

微带阵列天线与毫米波雷达的 内涵与研究

郭军朝、屈新田、李明虎、夏云

东风汽车集团有限公司技术中心，武汉，430058

【摘要】 本文首先介绍为什么毫米波雷达是智能驾驶汽车的标配，并且描述了毫米波雷达的特点、分类，进而深度剖析毫米波雷达测距、测速、测角的工作原理。尤其是详细介绍阵列天线发射电磁脉冲、接收探测目标反射电磁脉冲两者之间存在的多普勒频移现象。其次，本论文从工程应用角度剖析了四个 77GHz 毫米波雷达的“瞳孔”——微带阵列天线，并且提取 S_{11} 驻波反射系数、三维远场增益方向图、主瓣、旁瓣、微带阵列天线的线电流分布、近场电场分布、二维方位角和俯仰角的 FOV 等参数。本论文为全方位理解毫米波雷达、精准仿真天线阵列及工程应用指明了方向。

【关键词】 毫米波雷达，微带，阵列天线，主瓣，旁瓣，增益

Connotation and Summary Study of Micro-strip Array Antenna

of A Millimeter Wave Radar

Guo Junchao, Qu Xintian, Xia Yun

Dong Feng Motor Corporation Technical Center, Wuhan, 430058

Abstract: The background why millimeter wave radar is the standard configuration of intelligent driving cars is firstly introduced in this paper. And the characteristics and classification of millimeter wave radar is described, and then the working principle of millimeter wave radar's ranging test, speed test, and an-gle test is deeply analyzed. In particular, the Doppler frequency shift between the electromagnetic pulse emitted by the array antenna and the electromagnetic pulse reflected by the detection target is narrated in detail. Secondly, the four "pupillary" -microstrip array antennas of 77GHz millimeter wave radar are analyzed from the perspective of engineering application in this thesis. S_{11} standing wave reflection coefficient, three-dimensional far-field gain pattern, main lobe, side lobe, current distribution Ratio, line current distribution of microstrip array antenna, near-field electric field distribution, FOV of two-dimensional azimuth and pitch angle and other parameters are extracted, and the data are showed with curves, charts. The direction for in-depth understanding of millimeter wave radar, accurate simulation of antenna arrays and engineering applications is pointed out in this paper.

Key words: millimeter wave radar, microstrip, antenna array, main lobe, side lobe, gain

引言

随着汽车电动化、智能化、网联化、共享化的发展，尤其是智能驾驶汽车等级的定义，使得传感器在汽车上的应用个数日趋增多，如图1所示。在汽车高级辅助驾驶系统ADAS架构中传感器被比作汽车的“眼睛”，包括车载摄像头等视觉系传感器和车载毫米波雷达、激光雷达及车载超声波雷达等雷达系传感器。

这些传感器也是汽车主动安全领域的核心部件，毫米波雷达传感器就是核心部件之一^[1]。因为成本较低、技术比较成熟，毫米波雷达率先成为ADAS主力传感器。微带阵列天线是毫米波雷达内部的“瞳孔”，具备重要感知功能，在本论文中也被深度描述和研究。

1 毫米波雷达是智能汽车的标配

车载毫米波雷达通过发射天线向外发射相应波段具有指向性的毫米波信号，接收天线接收目标反射信号，经处理器处理后，能够快速准确地获取汽车车身周围的物理环境信息（如汽车与其他物体之间的相对距离、相对速度、角度、运动方向等）。然后根据所探知的物体信息进行目标追踪、识别、分类，进而结合车身动态信息进行数据融合，最终通过中央处理单元（ECU）进行智能处理。经合理决策后，以声、光及触觉等多种方式告知或警告驾驶员，或及时对汽车做出主动干预，从而保证驾驶过程的安全性，减少事故发生几率^[2]。

