从单个房间脉冲响应估计声源和接收器位置、房间几何结构及反射系数

Wangyang Yu、W. Bastiaan Kleijn，*IEEE* 会士

arXiv:2301.09198v1 [eess.AS] 22 Jan 2023

摘要—**我们提出一种算法，可同时从单个房间脉冲响应中估计声源和接收器位置、房间几何结构及反射系数。该算法基于对房间脉冲响应的对称性分析。所提方法利用直达路径、一阶反射和二阶反射的到达时间。该方法能够抵御错误脉冲和非镜面反射的影响。只要能获取所需的反射到达时间，该方法便可应用于任何具有平行墙壁的房间。与最先进的方法不同，我们不限制声源和接收器的位置。**

索引词—**房间脉冲响应、房间几何结构、声源/接收器位置、反射系数。**

I. 引言

ACCURATE 声学环境建模是房间声学的重要组成部分。它有多种应用，例如语音增强 [1]–[3],语音识别 [4]–[6], 和声音渲染 [7]–[9]。房间脉冲响应（RIR）是声源与接收器之间的传递函数，用于表征房间的声学环境。它受多种房间声学属性影响，包括房间几何结构、声源和接收器的位置以及反射系数。本文旨在分析房间脉冲响应，并根据单个房间脉冲响应推导出房间几何结构、声源和接收器的位置以及反射系数。

镜像声源法 [10]–[14] 是一种高效且广泛使用的 RIR 建模方法，最早于 [10] 提出。该方法可应用于空置的矩形房间。它假设声音沿直线传播。我们使用 $\mathbf{p}$，$\mathbf{m}$ 标记每次反射，其中 $\mathbf{p} = (q,\ j,\ k)$ 的每个元素可取 0 或 1，表示反射的方向；而 $\mathbf{m} = (m_x,\ m_y,\ m_z)$ 的每个元素可取整数值，与反射阶数$O_{\mathbf{p},\ \mathbf{m}}$ 相关，如下

$$O_{\mathbf{p},\mathbf{m}} = |2m_x - q| + |2m_y - j| + |2m_z - k|. \quad (1)$$

设 $\beta_{x_1}, \beta_{x_2}, \beta_{y_1}, \beta_{y_2}, \beta_{z_1}, \beta_{z_2}$ 表示六面墙的反射系数，$\tau_{\mathbf{p},\mathbf{m}}$ 表示每次反射的到达时间（TOA），$d_{\mathbf{p},\mathbf{m}}$ 表示相应的路径长度。然后，采用镜像声源法，并假设每面墙的反射系数均为有限且恒定的值，则 RIR 可写为

$$h(t) = \sum_{\mathbf{p},\mathbf{m}} \beta_{x_1}^{|m_x - q|} \beta_{x_2}^{|m_x|} \beta_{y_1}^{|m_y - j|} \beta_{y_2}^{|m_y|} \beta_{z_1}^{|m_z - k|} \beta_{z_2}^{|m_z|} \frac{\delta(t - \tau_{\mathbf{p},\mathbf{m}})}{4\pi d_{\mathbf{p},\mathbf{m}}}. \quad (2)$$

目前已有多种从房间脉冲响应估计房间几何结构的算法 [15]–[18]。 [15] 利用欧几里得距离矩阵的性质估计房间几何结构。该方法需要一个声源和四个已知成对距离的接收器。 [16] 使用一个声源和五个接收器估计房间几何结构，且该方法可达到约 1 cm 的精度。 [17]采用以声源为中心的坐标系，并使用单个房间脉冲响应估计房间几何结构。不过，该方法要求将到达时间标注为对应的镜像声源。 [18]利用一个声源与接收器阵列之间的房间脉冲响应中的到达时间集合推断房间几何结构，同时已知接收器阵列几何结构。检测到到达时间集合后，将其标注以估计声源和镜像声源的位置，随后可据此估计房间几何结构。房间脉冲响应还可用于室内定位 [19]–[21]。 [19] 假设房间几何结构和接收器位置均已知，并利用欧几里得距离矩阵通过单个房间脉冲响应定位声源。 [20]提出一种声源定位方法，使用从临时麦克风阵列采集的房间脉冲响应中提取的参数。房间脉冲响应也可用于基于指纹的定位 [21]。 [22] 利用单个房间脉冲响应中的一阶和二阶反射估计房间几何结构和声源位置。与本文工作不同，该方法假设声源与接收器位于同一位置。我们此前的论文使用深度神经网络，从单个房间脉冲响应估计房间几何结构和反射系数 [23]。

