arXiv:2304.07596v1 [cs.RO] 15 Apr 2023

利用推进系统噪声进行无人飞行器的物体相对距离估计与控制的声学波束形成

Alisha Sharma[1,2], Jason G eder[1], Joseph Lingevitch[1],Theodore Martin[1,3],Daniel Lofaro[1],和 Donald Sofge[1] ,

摘要——无人飞行器的推进系统通常会产生显著噪声。将这种宽带信号用作辅助传感系统的“声学照明”，能够以最低成本提高飞行器的鲁棒性。我们提出了一种基于声学波束形成的算法，利用飞行器产生的推进系统噪声，通过一个小型双麦克风阵列估计物体相对距离。我们在噪声环境中，使用安装在四旋翼飞行器上的设备进行了多项闭环距离反馈控制测试，结果表明，该方法的物体相对距离估计精度较高，探测距离比基线通道方法远两倍以上。我们得出结论，该方法能够适应多种实际飞行器和噪声情况，并有望应用于更复杂的运行环境。

I. 引言

自主无人飞行器（无人机）依靠多种传感技术进行导航，包括全球定位系统、激光雷达和摄像机；然而，所有传感技术在某些运行条件下都会失效，传感器也可能在运行过程中受损。许多无人机的电机螺旋桨系统会产生显著的宽带噪声。利用这种噪声的某些成分，通过辅助被动感知系统进行大型物体距离估计，可以以极低的成本提高无人机导航的鲁棒性。

这项任务之所以具有挑战性，有几个原因。首先，这个问题主要受噪声影响，因为机载麦克风距离螺旋桨比距离我们试图探测的物体近得多。更糟的是，主动声呐中使用的显式啁啾信号是专为实现高性能而设计的，而电机螺旋桨噪声则高度随机且复杂。最后，由于该系统旨在安装在无人机上，重量、功耗和成本都受到严格限制，使许多标准方法不切实际。

针对资源受限、与硬件无关的小型阵列声学感知，已有多种方法被提出，包括利用传感器运动 [1],利用物理结构实现方向性 [2], [3], 以及位置和声源感知 [4], [5], 等。最近， [6], [7] 研究了在涉及单个螺旋桨和单个 [6] 或两个 [7]麦克风的简化场景中，利用推进器自噪声估计车辆与刚性反射体之间距离的可行性。我们假设，对

[1]美国海军研究实验室，华盛顿特区，20375，美国[2]马里兰大学，大学公园市，大学公园市，马里兰州，20742，美国[3]Excet Inc.，弗吉尼亚州斯普林菲尔德，22150，美国 本研究由美国海军研究办公室项目资助。分发声明A：批准公开发布。分发不受限制。

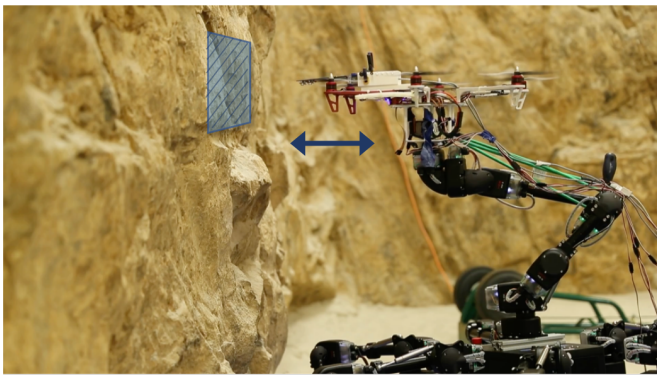


图 1. 我们利用车辆推进系统产生的噪声进行目标相对距离估计和反馈控制。在这项工作中，我们重点研究搭载式四旋翼无人机的感知。照片展示了我们的测试装置，其中无人机安装在六自由度驱动臂上，以模拟自由飞行。

