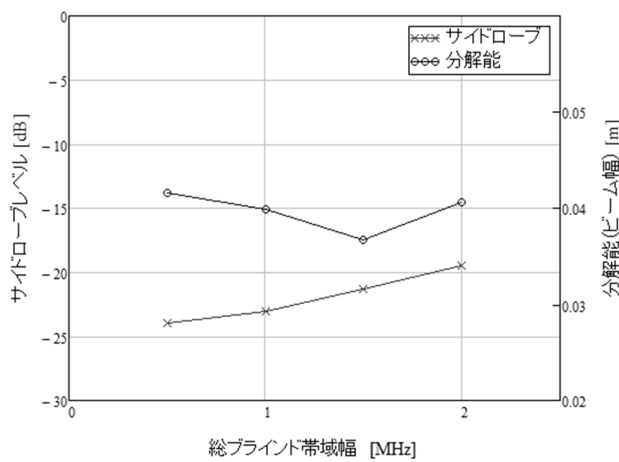


図 10. 評価パラメータの総ブラインド帯域幅（最小ブラインド帯域幅 500MHz）依存性

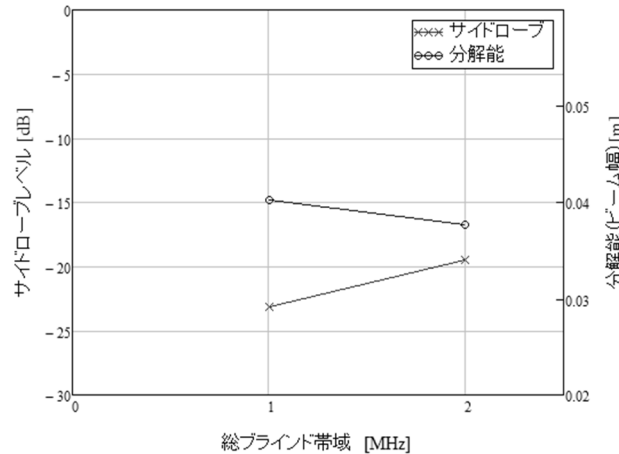


図 11. 評価パラメータの総ブラインド帯域幅（最小ブラインド帯域幅 1GHz）依存性

4.2.3 最小サブバンド帯域幅 1GHz

図 11 に最小ブラインド帯域幅 1GHz を 3.2GHz の帯域幅内にランダムに配置（各 1GHz のブラインド周波数に重なりはないものとする）したときの評価パラメータの総ブラインド周波数帯域幅との関係を示す。

図 11 より、総ブラインド帯域幅 2GHz（使用帯域幅 1.2GHz）までは、総ブラインド帯域幅に依らず、分解能はほぼ一定であることがわかる。一方で、ピークサイドローブレベルについては、ブラインド周波数帯域がない場合と比べて、ブラインド周波数の総帯域幅が 1GHz 以下では、サイドローブレベルの劣化は 1.8dB 程度であることがわかる。また、ピークサイドローブレベルはブラインド周波数の総帯域幅の増加により劣化するが、ピークサイドローブレベル 20dB 程度が最小ブラインド帯域幅 200MHz およびのときと同様に維持されることが確認される。

4. まとめ

本稿では、79GHz 帯において、干渉帯域（ブラインド周波数帯域）がある場合の超広帯域多周波ステップレーダのスパース周波数設計について検討した。まず評価パラメータ（サイドローブレベルと分解能）のブラインド周波数の位置との関係について考察した。その結果、ブラインド周波数帯が端にあるとき、分解能が劣化し、サイドローブレベルが低くなる傾向が見られた。ブラインド周波数帯幅 500MHz, 1GHz で同様の傾向が確認され、1GHz のとき 200MHz, 500MHz のときよりもその傾向が顕著に確認された。ブラインド帯域がない場合のサイドローブレベルと比べてサイドローブレベルの劣化は最大で 0.7dB~2.1dB 程度であることがわかった。また、評価パラメータと総ブラインド周波数帯域幅との関係について、3.2GHz の帯域幅内にブラインド周波数をランダムに配置（最小サブバンド帯域幅 200MHz, 500MHz, 1GHz）したとき総ブラインド帯域幅 2GHz（使用帯域幅 1.2GHz）までは、総ブラインド帯域幅に依らず、分解能はほぼ一定であることがわかった。ピークサイドローブレベルは、ブラインド周波数の総帯域幅の増加により劣化するが、ピークサイドローブレベル 20dB 程度が維持されることが確認された。

謝辞

本研究開発は総務省 SCOPE(受付番号 195003009)の委託を受けたものです。

文 献

- [1] 稲葉, “多周波ステップ ICW レーダによる多目標分離法”, 信学論(B), vol.J89-B, no.3, pp.373-383, 2006
- [2] 山田亮佑, 秋田学, 稲葉敬之, "圧縮センシングを用いた超広帯域多周波ステップ CPC 方式における距離アンビギュイティ抑圧効果の評価", 信学技報 SANE2018-50, vol. 118, no. 239, pp. 35-40, 2018
- [3] 稲葉敬之, 渡辺一宏, 秋田学 “超広帯域多周波ステップレーダにおける再帰的信号減産周波数推

- 定法を用いた自動検知法", 信学技報 SANE2018-114, vol. 118, no. 441, pp. 25-30, 2019
- [4] 稲葉敬之, 秋田学, "圧縮センシングを用いた多周波ステップレーダにおけるスパース周波数選択法", 信学技報 SANE2018-113, vol. 118, no. 441, pp. 19-24, 2019
- [5] 稲葉敬之, 谷口匠, 秋田学, "多周波ステップレーダの人工蜂コロニー法を用いた周波数多重化の基礎検討", 信学技報 WBS2019-6, vol. 119, no. 26, pp. 29-34, 2019
- [6] 小嶋浩一, 小川博文, 遠野安宏, 遠藤靖之, 大村博志, "マツダの先進安全技術", 自動車技術会 Motor Ring No.36, 2013
- [7] 青柳靖, "24GHz帯周辺監視レーダの開発", 古河電工時報第137号, 2018
- [8] 小河昇平, 福永貴徳, 山岸傑, 山田雅也, 稲葉敬之, "自動運転支援向け76GHz帯高分解能レーダ", SEIテクニカルレビュー, No.192, 2018
- [9] 山脇俊樹, 山野眞市, "60GHz帯自動車用ミリ波レーダ", 富士通テン技報, Vol.15, No.2, 1997
- [10] 岸上高明, 中川洋一, "次世代インフラ協調型安全運転支援システムに向けたミリ波センシング技術", パナソニック技報, Vol.57, No.3, 2011