

一种高增益24 GHz车载天线

尤征伟, 徐光辉, 朱浩然, 黄志祥, 吴先良

安徽大学信息材料与智能感知安徽省实验室, 安徽 合肥

收稿日期: 2023年2月27日; 录用日期: 2023年3月24日; 发布日期: 2023年3月31日

摘要

微带栅格阵列天线以其结构简单, 成本低, 增益高, 剖面低等优势得到了广泛应用, 微带梳状阵列是根据微带栅格阵列天线的传输特性改进而成, 将用于传输电场的长边去掉, 而不改变微带栅格阵列天线的功能。本文提出了一种基于印刷电路板工艺的24 GHz车载天线, 具有高增益, 低副瓣和窄波束的特性。首先设计了一个微带梳状线阵天线子阵, 然后并排组成10个子阵组成天线阵列。采用切比雪夫分布对各子天线单元进行非均匀激励, 以设计低旁瓣电平。最后, 天线阵的实增益可达到28.8 dBi, 在中心频率24.125 GHz附近, E面和H面的副瓣电平均低于-15 dB。

关键词

梳状阵列, 高增益, 低副瓣, 车载天线

A High Gain 24 GHz Vehicle Antenna

Zhengwei You, Guanghui Xu, Haoran Zhu, Zhixiang Huang, Xianliang Wu

Information Materials and Intelligent Sensing Laboratory of Anhui Province, Anhui University, Hefei Anhui

Received: Feb. 27th, 2023; accepted: Mar. 24th, 2023; published: Mar. 31st, 2023

Abstract

Microstrip grid array antenna has been widely used because of its simple structure, low cost, high gain, low profile and other advantages. Microstrip comb array is improved according to the transmission characteristics of microstrip grid array antenna, which removes the transmission long side without changing its function. In this paper, a 24 GHz vehicle mounted antenna based on PCB technology is proposed, which has the advantages of high gain, low sidelobe and narrow beam. Firstly, a microstrip comb antenna subarray is designed, and then 10 subarrays are used to form an antenna array. Chebyshev distribution is used to excite each subarray to obtain the low sidelobe level. Finally, the realized gain of the antenna array can reach 28.8 dBi. At the center frequency of 24.125 GHz, the measured sidelobe levels in the E-plane and H-plane are less than -15 dB.

Keywords

Comb Array, High Gain, Low Sidelobe, Vehicle Mounted Antenna

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

微带阵列天线的出现顺应了现代雷达系统向低成本、轻量化、小型化、多功能方向发展和高可靠性的趋势。随着 5G 和无人驾驶技术的发展，车载天线进入了高速发展时期，为了保证行车的安全，高增益高性能的车载天线也变得必不可少。设计用于车载雷达的天线结构应该尽可能紧凑，以方便集成到车辆，它必须适合大规模生产，以尽量降低单位生产成本。在性能方面，最好保持较低的副瓣电平，以避免误检。所有这些要求都对汽车雷达天线的设计提出了挑战。

文献[1] [2]提出了一种 24 GHz 车载微带梳状阵列天线，两者都具有良好的副瓣抑制，但天线增益较低，只有 12.2 dBi 和 19.85d Bi 的增益。一种 33 阵元的新型栅格阵列天线[3]，改变短边的形状将-10 dB 阻抗带宽提升到了 25%，E 面 3 dB 波束宽度为 7°，副瓣电平为 16 dB，增益仅有 13.87 dBi。一种应用于 24 GHz 车载雷达的宽波束高增益阵列天线[4]，该天线采用带有寄生环的辐射贴片，通过寄生环的辐射增加 E 面的波束宽度，水平极化八元天线阵列，-10 dB 阻抗带宽为 13%，E 面 3 dB 波束宽度为 130°，H 面 3 dB 波束宽度 12°，中心频率增益 12.2 dBi。文献[5] [6]设计的是两款 24 GHz 车载雷达天线，E 面和 H 面的副瓣电平均低于-20 dB，增益分别达到 21.7 dB 和 21 dB。

