

4D 毫米波雷达：智驾普及的新路径

华泰研究

2023 年 4 月 13 日 | 中国内地

专题研究

电子

增持 (维持)

研究员	黄乐平, PhD
SAC No. S0570521050001	leping.huang@htsc.com
SFC No. AUZ066	+(852) 3658 6000
研究员	陈旭东
SAC No. S0570521070004	chenxudong@htsc.com
SFC No. BPH392	+(86) 21 2897 2228
联系人	张宇
SAC No. S0570121090024	zhangyu@htsc.com
SFC No. BSF274	+(86) 10 6321 1166
联系人	郭春杏
SAC No. S0570122010047	guochunxing@htsc.com
SFC No. BTP481	+(86) 21 2897 2228
联系人	汤仕隍
SAC No. S0570122080264	tangshihe@htsc.com
	+(86) 21 2897 2228

4D 毫米波雷达，兼具高性能与低成本优势的解决方案

4D 毫米波雷达的 4D 指的是速度、距离、水平角度、垂直高度四个维度。相比传统雷达，增加了“高度”的探测、具有更高的分辨率和精度。目前，特斯拉 Hardware4.0 或将搭载 4D 毫米波雷达，上汽飞凡、深蓝 SL03 都已搭载 4D 毫米波雷达。我们预测 2030 年中国 4D 毫米波雷达市场规模有望达到 449 亿元。性能角度看，我们认为 4D 毫米波雷达未来在分辨率上或可逼近 16-64 线的激光雷达。成本上看，CMOS SoC+AiP 的技术下可实现大幅降本。国内 MMIC 芯片厂商有加特兰微电子、清能华波等；整机厂商包括经纬恒润、威孚高科、华域汽车、森思泰克等；PCB 有沪电股份、生益电子、深南电路等。

性能上看：4D 毫米波雷达未来在分辨率上或可逼近 16-64 线的激光雷达

性能角度看，我们认为 4D 毫米波雷达未来在分辨率上或可逼近 16-64 线的激光雷达。4D 毫米波主要优点：不受天气影响、测速、成本低、测距长；主要缺点：分辨率较低；多普勒效应对物体识别的精度不够。毫米波雷达/激光雷达分别在全天候工作能力/对物体的精准检测识别等方面有一定程度的不可替代性，我们认为长期来看，在自动驾驶、高级别辅助驾驶阶段，4D 毫米波雷达与激光雷达并非替代关系。4D 毫米波设计角度看，级联、CMOS、SoC 集成或将成为主流趋势。

成本上看，CMOS SoC+AiP 的技术下可实现大幅降本，有助于量产

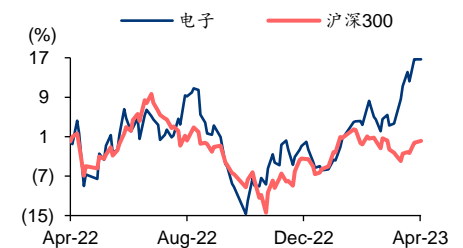
4D 毫米波雷达的成本约为 300 美元。硬件 BOM 拆分：射频前端 MMIC（包括发射、接收、及信号处理器）的成本约占 50%、PCB（包括接收、发射天线）的成本约占 20%、DSP/FPGA 的成本约占 20%；其它硬件成本约占 10%。由此可见，MMIC 芯片与天线是 4D 毫米波雷达成本的重要组成部分，也是未来降本的关键领域。根据加特兰微电子，毫米波雷达成本在 CMOS SoC+AiP 的技术下可实现大幅缩减，较 CMOS SoC/CMOS/SiGe/GaAs 方案分别节约 25/50/70/85% 的成本。我们判断成本下降有助于 4D 毫米波雷达的量产上车，我们预测 2030 年中国市场规模有望达到 449 亿元。

国内外企业积极布局 4D 毫米波雷达，商业化进程加速

国内外企业积极布局 4D 毫米波雷达，商业化进程加速。1) MMIC 芯片目前基本来自恩智浦、英飞凌、德州仪器、Mobileye 等海外芯片设计公司，我国国产实力相对薄弱，国内厂商有加特兰微电子、清能华波、矽杰微电子等。2) PCB 方面，主要企业包括 Rogers、Isola 以及国内的沪电股份、生益电子、深南电路等。3) 整机/解决方案供应商方面，传统 Tier1 普遍采用级联技术在 4D 产品量产方面走在前列，主要为 Arbe、博世、大陆、海拉等，国内主要整机厂商包括经纬恒润、威孚高科、华域汽车、森思泰克等。国内 MMIC 芯片和软件算法仍是稀缺标的。

风险提示：智能驾驶渗透率不及预期；新产品迭代速度不及预期。本研报中涉及到未上市公司或未覆盖个股内容，均系对其客观公开信息的整理，并不代表本研究团队对该公司、该股票的推荐或覆盖。

行业走势图



资料来源：Wind，华泰研究

正文目录

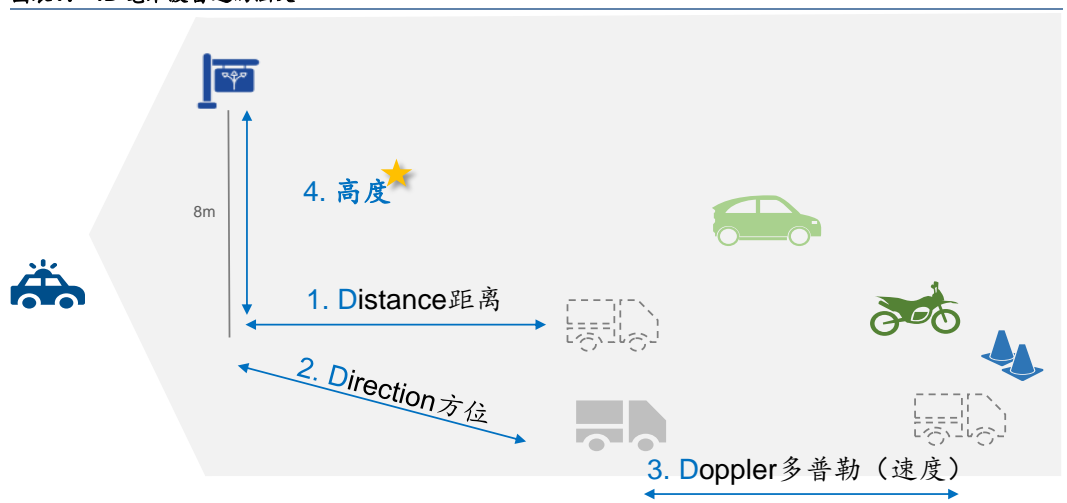
4D 毫米波	3
什么是 4D 毫米波雷达?	3
回顾: 4D 发展到了哪个阶段?	4
展望: 毫米波还有多少想象空间?	6
4D 毫米波 vs 其它传感器	8
技术上看, 替代还是互补?	8
成本上看, 共生还是共灭?	9
4D 毫米波的市场规模测算	11
4D 毫米波的技术路线探讨	12
前端收发模块 MMIC: 级联、CMOS、AiP	12
设计: 级联、单芯片、虚拟孔径	12
MMIC 工艺: GaAs-SiGe-CMOS	13
波形: FMCW、PMCW	14
天线: 分立-AoB-AiP	15
系统: 分立-模块合成-SoC 集成	16
4D 毫米波雷达产业链	18
MMIC 芯片	19
英飞凌 (IFX GR)	19
德州仪器 (TXN US)	20
恩智浦 (NXPI US)	20
加特兰微电子 (未上市)	21
4D 毫米波雷达整机/解决方案	22
Arbe (ARBE US)	22
博世 (RBOS GR)	23
大陆 (CON GR)	24
经纬恒润 (688326 CH)	24
威孚高科 (000581 CH)	25
森思泰克 (未上市)	25
PCB	26
沪电股份 (002463 CH)	26
深南电路 (002916 CH)	26
生益电子 (688183 CH)	26
风险提示	26

4D 毫米波

什么是 4D 毫米波雷达？

4D 毫米波雷达是传统毫米波雷达的升级版，4D 指的是速度、距离、水平角度、垂直高度四个维度。相比传统 3D 毫米波雷达，4D 毫米波雷达增加了“高度”的探测，将第四个维度整合到传统毫米波雷达中，这使得 4D 毫米波雷达 1) 获取信息的维度更加丰富，可以测量俯仰角度，且角度分辨率可以达到 1 度左右；2) 探测距离更长，最远探测距离可达 300 多米；3) 目标点云更密集，可以形成点云成像级的输出，进而可以使用数据驱动的方式进行图像识别。总体而言，4D 毫米波雷达具有更佳的探测能力，更高的分辨率和精度，在人工智能技术的加持下，能够实现更加智能化的感知和跟踪，从而为自动驾驶、智能交通等领域提供更加可靠的数据支持。目前，特斯拉 Hardware4.0 或将从纯摄像头的视觉方案回归到 4D 毫米波雷达的视觉方案，国内的上汽飞凡 R7、飞凡 F7、深蓝 SL03 都已经搭载了 4D 毫米波雷达，4D 毫米波雷达正在成为自动驾驶系统传感器的“明日之星”。

图表1：4D 毫米波雷达的涵义



资料来源：CSDN，华泰研究

4D 毫米波雷达探测性能包括距离、速度、方位角、俯仰角四个方面：

- 1) 在距离探测中，主要性能指标包括最大探测距离、距离精度、距离分辨率，主要影响因素是 ADC 采样率、调频斜率、输出功率、扫频带宽和信噪比等。
- 2) 在速度探测中，主要性能指标包括最大探测速度、速度精度、速度分辨率，主要影响因素是 Chirp 周期、有效帧周期和信噪比等。
- 3) 在方位角探测中，主要性能指标包括视场角、角度精度、角度分辨率，主要影响因素是天线间距、方位角和天线个数等。
- 4) 在俯仰角探测中，主要性能指标包括最大俯仰角、俯仰角精度和俯仰角分辨率；主要影响因素是天线间距、方位角和天线个数等。

4D 毫米波雷达测距三大指标、测速三大指标由雷达“一个帧的基本参数”决定。雷达性能受限于毫米波、模拟电路的性能、处理能力等因素。

毫米波雷达测速和测距性能进步主要取决于 MMIC 芯片本身性能提升。对于 4D 毫米波雷达而言，最大探测距离主要受限于 ADC 采样率、调频斜率、输出功率、系统设计等因素，这些与 MMIC 芯片本身性能、设计息息相关；距离精度和速度精度主要取决于毫米波雷达系统信噪比的提升，系统信噪比主要受到 MMIC 芯片的噪声系数、相位噪声等指标的影响。因此，MMIC 芯片的各类参数对于距离和速度的探测质量至关重要。

天线的口径决定雷达的角度分辨率，因此，天线的间距、设计方式(级联/单芯片)对于角度探测质量至关重要。

图表2：4D 毫米波雷达的四大维度及主要影响因素

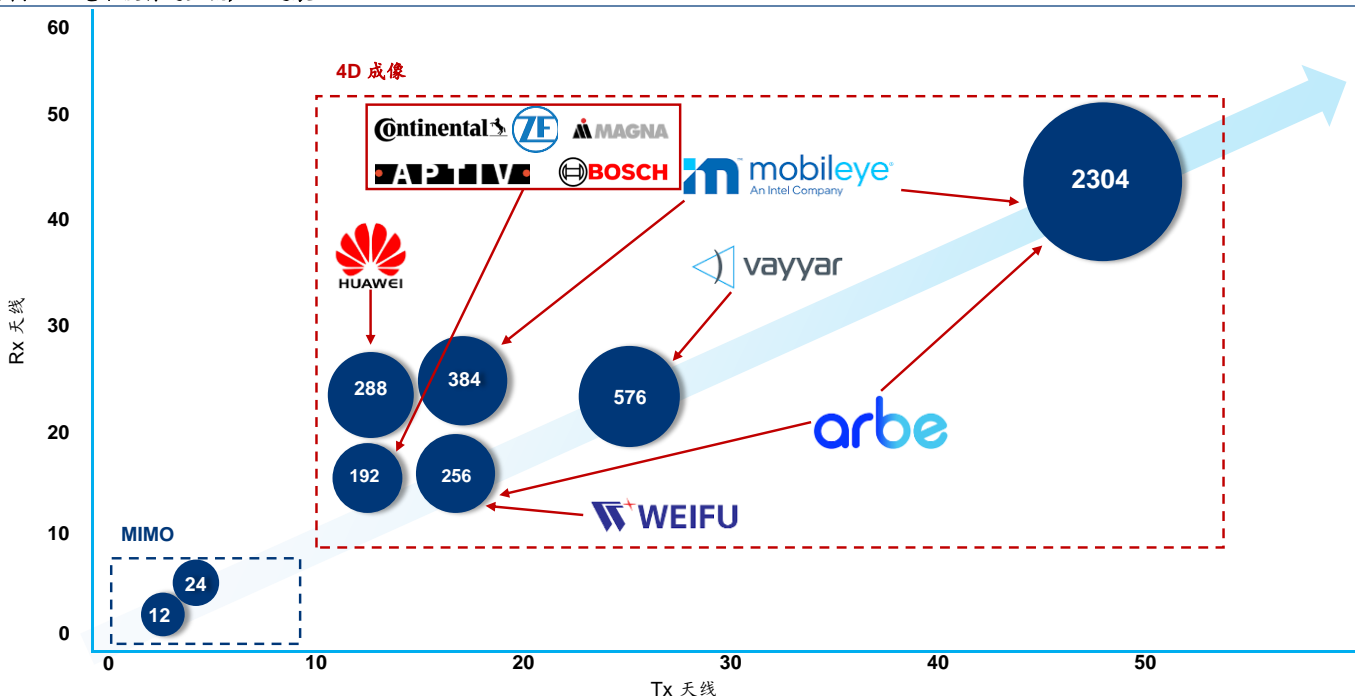
性能指标	公式	主要影响因素	参数说明
距离	最大探测距离 $d_{max} = \frac{cF}{2S} R_{max} = \sqrt{\frac{P_r G_r G_t \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{min} L}}$	ADC采样率 调频斜率 输出功率	F _c : 最大中频带宽 (取决于ADC采样率) S: 调频斜率 (S=B/T _c) B: 扫频带宽 SNR: 信噪比 c: 光速 λ: 波长 T _c : Chirp周期 T _f : 有效帧周期 N: 一个帧内包含的Chirp数
	距离精度 $\delta_R = c / 3.6B_{swep} \sqrt{2SNR}$	扫频带宽 信噪比	
	距离分辨率 $\Delta R = c / 2B$	扫频带宽	
速度	最大速度 $v_{max} = \frac{\lambda}{4T_c}$	Chirp周期	天线孔径: L=N×d N: 方位角方向上虚拟通道个数 d: 天线间距 M: 俯仰角方向上虚拟通道个数 λ: 波长
	速度探测精度 $\sigma_{res} = \lambda / 3.6NT_c \sqrt{SNR}$	有效帧周期 信噪比	
	速度分辨率 $\Delta v > \lambda / 2NT_c = \lambda / 2T_f$	有效帧周期	
方位角	视场角 $\theta_{max} = \sin^{-1}(\frac{\lambda}{2d})$	天线间距	$d = \frac{\lambda}{2}, \theta = 0^\circ$ 时, $\theta_m = \frac{2}{N}$
	角度精度 $\Delta\phi = \frac{2\pi d \sin(\theta)}{\lambda}$	天线间距 方位角	
	角度分辨率 $\theta_{res} = \frac{\lambda}{Nd \cos(\theta)}$	天线间距 天线个数	
俯仰角	最大俯仰角 $\theta_{max} = \sin^{-1}(\frac{\lambda}{2d})$	天线间距	$d = \frac{\lambda}{2}, \theta = 0^\circ$ 时, $\theta_m = \frac{2}{N}$
	俯仰角精度 $\Delta\phi = \frac{2\pi d \sin(\theta)}{\lambda}$	天线间距 方位角	
	俯仰角分辨率 $\Delta\theta_{res} = \frac{\lambda}{Md \cos\phi}$	天线间距 天线个数	

