

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

稲葉 敬之[†] 谷口 匠[†] 秋田 学[†]

[†]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: inaba@ee.uec.ac.jp

あらまし 著者等は、狭受信機帯域幅（すなわち遠距離性を備える）と高距離分解能という相反する能力を兼ね備えた多周波ステップ方式を提案している。当方式は、狭い瞬時帯域幅の周波数を時分割でステップ状に送受信することが特徴である。この特徴を活用し全周波数帯域幅をスパースに不等間隔周波数ステップすることで距離分解能を維持したまま周波数帯域幅削減や複数の組に分割することで帯域内に複数のレーダを共存させる周波数多重化について基礎検討を行う。周波数ステップの探索法として本研究では人工蜂コロニー法(ABCアルゴリズム)に基づきいくつかの改変を図る手法を提案する。計算機シミュレーションによりその有効性が期待されることを示すととも今後の課題について言及する。

キーワード 人工蜂コロニー, 圧縮センシング, 多周波ステップ, パルス圧縮, 合成帯域法, サイドローブ

Sparse Frequency Diversity Design using ABC in Multiple Frequency Stepped Pulse Radar

Takayuki INABA[†], Takumi TANIGUCHI, Manabu AKITA

Graduate school of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications

1-5-1 Choufugaoka, Choufu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

E-mail: inaba@ee.uec.ac.jp

Abstract Authors have proposed stepped multiple frequency radar modulation. It could achieve both a high range resolution and a long-range detection performance by a narrow band receiver compared with the transmission bandwidth. In this modulation, one of the important feature is that the frequencies that have narrow bandwidth are transmitted and switched in the time division in a sequence. In this article, the initial study of frequency multiplexing for coexisting multiple radars in the frequency band by reducing the frequency bandwidth or dividing into multiple frequency sets while maintaining the range resolution by adopting the sparse frequency and not equal frequency step width are conducted. As the optimizing method for the frequency steps, a searching method based on Artificial Bee Colony (ABC) algorithm and some modifications are described. The effectiveness of the method is verified by the computational simulations and the future tasks are also described.

Keywords Artificial Bee Colony, Compressive sensing, Multiple Frequency Stepped Radar, Pulse Compression, Synthetic Wideband Processing, Side-lobe Ambiguity

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]。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4GHz幅

等のより広帯域幅で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課題となる。この対策として通常的合成帯域処理（すなわちフーリエ変換処理）においてもグレーティングローブを回避しつつ低サイドローブを実現可能なスパースで不等間隔な周波数ステップを、圧縮センシング

を用いて推定する手法を提案している[2]. 一方, 周波数有効利用の観点でレーダの多重化は重要技術課題であり, 筆者らは, 時間同期を前提とした多周波ステップ CPC の完全相補符号を拡張する方法, 同様に完全周期相関符号でパルスを二次符号変調した多重化法等を提案してきた.

以上の背景から本論文では局所解を避け大局的最適解を求めるために群知能アルゴリズムとして近年注目されている人工蜂コロニー (ABC) アルゴリズムを適用し周波数ステップの「スパース方式」ならびに「多重化方式(1)(2)」を提案する. また計算シミュレーションによりその基礎的評価を実施する.

2. 人工蜂コロニー法用いた多周波ステップレーダの周波数設計

2.1 スパース化による周波数帯域幅削減, および多重化

1) 概要

周波数利用の効率化を図るために, 筆者らは多周波ステップレーダにおいて合成帯域処理 (通常の DFT 処理) 出力の低サイドローブを実現する不等間隔でスパースな周波数を探索するアルゴリズムとして圧縮センシングを採用した手法を報告した[2]. 図 1 に, その概念を示す. 等間隔な周波数ステップを持つ多周波ステップレーダで合成帯域で距離アンビギュイティが出ない最小のステップ間隔を用いたものが図 1 の上図としたとき下図のように更に周波数ステップの数を減らすことで実際に使用させる周波数幅を削減することを考える. このときアンビギュイティの発生およびサイドローブの上昇という問題が生じる. これらを抑制するようにスパースで不等間隔な周波数値を求める.

