# [毫米波雷达与激光雷达融合相关工作](http://10.102.1.36:8091/pages/viewpage.action?pageId=1346822)

**相关工作**

本小节的目的是分享目前人们对于该融合问题的研究进展，提供一些了解的方向。

最早应用到车辆的距离感知设备就有毫米波雷达，它具有7x24，不受环境影响的高感知鲁棒性的特点。究其原因，是主动探测以及较长感知波段这两个特点给它带来的优势。与此同时，它的缺点则是，毫米波雷达无法具有衍射极限以下的空间分辨率（毫米级别），并且在波束控制方面对硬件设计要求更高。低成本毫米波雷达往往采用少量的发送接收天线[1]，通过锯齿波连续调频方式，把环境感知问题转换为环境目标动、静态感知问题。这样的做法很好地避免了感知时对波束空间宽度调制的要求，从被测目标运动速度来区分目标与环境。因此，对于这类型的毫米波雷达，更加直观的数据使用方式就是在目标级。

当然，目前也有不少工作开始关注毫米波雷达在生成目标之前的信号数据。希望其能够与其他更高粒度的传感器进行融合，在目标检测或者是可行驶区域分割等问题中表现出更好的效果。比较常见的方案是毫米波雷达与相机的融合，其中包含毫米波雷达角度-距离(range-azimuth)信号图与相机图像的融合[2,3]，以及毫米波点云与相机图像的融合[4,5]。当然，其采用的都是深度学习模型拟合的方案。针对目标检测任务，其设计了毫米波雷达与相机在不同空间维度下的融合方案。例如对数据预处理使双方数据都到达鸟瞰图下，之后采用两个分支的卷积神经网络对两个数据输入源进行特征提取，然后在高的特征维度空间将结果拼接后，再进行特征提取下采样后接上采样。最终连接目标检测任务输出头，得到输出的结果[3]。

针对自动驾驶对环境三维感知的高要求，目前也出现了4D毫米波雷达[6,7]。它们的特点是收发天线增多，发送波束宽度基本做到1°甚至更高。这样的做法让毫米波雷达能够在空间感知上做到更细的颗粒度，其感知结果可以不再是目标，而是环境的三维轮廓。这样的毫米波雷达目标则是代替激光雷达进行环境感知任务。

激光雷达与毫米波雷达的融合任务，本质上与相机与毫米波雷达融合并无两样，二者都属于针对某个任务（分类，目标检测，分割等）将不同空间采样颗粒度的数据进行融合的问题。其方法论基本满足这样的流程：数据预处理、特征空间对齐、融合逻辑、输出解码四个步骤[8]。数据预处理部分包括毫米波雷达的信号处理（即整体上称为3D-FFT的流程），激光雷达的信号处理（可输出为点云形式，也可以保留信号形式）。特征空间对齐需要克服很多来自不同传感器的挑战，首先是空间采样颗粒度的问题，其次是时间采样序列的对齐问题，另外还有传感器的失效数据问题，冲突数据问题，外点问题等。融合逻辑则是要充分考虑到数据的测量不确定度，将其建模量化，之后在某个贝叶斯推理融合框架下，对数据进行加权结合。最后一步则是从加权融合结果中解码对应任务的输出。例如针对目标检测任务，则是希望输出目标的位置，长宽高等。针对可行使区域检测，则是输出空间分割结果。

目前对于激光雷达与毫米波雷达的融合研究开展得并不多，并且受限于激光雷达的开源程度，大部分融合的输入源都是激光雷达点云与毫米波雷达信号[9,10,11]。但是这并不是关键，其本质上并不与毫米波雷达与相机融合有多少差别，并且也满足上述的数据处理流程。