指向反射墙和螺旋桨的声束（“波束指向”）进行互相关，可能比 [6],中的通道方法获得更高的信噪比，从而能够在更具挑战性的条件下实现控制。

在这项工作中，我们提出了一种有效的基于波束形成的距离估计算法，并展示了该算法在一架实际四旋翼无人机主动控制中的应用。我们的主要贡献如下：

1) 我们介绍一种**利用两个麦克风，根据隐式产生的推进系统噪声进行声学波束形成的物体相对距离估计算法**。在仿真以及多项开环和闭环距离估计实验中，这种波束形成方法的表现始终优于信道自相关差算法 [7] 。此外，未来还可轻松扩展此方法，用于姿态估计和更大型的阵列。2) 我们**在车辆上完整实现了这段代码**，使用的是 Teensy 4.0 微控制器，并借此实现实时声学距离估计。3) 我们**展示了在嘈杂环境中，使用这种基于波束形成的算法对安装好的四旋翼无人机进行闭环反馈控制**。4) 最后，我们表明，双麦克风声学波束形成算法能够**以实用的精度估计物体相对距离，探测范围可达机体外侧近 0.5 米**，性能比基于信道的方法提升两倍以上。

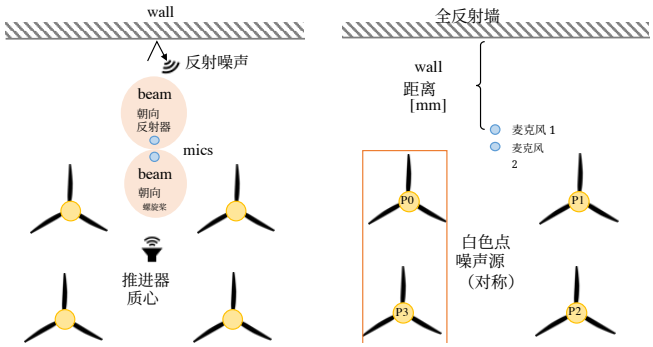


图 2。（左）波束形成的概念方法。使用双麦克风阵列构建导向矢量，分别指向墙壁（针对反射信号）和推进器（作为参考）。随后对这些波束进行相关处理，以估计反射信号的时间延迟，进而估算阵列与物体之间的相对距离。（右）仿真几何结构，模仿了后续章节中的四旋翼实验几何布局。我们展示了声源 P0 和 P3 的结果，以橙色方框标出。

II. 问题定义

先前的研究 [6], [7]探讨了在简化场景下，利用推进器自噪声估计车辆与刚性反射体之间距离的可行性；这些场景涉及单个螺旋桨以及单个 [6] 或两个 [7] 麦克风。直达路径与反射噪声之间的干涉会表现为频域中的强度变化，其变化取决于路径长度差和声学频率。例如，可以通过计算各麦克风响应的自相关谱来观察路径长度差 [7]。对于理想化的白噪声源，由于相关分析中各个频率的贡献相等，干涉模式很容易辨别。然而，对于电机/螺旋桨系统，声信号并非白噪声，其中包含与螺旋桨谐波相关频率处的强频谱线，以及来自电机和电子调速器的分量；这些成分可能主导相关方法，并掩盖路径长度干涉。

在 [7], 中，实现了一种时域方法，通过比较两个麦克风通道的自相关谱，并将反馈回路连接至推进器，从而使负浮力飞艇与地板保持垂直间隔。该方法对每个麦克风的傅里叶谱进行归一化，以减弱螺旋桨和电机谐波的主导影响。归一化因子为两个麦克风在每个傅里叶频点上的平均幅值；该因子在降低谐波影响的同时，使频谱频点能够作为比较依据得到优先加权。

在本研究中，我们将这一方法推广至涉及多个电机—螺旋桨的场景（例如多旋翼无人机）以及环境噪声较高的条件。与以往方法不同，我们采用由两个或更多麦克风组成的阵列进行波束形成互相关分析。我们引入了 [7] 提出的傅里叶频点归一化方法，以防止电机—螺旋桨的谐波淹没分析结果。

A. 声学波束形成方法

声学波束形成是一种空间感知技术，它利用传感器阵列估计信号方向性 [8]。具体做法是设计阵列，使我们能够根据入射信号的相位差推断其方向（图 3），从而使我们能够将波束指向指定方向（“波束指向”）。在本研究中，我们重点研究利用小型双麦克风阵列进行空间滤波，以提高距离估计的准确性。