资料来源: CSDN, 华泰研究

回顾：4D 发展到了哪个阶段？

目前，4D 毫米波雷达主流产品一般采用 2 片或 4 片 MMIC 级联的技术方案，也有部分厂商采用单芯片集成的技术方案。其中，4 片级联的 4D 毫米波雷达最为主流，它具有 12 个发射天线，16 个接收天线(12 发 16 收)，192 个通道，其方位和俯仰皆可达到 1 度左右的分辨率，理论上可以达到 0.1 的精度，最远探测距离可达 300 多米，代表性生产商有德国大陆、采埃孚、麦格纳、安波福和博世。2021 年，华为在上海车展发布 12 发 24 收的 4D 毫米波雷达，采用 4 片 3 发 6 收的芯片级联而成。以色列公司 vayyar 采用单芯片技术方案，通过密集天线阵列来实现更高、更好的效果，推出了 24 发 24 收，576 通道的 4D 毫米波雷达。以色列雷达供应商 Arbe 研制了目前最大的 48 发、48 收、2304 通道的 4D 毫米波雷达，配合其自研专用处理器芯片，大大提升了毫米波雷达系统的角度分辨率。

图表3：毫米波雷达主流产品进展



资料来源: 各公司公告, 华泰研究

毫米波按照安装位置分可分为前向雷达与角雷达。已有部分厂商在前向雷达产品中引入俯仰维度。目前，大陆集团的 ARS540，博世的第五代、森思泰克的 STA77-6、福瑞泰克的 FVR40 等产品都支持俯仰角度探测，其中在分辨率上，性能较高的毫米波雷达产品是福瑞泰克的 FVR40，支持1度的角度分辨率；在精度上，性能较高的产品是大陆集团的 ARS540，可以达到 0.1 度的角度精度。在这些毫米波雷达中，最远探测距离可达 300 米。角雷达的性能要求没有前向雷达苛刻。博世的第五代引入了俯仰维度，但其角度分辨率较差，且最大探测距离为 160 米。我们认为，随着智能驾驶技术的不断发展，4D 毫米波雷达的性能或将得到进一步的优化，渗透率有望提升。

图表4：各公司前向毫米波雷达对比

型号	ARS540	ARS430	ARS408	ARS404	第五代	STA77-5	STA77-6	FVR40	MDR	天端座(短距)	天端座(长距)	AMRR200	CTLRR-220Plus	CTLRR-220	CTLRR-410	K77
厂商	大陆集团	大陆集团	大陆集团	大陆集团	博世	森思泰克	森思泰克	福瑞泰克	纵目科技	蛮酷	蛮酷	行易道	承泰科技	承泰科技	承泰科技	木牛
类型	前雷达(4D)	前雷达	前雷达	前雷达	前雷达	前雷达	前雷达	前雷达	前雷达	前雷达	前雷达	前雷达	前雷达	前雷达	前雷达	前雷达
频率	77GHz	77GHz	77GHz	77GHz	77GHz	77GHz	77GHz	77GHz	77GHz			77GHz	77GHz	77GHz	77GHz	77GHz
最大探测距离	300m	250m	170m	170m	210m	210m	280m	300m	210m	80m	250m	200m	250m	220m	220m	200m
距离精度	±0.1~±0.3m	0.1m	±0.2m	±0.1m	0.11-0.15m	0.23m	0.2m	0.1m	0.1m	0.16m	0.16m	±0.15m	±0.1~±0.25m	±0.1~±0.2m	±0.1~±0.2m	0.5m
距离分辨率	0.4m	0.39m	0.75m	0.4m	0.21-0.29m	0.9m		0.1m	0.2m	0.33m	0.33m	0.5m	0.29-0.98m	0.25-0.85m	0.25-0.5m	
水平视场角	120°	18°	18°	18°	120°	30°	120°	120°	120°	120°	24°	15°~45°	9°~45°	9°~45°	9°~45°	50°
方位角精度	±0.1°	±0.1°	±0.1°	±0.1°	0.1°	±0.3°	±0.2°	0.5°		0.3°	0.3°	±0.3°	±0.2°	±0.2°	±0.15°~±0.25°	0.37°
方位角分辨率	1.2°	1.6°	3.3°	4.6°	3°	3°	2°	1°		4°	4°	3°~7°	3°	3.3°	1.5°~2.5°	
最高速度	400km/h	400km/h	400km/h	400km/h		400km/h	-400~200km/h	-110~70m/s	±240km/h			-260~130km/h	-400~200km/h	-400~200km/h	-400~200km/h	-180~180km/h
速度探测精度	±0.1km/h	±0.1km/h	±0.1km/h	±0.1km/h	0.06m/s	±0.03m/s	±0.03m/s		0.05m/s	0.05m/s	0.05m/s	±0.1m/s	±0.07km/h	±0.1km/h	±0.15km/h	0.1m/s
速度分辨率	0.1m/s	0.43km/h	0.28km/h	0.28km/h	0.29m/s	0.1m/s	0.09m/s	0.2m/s	0.2m/s	0.2m/s	0.2m/s	0.3m/s	0.36km/h	0.36km/h	0.5km/h	
俯仰视场角	8°		18°	18°	30°	16°	24°	30°	16°			6°	±9°	±9°	6°~10°	6°
俯仰角精度	±0.1°				0.2°	±0.6°	±0.5°	0.5°				±0.2°	±0.2°	±0.2°	±0.15°~±0.25°	
俯仰角分辨率	2.3°				6°		4°	1°				3°	3.3°	3.3°	1.5°~2.5°	

资料来源：各公司公告，华泰研究

图表5：各公司角毫米波雷达对比

型号	SRR308	第五代	STA79-1	STA79-2	SDR1	国际A	国际B	双鱼座
厂商	大陆集团	博世	森思泰克	森思泰克	纵目科技			蛮酷
森林	角雷达	角雷达	角雷达	角雷达	角雷达	角雷达	角雷达	角雷达
频率	24GHz	77GHz	79GHz	79GHz	77GHz	77GHz	77GHz	
最大探测距离	95m	160m	80m	110m	80m	110m	75m	120m
距离精度	±0.2m	0.09-1.2m	±0.35m@5m	±0.1m	±0.05m	0.1m	0.15m	0.1m
距离分辨率	1.0m	0.45-0.47m	0.75m	0.23m	0.2m	0.36m	0.3m	0.18m
视场角	150°	150°	150°	150°	150°	150°	90°	150°
角度精度	±5°	0.1~0.4°	±0.5°	±0.5°		0.3°	0.3°	0.3°
角度分辨率	14°	4.5°	13°	8.5°	6°	4°	8.5°	4°
最高速度	300km/h		55.5m/s	75m/s	±240km/h			
速度探测精度	±0.2km/h	0.04~0.06m/s	±0.14m/s	±0.13m/s	±0.05m/s	0.1mps	0.1mps	0.05mps
速度分辨率	1.2km/h	0.23-0.24m/s	0.28m/s	0.3m/s	0.13m/s	0.2mps	0.2mps	0.2mps
俯仰视场角	12°	30°	12°	12°	30°			
俯仰角精度		0.4°						
俯仰角分辨率		6°						

资料来源：公司公告，华泰研究

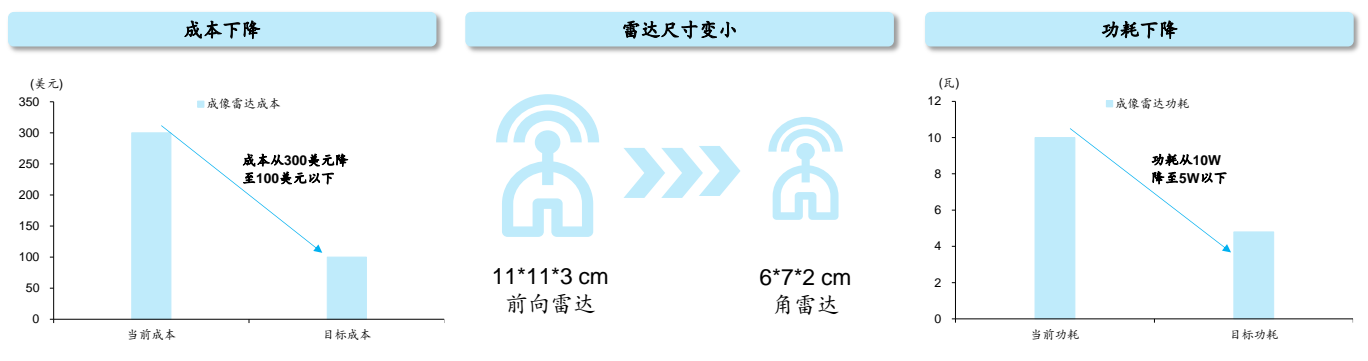
展望：毫米波还有多少想象空间？

我们认为，4D 毫米波雷达未来的发展趋势是成本/雷达尺寸/功耗的下降与产品性能的提升。

- 1) 成本方面：Yole 预测，4D 成像雷达当前的成本约为 300 美元，未来的成本目标是 100 美元。我们认为，4D 毫米波雷达成本的下降或将主要来自于：①设计层面，CMOS 工艺的改进、天线封装技术的优化、MCU+DSP 在 SoC 上的系统集成；以及②工程层面，技术成熟度提升，规模效益带来的成本摊薄。
- 2) 尺寸方面：Yole 认为，可接受的 4D 毫米波前向雷达的尺寸为 11*11*3cm，角雷达的尺寸为 6*7*2cm。车载毫米波雷达的尺寸受限，我们认为通过算法的优化、天线内置等方式可以在保障性能的前提下，压缩尺寸，便于车企进行灵活的设计安装。
- 3) 功耗方面：Yole 测算，4D 毫米波雷达当前功耗约为 20W。但考虑到车载传感器、通信模块数量的增加，单颗功耗下降或将便于整车系统设计。Yole 预测，4D 毫米波雷达单颗功耗有望降至 10W 以下。随着汽车电气化的发展，设备的功耗将变得愈发重要。

此外，4D 毫米波雷达的灵活性与可扩展性，多目标检测的能力也有望得到提升。

图表6：4D 毫米波雷达的发展路径



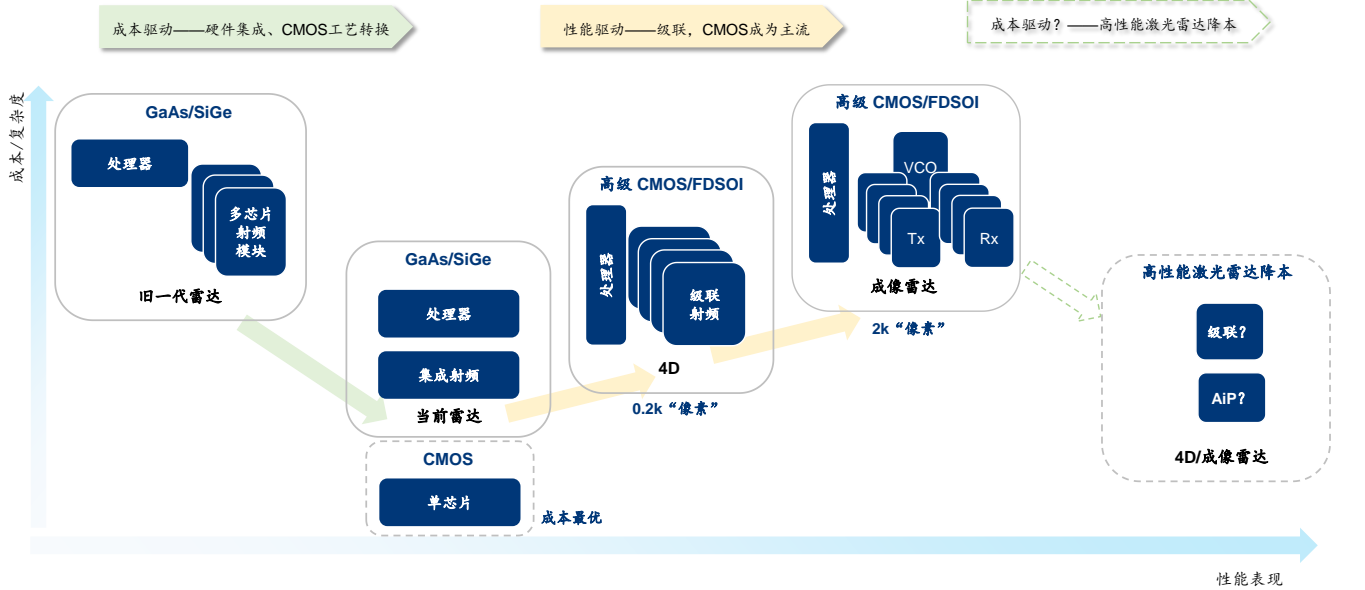
资料来源：Yole 预测，华泰研究

毫米波雷达始终在寻求性能与成本的平衡。我们可以将毫米波雷达的发展拆分成成本/性能两个驱动力的相互作用：

- 1) **成本驱动**（从基于 GaAs 的传统雷达到基于 CMOS 的单芯片集成方案）：探寻了成本最优解。为了降低成本，采用了硬件集成、CMOS 工艺转换，工艺改进的同时提高了雷达的性能表现。
- 2) **性能驱动**（从 CMOS 单芯片集成到 4D 成像雷达）：为了最优化雷达的性能表现，级联，CMOS 成为主流；算法优化；信号收发虚拟通道数量提高；点云密度提升，部分成像级雷达像素升级到 2k。毫米波雷达的复杂度与成本均有所上升。

