

多周波ステップレーダ MIMO ドップライメージングにおける 人工蜂コロニー法を用いたスパース素子配列最適化

谷口 匠[†] 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 筆者らは自動運転用車載レーダ等への適用を想定し、多周波ステップレーダによる前方画像化のための MIMO ドップライメージング法を提案している。当手法は、前方をドップライメージングでゲート化しビームフォーミングの狭ビームにより分解能を改善し、側方はビームフォーミングにて左右ゲート化してドップライメージングで高分解能化するハイブリット方式であり、ドップライメージングにおける前方分解能低下と左右判別不可能という課題を克服することを目的とした方式である。本論文では前方に焦点をあて、ドップライメージングでゲート化することで MIMO ビームフォーミングとしてはゲート外にグレイティングを許容し角度の高分解能化を少ない送受信アレー素子数で実現する MIMO アレー素子配置について検討する。具体的には、人工蜂コロニー法を用いてスパースかつ不等間隔な MIMO アレー素子配列を、素子数、アンビギュイティ範囲、低サイドローブの観点で最適化する手法を提案し計算機シミュレーションによる評価を行う。

キーワード MIMO レーダ, サイドローブ, 人工蜂コロニーアルゴリズム, 多周波ステップ方式

Sparse Element Array Optimization Using Artificial Bee Colony Method in Stepped Multiple Frequency Radar MIMO Doppler Imaging

Takumi TANIGUCHI[†] 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.ucc.ac.jp

Abstract Authors have proposed MIMO Doppler imaging method for forward imaging by Stepped Multiple Frequency Radar assuming the application to automotive radar for the autonomous driving. The method is a hybrid method which improves the angular resolution of forward area by the narrow beam of beam-forming process after the gating process by Doppler imaging and also improves that of side area with Doppler imaging after the gating process by the beam-forming to identify the side where the target exists. The proposed method overcomes not only the deterioration of the resolution of forward area but also the problem that Doppler imaging cannot identify the side of the target. In this article, we focus on the forward area and consider the arrangement of MIMO array elements which realize the high angular resolution with a small number of transmit and receiving array elements by permitting the power of the grating lobe outside of the gate by Doppler imaging. We propose a method which optimizes the arrangement of sparse and unequally-spaced MIMO array elements from the aspect of the number of element, ambiguity bounds, and low side lobe using Artificial Bee Colony (ABC) algorithm. The proposed method is also evaluated by computational simulations.

Keywords MIMO Rader, Side lobe, Artificial Bee Colony Algorithm, Stepped Multiple Frequency

1. まえがき

筆者らは自動運転用車載レーダ等への適用を想定し、多周波ステップ方式レーダを用いた前方画像化ドップライメージングの研究を行っている。多周波ステップ方式は高距離分解能と遠距離性という相反する2つの

性能の両立を実現するもので、実験的にその有効性が示されている[1]。多周波ステップ方式を用いたドップライメージングは、同方式の計測による目標の速度と距離から前方の静止目標位置の二次元画像を生成する手法である。高精度な画像生成のための長時間観測によって生じる観測時間内の目標移動に起因するレンジ

ウォークおよびドップラウォークの補償法が提案されている[2][3]. ドップライメージングには, 静止物の計測速度とレーダ自速の角度関係を用いることにより目標位置の左右判別不可能であること, ドップラ周波数の変化量が小さくなることによる正面の分解能劣化という問題がある. これらの問題に対して SIMO アンテナ構成の2つのレーダを用いて改善を図る手法を提案した[4]. 当手法は, 前方正面をドップライメージングでゲート化しビームフォーミングの狭ビームによりドップライメージングの分解能劣化を改善し, 側方はビームフォーミングによって左右の角度ゲート化しドップライメージングで高分解能化するハイブリット方式である. 側方は, ビームフォーミングでゲート化してドップライメージングで問題となる左右を分離するとともに高分解能を得る. 一方, 前方はドップライメージングでゲート化することで MIMO (あるいは SIMO) ビームフォーミングとしてはゲート外にグレーティングを許容し素子数を増加させることなく角度の高分解能化を図ることが期待される方式である.

本論文では, 人工蜂コロニー法(ABC法)を用いてスパースかつ不等間隔な MIMO アレー素子配列を, 素子数, アンビギュイティ範囲, 低サイドローブの観点で最適化する手法を提案し計算機シミュレーションによる評価を行う.

