

九章智驾专题报告第 1 期：

# 4D毫米波雷达市场及技术趋势分析

---

# 目录

## Part1： 4D毫米波雷达产品特征及应用前景分析

1.1 4D毫米波雷达的功能与特征

1.2 4D毫米波雷达与其他传感器对比分析

1.3 4D毫米波雷达应用前景分析

- VS 3D毫米波雷达
- VS 激光雷达

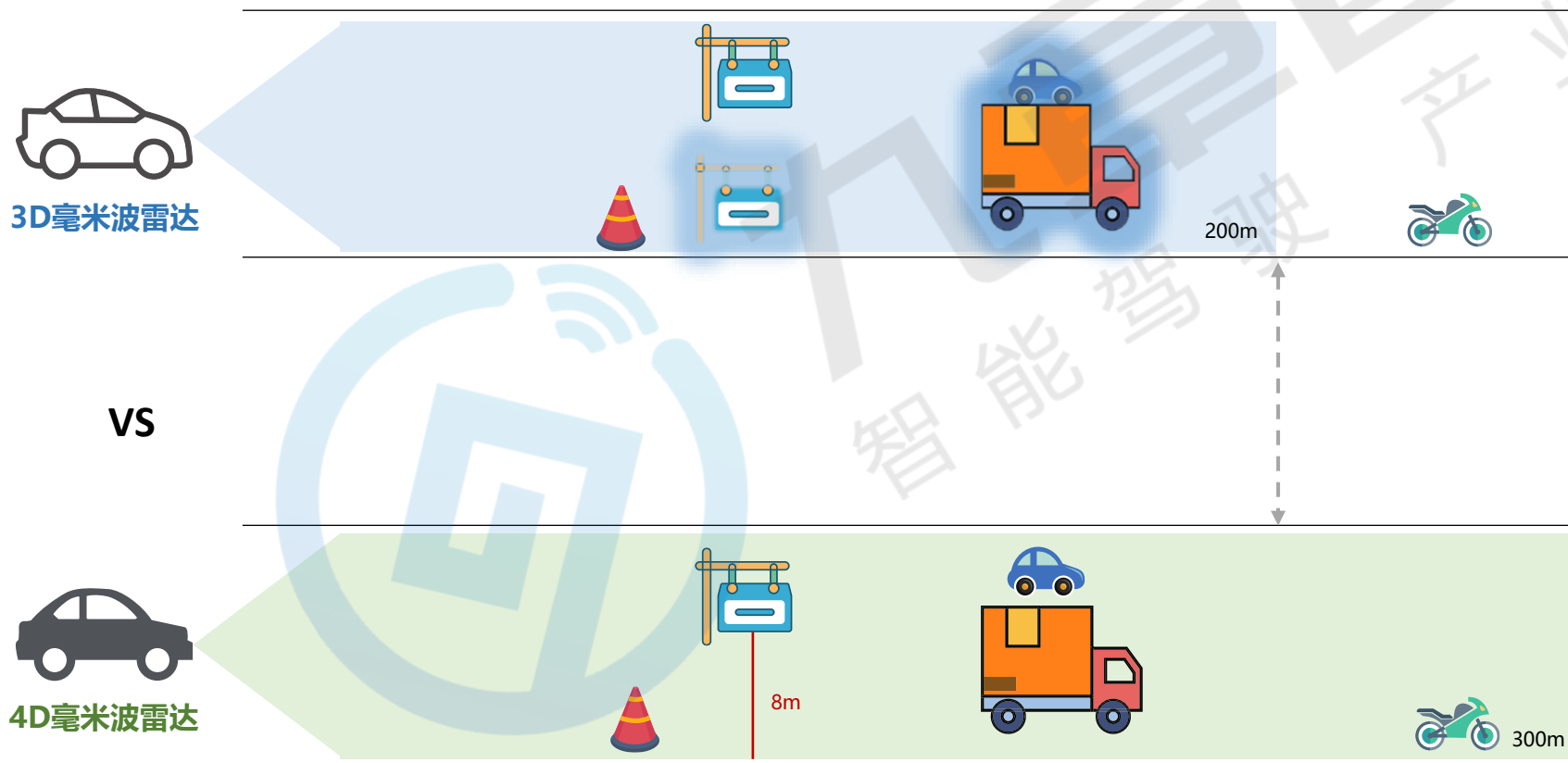
Part2： 4D毫米波雷达技术发展趋势分析

Part3： 4D毫米波雷达应用制约因素分析

Part4： 4D毫米波雷达产业链主流玩家及产品分析

## 4D毫米波雷达的功能与特征

- 4D毫米波雷达在3D毫米波雷达探测数据(①自车与目标的距离、②相对速度、③方位的数据)基础上, 增加④对目标高度数据的探测, 相比于3D毫米波雷达具有天线数量多/密度高、输出的点云图像更致密等特征;
- 4D毫米波雷达在探测距离、距离精度、角度分辨率、角度精度、速度精度等方面都有所提升。

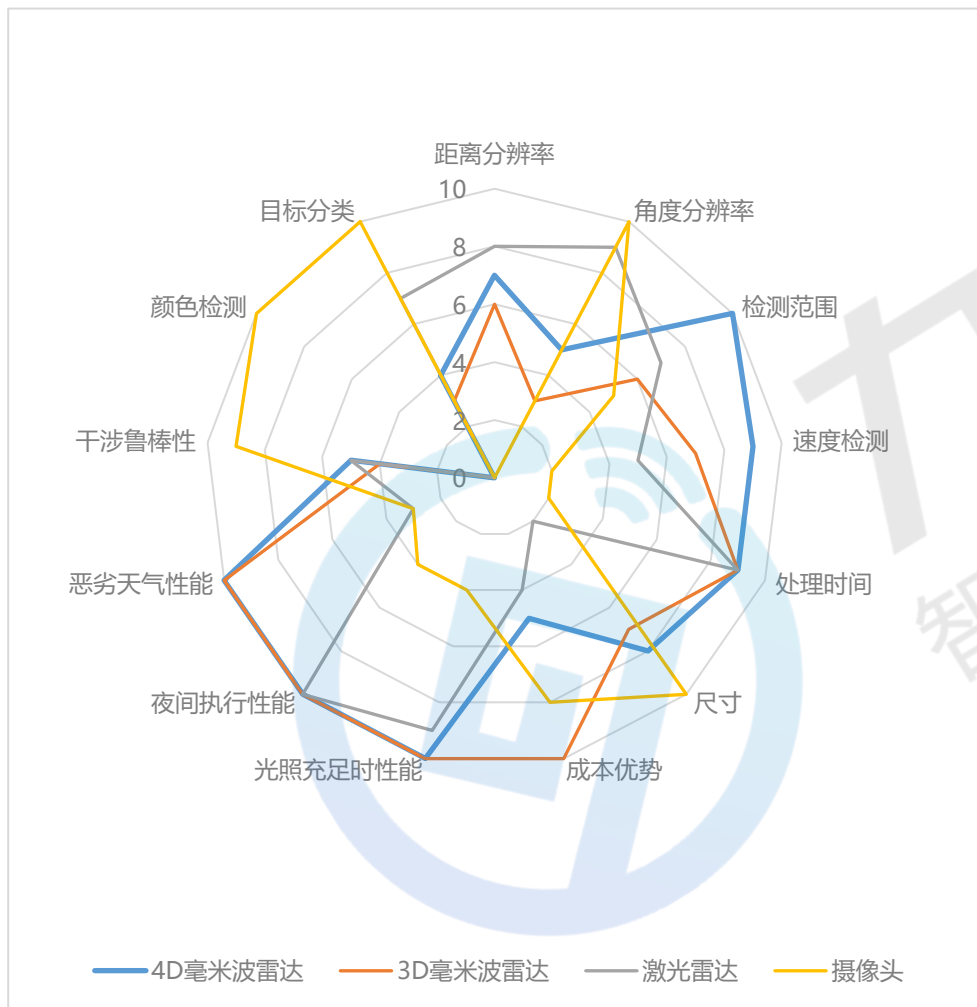


### 4D毫米波雷达 VS 3D毫米波雷达的优势

- 1. 高识别度:** 更有效解析测得目标的轮廓、行为和类别→可识别较小的物体、被遮挡的部分物体及静止物体和横向移动障碍物;
- 2. 高灵敏度:** 高度数据的增加可滤除部分误制动的假警报→可避免漏刹车/误刹车;
- 3. 高动态范围:** 可将同向同距同速的强弱目标区分开;
- 4. 更长探测距离:** 探测距离将提高到约300米左右。

## 4D毫米波雷达与其他传感器对比分析①

- 纵向比较：4D毫米波雷达相比3D毫米波雷达在多项性能上表现更强，但成本较高，且目前量产验证较少；
- 横向比较：4D毫米波雷达相比其他传感器不仅具有毫米波雷达的传统优劣势，而且对物体与行人的识别能力上实现了提升。



传感器	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
分辨率/角分辨率	7.5-60cm/小于1°	20-60cm/5°	最小1mm/最小1°	-
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
道路标线、交通信号识别	无法识别	无法识别	无法识别	可识别
恶劣天气	不受影响	不受影响	易受影响	易受影响
光照	不受影响	不受影响	不受影响	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
成本	高	较高	非常高	一般

## 4D毫米波雷达与其他传感器对比分析②

- 4D毫米波雷达能对普通场景中的目标信息进行更高性能的检测，普通场景的覆盖率和处理能力相较于3D毫米波雷达有所提高；
- 同时4D毫米波雷达在前前车刹车，防止连续追尾以及大光比、恶劣天气等corner case场景下能够保持较好的性能。

corner case		对传感器的需求	各传感器表现			
			4D毫米波雷达	3D毫米波雷达	激光雷达	摄像头
目标行为相关	辨别300米外的两辆车	水平角分辨率达到1°以下，探测距离大于300m	可探测到水平分辨率1° 探测距离300~350m	无法探测到水平分辨率3° 探测距离150~160m	无法探测到水平分辨率0.1° 探测距离220~250m	无法探测到，二维信息无法测距离和位置
	车前150米处悬空红绿灯	垂直角精度达到0.5°	垂直精度0.2°	垂直精度差，无法准确判定红绿灯位置	3D点云成像可准确判定高度信息	无法探测到，二维信息无法测距离和位置
	停放的车辆旁边站个人	准确区分人、车	分辨率高，可分辨同一个场合中的多个障碍物	分辨率低，无法分辨靠得太近的障碍物	分辨率高，可分辨同一个场合中的多个障碍物	不具备穿透力，无法识别
	前前车刹车	探测到前车速度信息	可探测到前前车，得到的前前车速度、距离信息较为精确（目前仅理论上可行，尚未有成熟应用）	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目标
感知环境相关	大光比	不受光线影响	不受光线影响（除大雨天气外）	不受光线影响（除大雨天气外）	不受光线影响	受光线影响较大，会曝光
	恶劣天气	不受雨雪雾影响 可穿透空气	不受天气影响	不受天气影响	特殊天气穿透性差	特殊天气成像效果差
	沙漠/极寒地区	耐高温/低温	-40℃~85℃	-40℃~85℃	-40℃~85℃	-40℃~80℃

### 毫米波雷达必然存在于多传感器融合技术路线中

- ✓ 国内视觉方面的深度学习算法仍偏弱，且交通环境复杂，深度学习目前无法覆盖所有场景，仍然需要毫米波雷达补充视觉在距离、速度维度检测方面能力的不足，同时可应对极端恶劣环境下其他感知传感器失效的情况。

### 高阶自动驾驶对毫米波雷达提出更高要求，3D毫米波雷达无法匹配后期发展趋势

#### 3D毫米波雷达性能的局限性

##### 决定了向4D毫米波雷达升级的必然性

- ✓ 对比4D毫米波雷达，3D毫米波雷达性能表现欠佳（缺乏高度信息、分辨率低、点云数量少、点云质量差等），产品迭代升级到4D毫米波雷达是必然趋势（如：摄像头200万→800万像素，激光雷达几线→百线）

#### 4D毫米波雷达

##### 具备更高corner case覆盖率

- ✓ 在L2及以下的阶段中，3D毫米波雷达已能满足大部分的场景需求，但仍有未能解决的corner case，4D毫米波雷达能够覆盖部分3D不能解决的corner case，如减少误认悬空路牌为障碍物导致的误刹车，提升AEB的功能体验感