国际自动机师学会关于智能驾驶等级分类

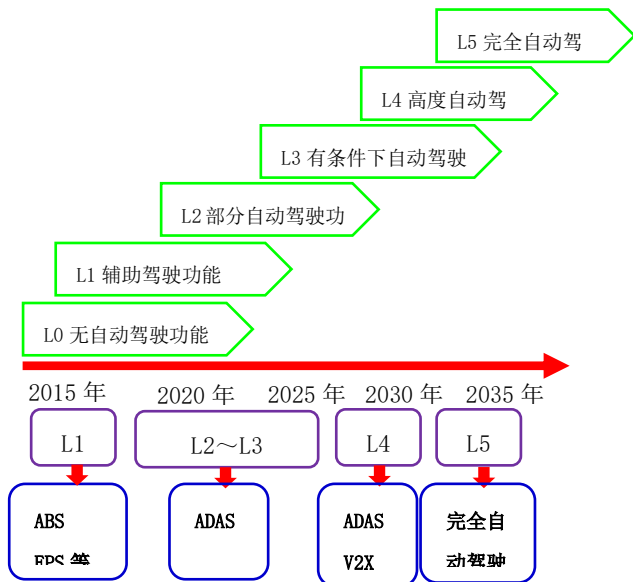


图1 智能驾驶汽车等级分类

毫米波雷达具有适应全天候环境，射频带宽较大而分辨率高，天线及相关部件尺寸小，穿透能力强，地物杂波低，抗EMC干扰能力强的优点。因而，这些优势使得毫米波雷达是智能驾驶汽车环境感知领域的标配，如图1所示等级越高，需要配备的毫米波雷达也越多。

例如，77GHz毫米波雷达是智能驾驶汽车上必不可少的关键部件，因为它是能够在全天候场景下快速感知0~200米范围内周边环境物体距离、速度、方位角等信息的传感器。

2 毫米波雷达工作的原理

2.1 毫米波雷达主要特点与分类

定性分析毫米波雷达传感器与其他传感器的区别，如表1所示。

表1 雷达系传感器各自的特点

技术参数指标	超声波	红外	激光	毫米波
长距离探测能力	低	一般	强	强
目标探测能力	低	低	一般	强
排除虚警能力	低	低	一般	强
温度稳定性	差	一般	强	强
黑暗穿透能力	强	强	强	强
全天候穿透能力	低	低	低	强
硬件成本可能性	高	高	一般	高
信号处理成本	高	高	高	高
烟雾穿透能力	一般	差	差	良好

根据测距的不同毫米波雷达分为短程雷达 SRR、中程雷达 MRR、远程雷达 LRR 如图2所示。24GHz 的毫米波雷达多用于短/中距测量，77GHz 毫米波雷达多用于中/长距离测量。具有环境感知功能的天线/阵列天线是毫米波雷达的重要组成部分，如图3所示。



图2 毫米波雷达的分类

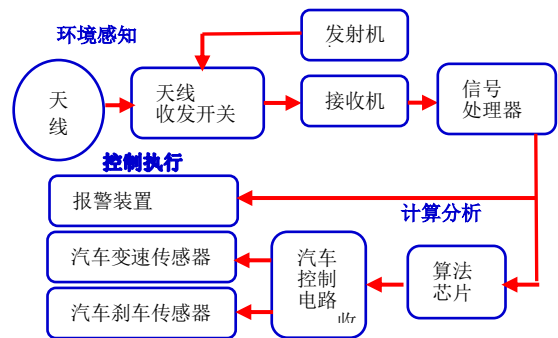


图3 天线是毫米波雷达感知部分

2.2 什么是毫米波

毫米波是指波长为毫米级的电磁波。例如 77GHz 毫米波雷达的波长：

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3000000000m/s}{77 \times 10^9 Hz} = 3.896mm \quad (1)$$

几毫米的波长与天线实际尺寸相当，所以毫米波

雷达的天线可以很小，从而可以使用多根天线来构成阵列天线达到获得窄波束的目的。

2.3 如何探测目标的距离

毫米波雷达通过发射阵列天线发出有指向性的毫米波波长的电磁波，传播速度是光速。当其遇到目标车后会发生反射，通过接收阵列天线接收反射回来的电磁波。

根据毫米波在往返目标车途中的时间 t ，可以计算毫米波雷达（本车）和目标车之间的相对距离，也即知道目标车的位置^[3]。

$$R = c \times t / 2 \quad (2)$$

其中 c 是光速， $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ， t 是后车探测目标车发出电磁波的往返时间。

2.4 如何探测目标的角度和方向

关于被探测目标的方位角测量，毫米雷达的探测原理是毫米波雷达的发射阵列天线发射出电磁波后，遇到被探测目标而反射回来，毫米波雷达内部布置的接收阵列天线会收到这个目标反射回来的电磁波，因为返回的电磁波存在相位差，毫米波雷达内部会根据相位差计算出被探测目标的方位角。探测方位角和俯仰角的原理如图 4 所示，方位角计算公式：