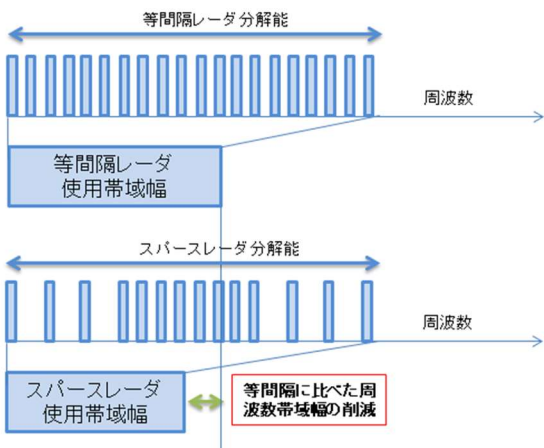


図 1 スパース化による周波数帯域幅削減の概念

しかし, 圧縮センシングによる手法では, 以下の 3 点の改善点が認められる.

- ① 選択する周波数の数が指定できない (IHT 等除く).

- ② 振幅が複素で求められ, 合成帯域時の信号損失が発生すること.

- ③ 推定結果が局所解となる.

そこで, 近年注目されている群知能アルゴリズムの一つである人工蜂コロニー法 (ABC) を用いてスパース, 不等間隔周波数を探索する「スパース方式」を構築する. また図 2 に示すように周波数多重化を実現する周波数ステップを探索する「多重化方式(1)(2)」について提案し評価検討する.

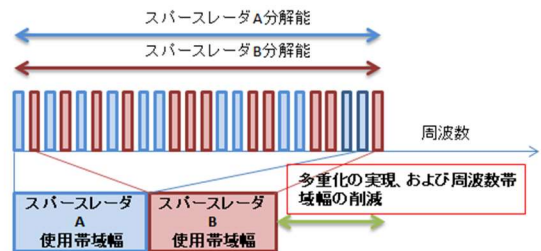


図 2 スパース化による周波数分割多重化の概念

2) ABC アルゴリズム適用時の条件設定

ABC アルゴリズムで求める探索ベクトルは, 多周波ステップレーダにおける周波数ステップさせる周波数値である. これをもとに合成帯域処理後のサイドローブを低減させることが探索制約条件であるが, その時 (ア) 探索ベクトルの要素は任意の実数ではなくある候補の中から選ばれた値 (最小分解能を基準にすると整数値) となる. また, (イ) 要素の順は不定 (順に関係なく同じ評価関数値) であり, 要素の値の組にのみ異存するという特徴がある.

本研究では, 条件 (ア) より全体の周波数の候補数を N , それぞれの多周波ステップレーダでの周波数値を K とする. また, 分解能の低下を抑制するため, それぞれのレーダは周波数が重複しないような条件の中で周波数帯域幅の重複しない両端の周波数値を取るものと制約する. そのため探索する周波数ステップ推定ベクトルは, それぞれその 2 つを除いた $(K-2)$ 個の要素 (周波数値) を候補 N の中から求めるものとする. なお, 多重化のための探索法として「第一レーダの周波数を探索し残り探索する方法」, 「周波数候補を (ランダムに) 分割した後にそれぞれそれらから選択する手法」等が考えられる. しかし本稿では, レーダ間をなるべく均等にとりあつかえるよう以下 2.2, 2.3 あるは表 1 に示すように ABC アルゴリズムを一部改変した方式を提案・検討する.