我们认为，4D 成像毫米波雷达或将进入新一轮的成本驱动发展阶段。在物理设计、天线性能设计、电连接、封装工艺和材料、散热处理、可靠性与自动化测试等方面进行持续优化，推出可大规模量产的高性能毫米波雷达解决方案。

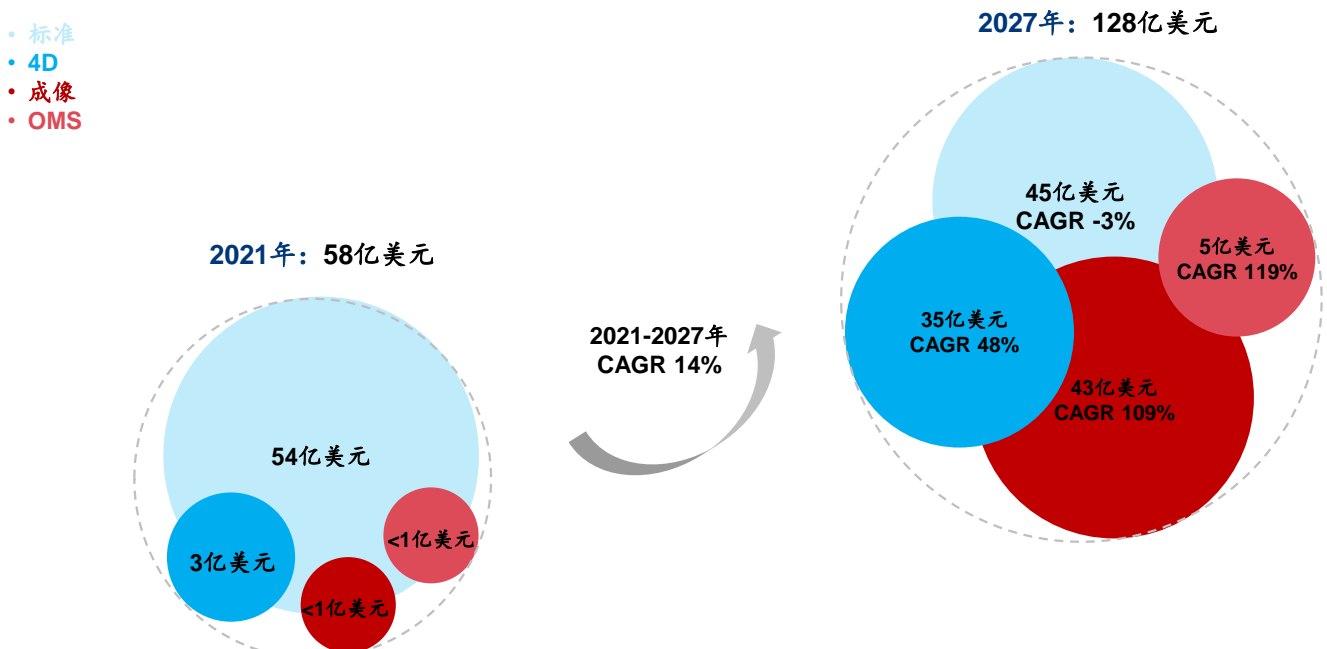
图表7：4D 毫米波雷达的发展路径



资料来源：Yole 预测，华泰研究

从市场空间的角度看，全球毫米波雷达市场增长潜力大。根据 Yole，2021 年全球毫米波雷达市场规模为 58 亿美元；其中标准/4D/成像/OMS 毫米波雷达分别为 54/3/<1/<1 亿美元；预计到 2027 年全球毫米波雷达市场规模有望到达 128 亿美元；2021-2027E 的 CAGR 为 14%；其中标准/4D/成像/OMS 毫米波雷达分别为 45/35/43/5 亿元，2021-2027E 的 CAGR 分别为-3/48/109/119%

图表8：毫米波雷达市场规模



资料来源：Yole 预测，华泰研究

4D 毫米波 vs 其它传感器

技术上看，替代还是互补？

我们认为性能上看，4D 毫米波雷达未来或可在分辨率上逼近 16-64 线的激光雷达。4D 毫米波相较于激光雷达的主要优缺点有：

优点：1) 不受天气影响。毫米波的分辨率越高，穿透能力越强、大气衰减小、受雨雪烟尘等天气影响小，故而毫米波雷达具有全天候的工作能力。**2) 测速。**可通过多普勒效应直接测速，并且测速精度较高，可以对摄像头等其他传感器形成互补。**3) 成本低。**4D 毫米波雷达主流方案是基于硅基的 CMOS，成本较激光雷达更低。**4) 测距长。**4D 毫米波雷达可实现 300m 甚至更远范围的覆盖，激光雷达一般感知距离在 210-250m 左右；**5) 穿透性强在一些场景上表现更优。**例如理论上可以直接通过穿透实现对前前车的识别与探测。

缺点：1) 性能不及激光雷达。目前 4D 毫米波雷达的方位角*俯仰角分辨率 1 *1 度左右；激光雷达可达到 0.1*0.1 度。**2) 多普勒效应的局限性。**在对横向移动的物体、距离较近的两辆车、人车等场景的识别上尚存在缺陷。

基于毫米波雷达/激光雷达分别在全天候工作能力/对物体的精准检测识别等方面有一定程度的不可替代性，我们认为长期来看，在自动驾驶、高级别辅助驾驶阶段，4D 毫米波雷达与激光雷达并非替代关系。另一方面，如何实现感知层的前融合、算法处理能力的提升或将是激光雷达、4D 毫米波雷达充分发挥技术优势，将“科技感”、“安全感”转化为自动驾驶性能提升的关键。

短期考虑低阶辅助驾驶对传感器性能的要求较低、主机厂的降本压力较大，4D 毫米波雷达或将率先实现规模化量产上车。

图表9：传感器性能对比

性能	Corner case	4D毫米波雷达	3D毫米波雷达	激光雷达	摄像头
测距/测速		精度高	纵向精度高，横向精度低	精度高	可测距,精度低
感知距离		300-350m	150-200m	210-250m	150-160m
	辨别300m外的两辆车	(可探测到水平分辨率1° 探测距离>300m)	(无法探测到水平分辨率3° 探测距离<300m)	(可探测到水平分辨率0.1° 探测距离<300m)	(二维信息无法探测距离及位置)
	车前150m处悬空的红绿灯	垂直精度0.2°	垂直精度较差，无法精准判定红绿灯的位置	3D点云成像可以精准判定高度	(二维信息无法探测距离及位置)
	前前车刹车	可探测前前车的速度、距离较为准确(仅理论上可行，未有成熟应用)	可探测到前前车，但置信度低，结果容易被过滤	穿透性差	无法越过前方障碍物探测到更前方的物体
分辨率/角分辨率		7.5-60cm/小于1°	20-60cm/5°	最小1mm/最小1	-
交通标线、交通信号识别		无法识别	无法识别	无法识别	可识别
行人/物体识别		可识别	难以识别	通过3D建模,易识别	通过AI算法识别
	停放的车旁边站着一个人	(分辨率高，可分辨同一场合中的不同障碍物)	(分辨率低，无法分辨距离太近的障碍物)	(分辨率极高，可分辨同一场合中的不同障碍物)	(无穿透力，无法识别)
恶劣天气		不受天气影响	不受天气影响	特殊天气穿透差	特殊天气成像效果差
沙漠/极寒地区		-40℃-85℃	-40℃-85℃	-40℃-85℃	-40℃-80℃
光照		不受影响	不受影响	受影响	受影响
电磁干扰/屏蔽能力		EMC易受影响	EMC易受影响	不受影响	不受影响
算法、技术成熟度		较高	高	一般	高

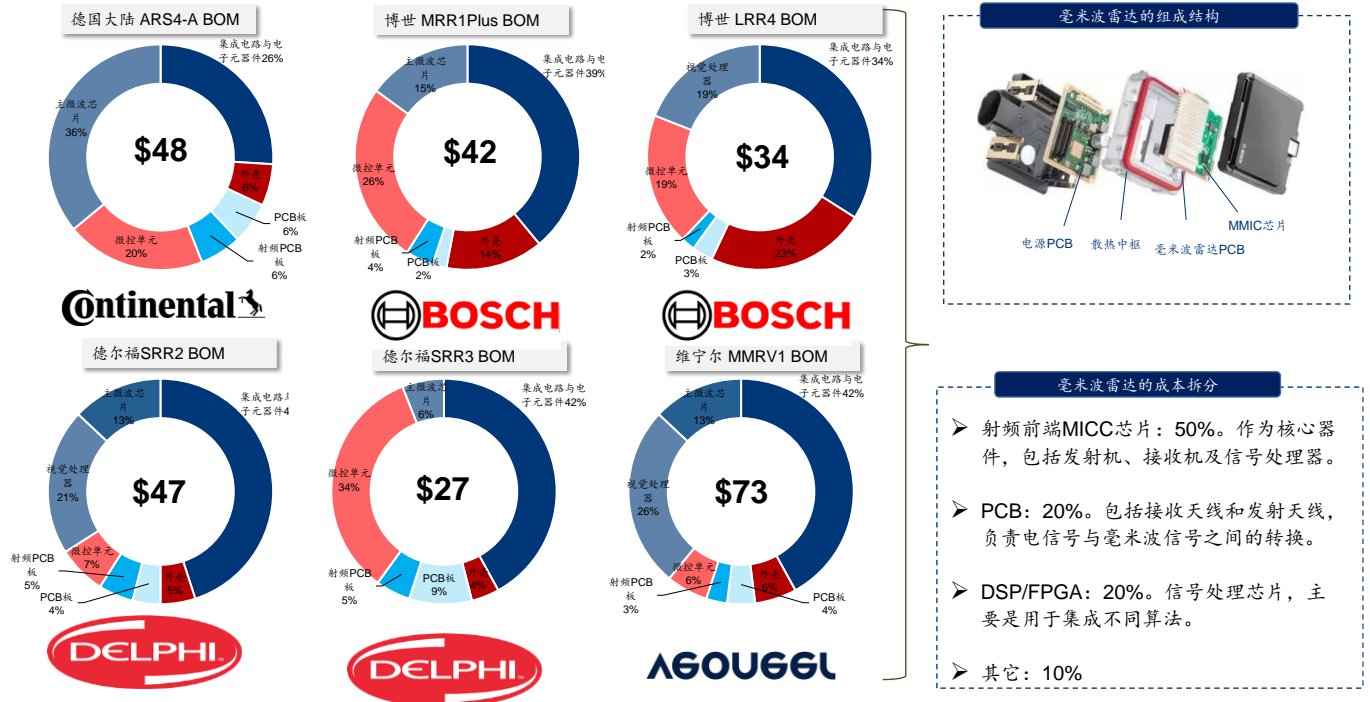
资料来源：九章智驾，EET，华泰研究

成本上看，共生还是共灭？

从单个传感器的角度看：

毫米波雷达的成本区间大致为 30-80 美元，4D 毫米波雷达的成本约为 300 美元。硬件 BOM 拆分：射频前端 MMIC（包括发射、接收、及信号处理器）的成本约占 50%、PCB（包括接收、发射天线）的成本约占 20%、DSP/FPGA 的成本约占 20%；其它硬件成本约占 10%。由此可见，MMIC 芯片与天线是 4D 毫米波雷达成本的重要组成部分，也是未来降本的关键领域。

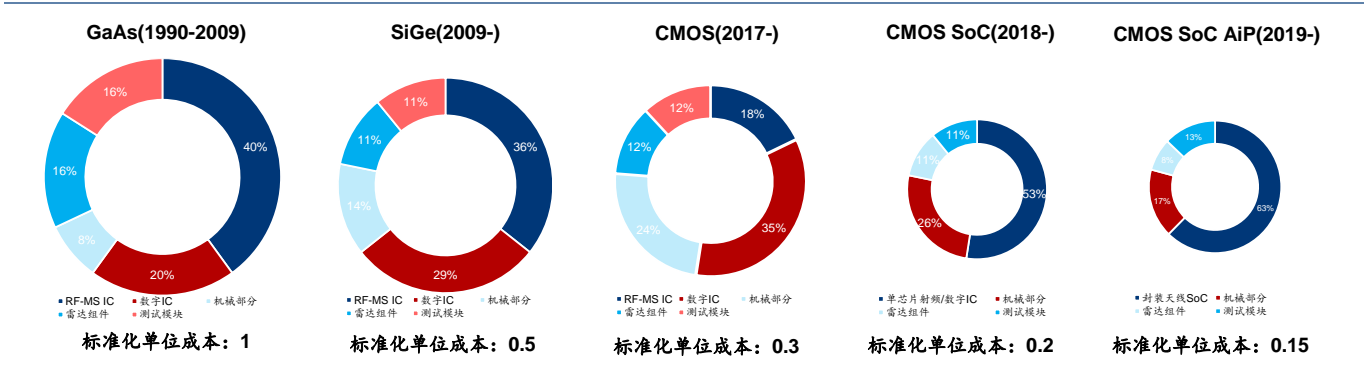
图表10：各公司毫米波雷达主流产品成本及拆分



资料来源：加特兰微电子，华泰研究

根据加特兰微电子在接受 EET 的采访时表示，毫米波雷达成本在 CMOS SoC+AiP 的技术下可实现大幅缩减，较 CMOS SoC/CMOS/SiGe/GaAs 方案分别节约 25/50/70/85% 的成本。

图表11：毫米波雷达成本在 CMOS SoC+AiP 的技术下可实现大幅缩减



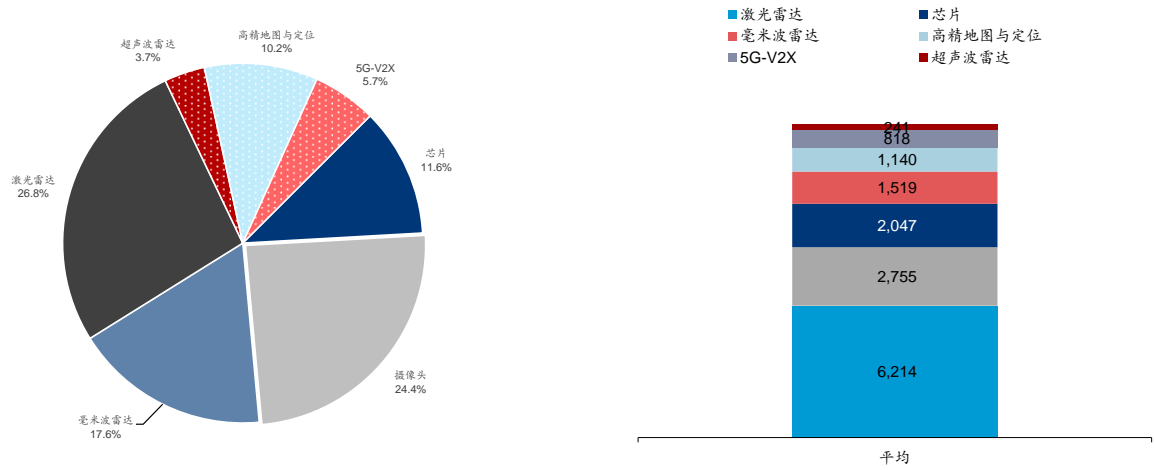
资料来源：加特兰微电子，华泰研究

考虑到车企对智能驾驶配置的选择决策不单依赖于某一种传感器的价格，而是综合考虑整个智能驾驶硬件 BOM 成本、自动驾驶数据采集的长远诉求、以及品牌形象定位。我们对智能驾驶硬件的 BOM 进行拆解。