#### 4D毫米波雷达与视觉前融合

##### 提供更多特征信息，准确性更高

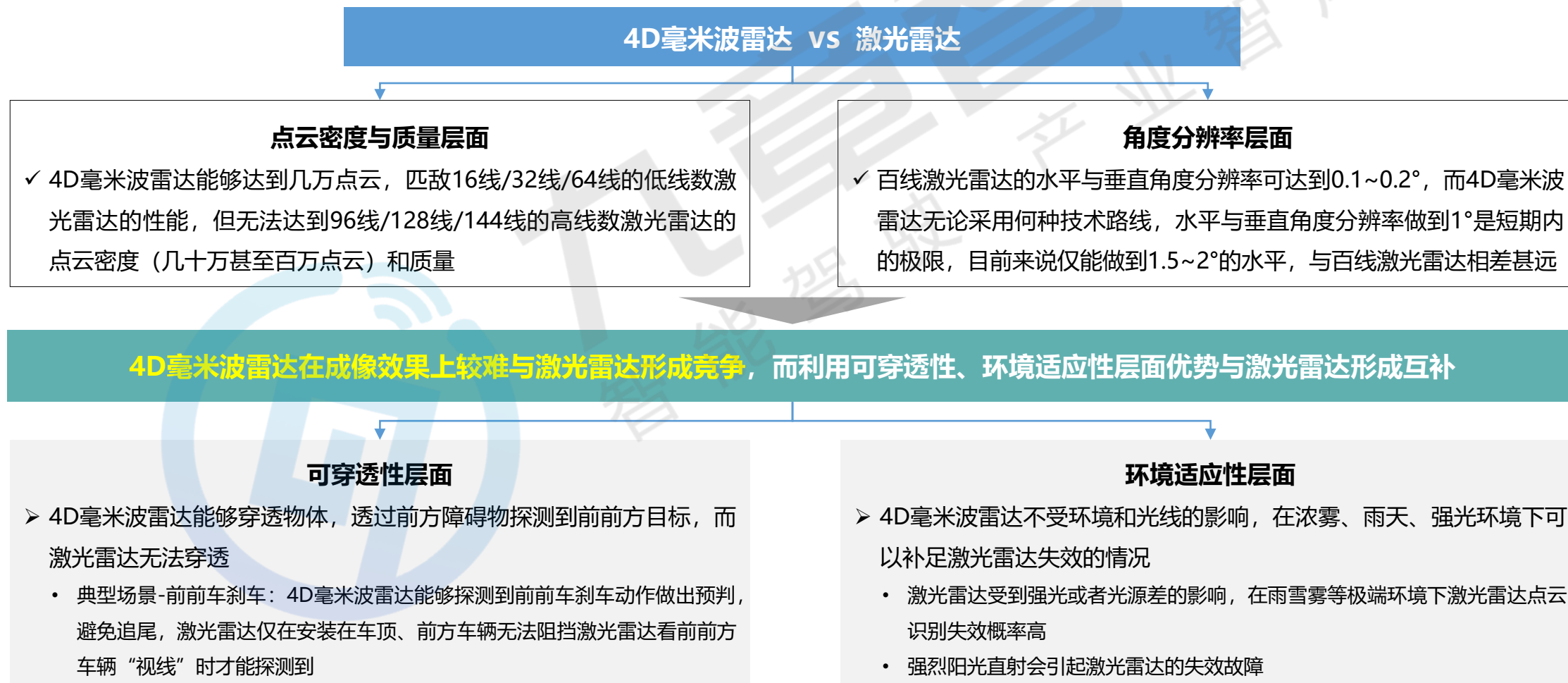
- ✓ 低阶辅助驾驶&高阶自动驾驶车辆，在使用4D毫米波雷达做融合处理时（1R1V或者5R1V），能够提供障碍物更多的特征信息；同时，融合后置信度提高，对目标的判断力也有所提升

### 4D毫米波雷达性能整体超越3D毫米波雷达，但短期内无法全面升级

- 性能方面，4D毫米波雷达各方面性能优于3D毫米波雷达，3D毫米波雷达能够完全升级为4D毫米波雷达
- 但受成本因素制约，在应用上，中高端车型逐步采用4D毫米波雷达，低端车型仍将采用3D毫米波雷达



- 短期内4D毫米波雷达在性能上无法替代激光雷达，但可在穿透性的优势上与激光雷达形成互补关系。
  - 4D毫米波雷达的成像效果与低线数激光雷达相当，但不如百线激光雷达→而车载激光雷达正向高线数方向发展→4D毫米波雷达与激光雷达竞争关系弱化



# 目录

Part1： 4D毫米波雷达产品特征及应用前景分析

## Part2： 4D毫米波雷达技术发展趋势分析

2. 4D毫米波雷达技术趋势总览

2.1 波形设计趋势分析

2.2 天线阵元设计趋势分析

2.3 天线阵列设计趋势分析

2.4 信号处理框架变化趋势分析

2.5 信号处理流程变化趋势分析

2.6 目标输出变化趋势分析

2.7 引入机器学习/深度学习算法趋势分析

2.8 测试方法发展趋势分析

2.9 测试真值系统趋势分析

2.10 模块结构与集成变化趋势分析

Part3： 4D毫米波雷达应用制约因素分析

Part4： 4D毫米波雷达产业链主流玩家及产品分析



4D毫米波雷达与3D毫米波雷达差异点

4D毫米波雷达与3D毫米波雷达相同点



## 4D毫米波雷达波形设计对比分析①

■ 根据辐射电磁波方式不同，毫米波雷达主要分为**脉冲体制**以及**连续波体制**两种工作体制。

	脉冲体制	连续波体制			
		FMCW调频连续波	PMCW调相连续波	CW恒频连续波	FSK频移键控连续波
测量距离	测量距离近（受发射功率限制）	测量距离远	测量距离更远	✓ 可探测目标速度， <b>但不可测量距离</b>	✓ 可探测移动目标的 位置与速度信息， 同时探测时间短， 精度高， <b>但不可同 时测量多个目标</b>
测量精度	较高	高	更高		
测量复杂度	简单	较高	较高		
成本	成本较高 (原因：当探测近距离目标时，需要采用 高速信号处理技术，结构要求复杂→成本↑)	成本较低	成本较低		
电磁波能量辐射图					

### FMCW调频连续波是目前4D毫米波雷达波形设计的主流形式

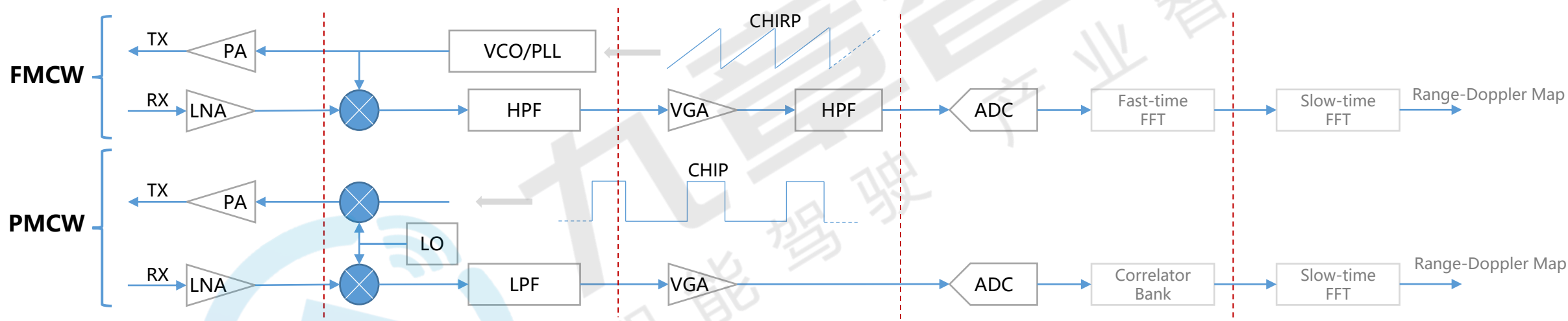
零差型FMCW	LFMCW线性调频连续波	LFSCW线性步进调频连续波
➢ 相位噪声性能较差，若收发天线共用，需增加环形器，使得收发通道的隔离度变差，且成本增加	➢ 探测精度高，调制方式相对简单，后端处理相对复杂 <b>车载毫米波雷达最常用的工作模式</b>	➢ FMCW与FSK模式联合使用，提高探测精度、分辨率； ➢ 对基准频率源要求苛刻，增加了硬件设计难度，简化后端基带数字信号处理

**FMCW调频连续波雷达的不同调制形式：**1) 正弦波调制；2) 锯齿式波调制；3) 三角波调制

① 不同调频方式的雷达硬件构成基本相同，只有小部分电路模块、电路参数与信号处理算法有所区别

② 对于单个静止物体的测量，锯齿波调制方式即可满足；对于运动物体，多采用三角波调制方式

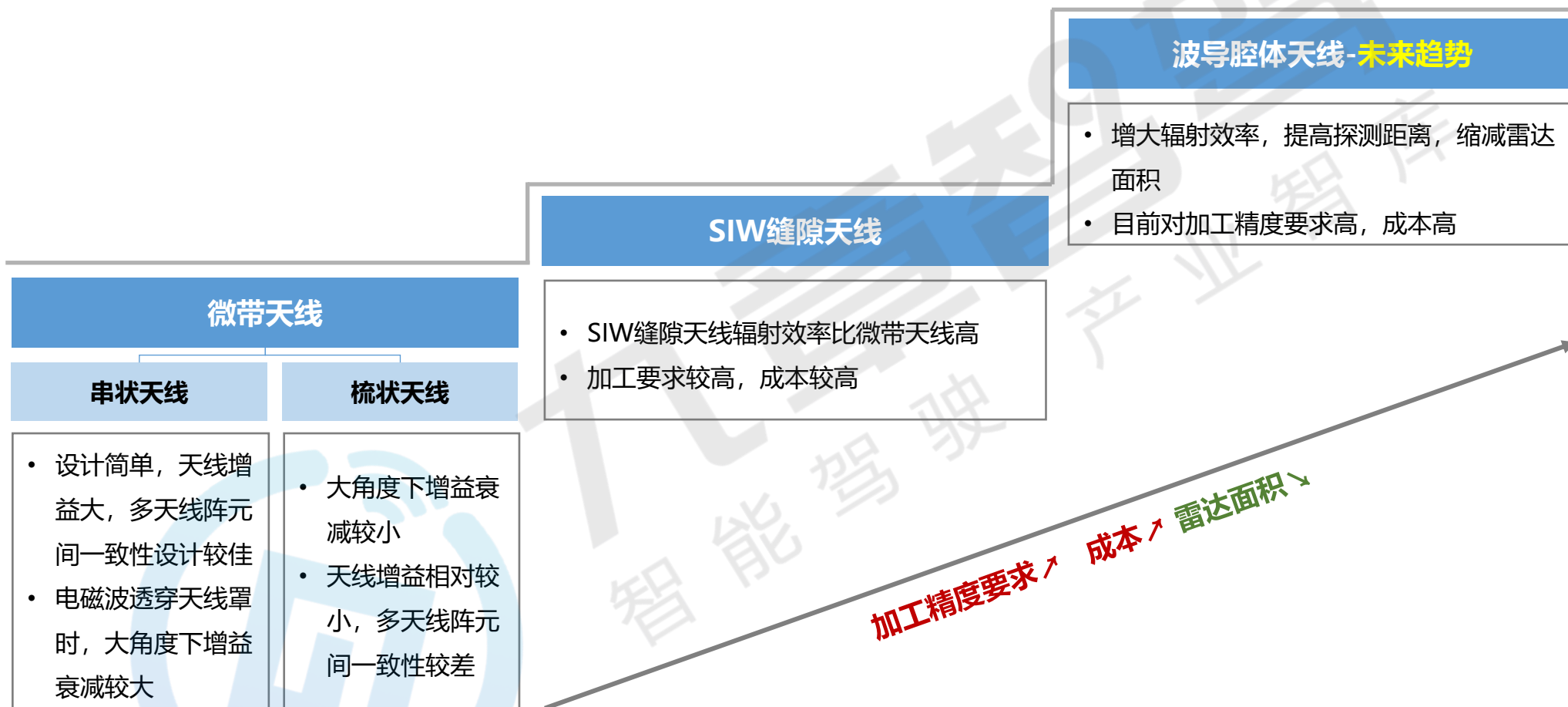
- PMCW（调相连续波方案）：通过多天线同时发射正交相位编码信号的方式来探测目标的距离和速度。
- PMCW方案不仅可以探测更远距离（有效探测距离可达500m左右），同时可以有效抗除雷达与雷达之间的相互干扰，4D毫米波雷达波形设计中，PMCW（调相连续波方案）逐渐崭露头角。



备注：+越多代表越高

制式对比	鬼影 (旁瓣影响)	相位噪声 敏感度	ADC分辨率	ADC速度 /IF带宽	功率谱密度 (PSD)	干扰敏感性	多发多收 TX正交	通信能力	功耗	业界已有 接受度	市场准入、 IP壁垒
PMCW	+	++	+	+	+++	+++	+	++	++	+	++
FMCW	++	+	++	++	+	+	++	+	+	+++	+

\*九章智驾基于公开资料整理



### 多芯片级联技术方案中-波导腔体天线将成为天线阵元设计趋势

- 多片级联雷达收发天线大幅增加，若仍采用微带天线设计思路，馈线走线和设计复杂度变大，天线阵列只能在x-y方向上布局，导致雷达面积过大，罗杰斯板材使用面积也会变大，成本显著增加；
- 采用波导腔体天线，天线阵列布局可沿z方向延伸，相比微带天线，可显著减小雷达面积。

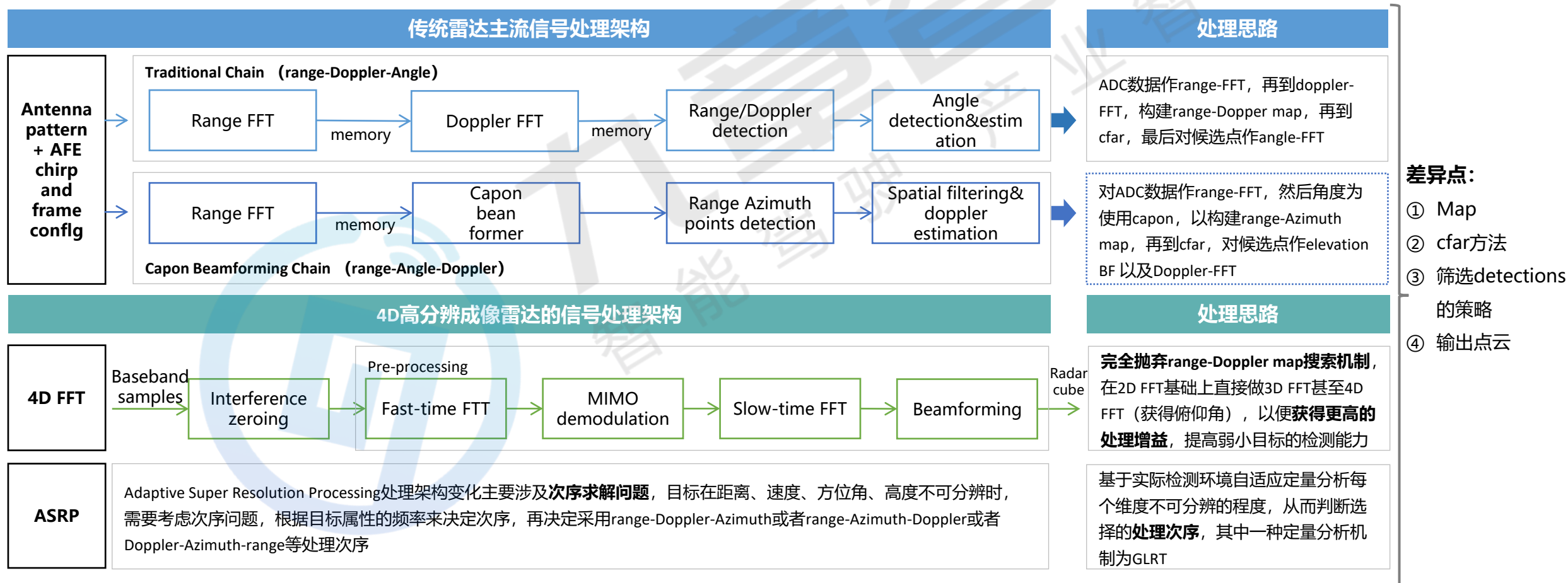
- 4D毫米波雷达比3D毫米波雷达增加俯仰角信息，天线阵列设计更为复杂，指标间相互制约，且与波形、硬件设计、制造工艺强相关。





