

参考如下：

- 《英文版Tracking radar targets with multiple reflection points.pdf》
- 《Group Tracker Parameter Tuning Guide for the 3D People Counting Demo.pdf》

3.1. Group Tracking

3.1.高级算法设计

随着检测精度的提高，真实世界的雷达目标（汽车、行人、墙壁、着陆地面等）。作为一组多个反射点的形式呈现给跟踪处理层。这些探测点形成了一组与范围、角度和角速度相关的测量值。当然，在任何时候都可能有多现实世界的目标。因此，我们寻找一种能够与多个目标群体一起工作的跟踪器。组跟踪方法如下图所示。

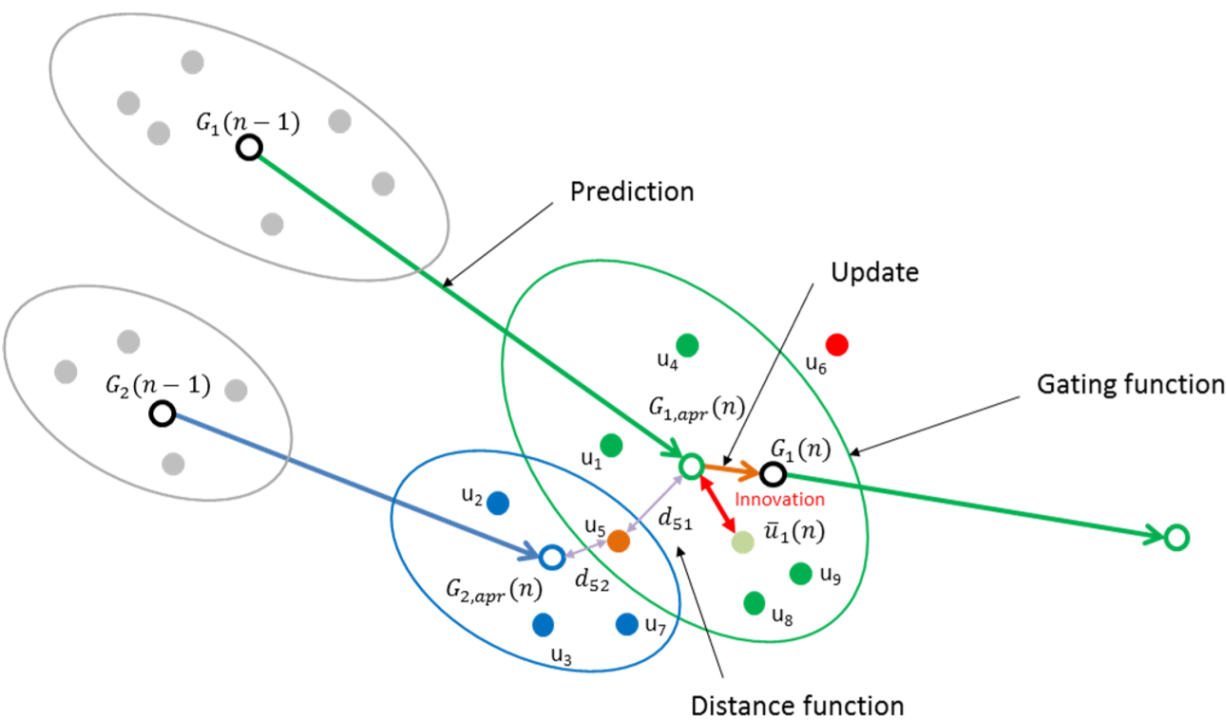


Figure 5. Group Tracking

<https://blog.csdn.net/djfkj52>

3.2. 群组跟踪框图

2944中组跟踪器的输入是一组来自检测层的测量点，称为“点云”。从检测层获得的每个测量点在球坐标中包括测量点的范围、方位角、高程和径向速度。2944所使用的跟踪器运动模型是一个