公开的数据集如下：

Bijelic M.[11]等人在人工的大棚下进行了多传感器在雾气、下雨等可控条件下的实验，并发布了公共数据集。其同时公开的多传感器融合方案包含了更多的传感器（激光雷达，可见光相机，红外相机，毫米波雷达等）。另外它还公开了一个模拟点云受到雾气影响的计算模型。输入当前的雾气浓度，通过该模型，可以修改无干扰的激光点云成为受干扰点云。Valeo[10]发布了激光雷达，4d毫米波雷达与相机的开源数据集。标注了8252帧数据，但是标注形式是只有目标位置没有目标的尺寸结果。牛津大学[12]毫米波雷达数据集包含了navtech 360 radar，velodyne 32L lidar和相机。标注了8k+的2d，3d目标结果。科罗拉多大学[13]发布了矿坑的毫米波雷达激光雷达数据集。其主要针对的是定位与建图任务。其采用的毫米波雷达与我们的一样，是TI的级联2243毫米波雷达。

公开的方法如下：

Qian[14]等人使用了牛津大学数据集进行融合任务的研究。其借鉴了激光雷达与相机的前融合框架AVOD[15]，提出了名为MVDNet的融合目标检测网络。其通过先验框的方式，输入多帧，融合激光雷达点云与毫米波雷达信号，输出目标检测结果。该方法的问题是先验框使得模型对目标检测任务有强依赖性，无法修改为本文所需的点云输出任务（分割任务）。

针对激光信号去噪问题，MIT[16]采用了SPAD阵列对雾气中的目标进行了轮廓的去噪还原。其分别建立激光和雾气的先验模型，拟合数据分布后从噪声数据中将激光分布提取出来。实验表明其模型在一定的雾气浓度下具有肉眼可分辨的去噪能力。这个方法的问题是，测试在近场，另外这样的分布模型很显然并没有很好的泛化性。

另外，有一篇中文的论文[17]讨论了毫米波雷达与激光雷达的融合方法。它的方法更加直接，首先对双方的点云进行去噪，之后将噪声水平低的点云直接叠在一起，作为最终的输出。他通过slam任务验证了在这种处理方式下，受到烟雾噪声影响的数据建图结果比不处理要好。

参考文献

为了能更快地索引到参考的位置，我这里没有按照参考文献的格式来，而是直接放上链接。

[1][https://www.ti.com/lit/ug/spruim4b/spruim4b.pdf?ts=1646034428551&ref\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FIWR1843](https://www.ti.com/lit/ug/spruim4b/spruim4b.pdf?ts=1646034428551&ref_url=https%3A%2F%2Fwww.ti.com%2Fproduct%2FIWR1843)

[2]Lowlevel Sensor Fusion for 3D Vehicle Detection using Radar RangeAzimuth Heatmap and Monocular Image

[3]Radar and Camera Early Fusion for Vehicle Detection in Advanced Driver Assistance Systems

[4]CenterFusion: Center-based Radar and Camera Fusion for 3D Object Detection

[5]GRIF Net-Gated ROI Fusion for 3D Object Detection from Radar and Monocula

[6]<https://www.ti.com/lit/ug/tiduen5a/tiduen5a.pdf>

[7]<https://www.youtube.com/watch?v=w3Xc6cHiF-Q>

[8]Multisensor data fusion: A review of the state-of-the-art

{9]<https://oxford-robotics-institute.github.io/radar-robotcar-dataset/>

[10]<https://www.valeo.com/en/valeo-ai/>

[11]Seeing Through Fog Without Seeing Fog: Deep Multimodal Sensor Fusion in Unseen Adverse Weather

[12]<https://oxford-robotics-institute.github.io/radar-robotcar-dataset/>

[13]<https://arpg.github.io/coloradar/>

[14]Robust Multimodal Vehicle Detection in Foggy Weather Using Complementary Lidar and Radar Signals, CVPR 2021.

[15]Joint 3D Proposal Generation and Object Detection from View Aggregation

[16]Towards photography through realistic fog

[17]党相卫, 秦斐, 卜祥玺, 等. 一种面向智能驾驶的毫米波雷达与激光雷达融合的鲁棒感知算法[J]. 雷达学报, 待出版. doi:  10.12000/JR21036