2.2 スパース化による周波数分割多重化方式 (1)

1) 未知パラメータと評価関数

ABC アルゴリズム出力の未知ベクトル X に対し, 偶数項と奇数項 $X1, X2$ にわけ, 2 つのレーダの $(K-2)$ 個

の周波数値を要素とするベクトルであるとする。次に、それぞれに両端の周波数値を加え、それぞれ K 個の要素としたベクトル Y1, Y2 とし、2つのレーダでの合成帯域出力で低サイドローブ制約の評価関数は以下の式を採用する。

$$F1(Y1, x) = \left| \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} e^{j2\pi x \cdot Y1_k} \right| \quad (1)$$

$$F2(Y2, x) = \left| \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} e^{j2\pi x \cdot Y2_k} \right| \quad (2)$$

$$E_Func(Y1, Y2) = \sum_{k=ks}^{ke} \{ (F1(Y1, x_k) - \epsilon)^2 + (F2(Y2, x_k) - \epsilon)^2 \} \quad (3)$$

ここで x は距離刻みベクトルを表し、 x_{ks} から x_{ke} が低サイドローブ要求範囲、 x_{ks} はメインビームを避けた距離に、 x_{ke} はアンビギュイティの発生が許容されるパルス圧縮による距離ゲート外までの距離である。また、 ϵ は低サイドローブ制約係数である。式(3)の評価関数を用いて ABC アルゴリズムにて以下の最適値を探索する。

$$(X1, X2) = \text{Arg min}\{E_Func(Y1(X1), Y2(X2))\} \quad (4)$$

この評価関数では式(1)(2)において、振幅 A (合成ウェイト) を 1 に固定していることが特徴であり合成帯域処理では信号損失が発生しないという利点がある。

2) ABC アルゴリズム

ABC アルゴリズムへの入出力ベクトルは上記 X であり、評価関数は $E_Func(Y1(X1), Y2(X2))$ である。ABC アルゴリズムにて乱数を伴うイレーションにて最適解を探索するが、(イ)を考慮して ABC アルゴリズムを改変する。まず、アルゴリズムの初期位置決定後にベクトルの要素を昇順となるようにソートを行う。以後の処理内での更新操作では全個体に対して要素間での位置の入れ替えが無いようにランダム範囲を制限するように改変していることを特徴とする。

2.3 スパース化による周波数分割多重化方式 (2)

本手法は周波数の候補 N 全てを用いる、つまり $N=2K$ を満足するパラメータ条件である。ABC で探索する次元数は片方の組分の ABC アルゴリズム出力の未知ベクトル X が周波数組 X1 に対応する。N の中から X に含まれない残りの要素を X2 とする。用いる評価関数および ABC アルゴリズムは多重化法(1)と同様である。多重化を行わない単一レーダでの ABC アルゴリズムを用いた周波数削減方式である「スパース化方式」および多重化方式(1)、(2)の一般の ABC アルゴリズムとの相違。ならびに用いた未知ベクトル X、評価関数の違いについて「表 2」にまとめる。

3. 計算機シミュレーション

3.1 スパース化による周波数削減の評価

時分割で狭帯域パルスを送受信する多周波ステップレーダを用いた周波数有効利用の実現において2つの達成目標を設定し評価・検討する。達成目標 1 は、図 1 に概念を示した「スパース化による周波数帯域幅削減」を目標としたものである。

【目標 1】: 等間隔で虚像 (グレーティング) が発生しない最小周波数ステップ数に対し、同じ帯域幅内でグレーティングを発生させずにステップ数を 20%以上削減する。

具体的なレーダパラメータは「表 1」に示す値を採用する。「表 1」における「比較対象」とは、等間隔周波数ステップでアンビギュイティ (グレーティング) が発生しない周波数ステップの数 K をもつパラメータであり、等間隔ステップ合成帯域での「距離視野」とパルス圧縮での「距離ゲート」が同じ距離幅となる条件である。このとき周波数候補数 $N=256$ から選択する周波数の数は $K=80$ が必要となる。一方「スパース方式」では $K=64$ に 20%削減することでスパースな条件となり「目標 (1)」の達成を評価することを目的としている。 $K=64$ の等間隔ステップでは「距離ゲート=3.75m」のところ「距離視野=3m」でありアンビギュイティが発生する。図 3 及び表 3 は、 $K=64$ としたときの ABC アルゴリズムを用いた「スパース方式」により推定したスパースな不等間隔周波数値による合成帯域出力 (中央) および同数の等間隔周波数ステップ数時の合成帯域出力 (右) の結果を示す (2m のピークが目標)。等間隔では要求される低サイドローブ距離範囲 ($2 \pm 3.75m$) 内でアンビギュイティ (5m のピーク) が発生するが、スパース方式により選択された周波数ステップによる合成帯域にて分解能が低下せずにアンビギュイティも抑圧されていることが確認される。また低サイドローブ制約範囲 ($2 \pm 3.75m$) 内でピークサイドローブレベルは振幅 $A=1$ の均一分布での第一サイドローブ (-13.2dB) を上回る値 (-14.3dB) にまで低減されていることわかる。