2. MIMO アレーにおける素子配置最適化

2.1. MIMO アレーの構成

MIMO アレーアンテナでは送信素子を複数設けることで, 得られるビームパターンが送信アレーと受信アレーそれぞれのビームパターンの合成された出力となり, SIMO アレーアンテナと比較して少ない素子数で大きな等価開口を実現することが可能である. 図 1 には送信素子アレーと受信素子アレーを左右に並べる構成の一例として 4 送信素子, 4 受信素子の場合の MIMO アレー配置を示す. また, 筆者らは図 2 に示すように受信アレーを送信アレーで挟む MIMO アレー構成も過去に提案している[5]. 後者の構成では受信アレーを送信アレー幅内に収めることで等価開口を維持しつつ送信アレーと受信アレーを左右に並べる構成と比較して実開口長を小さくすることが可能であるという利点がある. 以下, これら 2 つの構成をもとに, 人工蜂コロニー法を用いてスパースかつ不等間隔な配置の検討を行う.

なお MIMO レーダで必須となる送信多重化法に関しては本論文の検討対象外であるが, 例えば符号化による手法[6][7]や周波数多重化による方法[8][9]を採用することで実現可能である.



図 1 MIMO アレー(Tx-Rx 配置)



図 2 MIMO アレー(Tx-Rx-Tx 配置)

2.2. MIMO アレー素子配置問題への人工蜂コロニー法の適用

ABC アルゴリズムは, 各要素を変数とする任意次元のベクトルを入力にとる評価関数の出力値が小さくなるようなベクトルを探索するアルゴリズムである. MIMO レーダの素子配置最適化に ABC アルゴリズムを用いるために探索ベクトルの要素は各アンテナ素子位置とするが, 分解能を維持するため取りうる最大の開口長となるよう受信と送信各アンテナ素子の両端は固定する. そのため, 総素子数を K とすると探索次元は $K-4$ である. 探索ベクトルを X としたとき以下の式で表される.

$$X = \begin{bmatrix} XT_x \\ XR_x \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

ここで送信アンテナ素子数を N_t とすると XT_x は $N_t - 2$ の要素数の送信アンテナ素子のベクトルであり, 受信アンテナ素子数を N_r とすると XR_x は $N_r - 2$ の要素数の受信アンテナ素子のベクトルである. XT_x と XR_x それぞれに開口の両端に素子を配置するための要素を加えたベクトルをそれぞれ T_x, R_x とする.

また, 送信素子と受信素子が近い位置に置かれハード設計上困難な素子配置とならないよう図 3 に示すように送信アンテナ素子の探索範囲を最大の開口長から受信アレー開口長と送受アンテナ素子の最小素子間隔分を除いた範囲に制限する.

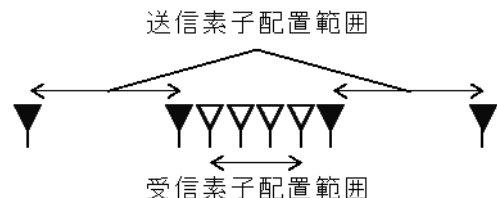


図 3 ABC 法による各素子の探索範囲

素子配置最適化のための評価関数は T_x, R_x を入力ベクトルとしてとり, 評価範囲内のサイドローブ値を出

力とし以下の式のように表される。

$$F(Tx, Rx, x) = \frac{1}{Nt \cdot Nr} \sum_{nt=0}^{Nt-1} \sum_{nr=0}^{Nr-1} e^{j2\pi \cdot x \cdot (Tx_{nt} + Rx_{nr})} \quad (2.2)$$

$$F_eval(Tx, Rx) = \sum_{k=ks}^{ke} |F(Tx, Rx, x_k) - \epsilon|^2 \quad (2.3)$$

ここで ϵ はサイドローブ制約係数であり、 x が角度を表すベクトルである。 x_{ks} はサイドローブ抑圧評価範囲の開始角度を表しメインビームを評価対象範囲から除くために必要となる。 x_{ke} はサイドローブ抑圧評価範囲の終了角度を表し、所望するサイドローブ抑圧必要角度により決定される。