2D-CV恒定速度模型，其特征是在笛卡尔空间中使用一个4元状态向量S: [x, y, vx ,vy]。需要注意的是，测量向量通过非线性变换与状态向量相关联（由从球面坐标转换到笛卡尔坐标需要进行三角运算）。使用标准卡尔曼滤波器的一种变体，称为扩展卡尔曼滤波器(EKF)，用于群跟踪器，利用非线性函数围绕当前状态估计的导数使非线性函数线性化。有关算法的更多细节，请参阅组跟踪器实现指南《英文版Tracking radar targets with multiple reflection points.pdf》。

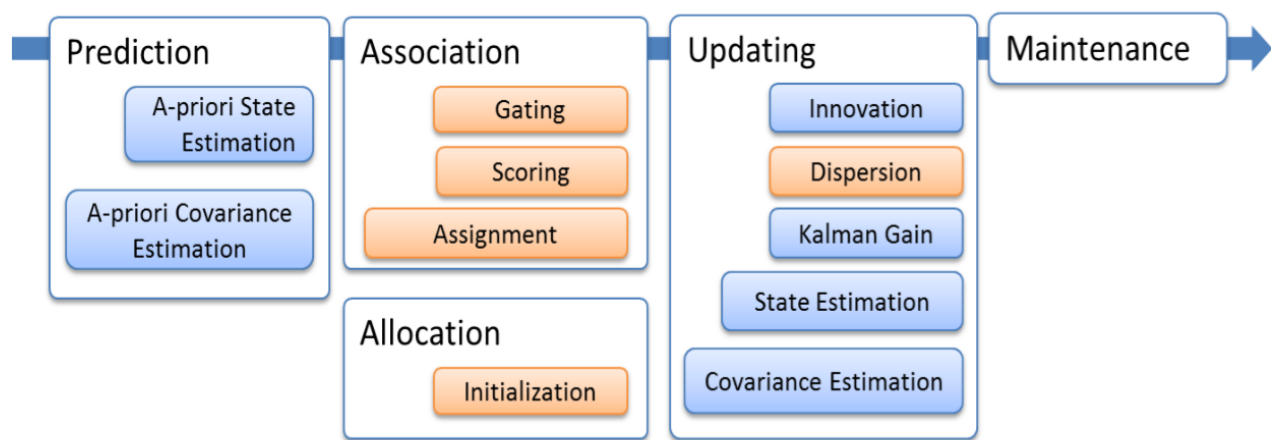
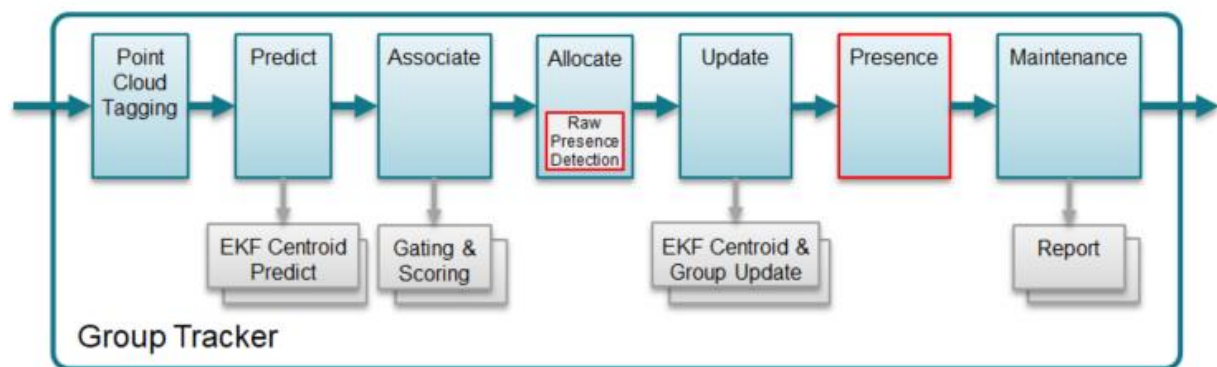