本文设计了一种高增益 24 GHz 车载天线，首先对天线单元进行了设计，通过仿真设计了并馈网络，并组成了阵列，最后进行了实物加工测试，并对比了实测与仿真的结果。

2. 微带梳状线阵设计

2.1. 微带梳状线阵结构

图 1 为具有 9 个微带枝节的梳状阵列天线的电流分布图，采用驻波串联馈电，其电流沿着长边进行传输，长边电流流向相反，短边电流用于辐射电磁波，因此可以将栅格阵列天线简化为梳状阵列天线，这样虽然改变了天线的结构但不会对其辐射特性产生影响，且避免了微带阵列单元之间的耦合，应用于车载天线上稳定性更好。

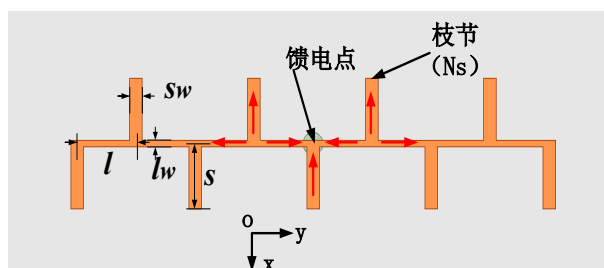


Figure 1. Microstrip comb array antenna structure

图 1. 微带梳状阵列天线结构图

微带梳状阵列天线的基本辐射单元是微带开路枝节，表 1 给出了微带梳状阵列天线的枝节和长边的尺寸。

Table 1. Microstrip comb antenna array parameters
表 1. 微带梳状天线阵列参数

参数	数值(mm)	参数	数值(mm)
l	9.5	sw	l
s	9.4	lw	0.5

2.2. 微带枝节对线阵 H 面波束的影响

描述天线性能的参数之一是波束宽度。波瓣宽度越窄，方向性越好，作用距离越远，抗干扰能力越强。如图 2 所示，随着枝节(N_s)的增多，不影响 E 面 3 dB 波束宽度，但 H 面 3 dB 波束宽度越小，其增益增加明显，但当阵列单元过多时，增益变化也会不明显。当 $N_s = 33, 65, 97$ 时，其 H 面 3 dB 波束宽度分别为 $4.3^\circ, 2.6^\circ, 0.7^\circ$ 。随着枝节的增多，所用基板也越来越大，本次研究以高增益为核心，但也要考虑到车载天线的加工成本和安装问题，所以此次选用的是 $N_s = 65$ ，其 3 dB 波束宽度小于 3° ，且 24.125 GHz 时增益也可以达到 22.5 dBi。

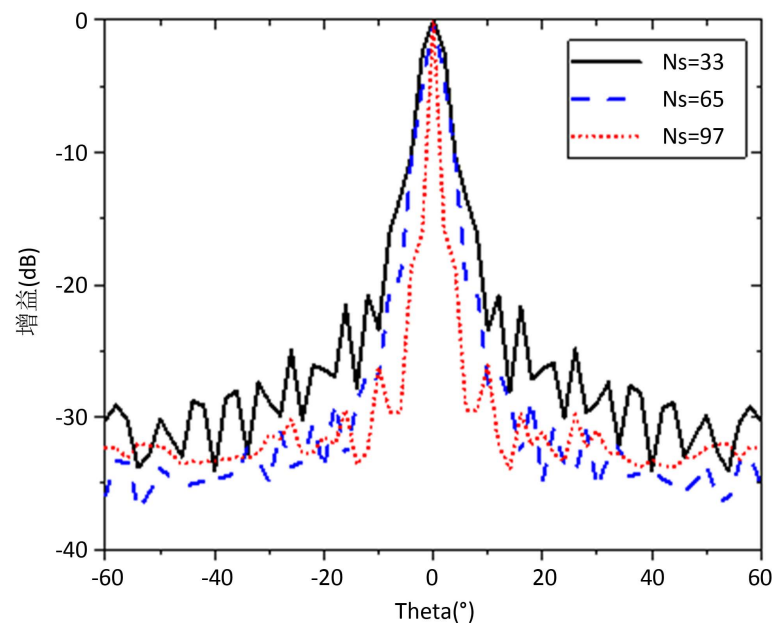


Figure 2. H-plane normalized pattern of antenna array unit at 24.125 GHz
图 2. 天线阵单元在 24.125 GHz 时 H 面归一化方向图