式(2.3)の評価関数を用いて探索を行うことで所望する角度範囲内のサイドローブが抑圧されるような素子配置の探索を行うことが可能となる。

3. 計算機シミュレーション

ドップライメーキングでの適用を想定し正面に生じる角度ゲートにより必要な角度視野が限定されることを考慮し、ABC法による素子配置最適化において低サイドローブ要求範囲がドップライメーキングのゲート範囲に対応させることとする。計算機シミュレーションでは同素子数、同等価開口長の等間隔SIMOアレー素子配置を比較対象とする。シミュレーション条件を表1に示し、それぞれのビームフォーミング出力結果を図4、図5、図6、図7、図8に、各条件の数値結果を表2に示す。ここでそれぞれの結果図に関して、中央列はABCによる探索結果であるMIMOアレーのビームパターン結果、右端列が比較対象である同素子数、同等価開口長のSIMOアレーのビームパターン結果である。それぞれ1段目にSIMOアレーの角度視野範囲、2段目にサイドローブ抑圧要求範囲、3段目がメインビーム付近範囲の表示とした。左端列の上段には各送信素子の等価開口長を示し、2段目3段目には送信素子アレー、受信素子アレーそれぞれが最大開口長を1とした場合の各素子位置を示す。4段目には実際のアレーアンテナにおける素子配置構成を示す。5段目がSIMOアレーとMIMOアレーのビームパターンにおけるサイドローブ比較図とである。また、シミュレーション条件に関して、送信素子が2つの場合は分解能維持のため開口の両端の素子は固定としているため、ABC法による素子配置の探索は受信素子のみを対象とした。

結果から、どの条件においても所望角度視野範囲外の電力を高くする代わりに範囲内のサイドローブを抑圧するような素子配置を選ぶことができていると考え

られる。

4. むすび

本研究では、ドップライメーキングによって正面が角度ゲート化されるという点に着目し、必要な角度視野が制限される範囲内のサイドローブを下げるために人工蜂コロニー法を用いたスパースMIMOアレー素子配置最適化の基礎検討を行った。等間隔SIMOと比較して角度分解能を維持し、素子数を低減しつつサイドローブが抑圧される効果が確認された。

今後は素子配置に加え振幅ウェイトもABCアルゴリズムの探索対象とすることでさらなるサイドローブ抑圧を図る予定である。また、ドップライメーキングへの適用に向け実際に所望される角度視野等のパラメータに関して検討を行っていく予定である。

参考文献

- [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, no.3, pp.285-291, 2015.
- [2] 渡辺一宏, 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, “多周波ステップCPC方式におけるドップライメーキングの高精度化の検討”, 信学技報SANE2016-17, vol.116, no.115, pp.37-42, 2016
- [3] 渡辺一宏, 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, “多周波ステップCPC方式におけるドップライメーキングの任意時刻合焦と高速化の検討”, 信学技報, vol.116, no.469, pp.1-6, 2017
- [4] 谷口匠, 稲葉敬之, 渡辺一宏, 秋田学, “前方監視のための多周波ステップCPC-SIMOドップライメーキング法の基礎検討”, 信学技報SANE2018-116, vol.118, no.441, pp.37-42, 2019/02
- [5] 稲葉敬之, 荒木純道, “サーキュレータとスイッチを組み合わせた合成開口レーダアンテナ構成法”, 電子情報通信学会誌B, Vol.186-B, no.11, pp.2423-2427, Nov.2003.
- [6] 秋田学, 渡辺優人, 稲葉敬之, “完全相補符号を用いたMIMO多周波ステップCPCレーダの検討”, 2016年電子情報通信学会総合大会, B-2-37, 2016-03.
- [7] 芝隆司, 渡辺優人, 石井雅博, 秋田学, 稲葉敬之, “PC-HPRF方式レーダのアンテナ信号に対する完全周期符号を用いた符号多重化方式”, 信学技報SANE2015-91, vol.115, no.403, pp.53-58, 2016
- [8] 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, 2019-02
- [9] 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”, 電子情報通信学会WBS研究会, 2019-05 (発表予定)

表 1 シミュレーション条件

	目標角度 [deg]	送信素子数	受信素子数	総素子数	所望角度視野 範囲 [deg]	等間隔配置時の 受信素子間隔	等間隔配置時 の角度視野 [deg]
条件 1 (図 4)	0	2	8	10	30	2λ	30
条件 2 (図 5)	0	2	16	18	30	2λ	30
条件 3 (図 6)	0	2	32	34	30	2λ	30
条件 4 (図 7)	0	4	8	12	30	2λ	30
条件 5 (図 8)	0	4	16	20	30	2λ	30

