

基于光纤的管道泄漏振动检测-光分布式声学传感

一、简介

管道是能源供应基础设施的重要组成部分，从本地工业管道系统到跨越大陆的管道，各种管道都在世界各地使用。随着世界管道基础设施的发展和老化，对管道安全和可靠运行的监管要求也越来越高。实施稳定可靠的泄漏检测系统仍然是管道状态监测的核心问题之一。管道泄漏的来源和特征可能因多种因素而异，包括输送介质、管道类型和操作条件。因此管道泄漏检测系统通常需要针对各个应用进行定制和验证。有许多不同的技术可用于管道泄漏检测，它们可以大致分为两类：内部和外部监控方法，有时也分别称为基于软件或硬件的系统。

内部系统利用不同的计算方法从管道内部参数（如产品压力、温度、密度或流速）推断泄漏的发生。这些类型的系统通常便宜且易于实施，因为它们依赖于处理来自传感器的数据，这些传感器要么是管道的一部分，要么可以轻松改装。然而它们的性能通常在最小可检测泄漏尺寸、泄漏检测速度和泄漏定位精度方面受到限制。

外部系统依赖于沿管道使用额外的传感器来检测可能泄漏的外部表现，例如声音信号、温度变化或化学品泄漏的存在，外部系统通常具有更高的硬件和安装成本，但即使对于较小的泄漏，也可提供更可靠、更快速的检测和高定位精度。

近年来，分布式光纤传感器（DFOS）在管道行业中因各种监测任务而受到越来越多的关注，DFOS 依赖于光纤中不同类型的光反向散射，基于此可以将它们大致分为三类：基于 Brillouin, Raman 和基于瑞利的 DFOS 系统。

根据传感原理 DFOS 可以提供有关沿数十公里光纤长度的局部衰减、温度和应变的分布式信息，使用 DFOS 作为外部管道监测系统非常有吸引力，因为一个单个单元可以提供对延长管道长度的空间和时间连续监测。多年来已经提出了各种 DFOS 方案用于管道泄漏检测，这些包括使用特殊碳氢反应性光纤电缆的基于衰减的传感器、检测泄漏声发射的基于干涉测量的系统或基于 Brillouin, Raman 系统检测管道附近泄漏引起的温度梯度。

分布式声学传感（DAS），有时也称为分布式振动传感（DVS），属于广泛可用 DFOS 技术的最新发展。DAS 系统属于基于瑞利的 DFOS 系列，依赖于称为相干光时域反射的原理（C-OTDR）。在最简单的 C-OTDR 形式中，短的相干激光脉冲被发送到光纤中，在光纤拉伸过程中形成的亚波长折射率不均匀导致局部散射中心的部分反射，在光纤输入端以高采集速率检测微弱的反向散射光。记录的单脉冲反向散射光强度的时间演化包含了沿光纤的局部反向散射中心的即时配置信息，沿着光纤的位置可以从光纤中的脉冲相对飞行时间推断出来，检测到的局部强度是来自包围在脉冲包络线中的散射中心的光干涉的产物。散射体分布是一种特定光纤的单独特性。然而，即使是由于外部扰动（例如应变或温度变化）导致的局部散射体分布的微小扰动，也可能导致记录的反向散射强度剖面的显著变化。可以以高重复率监测连续脉冲之间光纤背向散射分布的这些变化，从而提供关于沿光纤的温度或应变变化的高动态信息。这种高动态应变监测是 DAS 技术的核心。上述单脉冲直接检测 C-OTDR 代表了 DAS 技术的最简单实现，有时也称为基于幅度的 DAS。事实上在这种情况下，指定 DAS 是用词不当，因为系统既不能测量声学/振动信号的相位，也不能测量真实幅度。一些研究人员和制造商对这些类型的系统使用更合适的 DVS 名称，仅允许定

性分布式振动测量。尽管如此，近年来已经提出了许多更复杂的用于真正定量动态应变测量的系统配置。

DAS 系统能够检测到高达 kHz 范围的高动态振动信号，以其在管道监测任务中的巨大潜力引起了管道行业的兴趣，最典型的是这些系统被考虑并用于检测管道上的第三方入侵。尽管如此，DAS 在清管器跟踪、流量监测和泄漏检测中的应用也已被探索。在大多数应用中，传感光缆是沿管道附近铺设的。泄漏监测是基于检测与泄漏开口相关的负压波或宽带泄漏引起的噪声。然而，从管道到远程光纤的信号传输并不理想，泄漏检测通常仅限于相对较大的泄漏。将光纤直接应用于管道可以提供更好的信号传输和更高的 DAS 系统灵敏度，以检测甚至很小的泄漏 (<1%)。在这里我们展示了测量活动的结果，研究了利用光纤直接应用于管道的 DAS 检测气体管道针孔泄漏的可行性。结果表明利用该方法可以检测出管道的微弱泄漏诱发的固有振动模态，并可作为管道泄漏定位的指示。

2. 材料和方法

2.1. 模型管道系统

本文研究了光纤直接应用于管道表面的光纤 DAS 检测气体管道小泄漏的可行性。所有的实验都是在联邦材料研究与试验研究所(BAM)的技术安全试验场建立的管道模型上进行的。线性管道部分位于设施建筑内，从那里它不断延伸穿过建筑墙到外部区域。该管道由 13 段 DN100 管道通过法兰连接而成，图 1a 为所使用的管道设置示意图，图 1b 为管道外部的图片。除 n. 8 段只有 2m 外，其余段均为 3m，管道总长度为 38m。四个单独的管段采用光纤进行 DAS 测量，管道外部的三个相邻管段(n. 9-11)构成主测量区域，靠近管道内端的一个管段(n. 2)作为远程参考区域。由于实际原因，全光纤在整个管道上的应用并不可行。为了进行数据评估，从现在开始，参考管段(n. 2)将被称为 0 区，三个外部测量管段(n. 9-11)将被称为 1-3 区(图 1a)。