3.2 スパース化による周波数多重化の評価

目標 2 は図 2 に示した「スパース化による周波数多重化」を目的としたものである。

【目標 2】: 等間隔ステップではグレーティングが避けられない条件にて、同じ帯域幅内に、同時 2 台以上の非同期レーダを分解能を落とさず (劣化を最小限に抑制し) 共存させる周波数ステップを実現する。

多重化方式(1)では、レーダ間最小 $\Delta f=12.5MHz$ がパルス圧縮帯域幅=40MHz より小さくレーダ間が時間非同期である場合、タイミングによってはレーダ間で信号の一部が干渉する。一つの観測区間全体の中での

干渉電力としては小さいが、更に干渉対策能力向上を図る必要がある場合には、異なる符号変調等の併用が対策として考えられる。また周波数ステップでの対策案を「むすび」にて今後の課題として述べる。なお、同期レーダであれば周波数ステップの順の制御により当該問題は回避可能である。

多重化方式(2)では、レーダ間最小 $\Delta f=25\text{MHz}$ とパルス圧縮帯域幅 $=25\text{MHz}$ が同じ値であり、レーダが非同期であっても観測区間内全体を通して干渉が最低限に抑えられる。図4. 5及び表3にそれぞれ多重化方式(1)(2)でのレーダ1, レーダ2の合成帯域力評価結果を示す。いずれもピークサイドローブレベルが $-13.5\sim-15.4\text{dB}$ に抑圧されていることが確認される。

4. むすび

本稿では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帯域幅削減、および多重化方式について提案した。また基礎検討の結果その有効性が確認された。なお、更なるサイドローブの低減のためには

表1. 計算機シミュレーションにおける各方式のレーダパラメータ

レーダパラメータ	合成帯域							パルス圧縮		
	周波数ステップ範囲 (MHz)	候補周波数の数	周波数ステップ数	平均		最小		レーダ間最小 Δf (MHz)	パルス帯域幅 (MHz)	距離ゲート (m)
				平均周波数ステップ幅 Δf (MHz)	距離視野 (m)	自レーダ最小 Δf (MHz)	最大距離視野(m)			
比較対象(アンビギュイティなし)	3200	256	80	40	3.75	12.5	12	-	40	3.75
スパース方式	3200	256	64	50	3	12.5	12	-	40	3.75
多重化方式(1)	3200	256	64	50	3	25	6	12.5	40	3.75
多重化方式(2)	3200	128	64	50	3	50	6	25	25	6

表2. 各方式での処理方法の違い

処理内容	従来のABCアルゴリズムと異なる点			評価関数	ABC探索次元		
	N	ソート	NとKの関係				
スパース方式	N個からABCでK個選択する。	整数	なし	N>K	従来と同様 (別個要素との入れ替えがない範囲)	1レーダの合成帯域処理におけるサイドローブ電力	K-2
多重化方式(1)	N個からABCで重複しないように2K個選択し、偶奇2K個ずつに分割する。	整数	あり	N>2K	隣接する要素との入れ替えがない範囲	2レーダの合成帯域処理におけるサイドローブ電力の和	2(K-2)
多重化方式(2)	N個からABCで2K個選択した組と残りのK個の組に分割し評価関数に入れる。	整数	あり	N=2K	隣接する要素との入れ替えがない範囲	2レーダの合成帯域処理におけるサイドローブ電力の和	2(K-2)