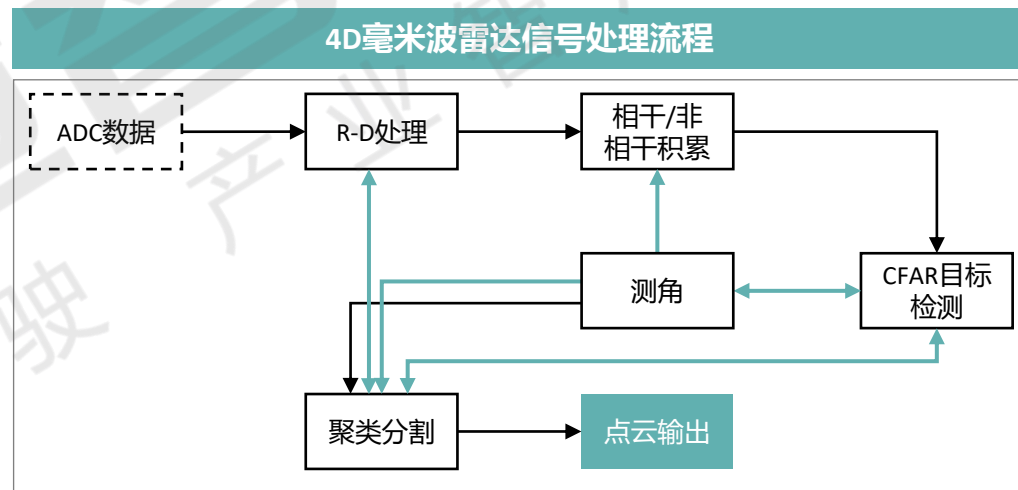
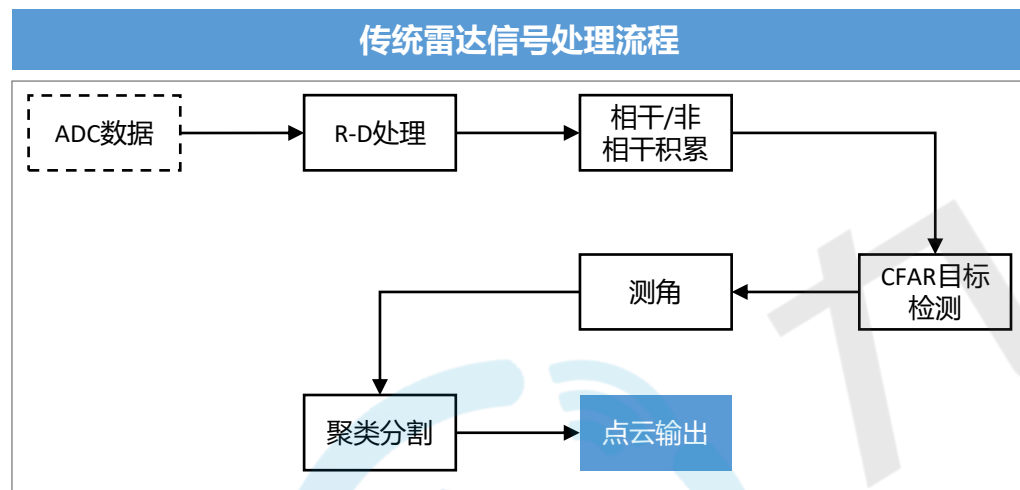
## 4D毫米波雷达信号处理框架变化趋势分析

- 雷达信号处理最核心工作：依次完成径向距离、径向速度、方位角的估计问题（在满足一定条件下都可等价为各自独立频率的估计问题），常见的处理架构是range-Doppler-Angle 或range-Angle-Doppler；
- 4D毫米波雷达引入高度信息、芯片级联→信号处理框架更加丰富（FFT增加），需基于应用场景选择合适的处理框架。



## 4D毫米波雷达信号处理流程变化趋势分析

- 4D毫米波雷达信号处理方案设计以扩展目标为最终结果，而传统雷达信号处理流程中检测和测角模块是以假设目标为点目标进行设计的，传统流程无法实现单帧高密度点云，需采用全新的雷达信号处理算法流程，其中相干/非相干积累、目标检测、测角等模块的算法与传统算法存在差异。



- ① 雷达系统获取的原始ADC数据经信号预处理得到快时间、慢时间和天线维度信息；
- ② 通过对这些信息进行距离-多普勒、CFAR检测、DOA估计和聚类跟踪等处理，最终得到点云信息。

CFAR检测处理的算法基于一定经验和统计信息，设计简单，计算量小，可以过滤掉大量噪声

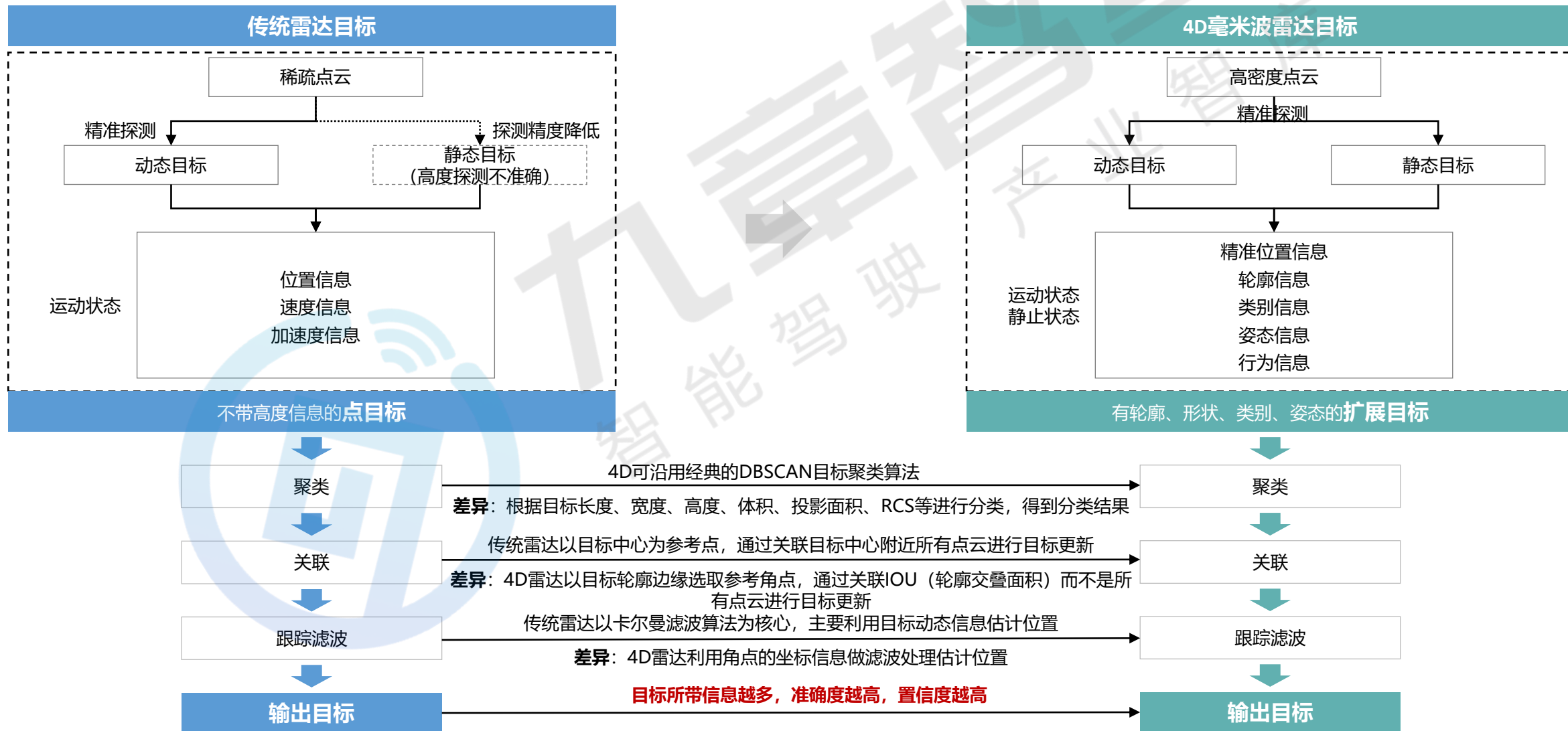
但极有可能丢失回波中包含的原始目标信息，不适用于目标信息更多的4D毫米波雷达

- ① 直接将RD图、RA图等送到后端进行智能处理，结合点云获取更完整的信息；
- ② 对多通道的距离-多普勒直接进行角度FFT后获取信息，也可以获取大量信号级信息；
- ③ 直接利用CFAR前的RD图，以及多帧RD图之间的信息关联或信息变化等均蕴含着大量可用信息。

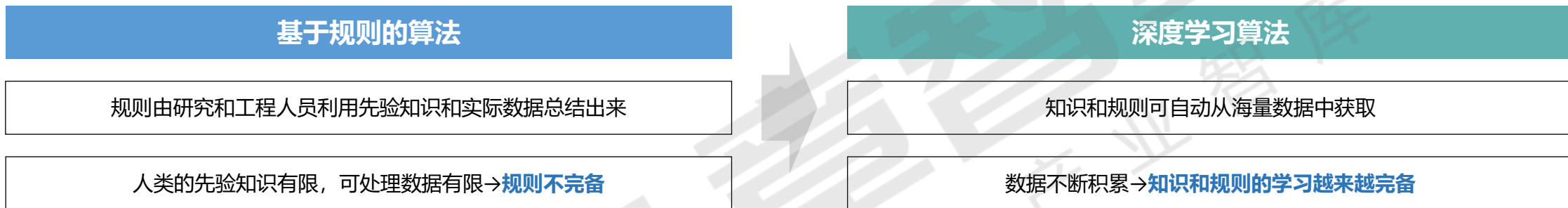


## 4D毫米波雷达目标输出变化趋势分析

- 传统毫米波雷达点云稀疏，中心点无法关联边缘点，仅能输出带信息的点目标。
- 4D毫米波雷达点云密度高，可关联点云数量多，且速度、位置信息更加精确，可输出带轮廓的扩展目标。



- 随着4D毫米波雷达点云数量增加，需处理的数据量也同步增加，但基于规则的传统算法处理能力有限，能处理更多数据的深度学习算法是未来趋势。同时随着EEA架构的演进，整车拥有更高的算力，使深度学习边缘加速成为可能。

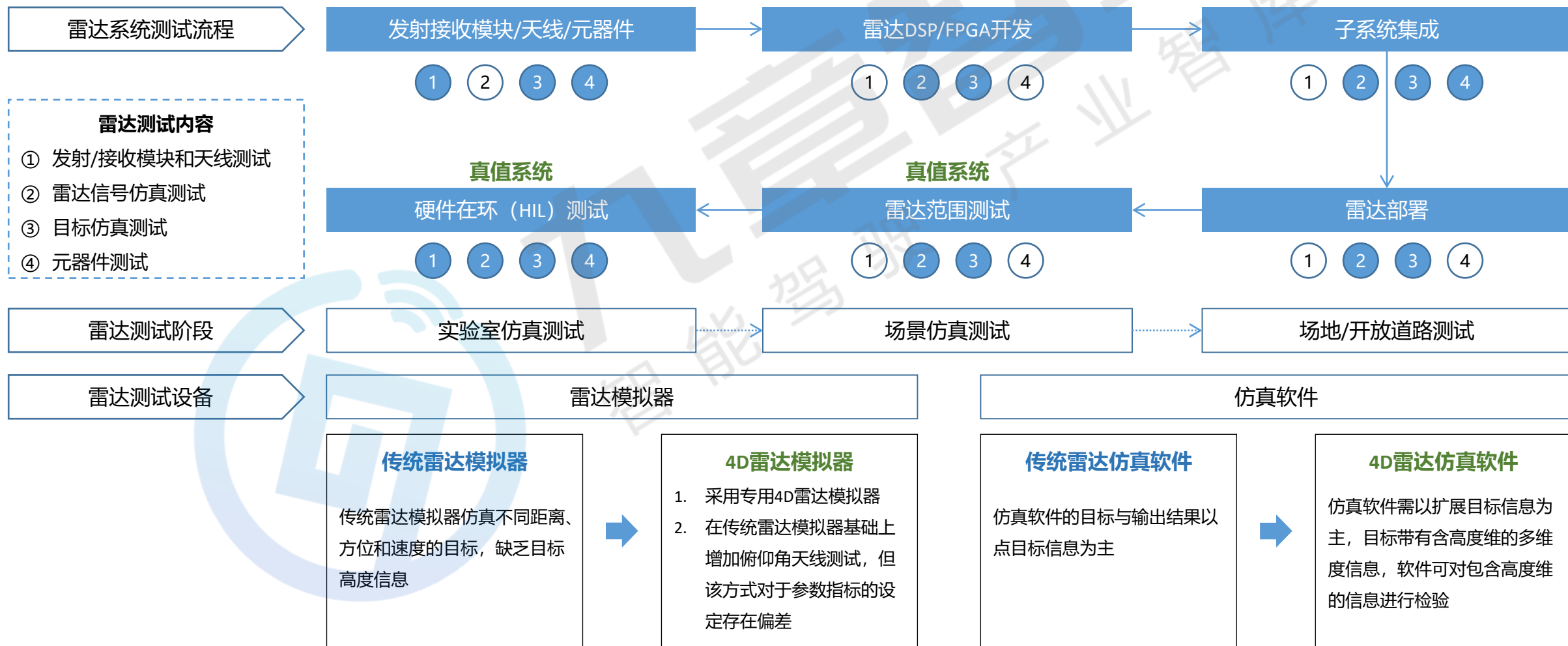


### 案例：某Tier 1机器学习算法在4D成像雷达的应用成果

- ① **小物体的探测精度提升**：针对道路上的小物体或碎片，机器学习可以将探测距离提高50%以上，并能跟踪200米范围内的小物体；同时，对于前方小物体是否可以安全行驶通过，机器学习系统也可以用安全的和不安全的物体进行训练。
- ② **漏检率提高**：与经典的雷达信号处理算法相比，机器学习减少70%的漏检，通过与其他传感器的融合可以进一步改善检测。
- ③ **噪声滤除提高**：隧道墙壁是巨大的反射面，会导致非常多的返点，机器学习以更高的精度过滤检测中的噪声，可减少处理量。
- ④ **目标检测与跟踪准确率提高**：机器学习可以帮助提供准确的目标检测和跟踪，包括目标边界和鲁棒分离，可以将位置误差和目标航向误差降低50%以上，更好地识别停在其他车道上的车辆和静止或缓慢移动的物体。
- ⑤ **目标分类更好**：机器学习可以更好地解释隧道和其他封闭环境中的雷达回波，对扇形等目标进行分类。