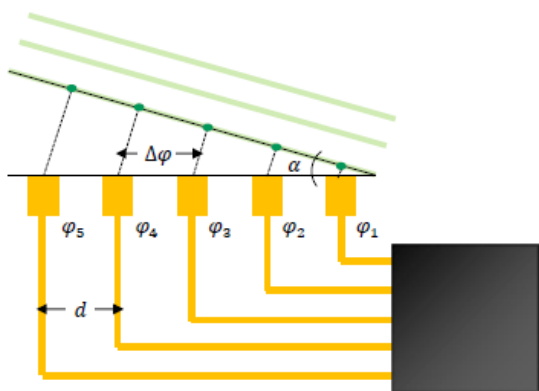


图 4 探测方位角和俯仰角原理

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda \cdot \Delta \varphi}{2\pi d} \right) \quad (3)$$

其中： d 是毫米波雷达阵列天线阵元之间的距离， $\Delta \varphi$ 是阵列天线各阵元之间的相位差， α 是反射回波的到达角， λ 是毫米波雷达的波长。

在毫米波雷达工作过程中，接收阵列天线阵元之间相位是不同的，即相位差是不同的，如图 5 所示。

$$\Delta \varphi_1 \neq \Delta \varphi_2 \neq \Delta \varphi_3 \neq \Delta \varphi_4 \neq \Delta \varphi_5 \quad (4)$$

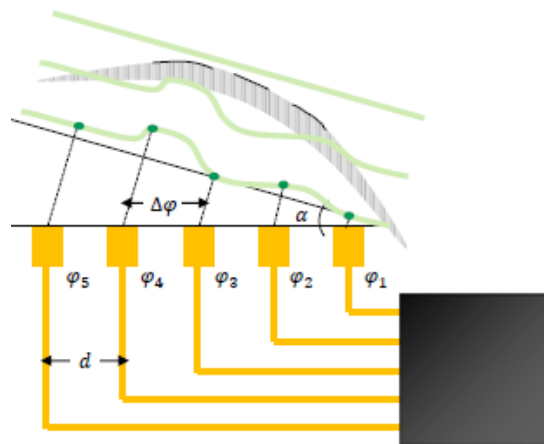


图 5 探测方位角和俯仰角原理

2.5 如何探测目标的速度

根据多普勒效应，毫米波雷达的频率变化与本车及探测目标的相对速度是紧密相关的。根据反射回来的毫米波频率的变化可以得知前方实时跟踪的障碍物目标和本车之间的相对运动速度。

因此，其表现就是传感器发出安全距离报警时，若本车继续加速、或前监测目标减速、或前监测目标静止的情况下，毫米波反射回波的频率将会越来越高；反之则频率越来越低。计算如公式（5）所示，速度和频率变化示例如表 2 所示^[4]。

$$f_D = - \frac{2f_c v_R}{c_0} = - \frac{2v_R}{\lambda} \quad (5)$$

其中， V_R 是相对速度， f_c 是毫米波雷达的频率， c_0 是光速， f_D 是频移，频率的变化， λ 是波长。

表 2 相对速度与频率变化的关系

$f_c = 76.5 \text{GHz}$				
V_R	1m/s	3km/h	120km/h	250km/h
f_D	0.51kHz	4.25kHz	17kHz	35.42kHz

2.6 阵列天线发出与接收的电磁脉冲有什么特点

根据辐射电磁波方式的不同，毫米波雷达主要有脉冲体制和连续波体制，连续波又分为FSK（频移键控）、PSK（相移键控）、CW（恒频连续波）、FMCW（调频连续波）四种方式。调频连续波FMCW工作体制不但可以对多个目标测量距离、速度信息，而且它的分辨率高、信号处理复杂度低、成本低廉、技术成熟，因而被大陆、博世、电装、德尔福、海拉等公司应用到毫米波雷达的开发中。