表3. 各方式での合成帯域評価数値結果

	評価項目					
	メインビーム幅 [cm]		ピークサイドローブレベル[dB]		平均サイドローブレベル[dB]	
	レーダ1	レーダ2	レーダ1	レーダ2	レーダ1	レーダ2
スパース方式	4.3	-	14.3	-	24.6	-
多重化方式(1)	4.0	4.0	13.8	13.5	21.4	21.7
多重化方式(2)	4.0	4.2	15.4	15.4	20.7	21.0

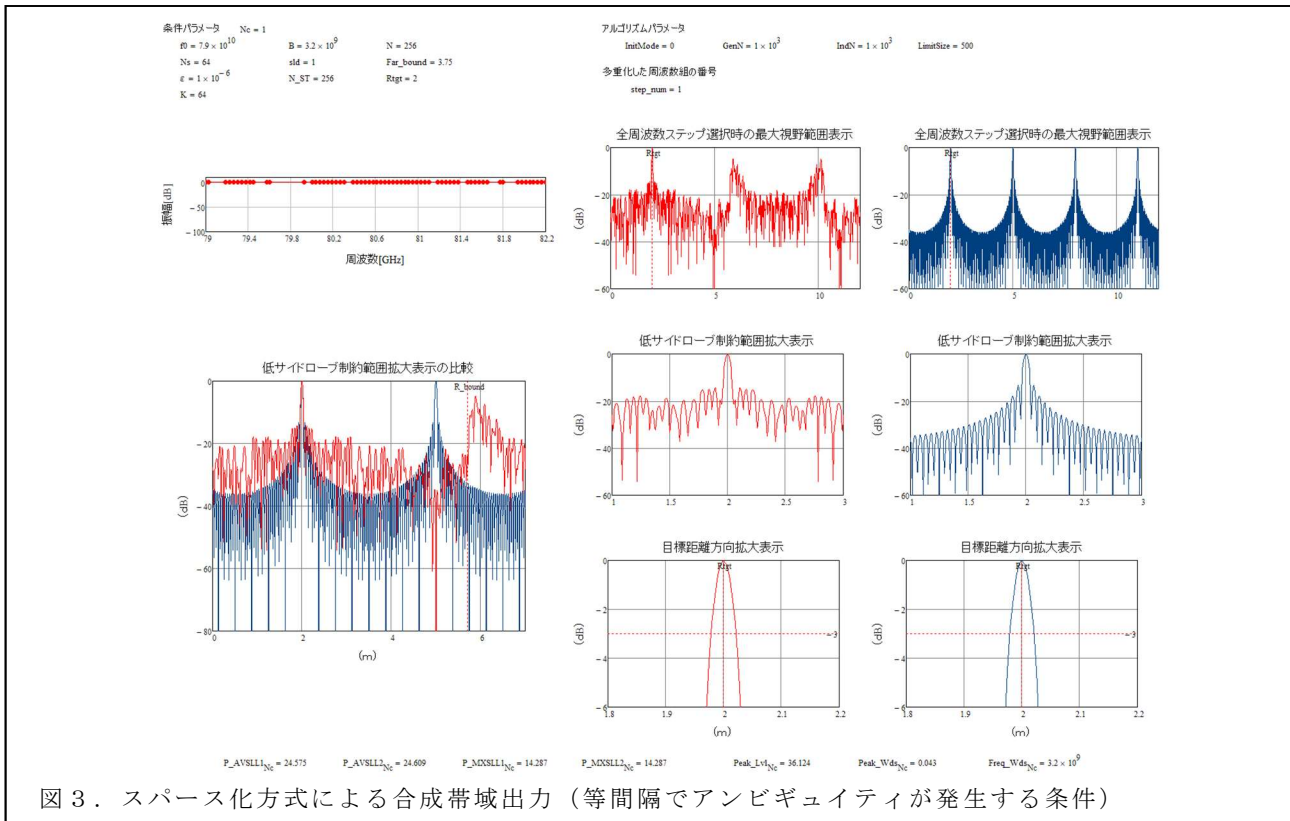


図3. スパース方式による合成帯域出力 (等間隔でアンビギュイティが発生する条件)

