

超広帯域多周波ステップ方式の合成帯域における 距離ゲート内サイドローブに関するパラメータスタディ

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.uec.ac.jp

あらまし 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を提案してきた。79GHz帯の4GHz幅等の超広帯域幅への拡張において、受信機帯域幅が送信周波数帯域幅の1/100倍程度としさらなる低ハードウェア負荷を実現する方法について提案している。一方で、本稿では受信機帯域幅として送信帯域幅4GHzの1/10程度（受信機帯域幅320MHz）まで広帯域化することによる合成帯域処理（通常の離散フーリエ変換）でのアンビギュイティとサイドローブという視点で、その効果について検討する。まず、後者の幾分広帯域化した方法は前記狭帯域化時に課題となる周波数ステップのスパース・不等間隔化問題を回避可能であり等間隔周波数ステップを採用しても距離アンビギュイティが生じないという利点がある。さらに、多周波ステップ方式において、合成帯域処理のゲート機能として働くパルス圧縮後帯域幅の関係を解説し、この幾分の広帯域により、合成帯域処理で低サイドローブ化が必要な距離領域が目標方向の近傍のみに限られることから、その領域のみを低サイドローブ化させるための適応ビームフォーミングが利用可能となる。本稿では、計算機シミュレーションにおいて、多少の広帯域化（それでも受信機帯域幅は送信帯域幅の1/10~1/50）により距離視野よりパルス圧縮後のパルス幅が小さいというレーダパラメータとすることで得られる利点（距離ゲート内のサイドローブの低減効果）について示す。

キーワード 多周波ステップ方式, スパース周波数分割法, 合成帯域, MSN

A Study on Radar Parameter associated with Range Side-lobe of Ultra-Wide Band Stepped Multiple Frequency Radar

Takumi Taniguchi, Manabu Akita, 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: taniguchi.takumi@inabalab.ee.uec.ac.jp

Abstract Authors have proposed the stepped multiple-frequency radar based on the synthetic bandwidth, in which the receiver can be narrow bandwidth by switching the frequency in a time-division. The subsequent signal processing achieves a high resolution equivalent to the transmission bandwidth. We proposed a method to mitigate the hardware load by setting the receiver bandwidth to 1/100 of the transmission bandwidth in ultra-wide bandwidth in 79GHz band. On the other hand, in this article, we consider the effect of increasing the receiver bandwidth up to 1/10 of the transmission bandwidth on the ambiguity and side-lobe level in the processing of synthetic bandwidth. The method using relatively wide receiver bandwidth avoids the problem of range ambiguity. In addition, we illustrate the output of pulse compression that works as the range gate in synthetic bandwidth. In this method, the range where the side-lobe level should be suppressed is limited around the target direction. That is why we can have option to use adaptive beamforming to suppress the side-lobe in corresponding range. We show the advantage by adopting the relatively wide receiver bandwidth.

Keywords Stepped multiple frequency pulse radar, Sparse frequency division method, Synthetic bandwidth, MSN

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を提案してきた^{[1][2][3]}。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を両立可能であることを特徴としている。筆者らは、79GHz帯の4GHz幅等の超広

帯域幅への適用において受信機帯域幅をさらに狭帯域化（受信機帯域幅が送信周波数帯域幅の1/100倍程度とし低ハードウェア負荷を実現）する方式に関するパラメータスタディを行ってきた^{[4][5]}。受信機帯域幅40MHzにて79GHz帯の4GHz幅等の超広帯域幅を実現することを前提としたアプローチにおいては、距離アンビギュイティを生じない最適な周波数ステップのスパース解を求め、周波数ステップを選択・設計する手

法(スパース周波数分割設計法)の開発を進めている。最適な周波数ステップを求める方法として圧縮センシングを用いる周波数ステップ選択法, 大局的最適解探索アルゴリズムによる周波数ステップ選択法^[6]を提案してきた。また, この周波数スパース化に伴い生じる距離方向のサイドローブへの対策として振幅の大きな目標から検知と減算を繰り返す再帰的信号減算周波数推定法^[7]を用いた自動検知法を提案している^[8]。