## 4D毫米波雷达测试方法发展趋势分析

- 4D毫米波雷达的测试流程与内容可沿用传统毫米波雷达的体系，但4D雷达天线数量增加、俯仰角信息增加，使其测试方法和设备无法完全沿用传统毫米波雷达，需在现有基础上进行更新。



- 不同传感器提供不同类型的数据，需提供符合4D毫米波雷达算法要求的真值系统进行测试与训练，但目前缺乏一套完整的、带高度维信息的4D毫米波雷达真值系统。



大多数现有雷达数据集仅提供3D雷达张量（3DRT）数据，包含沿多普勒、距离和方位维度的功率测量，缺乏高程信息，而4D雷达需要海拔维度信息，故现有真值系统无法满足4D毫米波雷达的测试需求



4D毫米波雷达的安装难度，模块化、高度集成化将成为重点探索的方向



# 目录

Part1： 4D毫米波雷达产品特征及应用前景分析

Part2： 4D毫米波雷达技术发展趋势分析

**Part3： 4D毫米波雷达应用痛点分析**

3. 4D毫米波雷达应用痛点分析

3.1 4D毫米波雷达技术路线趋势尚不清晰

3.2 4D毫米波雷达成本高且降本空间小

3.3 4D毫米波雷达算法开发难度更高

3.4 4D毫米波雷达抗干扰难度大

3.5 4D毫米波雷达与视觉前融合面临诸多难点（置信度及联合标定问题等）

3.6 4D毫米波雷达尺寸大带来安装问题

Part4： 4D毫米波雷达产业链主流玩家及产品分析

## 一、自身产品层面

## 二、应用层面

## ① 技术路线不清晰

- 级联技术相对成熟，但受尺寸、成本制约无法无限制提升性能

- 算法虚拟孔径及单芯片集成技术处于发展初期，还需量产验证

## ② 成本竞争力较差

成本太高

降本空间小

## ③ 算法开发困难大

- 4D毫米波雷达与3D毫米波雷达点云属性不同，算法完全颠覆

- 缺乏熟悉4D毫米波雷达点云属性的人才，算法开发“堆积木”现象明显

## ④ 天线与天线、雷达与雷达之间干扰大

- 天线数量增多，互相之间的干扰问题大

- 车载雷达逐渐增多且装配车辆提升，雷达之间的互相干扰问题更大

## ⑤ 与视觉融合方案存在争议

- 后融合结果目前已经基本满足需求，并且现阶段前融合难度较大，做前融合的必要性不强

- 前融合是必然趋势，但存在理论体系、联合标定方法不成熟等问题

## ⑥ 安装位置存在争议

产品尺寸较大

- 旧车型上新增/替换困难
- 新车型配置需考虑周边器件

## 4D毫米波雷达目前优势不显，性价比不足

- 对比3D毫米波雷达，除了性能优势外，其他优势并不显著：4D毫米波雷达成本较3D毫米波雷达高，尺寸比3D毫米波雷达大，且算法开发存在较大难度

## 主机厂短期对4D毫米波雷达需求迫切性不强

- 在3D毫米波雷达已能满足当下功能需求的基础上，4D毫米波雷达不具备明显的优势，再加上对选择何种技术路线的产品存在争议（无法保持后续产品迭代一致性），因此主机厂对于当下使用4D毫米波雷达的迫切性不强，对于自动驾驶功能对4D毫米波雷达提出的性能需求暂无明确定义



## 痛点①：4D毫米波雷达技术路线发展趋势尚不清晰

### 优势

### 劣势&瓶颈点

#### 技术路线1： 多芯片级联路径 (目前主流为四级联)

- ① **技术成熟度高**，产品稳定性好
- ② **前期开发难度低**，上市时间短

- ① **目前成本较高**：当前四级联的4D毫米波雷达售价约1500~1600元，成本约1200元
- ② **功耗高、尺寸大**：四级联方式比单芯片以及双级联的算法虚拟方式功耗高（天线数量、PCB板、通讯线路数量增加）
- ③ **中频同步难**：四级联芯片会产生20G以上的中频信号需同步，处理难度较大
- ④ **后续产品性能提升难度大**：因使用多块芯片级联，算力、尺寸、功耗等问题→**级联路线不可持续，无法通过芯片堆砌方式实现产品性能的无限提升**

#### 技术路线2： 双级联+软件算法 虚拟孔径路径

- ① **硬件成本低**：硬件成本相对于级联方式更低
- ② **尺寸小、功耗低**：硬件双级联+虚拟算法→多通道，硬件上尺寸比四级联小，且功耗较低

- ① **虚拟通道算法成本暂时较难估计**
- ② **实时性差**：采用虚拟孔径的方式需要先通过算法的方式实现通道数量的增加→**实时性相比于其他路径产品较差**（自动驾驶对实时性要求严格，此问题点为该技术路线当前最大瓶颈）

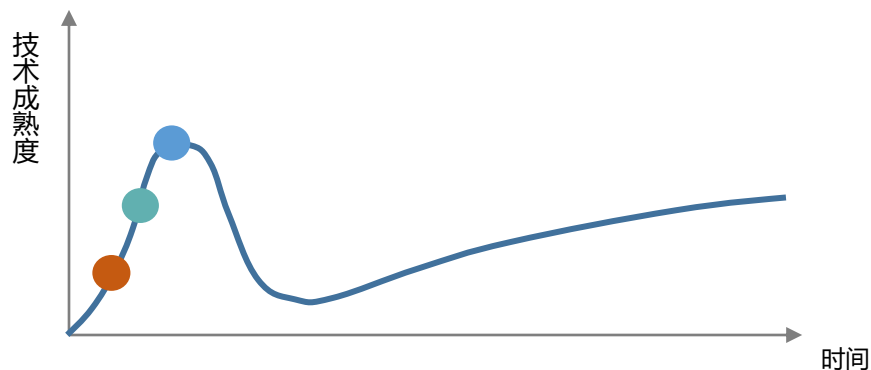
#### 技术路线3： 单芯片集成路径

- ① **尺寸小**：单颗芯片就能实现多级联芯片的通道数量→硬件尺寸较小
- ② **灵活性高**：分布式架构对雷达模组芯片造成影响，单片雷达芯片具有更加灵活的调制方式和架构

- ① **处理器要求高**：单芯片可实现的数据量大，对MCU性能提出更高要求
- ② **黑盒、半黑盒形式不利于定制化调整**：专用芯片算法固化，仅能对个别参数进行配置
- ③ **产品成熟度低**：目前单芯片仅有少数企业（如Arbe、Mobileye、Uhhnder）布局，还需经过大量的验证测试，解决天线布局、干扰、信噪比等问题

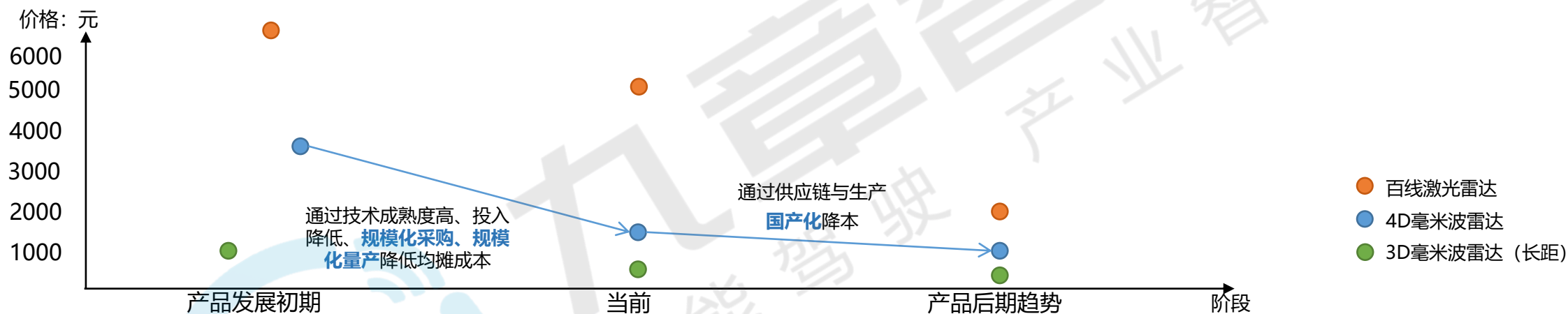
### 4D毫米波雷达未来的技术路线发展趋势尚不清晰

- 4D毫米波雷达当前技术路线均处在发展初期，虽然多芯片级联技术发展速度较快、成熟度较高，但硬件存在瓶颈，性能无法通过无限级联来实现。
- 产业内普遍希望以更少的芯片、更低的成本实现更高性能的技术路线，未来普遍看好单芯片集成的技术路线发展。



## 痛点②：4D毫米波雷达成本高且降本空间小

- 采用算法虚拟孔径及单芯片集成的技术路线产品目前仍不成熟，其成本处在产品发展初期高位，级联方式下的国外厂商产品成本虽较为稳定，但相比传统长距3D毫米波雷达成本仍不具明显优势；
- 级联方式通过BOM来降低成本的空间很小，未来主要通过国产化降低成本，但可降低空间较小，阻碍量产快速推进。



4D毫米波雷达目前的价格约1500~1600元，成本约1200元，  
与传统长距3D毫米波雷达400元左右的价格还有很大差距

### 4D毫米波雷达成本虽有所下降，但目前成本下降空间小

#### 原因①：更好性能的MCU价格更高

- ✓ 点云数量的增加对MCU处理要求更高，需要采用性能更好的MCU，成本难以下降

#### 原因②：主配件射频芯片成本难以下降

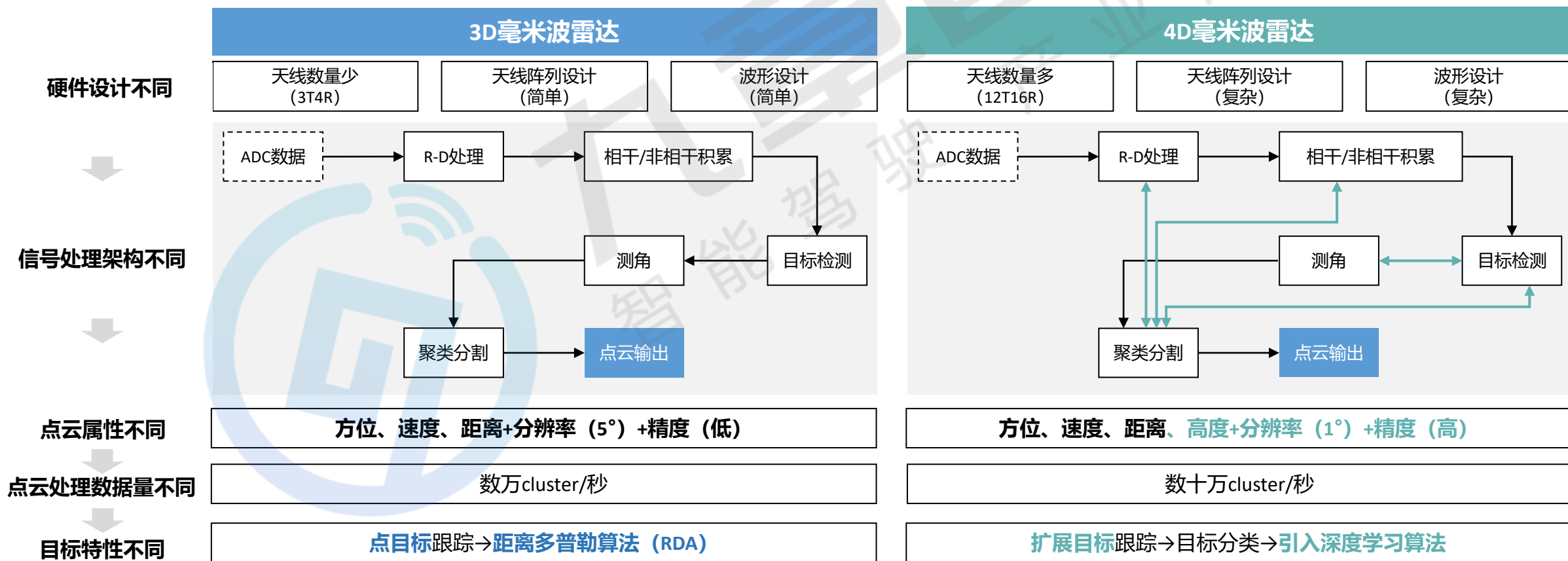
- ✓ 主要采用国外芯片，供货成本高，议价权小，而国产芯片尚不成熟

#### 原因③：其他配件成本增加

- ✓ 4D毫米波雷达点云数量多，要求传送的带宽大，常用的车载的CAN无法适配，需要增加以太网，会增加成本

### 痛点③：4D毫米波雷达目前不能基于传统雷达进行算法开发

- 从已量产的产品来看，算法尚未取得突破，仍在做简单的堆砌，未把4D毫米波雷达的全部性能发挥到极致→亟需解决：如何把硬件发挥到最大的性能；
- 4D毫米波雷达算法开发区别于3D毫米波雷达，需要进行根本性的调整：传统雷达将目标定义为点目标，4D雷达将目标定义为扩展目标，**目标特性定义不同，导致信号处理方式存在差异。**



