

## W 波段 45°线极化天线阵设计

金 良<sup>1</sup>,葛俊祥<sup>1,2</sup>,汪 洁<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学电子与信息工程学院,江苏南京 210044;2. 南京信息工程大学雷达技术研究所,江苏南京 210044)

**摘 要:** 提出了一种带反射相消单元的 W 波段 45 度线极化微带贴片天线阵列. 单列串馈天线阵采用泰勒加权结合反射相消单元实现了 25dB 的旁瓣抑制,通过添加贴边矩形槽改善了主瓣内的交叉极化. 一阶十路功分器通过 T 型结取代一般的四分之一波长匹配段实现 4.5 倍的不等功分比. 仿真与实测结果表明:组阵后的天线工作在 75.7GHz ~ 77.6GHz,水平和垂直方位 3dB 波束宽度可覆盖正负 45 度,该宽度内交叉极化比均高于 18dB. 天线增益达 24dB,旁瓣抑制制度达 20dB. 该天线形式可用于汽车防撞雷达并提高其抗干扰能力.

**关键词:** W 波段; 45°线极化; 泰勒加权; 交叉极化; 汽车防撞雷达

**中图分类号:** TN821 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)06-1378-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.06.027

## Design of 45-Degree Linearly Polarized Antenna Array at W Band

JIN Liang<sup>1</sup>, GE Jun-xiang<sup>1,2</sup>, WANG Jie<sup>1</sup>

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;  
2. Institute of Radar Technology of Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China)

**Abstract:** A 45-degree linearly polarized microstrip antenna array with reflection-canceling unit is proposed at W band. The single-row series-fed antenna array with sidelobe suppression of 25dB is designed by the Taylor-weighted, combined with reflection-canceling unit. Meanwhile the cross polarization is improved in the main lobe by adding the rectangular welt groove. The power divider with first order and ten ways replaces quarter wavelength transmission lines with the T-shaped structure junction, which achieves the power division ratio of 4.5 times. The simulation and measure results show that the antenna works from 75.7GHz to 77.6GHz by arraying. The horizontal and vertical azimuth for 3dB beam width can cover from -5 degrees to 5 degrees, where the cross polarization ratio is all higher 18dB. The gain of the antenna is 24dB and the sidelobe suppression is up to 20dB. The antenna can be used in the vehicle anti-collision radar and further improve whose anti-jamming capability.

**Key words:** w band; 45-degree linearly polarized; taylor-weighted; cross polarization; vehicle anti-collision radar

### 1 引言

毫米波汽车防撞雷达作为一种预防交通事故、保护人身安全的设备,已受国内外汽车厂商和科研院所的关注. 其中,77GHz 雷达设备体积小、质量轻、环境适应性好,能够同时做到长短距离探测和高空间分辨率,这些优势将使其成为未来汽车防撞雷达的主流<sup>[1]</sup>. 在汽车防撞雷达系统中,天线需要满足高增益、低损耗、小型化、加工工艺要求低、易与平面电路集成等要求,这对天线的设计提出了挑战<sup>[2]</sup>. 国内外对 77GHz 频段天线的研究主要集中于垂直极化形式,文献[3]提出了一种

微带富兰克林天线阵列(MFAA),通过简单的直线结构实现各单元辐射的同相位,该天线结构新颖、增益高,但带宽窄,旁瓣抑制制度仅有 10dB. 文献[4]通过改变阵列天线上介质透镜的位置来实现天线波束的扫描,介质透镜往往增加了系统的高度,而且很难实现天线波束远近距离的切换. 文献[5]为常规的微带串馈梳状垂直极化阵,不等宽阵元较等宽阵元可以获得更好的旁瓣抑制效果. 串馈线阵结合数字波束成形(DBF)技术可实现多波束扫描和低旁瓣,但对后端信号处理提出了更高的要求<sup>[6]</sup>. 文献[7]中提出了一种 45°极化的串馈行波微带天线阵列,其天线单元结构较复杂、线阵增益

低、不利于组成大规模面阵。

采用垂直极化会带来设备之间的干扰,45°线极化可使相向而行的车辆的极化方式正交,减小设备天线间的耦合.由于毫米波天线尺寸较小,大规模的阵列馈电网络带来损耗的同时易出现强耦合的现象,不易扩展为大型阵列.本文提出了一种 W 波段具有 45°线极化的 77GHz 串馈驻波梳状微带贴片面阵,采用  $10 \times 10$  结构,通过一阶十路不等功分器进行馈电,天线的增益、旁瓣抑制制度和交叉极化比都有良好的性能,对提高汽车防撞雷达的抗干扰能力有很大帮助.