上記のように, 受信機帯域幅の狭帯域化を目指す研究を推進する一方で, 本稿では, 受信機帯域幅として送信帯域幅 4GHz の 1/10 程度 (受信機帯域幅 320MHz すなわち 16bit でサンプリング周波数 640MHz 程度) まではハードウェア的に実現が可能であることを前提とした信号処理および瞬時帯域が広がることの効果を検討する。受信機帯域幅が比較的大きく等間隔周波数ステップを採用しても距離アンビギュイティが生じないパラメータを採用したとき, 等間隔周波数ステップを用いた合成帯域処理において距離ゲート内のサイドローブを低減する方法について検討する。計算機シミュレーションにおいて, 距離視野よりパルス圧縮後のパルス幅が十分小さいレーダパラメータとすることで得られる利点 (距離ゲート内のサイドローブの低減効果) について示す。

2. 合成帯域処理における距離ゲート内のサイドローブ低減

2.1 多周波ステップレーダパラメータ

79GHz 帯の 4GHz 帯域幅での利用を想定し各パラメータは表 1 に示す値を採用する。全送信帯域ステップ幅 $B=3.2\text{GHz}$ を $N=64$ ステップに分割する。 $\Delta f=B/N=50\text{MHz}$ であり, 最大の距離視野 $R_{\text{amb}}=c/2\Delta f$ は 3m となる。ここで, パルス帯域幅が 80MHz で圧縮後のパルス幅が 1.87m であれば, 距離視野 R_{amb} より小さいために, パルス圧縮が距離ゲートとして機能し, 合成帯域処理による折返し (アンビギュイティ) が抑圧される。パルス圧縮後の距離ゲート機能と合成帯域処理における低サイドローブが求められる距離幅の関係について, 図 1 に示す (文献[6]図 1 より引用)。ここでパルス圧縮後パルス幅に対しオーバーサンプリングは 2 とする。図 1 は, 最終的に目標距離を出力するパルス位置サンプリングに対し, 目標位置 (パルス立ち上がり) が, 最も左に存在した場合の状況を示す。それぞれ, パルス帯域幅が 80MHz のとき, パルス位置サンプリング間で干渉しないためには, 合成帯域処理で目標位置を中心として低サイドローブが求められる

距離範囲は, それぞれ -0.94m ~ 1.87m, および -1.87m ~ 0.95m である。同様に, パルス帯域幅が 160MHz, 240MHz, 320MHz のときに低サイドローブが要求される距離の範囲を表 1 に示す。本稿では, 表 1 に示すように, $\Delta f=50\text{MHz}$ で等間隔ステップを採用し通常のフーリエ変換に基づく合成帯域においてアンビギュイティが発生しないパルス帯域幅を採用したときのニアサイドローブの低減方法について検討する。

一方, パルス帯域幅が 40MHz のときは, パルス幅が 3.75m となり距離視野 R_{amb} より大きく合成帯域処理において折返し (アンビギュイティ) が発生してしまう。パルス圧縮後パルスによる距離ゲート幅から低サイドローブが求められる距離範囲のサイドローブ電力を最小化させるスパースで不等間隔な周波数ステップの設計方法 (スパース周波数分割設計法) については, 文献[6]を参照されたい。

表 1. 計算機シミュレーションでのレーダパラメータ

パラメータ	送信帯域幅	合成帯域			パルス圧縮		
		周波数ステップ数	平均周波数ステップ幅 Δf (MHz)	距離視野 (m)	パルス帯域幅 (MHz)	距離ゲート (m)	要求低 SL 幅
(1)	3.2GHz	64	50MHz	3	80	1.87	2.81
(2)	3.2GHz	64	50MHz	3	160	0.93	1.44
(3)	3.2GHz	64	50MHz	3	240	0.62	0.94
(4)	3.2GHz	64	50MHz	3	320	0.47	0.70