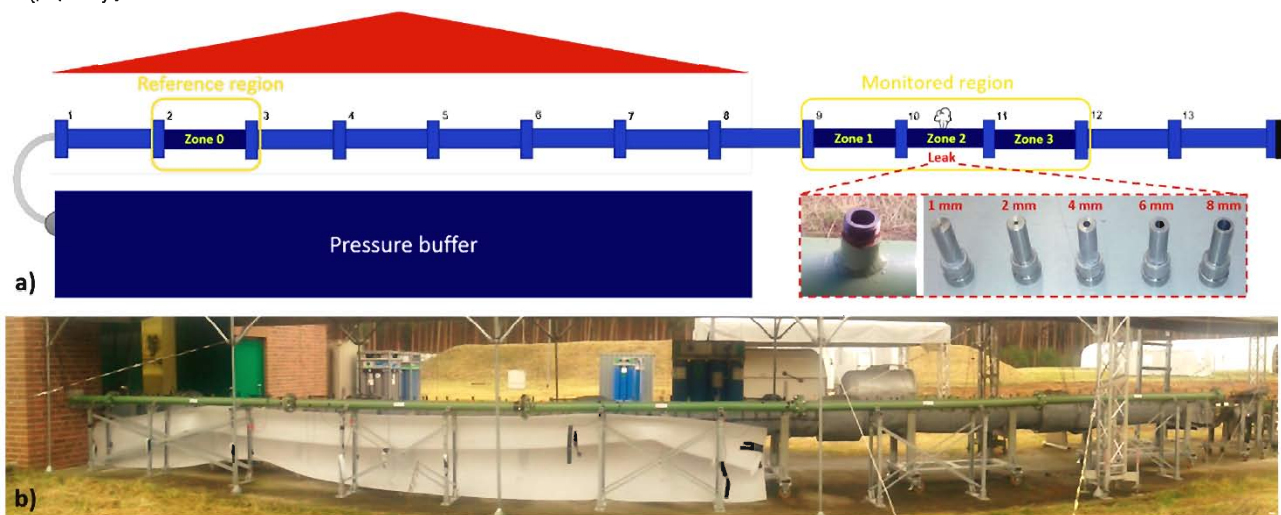


图 1 所示

(a)使用的管道系统示意图，突出用光纤测量的管道区域。管道侧转接头和小孔转接头帽，用于模拟管道泄漏；

(b)用光纤测量的主要测量区域位于管道系统外部部分的照片。

各管段每 30cm 焊接转接头，在管道 2 区（即 DAS 主要监控区域的中部）的转接头中插入小孔转接头帽，模拟管道泄漏（图 1a）。使用了 1 - 8mm 范围内不同直径圆孔的转接头。管道两端关闭，辅助压力缓冲器通过 1 英寸软管与管道内端连接，并带有可遥控阀门。使用压缩空气缓冲器可以加增压至 30bar。在管道中安装所需尺寸的孔洞转接帽，打开缓冲器与管道之间的阀门，使管道快速增压，模拟通过孔洞转接帽泄漏，使用电子压力表监测管道和缓冲内部压力。

2.2. 使用传感器

在这项工作中使用了没有任何护套的标准单模光纤（SMF-28e，康宁，纽约，美国）。图 2a 示意性地说明了用于用光纤检测选定管段的光纤应用方法。所有四个仪表管段都使用相同的光纤应用方法。使用大约 2.5 厘米的相对较小的节距将纤维螺旋缠绕在管段的主体周围。图 2b 显示了其中一个仪表管段的照片，显示了螺旋应用的纤维。与沿管道的简单直纤维应用相比，螺旋缠绕增加了纤维与管道的覆盖率

$$R = L_f / L_p$$

其中 L_f 是纤维的长度

用于覆盖长度为 L_p 的管段，这有助于提高潜在微弱信号的测量灵敏度和空间分辨率。考虑到管道外径和纤维应用间距，大约 40 m 的纤维被应用到 3 m 长的管段的主体上。除了这 40 m 的光纤外，还在管段的两端靠近法兰处应用了 10 m 的紧密缠绕的辅助光纤。由于管道法兰的原因，连续纤维应用不可行，因此管段之间总是有一个短的自由悬挂的纤维部分。事实证明光纤的这些自由悬挂部分容易记录杂散信号。DAS 系统本质上是测量振动信号，有效地集成在与所使用的询问脉冲长度成比例的光纤长度上，这可能导致杂散信号从自由悬挂的光纤部分“光泄漏”到应用在管道上的光纤，特别是如果使用较长的 DAS 脉冲设置。辅助光纤区域有助于将应用于管道的其余光纤与来自自由悬挂光纤部分的潜在杂散信号隔离开来。仅评估应用于相关管区的纤维部分的数据。所有其他互连光纤部分都被视为所谓的死区，并且在评估中丢弃来自这些部分的信号。