表 2 数値結果

	メインビーム幅 [deg]	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]
条件 1 (図 4)	1.46	-11.9	-19.5
条件 2 (図 5)	0.76	-17.2	-25.0
条件 3 (図 6)	0.39	-17.0	-27.4
条件 4 (図 7)	0.75	-13.0	-22.2
条件 5 (図 8)	0.39	-16.3	-26.4

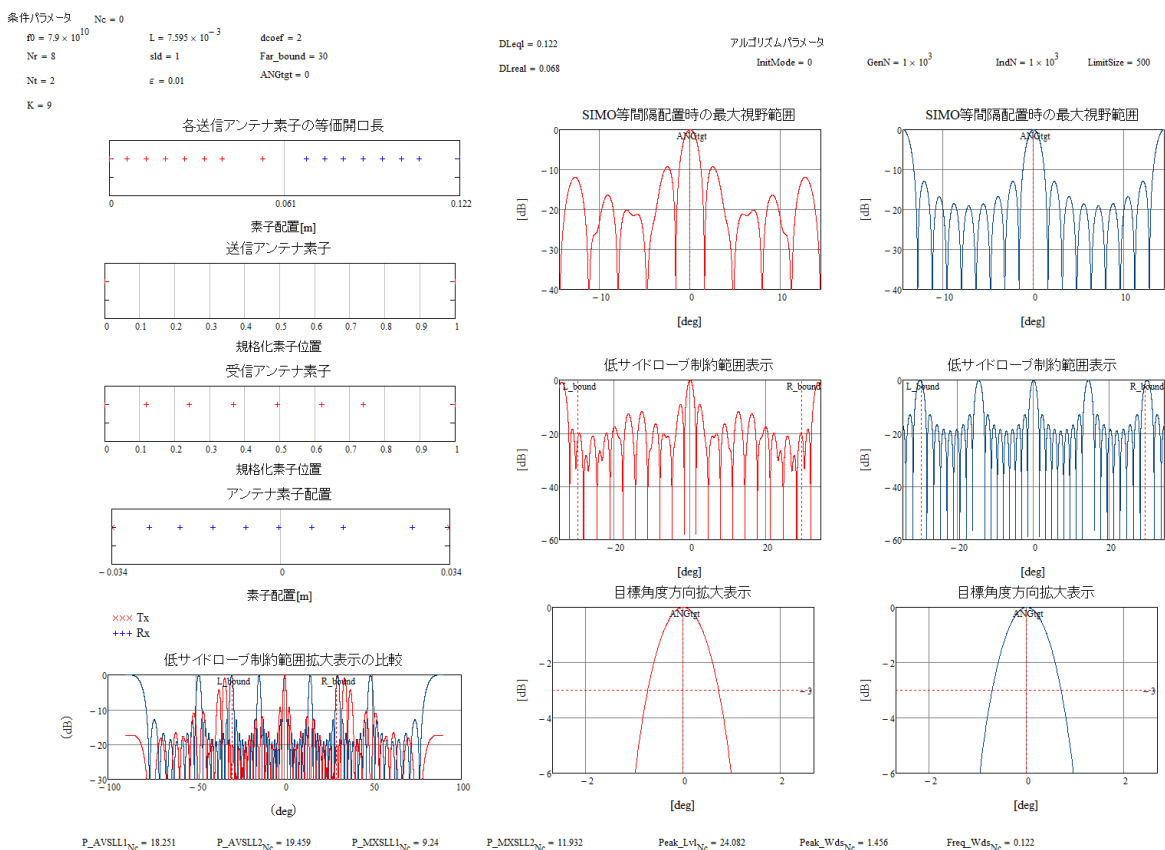


図 4 MIMO アレー素子配置最適化の結果 (条件 1)