## 2 天线线阵设计

串馈微带天线阵有驻波型和行波型两类,通常驻波天线为边射且效率较高,而行波天线可以设计成从边射到端射之间任一方向,由于微带线终端要接匹配负载,损耗大,降低了行波天线的辐射效率.前置汽车防撞雷达更注重通过高增益天线来减小设备的发射功率,从而获得更低的功耗,所以,本文天线采用驻波型.图 1(a) 为广泛使用的垂直极化串馈驻波阵,根据 -25dB 旁瓣抑制的泰勒加权形式,首先求得中心单元的宽度,然后依次推导出相邻单元的宽度<sup>[8]</sup>.

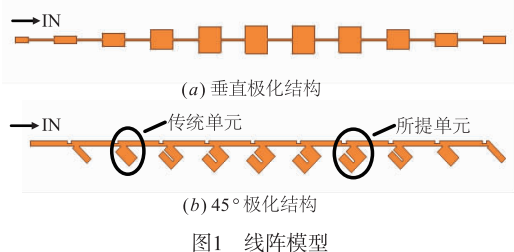


图1 线阵模型

本文提出的 45°线极化串馈驻波线阵如图 1(b) 所示,基板采用 Rogers Ro3003,介电常数 3.0,损耗正切 0.0013,介质板厚度 0.127mm.为了获得 45°线极化,基于图 1(a) 设计的垂直极化天线,将十个单元依次呈 45°放置在馈电线的一边,天线单元的间距约为一个介质波长,通过添加反射相消单元可抵消从每个单元反射回来的电流,起到阻抗变换的作用,且不增加天线的损耗.而同类型的角馈天线通过 1/4 波长匹配段进行馈电,单元高达 584Ω 的输入阻抗给单元间的阻抗匹配带来的困难,加上单元间的强耦合,天线效率极低,最终,32 个贴片单元增益仅有 16.38dB<sup>[9]</sup>.

图 2 为本文提出的一个带反射相消单元的矩形贴片单元.它包括三部分:矩形辐射贴片、反射相消单元和贴边矩形槽.根据腔膜理论,传统角馈方型贴片易产生极化正交、幅值相等的两个简并模,通过改变单元长宽或添加微扰单元可以改变两个模式相位差,以此获得线极化或圆极化.图 3 是两种简并模在贴片周围产生的

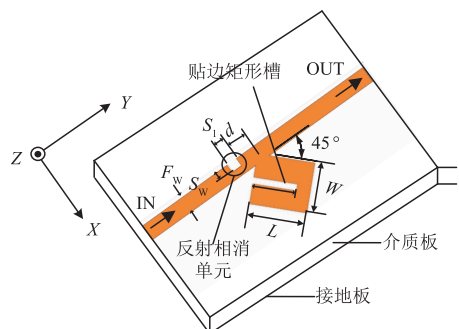


图2 贴片单元结构

磁流分布图.空间任一  $P$  点的场强由两个模式下的场强叠加,贴片的极化方向会随着不同单元的长宽的变化而变化,因此线阵不能获得统一的极化方向,给定方向的交叉极化比恶化.

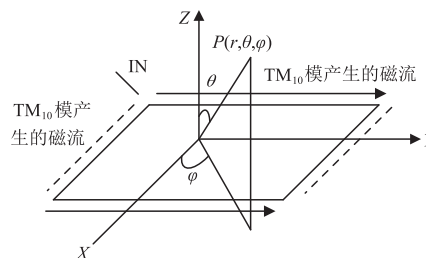


图3 电磁流分布图

为了解决上述问题,引入单模传输,见图 4,此时,  $W = 0.9\text{mm}$ 、 $L = 1.03\text{mm}$ ,电流在波节点处通过边角流向传统贴片单元表面,由于天线单元的长宽近似为半个波长,所以在贴片四周形成了四个半波,表面电流的方向性印证了传统角馈贴片单元的双模特性,其中,  $\text{TM}_{01}$  模式下电流矢量方向是设计需要的,而  $\text{TM}_{10}$  模式下的强电流流向与 45°极化方向正交,恶化了天线的交叉极化比,为此,我们通过贴边矩形槽破坏  $\text{TM}_{10}$  方向电流的连续性获得单模传输.此时的贴片单元由两个窄矩形组成,因为电流上下半波的流向相反,所以下半波旋转 180°可以与上半波获得相同的电流流向,同时,调整贴边槽的宽度以加强两边的耦合,使得斜 45°方向的表面电流强度较传统结构有了明显的提升.