## 痛点④：4D毫米波雷达抗干扰难度大

- 4D毫米波雷达通过MIMO使系统通道数量得到极大提升，同时存在天线之间互相干扰的问题，尤其是单芯片集成的4D毫米波雷达，背景噪声高，影响成像清晰度；随着车辆搭载毫米波雷达数量的增多，雷达与雷达之间的干扰日益严重，尤其是在相同的中心频率内使用线性调频信号，很容易产生相互之间的干扰，产生误报甚至失效的情况。
- 同时目前主机厂在4D毫米波雷达量产开发前期碰到最大的难题是台架实验较难通过，尤其是电子兼容性（EMC）很难通过。且在前期模拟中很难发现该问题，需在实验中才能发现，目前主要通过硬件加电容等抑制手段来通过实验标准。

### 雷达之间互相干扰问题难点

#### 雷达之间存在多种干扰可能性，应对方案需同时解决多项干扰

- 需同时解决不同雷达之间交叉干扰和平行干扰的问题：
  - 具有不同的调频斜率的雷达之间会出现交叉干扰，发射信号具有相同的调频斜率且两者之间起始时间非常接近的雷达之间会出现平行干扰，同一雷达在同一场景下会碰到两种干扰问题，需同时解决。

#### 在模拟测试中难以发现问题

- 电子兼容性问题在前端模拟测试中很难发现，需在上路实验中才能发现，很难在设计层面就解决该问题。

### 解决方案

- 通过跳频、调频、调相等**复杂波形设计方法**减少雷达间相互干扰的影响：需结合检测、测角、点云预处理等环节综合处理减少雷达间相互干扰的影响；
- 使用**多个频率跳动的窄带信号合成宽带信号**规避雷达之间的相互干扰：该方法出自Arbe的波形设计专利中，其可行性尚未进行验证；
- 通过**标准化的频率规划、chirp设计、时隙管理**实现在达到分辨率要求的情况下使不同的雷达在不同的射频频段共存来降低干扰影响。

- 在实验阶段可通过**硬件加电容**等抑制手段来减少雷达的干扰问题。



## 痛点⑤：4D毫米波雷达与视觉前融合面临诸多难点

4D毫米波雷达与视觉未来趋势是坚持后融合还是前融合目前仍存在争议

### 观点①：前融合是必然趋势

- 多传感器前融合是必然趋势，4D毫米波雷达与视觉的前融合难度较高且是正向的难度，虽然技术上更难，但能够解决静态物体的遗漏、极端天气下多传感器失效等问题

争议

### 观点②：前融合的意义和必要性不大

- 前融合意味着4D毫米波雷达给视觉提供一个更准确的速度和对应的信号信息，目标级融合即可实现；
- 前融合同样也存在鬼影、隧道误报等问题，且较难解决

毫米波雷达供应商多已在探索前融合方案，但仍然面临诸多难点，解决路径尚未明确

1

#### 4D对算力需求更高， 但通过算力堆砌提升性能受成本限制

- 4D毫米波雷达在有限的成本下需尽可能利用更多的数据（反观摄像头可引入AI芯片提高算力，激光雷达对成本敏感度较低，也可依靠算力堆积提升性能）

2

#### 车载网络不足以支撑

- 主流整车电子电气架构车载网络仍是采用CAN、LTE方式不足以支撑传感器点云数据的传输要求（传感器点云数据量几兆~几十兆/秒，CAN、LTE方式最高速率不超过5兆）

3

#### 传感器之间存在时间同步or相互干扰

- 不同厂家的雷达、传感器相互干扰会对原始数据层级有影响，至少同一辆车上的毫米波雷达不能够相互干扰

4

#### 融合算法较为复杂

- 4D毫米波雷达的识别和算法较视觉算法容易，但两者融合复杂度较高，目标级的融合相对容易，点云级别的算法融合较难（点云属性不同）

5

#### 主融合算法的融合方案选择存在争议

- 主融合算法应融合在单传感器（如摄像头/4D毫米波雷达）控制器or域控制器中存在争议，不同方案的选择将导致时效性、算力支撑能力、供应商制衡等维度的差异

6

#### 缺乏成熟理论体系和算法体系支撑

- 处理点云数据做距离跟踪将会遇到问题，扩展目标的跟踪和跟踪理论不成熟

## 痛点⑤：4D毫米波雷达与视觉前融合面临诸多难点

- 前融合面临置信度的问题，与后融合的差异体现在前融合会对点云级/像素级数据做置信度的权衡；
- 路测联合标定是前融合提升精度的必然途径，但对标定间的尺寸和时间都有严苛要求，对于同一个目标，不同传感器的置信度、准确度、输出存在差异，最终对于目标的精度判断将会存在偏差。当前缺乏成熟的联合标定方法和检验系统，短期内可参考激光雷达与视觉的联合标定方法。

### 问题难点

### 解决方案

#### 置信度问题

##### 双方优势及输出属性不同

- 视觉对于距离的测量不准确，但对于目标的分类和轮廓相对准确；
- 4D毫米波雷达对于距离和速度是相对准确，对于语义信息的理解不够准确、对目标分类也不准确；
- 两者前融合问题在于：在像素点与点云存在“差异”时，该相信哪个传感器所“看到”的，什么情况下哪个传感器的准确度更高，需要设置合理的置信度。

##### 不断进行数据训练调整权重

- 需大量采集数据、大量融入场景；
- 通过大量的真值测试以及兼顾每个传感器性能的优劣势来看设置基础权重，后期可以通过采集到的数据做训练后进行微调；
- 设置权重来相信某个传感器（但不可全信），且权重可动态调整。

#### 联合标定问题

##### 双方没有明确的路线

##### 如摄像头本身就存在路线的分歧

- 单目摄像头无法提供距离信息，而4D毫米波雷达有距离信息，但这会成为单一的数据源，存在是否可信的问题；
- 双目摄像头加上4D毫米波雷达，双方都能提供距离、位置、速度、高度信息，数据的维度是同样的，就可以在同一维度进行对比，难度偏执行层面。

##### 路测标定难点较多，解决途径依赖于可靠的真值系统

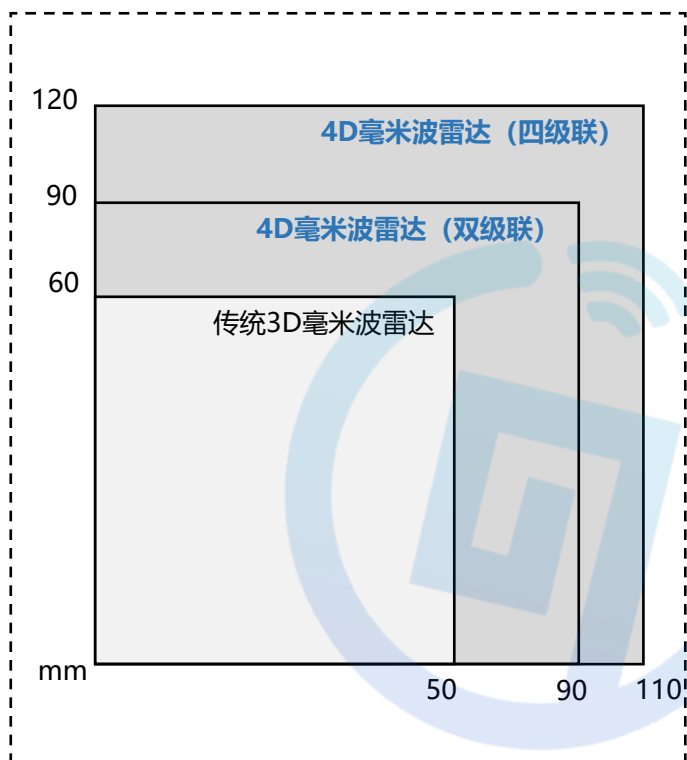
##### 但目前尚未有较为可靠的真值系统

- 设计一套真值系统测试目标准确度，具体涉及到算法开发、数据融合、功能开发，可降低4D毫米波雷达与视觉路测标定时的精度偏差。

## 痛点⑥：4D毫米波雷达尺寸大带来安装问题

- 主机厂目前普遍不会为搭载4D毫米波雷达而放弃对4D毫米波雷达尺寸的要求，当无法解决4D毫米波雷达产品尺寸过大带来的安装问题时，主机厂对4D毫米波雷达的应用意愿度会降低。

多芯片级联技术的尺寸升级，在旧车型新增/替换会带来安装问题，多数在新车型上使用  
(4D雷达比传统雷达尺寸大，仍需综合考虑其自身尺寸、安装位置、周边器件)



➤ 车型设计主要由造型设计部门+整车总布置部门（类似于机械集成）+电子电气部门（4D毫米波雷达VCU零件负责）参与，由**电气电气部门提出需求、整车总布置部门**最后决定是否安装

### 升级车型 ❌

#### 需综合考虑设计变更带来的成本上升

- 通常情况**不会**在升级车型上考虑新增传感器或者替换原有的传感器；
- 综合考虑安装位置、成本、利润，如果设计变更小、成本低，才会考虑在升级车型上使用新的传感器。

### 新车型 ✅

#### 需综合考虑4D毫米波雷达安装属性及周边器件

- 新车型上增加新的传感器并不容易，不仅仅**考虑传感器本身的尺寸**，还需要考虑**安装位置周边零件的影响**，如新增4D毫米波雷达，周边不能有金属物体的遮挡，安装位置是水平或者垂直或者斜置都会影响周边器件的布局。



# 目录

Part1： 4D毫米波雷达产品特征及应用前景分析

Part2： 4D毫米波雷达技术发展趋势分析

Part3： 4D毫米波雷达应用制约因素分析

## Part4： 4D毫米波雷达产业链主流玩家及产品分析

### 4.1 4D毫米波雷达产业链生态现状分析

- 4D毫米波雷达产业链构成
- 4D毫米波雷达产业生态未来趋势
- 搭载4D毫米波雷达的部分车型解析（已公开）

### 4.2 4D毫米波雷达国内外主流玩家及产品分析

- 4D毫米波雷达国际主流玩家及产品
- 4D毫米波雷达国内主流玩家及产品
- 4D毫米波雷达厂商产品通道数布局

### 4.3 4D毫米波雷达射频芯片国内外主流玩家及产品分析

- 4D毫米波雷达射频芯片国外主流玩家及产品（TI、恩智浦）
- 4D毫米波雷达射频芯片国内主流玩家及产品

## 4D毫米波雷达产业链生态构成

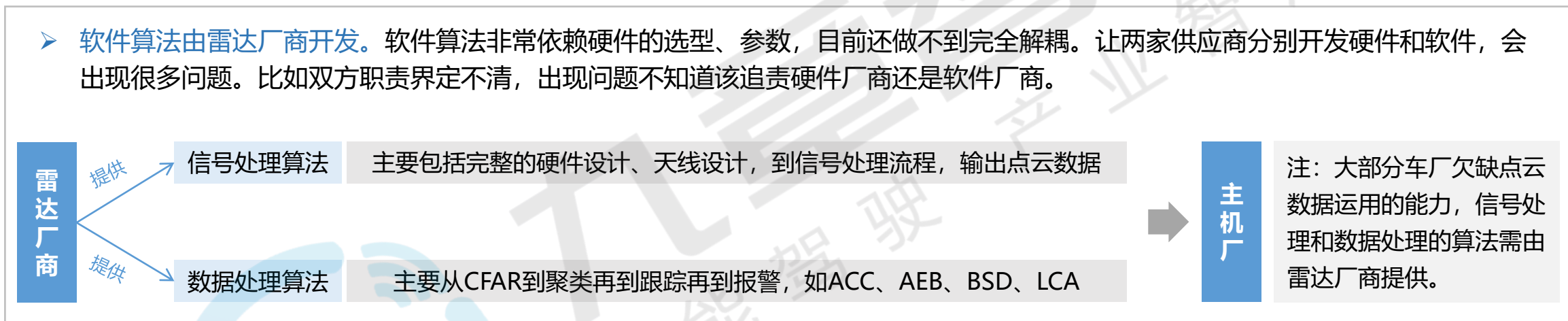
- 4D毫米波雷达产业链主要分为三部分：上游包括射频MMIC芯片（硬件核心）、高频PCB、处理芯片以及相关企业，中游包括成品4D毫米波雷达的生产企业，下游则为主机厂。
- 目前4D毫米波雷达处于市场培育阶段，可提供量产产品的厂商以国外为主，新车型中搭载4D毫米波雷达的主机厂较少。