我们的贡献是提出一种解析方法，无需任何先验信息，仅利用单个房间脉冲响应（RIR），即可同时估计房间几何结构、声源和接收器的位置以及反射系数。该方法适用于具有平行墙对的房间。本文结构如下：第二节介绍用于估计房间声学参数的算法。第三节分析房间脉冲响应，重点讨论简并问题。第四节讨论实验，并在第五节总结全文。

Wangyang Yu 任职于荷兰代尔夫特理工大学微电子系。电子邮件：W.Yu-1@tudelft.nl。W. Bastiaan Kleijn 任职于荷兰代尔夫特理工大学微电子系，同时任职于新西兰惠灵顿维多利亚大学工程学院。电子邮件：w.b.kleijn@tudelft.nl。

II. 房间声学参数估计

本节提出一种方法，用于根据单个房间脉冲响应确定房间声学参数的一种特定有效配置

。第三节将说明如何将一种有效配置映射为任意其他有效配置。我们的方法适用于具有多组平行墙的房间。此外，我们假设观测到的房间脉冲响应中包含直达路径、一阶和二阶反射的脉冲。可以使用 [24]–[27]中提出的方法检测它们的到达时间。反射的路径长度可根据到达时间和声速计算得出。如果一组反射仅涉及一对平行墙，我们就称它们属于同一方向。

我们提出的方法先识别每个方向上的反射，然后根据该方向上反射的路径长度计算墙对间距。该方法基于镜像声源法和房间脉冲响应的简并性，相关内容将在下一节详细讨论。我们首先在第一小节介绍用于识别反射方向的定理。在第二小节中，我们提出一种识别反射的算法。随后，我们计算房间几何结构以及声源／接收器位置。在第四小节中，我们介绍如何计算反射系数。

A. 识别反射方向

在本小节中，我们介绍一个定理，用于根据一组未标记的反射路径长度识别反射方向。该定理用于将高阶反射划分为两组，即一个多方向集合和一个单方向集合。

定理 1. 设 d_{ij}、 d_i、 d_j 和 d_0 分别表示在两个方向i 和 j上反射的(O_i+O_j)阶反射、在方向 i 上的 O_i 阶反射、在方向 j 上的 O_j 阶反射以及直达路径的路径长度。则 $d_{ij}^2+d_0^2 = d_i^2 + d_j^2$ 成立。反之，若存在一个$(O_i + O_j)$阶反射的路径长度 d_{ij} 满足该方程，则路径长度 d_i 和 d_j 所对应的反射属于不同方向。

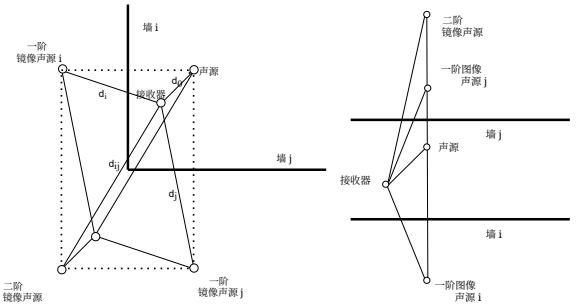
证明。设声源 s 和接收器 r 的坐标分别为 (x_s, y_s, z_s) 和 (x_r, y_r, z_r)，房间几何结构为 $L_x \times L_y \times L_z$。那么，镜像声源位置可表示为 $(2m_xL_x + (1 - 2q)x_s, 2m_yL_y + (1 - 2j)y_s, 2m_zL_z + (1 - 2k)z_s)$。我们假设路径长度为 d_i 的镜像声源位于 x 方向，而路径长度为 d_j 的镜像声源位于 y 方向。相应镜像声源的坐标分别为 $(2m_xL_x + (1 - 2q)x_s, y_s, z_s)$ 和 $(x_s, 2m_yL_y + (1 - 2j)y_s, z_s)$。坐标