2.2 MSN 法を適用した合成帯域処理

本稿では, 通常のフーリエ変換に基づく合成帯域においてアンビギュイティが発生しないパルス帯域幅を採用した場合においてニアサイドローブを低減する方法として, 式 (1) で表される MSN 法を用いる^[9]。合成帯域における距離ゲート幅内 (低サイドローブが要求される距離範囲) のサイドローブを低減するために距離ゲート幅のビーム指向方向以外を干渉波が存在するとみなし, この距離範囲内において信号対干渉波の出力電力比を最大とする MSN ウェイトベクトルとして,

$$\mathbf{w} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{v} \quad (1)$$

$$\mathbf{a}(R) = \left(e^{-j\frac{4\pi R}{c}\Delta f \cdot 0} \quad e^{-j\frac{4\pi R}{c}\Delta f \cdot 1} \quad \dots \quad e^{-j\frac{4\pi R}{c}\Delta f \cdot (N-1)} \right)^T \quad (2)$$

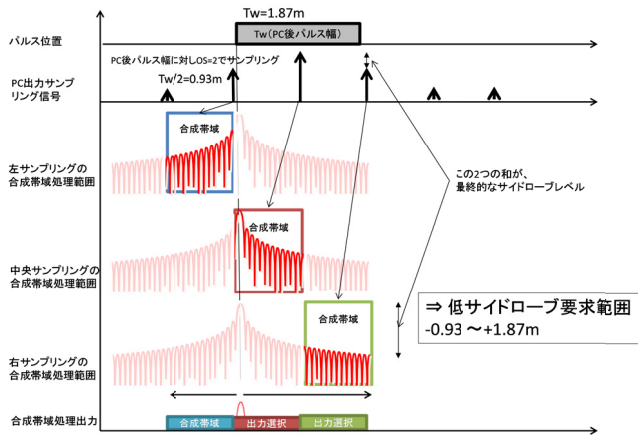


図1. 合成帯域処理における低サイドローブ要求範囲 (文献[6]の図1より引用)

を用いて合成帯域処理を行う。ここでベクトル \mathbf{v} は、目標距離に対するステアリングベクトル $\mathbf{a}(R)$ である。

3. 計算機シミュレーション

図2に表1に示す各レーダパラメータにおいて、式(1)に基づく合成帯域処理のビームパターンを示す。図1は、サンプリング点間の左端にビームを指向させたときのビームパターンを示している。図2のそれぞれのパラメータで低サイドローブが求められる距離範囲において、窓関数を用いたときに比べてビーム幅の劣化が少なく（ビーム幅の広がり率は10%以下）、通常のフーリエ変換よりも、距離ゲート内の低サイドローブ化が確認される。各パラメータにおいて、距離ゲート内のピーク対サイドローブが約40dB程度確保されていることがわかる。また、瞬時帯域が広い（低サイドローブ要求範囲が狭い）ほど、ニアサイドローブの抑圧がされていることがわかる。

4. むすび

本稿では、受信機帯域幅として送信帯域幅4GHzの1/10程度（受信機帯域幅320MHz）まではハードウェア的に実現が可能であることを前提とした信号処理を検討した。受信機帯域幅が比較的大きく等間隔周波数ステップを採用しても距離アンビギュイティが生じないパラメータを採用したとき、等間隔周波数ステップを用いた合成帯域処理において距離ゲート内のサイドローブを低減する方法について示した。計算機シミュレーションにおいて、距離視野よりパルス圧縮後のパルス幅が十分小さいレーダパラメータとすることで距離ゲート内のピーク対サイドローブが約40dB程度確保されていることを示した。また、瞬時帯域が広い（低サイドローブ要求範囲が狭い）ほど、ニアサイドロー

ブの抑圧がな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] 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
- [3] 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, vol135, no.5, 2015
- [4] 稲葉敬之, 秋田学, 渡辺優人, "超広帯域(79GHz帯域4GHz幅等)に向けた狭受信機帯域レーダ方式の提案", 信学技報SANE2017-20, vol. 117, no.107, 43-48, 2017
- [5] 稲葉敬之, 秋田学, 渡辺一宏, "狭受信機帯域による超広帯域コヒーレントレーダ技術", 2017年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, BI-1-2, 2017
- [6] 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
- [7] 山口和樹, 渡辺一宏, 秋田学, 稲葉敬之, "再帰的信号減算周波数推定法の基本特性の評価と多周波ステップCPCへの適用の検討", 信学技報SANE2018-48, vol. 118, no. 239, pp. 23-28, 2018
- [8] 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算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
- [9] 稲葉敬之, 荒木純道, "干渉波環境での車載用レーダ信号処理構成の検討"電子情報通信学会論文誌B, vol. J87-B, No. 2, pp. 199-212, 2014