Figure 6. Tracking Block Diagram

<https://blog.csdn.net/djfkj52>

测量误差，也被称为innovation。innovation中也包含新信息。



• Point Cloud Tagging

作为第一步，落在用户可配置边界之外的测量点将被适当地标记和忽略，以便进一步处理。这些边界定义了感兴趣的区域，并通常符合于空间或感兴趣的区域的维度。忽略房间墙壁之外的点也有助于消除ghost目标，因为这些ghosts经常落在房间的物理维度之外

• Prediction Step

2944预测步骤实现了卡尔曼滤波器的标准预测方程。预测的输入是笛卡尔坐标中的位置、速度以及被跟踪对象相应的状态协方差矩阵Q。在预测方程的基础上，估计了每个目标的新位置、速度和协方差矩阵Q。估计时间的跟踪组质心。

• Association Step

假设存在一个或多个tracks以及相关的预测状态向量。对于每个给定的track，我们形成一个关于预测质心的门gate。如果点在track的gate内，它被分配一个score。每一个point都有资格为每一条track给score。最后，point将被分配给的score最高的track。请注意，每个点只与单个track相关

gate口应考虑以下因素：

目标操纵maneuver 组的分散dispersion of the group 测量噪声

我们使用组残差协方差矩阵在跟踪组质心周围的3D测量空间中构建一个关于跟踪群质心椭圆。椭圆将代表gating函数，以限定我们在时间n观察到的单个测量结果。gating设计在以下部分中说明

对于gate的测量，我们将归一化距离函数作为cost函数进行计算，以将测量与每个轨迹相关联

assignment process将cost函数最小化，一次将一项测量分配给最近的track。这将创建与每个轨道相关的一组测量

• Allocate

在关联步骤中未与现有track关联的所有点都将经过一个分配步骤。在功能上，分配类似于clustering。在分配步骤中，首先选择一个arbitrary的测量点作为一个leading测量点，并用于一个集群/候选集的初始化。然后检查每个测量值是否在用户对cluster的可配置的速度和距离阈值范围内。如果测量值通过检查，则将其添加到cluster中，并重新计算质心。一旦对所有测量点完成此测试，就会为cluster检查一些额外的合格标准。这些测试包括cluster是否超过最小点数，其平均速度超过速度阈值，以及cluster中的点是否有足够强的组合信噪比。如果这些合格条件满足，则将创建一个新的跟踪实例，并将cluster中的关联点用于初始化tracker。没有通过合格标准的cluster将被忽略。

• Update

当新的测量值与track相关联时，基于这些新的相关测量值，更新每个轨迹的轨迹质心和相应的协方差矩阵估计。此外，本一步还计算了群轨迹离散矩阵和群协方差矩阵。组协方差矩阵随后在每个轨迹周围形成一个gate

• Presence

存在检测确定在占用区域内是否存在任何目标。该算法结合了“原始检测”和“区域已知目标”指标。对于“原始检测”指示，它重复使用由分配过程创建的候选集，并根据占用阈值检查集合中的点云数和它们的平均速度是否超过相应的阈值。对于“区域内的已知目标”，算法检查已知的目标测量质心是否在占用盒内。

• Maintenance

每条track都要经过一系列事件的生命周期。轨道可能处于检测、活动或自由状态（DETECT, ACTIVE or FREE state）。在维护步骤中，track的状态可能被改变或track可能被取消分配。

4.Implementation Details

4.1. Group Tracker

跟踪算法被实现为一个库。应用程序任务使用配置参数创建算法实例，该配置参数描述传感器，场景和雷达目标的行为。从应用程序任务上下文每帧调用一次算法。可以创建组跟踪器的多个实例。

下图说明了算法在每个帧调用期间执行的步骤。算法以极坐标（范围，角度，多普勒）输入测量数据，并在笛卡尔空间中跟踪对象。因此，我们使用扩展卡尔曼滤波器（EKF）流程。