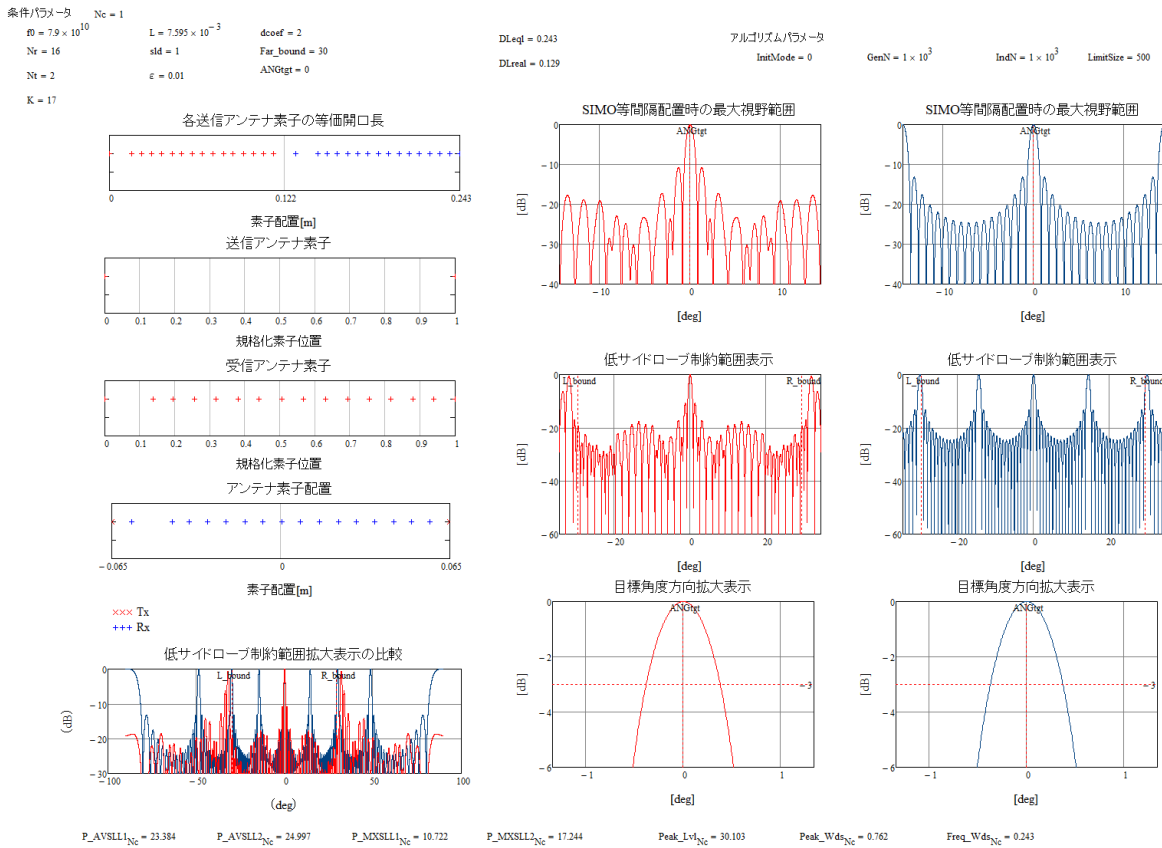


図 5 MIMO アレー素子配置最適化の結果 (条件 2)