第 $(O_i + O_j)$ 阶镜像声源的坐标为 $(2m_xL_x + (1 - 2q)x_s,\ 2m_yL_y + (1 - 2j)y_s,\ z_s)$。随后，我们可以计算镜像声源与接收器之间的路径长度 d_i，公式如下：

$$d_i^2 = (2m_xL_x + (1 - 2q)x_s - x_r)^2 + (y_s - y_r)^2 + (z_s - z_r)^2.$$

其他情况也适用相同的表述。将 d_i、d_j、d_{ij}、d_0、$d_{ij}^2+d_0^2 = d_i^2 + d_j^2$ 和 d_i、d_j 以相同形式表述后，可以看出，当和属于不同方向的反射路径长度时，该式总是成立。当它们属于同一方向时，该等式不成立。□

定理 1 也可以通过图1a所示的平行四边形法则来证明。图1展示了二维情况，便于理解，但该结论对三维情况同样成立。从图1a可以看出，声源与二阶镜像声源之间的距离等于两个一阶镜像声源之间的距离，并且这两个平行四边形共用一条对角线。根据平行四边形法则，这两个平行四边形的边长平方和相等，即 $d_{ij}^2 + d_0^2 = d_i^2 + d_j^2$。图1b展示了一个例子，其中高阶路径长度无法表示为低阶反射的函数。



(a) 多个方向　　(b) 一个方向

图1：二维情况下的二阶反射。

二阶（或更高阶）反射的多方向 集合，指的是在多个方向上发生反射的反射。多方向集合无法提供独立方程，因为路径长度平方可以表示为低阶反射的组合。对于我们的目的而言，这一集合中的反射没有用处，可以利用低阶反射将其剔除，因为它们必定晚于低阶反射到达。例如，来自$(-x_s,\ -y_s,\ z_s)$的二阶反射会同时在 x 和 y 方向上发生反射，其路径长度平方可以表示为直达路径以及来自$(-x_s,\ y_s,\ z_s)$和$(x_s,\ -y_s,\ z_s)$的两次一阶反射的组合。

二阶（或更高阶）反射的单方向 集合，指的是沿一个方向发生反射的反射。它们可用于确定房间声学参数。沿一个方向反射的 N阶反射，晚于该方向上最后到达的$(N - 1)$阶反射。举例来说，来自$(x_s \pm 2L_x,\ y_s,\ z_s)$的二阶反射晚于来自$(2L_x - x_s,\ y_s,\ z_s)$的一阶反射到达。由于声源和接收器可以互换，且下文将作此假设，因此不失一般性地，假设 $x_r < x_s$、 $y_r < y_s$和 $z_r < z_s$ ，以分析这些反射的顺序。例如，来自$(x_s - 2L_x,\ y_s,\ z_s)$的反射早于来自$(x_s + 2L_x,\ y_s,\ z_s)$的反射到达。

B. 反射分类算法

在本小节中，我们将详细介绍用于对反射进行分类的算法。我们假设已获得 RIR 信号中反射的未标记路径长度集合，其中包含直达路径、一阶和二阶反射。我们假设一阶反射可以区分。输入集按升序排列，记为 d_k，$k \in \mathbb{N}$。