调频连续波（FMCW）雷达的原理是发送具有一定带宽、频率线性变化的连续信号，再对接收到的连续信

号进行快速傅里叶变换，通过发送与接收信号的频率差来计算两个信号的时间差，最后由时间差得到对应的距离值，如图6所示^[5]。

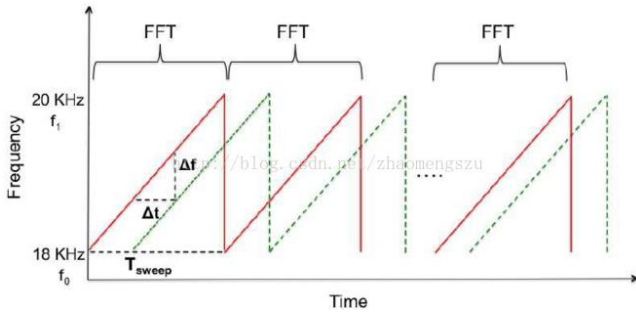


图6 发射与接收脉冲的频率差和时间差

探测距离、速度及精度的描述如图7所示，带宽BW越大，则探测精度越高。

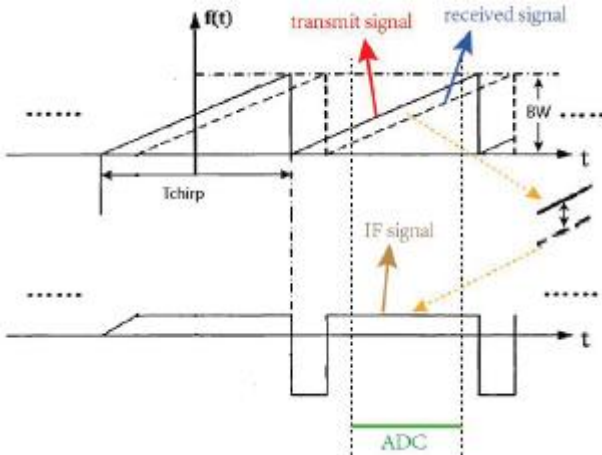


图7 带宽与测距测速精度的关系

$$R_{\max} = \frac{f_s C T_{\text{chirp}}}{4BW} \quad (6)$$

$$\Delta R = \frac{C}{2BW} \quad (7)$$

$$V_{\max} = \frac{C}{4f_0 T_{\text{chirp}}} \quad (8)$$

$$\Delta V = \frac{\lambda}{2MT_{\text{chirp}}} \quad (9)$$

其中 f_s 是采样频率， BW 是带宽， T_{chirp} 是差频时间， C 是电磁波速， λ 是波长， M 是差拍的个数， R 是测距， ΔR 是测距精度， V 是多普勒速度， ΔV 是多普勒测速精度。

毫米波雷达发射调频的毫米波信号，也接收被探

测目标反射的回波信号。通过混合接收和发射的信号，系统获得一个频率为 f_b “拍打”信号。因为后车毫米波雷达与前方探测目标存在一定的距离，该信号有一定时间延迟。又因为与目标有相对运动速度，也存在一个多普勒频移，如图8所示^[6]。

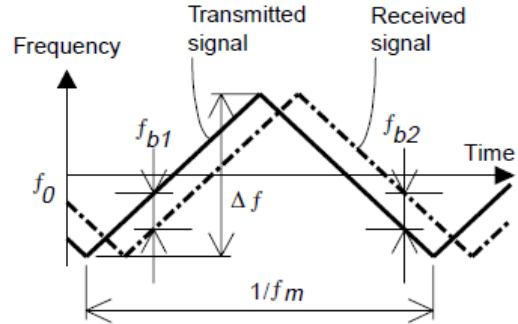


图8 测距测速与“拍打”信号的联系

分析图8，探测目标的距离 R 、相对运动速度 V 可以用含有“拍打”频率 f_{b1} 、 f_{b2} 的两个等式进行描述。拍打信号是由存在时间差的调频脉冲对获得的。

$$R = \frac{(f_{b1} + f_{b2})c}{8f_m \Delta f} \quad (10)$$

$$V = \frac{(f_{b2} - f_{b1})c}{4f_0} \quad (11)$$

其中： c 是光速， f_0 是中心频率， f_m 是调制频率， Δf 是最大频率偏移值。

3 微带阵列天线多案例研究

毫米波雷达是智能驾驶汽车“眼睛”，而印刷在PCB板上的微带阵列天线是毫米波雷达的“黑色瞳孔”。因此对具备毫米波雷达感知功能的阵列天线的分析、仿真、研究是极其重要的^[7]。