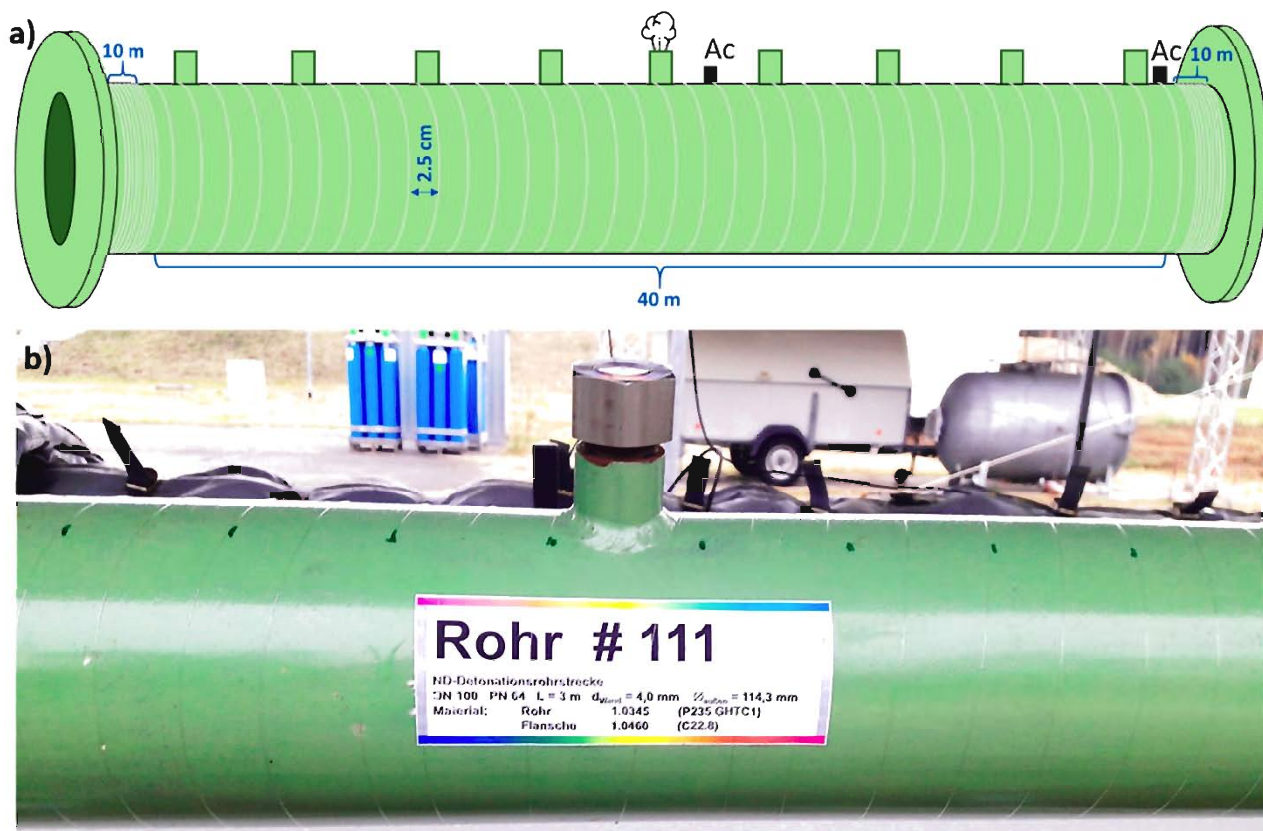


图 2.

(a) 所采用的纤维应用方法的示意图，该方法依赖于围绕管段的纤维螺旋缠绕。模拟泄漏和参考加速度计“Ac”（仅在管道区域 2）的位置也被指示；

(b) 其中一个仪表管段的详细照片，显示了管侧转接头和应用的纤维。

分布式振动测量的研究采用了商用 DAS 系统 (Helios DAS, Fotech Solutions, Church Crookham, UK)。该系统代表了 DAS 技术最简单的基于幅度的实现。如前所述 DAS 名称实际上是对此类系统的用词不当,因为它仅提供定性分布式振动测量。尽管如此,我们将继续在论文中使用该命名法,因为它似乎已在该领域确立,并且使用的系统以该名称出售。所有提供的测量均使用 200 ns 激光脉冲长度和 80 kHz 脉冲重复率进行。相对较大的脉冲长度有助于提高系统对潜在微弱泄漏诱发信号的灵敏度。另一方面,长脉冲长度 T_p 限制了可实现的 DAS 空间分辨率 $r = cT_p / (2n_{eff})$, 其中 c 是真空中光速, n_{eff} 是光纤模式的有效折射率。200 ns 的脉冲长度对应于光纤中大约 20 m 的空间分辨率。使用长脉冲长度的较低 DAS 空间分辨率通过具有高光纤与管道覆盖率的光纤应用进行补偿。对于我们的光纤应用,螺旋应用光纤中的 200 ns 脉冲对应于大约 1.6 m 长管道部分的测量空间分辨率。这可能不足以在同一管段内执行精确的信号定位,但是不同管段之间的信号定位应该是可能的。根据奈奎斯特定理,脉冲重复率决定了可检测振动信号的最大频率。在我们的测量中使用了接近最大可能系统设置的脉冲重复率,以覆盖潜在振动信号的尽可能宽的频谱间隔。然而脉冲重复率 f_p 与最大监测距离 $L_m = c / (2n_{eff} f_p)$ 成反比。80 kHz 的脉冲重复率大致对应于 1.25 公里的最大监测距离。这对我们的实验没有任何限制,其中仅监测大约 250 m 的相对较短的光纤距离。除了光纤之外,泄漏的管段 (区域 2) 还配备了参考加速度计 (KS95B.100、MMF、德国拉德博尔)。加速度计从顶部粘在管道表面上;一个在靠近模拟泄漏的管段中间,一个靠近管段末端 (图 2a)。

2.3 实验方法

该实验包括在不同泄漏尺寸和管道内部压力组合下进行的一系列测量。对于每个泄漏尺寸,在逐渐降低压力的情况下进行一系列测量。对于每个测量系列,压力缓冲器首先泵送至 25-30 bar。当达到所需的缓冲压力水平时,打开缓冲与主管道之间的阀门。经过一段短暂的时间后,缓冲液和管道中的压力平衡,实现了相对稳定的从多孔适配器泄漏。当管道压力由于泄漏而逐渐降低到大气压力时,在选定的压力水平下使用 DAS 和参考加速度计进行了持续 30 秒的测量。由于持续泄漏,在 30 秒测量期间内部压力不会保持不变。表 1 列出了执行不同泄漏尺寸的单个测量时的近似压力间隔。为简便起见,整篇论文中将使用四舍五入的标称压力值 (如表 1 所示) 作为单个测量的参考。

保存的 DAS 原始数据表示包含沿两个轴呈现的记录光强度信号的 2D 矩阵:测量时间和沿光纤的位置,然后将短时快速傅里叶变换(STFFT)应用于单个位置箱的数据。将每个位置仓的时间序列数据被分成包含 N 个时间测量点的连续时间窗口,利用快速傅里叶变换(FFT)计算其频谱表示。在执行的 STFFT 中没有使用窗口,但在 FFT 前对每个时间窗内的信号进行去趋势处理,以最大限度地减少 DAS 信号的 DC 波动对计算光谱的影响。8192 点的 FFT 窗口长度 N 用于所有呈现的结果。如前所述,只对四个相关管区的数据进行评估。来自死区的信号将被丢弃。准备好的所有相关位置区间的 STFFT 频谱演化数据代表了本文进一步信号评估和呈现的基础,本文将使用三种不同的信号频谱表示:

- *时间平均频谱-来自所有单独 STFFT 时间窗口的 STFFT 频谱被平均,分别用于每个位置区间
- *位置平均频谱 - 对属于同一管道区域的所有位置区间的 STFFT 频谱进行平均,分别针对每个 STFFT 时间窗口。
- *总的区域谱-单个管道区域的 STFFT 频谱在属于该区域的所有区间和所有 STFFT 时间窗口上进行平均。