3. 微带梳状天线阵列设计

3.1. 阵列结构

阵列如图 3 所示，将阵列单元沿着 xoy 面进行等间距组阵，阵列越多其在 E 面的 3 dB 波束宽度越窄，综合考虑选用 10 单元组成阵列，采用基板为介电常数 $\epsilon_r = 2.2$ ，损耗正切 $\tan\delta = 0.0009$ ，基板厚度 $h_1 = 0.787$ mm 的 Rogress5880，其板材的长 $G_y = 320$ mm， $G_x = 135$ mm。考虑子阵间距设定为 $0.96 \lambda_0$ (24.125 GHz 对应波长)。在每个阵列单元中心进行馈电，考虑到测试弯折问题，所以将其固定在铝板上，其基板周围

的孔径是固定尼龙螺丝的孔。

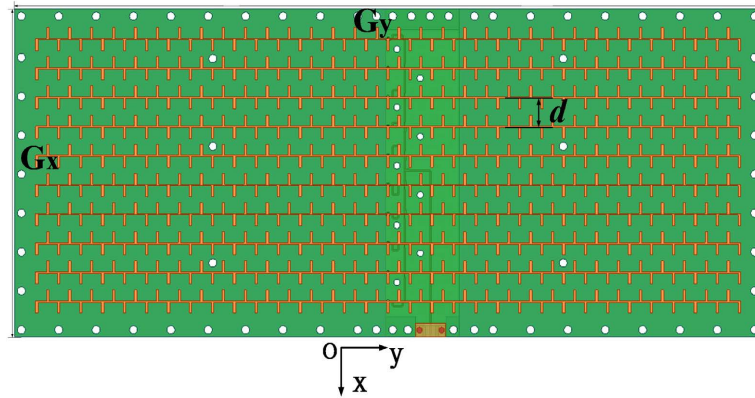


Figure 3. Top view of microstrip comb antenna array
图 3. 微带梳状天线阵列顶视图

3.2. 馈电网络设计

该馈电网络基板采用的是介电常数 $\epsilon_r = 3.66$, 损耗正切 $\tan\delta = 0.004$, 基板厚度 $h_2 = 0.254$ mm 的 Rogers RO4350b。电流幅度分布的形式有很多, 最常用的是切比雪夫分布, 由于切比雪夫分布能够实现波束的等副瓣分布, 从而实现天线阵 E 面的低副瓣电平。

m 阶切比雪夫多项式 T_m 是如下二阶微分方程的解:

$$(1-x^2)\frac{d^2T_m(x)}{dx^2} - x\frac{dT_m(x)}{dx} + m^2T_m(x) = 0 \quad (1)$$

当 $|x| \leq 1$ 时, $T_m(x) = \cos(m \cos^{-1} x)$, 当 $|x| \geq 1$ 时, $T_m(x) = ch(mch^{-1}x)$ 。

阵列的馈电网络如图 4 所示。采用一分十切比雪夫功分器给每个阵元并行馈电, 实现对每个阵元同相切比雪夫馈电, 且使得副瓣电平小于 -20 dB。根据公式(1)和 MATLAB 计算可以得出该天线阵的归一化电流幅度比为 $I_1:I_2:I_3:I_4:I_5:I_6:I_7:I_8:I_9:I_{10} = 0.3950:0.5056:0.7214:0.8993:1:1:0.8993:0.7214:0.5056:0.3950$, 一端口用 50Ω 激励馈电, 用四分之一阻抗变换器进行各枝节的阻抗匹配以满足功分比和十个枝节末端端口的阻抗为 50Ω , 因其功分比是对称的, 所以只需要设计一侧的枝节满足功分比即可。使用 ADS 和 ANSYS HFSS 进行优化设计后一侧的枝节微带线宽度参数如表 2 所示, 激励幅度如图 5 所示, 满足比例要求。