我们的目标是将反射的路径长度分为五组，即 x 方向上的一阶反射 S_x^1、y方向上的一阶反射 S_y^1、z方向上的一阶反射 S_z^1、单方向上的二阶反射 S_{single}^2，以及多方向二阶反射 S_{multi}^2。我们有 $|S_x^1| = 2$, $|S_y^1| = 2$, $|S_z^1| = 2$ $|S_{\text{single}}^2| = 6$ $|S_{\text{multi}}^2| = 12$，以及 。由于检测到的峰值位置与理论路径长度之间可能存在差异，因此我们引入一个超参数 δ 作为路径长度方程中的误差阈值。误差阈值取决于数据属性和路径长度。

最先到达的脉冲 d_0 总是对应于直达路径的路径长度。为不失一般性，我们假设第二个到达的脉冲（最先到达的一阶反射）d_1 对应于（$-x_s$， y_s， z_s）。将d_1 标记为 d_x。这一假设的正确性将在第三节中解释。我们遍历输入集，一旦某个反射的路径长度被归入某个集合，就将其从输入集中删除。我们首先找出所有满足条件的 d_i d_j $d_j \in$。这 $[\sqrt{d_i^2 + d_x^2 - d_0^2 - \delta}, \sqrt{d_i^2 + d_x^2 - d_0^2 + \delta}]$ $1 < i < j$ 些 d_j 属于 S_{multi}^2，并且为不失一般性，我们假设最小的 d_i 属于 S_y^1。将该路径长度标记为 d_y。我们遍历其余已找到的 d_i 以及输入集中剩余的路径长度。对于所有满足 $d_k \in [\sqrt{d_i^2 + d_y^2 - d_0^2 - \delta}, \sqrt{d_i^2 + d_y^2 - d_0^2 + \delta}]$的 d_i和 d_k，有 $d_k \in S_{\text{multi}}^2$和 $d_i \in S_z^1$。于是，剩余的d_i属于 S_y^1。至此，我们已经找到了 S_y^1和 S_z^1中的所有反射路径长度。接下来，我们再次遍历输入集，并以 d_y 为依据（也可以用 S_z^1中的某个路径长度替代），找出满足 $d_j \in [\sqrt{d_i^2 + d_y^2 - d_0^2 - \delta}, \sqrt{d_i^2 + d_y^2 - d_0^2 + \delta}]$的 d_j和 d_i。于是有 $d_i \in S_x^1$和 ~~$d_j \in S_{\text{multi}}^2$~~ 最后，~~将输入集中剩~~余的反射路径长度分配给 S_{single}^2。

该算法能够稳健地处理第一或第二个脉冲的错误标记。如果最先到达的两个脉冲并非对应于 x 方向上的直达路径和一阶反射，那么定理 1 对二阶反射不适用，并且各集合的基数不匹配。由此可知，最先到达的两个脉冲中存在错误脉冲。接下来，我们可以利用下一个到达脉冲的路径长度，从这些脉冲中选出两个，并重复这一过程，直到基数正确为止。

C. 估计　房间几何结构和声源/接收器位置的估计　位置

在对反射进行分类之后，本小节将介绍如何计算房间几何结构以及声源和接收器位置的一种有效配置。如前所述，S_{multi}^2对此计算没有帮助。因此，我们只使用 S_x^1、S_y^1、S_z^1 S_{single}^2 和 。反射的到达顺序将在第三节中说明。

我们的方法基于对 S_{single}^2 的迭代。这个集合包含六个二阶反射，镜像声源的坐标为（$x_s \pm 2L_x$， y_s， z_s）、（x_s， $y_s \pm 2L_y$， z_s）、（x_s， y_s， $z_s \pm 2L_z$）。对于这六个元素中的每一个，我们都执行以下计算。S_{single}^2 中路径长度最小的反射有三个可能的方向。我们使用每个二阶反射候选项，以及该方向上的一阶反射和直达路径，来计算该方向上的房间几何结构、声源位置和接收器位置。对于每个二阶反射候选项，我们随后推导该方向上另一个二阶反射的坐标，并计算相应的路径长度；对于正确的二阶反射候选项，该路径长度应当是 S_{single}^2 中的一个元素。我们还可以在下一小节中通过反射系数验证这一组合。