所有区域都具有相同大小的 36 个 bin,以保持各个区域的结果具有可比性。对于所有频谱表示,从单个频谱中减去噪声层,噪声层估计为相应频谱的中值。

用于 DAS 数据的类似 STFFT 频谱时间平均方法也适用于加速度计数据。以 200kHz 的采集速率采集加速度计数据，32,768 点的 FFT 时间窗口长度用于评估。

表 1. 执行单独测量的实际管道压力 (bar) 的间隔。列出的泄漏尺寸和公称压力值将用于参考整篇论文中的各个测量值。

Nom. Pressure\Leak Size	1 mm	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm
25 bar	25.7–25.5	26–23.8	25–24	-	-
20 bar	20.5–20.2	21–19.9	20–19.1	20.7–19.4	21–18.1
15 bar	15.5–15.31	15.5–14.5	15–14.35	15.5–14.3	16–13.9
10 bar	10.53–10.42	15.5–9.95	10–9.56	10.5–9.7	10.8–9.3
6 bar	-	6.15–5.8	6–5.73	6.3–5.8	6.4–5.55
5 bar	5.7–5.6	-	-	-	-
4 bar	-	4.15–3.93	4–3.82	4.15–3.8	4.3–3.7

3. 结果

所有 DAS 测量均使用 80 kHz (接近最大可能) 脉冲重复率进行，以覆盖潜在振动信号的最大可能频谱范围。然而在整个实验过程中，几乎没有在 10 kHz 以上的频率上观察到相关信号。因此，在这项工作中没有关注 10 kHz 以上的频谱范围。对表 1 中列出的模拟泄漏尺寸和管道内部压力的不同组合进行了大量测量。然而这里提供的结果仅限于小泄漏率的情况，即在小泄漏尺寸和/或低压下的测量。一方面这符合这项工作的最初动机，其中针孔泄漏的检测代表了所解决的技术挑战，另一方面这也是我们测量设置的固有局限性的结果。在我们的管道系统中，高泄漏率会导致通过缓冲管道互连软管的内部气流产生强烈的寄生振动信号，这些强烈振动沿管道传播，即使在距离缓冲管道互连 20 m 以上的区域 3 中 DAS 系统也可以检测到。图 3 比较了两个单独测量的单个管道区域中位置平均 DAS 信号频谱的时间演变，说明了这种负面影响；10bar 泄漏 1 毫米，20bar 时泄漏 8 毫米。这两个测量值代表了泄漏率方面的两个极端实验条件情况。

图 3a 展示了一个低泄漏率的情况，显示了由一组微弱但频谱不同的频率组成的信号的存在，这些频率主要位于低于 2.5 kHz 的频谱范围内。信号在模拟泄漏所在的管道区域 2 中占主导地位，而在参考区域 0 中没有观察到信号。这表明观察到的特征是 DAS 系统检测到的实际泄漏引起的振动信号。检测信号的频谱在 30 秒的测量时间内保持相对稳定。另一方面在图 3b 中观察到了更复杂和随时间变化的光谱，呈现了一个大的泄漏率场景。源自缓冲器-管道互连的强寄生信号在区域 0 中最为明显，但在所有其他管道区域中也可检测到。关注区域 0 中光谱不同的信号，只有低于 4 kHz 的特征代表实际振动信号。图中在较高频率处可见的其余频谱特征是这些振动信号的谐波。对于基于幅度的 DAS 系统来说，强信号的高次谐波的出现是众所周知的固有问题。高次谐波信号与实验没有任何关系，然而它们可以掩盖实际信号并阻止其成功检测和解释。缓冲管道互连处寄生振动信号的出现对所进行的实验非常不利，并且不允许我们对大泄漏率进行可靠的评估。因此我们进一步主要关注小泄漏率情况的评估，即小泄漏尺寸和/或低压下的测量。对于评估的测量情况，信号主要位于 5 kHz 以下的频率范围内。因此仅此光谱范围将进一步包含在所呈现的评估中。

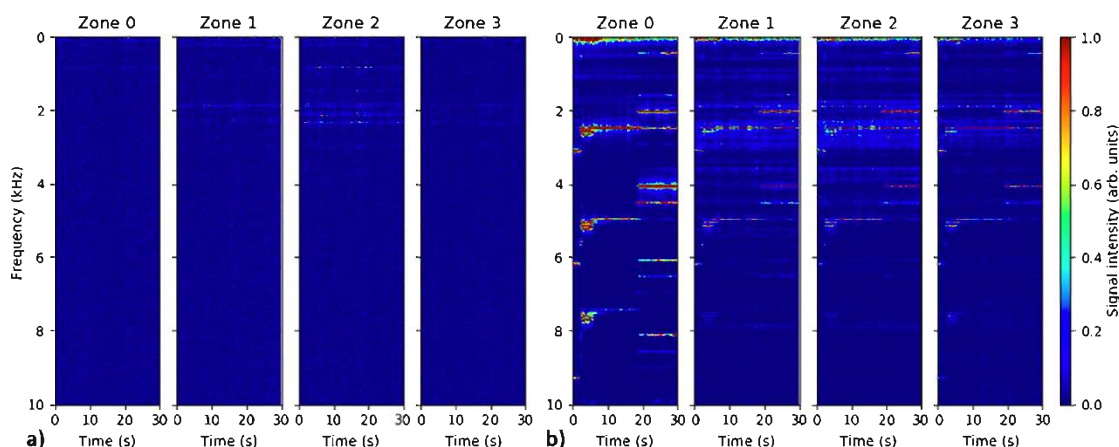


图 3

(a)在 10 bar 处泄漏 1mm 和 20 bar 处泄漏 8mm 时，每个管区的位置平均分布式声传感(DAS)信号谱的时间演化
(b)注意到在 10bar 处泄漏 1 毫米的光谱幅值相对于在 20bar 处泄漏 8 毫米的光谱幅值是按 5 倍计算的

如图 3a 所示，较低泄漏率的泄漏诱导信号在时间上是稳定的。这使我们能够对记录的信号进行时间平均，以提高信噪比 (SNR) 和弱信号的可检测性。图 4 描绘了沿光纤的时间平均 DAS 信号频谱，在 5 个条柱处 1 毫米泄漏。如前所述来自光纤死区的信号被丢弃，即设置为零。使用了三个不同的采集时间，在这些时间上平均信号谱。使用的采集时间大约为测量时间的 0.3 秒、3 秒和 30 秒。选定的采集时间分别对应于 3、29 和 292 个 STFFT 窗口的频谱平均。该图说明了时间平均如何帮助提高对来自小管道泄漏的微弱但时间稳定的信号的可检测性。虽然在 0.3 秒的采集时间内看不到可检测的信号，但当对整个 30 秒测量间隔的光谱进行平均时，仍然可以观察到微弱但清晰可检测的泄漏诱导信号。从现在开始这里呈现的数据的所有光谱表示都是使用讨论的时间平均在单个测量的整个 30 s 持续时间内准备的。