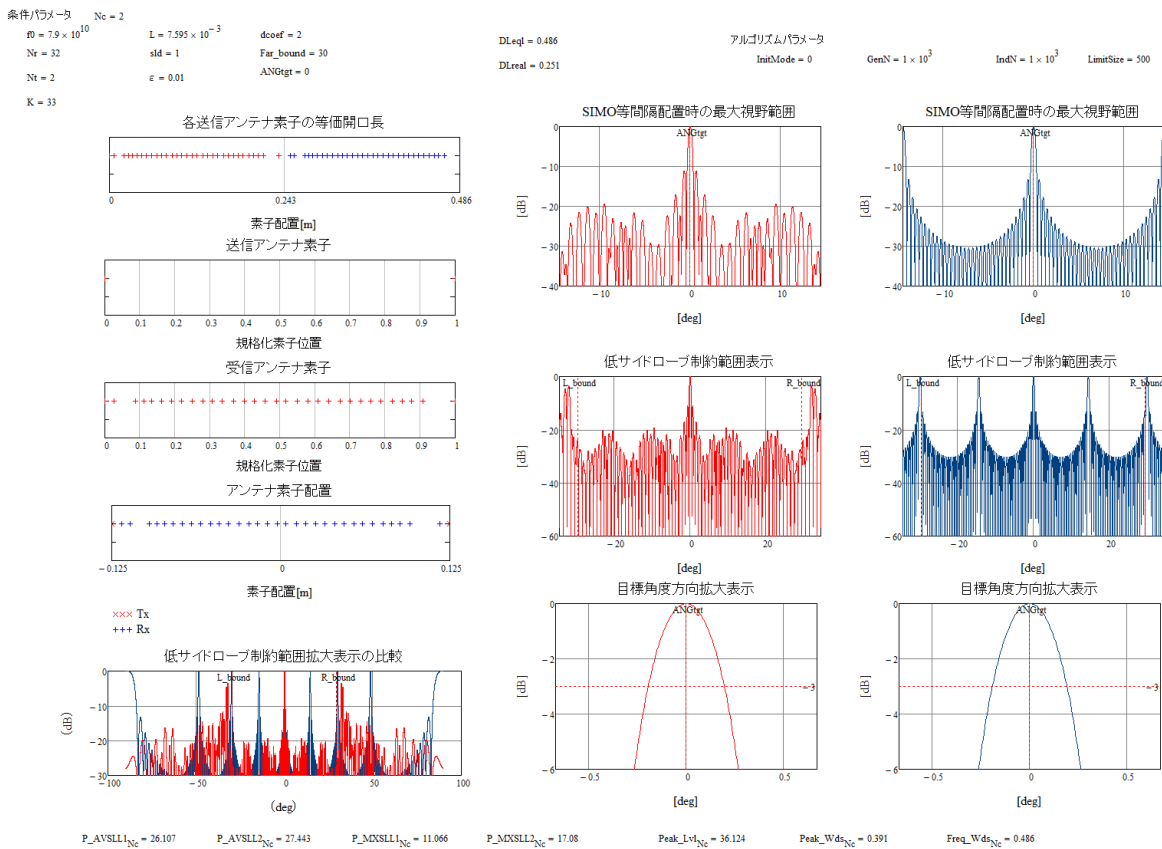


図 6 MIMO アレー素子配置最適化の結果 (条件 3)