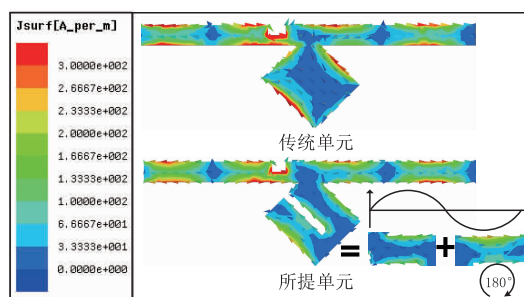


图4 单元表面电流分布

图5为上述单元在ZX面(水平方位)和ZY面(垂直方位)有无贴边矩形槽(图中简称为有、无)前后的主极化与交叉极化归一化辐射特性,数据对比表明所提单元在半功率宽度内的交叉极化水平较传统单元有了极大的提升,其中,在水平方位和垂直方位的正负5°内,交叉极化均提高了10dB左右,归一化交叉极化电平低于-20dB.

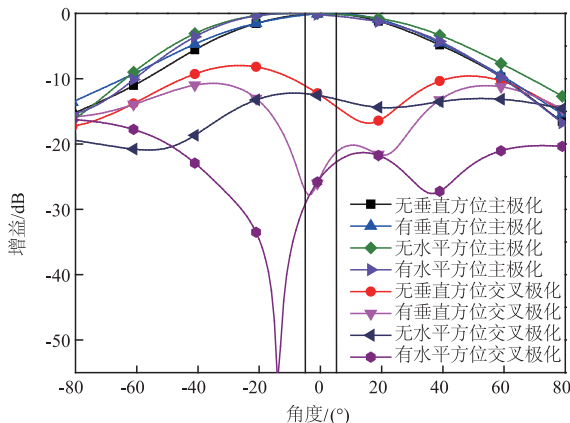


图5 贴片单元归一化辐射特性

图6为先后加入反射相消单元、贴边矩形槽三个阶段的两端口输入输出特性(图中简称为有无反和有无反边).此时单元结构参数为: $L = 1.03\text{mm}$ ,  $W = 0.9\text{mm}$ ,  $F_w = 0.3\text{mm}$ ,  $S_1 = 0.2\text{mm}$ ,  $S_w = 0.15\text{mm}$ ,  $d = 0.55\text{mm}$ ,  $L_s = 0.78\text{mm}$ ,  $W_s = 0.12\text{mm}$ .反射相消单元抵消了部分回波,更多的能量流向辐射贴片,使得贴片单元原本趋于水平的回波损耗曲线具有了谐振特性.加入贴边槽后,见图4,贴片单元在45°极化方向上形成四条半波,较传统单元多了两条,进一步地改善了贴片单元的谐振特性,同时,贴边槽延长了电流路径,天线带宽较传统结构拓宽了50%.本文所提的新型贴片单元相对于1/4波长匹配馈电形式而言,结构紧凑,匹配效果更明显.因为渐削的辐射单元尺寸不同,所以,反射相消单元的位置与大小也要单独进行设计,保证所提贴片单元结构具有低正向传输系数和入射端口的最佳驻波特性.

单列串馈线阵的单元宽度初始值参考垂直极化形式,表1列出了单元在加入贴边矩形槽前后法线方向的交叉极化比.同前文理论分析一致,当单元长宽比趋向于1,即 $W$ 趋向于1.05时(本文单元最佳谐振长度1.05mm),天线单元的交叉极化发生恶化,所以,窄矩形贴边单元无需引入贴边矩形槽,同时也保证了贴片单元大的辐射面积.基于此,本文线阵采用6个所提单元

表1 有无贴边矩形槽单元法线方向交叉极化比

W/mm	0.33	0.63	0.9	1.18	1.28
无贴边矩形槽/dB	24.28	19.7	11.7	12.7	14.9
有贴边矩形槽/dB	—	—	24.9	32.8	36.7