从整个智能驾驶硬件 BOM 的角度看：

我们基于市面上主流高级别辅助驾驶的硬件配置成本测算¹。当前各品牌旗舰车型智能驾驶硬件的平均总成本为 10,531 元；其中激光雷达占 26.8%、摄像头占 24.4%、毫米波雷达占 17.6%、芯片占 11.6%、高精度地图与定位占 10.2%、V2X 占 5.7%、超声波雷达占 3.7%。

图表 12：L2/L2+智能驾驶 BOM 成本拆分



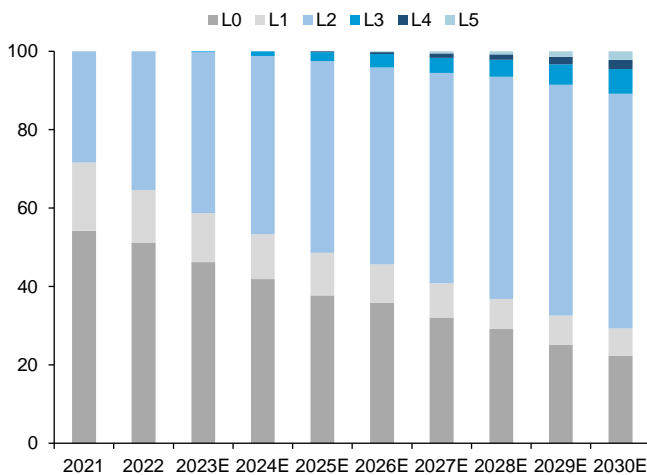
注：样本为蔚来、理想、小鹏、问界、极氪、智己、飞凡、广汽埃安、瑞虎、红旗、岚图、极狐、丰田、大众、现代、宝马、福特、凯迪拉克 L2/L2+级别车型
资料来源：公司公告，华泰研究

¹注：样本为蔚来、理想、小鹏、问界、极氪、智己、飞凡、广汽埃安、瑞虎、红旗、岚图、极狐、丰田、大众、现代、宝马、福特、凯迪拉克 L2/L2+级别车型

4D 毫米波的市场规模测算

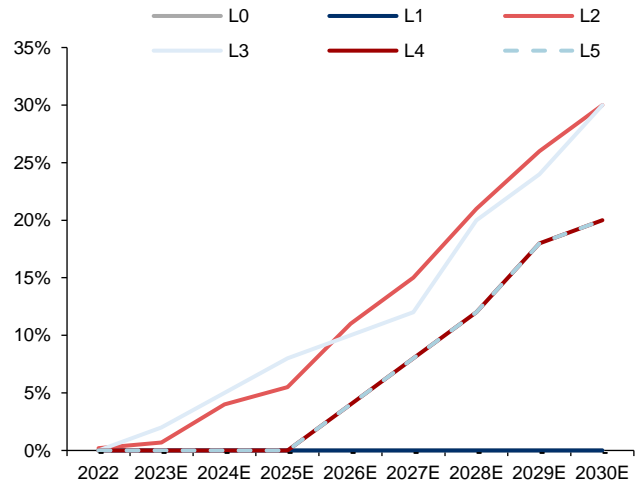
- 1) 汽车销量：**根据公安部 2022 年 3 月数据，我国千人汽车保有量约为 210 辆，距离发达国家每千人四百辆的汽车保有量仍有差距。叠加经济复苏等宏观因素向好，我们预测 2022-2030 年中国新能源汽车销量的 CAGR 为 20%；整体汽车销量的 CAGR 为 2%，维持低个位数增长。
- 2) 智能驾驶：乘用车 L2 级辅助驾驶将成为标配。**考虑到 L3 级以上级别自动驾驶所面临的法规、权责、以及技术长尾问题，我们预测 2025 年之前，辅助驾驶配置向 L2/L2+ 级别升级（ADAS）将是大规模商业化落地的主要方向。具体而言，我们预测 L0/L1 级车型将向 L2 升级，L2 以下级别渗透率将由 2021 年的 71.6% 下降到 2030 年的 29.3%，而 L2 级别智能驾驶渗透率将由 2021 年的 28.4% 上升至 2030 年的 59.9%，L3 及以上级别智能驾驶取得一定的突破。
- 3) 4D 毫米波雷达：**受汽车智能化趋势的影响，我们预测 2030 年中国 4D 毫米波雷达市场规模有望达到 449 亿元。

图表13：中国汽车销量预测-分智驾级别



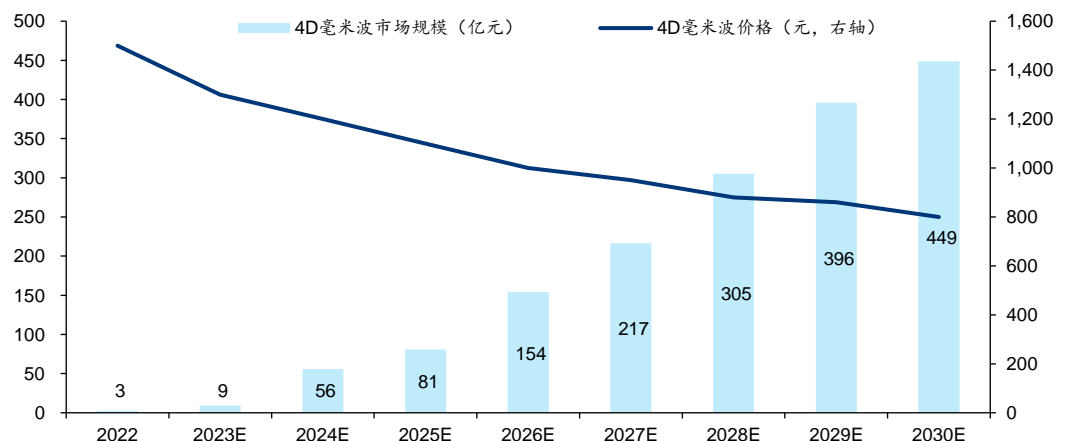
资料来源：中汽协，华泰研究预测

图表14：4D毫米波雷达渗透率预测-分智驾级别



资料来源：中汽协，华泰研究预测

图表15：中国 4D 毫米波雷达市场规模预测



资料来源：中汽协，华泰研究预测

4D 毫米波的技术路线探讨

前端收发模块 MMIC：级联、CMOS、AiP

设计：级联、单芯片、虚拟孔径

4D 毫米波雷达的技术路线主要分为三种，分别是多级联、级联+虚拟孔径成像技术、以及集成芯片。（1）**多级联**：级联方案以成熟的标准雷达芯片为基础，在业内得到广泛应用。级联方案通常应用德州仪器、英飞凌、恩智浦等公司的标准雷达芯片，通过 2 级联、4 级联或 8 级联方式增加天线数量，形成多发多收通道。由于该方案基于成熟芯片打造，前期开发难度低，有利于加快产品上市节奏。目前，大陆集团、采埃孚、博世、安波福、华为、华域汽车等零部件供应商，均基于级联方案打造 4D 毫米波雷达。但由于级联方案由多颗芯片级联而成，产品尺寸较大、功耗较高。另一方面，天线之间存在互相干扰的问题，零部件供应商需要解决信噪比较低的问题。

（2）**集成芯片**：集成芯片方案集成度更高，对技术应用的要求提升。集成芯片方案通过将多发多收天线集成在一颗芯片中，以 ASIC 芯片实现上述功能。与级联方案相比，集成芯片方案集成度更高，有利于大幅缩小 4D 毫米波雷达的体积，降低产品功耗。但由于芯片方案尚未完全成熟，该方案成本较高。根据 Vehicle 数据，现阶段集成芯片方案的 4D 毫米波雷达单价约为 300-400 美元，级联方案则为 150-200 美元。同时，采用集成芯片方案的厂商需要解决天线密集布置、天线之间互相干扰等问题，对技术应用的要求更高。目前，Arbe、Uhnder、Vayaar 为该技术路线的代表性企业。

（3）**级联+虚拟孔径成像**：级联+虚拟孔径成像方案通过算法实现天线数量倍增。对于传统毫米波雷达而言，产生多种波形的唯一方法是增加接收天线数量。级联+虚拟孔径成像方案在标准雷达芯片的基础上，借助虚拟孔径成像算法进行相位调制，使得每根接收天线在不同时间产生不同的相位响应，从而将原有物理天线虚拟至十倍甚至数十倍，角分辨率能够从 10°提升至 1°。与级联方案相比，该方案使用的芯片数量更少，有利于缩小产品尺寸，降低产品功耗。与集成芯片方案相比，该方案使用的芯片更加成熟，且不依赖于特定厂商的芯片方案，兼容度更高。该方案在虚拟孔径成像算法、天线布局等方面具有较高壁垒，目前的主要参与者为傲酷和几何伙伴。

图表16：前端收发模块 MMIC：级联、单芯片、虚拟孔径



资料来源：《4D 成像毫米波雷达系统的发展与趋势》（DrWang, 2022），华泰研究

级联方案开发难度低、产品落地快，成为国内外主流技术路线。TI 在公司早期推出的毫米波雷达芯片 AWR1243 中通过发射 FMCW 信号来探测目标的距离和速度，而使用时分波形的方式将三个发射和四个接收构成的 12 个虚拟通道来探测角度，然而受限于角度分辨率，其获取的目标信息有效。而毫米波雷达系统级联方案，通过将四个三发四收的单个 MIMO 芯片级联方案可以构成 12 发 16 收的 MIMO 雷达阵列，此时雷达系统的虚拟通道数可从 12 提升到了 192，该方法可以极大地提升雷达系统的角度分辨率。目前大部分毫米波雷达公司，包括国内、国外、传统、头部的雷达供应商，都采用级联的方式实现，一般采用 2 片或者 4 片级联的技术方案。级联的方式很多时候比单芯片方式更合适，效果和可行性更好。比如一个芯片的集成度非常高，单个芯片就要做得很大，因为单入单出非常占面积，成本也会很高。另外一个问题就是单芯片天线通道高频段耦合互耦非常强，这是一个很不好的设计。即使通过精心设计消除互耦，也存在同一芯片中通道拉的远的传输距离远导致损耗大的问题，但如果采用分布式或级联的解决方案，就能很好的解决这个问题。

MMIC 工艺：GaAs-SiGe-CMOS

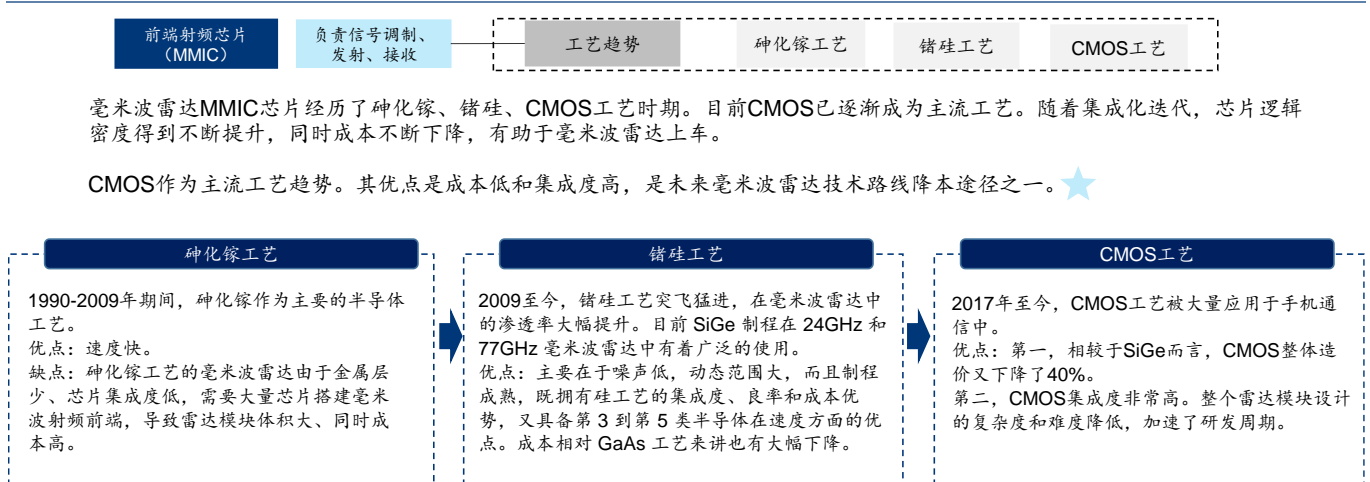
MMIC 芯片工艺改进（GaAs-SiGe-CMOS）推动车载毫米波雷达系统成本持续下行。

1) GaAs 工艺时代（1990 年-2009 年）：早期 PCBA 上大部分的器件都可以使用硅来制造，只有射频部分没有办法使用，主流都是采用砷化镓（GaAs）的工艺来制造；由于砷化镓工艺所需要的材料比较稀缺，不管是材料成本和制造成本都比较高，对于生产线的要求也很高。因此在 2009 年之前，毫米波雷达中的前端射频芯片最初也是使用的 GaAs 工艺，而且集成度很低，一个毫米波雷达需要 7-8 颗 MMICs、3-4 颗 BBICs。

2) SiGe 工艺时代（2009 年至今）：SiGe（锗硅）拥有硅工艺的集成度、良率和成本优势，从 2009 年开始 SiGe 工艺逐渐代替 GaAs 工艺，毫米波雷达前端射频芯片的集成度大幅提升，一个毫米波雷达只需要 2-5 颗 MMICs、1-2 颗 BBICs，毫米波雷达整个系统成本降低 50%。

3) CMOS 工艺时代（2017 年至今）：最初 CMOS 工艺没法用在毫米波雷达芯片，是因为不能工作在高频中，以 180nm 为例，SiGe 可以工作在 180GHz 以上，而 CMOS 工作频率只能达到 40GHz；直到 2010 年工艺进步到 40nm，才使得 CMOS 用于 77GHz 毫米波雷达成为可能。由于 CMOS 晶圆价格便宜且集成度非常高，一个毫米波雷达只需要 1 颗 MMIC 芯片、1 颗 BBIC 芯片。