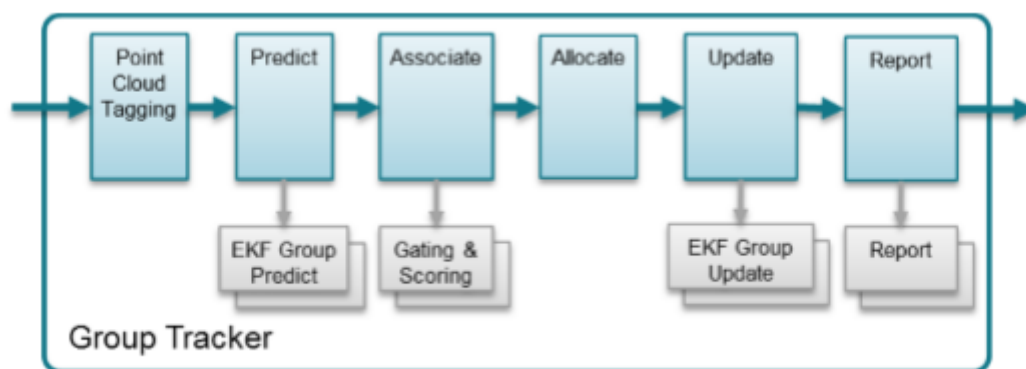


Figure 9. Group Tracking Algorithm <https://blog.csdn.net/djfkj52>

首先基于场景边界标记点云输入。有些点可能被标记为“边界外”，在关联和分配过程中将被忽略。

预测函数根据在时间 $n-1$ 估计的状态和过程协方差矩阵估计时间 n 的跟踪组质心。我们为每个可跟踪对象计算先验状态和误差协方差估计。在这一步，我们还计算测量矢量估计。

关联功能允许每个跟踪单元指示每个测量点是否“足够近”（门控），如果是，则提供出价值（scoring）。point分配给最高出价者。未分配的点正在通过分配功能。

在分配过程中，首先根据点在测量坐标中的接近度将它们合并为一组集合。每个集合成为分配决策的候选者。它必须通过多项测试才能成为新的track。一旦通过，就分配新的跟踪单元。

在“更新”步骤中，将根据一组关联点来更新track。我们计算innovation, 卡尔曼增益以及后验状态向量和误差协方差。

除经典EKF外，误差协方差计算还包括测量噪声协方差矩阵中的 group dispersion。

报告功能查询每个跟踪单元并产生算法输出。

4.2. Building and using the library

该算法以现成的makefile基础结构作为源代码提供。 可以构建库来支持2D或3D几何。 应用程序应包括库（2D或3D），因为它需要。以流量监控（TM）和人数统计（PC）用例的建议值为例。与以前（仅2D）版本的更改以红色突出显示。 配置将在模块创建时传递给算法实例。 下一章介绍了配置参数。

4.3. Configuration Parameters

配置参数用于配置跟踪算法。 它们应根据特定的场景和目标特性进行调整，以匹配客户用例。 参数分为强制性和可选（高级）。 强制性参数如下所述。

4.3.1.强制性配置参数

参数	T M	PC	单位	描述
maxNumPoints	250	250	-	每一帧的最大检测点云数
maxNumTracks	20	20	-	在任何给定时间内要跟踪的最大目标数量
stateTrackingVectorType	2D A	2D A	-	2DA={x,y,vx,vy,ax,ay} 3DA={x,y,z,vx,vy,vz,ax,ay,az}
initialRadialVelocity	-20	0	m/s	在探测时刻的预期目标径向速度
maxRadialVelocity	N/A	N/A	m/s	由传感器报告的最大绝对径向速度。这应与传感器的chirp配置相匹配
radialVelocityResolution	N/A	N/A	m/s	由传感器报告的最小非零径向速度。这应与传感器的chirp配置相匹配
maxAcceleration	0, 20, 0	0.1, 0.1, 0.1	m/s ²	横向、纵向和垂直方向的最大目标加速度。用于计算处理噪声矩阵。对于2D选项，将忽略垂直方向

参数	T M	PC	单 位	描述
deltaT	N/ A	N/A	m s	帧速率。这应与传感器的chirp配置相匹配
verbosityLe vel	N O N E	NO NE	-	表示冗长级别的位掩码：NONE WARNING