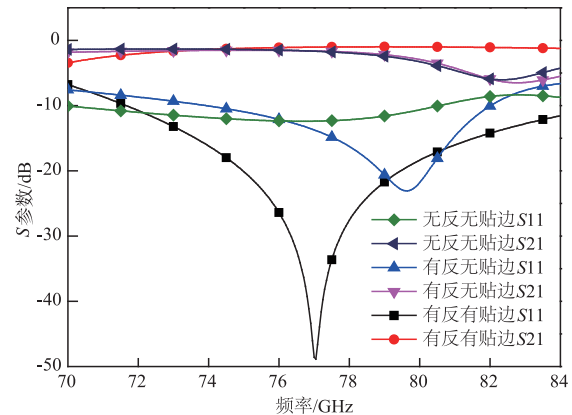


图6 端口传输特性

结合4个传统单元的形式,根据上述设计思路,优化每个单元尺寸获得最佳驻波特性,然后将十个单元结构级联,调整单元的间距,使得十单元满足同相位的要求.图7是线阵天线的表面电流分布,每个天线单元的强电流均集中在45°方向.图8是两种极化串馈线阵的辐射方向图.两种结构的旁瓣抑制制度均达到25dB.在45°极化方向的半功率波束宽度内与文献[7]相比,所提线阵的交叉极化比提高了4dB,天线增益为15.1dB.



图7 线阵表面电流分布

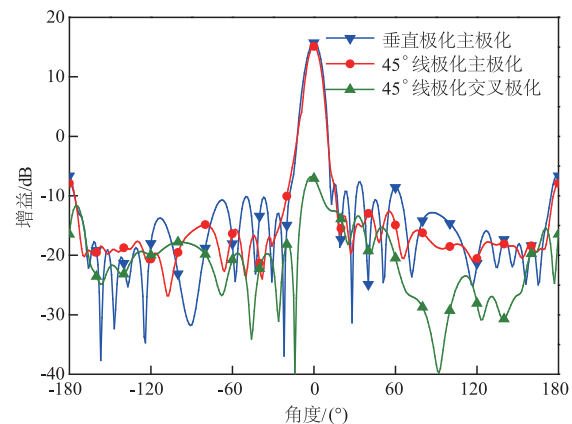


图8 线阵极化方向图

### 3 天线面阵设计

上述端馈线阵结构紧凑、损耗小,避免复杂的馈电网络带来的额外的传输损耗,为大规模面阵设计留出了充足的空间.

#### 3.1 馈电网络设计分析

在平面功分器中,最常用的是具有高隔离度、低损耗的威尔金森功分器,然而,当输出端口比较多的情况下,需要的隔离电阻星形网络结构复杂,且多级结构势

必会加大传输线的损耗. 微带 T 型功分器, 虽然其原理简单, 结构小巧紧凑, 容易实现各种复杂的馈电网络, 然而, 超过 4 倍比例的大功分比的不等功分器又是设计的难点.

典型的 T 型不等功分器如图 9 所示, 其中端口输入输出阻抗均为  $Z_0$ ; 1, 2 支路的  $1/4$  波长匹配段分别为  $Z_{T1}$ 、 $Z_{T2}$ .

则各阶阻抗计算公式为:

$$P_1 : P_2 = \left( \frac{1}{2} \frac{V_0^2}{Z_{in1}} \right) : \left( \frac{1}{2} \frac{V_0^2}{Z_{in2}} \right) = 1 : k \quad (1)$$

$$P_{in} = P_1 + P_2 = \frac{1}{2} \frac{V_0^2}{Z_0} \quad (2)$$

$$Z_{in1} = (1+k)Z_0, Z_{in2} = \frac{1+k}{k}Z_0 \quad (3)$$

$$Z_{T1} = \sqrt{1+k}Z_0, Z_{T2} = \sqrt{\frac{1+k}{k}}Z_0 \quad (4)$$

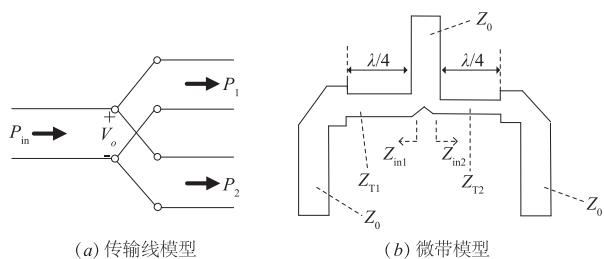


图9 T型不等功分器

表 2 不等功分器端口电流

端口	归一化电流比 (泰勒加权)	归一化功率比 (泰勒加权)	本文仿真 电流比	本文仿真归一化 电流比
2	1	1	0.43	1
3	0.88	0.77	0.35	0.81
4	0.67	0.45	0.27	0.62
5	0.43	0.18	0.17	0.39
6	0.21	0.04	0.1	0.23