图3. 波束形成阵列中不同麦克风的相位差示意图。

为了考虑多个噪声源，我们将 [7] 中描述的基于通道的相关方法推广为采用声学波束形成（算法1）。这里我们考虑将波束形成方法应用于一个简单的麦克风阵列（2个麦克风）；更复杂的阵列能够获得更好的波束形成效果，但需要更多硬件资源和信号处理。

算法1 波束互相关

要求： 波束指向 μ_1, μ_2
当系统正在运行 **时**
  读取每个麦克风的原始音频缓冲区
  应用汉宁窗
  计算加窗缓冲区的快速傅里叶变换
  计算互谱密度的移动平均
  （快速傅里叶变换的互谱密度）
  对移动平均阵列中的互谱密度取平均
  按迹归一化互谱密度
  使用 μ_1, μ_2构造导向矢量
  应用波束形成以获得波束功率谱
  对波束功率谱加窗并归一化
  时间延迟 $t_d \leftarrow$ 逆快速傅里叶变换（波束功率谱）
结束 while 循环

基本思路是将指向远离车辆方向的波束与指向螺旋桨噪声源的参考波束进行互相关（图2，左）；当波束指向反射射线路径的方向时，会观察到一个相关峰。该方法的伪代码见算法1。

B. 仿真结果

本节中，我们在模拟的对称多旋翼场景下比较基于通道的自相关差异与基于波束的互相关。近似几何布局如图2（右）所示，声源 P0 和 P3 分别位于 $(-0.1375, -0.255)$ m 和 $(-.1375, -.731314)$ m 处。噪声源是在二维几何布局中由互不相关的噪声源合成生成的白噪声。

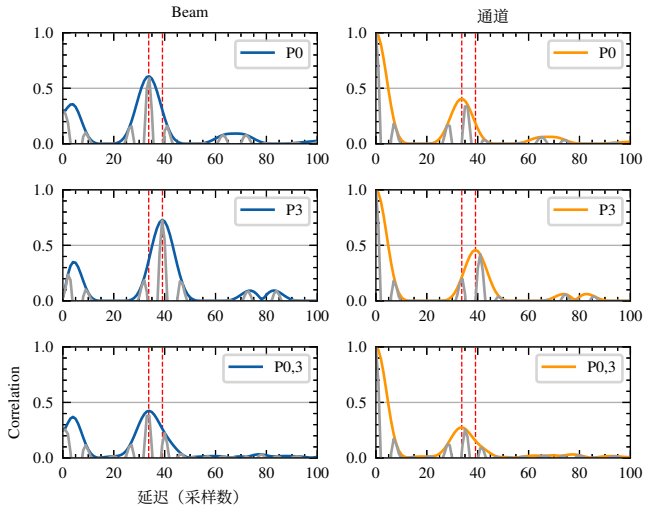


图 4. 无环境噪声时双源系统的波束互相关（左）与信道自相关差（右）的比较。顶行显示仅有声源 P0 时的响应，中间行显示仅有 P3 时的响应，底行显示 P0 和 P3 同时存在时的结果。灰色曲线表示原始相关，彩色曲线表示对相关信号进行希尔伯特变换后计算得到的复包络。

墙面反射体位于 $y = 0$处，声速恒定为 343 m/s。我们使用一个双元麦克风阵列（间距为 15 mm）。各麦克风分别位于 (0， -0.1475) m 和 (0， -0.1625) m 处。

仿真结果见图 4。各列表示算法（左：基于波束，右：基于信道），各行表示噪声源（顶行：仅 P0，中间行：仅 P3，底行：P0 +P3）。

我们有两个主要观察结果。

1) 首先，在多源情形下，基于波束和基于信道的方法所产生的峰值都会衰减（图 4，底行）；然而，由于信号幅度本来就较低，基于信道的方法衰减更为显著。

2) 其次，波束形成相关性（图 4，左）的幅度远高于相应的基于信道的信号（图 4，右），因此在距离估计算法中更容易识别，尤其是在环境噪声较强的条件下（信噪比更高）。