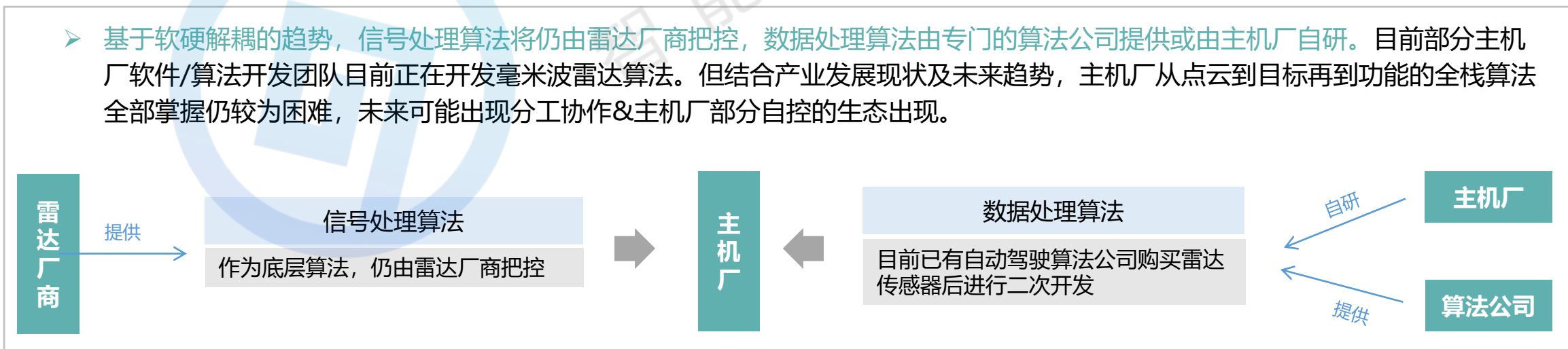
## 产业生态未来趋势：软硬解耦趋势将导致主机厂与雷达厂商将出现博弈

- 短期而言，4D毫米波雷达算法开发仍将由 Tier 1 提供（Tier 1 提供硬件+软件），主机厂仅对交付结果进行审核，且此方案成本较低；
- 长期来看，主机厂将会将数据处理部分的算法逐步自研自控，主机厂的诉求与雷达厂商的参与度存在博弈。

现状



未来



## 搭载4D毫米波雷达的部分车型解析（已公开）

- 目前主机厂已公布使用4D毫米波雷达的新车型SOP节点预计在2022年底~2023年。

车企/车型		上汽飞凡R7	吉利路特斯Eletre	长安深蓝SL03
4D毫米波雷达	定点厂商	采埃孚	福瑞泰克（傲酷）	森思泰克
	定点产品	PREMUIM	FVR40	-
	搭载数量	2颗	2颗	1颗（前向）
	定点时间	2021年	-	2022年年初
	量产时间	2022年9月下旬正式上市 2022年10月下旬开启交付	2022年10月开启预定 2023年年初开启交付	2023年
其他传感器配置	摄像头	1颗800万像素摄像头 11颗200万像素摄像头	7颗800万像素摄像头 4颗200万像素摄像头	1颗800万像素摄像头 9颗200万像素摄像头
	传统3D毫米波雷达	6颗长距点云雷达	4颗角雷达	4颗点云雷达
	激光雷达	1颗激光雷达 (LUMINAR 1550nm Iris)	4颗激光雷达 (2颗禾赛+2颗速腾聚创)	-
售价		预计接近30万元	预计2022年10月公布	纯电版18~21万 增程版17万
芯片		使用2颗英伟达ORIN X芯片（单颗芯片算力254 TOPs）	使用2颗英伟达ORIN X芯片	使用高通8155芯片
智驾功能		支持L3智驾功能	初期支持常规L2智驾功能	支持L3智驾功能（PVAP）

## 4D毫米波雷达国际主流玩家及产品

- 4D毫米波雷达产品以大陆、采埃孚等国际Tier1为主，主要通过双级联/四级联NXP、TI的芯片实现多通道。

主流玩家		 大陆	 傲酷	 Arbe	 采埃孚	 博世		
产品型号		ARS 540	FALCON	EAGLE	Phonenix	Lynx	PREMIUM	FR5CU
合作厂商		宝马	通用、长城		-	-	上汽R汽车	-
预计量产时间		2021年	2022年		2022年	2022年	2021年	-
工作频段		76-77GHz	76-81GHz	76-81GHz	77GHz	77GHz	-	76-77GHz
芯片		AWR2243	AWR2243	AWR2243	自研芯片	自研芯片	-	RXS816x
收发天线		12T16R	3T4R	6T8R	48T48R	24T12R	12T16R	4T8R
点云数量		2000个	-	1000个	-	-	-	1000个
功耗		23W	2.5W	5W	23W	-	-	15W
外形尺寸		137*90*39	100*80*15	100*80*15	143*127*30	77*67*30	-	110*143*30
重量		500g	-	644g	-	-	-	500g
距离	探测范围	300m	200m	350 + m	300m	260m	350m	302m
	距离精度	0.1-0.3m	0.16m	0.16m	0.07-0.6cm	0.1-0.8m	0.07m	-
速度	探测范围	-400~200kph	-400~200kph	-400~200kph	-	-	-	-400~200kph
	速度精度	0.1m/s	0.15m/s	0.15m/s	0.1m/s	0.1m/s	0.01m/s	0.05m/s
水平	视场角	120°	120°	120°	100°	140°	120°	120°
	角度分辨率	1.2°	2°	1°	1°	2.5°	-	2°
垂直	视场角	30°	30°	30°	30°	30°	30°	24°
	角度分辨率	2.3°	5°	1°	1.7°	6.4°	-	2.2°

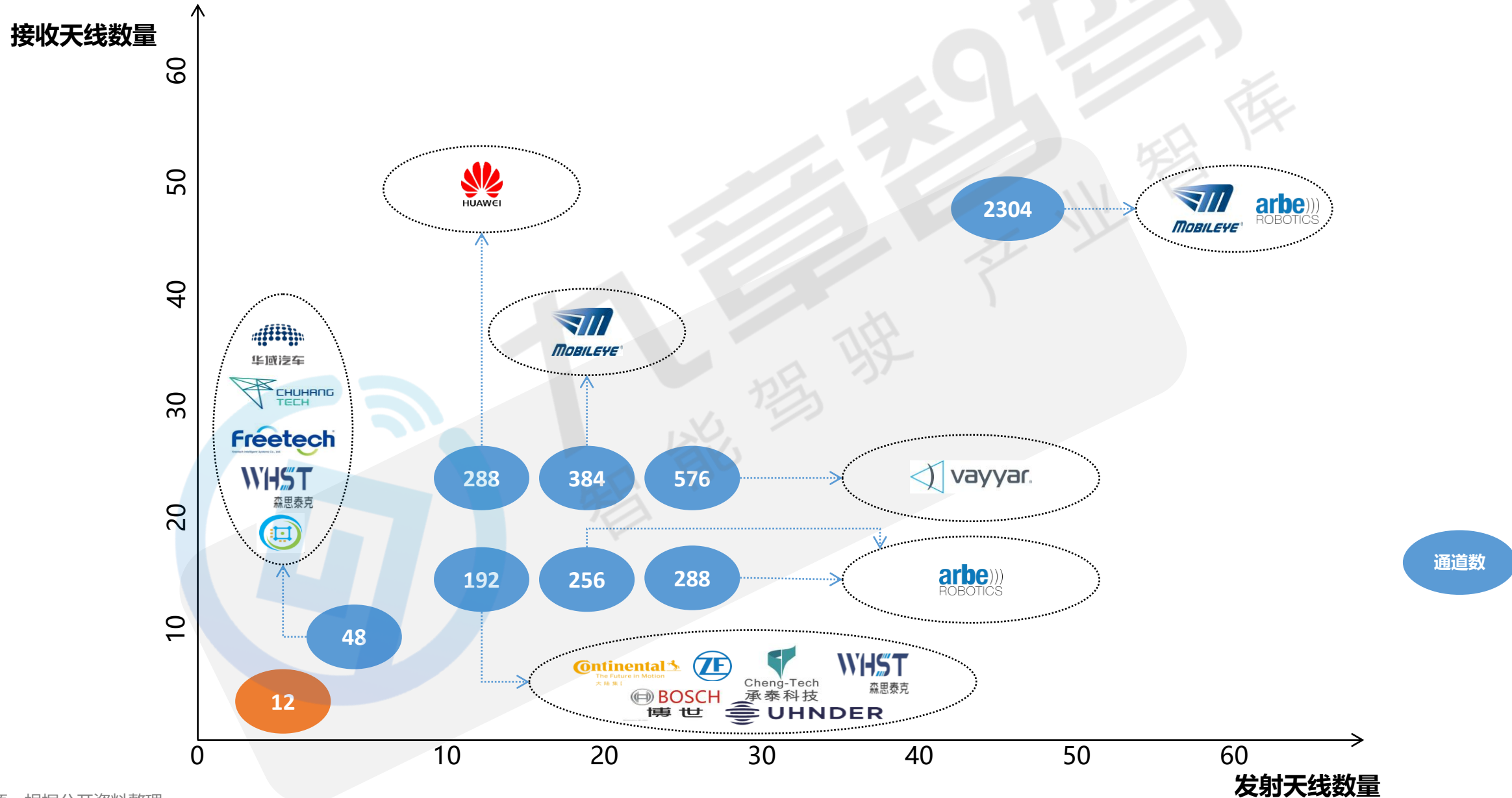
# 4D毫米波雷达国内主流玩家及产品

- 国内4D毫米波雷达厂商数量众多，多数处于开发状态，实际量产进展仍较为缓慢，且初创企业缺乏车载雷达目标输出经验，在目标稳定性、准确性方面仍需经过长时间验证，仅有少数企业进入到可提供样机测试阶段。

主流玩家		华为	华域汽车		森思泰克		福瑞泰克	纵目科技	纳瓦电子
产品型号		高分辨4D成像	LRR30	LRR40	STA77-6	STA77-8	FVR40	ZM-SDR1	4D高精成像雷达
合作厂商		-	友道智途	-	长安（不确定雷达产品型号）		路特斯	金康、美团、JAC	3家主流主机厂前装定点
预计量产时间		2022.H2	2021.Q4	2024年	2023年	2023年	2022.Q4	-	2022年
工作频段		77GHz	77GHz	77GHz	77-79GHz	77-79GHz	-	76-77GHz	77GHz
芯片		-	AWR2243	S32R45	-	-	-	-	-
收发天线		12T24R	6T8R	12T16R	6T8R	12T16R	6T8R	-	6T8R/12T16R
点云数量（个/帧）		1500个	1024个	3072个	1024个	3072个	1024个	-	1300个
目标数量		-	64个	128个	64个	128个		-	-
功耗		-	6.5W	-	7W	-	5W	4.5W	-
距离	探测范围	300+m	300m	350m	280m	350m	350m	-	320m
	距离精度	-	-	-	0.07m	-	0.1m	0.05m	0.1m
速度	探测范围	-	-	-	288kph	-	200kph	240kph	-
	速度精度	-	-	-	0.03m/s	-	0.1m/s	0.05m/s	0.1m/s
水平	视场角	120°	130°	150°	150°	120°	120°	150°	120°
	精度	0.1°	-	-	0.2°		0.1~0.5°	-	0.1°
	角度分辨率	1.5°	2°	0.8°	2.5°	1.2°	1°	-	1.6°
垂直	视场角	30°	-	-	30°	30°	30°	-	48°
	精度	-	-	-	0.5°	-	0.1~0.5°	-	0.2°
	角度分辨率	2.5°	3°	0.5°	4°	2.5°	1°	-	1.6°



## 4D毫米波雷达厂商产品通道数布局





## 4D毫米波雷达射频芯片国外主流玩家及产品

- 4D毫米波雷达芯片目前主要依赖NXP、TI、英飞凌等国外传统芯片厂商的通用芯片方案；
- 目前除德国大陆推出的全球首款4D成像毫米波雷达（ARS540）选用的是FPGA方案外，其余方案基本都基于德州仪器的芯片方案所开发。

### 传统芯片厂商主流射频芯片方案

### 自研射频芯片方案



#### 恩智浦

➢ 2020年12月 恩智浦推出了一套完整的4D毫米波雷达芯片组解决方案：

- **成像雷达解决方案：**  
S32R45+TEF82xx收发器
- **角雷达和前置雷达解决方案：**  
S32R294+TEF82xx收发器

\* **关注点：** S32R294目前采用16nm制程工艺，未来将可能采用台积电的5nm工艺打造，可以处理4D点云雷达信号，为主机厂提供扩展性解决方案所需的效能。



#### 德州仪器TI

➢ 德州仪器于2018年推出基于**AWR2243 FMCW（调频连续波）单芯片收发器**的**4片级联4D毫米波雷达全套设计方案**。

\* **关注点：** 德州仪器针对AWR2243提供一站式解决方案，包括参考硬件设计、软件驱动程序、示例配置、API指南和用户文档，同时提供2芯片级联和4芯片级联方案



#### 英飞凌

➢ 2020 年英飞凌推出基于**可级联的芯片 RASICTM RXS816xPL**的4D毫米波雷达解决方案，配合英飞凌的多核芯片二代AURIXTM TC3x来完成对环境的成像功能。

\* **关注点：** RXS816xPL系列芯片使用支持高达2GHz的高调制带宽，以实现精确的距离测量和MIMO的同步发射机操作，能够探测和识别300米范围内的物体。



- 4D成像雷达解决方案提供商Arbe选择自研芯片：
- 出发点：认为市面上没有能够处理自动驾驶所需的海量信息的芯片
- 优势：在于可结合自身需求来设计芯片，最大程度发挥芯片的性能
- 问题点：需投入较大的人力、物力、时间，短期内无法解决产品成熟度和稳定性的问题，让需较长时间验证。可能会选题提供一个Demo或者SDK让用户在此基础上进行开发。

**4D毫米波雷达通用芯片优势在于产品成熟度较高、稳定性及可靠性较优，在量产开发过程中出现问题相对较少；**

**但劣势在于目前基本无法提供定制化服务（战略客户外），且需要与芯片厂商签订战略合作才能优先拿到样机开发和软件配置。**

## TI: 2017-2022 毫米波雷达主要产品对比分析

参数	AWR1443	AWR1642	AWR2243	AWR2944	升级方向
收发器数量	4收3发	4收2发	4收3发	4收4发	• 提高角度分辨率与精度
存储器	576KB	1.5MB	无	4MB	• 提高RAM容量，平衡通道数提升以及算法复杂度提升带来的内存开销增大
Max I/F (Intermediate Frequency) (MHz)	5	5	20	15	• 提升对外来干扰的抑制能力
Max real/complex 2x sampling rate (Msps)	12.5	12.5	45	37.5	• 提升采样分辨率，提高信噪比
Device Security*	无	有	无	有	• 提升产品安全特性，防止非法读取数据，保护知识产权
安全加速器 Security Accelerators	无	无	无	有	
是否符合AEC-Q100 标准	否	否	是	是	• 符合 AEC-Q100 标准
CAN FD	0	1	无	2	• 提升数据传输效率，增强信息传输的稳定性和安全性
MCU (RxF)	R4F	R4F	无	R5F	• 射频性能提升，提高探测距离与可靠性
DSP	无	DSP C674x	无	DSP C666x	• 降低DSP规格，C666x处理频率360MHz低于C67x的600MHz
硬件加速器 Hardware accelerator, HWA	有	无	无	有	• 内置DDMA、C-PHY等硬件加速单元，提升40%雷达探测距离； • 升级HWA2.0，通过卸载通用雷达处理（如 FFT、恒定误报率 (CFAR)、缩放和压缩）来对 DSS 和 MSS 进行补充
硬件安全模块 Hardware Security Module, HSM	无	无	无	有	• HSM 由可编程 ARM Cortex M4 内核和必要的基础设施组成， 以在器件内提供安全的操作区域，加强雷达硬件安全