用泰勒加权的形式对十个端口进行等间距不等幅馈电, 工程实践发现, 馈电网络旁瓣抑制制度越高, 组阵后效果越好, 表 2 中第 2 列为旁瓣抑制为  $-30\text{dB}$  的十单元泰勒加权阵的归一化电流幅度比, 在理想情况下,  $P_5 : P_6 = 4.5 : 1, P_4 : (P_5 + P_6) = 2 : 1$ , 应用式(1) ~ (4), 求得各匹配段的特性阻抗, 依据工程采用的板材, 计算得  $Z_{S2}$  的微带线宽为  $0.06\text{mm}$ ,  $Z_{42}$  的微带线宽为  $0.09\text{mm}$ , 超细线宽对天线加工工艺提出了更高的要求, 实物加工很难满足精度的要求.

考虑加工工艺以及优化过程中线宽的进一步缩小, 传统级联形式很难实现大功率功分比, 这里采用文献[10]中基于二端口网络的 ABCD 矩阵设计方法, 用 T 型枝节取代  $1/4$  阻抗匹配枝节, 实现末端高达 4.5 倍的

不等功率输出. 等效变换后的 T 型节要长于  $1/4$  阻抗段, 通过微调后端的过渡段长度使得输出端口满足同相位的要求, 如图 10(b), 变换后的结构增加了优化的自由度.

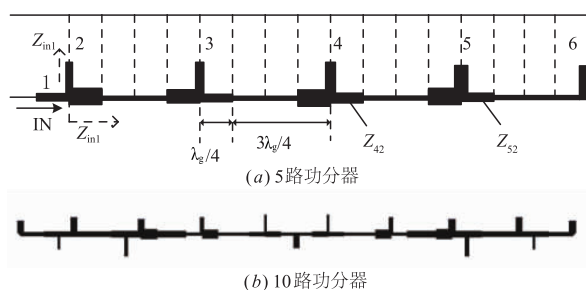


图10 功分器结构图

因为结构对称, 可通过一边的五端口值表明设计的结果. 通过 Ansoft HFSS 设计得十个端口的输出端口激励电流幅值比, 见表 2, 归一化的电流比逼近泰勒加权的结果, 见图 11, 在工作频点处, 十个端口输出同相位, 见图 12.