根据这些仿真结果，我们预计，基于波束的相关方法在环境噪声较高的多旋翼环境中会更加稳健。在第四节中，我们将在实验环境中检验这一假设。

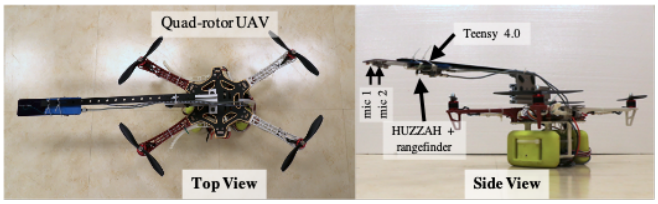
III. 方法

以下实验使用安装在驱动臂上的四旋翼无人机，在自由飞行测试之前，通过受限的实验设置展示相对墙壁距离的反馈控制。我们使用算法估计墙壁距离，该算法接收来自两个安装式麦克风组成的阵列的声音数据。所有距离估计均由机载微控制器实时计算。

在开环控制实验中，驱动臂按照预定义的模式移动车辆，并记录每次运行的原始音频信号、机载距离估计和真实距离。在闭环控制实验中，机载实时计算距离估计，然后将其发送给驱动臂上的比例控制器；该控制器会根据指令墙壁距离与测量的墙壁距离之间的差异作出响应。

A. 车辆设置

如图 5 所示，我们的车辆是一架四旋翼无人机。该车辆有四个安装在无人机机架上的 205毫米旋翼。两支麦克风位于前旋翼之间的中心位置，并垂直朝向墙壁。两支麦克风间距为 15 毫米，后置麦克风距前螺旋桨中心 350 毫米。麦克风连接到 Teensy 4.0 微控制器，该微控制器根据流式音频信号实时计算距离估计。



F图 5. 车辆几何结构的俯视图（左）和侧视图（右）　结构。

为获取距离真实值，Adafruit VL53L0X 光学飞行时间测距传感器安装在麦克风内侧 175 毫米处。传感器连接至 Adafruit Feather HUZZAH 微控制器，用于记录数据和通信。在所有测试中，墙壁距离均从麦克风阵列中心测量。

B. 驱动臂设置

在所有实验中，无人机均安装在 HEBI 6DoF驱动臂上，如图 1 所示。在接下来的测试中，机械臂沿垂直于墙壁的轴线移动车辆，并保持车辆水平。机械臂的运动由基于机载距离估计的反馈控制算法输出指令。

C. 距离估计算法

我们采用 [7] 和算法1中所述的两种方法估计距离，分别称为通道 和波束。此外，我们使用光学 测距仪 为开环和闭环控制测试提供距离真实值。我们对测距仪与原点（前置麦克风中心）之间的位置偏移进行校正，以提供用于评估距离估计算法的真实值。此外，我们还使用测距仪来展示闭环控制系统在采用“理想”距离测量时的基线性能。

波束和通道相关方法都通过对声信号进行解析处理来估计墙壁距离（图6）。距离估计分为两步：

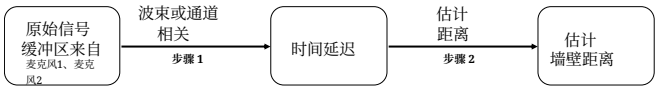


图 6. 声学距离估计分为两个高层步骤：(a) 找出延迟时间序列；(b) 根据该时间序列估计距离。本文研究第 1 步。

1) 时间延迟序列。首先，使用通道相关 [7]或波束形成算法处理原始信号缓冲区，得到延迟时间序列；示例见结果部分的图8。每个时间步对应的墙面反射噪声的时间延迟，可通过幅值最高的频段直观地识别。

2) 距离估计。接下来，简单的估计算法会提取该信号，并将时间延迟转换为估计的墙壁距离。由于这一步并非本文的重点，我们对波束方法和通道方法都采用相同的简单算法：选取时间延迟值最高的三个区间，选择最接近前一区间的区间，找出对应的往返距离，再将其减半以得到墙壁距离：

$$d = t_d * c/2 \tag{1}$$

其中， d 为估计的墙壁距离， t_d 为时间延迟，
$c \approx 343$ m/s 为声速。

通道和波束形成的距离估计均由 Teensy 全程机载计算，频率为 10 Hz。

D. 控制系统

在闭环控制实验中，机械臂运动通过一个校正量来控制，该校正量 x_c 与当前（估计的）目标墙距之间的差值成正比，$x_p := d$ 和 x_t:

$$x_c = K_p(x_t - x_p) \tag{2}$$

其中， K_p 为比例增益。

控制回路以 10 Hz 的频率运行，与距离估计频率一致。

E. 实验

1) 开环控制实验：我们比较机械臂相对于墙壁做振荡运动时，基于波束和通道的相关算法在机载端得出的距离估计。所有预测和中间值均由机载 Teensy 计算，并实时传输。