图表 17：前端收发模块 MMIC 工艺：GaAs-SiGe-CMOS



资料来源：加特兰微电子，Yole《Automotive Radar Comparison 2020》，华泰研究

波形：FMCW、PMCW

目前车载毫米波雷达多采用连续调频式（FMCW）。顾名思义，调频连续波是连续发射调频信号，以测量距离、角度和速度等。在该方法中，在特定周期 T 内对特定频率的连续波进行调频，同时传输该连续波。以这种方式传输的信号可以被视为“带有时间戳”。发射波到达目标，其中一部分被反射。雷达接收到的反射波与原始信号混合、比较，进行信号处理。相对其他电磁波雷达，调频连续波雷达发射功率较低、成本低且信号处理相对简单，被毫米波雷达厂商广泛使用。

图表18：前端收发模块 MMIC 波形：FMCW、PMCW

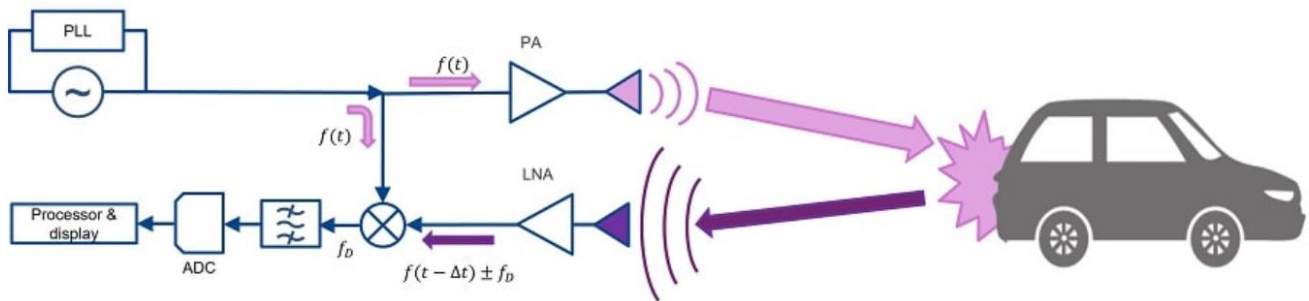


- FMCW调频连续波是目前波形设计的主流形式
- PMCW（调相连续波方案）通过多天线同时发射正交相位编码信号的方式来探测目标的距离和速度。该方案不仅可以探测更远距离（有效探测距离可达500m左右），同时可有效抗除雷达与雷达之间的相互干扰。★

	测量距离	测量精度	测量复杂度	成本	电磁波能量辐射图	鬼影（旁瓣影响）	相位噪声敏感度	ADC分辨率	ADC速度/IF宽带	功率谱密度	干扰敏感性	多发多收 TX正交	通信能力	功耗	业界接受度	市场准入壁垒
FMCW调频连续波	远	高	较高	较低		++	+	++	++	+	+	++	+	+	+++	+
PMCW调相连续波	更远	更高	较高	较低		+	++	+	+	+++	+++	+	++	++	+	++

资料来源：九章智驾，华泰研究

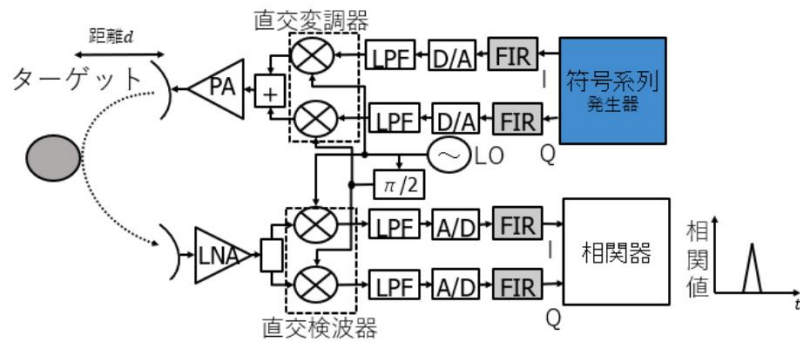
图表19：FMCW 汽车雷达 - 原理和组件



资料来源：Renesas，华泰研究

调相连续波（PMCW）雷达会根据码序列，由正交调制器对载波进行相位调制后发送，接收来自目标的反射信号，由正交检测器根据发送的载波信号进行正交检波，在 LPF 中消除谐波。用 ADC 将检波输出的实部 (I) 和虚部 (Q) 转换成数字信号，用数字滤波器进行频带限制后，用相关器计算发送码系列和接收码系列的相关值，通过峰值检测来检测目标。PMCW 毫米波雷达技术,相较于传统的 FMCW 雷达，具备探测距离更远、分辨率更高、抗干扰能力更强等优势。目前，Uhfnder 有一款 28nm，具有 12TX/16RX 通道收发器的产品，使用自己的软件来实现带数字编码调制 (DCM) 的相位调制连续波形 (PMCW)，有助于通过使用几乎独特的相位编码探测信号来消除相互的雷达干扰。

图表20: PMCW 雷达的结构



资料来源:《Zadoff-Chu 系列を用いた PMCW レーダの基本特性評価》(岡田浩平, 2018), 华泰研究

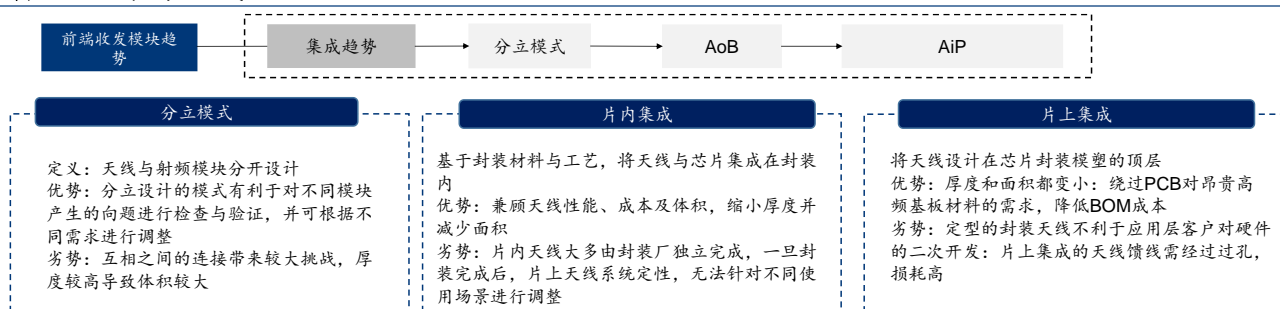
天线: 分立-AoB-AiP

射频前端收发模块集成有分立模式、AoB、AiP 三次技术路线。AoB(板载天线)是指将天线贴在高频 PCB 板上; AiP(封装天线)是指将天线和芯片集成封装到一起, 天线采用 IC 封装工艺制作。相比于 AoB, AiP 具有以下优势:

- 1) 带有天线封装的雷达传感器的板级面积比采用 AoB 的传感器的天线所占板级空间的面积小约 30%。
- 2) 降低高频 PCB 基板面积, 可以降低 BOM 成本。
- 3) 由毫米波雷达芯片厂商做了天线设计部分, 毫米波雷达系统厂商无需做天线设计和开发, 可以降低工程成本。
- 4) 由于从硅芯片到天线的路径更短, 因此可以实现更高的效率和更低的功耗。

小型化、增加新的应用场景、易安装、低成本是 AiP 技术的核心优势。考虑到未来车载 4D 毫米波雷达的发展趋势, 采用 AiP 技术将带来更小的雷达尺寸、更低的雷达成本、更灵活的应用场景。

图表21: 天线: 分立模式-AoB-AiP



封装天线 (AiP) 未来会逐步替代板载天线 (AoB) ★

定义:

AiP: 基于封装材料与工艺, 将天线与芯片集成在封装内, 即天线采用IC封装工艺制作

AoB: 将天线贴在高频PCB板上, 即将天线与射频模块进行分开设计

AiP优点: (1) 成本低: 板载天线是需要使用高频基板材料的, AiP天线技术可以降低天线对高频基板材料的需求, 故可以减少高频PCB基板面积, 降低BOM成本。(2) 低功耗: 由于从硅芯片到天线的路径更短, 因此器件到天线的布线距离缩短也有利于降低功率损耗。

资料来源: 九章智驾, 封装天线技术发展历程回顾 (张跃平, 2017), 封装天线技术最新进展 (张跃平, 2018), 华泰研究

系统：分立-模块合成-SoC 集成

4D 毫米波雷达系统结构集成技术经历了分立模式、模组合成、SoC 集成三次技术升级，我们认为，SoC 集成是未来发展趋势。MMIC、DSP(数字信号处理器)、MCU(微控制器)是4D 毫米波雷达的核心部件，不同的系统结构集成技术代表了这三个部件不同的集成方式：

- 1) 分立模式：指 MMIC,DSP 和 MCU 模块都分开，可由不同的供应商提供产品
- 2) 模组合成：MMIC 与 DSP 集成，或者 DSP 与 MCU 集成
- 3) SoC 集成：SoC(SystemonaChip)是指将多个电子元件、模块或者子系统集成到一块芯片上的技术。这里指将 MMIC, DSP, MCU 集成在雷达 SoC 芯片上。

低成本、小型化、高性能、低功耗是 SoC 集成最大优势，也符合车载 4D 毫米波雷达未来的发展趋势：

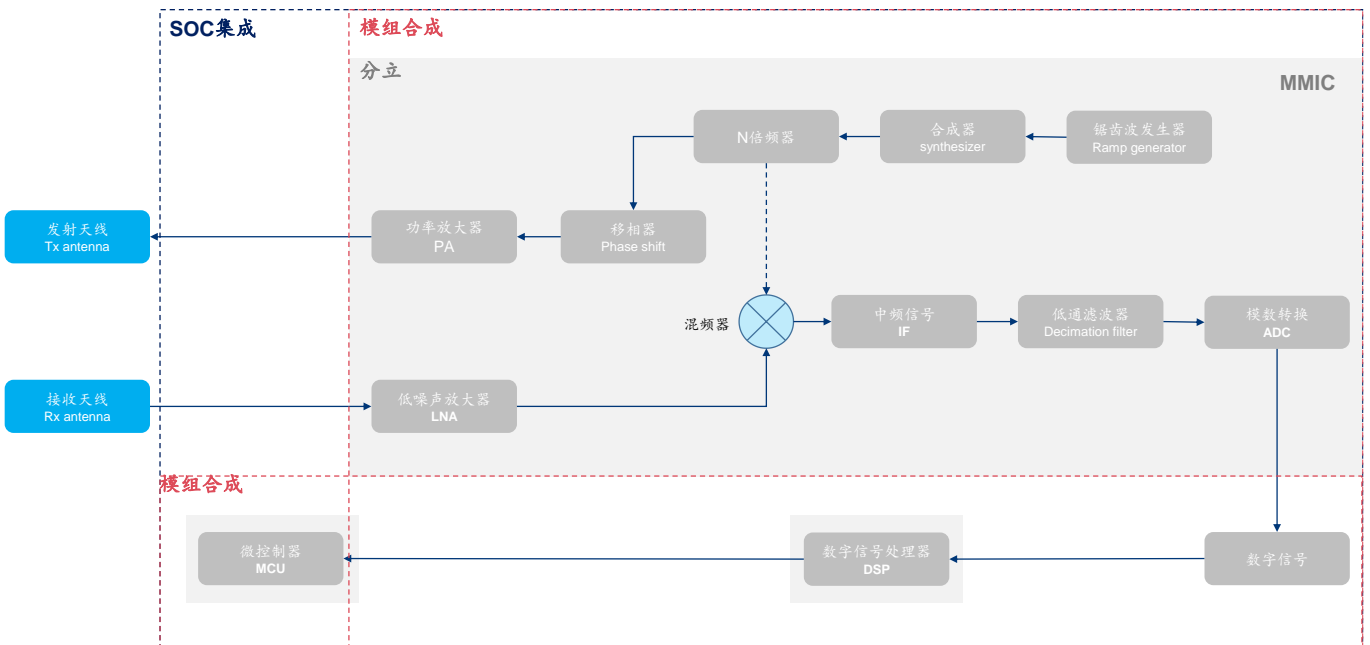
- 1) 高集成带来的直接优势就是高性价比，因为可以用单 SoC 方案解决以前用三个子系统组成的毫米波雷达传感器，这显著降低了毫米波雷达的成本，大幅拉低了车载毫米波雷达硬件的开发难度。
- 2) 将各个部件集中在一块芯片上，可以减小毫米波雷达体积。
- 3) 各部件排布更为紧密，有效较少了各部件之间信息传输的损耗，提高了信息传输效率。