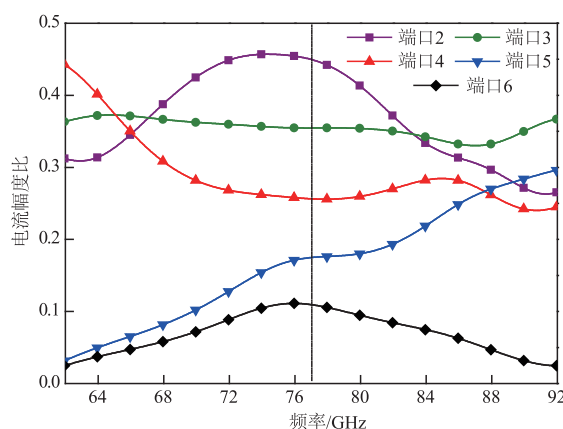


图11 输出端口激励幅度比

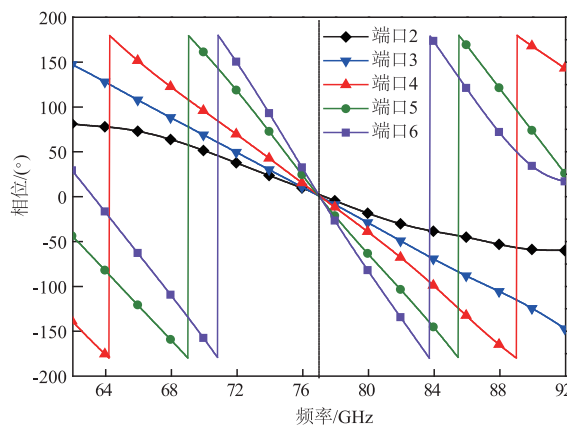


图12 输出端口激励相位

### 3.2 面阵设计与分析

将上述线阵与一阶十路功分器进行组合, 使用 An-

soft Hfss 对其进行仿真,将设计的模型进行加工,通过鳍线过度的波导转微带结构对天线进行测试,天线实物见图 13. 使用安捷伦矢量网络分析仪对天线的  $S$  参数进行测试, $S$  参数仿真与实测结果见图 14,实测结果与先前设计吻合,中心频率往低频偏移了约 500MHz,最佳谐振点落在 76.5GHz,天线可工作在 75.7 ~ 77.6GHz.

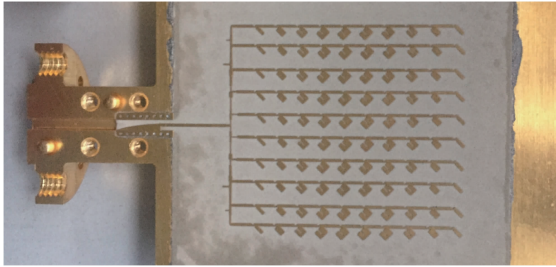


图13 天线实物图

使用微波暗室的远场测试系统对天线辐射特性进行测试. 图 15、图 16 是将泰勒加权归一化功率直接馈入十列等间距线阵(图中简称直馈)与本文设计面阵的仿真、实测对比图. 理想泰勒加权下天线增益 25.1dB,垂直方位旁瓣抑制制度为 25dB,水平方位旁瓣抑制制度为 29dB,水平、垂直方位半功率波束宽度  $5^\circ$  内的交叉极化比高于 21dB. 见图 13,十列线阵与功分器直接相连,由于十个输出端口特性阻抗各不相同,而十列线阵的输入阻抗均为  $50\Omega$ ,阶跃结构将导致阻抗失配,甚至相位的不连续,同时,毫米波天线单元间存在强耦合,所以,面阵激励的幅相与理想值有偏差. 最终实测天线增益 24dB,水平旁瓣抑制制度为 22dB、垂直方位的旁瓣抑制制度为 20dB,比泰勒加权理想值低,但是已满足设计的需要. 水平、垂直方位半功率波束宽度  $\pm 5^\circ$  内的交叉极化比高于 18dB. 实测与仿真结果吻合较好.