2) 闭环控制实验：如前所述，我们将每个距离估计值和目标发送给 HEBI 机械臂上的比例控制器，以测试闭环控制。我们进行了两项测试：

1) 方波测试。 车辆被命令在两个目标墙距之间移动：120 毫米和 200 毫米。测试持续 2.5 个周期，每个距离保持 20 秒，总测试时间为 100 秒（图7，左）。

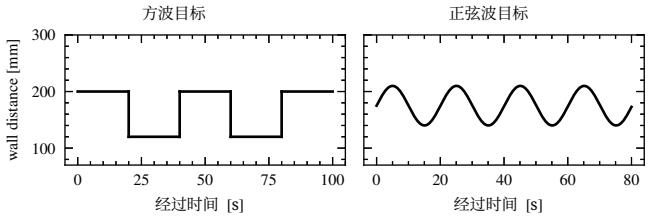


图7. 方波（左）和正弦波（右）测试的指令距离

2) 正弦波测试。 车辆被命令在两个距离之间振荡。我们将目标距离设定为一条正弦波，中心值为 175 毫米，振幅为 35 毫米。测试持续 4 个周期，每个周期为 20 秒，总测试时间为 80 秒（图7，右）。

对于每种墙壁距离测量方法：测距仪（基线）、波束和通道，我们分别进行了三次测试。我们比较了各方法的位置轨迹，以及距离估计的分布与真实值的差异。对于每项测试，我们计算了相对于指令距离的稳态误差和方差。此外，对于方波测试，我们还计算了平均上升时间（从达到指令距离的 10% 到 90% 所需的时间）和平均超调量。

3) 距离测试： 最后，我们比较两种方法在不同墙壁距离（从 4 cm 到 0.7 m）下的机载估计值，以测试其距离极限。

IV. 结果

A. 开环控制

1) 振荡测试： 首先，我们在机械臂振荡测试中比较波束与通道的机载预测结果。从定性角度看，与通道相关方法相比，波束形成方法生成的延迟时间序列信号清晰得多（图8），距离估计也更准确、更精确（图9）。从这些时间序列中提取的距离估计表明，波束形成方法的预测比通道相关方法更准确、更精确（图9）。从定量角度看，波束方法在保持相同预测率的同时优于通道方法（表 I）。