我们来判断这样一个假设是否正确：S_{single}^2 中的某个特定距离对应于 x 方向，即镜像声源为（$x_s - 2L_x$， y_s， z_s）。结合该方向上两个一阶方向的路径长度（其镜像声源分别为（$-x_s$， y_s， z_s）和（$2L_x - x_s$， y_s， z_s）），以及从（x_s，y_s， z_s）出发的直达路径长度，我们可以计算出 L_x、x_s 和 x_r。随后，我们可以计算该集合中从（$x_s + 2L_x$， y_s， z_s）出发的二阶反射路径长度；如果它与初始假设一致，则说明该假设已得到验证。若是如此，我们还计算出了该方向上的第二个二阶反射。此过程使我们能够找到每个方向上的二阶脉冲。

所提出的方法在两个方面具有较强的鲁棒性。首先，将该算法推广到包含更多高阶反射的情况，可以提高算法的鲁棒性。定理 1 也可应用于高阶反射，以对方向进行分类。我们可以将所提出的方法应用于沿同一方向反射的高阶反射。因此，可以利用这些高阶反射验证房间声学参数的解，从而提高鲁棒性。其次，所提出的方法能够抵抗不属于任何反射的额外峰值。使用上一小节中的算法，这些脉冲会被错误地归入包含沿同一方向反射的高阶反射的集合中。由于不存在另一个也沿该方向反射的二阶反射，因此我们知道这个峰值是错误的。

我们提出的方法的一项优势是可以针对每个方向独立计算。由于各方向的计算彼此独立，该方法也可用于一些特殊情况。无论其他方向上的墙相距很远（例如走廊），还是受到家具影响，我们都能估计这对平行墙之间的距离，以及沿这对平行墙的声源/接收器位置。针对每个方向独立计算，使我们的方法能够应用于由多组平行墙对构成的非鞋盒形房间，前提是所需的反射可用。例如，带有倾斜天花板的房间就属于这种情况。这类房间有两对平行墙和一对非平行墙。对于垂直墙与地板之间的二阶反射，由于二者构成直角，这些二阶反射会被一阶反射剔除。对于天花板与其余墙面之间的二阶反射，由于它们不符合定理 1，因此不会被剔除，而会被归类为 S_2^{single}。不过，由于不存在有效的房间声学参数解，它们会被识别为错误脉冲。

D. 反射系数的估计

除了估计房间几何结构以及声源和接收器的位置外，我们还可以利用一阶反射估计每面墙的反射系数。根据镜像声源法和公式 (2)，我们知道每个反射的振幅仅与镜像声源和接收器之间的距离以及反射系数有关。对于一阶镜像声源，我们已知其路径长度以及从房间脉冲响应信号中获得的真实振幅。由于它们只反射一次，振幅等于 $\frac{\beta_i}{4\pi d_i}$，其中 β_i 是相应的反射系数。因此，我们可以计算每面墙的反射系数。利用各面墙的反射系数和计算得到的参数，我们就能计算每个方向上的二阶反射振幅。如果计算得到的振幅与测量振幅相符，就能验证反射系数的取值。

III. 房间脉冲响应简并性分析

在第二节中，我们讨论了如何根据房间脉冲响应计算房间声学参数。然而，对于特定的房间脉冲响应，房间配置并非唯一，其中包括房间几何结构、声源和接收器的位置、反射系数以及坐标系。图 2 展示了一个二维示例：八种不同的配置会产生相同的房间脉冲响应。此外，如果交换声源和接收器的位置，房间脉冲响应也不会改变。因此，对于二维房间，共有 16 种配置会产生相同的房间脉冲响应。除这种简并外，房间脉冲响应中反射的到达时间相对于房间配置是唯一的。