4.3.2. Advanced parameters

高级参数分为几组。 每个集合都可以省略，默认值将由算法使用。 客户应修改所需的参数以获得更好的性能。

1) Scenery Parameters

这组参数描述了场景。 它允许用户为跟踪器配置预期的边界和静态行为区域。 用户最多可以定义 2 个边界框和 2 个静态框。 方框坐标以米为单位，传感器位于笛卡尔 (X, Y) 空间的 (0, 0, 0) 。

Table 2. Scenery Parameters

Parameter	TM	PC		Description
numBoundary Boxes	1U	1U	-	Number of boundary boxes defined. Points outside boundary box will be ignored
boundaryBox[2]	{-1.f,12.f, 15.f,75.f,0.f,0.f}, {0.f,0.f,0.f,0.f,0.f,0.f}	{-4.f,4.f, 0.5.f,7.5f,0.f,0.f}, {0.f,0.f,0.f,0.f,0.f,0.f}	m	{x1,x2, y1,y2,z1,z2 }
numStatic Boxes	1U	1U	-	Number of static boxes defined. Targets inside static box are allowed to persist as static
staticBox[2]	{0.f, 11.f,19.f,50.f,0.f,0.f}, {0.f,0.f,0.f,0.f,0.f,0.f}	{-3.f,3.f,2.f,6.f,0.f,0.f}, {0.f,0.f,0.f,0.f,0.f,0.f}	m	{x1,x2, y1,y2,z1,z2 }

<https://blog.csdn.net/djfk52>

- numBoundaryBoxes：已定义的边界框数。边界框之外的点将被忽略
- numStaticBoxes：已定义的静态方框数。静态框内的目标被允许作为静态框持续存在

2) Measurement Standard Deviation Parameters 测量标准偏差参数

这一组参数被忽略了

3) Allocation Parameters 分配参数

点云中报告的反射点与现有跟踪实例相关联。未关联的点是分配决策的目标。每个候选点都聚集到一个分配集中 (cluster)。要加入集合，每个点都必须位于集合质心的maxDistance和maxVelThre之内。形成集合后，它必须多于setPointsThre，并通过最小速度和SNR阈值

Table 3. Allocation Parameters

Parameter	TM	PC	Dim	Description
setSNRThre	100.f	60.f	-	Minimum total SNR for the allocation set, linear sum of power ratios
setSNRObscThre	100.f	200.f	-	Minimum total SNR for the allocation set, linear sum of power ratios, when obscured by another target
setVelThre	1.f	0.1f	m/s	Minimum radial velocity of the allocation set centroid
setPointsThre	3U	5U	-	Minimum number of points in the allocation set
maxDistanceThre	4.f	1.f	m ²	Maximum squared distance between candidate and centroid to be part of the allocation set
maxVelThre	2.f	2.f	m/s	Maximum velocity difference between candidate and centroid to be part of the allocation set

setSNRThre：分配集的最小总信噪比，功率比的线性和

setSNRObscThre：当被另一个目标掩盖时分配集的最小总信噪比，功率比的线性和，

setVelThre：分配集质心的最小径向速度

setPointsThre：分配集中的最小点云数量

maxDistanceThre：候选集和质心之间的最大平方距离是分配集的一部分

maxVelThre：候选对象和质心之间的最大速度差将作为分配集的一部分

4) State Transition Parameters

每个跟踪实例可以处于FREE，DETECT或ACTIVE状态。每帧一次实例可以获取HIT（具有与目标实例关联的非零点）或MISS（没有关联的点）事件。

一旦处于“FREE”状态，则由分配决策进行到“DETECT”状态的转换。有关分配决策配置参数，请参见上一节。进入DETECT状态后，我们将使用det2active阈值来转换为ACTIVE状态的hits，或使用det2free阈值来转换回FREE状态的misses。

进入ACTIVE状态后，MISS（无关联点）的处理如下：

-如果目标位于“静态区域”，并且目标运动模型接近静态，则假定我们没有检测到的原因是因为它们将它们删除为“静态杂波”。在这种情况下，我们增加miss，并使用static2free阈值“延长预期寿