两种方法均以大致相同的频率（10 Hz）生成估计值，这与我们的控制回路速度相匹配。

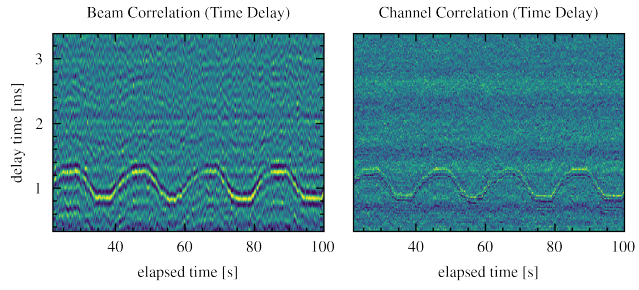


图 8. 机械臂振荡运动时波束与通道的延迟时间序列。

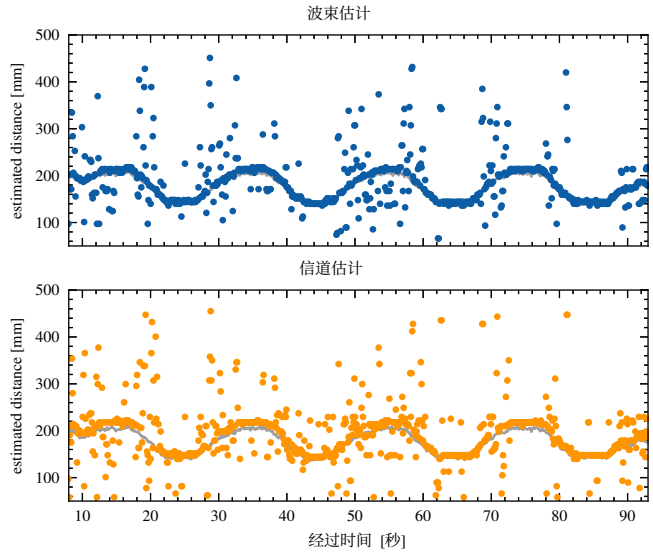


图 9. 使用波束形成和基于信道的相关算法对正弦运动进行机载预测。上图显示了每个时间步的预测结果，并与测距仪的真实值进行对比；下图显示了相应的误差图。随着墙壁距离增加，两种方法的误差均随之增大，而波束形成的误差始终较低。

方法	平均误差	标准差	最大误差	输出频率
互相关	35.0 毫米	61.2 毫米	291.4 毫米	**10 Hz**
波束形成	**27.3 毫米**	**53.3 毫米**	**283.1 毫米**	**10 赫兹**

表 I
开环控制误差

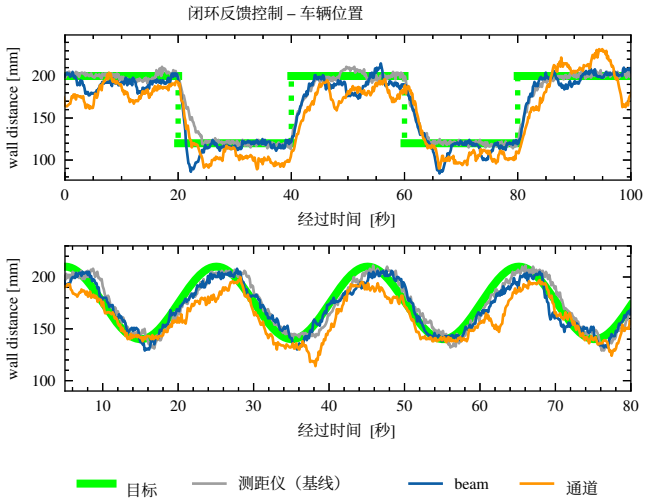


图 10. 使用各算法的距离预测进行闭环控制时的位置（测距仪真实值、声学波束相关和声学通道相关）。

方法	稳态 相对于目标的误差	稳态 标准差	上升时间	超调 %
测距仪（基线）	*2.8* 毫米	*2.3* 毫米	*3.77* 秒	*n/a*
通道	34.9 毫米	40.3 毫米	6.11 秒	**32.39%**
Beam	**19.7 毫米**	**34.4 毫米**	**4.59 秒**	43.06%

表 II 闭环反馈控制误差

B. 闭环控制

在开环分析之后，我们进行了多次闭环控制测试，按照前文所述，在机械臂控制回路中利用反馈波束和通道距离估计。两种方法都成功控制了方波和正弦波运动，但波束方法始终比通道相关更准确。

1）方波：方波测试的结果如图 10 所示，其中绘出了使用指定反馈（基于测距仪测量值的基线控制、波束和通道）时，测距仪测得的墙壁距离与指令距离的关系。波束方法和通道方法在向墙壁靠近时往往会出现超调，这可能是由于车辆重量对 HEBI 机械臂产生了外力矩；不过，波束形成方法在发生超调后能够更有效地回到目标位置。在多次测试中，这两种方法还会导致车辆在远离墙壁时未达到目标距离。我们认为这是因为离群值偏向较高数值，这一点可见于图 11（左）。

在稳态期间，波束相关控制的准确度是通道相关控制的两倍，上升时间快 1.5 秒，且出现较大离群值的情况较少（表 II）。尽管波束在向墙壁移动时出现了更明显的超调，但通常能迅速恢复到指令距离；相比之下，通道难以维持目标距离，稳态时往往与目标相差数厘米（图 10）。

2) 正弦波：同样，在正弦波测试期间，车辆会在两个指令距离之间振荡。该测试促使车辆持续运动，导致机械臂执行器产生更多背景噪声。因此，结果表明车辆在噪声更大的条件下可能会有怎样的表现。