## TI: HWA定义及意义

- 雷达硬件加速器（HWA）能够协助主处理器/DSP减少FMCW雷达信号处理中部分常用的计算负担；
- 不需要主处理器参与计算，可直接通过控制启动HWA进行相关专用计算。

### HWA在2944内位置

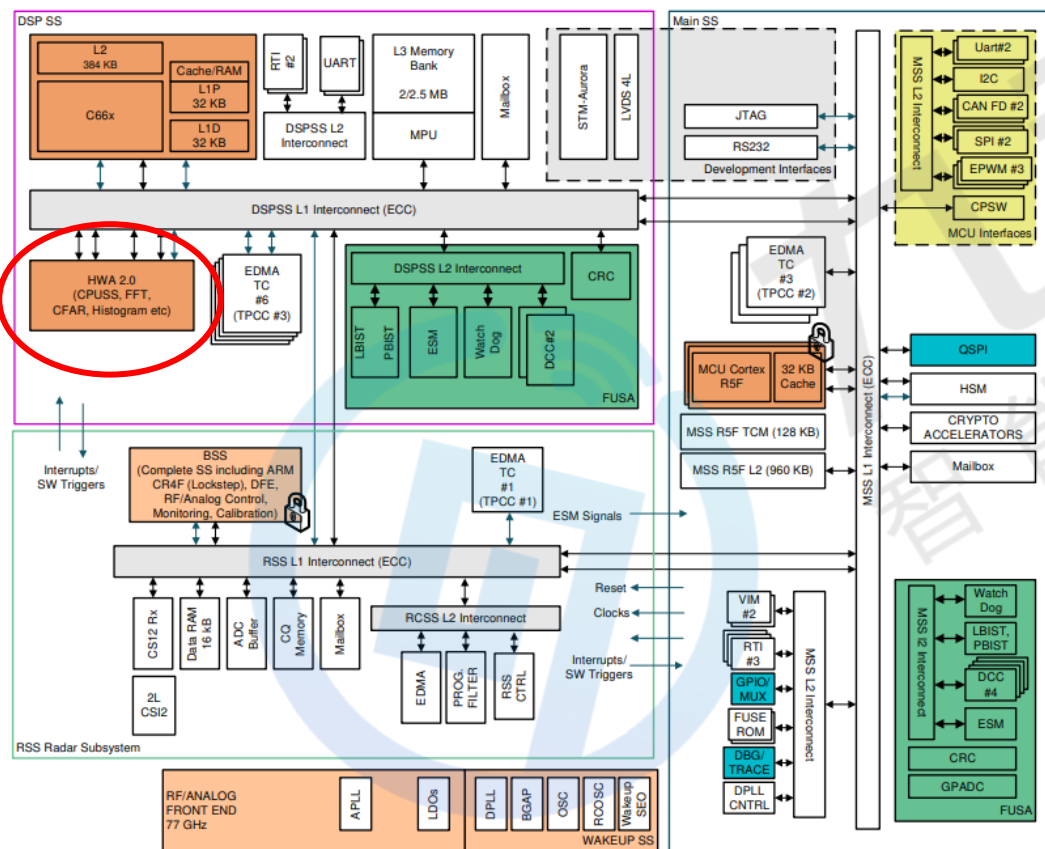
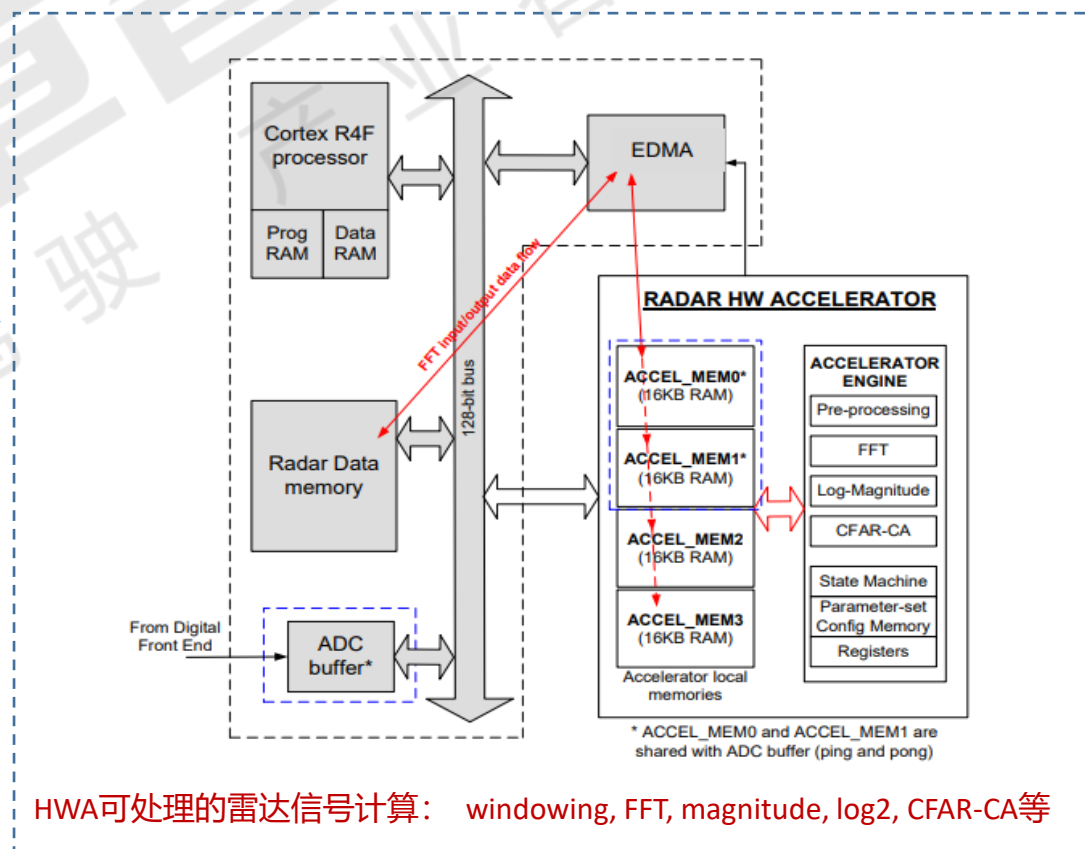
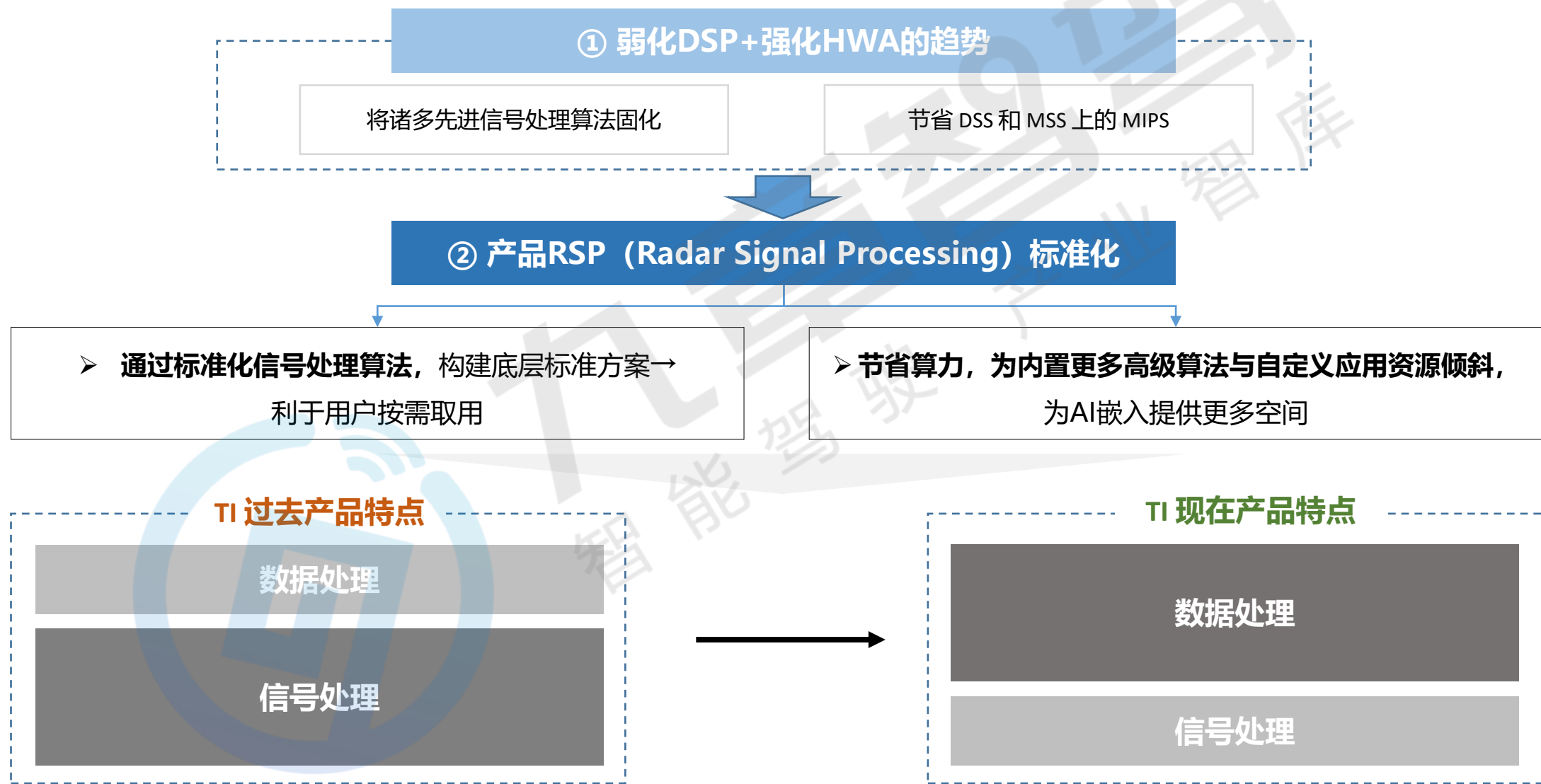