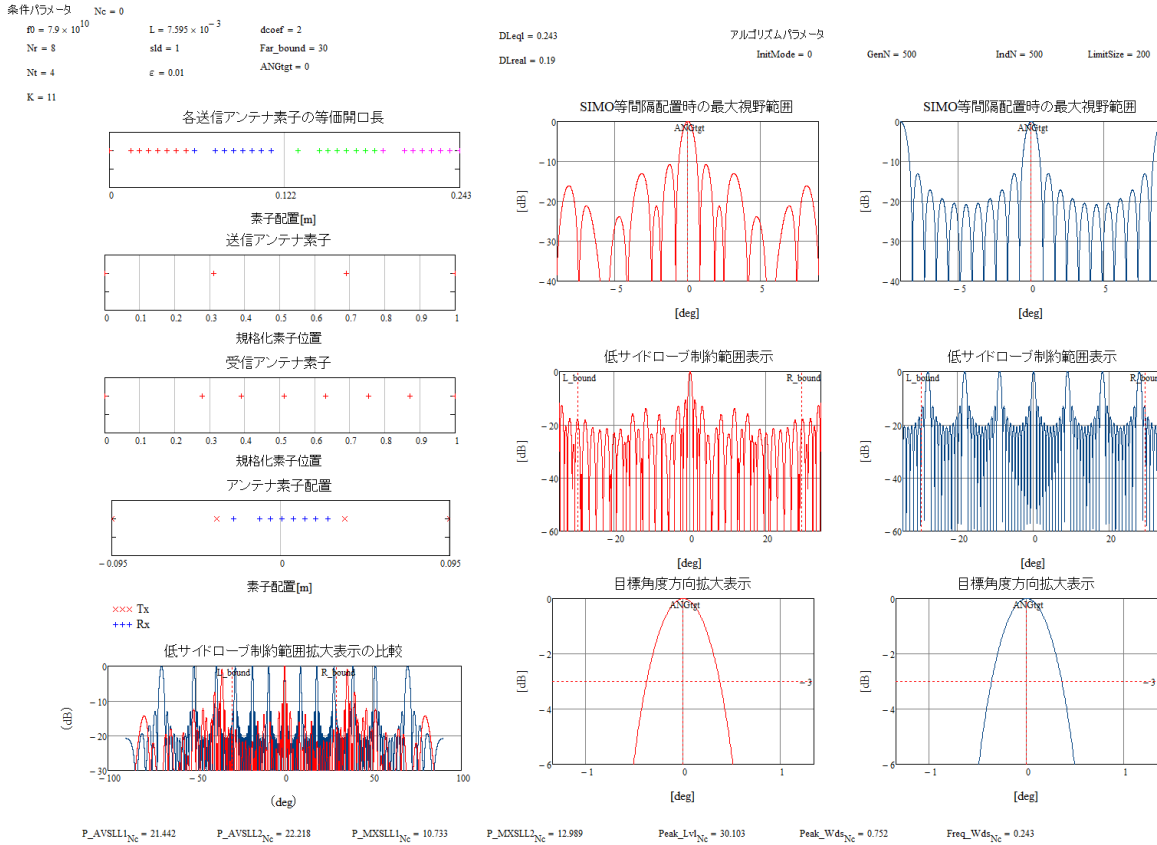


図 7 MIMO アレー素子配置最適化の結果 (条件 4)

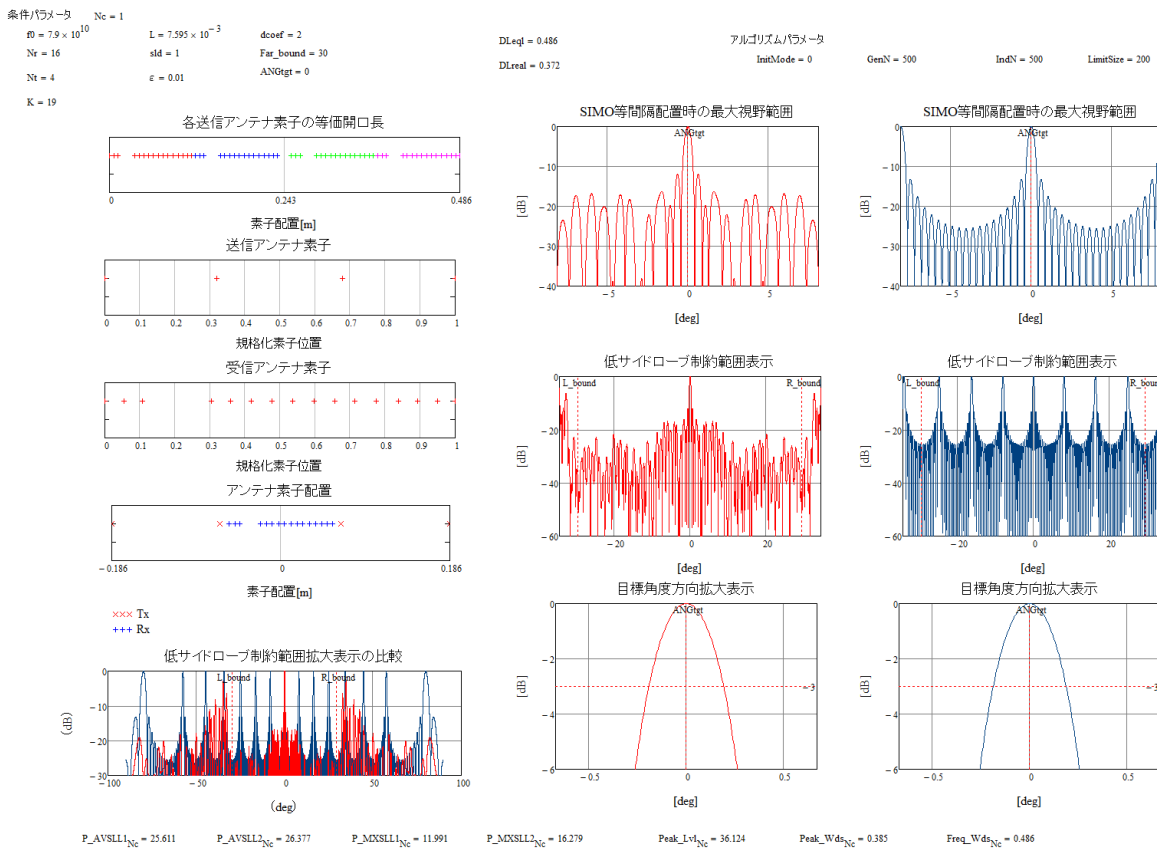


図 8 MIMO アレー素子配置最適化の結果 (条件 5)