图 5 显示了不同压力下 1 毫米泄漏测量系列沿光纤的时间平均 DAS 信号频谱。对于所有测试压力水平，由多个不同频谱分量组成的泄漏引起的振动信号在管道区域 1-3 中清晰可见。另一方面在远程参考区 0 中几乎不存在可检测信号。信号的幅度和复杂性随着管道压力的增加而增加。此外看起来最强的信号出现在模拟泄漏所在的区域 2 中。这都表明记录的信号与泄漏产生的振动有关，可以用作管道泄漏检测和定位的指示。

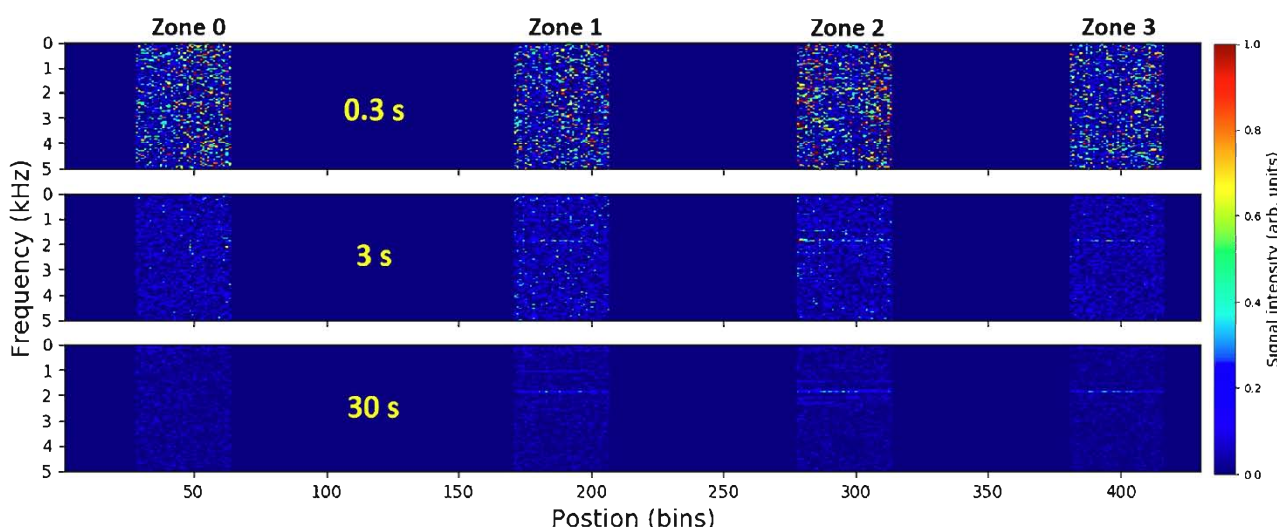


图 4。在 5bars 处泄漏 1mm 时，沿光纤记录的时间平均 DAS 信号谱，以及不同采集时间的平均值。被监控的管道区域之间的光纤死区发出的信号将被丢弃，即设置为零。0.3 s、3 s 和 30 s 的标记获取次数对应于超过 3,29 和 292 个短时快速傅里叶变换(STFFT)窗口的光谱平均值。