振幅 $A=1$ の固定でなく周波数ステップ値とともに振幅ウエイト A を推定する方法に拡張することが考えられる。一方サイドローブを低減するというアプローチではなく、大目標のサイドローブより小さい目標の検出をも可能とする信号減算原理に基づく方法[3]を併用することで多目標検知が実現可能である。また、非同期での周波数ステップ多重化のためには、全帯域をサブ帯域に分けその帯域内ではレーダ1は最小の周波数ステップ間隔を選択可能とし一方で別レーダは最小周波数ステップ幅の3ステップ間隔を専有させ、その中心のみ利用する方法へと探索方法を改善する等の案が考えられ今後の課題とする。

- [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, Mar.2006
- [2] 稲葉, 秋田, “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周波数ステップ設計法”, 信学技報, vol. 118, no. 441, pp. 19-24, Feb.2019
- [3] 稲葉, 渡辺, 秋田, “超広帯域多周波ステップレーダにおける再帰的周波数推定法を用いた自動検知法”, 信学技報, 信学技報, vol. 118, no. 441, SANE2018-114, pp. 25-30, Feb.2019

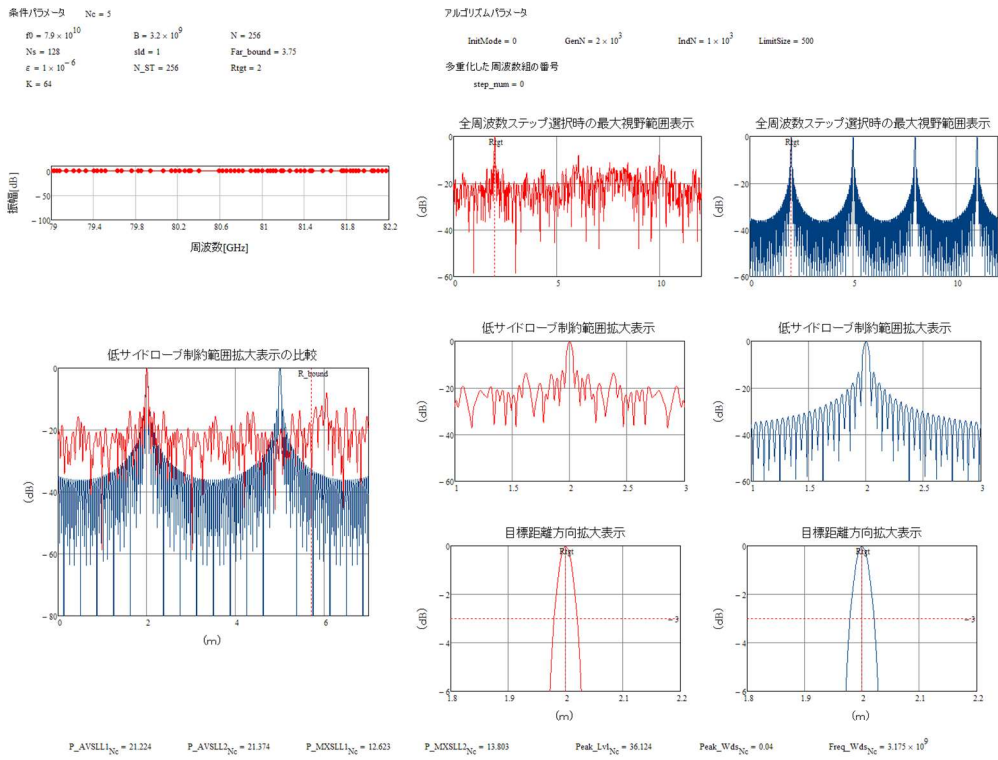


図 4 (1). スパース化による多重化方式(1) による合成帯域出力 (レーダ 1)