结果见图 10（下），其中展示了各方法的位置与指令距离的关系。与方波测试相比，正弦波的平滑运动有助于减少超调，但通道方法难以应对此次测试中增加的背景噪声。在 38 s 和 63 s 处可以看到明显的位置误差，且整个测试期间的通道预测远不如相应的波束

方法	平均误差 相对于目标的速度	标准差	最大误差 相对于目标的速度
测距仪（基线）	*8.4* 毫米	*4.0* 毫米	*22.0* 毫米
通道	13.1 毫米	10.3 毫米	51.7 毫米
Beam	**7.7 毫米**	**5.0 毫米**	**25.1 毫米**

表 III 闭环正弦波测试的误差指标

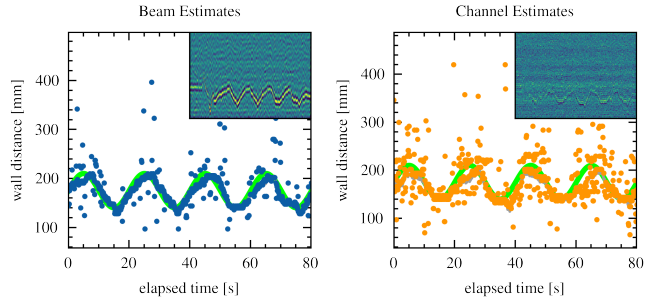


图 11. 每次闭环控制运行的距离估计，显示指令距离（绿线）及叠加的估计值（点）。插图中的延迟时间序列图可用于定性比较。

预测精确（表 III）。请注意，误差是相对于指令距离计算的。

比较两种方法的距离估计时，这一趋势更加明显（图 11）。与波束方法相比，通道方法的噪声更高；与之前的开环测试相比，这种差异在闭环控制测试中始终更加突出。我们认为这是由一个恶性控制循环造成的：噪声更大的预测导致机械臂运动增多，进而产生更高的环境噪声，使预测变得更加嘈杂。在自由飞行情况下，这种循环可能不那么明显，但我们认为仍会存在。相比之下，波束形成预测的噪声水平与开环测试结果相符。

我们在更多具有挑战性的条件下重复了这些闭环反馈测试，包括各种环境噪声条件、多个附近的反射体，以及面对粗糙岩壁的情况；波束方法在这些条件下的表现与受控条件下相当。未来的工作将更全面地研究该方法在复杂环境中的鲁棒性，并表征其失效模式。

C. 距离测试

一种实用的障碍物检测算法应能在足够远的距离检测到障碍物，以便无人机作出反应。图 12 展示了两种算法在 4 cm 至 0.7 m 范围内的时间延迟和距离预测；0.7 m 是采用该飞行器几何结构时光学测距仪的最大测量范围。

在基于信道和基于波束的延迟时间序列中，随着墙壁距离增加，信号都会衰减。与前文相同，基于波束的相关信号比基于信道的信号更清晰。采用简单的距离估计算法时，信道在约 200 毫米以内的精度足以满足闭环控制要求，与 [7] 相近。波束方法在超过两倍的距离范围内（最远近 0.5 m）仍能保持相近的误差和方差。从定性角度看，使用波束时，即使时间延迟接近 4 ms，峰值仍清晰可见，对应的墙壁距离为 0.7 m。