图表22：系统：分立-模块合成-SoC 集成



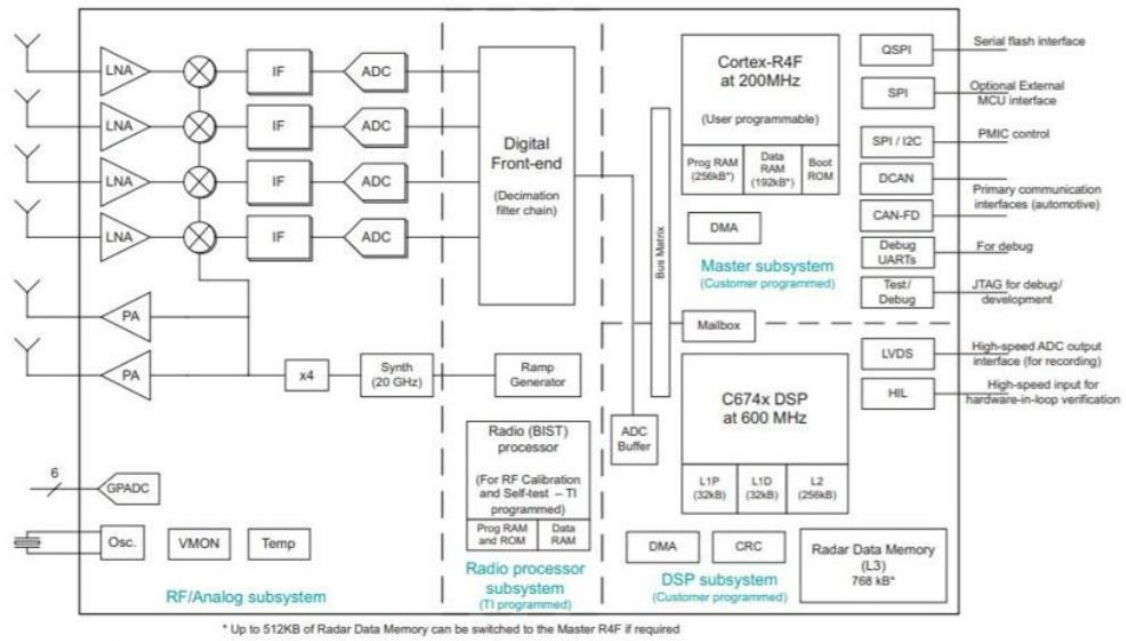
资料来源：九章智驾，华泰研究

图表23：4D 毫米波雷达系统



资料来源：EET，华泰研究

图表24：德州仪器（TI）AWR1642 毫米波雷达芯片的高级架构框图

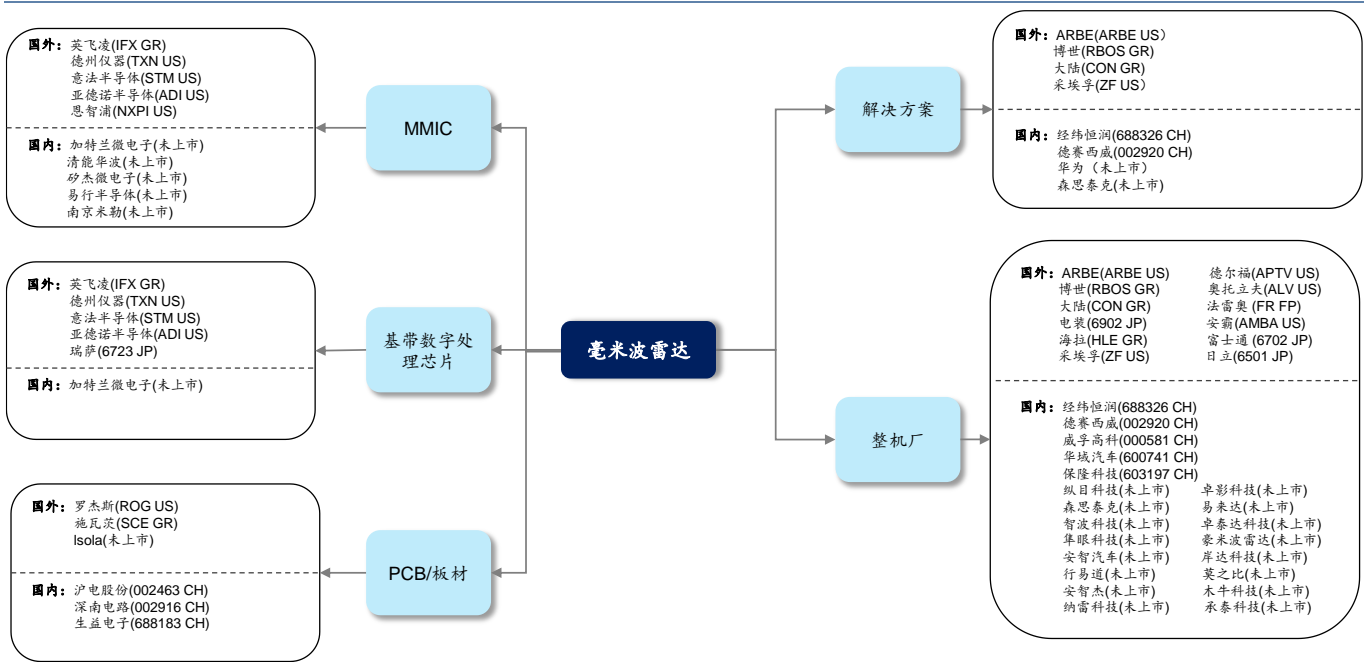


资料来源：德州仪器，华泰研究

4D 毫米波雷达产业链

毫米波雷达产业链主要分为上游射频 MMIC 芯片、高频 PCB、处理芯片以及后端算法等相关企业，中游包括成品毫米波雷达的生产企业，下游则为主机厂。1) MMIC 芯片目前主要来自恩智浦、英飞凌、德州仪器、Mobileye 等海外芯片设计公司，我国国产实力相对薄弱，国内厂商有加特兰微电子、清能华波、矽杰微电子等。2) 上游 PCB 方面，主要企业包括 Rogers、Isola 以及国内的沪电股份、生益电子、深南电路等。3) 整机/解决方案供应商方面，传统 Tier1 普遍采用级联技术在 4D 产品量产方面走在前列，主要为 Arbe、博世、大陆、海拉等，新进入厂商或依托专用芯片组和虚拟孔径方案实现换道超车，如 Arbe 产品通道数具备较强竞争力。国内主要整机厂商包括经纬恒润、威孚高科、华域汽车、森思泰克等。

图表25：毫米波雷达产业链梳理

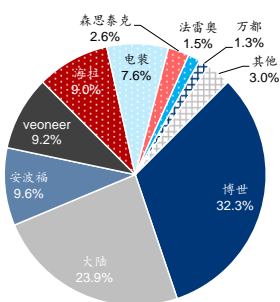


资料来源：各公司公告，华泰研究

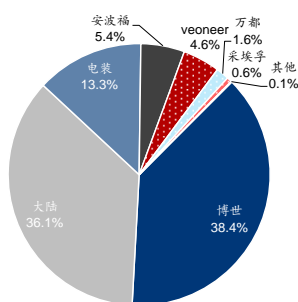
传统毫米波雷达市场：主要被海外企业主导。毫米波雷达市场主要被海外企业主导，国外企业包括博世、大陆、电装 Denso、海拉、富士通、采埃孚等。根据高工智能汽车测算，2021 年仅博世、大陆两家企业就占据了国产乘用车市场超过 50% 的市场份额。

图表26：毫米波雷达市场格局

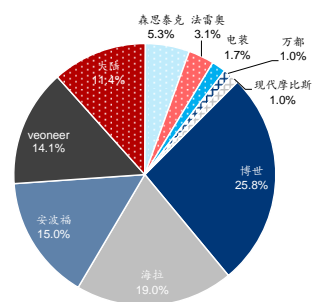
2021年国产乘用车毫米波雷达供应商市场份额



2021年国产乘用车前向雷达供应商市场份额



2021年国产乘用车角雷达供应商市场份额



资料来源：高工智能汽车，华泰研究

4D 毫米波市场：国内上车量产快，MMIC 芯片和软件算法仍是稀缺标的。国内市场方面，4D 毫米波雷达已搭载于上汽集团旗下飞凡汽车、长安汽车旗下深蓝品牌等量产车型，产品量产速度领先。但是，在车载毫米波雷达中，MMIC 芯片和软件算法等关键部件仍被国外企业掌控，而如博世、恩智浦等企业在软件硬件层面具备双重优势，各类 MMIC、DSP、FPGA、CMOS 芯片产品也以过硬的品质成为业内首选。软件方面：国内目前急缺类似华为这种能够在软件算法软件有所突破的供应商；芯片供应商方面：开始有了一定的积累，如 CMOS 供应商中国电科、加特兰、岸达科技等。

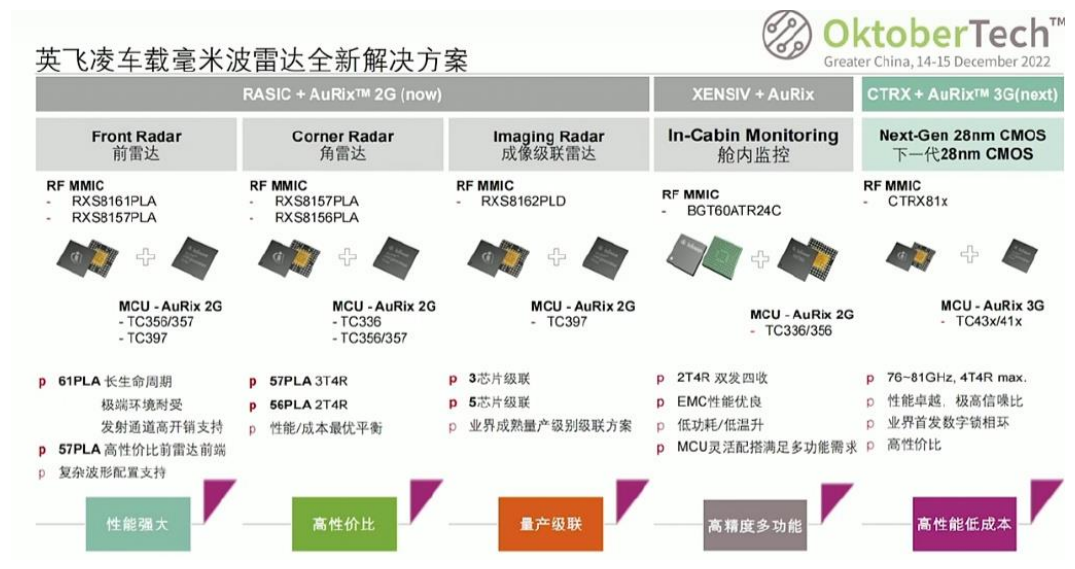
MMIC 芯片

英飞凌 (IFX GR)

英飞凌科技公司于 1999 年在德国慕尼黑正式成立，是全球领先的半导体公司之一。公司和博世合作非常紧密，长期为博世定制雷达芯片。英飞凌在 2009 年推出了全球首款基于 SiGe 技术的 77GHz 车用毫米波雷达芯片，迄今为止英飞凌在 77GHz 毫米波雷达 MMIC 市场占据 2/3 份额。2017 年英飞凌发布了 RTN7735PL, 3 发 4 收。2020 年英飞凌发布 RXS816x, 可以支持 4D 雷达级联，3 发 4 收方案。2022 年 11 月英飞凌发布新一代 CTRX8181 收发器，4 发 4 收，这也是英飞凌发布的首款采用 28nm CMOS 工艺的 MMIC，此前英飞凌所有的 MMIC 都是 130nm SiGe 工艺，CTRX8181 的发布说明英飞凌直接跳过了 40/45nm CMOS 工艺。

在毫米波雷达专用 MCU 上，英飞凌主要有 TC3x 和 TC4x，TC4x 相比于 TC3x 升级了信号处理单元 SPU，增加了可以运行机器学习算法的并行计算单元 PPU。其中 TC3x 系列中可以用做毫米波雷达专用处理器的是 TC336、TC356/357、TC397，性能最强的 TC397 可以支持 3 片/5 片 RXS8162 级联。而下一代 TC4x 系列基于台积电 28nm，首批样品将于 2023 年底提供给客户，将最快于 2024 年开启交付，其信号处理单元从上一代的 SPU2.0 升级为了 SPU3.0，使得 FFT 等信号处理运算延迟大幅减少；增加了并行计算单元 PPU，可以运行机器学习算法。

图表27：英飞凌车载毫米波雷达解决方案

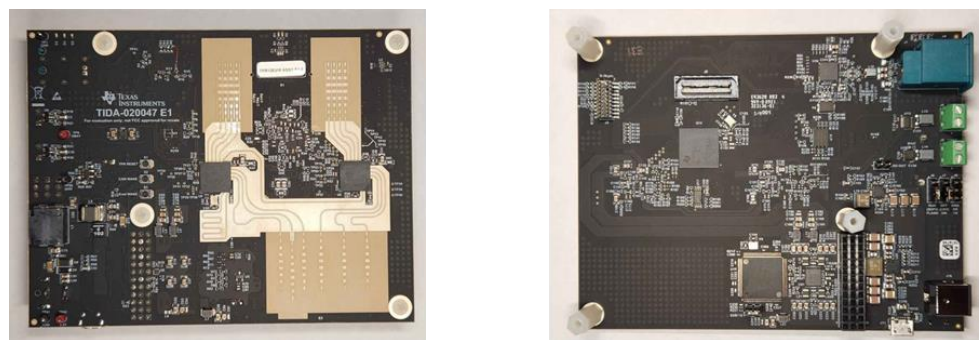


资料来源：Infineon，华泰研究

德州仪器 (TXN US)

德州仪器于 1930 年在美国德克萨斯州成立，是一家全球性的半导体公司，致力于设计、制造、测试和销售模拟和嵌入式处理芯片。TI 在 2018 年就开始提供基于 AWR2243 的 4 片级联方案，是最早布局 4D 成像毫米波雷达的厂商之一。TI 现在已经推出了两代毫米波雷达芯片产品，第一代主要用来做角雷达，第二代用于前雷达和高端前角雷达，TI 是三家芯片大厂中唯一一家已经将 MMIC 和雷达 MCU 集成在一起打包售卖的厂商：其中第一代 (AWR1XXX) 一共发布了 5 款芯片；第二代 (AWR2XXX) 有 2 款芯片，第二代 MMIC 射频性能比第一代整体高 50%，另外 SoC 数字信号处理性能也比第一代好，DSP、MCU 核心、HWA 等均进行了升级。TI 的毫米波雷达芯片集成度越来越高，集成度提升的好处在于成本下降，节省 PCB 面积。第一代产品主要用来做角雷达，其中用 AWR1642 做后角雷达，用 AWR1843 做 4D 角雷达；第二代产品用来做前雷达和高端角雷达，其中 AWR2243 用来做 4D 成像毫米波雷达，用 AWR2943 和 AWR2944 做高端前角雷达和前雷达。

图表28：德州仪器汽车 4D 成像雷达芯片设计方案



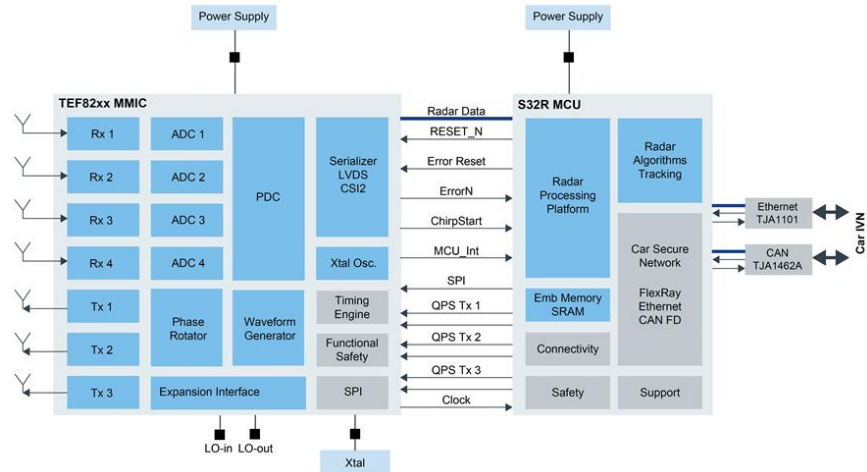
资料来源：TI，华泰研究

恩智浦 (NXPI US)

恩智浦半导体创立于 2006 年，总部位于荷兰埃因霍温，是全球领先的嵌入式应用安全连接解决方案提供商。NXP 目前主推的 MMIC 芯片一共有两代：TEF81XX 和 TEF82XX。NXP 从飞思卡尔时代就和大陆集团有长期合作，为大陆集团 ARS300 和 ARS400 系列提供射频芯片和雷达 MCU，但是为大陆提供的 MMIC 芯片不对中国销售，这一时期 NXP 提供的 MMIC 都是基于 SiGe 工艺。2018 年 NXP 开始提供基于 40nm CMOS 工艺的 MMIC 也就是 TEF810X 系列，TEF810X 系列包含 7 个型号，包括最低端的 1 发 3 收、中端 2 发 4 收、高端的 3 发 4 收。2020 年 NXP 发布了新一代 MMIC 芯片 TEF82 系列，3 发 4 收。