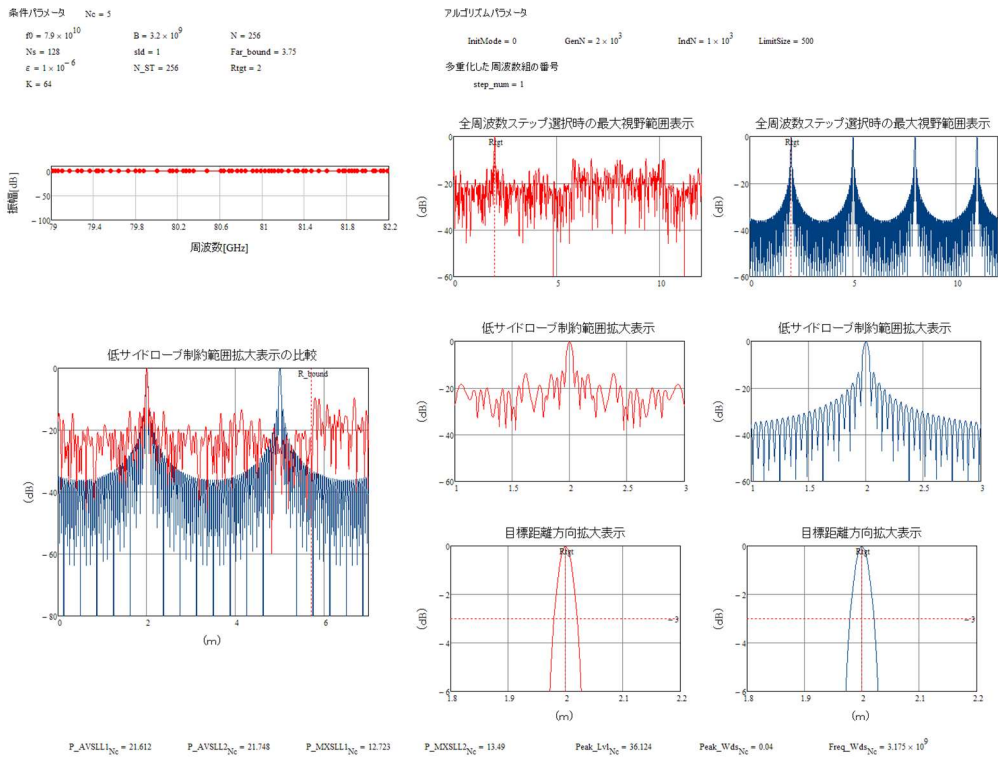


図 4 (2) 図 3. スパース化による多重化方式(1) による合成帯域出力 (レーダ 2)