虽然我们的闭环控制测试大多在 100–200 毫米范围内进行，但这些结果令人鼓舞，表明波束形成方法在远得多的墙壁距离下也能有效用于主动控制，尤其是随着距离

图 6 中的估计算法得到了改进。

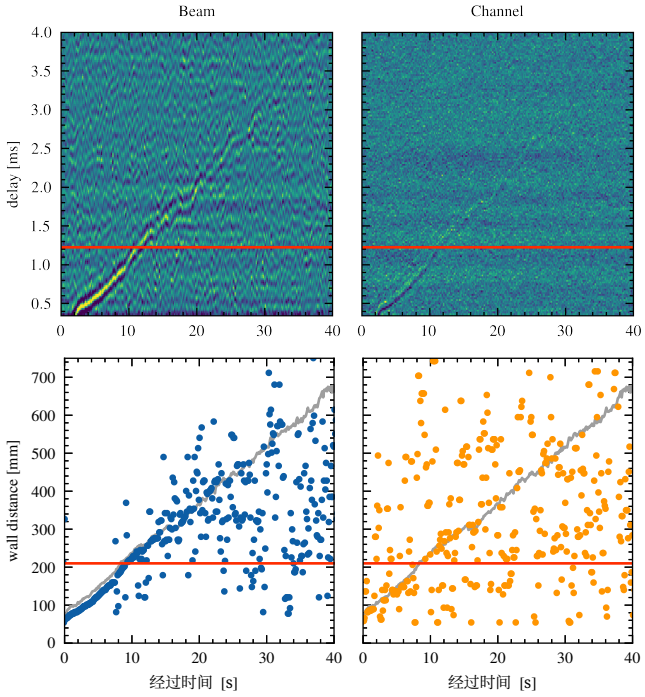


图 12. 距离为 4 cm 至 0.7 m 时各声学估计方法的延迟时间。红线表示当前闭环测试的范围上限。

V. 结论

在本研究中，我们提出了一种方法，通过对车辆推进系统产生的隐式噪声应用声学波束形成，估计四旋翼无人机与物体之间的相对距离。我们展示了该方法在开环设置下具有较高的估计精度，将其部署到机载系统中以进行实时预测，并验证了其在机械臂搭载无人机上的闭环反馈控制效果。在仿真、开环分析以及最终的机载闭环反馈控制实验中，基于波束的相关方法始终优于基于通道的相关方法。此外，对不同墙面距离的开环分析表明，当墙面距离接近 0.7 米时，波束形成信号仍然较强，因此能够在远两倍的距离上实现准确估计。这为最终实现自由飞行带来了希望：在更远距离探测到墙壁可以降低碰撞可能性、提高车辆机动性，并有助于开展更复杂的声学感知和建图任务。

这项工作的一个直接延伸，是将声学波束形成方法应用于物体相对方位估计，以实现粗略二维感知。我们还计划更好地刻画该方法的局限性，研究其在不同环境和运行设置、墙壁距离及飞行器配置下的鲁棒性。最后，我们打算在自由飞行环境中测试该方法，先进行开环分析，进而实现对飞行中无人机的闭环反馈控制。

参考文献

[1] J. C. Curlander 和 R. N. McDonough，《合成孔径雷达》。Wiley，纽约，1991年，第11卷。[2] G. Ma 和 P. Sheng，“声学超材料：从局部共振到广阔前景”，《*Science Advances*》，第2卷，第2期，页码 e1501595，2016年2月。[3] Y. Bai、N. Garg 和 N. Roy，“SPiDR：用于微型机器人导航的超低功耗声学空间感知”，载于《第*20*届移动系统、应用与服务国际年度会议论文集》。俄勒冈州波特兰：ACM，2022年6月，第99–113页。[4] S. Ogiso、T. Kawagishi、K. Mizutani、N. Wakatsuki 和 K. Zempo，“使用声学信标的移动机器人自定位方法”，《*ROBOMECH Journal*》，第2卷，第1期，页码12，2015年12月。[5] I. Shahid、Y. Bai、N. Garg 和 N. Roy，“VoiceFind：抗噪普通耳机中的语音恢复”，载于第一届*ACM*智能声学系统与应用国际研讨会论文集。美国俄勒冈州波特兰：ACM，2022年7月，第13–18页。[6] L. Calkins、J. Lingevitch、L. McGuire、J. Geder、M. Kelly、M. M. Zavlanos、D. Sofge 和 D. M. Lofaro，“利用电机-螺旋桨系统的自激声学特征进行受生物启发的距离估计”，载于国际机器人与自动化会议，线上会议，2020年6月，第7页。[7] L. Calkins、J. Lingevitch、J. Coffin、L. McGuire、J. Geder、M. Kelly、M. M. Zavlanos、D. Sofge 和 D. Lofaro，“利用航空器自激噪声进行距离估计”，*IEEE*机器人与自动化快报，第6卷，第2期，第2807–2813页，2021年4月。[8] A. V. Oppenheim，离散时间信号处理。Pearson Education India，1999年。