NXP 针对 4D 成像毫米波雷达主要有两个芯片组：(1) 第一个芯片组是 TEF82 系列，第二代 CMOS 射频芯片，预计最快 2022 年下半年量产；(2) 后端信号处理芯片 S32R45 系列和 S32R41 系列：45 系列已经在 2022 年初量产，支持 4 片 MMIC 级联；41 系列新版本芯片在 2022 年底量产，支持 2 片 MMIC 级联。S32R45 相比 S32R41 增加了 LAX 矩阵加速器，拥有 300GFlops 算力，可以支持超分辨率算法计算。

图29：恩智浦 4D 成像雷达框图



资料来源：NXP，华泰研究

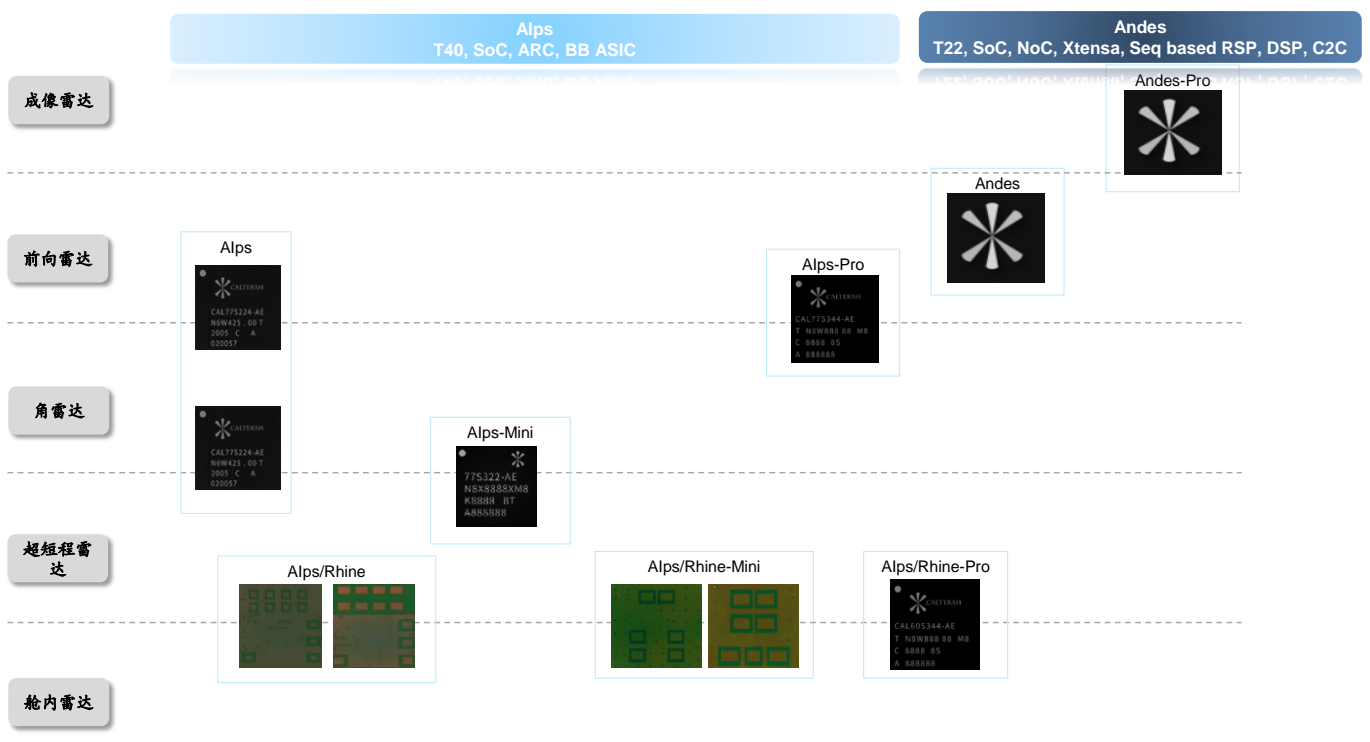
加特兰微电子（未上市）

加特兰微电子科技创立于 2014 年，是 CMOS 工艺毫米波雷达芯片开发与设计的领导者。公司汇聚了射频毫米波电路设计、雷达系统算法研发、大规模数字电路实现、高频天线设计以及汽车级芯片量产运营等领域的顶尖人才，并于 2017 年成功量产了全球首个汽车级 CMOS 工艺 77/79GHz 毫米波雷达射频前端芯片，率先实现了在汽车前装市场的突破。随着汽车自动驾驶和驾驶辅助技术的快速发展，高性能、易开发、小型化成为毫米波雷达发展的热点和趋势。加特兰率先推出了集成雷达基带处理的 SoC 芯片，为毫米波雷达传感器的开发实现带来了全新的变革。公司又进一步推出了 AiP 技术，通过在芯片封装内部集成天线阵列，减少用户天线设计和高频板材投入，并大幅缩短模块研发和生产周期，加速毫米波雷达在汽车和行业市场的普及。

公司坚持汽车级可靠性和安全性的设计理念，通过了 ISO 9001 质量体系认证和 ISO 26262 功能安全管理体系认证。产品满足 AEC-Q100 的可靠性规范，包含计算单元的 SoC 产品达到 ASIL-B 的功能安全等级。

2022 年 12 月 20 日，加特兰举办“Next Wave” Calterah Day 活动，发布了下一代全新毫米波雷达 SoC 芯片系列——Andes，代表了目前毫米波雷达技术的前沿。Andes 系列芯片可实现 4D 高端雷达以及成像雷达功能。加特兰 CEO 陈嘉澍博士在新品发布会上提到，车载毫米波雷达有三大发展趋势：小尺寸低功耗雷达、高性价比雷达和 4D 成像雷达。加特兰拥有全面的毫米波雷达芯片产品组合，可满足三大雷达发展趋势的需求。截至 2022 年 12 月 20 日，加特兰已服务超 400 家客户，与 20 余家 OEM 车企达成合作，赋能 70 余款乘用车，累计汽车芯片出货量超过 300 万片。

图30：加特兰电子毫米波雷达产品矩阵



资料来源：加特兰电子官网，华泰研究

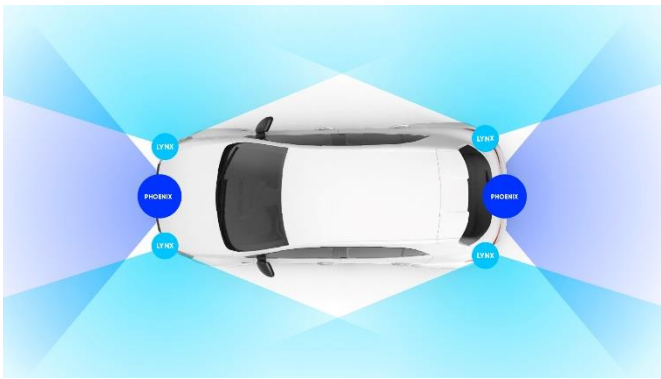
4D 毫米波雷达整机/解决方案

Arbe (ARBE US)

ArbeRobotics 是新一代 4D 成像雷达解决方案的头部企业，总部位于以色列特拉维夫，于 2021 年 10 月通过 SPAC 的方式在纳斯达克上市，是第一家在美国公开上市的汽车成像雷达公司。ArbeRobotics 公司自主开发的雷达芯片组解决方案凤凰，适用于 L2.5/L3/L4/L5 场景的 4D 点云高清成像雷达，四个维度分别为 Azimuth（水平夹角），Elevation（高程），Range（距离）和 Speed（本车速度矢量），优点是支持全天候测量，易车规，测速准，成本低，并且可以高清点云成像，达到高角分辨率，特别是高程角分辨率。Arbe 2022 年全年营收 350 万美元，同比增长 59.1%。2022 年全年的新订单营收为 160 万美元，截至 2022 年 12 月 31 日，积压订单金额为 20 万美元。2022 年全年的毛利润为 63.5%，上年同期为 36.0%，主要与规模经济、收入构成和 Arbe 逐步实现生产而降低单位成本有关。公司 2023 年的预期营收将在 500 万美元至 700 万美元之间，同比增长大约 71%。

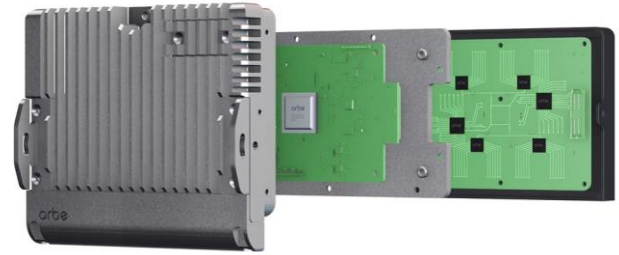
Arbe 目前一共发布了 2 款产品：48 发 48 收毫米波雷达芯片组 Phoenix，作为前雷达；以及 24 发 12 收毫米波雷达芯片 Lynx，作为角雷达。（1）Phoenix：Arbe 的毫米波雷达芯片组 Phoenix 由发射器（单颗 12 发）、接收器（单颗 24 收）、处理器三部分构成，Arbe 在 2018 年发布的 RF 射频芯片，在 2020 年发布雷达处理器。雷达处理器最多可以支持 4 颗发射器和 2 颗接收器，也就是 48 发 48 收射频信号的处理，采用格罗方德半导体公司 22nm 射频 CMOS 工艺，帧率约 30Hz。（2）Lynx：Lynx 发布于 2022Q1，Lynx 也是由发射器、接收器、专用处理芯片三部分构成，但是由于是 24 发 12 收的方案，因此虚拟通道数为 288 个，成本和性能较 Phoenix 更低，适合用做角雷达和更低价位车型前雷达。

图表31: Arbe 的雷达解决方案



资料来源: ARBE 官网, 华泰研究

图表32: Phoenix 雷达



资料来源: ARBE 官网, 华泰研究

博世 (RBOS GR)

博世集团从事汽车与智能交通技术、工业技术、消费品和能源及建筑技术相关产业，总部设在德国南部斯图尔加市，是全球领先的技术和服务供应商。2023年4月4日，博世首次在中国市场推出了其第五代雷达极致版——4D 成像雷达，采用 76-77GHz 频段，最远探测距离可达 302 米，水平视场可达 120 度，垂直视场可达 24 度。今年 3 月，博世宣布与芯片代工厂 GlobalFoundries 达成合作协议，开发用于自动驾驶功能的雷达芯片，其德国工厂将开始生产高频雷达芯片。根据计划，博世基于新解决方案的首个雷达 SoC 将于今年下半年交付，用于新一代汽车雷达的进一步测试和验证。在公司经营方面，2022 年公司营业收入为 961.6 亿美元，同比增长 12.0%，集团息税前利润为 40.3 亿美元，同比增长 15.6%。其中，集团汽车与智能交通技术业务取得了 17% 的销售增长，达到了 572.2 亿美元。

图表33: 博世 4D 成像雷达传感器



highly precise
object detection and tracking with real height measurement

20 % greater range
than the preceding generation

wide opening angle

- ▶ Detection of position, relative velocity, and direction of movement at large distances
- ▶ Direct height measurement and improved classification of vulnerable road users (pedestrians, cyclists) and potential obstacles (tires, pallets)
- ▶ Suitable for NCAP functions (diverse automatic emergency braking functions as well as adaptive cruise control (ACC) up to 250 km/h)
- ▶ Improved comfort and safety for complex partially and highly automated driving scenarios (the ends of traffic jams ...)

资料来源: BOSCH, 华泰研究

大陆 (CON GR)

大陆集团是德国运输行业制造商，主要产品为轮胎，制动系统，车身稳定控制系统，发动机喷射系统，转速表，以及其他汽车和运输行业零部件，总部设在德国汉诺威。大陆集团深耕车载毫米波雷达数十年，自 2016 年推出划时代的 ARS4XX77GHz 毫米波前向雷达和 BSD3XX24GHz 毫米波盲区检测雷达，目前前向雷达和角雷达产品已更迭至第五代，客户包括了戴姆勒、宝马、大众、丰田等知名主机厂。2020 年大陆推出了 4D 成像雷达 ARS540，采用 4 颗射频芯片级联的方式，实现 12 发射通道，16 接收通道高分辨率雷达，采用赛灵思 Xilinx 的 ZynqUltraScale+MPSoC 处理雷达信号，支持 300 米的探测距离和的视场角。在公司经营方面，2022 年公司营业收入为 428.6 亿美元，同比增长 16.7%，集团息税前利润为 21.8 亿美元，同比增长 5.2%。

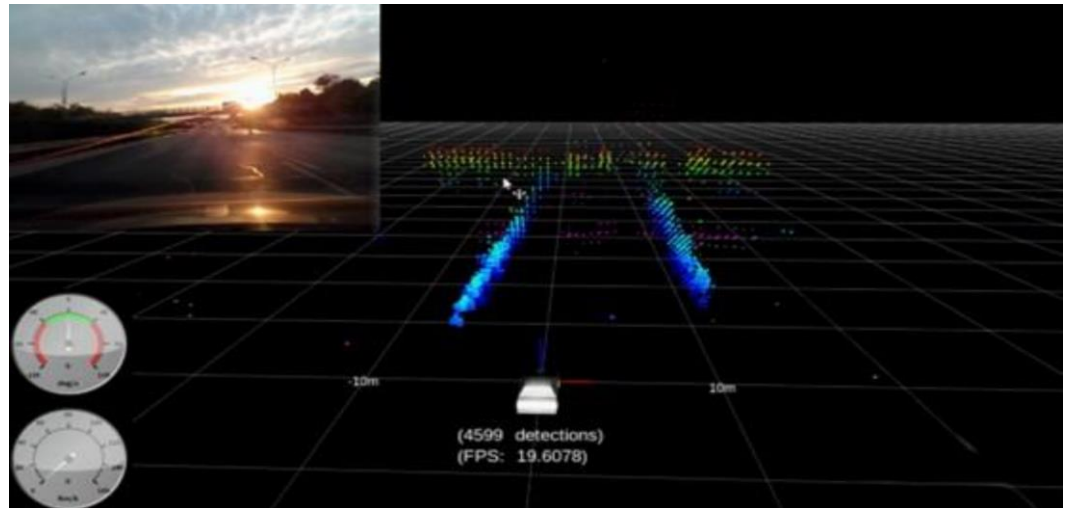
图表34：大陆 ARS540 雷达



资料来源：ConTInental，华泰研究

经纬恒润 (688326 CH)