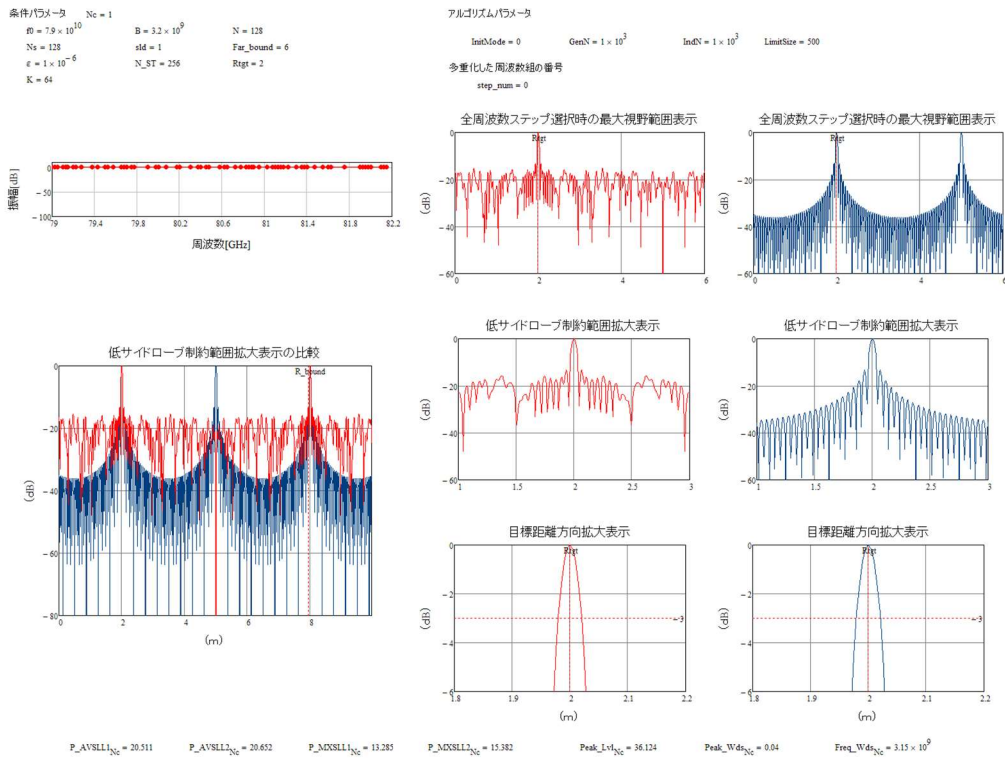


図 5 (1). スパース化による多重化方式(2) による合成帯域出力 (レーダ 1)

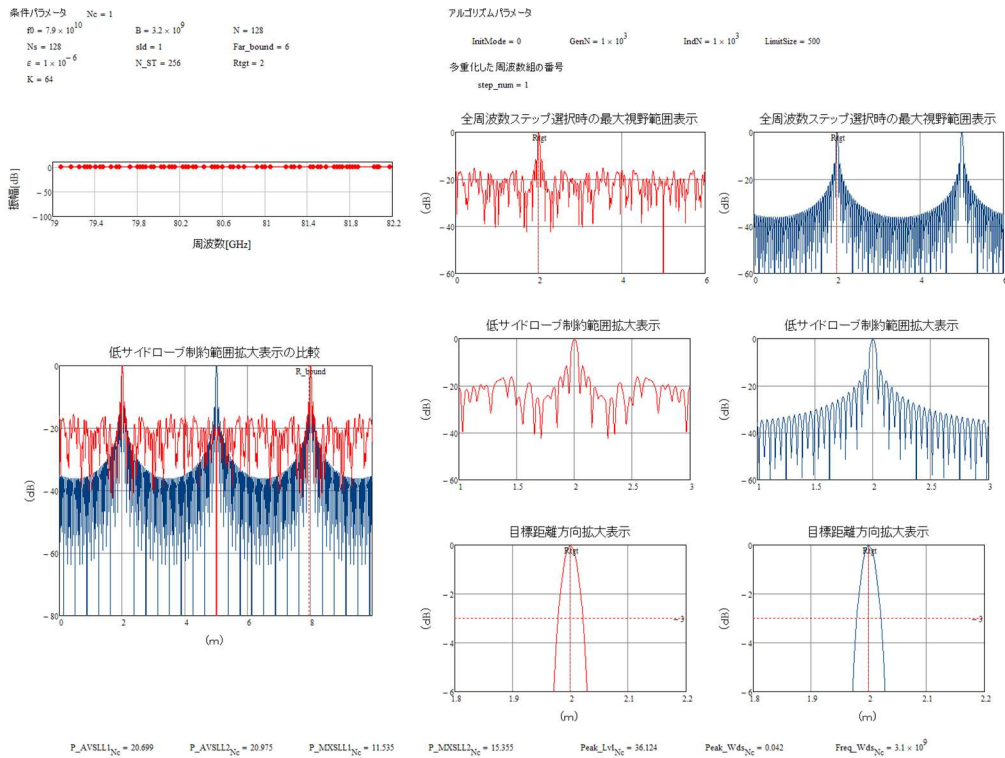


図 5 (2). スパース化による多重化方式(2) による合成帯域出力 (レーダ 2)