3.1 某中长距雷达2发射阵列天线案例分析

根据不同的场景需求，车载毫米波雷达的探测距离和FOV通常需要权衡设计，例如在自适应巡航ACC中，对雷达的前向探测距离要求较高，要求可探测较远的距离，但是对于大角度的FOV则相应较低；在前向碰撞预警FCW、行人检测PED及交通标志检测TSR等的使用中，需要毫米波雷达具备足够的FOV以检测较大视野范围的目标以预留足够的反应时间进行决策。

为了实现中长距一体化雷达以及对应的FOV覆盖范围，本文援引了一种新型的发射天线组阵方案，使用两个发射通道，分别馈入一路高增益窄波束天线和一路低增益宽波束天线，通过开关在两者之间进行切

换工作，使雷达分时工作在长距和中距探测模式。

车载毫米波雷达探测的目标通常来自于前方车道，要求天线在俯仰方向上的波束宽度一般控制在 $\pm 3^\circ \sim \pm 5^\circ$ 内。低增益天线中，为实现在方位面较大的波束宽度，采用 1×10 串馈微带天线阵^[8]。对于方位视场角FOV要求约 $\pm 30^\circ$ 以上的覆盖范围，建立了如图9所示的串馈微带天线阵模型。

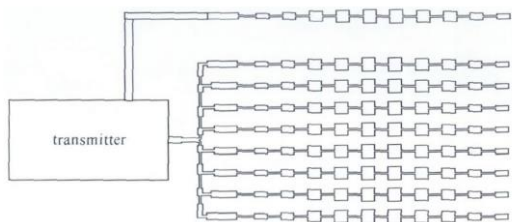


图9 发射天线高低增益一体化设计结构

高增益天线、低增益天线的驻波分析时，对应的端口反射系数随频率的变化分别如图10、11所示。

76GHz左右时，驻波反射系数 S_{11} 达到最低。

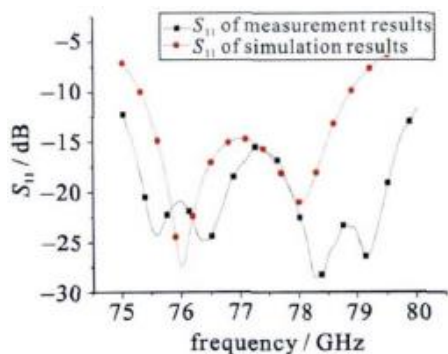


图10 1×10 微带天线阵列驻波分析

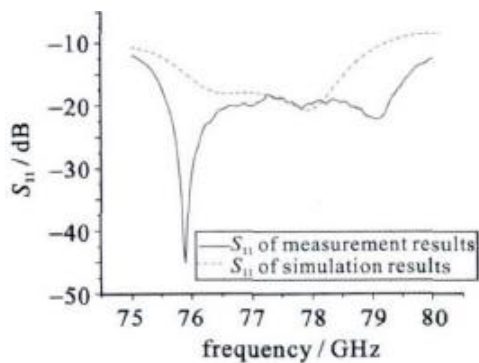


图11 8×10 微带天线阵列驻波

高增益天线、低增益天线的垂直视场角、水平视场角及其对应的增益如图12所示。

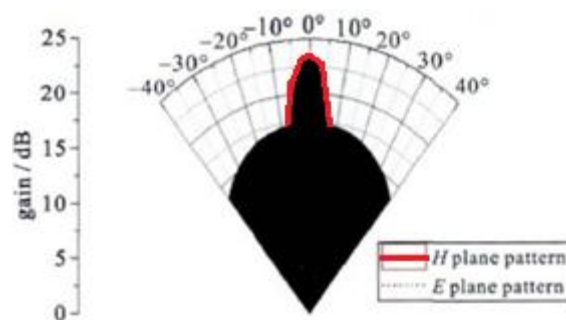


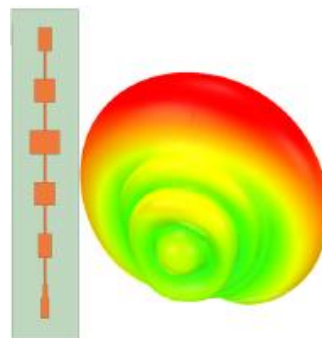
图12 高低增益天线及其视场角

3.2 某1发4收阵列天线案例分析

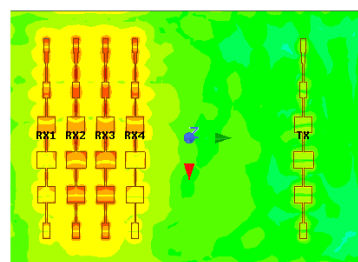
参考文献中1发4收的阵列天线，发射阵列天线是由多个长方形的微带串联而成，馈点在左端^[9]。串联微带阵元、发射天线远场增益、接收阵列天线的感应电场、远场增益分别如图13中(a)、(b)、(c)、(d)所示。