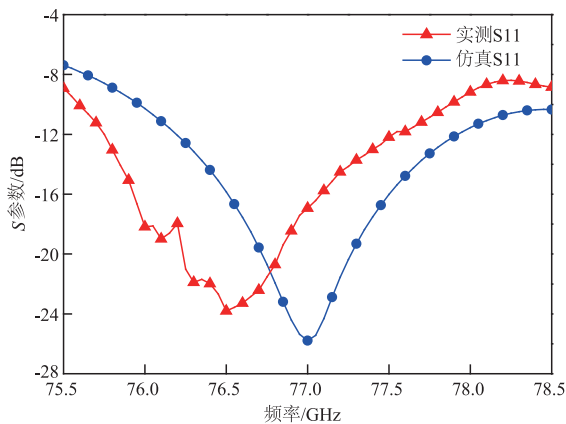


图14 仿真与实测S参数

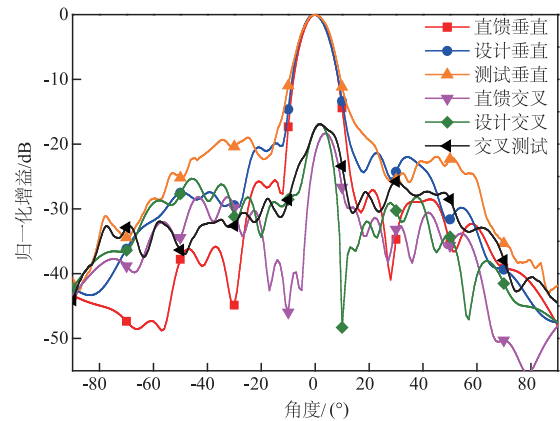


图15 垂直方位辐射图

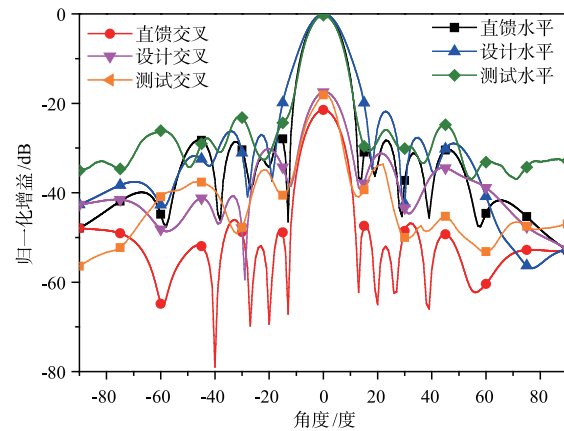


图16 水平方位辐射图

## 4 结论

本文提出了一种新型 W 波段  $45^\circ$  线极化微带串馈天线面阵,反射相消单元的引入使得馈电端口获得最佳的驻波特性,贴边矩形槽切断电流路径获得单模传输,明显地提高了天线在主波束方向的交叉极化比,一阶十路功分器避免了传统多阶并馈网络带来的大损耗与强耦合,面阵通过泰勒加权获得良好的旁瓣抑制特性. 仿真和实测结果表明:天线工作在 75.7 ~ 77.6GHz,旁瓣抑制制度高于 20dB,半功率波束宽度内交叉极化比达 18dB. 该天线为进一步提高汽车防撞雷达的抗干扰能力和可靠性提供了一种新的思路.

## 参考文献

- [1] Xu J, Hong W, Zhang H, et al. An array antenna for both long and medium range 77GHz automotive radar application[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2017, 65(12): 7207 - 7216.
- [2] Hasch J, Topak E, Schnabel R, et al. Millimeter-wave technology for automotive radar sensors in the 77GHz frequency band[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and

- Techniques, 2012, 60(3):845-860.
- [3] Kuo C H, Lin C C, Sun J S. Modified microstrip Franklin array antenna for automotive shortrange radar application in blind spot information system [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16(2):1731-1734.
- [4] Hallbjorner P, He Z, Bruce S, et al. Low-profile 77GHz Lens antenna with array feeder [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012, 11(1):205-207.
- [5] Dewantari A, Kim J, Jeon S Y, et al. Gain and sidelobe improvement of W-band microstrip array antenna with CSRR for radar applications [J]. Electronics Letters, 2017, 53(11):702-704.
- [6] 恽小华, 陈春红, 楚然, 等. 一种自适应的毫米波多波束天线[J]. 电子学报, 2004, 32(3):522-524.  
Xiao-hua YUN, Chun-hong CHEN, Ran CHU, et al. A self-adaptive millimeter-wave multiple-beam antenna [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(3):522-524. (in Chinese)
- [7] Sugawa S, Sakakibara K, Kikuma N, et al. Low sidelobe design of microstrip combline antennas using stubintegrated radiating elements in the millimeter-wave band [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(10):4699-4709.
- [8] 华光, 杜小东, 洪伟. 微带加权串馈天线阵的设计与研制 [J]. 微波学报, 2009, 25(4):41-44.  
Hua G, Xiao-Dong DU, Hong W. Design and development of weighted series-fed microstrip antenna array [J]. Journal of Microwaves, 2009, 25(4):41-41. (in Chinese)
- [9] Yasini S, Mohammadpour Aghdam K. Design and simulation of a combline fed microstrip antenna array with low side lobe level at 77GHz for automotive collision avoidance radar [A]. International Conference on Millimeter Wave & Terahertz Technologies [C]. Tehran, Iran: IEEE, 2017. 87-90.

- [10] Yang T, Chen J X, Xue Q. Novel approach to the design of unequal power divider with high dividing ratio [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2009, 51(5):1240-1243.

#### 作者简介



金 良 男, 1992 年 8 月生于江苏连云港, 现为南京信息工程大学电子与信息工程学院硕士研究生. 主要研究方向: 天线理论与设计.  
E-mail: jwblyg@163.com



葛俊祥 男, 1960 年 8 月生于江苏南京, 现为南京信息工程大学教授, 博士生导师. 主要研究方向为电磁场理论、微波毫米波理论与技术、天线理论与技术、雷达系统等.  
E-mail: jxge@nuist.edu.cn



汪 洁 男, 1988 年 8 月生于河南商丘, 现为南京信息工程大学大气科学学院博士研究生. 主要研究方向: 太赫兹大气传输, 天线技术.  
E-mail: 1057798108@qq.com