命”静态目标。

-如果目标不在静态区域内，则假定我们未获得points的原因是目标正在退出。在这种情况下，我们使用exit2free阈值来快速释放现有目标。

-否则，（意味着目标在“静态区域”中，但在径向投影中具有非零运动），我们假定未进行检测的原因是该目标被其他目标遮挡了。在这种情况下，我们将根据模型继续进行目标运动，并使用active2free阈值。

Table 4. State Transitions Parameters

Parameter	TM	PC	Dim	Name
det2activeThre	3U	10U	-	In DETECT state; how many consecutive HIT events needed to transition to ACTIVE state
det2freeThre	3U	5U	-	In DETECT state; how many consecutive MISS events needed to transition to FREE state
active2freeThre	5U	50U	-	In ACTIVE state and NORMAL condition; how many consecutive MISS events needed to transition to FREE state
static2freeThre	100U	100U	-	In ACTIVE state and STATIC condition; how many consecutive MISS events needed to transition to FREE state
exit2freeThre	5U	5U	-	In ACTIVE state and EXIT condition; how many consecutive MISS events needed to transition to FREE state

<https://blog.csdn.net/djijkj52>

5)Gating Parameters

Gating parameters gating参数集在关联过程中用于为可以与给定轨迹关联的点提供边界。 这些参数是特定于目标的。

Table 5. Gating Function Parameters

Parameter	TM	PC	Dim	Description
Volume	16.f	2.f		Gating volume
DepthLimit	12.f	2.f	m	Gating Limit in depth
WidthLimit	8.f	2.f	m	Gating Limit in width
HeightLimit	0.f	0.f	m	Gating Limit in height (Ignored for 2D)
VelocityLimit	0.f	0.f	m/s	Gating Limit in velocity (0 – no limit)

对于2D几何形状，门控体积可以估计为椭圆体的体积，计算公式为

$$V = \frac{4\pi}{3}abc$$

where a , b , and c are the expected target dimensions in range (m), angle (rad), and doppler (m/s).

例如，将车辆视为雷达目标。对于车辆中心，我们可能希望达到 $\pm 4\text{m}$ 的范围 ($a = 8$)，方位角 $\pm 3^\circ$ ($b = 6\pi / 180$) 和径向速度 $\pm 2\text{m/s}$ ($c = 4$)，产生的体积约为16。

除了设置门控椭圆体的体积外，还可以施加限制以防止椭圆体过度拉伸。limits是预期目标的几何形状和运动的函数。例如，将DepthLimit设置为8m将不允许gating功能延伸超过8m的深度。