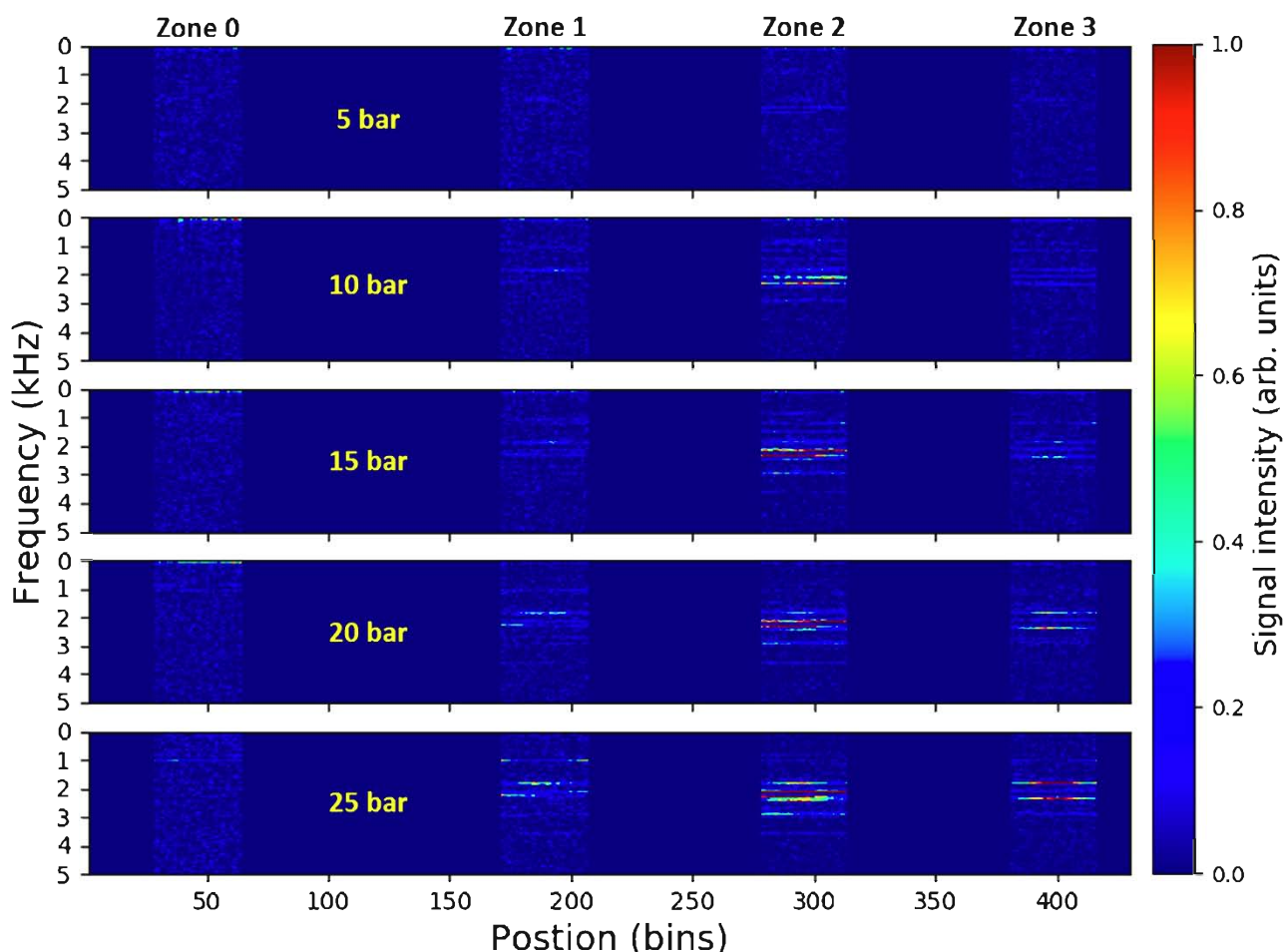


图 5. 在不同压力水平下记录的 1 毫米泄漏沿光纤的时间平均 DAS 信号谱，来自受监控管区之间的光纤死区的信号被丢弃，即设置为零。

为了进一步分析记录的信号的频谱特征，我们将给出的时间平均数据在各个管区对应的所有 bins 上再进行平均。图 6a 为管区 2 中 1mm 泄漏测量系列所记录的整体信号谱。图 6b 中包含了两个参考加速度计记录的信号频谱用于比较。为了图表的可读性，加速度计数据只包括了最低(5 条)和最高(25 条)测试压力水平的测量值。从图 6a 可以看出，DAS 漏致信号频谱的整体形态保持相对稳定。在最低(5 条)压力测量中可以识别的所有光谱特征，在所有其他测量中也保留在信号光谱中。在较高气压下，光谱中出现了一些新的光谱特征。然而，这很可能与信号振幅的普遍增加有关，它“揭示”了之前低于测量检测水平的峰值，即有过低的信噪比。大多数优势峰的光谱位置是稳定的。然而，在一些频谱特征上观察到轻微的频率偏移，例如，最左边的峰值随着管道压力的增加从 830 Hz 逐渐转移到 860 Hz。

管道段中间和末端的加速度计之间的比较表明，虽然两条曲线的一些频率分量是相同的，但也有几个互补频率仅出现在其中一个频谱中。例如最左边的 850 Hz 附近的峰值仅出现在“中央”加速度计信号中，而 1.85 kHz 附近的峰值仅出现在“末端”加速度计信号中。在这方面显示的 DAS 数据代表位置平均光谱。这不仅是因为在评估步骤中对区域 2 的光谱进行了数值平均，而且还因为来自有限长度光纤的信号固有“光学集成”与所使用的 DAS 脉冲长度成正比。对于我们的光纤应用，螺旋应用光纤中的 200 ns 脉冲对应于大约 1.6 m 长管段的 DAS 空间分辨率。然而 DAS 系统收集的信号与参考加速度计之间存在良好的一致性。类似地对于 DAS 数据，加速度计结果证实信号频谱的一般形状基本保持不变，只有其幅度随着管道压力的增加而增加。某些光谱特征会随着压力的变化而略有变化。在 DAS 系统和加速度计中一直观察到这种偏移，例如 850 Hz 频谱峰值随压力上升而发生正偏移。两种测量技术之间所有主要光谱峰的位置都非常吻合，但是各个峰的相对幅度可能会有很大差异。这可能是由于传感器对实验中存在的不同性质（不同管道振动模式）的振动信号的不同敏感性造成的。从管道到光纤的信号传输的光谱依赖性也可能起作用。加速度计数据通常包含高达 50 kHz 的强泄漏生成

振动信号（此处未显示），而 DAS 系统几乎无法检测到 5 kHz 以上的泄漏生成信号。由于不知道 DAS 系统灵敏度的光谱相关性，因此这种影响很可能与管道振动信号到传感光纤的机械传输有关。提醒一下也很重要与加速度计不同的是，所使用的 DAS 系统不具有线性和时间不变的传递函数，因此不能提供信号幅度的真实测量。

图 7a 显示了在 25 bars 下 1 毫米泄漏情况下所有四个管区的整体 DAS 信号频谱。在参考区 0 中几乎没有观察到信号。在监测区域的三个管区中，信号在模拟泄漏所在的管区 2 中明显占主导地位。这表明记录的信号源自泄漏。一些频谱特征似乎更有效地传播到相邻的管段，例如 1.85 kHz 附近的频谱峰值。其他频谱特征似乎仍然强烈地集中在有泄漏的管段中，例如 850 Hz 附近的频谱峰值。为了帮助理解观察到的振动信号的性质，使用冲击锤测试研究了管道固有频率。用冲击锤（ICP® 086C03, PCB Piezotronics, Depew, NY, USA）在管道侧适配器顶部激发管道模拟泄漏，并使用粘贴在不同位置的加速度计测量管道响应管道。管道频率响应函数（FRF）由 20 个单独的点击确定。图 7b 比较了管道段 2 中两个参考加速度计在 25 bars 下 1 毫米泄漏的实验中收集的信号频谱，以及为两个加速度计确定的管道 FRF，其位置与泄漏实验中的相似。两幅图显示了大多数主峰的良好一致性，表明观察到的信号对应于由通过小泄漏从管道逸出管道的加压空气产生的宽带激励（白噪声）激发的管道本征频率。根据振动模式的性质，一些模式可能会更有效地沿管道传播，而其他模式则只局限在激励源附近。关于 DAS 和加速度计数据的比较，必须注意加速度计主要对其灵敏度轴方向（在我们的案例中为垂直方向）上的振动敏感，而 DAS 对导致应变的所有振动信号敏感螺旋应用纤维。这些可以是不同的横向、纵向和圆周管道振动模式。