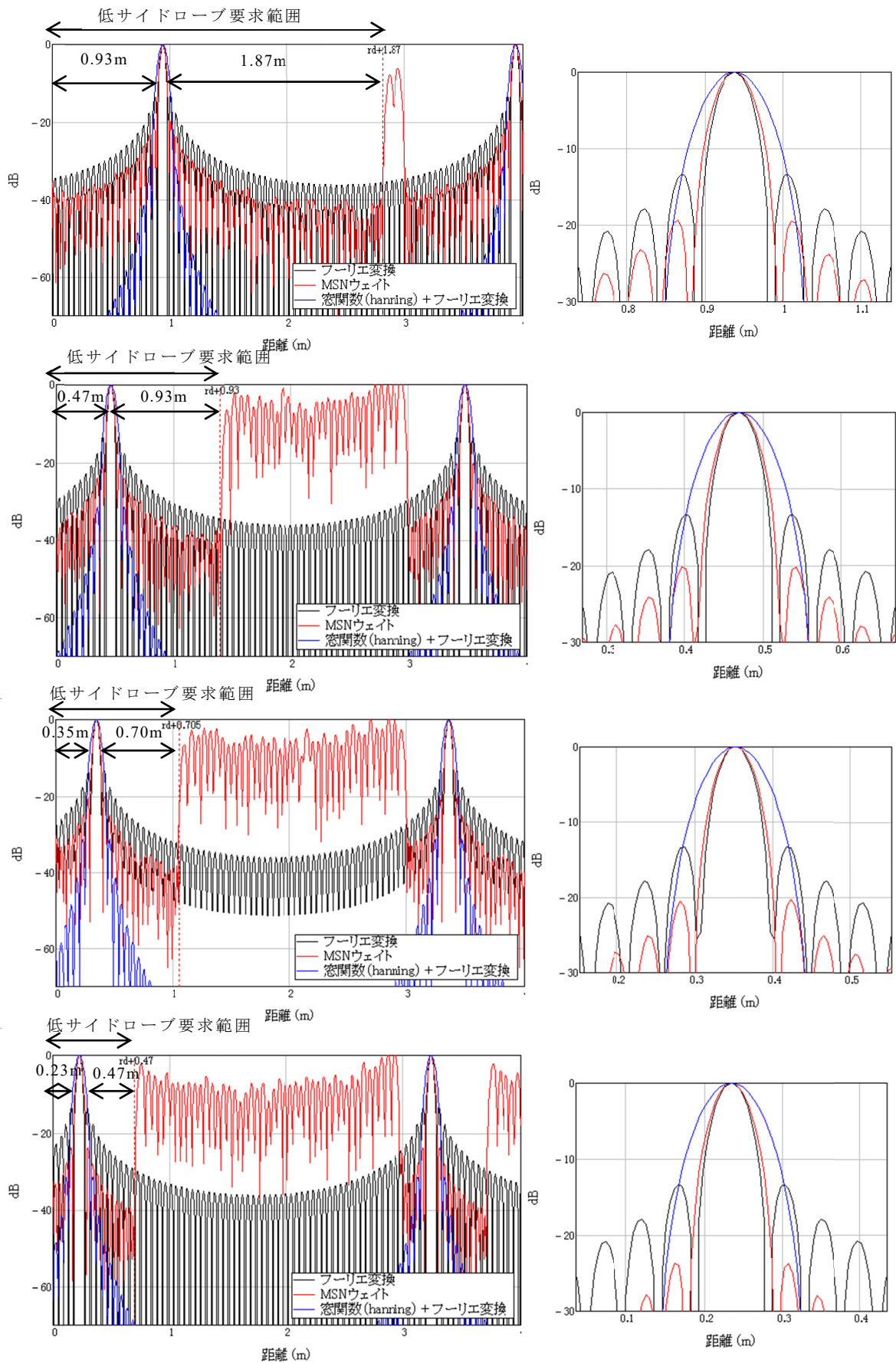


図 2. MSN 法を適用した合成帯域処理のビームパターン
 (a) パラメータ (1), (b) パラメータ (2), (c) パラメータ (3), (d) パラメータ (4)