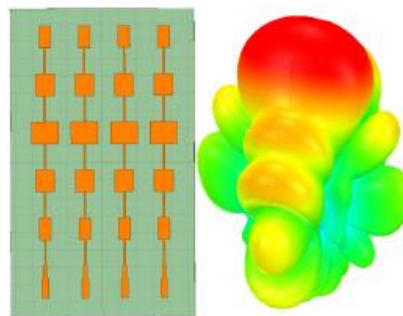
(a) 串馈微带阵元



(b) 发射天线远场增益



(c) 阵列天线平面的感应电场分布



(d) 接收天线远场增益

图13 1发4收天线阵元及收发阵列远场增益

3.3 某2发4收阵列天线案例分析

参考文献77GHz毫米波雷达阵列天线案例，其是由先串联、后并联的天线阵元组成，是2发4收的面阵，如图14所示。

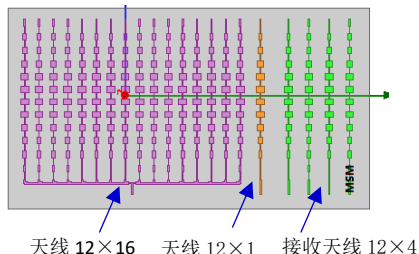


图14 2发4收-低副瓣微带阵列天线结构

2发射天线俯仰角、方位角的主副瓣及增益统计，如表3所示，其中二维发射面阵12x16天线阵列的探测距离远，视场角小，其3dB的E面视场角是 $\pm 3.5^\circ$ ，H面视场角是 $\pm 5.5^\circ$ [10]。

一维线阵12x1天线阵列的探测距离近，视场角FOV比较大，其3dB的E面视场角是 $\pm 30^\circ$ ，H面视场角是 $\pm 35^\circ$ 。

表3 2发射天线俯仰角、方位角的主副瓣及增益统计

类型	分析	分析指标	E 面	H 面
发射天线 1-12x16	Elevation 俯仰角	Main lobe width @3dB	$\pm 4.5^\circ$	$\pm 6.5^\circ$
		最大峰值降低 3dB 时主瓣 FOV		
		Side lobe 副瓣	20dB	20dB
	Azimuth 方位角	Main lobe width @3dB	$\pm 3.5^\circ$	$\pm 5.5^\circ$
		最大峰值降低 3dB 时主瓣 FOV		
		Side lobe 副瓣	20dB	20dB
		Gain 增益	24dBi	24dBi
发射天线 2-12x1	Elevation 俯仰角	Main lobe width @3dB	$\pm 4.5^\circ$	$\pm 6.5^\circ$
		最大峰值降低 3dB 时主瓣 FOV		
		Side lobe 副瓣	20dB	20dB
	Azimuth 方位角	Main lobe width @3dB	$\pm 30^\circ$	$\pm 35^\circ$
		最大峰值降低 3dB 时主瓣 FOV		
		Side lobe 副瓣	20dB	20dB
		Gain 增益	15dBi	15dBi

发射天线1-12x16二维发射面阵的三维远场增益，如图15所示。

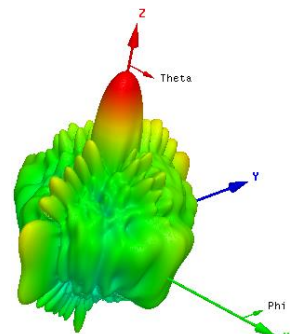
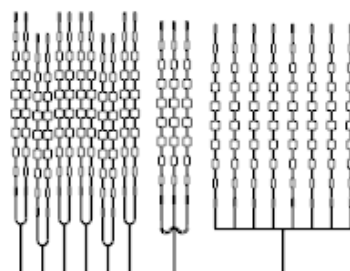