5. Performance

跟踪效果可以直观地表示为三类指标：

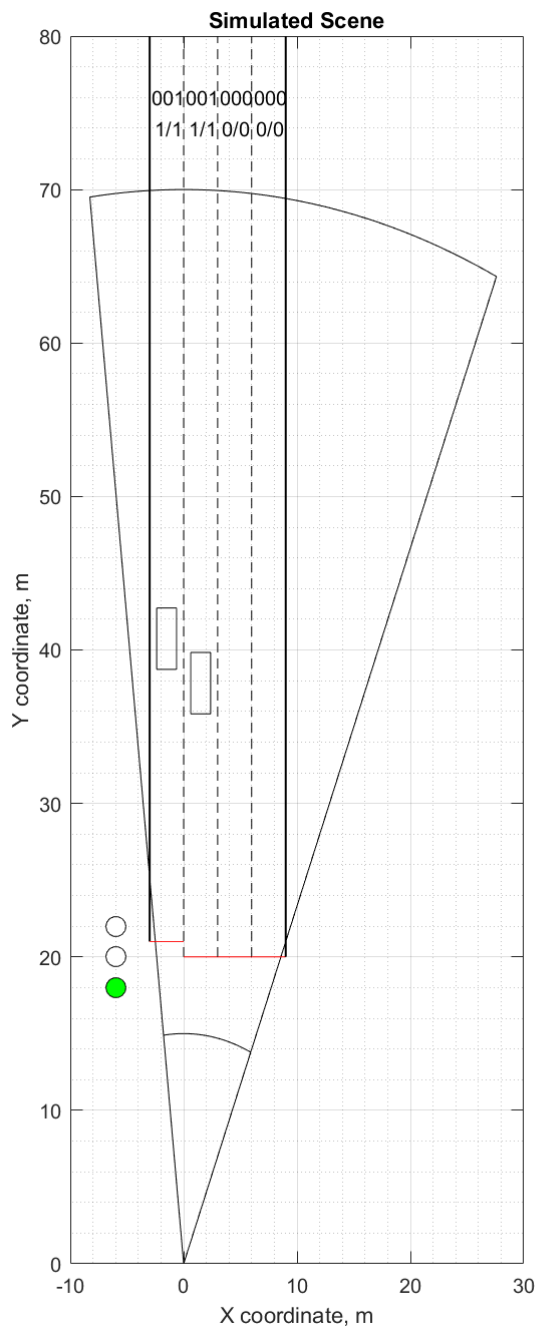
- 1.跟踪可靠性Tracking Reliability，它显示跟踪器在缺少轨道，误报，不匹配，无法恢复轨道等方面犯了多少错误。
- 2.跟踪精度Tracking Precision，表示对正确跟踪的对象的准确特征的估计程度，
- 3.跟踪分辨率Tracking Resolution，表示要分别跟踪的两个对象之间需要多少特征分离

5.1 追踪可靠性

测量跟踪可靠性的测试用例是模拟的随机寿命测试。我们在流量监控使用案例中对跟踪器性能进行了建模。

5.1.1 测试用例描述

传感器的几何结构如下图所示。



通过随机泊松过程模拟交通，其中车辆以随机速度到达4车道交叉口。交叉路口由交通信号灯控制，具有针对绿色，黄色和红色信号的预定延迟。停止线距离传感器20m。车辆运动采用以下规则建模：

- 1.除非前方没有障碍物，否则每辆车均保持恒定速度。障碍物可以是前方的其他车辆，也可以是红色或黄色的交通信号灯。
- 2.前方有障碍物时，车辆将减速以匹配障碍物速度。减速度限制为给定车辆类型所允许的最大值。
- 3.车辆保持2m的安全距离。
- 4.清除障碍物后，车辆将加速行驶。每种车辆类型都配置了加速步骤和最大加速量

可靠性测试至少模拟10分钟的流量。

传感器输出（点云）是随机生成的，并在从移动车辆捕获的测试数据之后进行建模。该模型包括反射点云数量，范围/角度空间中的点分布以及云中的多普勒信息分布的统计建模。每个车辆在任何时候都由一个点云（具有范围/角度和径向速度信息的反射点集）表示。

注意：假设来自多个车辆的点云是可加的，所以我们没有对由于多个物体而导致的the point cloud degradation点云退化建模。

对于点云合成，我们从两种检测层配置的现场测试中收集了反射点

- 配置A，具有“最大可能”的反射（单一范围CFAR-CASO，多普勒尺寸无窗口,0.2deg DoA)
- 配置B，大约有1/3的反射（双通范围/多普勒CFAR-CASO，0.2deg DoA)

跟踪器输入点云，将反射点与跟踪的对象相关联，预测和建模对象的行为，然后将估计的对象属性输出到上一层。

每个配置在两个子情况下运行：

上层处理通过将地面真实情况与跟踪器输出进行比较来估计跟踪误差。

作为基本事实，我们考虑模拟车辆矩形的质心。

对于每个轨道，基于全局时间戳，我们将同步地面真点和跟踪器输出。

我们针对跟踪器存在的所有时间实例分别计算均方误差。

如果均方误差在任何时候均未超过所需阈值，则我们声明对对象的正确跟踪，否则，则声明跟踪错误事件。

此外，上层处理对25m车道上的对象数进行计数。此计数也将与地面真实数字进行比较。