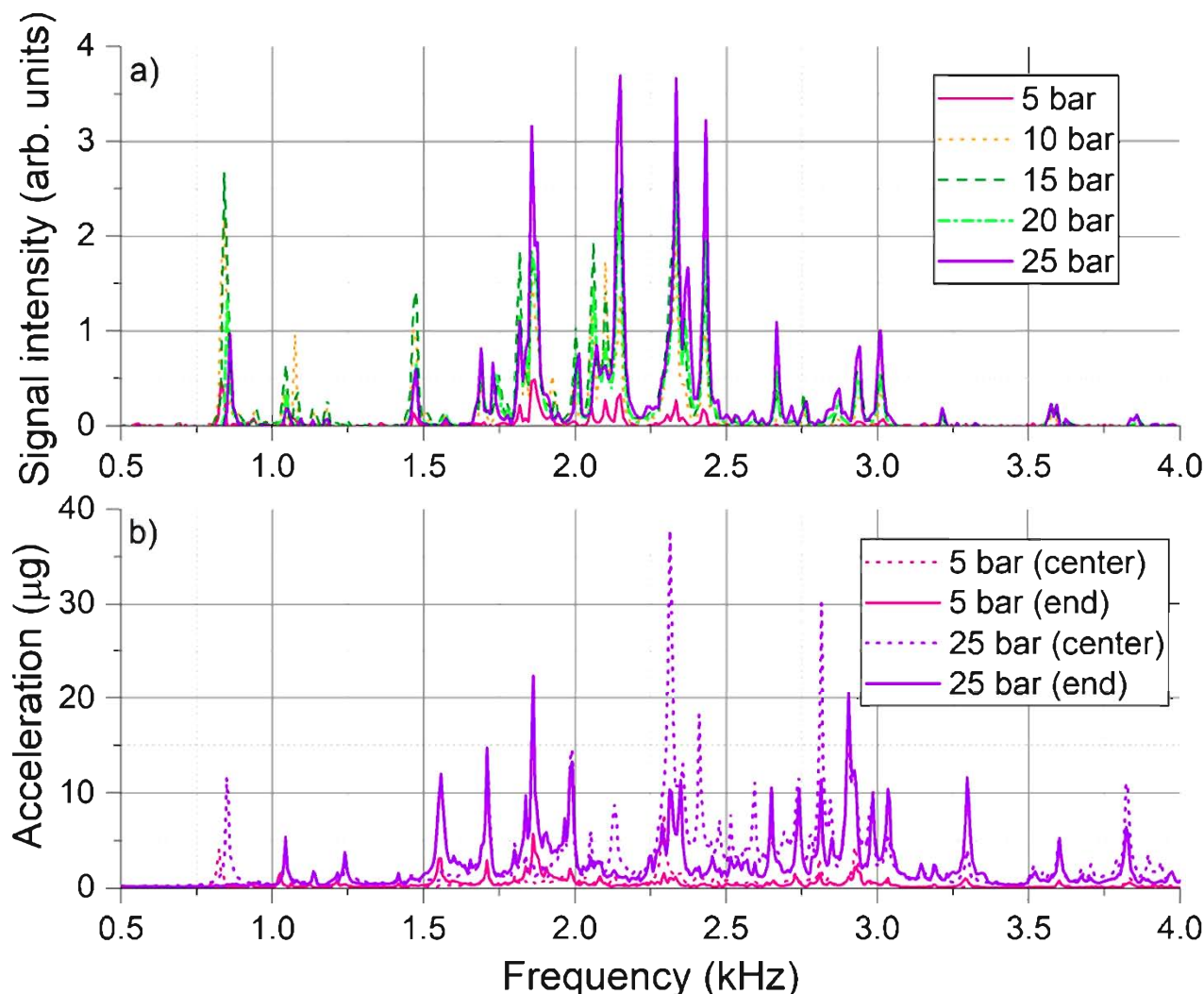


图 6. 在管区 2 中记录的信号谱，用于不同压力水平下 1 mm 泄漏的测量系列；

(a) 来自管区 2 的总体（时间和位置平均）DAS 信号频谱；

(b) 来自位于管区 2 中间靠近泄漏处（中心）的参考加速度计的时间平均信号频谱和在靠近法兰（端部）的管区边缘。

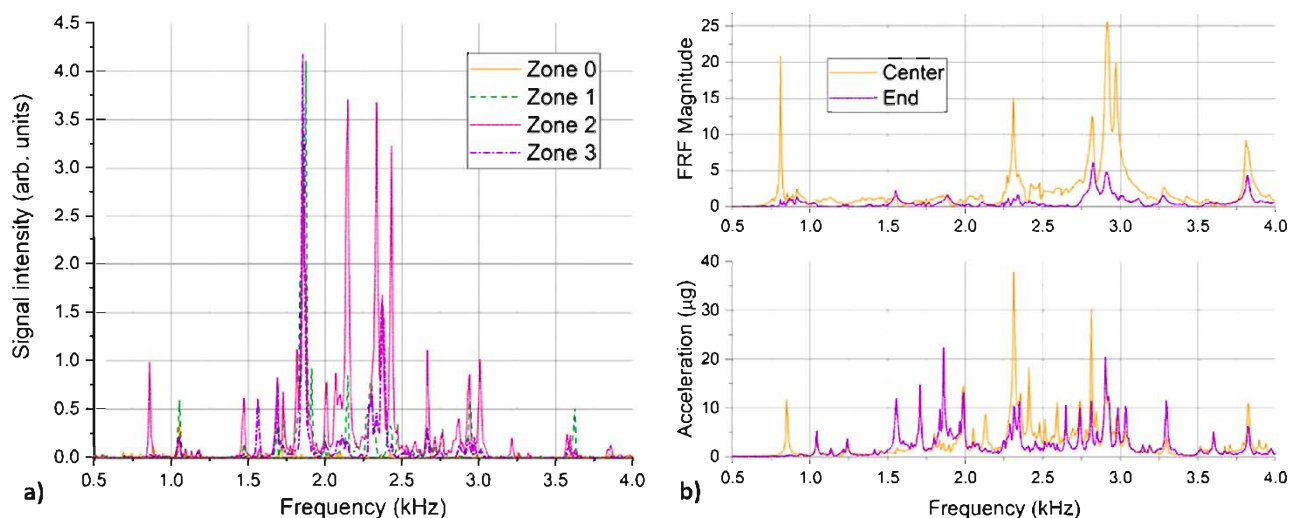


图 7

(a) 1mm 泄漏在 25 bar 时不同管区的总体 DAS 信号频谱；

(b) 管道区域 2 中记录的加速度计信号在 25bars 下 1mm 泄漏（底部）和通过冲击锤测试确定的管道频率响应函数（FRF）（顶部）的比较。

与图 5 类似，图 8 描绘了在 10 bar 相同压力水平下测量不同尺寸泄漏系列时沿光纤的时间平均 DAS 信号频谱。该图显示，对于较大直径的模拟泄漏，在管道区域 1-3 中也可检测到光谱不同的泄漏诱发信号，并且仍可用作检测和定位管道泄漏的指针。然而由于我们之前讨论的管道设置的局限性，来自缓冲器-管道互连并沿整个管道传播的强寄生信号出现在测量较大泄漏尺寸的过程中。对于所提供的测量系列，这种跨越所有受监控管道区域的寄生信号从 4 毫米泄漏尺寸开始就很明显，在那里它以 700 Hz 左右的尖锐频谱特征的形式可见。