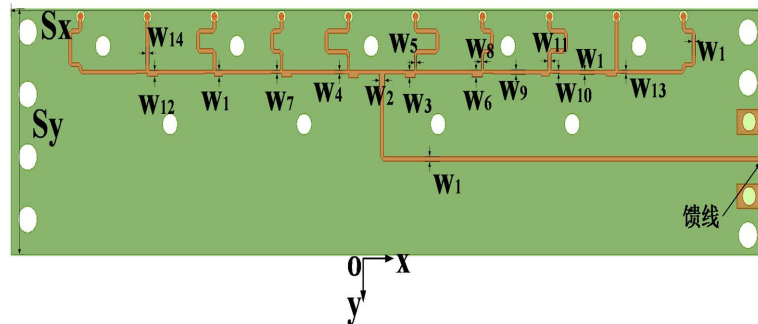


Figure 4. Feed network
图 4. 馈电网络

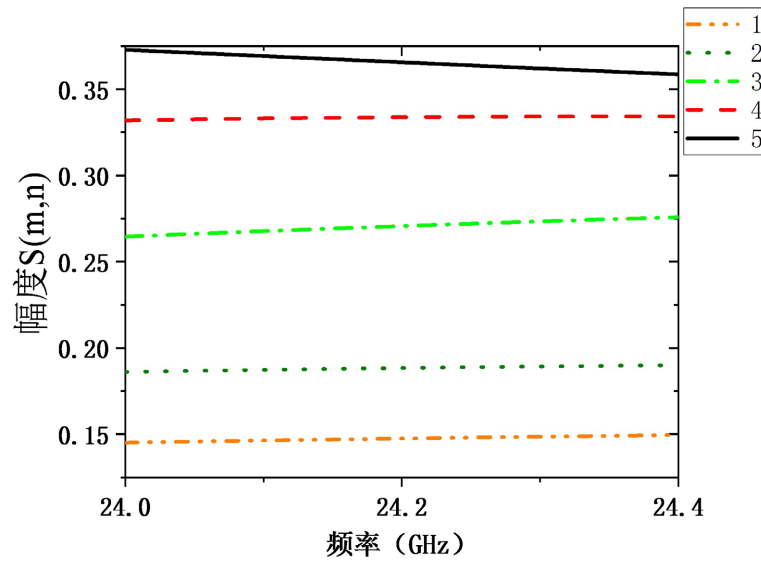


Figure 5. Excitation amplitude
图 5. 激励幅度

Table 2. Parameter values of feed network
表 2. 馈电网络各参数值

参数	数值(mm)	阻抗值(Ω)	参数	数值(mm)	阻抗值(Ω)
W_1	0.53	50.00	W_{10}	0.40	59.53
W_2	0.91	35.60	W_{11}	0.58	47.97
W_3	0.95	34.57	W_{12}	0.74	41.03
W_4	0.45	55.76	W_{13}	0.39	60.35
W_5	0.26	73.85	W_{14}	0.61	46.48
W_6	0.87	36.77	S_y	31.5	--
W_7	0.43	57.20	S_x	130	--
W_8	0.41	58.73	d_1	2.7	--
W_9	0.74	41.03	d_2	3.4	--