经纬恒润成立于 2003 年，专注于为汽车、无人运输等领域的客户提供电子产品、研发服务和高级别智能驾驶整体解决方案。经纬恒润基于 Arbe 雷达芯片组开发的 4D 毫米波雷达具有 48 路发射和 48 路接收通道，探测距离达 350m，并可实现方位向 1° 和俯仰向 1.5° 的真实孔径分辨率，相比传统毫米波雷达，成像雷达分辨率提升一个数量级。通过定制专用雷达处理芯片，增加信号处理能力和数据处理能力，可提供市场上其他毫米波雷达解决方案无法实现的致密点云，媲美激光雷达的成像效果，可以满足 L3 及以上级别的智能驾驶系统的需求。根据公司官网，公司 4D 毫米波雷达研发进展顺利，且预计将于今年实现量产应用。公司已于 2022 年 11 月向 Arbe 订购 34 万个雷达芯片组，计划应用于 2023 年和 2024 年的 4D 毫米波雷达量产产品。

图表35：经纬恒润 4D 毫米波雷达探测效果


资料来源：经纬恒润官网，华泰研究

威孚高科 (000581 CH)

无锡威孚高科技集团股份有限公司，始建于 1958 年，是国内汽车零部件的著名生产厂商，中国汽车零部件三十强企业。威孚高科与 Arbe 展开合作，其 4D 毫米波雷达已获得干线物流定点项目。威孚高科同样基于 Arbe 雷达芯片组，开发集成芯片方案的 4D 毫米波雷达产品。公司官网显示，公司于 2021 年实现 4D 毫米波雷达的首批原型样件试制和交付，目前处于技术研发和市场应用快速发展阶段，并已获得干线物流项目定点。

图表36：威孚高科 4D 毫米波雷达


资料来源：ARBE 官网，华泰研究

森思泰克 (未上市)

森思泰克注册于 2015 年，是一家专业从事毫米波与激光雷达传感器智能产品研发、生产与销售的高科技企业。森思泰克在 2018 年就已经开始研发毫米波雷达 4D 成像技术。2021 年，4D 成像雷达发展势头强劲，森思泰克率先与长安基于 4D 成像前向雷达定制与开发合作，拿下新一代平台的多款车型的项目定点。2022 年森思泰克继续保持行业领先，拿下理想、红旗、吉利、长安等 4D 成像前向雷达的项目定点，也拿到了红旗的 4D 成像角雷达的项目顶点。目前，森思泰克的 4D 毫米波雷达产品包括 4 级联的 STA77-8 和 2 级联的 STA77-6，两款产品目前均已量产，森思泰克也是国内少有的实现 4D 毫米波雷达量产的企业。

图表37：森思泰克车载毫米波雷达产品


资料来源：森思泰克官网，华泰研究

PCB

沪电股份（002463 CH）

沪电股份有限公司于 1992 年在江苏省昆山市成立，专注于各类印制电路板的生产、销售及相关售后服务，产品可广泛应用于通讯设备、汽车、工业设备、微波射频等多个领域。公司紧跟汽车行业的发展趋势，提升技术能力和适用性，增强与客户在技术上的准确支持以及在业务上的长期合作，夯实在 ADAS（高级驾驶辅助系统）、动力系统电气化、汽车电子功能架构等领域高端 PCB 的竞争优势。在具体产品方面，应用于 4D 车载雷达，自动驾驶域控制器，智能座舱域控制器，车载网关等领域的产品已实现量产。沪电股份是大陆和博世的 PCB 板材供应商，目前已就 24GHz 和 77GHz 高频雷达用 PCB 产品与国际顶尖厂商 Schweizer 开展合作。

深南电路（002916 CH）

深南电路成立于 1984 年，总部坐落于中国广东省深圳市，公司经营范围包括印刷电路板、封装基板产品、模块模组封装产品等，下游应用领域广泛，覆盖通信、数据中心、工控医疗、汽车电子等领域。根据公司公告，汽车电子是公司 PCB 业务重点拓展领域之一，以新能源和 ADAS 为主要聚焦方向，主要生产高频、HDI、刚挠、厚铜等产品，应用于摄像头、雷达、电池、电控等设备。

生益电子（688183 CH）

生益电子成立于 1985 年，总部位于广东省东莞市。生益电子自成立以来始终专注于各类 PCB 的研发、生产与销售业务，是专业制作高精度、高密度、高品质印制电路板的高新技术企业。公司产品应用领域覆盖通信设备板、网络设备板、计算机服务器板、消费电子板、工控医疗板、汽车电子板等，产品行销北美、欧洲、亚太等国家及地区。根据公司公告，生益电子已经向客户提供包含 4D 雷达产品在内的多种高级辅助智能驾驶产品，目前业务发展整体向好。未来，公司将持续加大在汽车专线的投入，以应对日益增长的汽车 PCB 订单需求。

风险提示

智能驾驶渗透率不及预期；新产品迭代速度不及预期。受到技术长尾问题、汽车销量不振等因素的影响，智能驾驶软硬件迭代的速度或将慢于预期。

本研报中涉及到未上市公司或未覆盖个股内容，均系对其客观公开信息的整理，并不代表本研究团队对该公司、该股票的推荐或覆盖。

免责声明

分析师声明

本人，黄乐平、陈旭东，兹证明本报告所表达的观点准确地反映了分析师对标的证券或发行人的个人意见；彼以往、现在或未来并无就其研究报告所提供的具体建议或所表达的意见直接或间接收取任何报酬。

一般声明及披露

本报告由华泰证券股份有限公司（已具备中国证监会批准的证券投资咨询业务资格，以下简称“本公司”）制作。本报告所载资料是仅供接收人的严格保密资料。本报告仅供本公司及其客户和其关联机构使用。本公司不因接收人收到本报告而视其为客户。

本报告基于本公司认为可靠的、已公开的信息编制，但本公司及其关联机构（以下统称为“华泰”）对该等信息的准确性及完整性不作任何保证。

本报告所载的意见、评估及预测仅反映报告发布当日的观点和判断。在不同时期，华泰可能会发出与本报告所载意见、评估及预测不一致的研究报告。同时，本报告所指的证券或投资标的的价格、价值及投资收入可能会波动。以往表现并不能指引未来，未来回报并不能得到保证，并存在损失本金的可能。华泰不保证本报告所含信息保持在最新状态。华泰对本报告所含信息可在不发出通知的情形下做出修改，投资者应当自行关注相应的更新或修改。

本公司不是 FINRA 的注册会员，其研究分析师亦没有注册为 FINRA 的研究分析师/不具有 FINRA 分析师的注册资格。

华泰力求报告内容客观、公正，但本报告所载的观点、结论和建议仅供参考，不构成购买或出售所述证券的要约或招揽。该等观点、建议并未考虑到个别投资者的具体投资目的、财务状况以及特定需求，在任何时候均不构成对客户私人投资建议。投资者应当充分考虑自身特定状况，并完整理解和使用本报告内容，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。对依据或者使用本报告所造成的一切后果，华泰及作者均不承担任何法律责任。任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。

除非另行说明，本报告中所引用的关于业绩的数据代表过往表现，过往的业绩表现不应作为日后回报的预示。华泰不承诺也不保证任何预示的回报会得以实现，分析中所做的预测可能是基于相应的假设，任何假设的变化可能会显著影响所预测的回报。

华泰及作者在自身所知情的范围内，与本报告所指的证券或投资标的不存在法律禁止的利害关系。在法律许可的情况下，华泰可能会持有报告中提到的公司所发行的证券头寸并进行交易，为该公司提供投资银行、财务顾问或者金融产品等相关服务或向该公司招揽业务。

华泰的销售人员、交易人员或其他专业人士可能会依据不同假设和标准、采用不同的分析方法而口头或书面发表与本报告意见及建议不一致的市场评论和/或交易观点。华泰没有将此意见及建议向报告所有接收者进行更新的义务。华泰的资产管理部门、自营部门以及其他投资业务部门可能独立做出与本报告中的意见或建议不一致的投资决策。投资者应当考虑到华泰及/或其相关人员可能存在影响本报告观点客观性的潜在利益冲突。投资者请勿将本报告视为投资或其他决定的唯一信赖依据。有关该方面的具体披露请参照本报告尾部。

本报告并非意图发送、发布给在当地法律或监管规则下不允许向其发送、发布的机构或人员，也并非意图发送、发布给因可得到、使用本报告的行为而使华泰违反或受制于当地法律或监管规则的机构或人员。

本报告版权仅为本公司所有。未经本公司书面许可，任何机构或个人不得以翻版、复制、发表、引用或再次分发他人（无论整份或部分）等任何形式侵犯本公司版权。如征得本公司同意进行引用、刊发的，需在允许的范围内使用，并需在使用前获取独立的法律意见，以确定该引用、刊发符合当地适用法规的要求，同时注明出处为“华泰证券研究所”，且不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删节和修改。本公司保留追究相关责任的权利。所有本报告中使用的商标、服务标记及标记均为本公司的商标、服务标记及标记。

中国香港

本报告由华泰证券股份有限公司制作，在香港由华泰金融控股（香港）有限公司向符合《证券及期货条例》及其附属法律规定的机构投资者和专业投资者的客户进行分发。华泰金融控股（香港）有限公司受香港证券及期货事务监察委员会监管，是华泰国际金融控股有限公司的全资子公司，后者为华泰证券股份有限公司的全资子公司。在香港获得本报告的人员若有任何有关本报告的问题，请与华泰金融控股（香港）有限公司联系。

香港-重要监管披露

- 华泰金融控股（香港）有限公司的雇员或其关联人士没有担任本报告中提及的公司或发行人的高级人员。
- 华域汽车（600741 CH）：华泰金融控股（香港）有限公司、其子公司和/或其关联公司实益持有标的公司的市场资本价值的 1%或以上。
- 有关重要的披露信息，请参华泰金融控股（香港）有限公司的网页 https://www.htsc.com.hk/stock_disclosure 其他信息请参见下方“美国-重要监管披露”。

美国

在美国本报告由华泰证券（美国）有限公司向符合美国监管规定的机构投资者进行发表与分发。华泰证券（美国）有限公司是美国注册经纪商和美国金融业监管局（FINRA）的注册会员。对于其在美国分发的研究报告，华泰证券（美国）有限公司根据《1934 年证券交易法》（修订版）第 15a-6 条规定以及美国证券交易委员会人员解释，对本研究报告内容负责。华泰证券（美国）有限公司联营公司的分析师不具有美国金融监管（FINRA）分析师的注册资格，可能不属于华泰证券（美国）有限公司的关联人员，因此可能不受 FINRA 关于分析师与标的公司沟通、公开露面和所持交易证券的限制。华泰证券（美国）有限公司是华泰国际金融控股有限公司的全资子公司，后者为华泰证券股份有限公司的全资子公司。任何直接从华泰证券（美国）有限公司收到此报告并希望就本报告所述任何证券进行交易的人士，应通过华泰证券（美国）有限公司进行交易。

美国-重要监管披露

- 分析师黄乐平、陈旭东本人及相关人士并不担任本报告所提及的标的证券或发行人的高级人员、董事或顾问。分析师及相关人士与本报告所提及的标的证券或发行人并无任何相关财务利益。本披露中所提及的“相关人士”包括 FINRA 定义下分析师的家庭成员。分析师根据华泰证券的整体收入和盈利能力获得薪酬，包括源自公司投资银行业务的收入。
- 华域汽车（600741 CH）：华泰证券股份有限公司、其子公司和/或其联营公司实益持有标的公司某一类普通股证券的比例达 1%或以上。
- 华泰证券股份有限公司、其子公司和/或其联营公司，及/或不时会以自身或代理形式向客户出售及购买华泰证券研究所覆盖公司的证券/衍生工具，包括股票及债券（包括衍生品）华泰证券研究所覆盖公司的证券/衍生工具，包括股票及债券（包括衍生品）。
- 华泰证券股份有限公司、其子公司和/或其联营公司，及/或其高级管理层、董事和雇员可能会持有本报告中所提到的任何证券（或任何相关投资）头寸，并可能不时进行增持或减持该证券（或投资）。因此，投资者应该意识到可能存在利益冲突。

评级说明

投资评级基于分析师对报告发布日后 6 至 12 个月内行业或公司回报潜力（含此期间的股息回报）相对基准表现的预期（A 股市场基准为沪深 300 指数，香港市场基准为恒生指数，美国市场基准为标普 500 指数），具体如下：

行业评级

- 增持：** 预计行业股票指数超越基准
中性： 预计行业股票指数基本与基准持平
减持： 预计行业股票指数明显弱于基准

公司评级

- 买入：** 预计股价超越基准 15%以上
增持： 预计股价超越基准 5%~15%
持有： 预计股价相对基准波动在-15%~5%之间
卖出： 预计股价弱于基准 15%以上
暂停评级： 已暂停评级、目标价及预测，以遵守适用法规及/或公司政策
无评级： 股票不在常规研究覆盖范围内。投资者不应期待华泰提供该等证券及/或公司相关的持续或补充信息

法律实体披露

中国: 华泰证券股份有限公司具有中国证监会核准的“证券投资咨询”业务资格, 经营许可证编号为: 91320000704041011J
香港: 华泰金融控股(香港)有限公司具有香港证监会核准的“就证券提供意见”业务资格, 经营许可证编号为: AOK809
美国: 华泰证券(美国)有限公司为美国金融业监管局(FINRA)成员, 具有在美国开展经纪交易商业业务的资格, 经营业务许可编号为: CRD#:298809/SEC#:8-70231

华泰证券股份有限公司**南京**

南京市建邺区江东中路228号华泰证券广场1号楼/邮政编码: 210019

电话: 86 25 83389999/传真: 86 25 83387521

电子邮件: ht-rd@htsc.com

深圳

深圳市福田区益田路5999号基金大厦10楼/邮政编码: 518017

电话: 86 755 82493932/传真: 86 755 82492062

电子邮件: ht-rd@htsc.com

北京

北京市西城区太平桥大街丰盛胡同28号太平洋保险大厦A座18层/

邮政编码: 100032

电话: 86 10 63211166/传真: 86 10 63211275

电子邮件: ht-rd@htsc.com

上海

上海市浦东新区东方路18号保利广场E栋23楼/邮政编码: 200120

电话: 86 21 28972098/传真: 86 21 28972068

电子邮件: ht-rd@htsc.com

华泰金融控股(香港)有限公司

香港中环皇后大道中99号中环中心58楼5808-12室

电话: +852-3658-6000/传真: +852-2169-0770

电子邮件: research@htsc.com

<http://www.htsc.com.hk>**华泰证券(美国)有限公司**

美国纽约公园大道280号21楼东(纽约10017)

电话: +212-763-8160/传真: +917-725-9702

电子邮件: Huatai@htsc-us.com

<http://www.htsc-us.com>

©版权所有2023年华泰证券股份有限公司