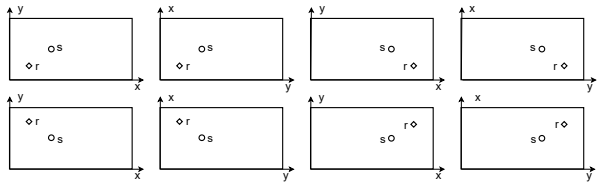


图 2：产生相同房间脉冲响应的不同二维配置，其中 s和 r 分别表示声源和接收器。

接下来，我们分析三维房间中的简并，并根据一阶反射确定坐标系。假设第一次反射是由墙 $x = 0$反射的脉冲。由于第一个脉冲可以由任意一面墙反射，因此会产生六重简并。同样，假设下一个到达且不沿 x 方向的一阶反射由墙 $y = 0$反射，则会产生四重简并。最后，假设第三个到达且不沿 x 和 y 方向的一阶反射由墙 $z = 0$反射，则会产生二重简并。由此总共产生 48 重简并。此外，声源和接收器的坐标可以互换，因此总数为

96 重简并。

我们以一个案例为例，讨论简并在实际设置中如何出现，因为其他案例也类似。该案例对应于图 3 中的一条特定分支路径，图 3 展示了一阶反射可能的排序。

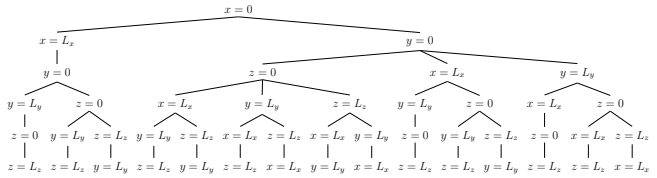


图 3：三维情况下的一阶反射序列。

如前所述，最先到达的一阶反射在$x = 0$上反射，这会引入六重简并。请注意，第二个到达的一阶反射可以在 $x = L_x$ 上反射，也可以沿 y 或 z 方向反射。我们考虑第二个到达的一阶反射在 $x = L_x$上反射的情况。接着，我们将第三个到达的一阶反射定义为在 $y = 0$上反射，这会引入四重简并。然后，第四个到达的一阶反射将在 $y = L_y$ 上反射，或沿 z 方向反射。我们考虑第四个到达的一阶反射在$y = L_y$上反射的情况。接着，我们将第五个到达的一阶反射定义为在 $z = 0$ 上反射，并将第六个到达的一阶反射定义为在 $z = L_z$上反射。假设第五次反射在 $z = 0$ 上反射，则会引入二重简并。交换声源和接收器的坐标后，该分支路径总共会产生 96 重简并。对于其他路径，我们也得到相同的结果。

从一个简并解映射到另一个简并解很简单。方法包括交换声源和接收器的坐标、交换 x、 y和 z 坐标，以及相对于 $x = \frac{L_x}{2}$、 $y = \frac{L_y}{2}$ 或 $z = \frac{L_z}{2}$进行对称变换。对于纯音频环境，选择哪种情况并不重要。然而，对于视听环境，则需要将其中一种简并情况与视觉场景相匹配，才能获得令人满意的体验。我们需要利用可用的视觉线索来确定采用哪种情况以及使用哪些方法组合；这超出了本文的讨论范围。

IV. 实验

我们使用通过镜像声源法生成的房间脉冲响应，在有散射 [28]和无散射两种情况下，对第 II-B 节中的算法进行了评估。散射系数 [29] 设为 0。1 和 0。2，以便与仅包含镜面反射的房间脉冲响应进行比较。假设房间为矩形且内部为空。我们随机生成了 1000 个房间。房间几何结构的每个维度均在 $2 \times 5 \times 7$ 米至$4 \times 10 \times 11$ 米之间均匀分布。在房间内随机放置一个声源和一个接收器。声速设为 $c = 343$米/秒。采样频率设为 $fs = 44100$ 赫兹。每个房间脉冲响应的长度为 127890 个采样点，对应一个时长为 2。9 秒的信号。墙的反射系数模拟为在 0 和 1 之间独立同分布。我们假设房间脉冲响应的带宽等于奈奎斯特带宽，误差阈值设为 $\delta = 5/fs$ 。