4. 实物加工测试

将馈电网络放置于天线阵的底部，通过金属通孔对上层天线阵辐射体进行馈电，图 6 分别为天线阵正面和天线阵背面实物图，图 7 为天线在暗室实测图。

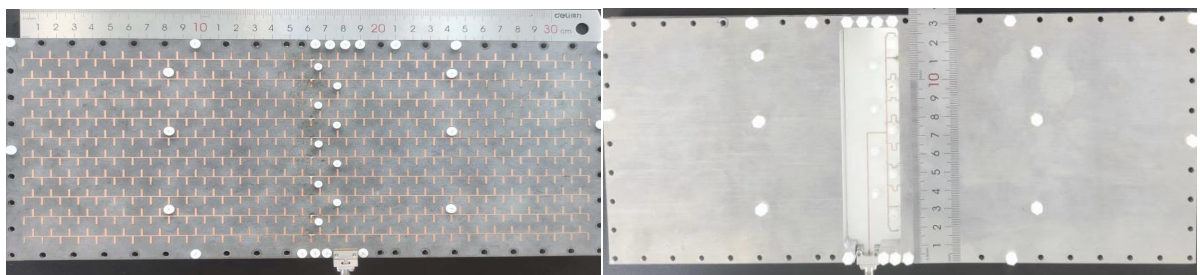


Figure 6. Photographs of proposed antenna
图 6. 所提出的天线实物图

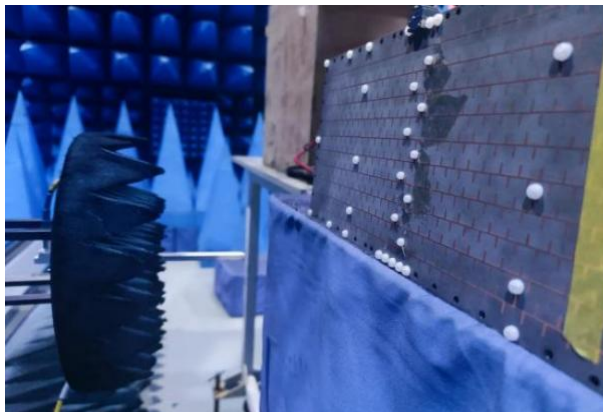


Figure 7. Measure of antenna in darkroom

图 7. 天线在暗室的测试

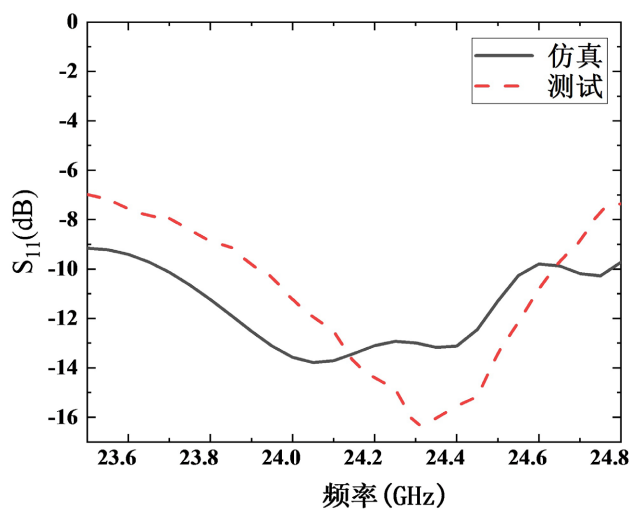


Figure 8. Simulated and measured of S parameter

图 8. S 参数仿真与测试

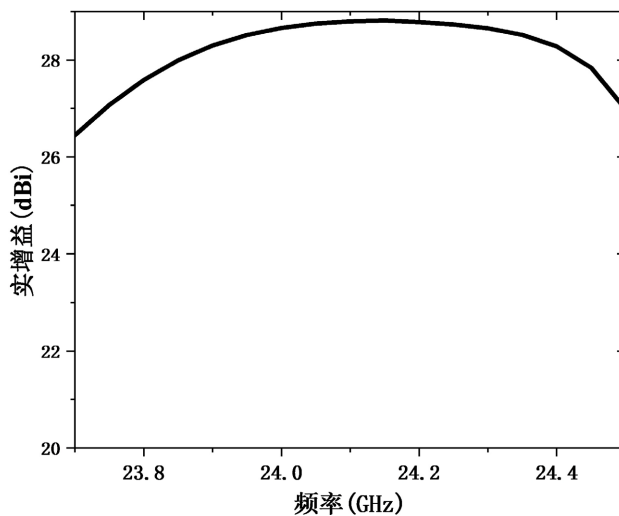


Figure 9. The simulated realized gain of antenna array

图 9. 天线阵实增益示意图

图 8 为在实验室使用矢量网络分析仪对该天线的测试,可知,该天线的仿真-10 dB 阻抗带宽为 3.73% (23.70~24.60 GHz),测试的-10 dB 阻抗带宽为 3.1% (23.90~24.65 GHz),所测试的天线阻抗带宽比仿真小,可能是在毫米波频段,加工的精度与焊接问题,但还是满足天线的工作频段。