Figure 9-5. Processor Subsystem

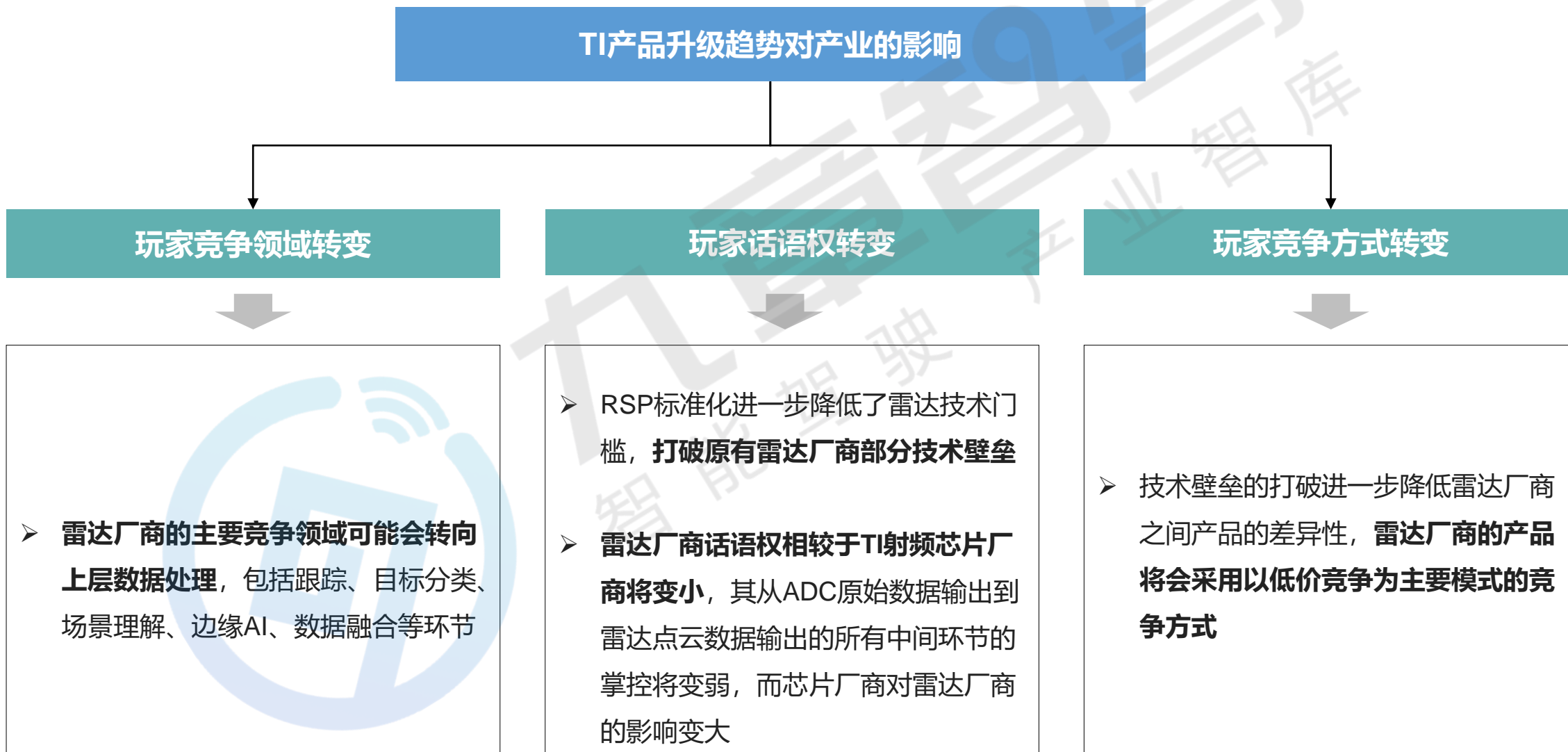
### HWA在信息处理流程中的作用



HWA可处理的雷达信号计算： windowing, FFT, magnitude, log2, CFAR-CA等



DSP规格↓ + 接收端单路混频方案ADC数量↓ → 升级后的产品 (AWR2944) 成本并不会提高很多



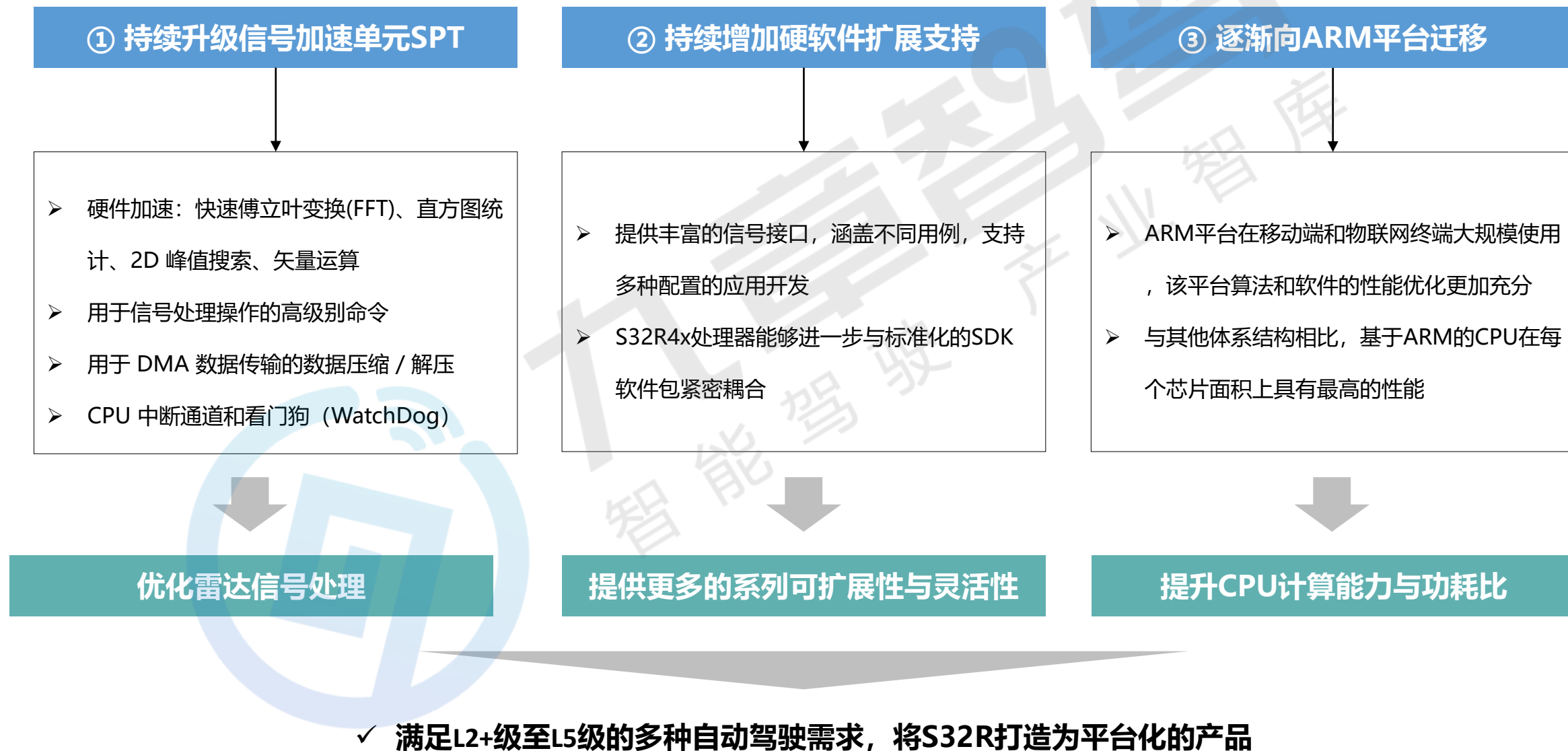


# 恩智浦：S32R微控制器产品对比

项目	S32R274	S32R294	升级方向
尺寸	7.5mm×7.5mm	7.5mm×7.5mm	<ul style="list-style-type: none"><li>尺寸相同，R294性能却提升了一倍</li></ul>
数字处理制程工艺	55nm制程	16nm制程	<ul style="list-style-type: none"><li>降低功耗，S32R294的功耗不到R274的一半，在0.9W左右，有助于客户开发高性、能低功耗的毫米波雷达产品</li></ul>
CPU	双Power Architecture e200z4 32位CPU	双Power Architecture e200z7 32位CPU	<ul style="list-style-type: none"><li>提升雷达信号的后处理和任务调度，如超分辨算法、信号聚类、目标追踪等；</li><li>16nm Power架构的处理器与R274有非常好的软件兼容性，软件复用率高达80%</li></ul>
硬件加密引擎	无	有专门的硬件加密引擎CSE（Cyptographic Services Engine）获得了ASIL D级 ISO26262信息安全性认证	<ul style="list-style-type: none"><li>支持安全启动（security boot）等高阶加密算法，提高信息安全性</li></ul>
静态随机存取存储器 SRAM	1.5MB	5.5MB	<ul style="list-style-type: none"><li>提升中频信号处理效率；</li><li>与 S32R274 相比，S32R294具有多种配置，可以支持从入门到高端的全系应用开发</li></ul>
MIPI CSI-2	1	2	
信号加速单元	SPT 2.0	SPT 2.8 高达430 MHz 对雷达中频信号的FFT、求模、峰值检测、直方图统计等耗资源的运算进行硬件加速，是专门针对FMCW雷达的信号处理加速单元	<ul style="list-style-type: none"><li>优化雷达信号处理加速机制，尽可能提高性能功耗比</li></ul>

# 恩智浦：S32R处理器产品对比

项目	S32R41	S32R45	差异点
定位	专为L2+辅助驾驶应用定制	支持L2+级到L5级用例，可以满足运输等工业应用需求	<ul style="list-style-type: none"><li>R41具有更高性价比，可将4D成像雷达的优势延伸到更多汽车</li><li>R45能够满足更高级别的自动驾驶需求</li></ul>
存储器	8MB SRAM + 外部闪存	8MB SRAM + LPDDR4 + 外部闪存	<ul style="list-style-type: none"><li>R45内存支持更强，更能满足大幅增加的雷达数据和算法软件需求</li></ul>
收发器	支持最多两个级联收发器	支持多达四个级联收发器	<ul style="list-style-type: none"><li>R45可用于先进的长距雷达应用</li></ul>
CPU	1个Arm A53内核，主频高达800MHz	4个Arm® A53内核，主频高达800MHz	<ul style="list-style-type: none"><li>R45整体性能更强，标志着恩智浦向Arm平台的迁移</li></ul>
	2个锁步Arm M7内核，主频高达400MHz	3个锁步Arm M7内核，主频高达400MHz	
接口	1 GB ENET 1 10/100 ENET 2 CAN FD 4 SPI	2 PCIe 2 GB ENET 8 CAN FD 2 GB ENET	<ul style="list-style-type: none"><li>R45具有独特的 PCIe扩展支持，可将多个 S32R45 器件组合在一起，用作高性能域控制器</li></ul>
MIPI CSI2	2	4	<ul style="list-style-type: none"><li>R45中频信号处理效率更高</li></ul>
SAR ADC	1个8通道SAR ADC	2个16 通道SAR ADC	<ul style="list-style-type: none"><li>R45模拟信号向数字信号的转换效率更高</li></ul>
SPT	SPT 3.5 600 MHz 带集成DSP	SPT 3.1 600 MHz 集成 DSP 和多线程	<ul style="list-style-type: none"><li>SPT 3.1的性能是 SPT 2.0 的 10 倍</li><li>SPT 3.5性能强于SPT 2.8</li></ul>
Linear Algebra Accelerators	无	有	<ul style="list-style-type: none"><li>LAX 1.0 线性代数加速器用于环境建模和融合处理加速，R45具有更强的计算能力，能处理特征检测和分类（识别不同类型的对象，如人、车和动物）</li></ul>



## 4D毫米波雷达射频芯片国内主流玩家及产品

- 短期来看，国产芯片厂商的技术能力与国外大厂多年的技术积累之间存在较大差距（如单芯片可实现收发通道数量），虽然在成本上会有些优势，但在极限工况下稳定性、可靠性不足导致其在量产过程中会产生一致性的问题，如高低温、SDK软件成熟度等，需优化迭代；
- 目前4D毫米波雷达并没有普及，每年零部件的出货量较小，①性能、质量不如主流国外芯片；②雷达厂商不愿承担“试错”风险，新芯片厂商竞争优势较小。

加特兰Alps CAL77S244-AE芯片性能参数

关键指标	性能参数
发射通道数	4
接收通道数	4
工作频率	76-81GHz
扫频带宽	5GHz
FMCW波形器	支持自动增益控制、帧交错等功能
CPU	300MHz ARC EM6
外设接口	CAN/CAN-FD/SPI/QSPI/UART/12C/LVDS/GPIOs

迈矽科MSTR003芯片性能参数（预计2023年Q1量产）

关键指标	性能参数	关键指标	性能参数
发射通道数	3	调频线性度	<0.5%
接收通道数	4	ADC采样率	40Msps
芯片工艺	硅基工艺	中频低通滤波器带宽	7.5MHz、10MHz、12.5MHz、15MHz可调
工作频率	76-81GHz	中频高通滤波器带宽	200KHz、1MHz、5MHz可调
发射功率/配套PA	15dBm/23dBm	发射信号杂散	-50dBc
发射功率可调范围	0~+15dBm	芯片功耗	3.5W（发射全开）
移相精度	6bit可调	相位噪声（@1MHz）	76-77GHz-95dBc，77-81GHz-94dBc
接收机噪声系数	9dB	是否支持级联	是
接收机输入1dB	-12dB	芯片封装	FOWLP

➤ **国产厂商同样存在供应风险：** 国产芯片厂商多数不具备制造能力，需专业芯片生产企业如台积电代加工，但台积电代理品牌多，也无法保证出货量，国产芯片同样存在供应链短缺、供应不足的风险

➤ **来自AI芯片厂商的竞争风险：** 未来国产AI芯片厂商在AI芯片市场饱和、企业需开辟新市场、4D毫米波雷达芯片市场规模大等前提下可能会涉足雷达芯片行业

- 凡知杂货铺：4D雷达之信号处理框架
- 凡知杂货铺：4D雷达天线布局思考-方位角篇、4D 雷达天线布局思考-俯仰角篇
- 凡知杂货铺：如何做好一款4D 高分辨毫米波雷达
- 雷锋网：雷达仿真与测试
- 华为押对宝？4D毫米波雷达将成自动驾驶首选？
- 替代激光雷达？4D 成像毫米波雷达的「热」与「痛」
- 智能汽车设计：主流雷达供应商的4D成像雷达方案梳理
- 中金证券：汽车智能化系列之4D成像雷达：于锦上更添花，由侧幕登前台
- 汽车驾驶之心：大火的4D Radar数据集及基线模型汇总
- 智驾最前沿：一文聊聊4D毫米波雷达发展
- 智车行家：CEO焦点访谈：4D成像雷达成主流，软件比硬件先行？
- RF技术社区：毫米波雷达天线布局设计指南
- frostblade：谈谈AoP毫米波雷达
- 赵孔瑞：车载毫米雷达系列（连载）1.漫谈车载毫米波雷达历史
- 赵孔瑞：车载毫米波雷达天线介绍
- 赵孔瑞：奔向量产之路：4D成像毫米波雷达产品化问题思考
- 工程管理前沿：试述 DSP 技术在雷达信号处理中的应用
- TI毫米波雷达：TI毫米波雷达系列——硬件加速器（HWA）
- 过路人：TI 毫米波雷达软件架构分析（一）总述



- 九章智驾专题报告尽量保证报告中信息及数据准确严谨，因时间及人力有限，报告中如若存在纵漏及重大失误敬请读者不惜赐教批评指正。
- 本报告的部分信息来源于我们认为可靠的专家访谈及公开资料，引用信息的版权归原作者所有，九章智驾对信息的准确性、完整性或可靠性作尽可能的追求但不作任何保证。
- 本报告为九章智驾原创，版权归属于九章智驾，欢迎因业务需要引用本报告内容，引用时需注明出处，对于未注明来源的引用、盗用、篡改以及其他侵犯九章智驾著作权的商业行为，九章智驾将保留追究其法律责任的权利。
- 在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见均不构成对任何人的投资建议。请客户对本报告的信息和意见进行独立评估，对依据或使用本报告所构成的一切后果，本公司均不承担任何法律责任。



# THANK YOU

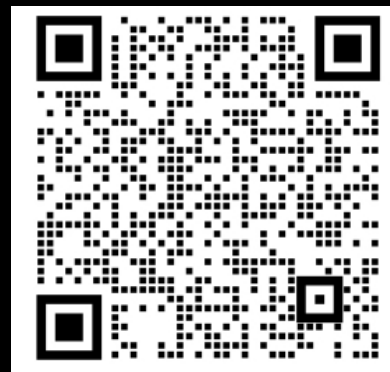
## 鸣 谢

衷心感谢各位给予交流支持的业内专家们！

衷心感谢本报告中所引用的参考资料的作者们！



九章智驾公众号



业务合作