我们记录了估计得到的房间几何结构、声源/接收器位置和反射系数的均方根误差。结果如表 I 所示。我们还记录了以下失败情况：使用检测到的反射

计算房间声学参数失败，以及某个房间声学参数的均方根误差大于 1。散射系数为 0、0.1 和 0.2 时，失败比例分别为 0.7%、6.8% 和 18.9%。通过使用重新测量的房间脉冲响应重复实验，可以降低失败比例。实验结果表明，较大的散射系数会降低房间声学参数估计的精度。

表 I：房间声学参数估计的均方根误差。

散射系数	0（无散射）	0.1	0.2
房间几何结构（m）	0.0505	0.2286	0.2633
接收器位置（m）	0.1371	0.1803	0.3088
声源位置（m）	0.1739	0.2329	0.5792
反射系数	0.1386	0.1401	0.1478

V. 结论

本文提出了一种解析方法，用于分析房间脉冲响应，并同时推导房间几何结构、声源和接收器的位置以及反射系数。我们只需获得房间内声源与接收器之间单个房间脉冲响应中直达路径、一阶反射和二阶反射的到达时间，无需任何其他信息。所提出的方法能够抵抗错误脉冲和非镜面反射。然而，由于该方法依赖于早期反射的到达时间估计，因此在实际应用中存在局限性。未来的工作可以着重提升其在实际应用中的鲁棒性。