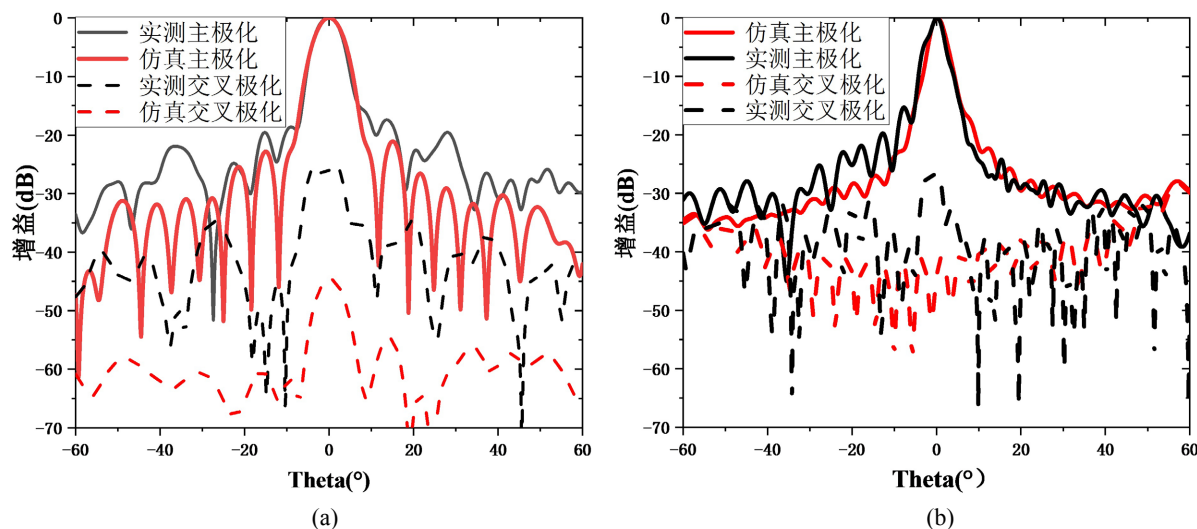


Figure 10. Simulated and measured normalized gain pattern of antenna array at 24.1 GHz E-plane (a) and H-plane (b)

图 10. 天线阵在 24.1 GHz 时的仿真与测试增益方向图 E 面(a)和 H 面(b)

从仿真的结果可以看出,各单元间实现了阻抗的良好匹配,该天线阵的实增益达到了 28.8 dBi,如图 9 所示。E 面的 3 dB 波束宽度为 6.1°,H 面的 3 dB 波束宽度为 3.3°,E 面和 H 面的副瓣电平平均低于-20 dB,很好的实现了高增益,低副瓣与窄波束的特性,对比测试结果可见 E 面方向图副瓣低于-18 dB,H 面方向图副瓣低于-15 dB,实测的交叉极化低于-25 dB,如图 10 所示,与仿真的结果有些差别但还是可以满足需求,此结果是由于焊接引起的误差。

5. 总结

本文设计了一款高增益 24 GHz 车载雷达阵列天线,仿真结果表明该阵列天线具有高增益、低副瓣、窄波束等优点,在仿真优化的基础上,对天线进行了加工与测试。将馈电网络与天线阵列通过底部中心馈电有效地减小了天线的尺寸。这种结构简单、性能优越的微带梳状天线阵能有效满足 24 GHz 车载雷达天线的要求,在该领域有着广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Qian, J.W., Zhu, H.R., Tang, M. and Mao, J.F. (2021) A 24 GHz Microstrip Comb Array Antenna with High Sidelobe Suppression for Radar Sensor. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **20**, 1220-1224. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2021.3075887>
- [2] Zhang, L., Zhang, W. and Zhang, Y.P. (2011) Microstrip Grid and Comb Array Antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **59**, 4077-4084. <https://doi.org/10.1109/TAP.2011.2164216>
- [3] Alsath, M.G.N., Lawrance, L. and Kanagasabai, M. (2015) Bandwidth-Enhanced Grid Array Antenna for UWB Automotive Radar Sensors. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **63**, 5215-5219. <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2478143>
- [4] Yu, C., et al. (2019) 24 GHz Horizontally Polarized Automotive Antenna Arrays with Wide Fan Beam and High Gain. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **67**, 892-904. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2880099>
- [5] 郝宏刚, 周小川. 一种新型混合馈电 24 GHz 车载雷达阵列天线设计[J]. 微波学报, 2018, 34(3): 48-51.
- [6] 王绍龙, 王伟, 何小祥, 刘冰. 24 GHz 小型化低副瓣微带天线阵设计[J]. 微波学报, 2014, 30(S1): 302-304.