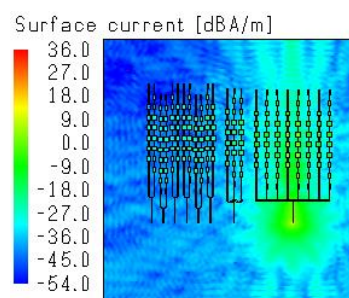
图15 12X16发射阵列天线3D远场增益

3.4 某2发4收2影子-阵列天线工程分析

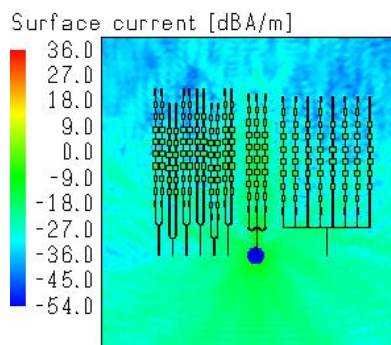
前置车载防撞雷达可缩短司机的反应时间，进而避免绝大部分交通事故的发生 [11]。结合现开发产品，本文以某车型前向毫米波雷达的阵列天线为研究对象，分析雷达内部的阵列天线，并且进行仿真建模，如图16（a）所示。经快速多层多极子计算分析获得在宽波束、窄波束端口施加激励时射频板 top 面的感应电场分布，分别如图16（b）、（c）所示。



(a) 2发4收2影子-阵列天线面阵



(b) 窄波束端口激励时阵列天线面-感应电场



(c) 宽波束端口激励时阵列天线面-感应电场
图16 某前向毫米波雷达2发4收2影子-阵列分析

4 总结

针对本文主要内容，总结及展望如下：

(1) 本论文从研究毫米波雷达的必要性出发，解释了毫米波雷达的特点、分类，并深度剖析毫米波雷达的测距、测速、测角的工作原理以及阵列天线发射电磁脉冲、接收探测目标反射电磁脉冲两者之间存在的多普勒频移现象。

(2) 本论文从工程应用角度研究了四个 77GHz 毫米波雷达的“瞳孔”——微带阵列天线，分别提取 S11 驻波反射系数、三维远场增益方向图、主瓣、旁瓣、微带阵列表面电流分布、近场电场分布、二维方位角和俯仰角的 FOV 等参数，并且从数据、曲线、图表等角度进行展示，为深度理解毫米波雷达、天线阵列仿真及工程应用提供了思路。

(3) 以毫米波雷达为研究基础，展望其后续工作：对其本体可以运用多层天线、赋形天线及 SIW 天线等方法获得天线的波束，也可研究发射、接收天线的间距与隔离度的关系；对其外延，可以开展雷达罩、前后保险杠的基材、涂层等周围环境件对微带阵列天线所发射电磁波的透射、反射等进行研究。这对智能驾驶汽车毫米波雷达的布置有重要指导意义。

参考文献

- [1] 樊宇星、何芒、周平源. 一种应用于中远距离汽车雷达的阵列天线 [C]. 2019 年全国微波毫米波会议.
- [2] 郭俊雷、杨德强. 24GHz 微带阵列天线设计 [C]. 2019 年全国微波毫米波会议.
- [3] Ann Arbor. From Antenna Design to High Fidelity: Full Physics Automotive Radar Sensor Corner Case Simulation [J]. Modelling in Engineering, Volume 2018.
- [4] 张慧、余英瑞、徐俊. 77GHz 车载毫米波中远距雷达天线阵列设计 [J]. 强激光与粒子束, 2017 年 10 月.
- [5] Dapeng Wu. 76-81 GHz Planar Antenna Development and Utilization for Automotive Radar Applications. 2016 年
- [6] Renan Alves dos Santos. Reconfigurable Printed Antenna Arrays for Mm-wave Applications [C]. Conference Paper, April 2016.
- [7] M.S. Rabbani. Evaluation of Gain Enhancement Large Micro-strip Antenna Arrays for Mm-wave Applications. Conference Paper, January 2017
- [8] Ushemadzoro Chipengo. Full Physics Simulation Study of Guardrail Radar-Returns for 77 GHz Automotive Radar Systems. September 2018.
- [9] Shuaihao Ji. Optimal Design of One Micro-strip Patch Array Antenna Operating at 60 GHz Frequency Band [C]. Altair 2015
- [10] 王永琦. 应用于 K 波段汽车防撞雷达的微带天线阵列设计 [C]. Altair 2015 技术大会论文集
- [11] 金良. 77GHz 车载防撞雷达新型天线阵设计 [J]. 固体电子学研究与进展, 2018 年 10 月.