参考文献

[1] Y. Ephraim 和 H. L. Van Trees，“一种用于语音增强的信号子空间方法”，*IEEE*语音与音频处理汇刊，第 3 卷，第 4 期，第 251–266 页，1995 年。[2] P. C. Loizou，语音增强：理论与实践。CRC出版社，2013年。[3] Y. Hu 和 P. C. Loizou，“语音增强算法的主观比较与评估”，*Speech Communication*，第 49 卷，第 7 期，第 588–601 页，2007 年。[4] R. Gomez、J. Even、H. Saruwatari 和 K. Shikano，“利用房间脉冲响应的晚期反射分量实现远距离通话的鲁棒语音识别”，载于*2008 IEEE*国际声学、语音与信号处理会议，2008 年，第 4581–4584 页。[5] J. Liu 和 G.-Z. Yang，“通过使用最优合成房间脉冲响应模型，在混响环境中实现鲁棒语音识别”，*Speech Communication*，第 67 卷，第 65–77 页，2015 年。[6] M. Ravanelli、A. Sosi、P. Svaizer 和 M. Omologo，“混响环境中用于鲁棒语音识别的脉冲响应估计”，载于*2012*年第*20*届欧洲信号处理会议论文集（*EUSIPCO*），2012 年，第 1668–1672 页。[7] Y. Li、P. F. Driessen、G. Tzanetakis 和 S. Bellamy，“利用实测房间脉冲响应进行空间音频渲染”，载于*2006 IEEE*国际信号处理与信息技术研讨会，2006 年，第 432–437 页。[8] J. Merimaa 和 V. Pulkki，“空间脉冲响应渲染 I：分析与合成”，音频工程学会期刊，第 53 卷，第 12 期，第 1115–1127 页，2005 年 12 月。[9] J. Sheaffer 和 B. Rafaely，“使用球形阵列渲染双耳房间脉冲响应的均衡策略”，载于*2014*年*IEEE*第*28*届以色列电气与电子工程师大会（*IEEEI*），2014 年，第 1–5 页。[10] J. B. Allen 和 D. A. Berkley，“用于高效模拟小房间声学的镜像法”，美国声学学会期刊，第 65 卷，第 4 期，第 943–950 页，1979 年。[11] H. Kuttruff，《房间声学》。纽约：CRC出版社，2014 年。[12] L. Savioja 和 U. P. Svensson，“几何房间声学建模技术概述”，美国声学学会期刊，第 138 卷，第 2 期，第 708–730 页，2015 年。[13] S. G. McGovern，“用于计算箱形房间脉冲响应的快速镜像法”，应用声学，第 70 卷，189，2009 年 1，182 号，第 – 页。[14] 埃尔朗根国际音频实验室，“RIR生成器”，2014 年。[15] I. Dokmani´c、R. Parhizkar、A. Walther、Y. M. Lu 和 M. Vetterli，“声学回声揭示房间形状”，美国国家科学院院刊，第 110 卷，第 30 期，第 12 186–12 191 页，2013 年。[16] T. Rajapaksha、X. Qiu、E. Cheng 和 I. Burnett，“基于房间脉冲响应的几何房间几何结构估计”，载于2016年IEEE国际声学、语音与信号处理会议（ICASSP），2016年3月，第 331–335 页。[17] A. H. Moore、M. Brookes 和 P. A. Naylor，“从单通道声学脉冲响应估计房间几何结构”，载于第21届欧洲信号处理会议（EUSIPCO 2013），2013年9月，第 1–5 页。[18] Y. E. Baba、A. Walther 和 E. A. P. Habets，“基于房间脉冲响应堆栈的三维房间几何结构推断”，IEEE/ACM音频、语音与语言处理汇刊，第 26 卷，第 5 期，第 857–872 页，2018 年。[19] R. Parhizkar、I. Dokmani´c 和 M. Vetterli，“单通道室内麦克风定位”，载于2014年IEEE国际声学、语音与信号处理会议（ICASSP），2014 年，第 1434–1438 页。[20] S. Pasha 和 C. Ritz，“利用声学房间脉冲响应参数进行知情声源定位和到达方向估计”，载于2015年IEEE国际信号处理与信息技术研讨会（ISSPIT），2015 年，第 139–144 页。[21] Y. Jin、W. Soh 和 W. Wong，“基于信道脉冲响应指纹和非参数回归的室内定位”，IEEE无线通信汇刊，第 9 卷，1127，2010 年 3，1120 号，第 – 页。[22] I. Dokmani´c、Y. M. Lu 和 M. Vetterli，“能否听出房间的形状：二维多边形情形”，载于2011年IEEE国际声学、语音与信号处理会议（ICASSP），2011 年，第 321–324 页。[23] W. Yu 和 W. B. Kleijn，“利用深度神经网络从房间脉冲响应估计房间声学参数”，IEEE/ACM音频、语音与语言处理汇刊，第 1–1 页，2020 年。[24] I. J. Kelly 和 F. M. Boland，“利用动态时间规整检测房间脉冲响应中的到达声”，IEEE/ACM音频、语音与语言处理汇刊，第 22 卷，1147，2014 年 7，1139 号，第 – 页。[25] B. L. Sturm 和 G. DeFrance，“利用贪心稀疏近似检测并估计房间脉冲响应中的到达声”，载于2010年第18届欧洲信号处理会议，2010 年，第 1934–1938 页。[26] D. M. Risti´c、M. Pavlovi´c、D. ˇS. Pavlovi´c 和 I. Reljin，“利用多重分形检测早期反射”，美国声学学会期刊，第 133 卷，第 4 期，第 EL235–EL241 页，2013 年。[27] D. Risti´c、M. Pavlovic、M. Mijic 和 I. Reljin，“改进用于检测早期反射的多重分形方法”，塞尔维亚电气工程期刊，第 11 卷，第 11–24 页，2014 年。[28] D. Schr¨oder 和 M. Vorl¨aender，“RAVEN：用于交互式虚拟环境可听化的实时框架”，Forum Acusticum论文集，第 1541–1546 页，2011年1月。[29] Wendt、Florian 和 H¨oldrich、Robert，“镜面反射与漫反射的优先效应”，Acta Acust.，第 5 卷，第 1 页，2021 年。