随着泄漏尺寸的增加，寄生信号的幅度增加，其频率也增加。通常在模拟泄漏的管道区域 2 中观察到具有最高复杂性的光谱。泄漏引起的信号的复杂性和强度似乎随着泄漏尺寸的增加而增加。

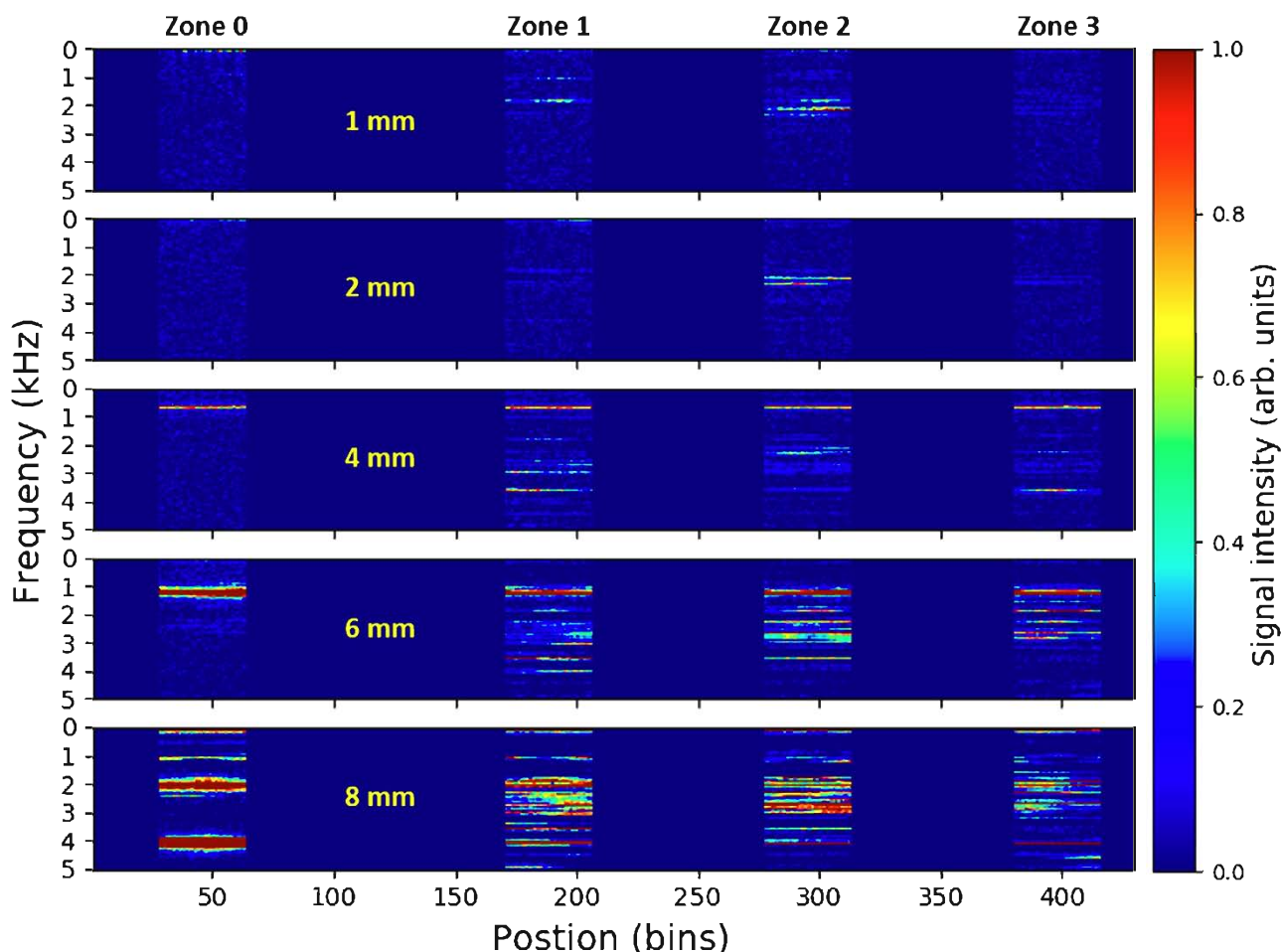


图 8. 沿光纤记录的不同大小的模拟泄漏在 10 bar 下的时间平均 DAS 信号谱。来自受监控管区之间的光纤死区的信号被丢弃，即设置为零。

图 8 中给出的测量系列的管道区域 2 的总体 DAS 信号频谱如图 9a 所示。对于 8 mm 泄漏，寄生信号变得足够强以致导致其谐波频率的出现，这不允许可靠的信号评估。因此，此测量的数据不会显示在此处，也不会为进一步评估中省略。作为参考，图 9b 显示了为相同测量系列记录的加速度计信号频谱。为了图表可读性，仅显示最小 (1 mm) 和最大 (6 mm) 泄漏尺寸的测量值。与恒定泄漏尺寸下的压力增加相比，这似乎仅增加了检测到的光谱信号的幅度，恒定压力下泄漏尺寸的增加似乎对检测到的信号的一般频谱形状具有更深远的影响。这与其说是在单个尖锐光谱特征的位置变化方面，不如说是在不同光谱带中光谱成分的激发效率方面。在恒定压力水平下增加泄漏尺寸似乎会导致在更高频率下激发管道振动。比较两个极值情况 (即 1 毫米和 6 毫米泄漏) 的 DAS 光谱，这一点最为明显。对于 1 mm 泄漏，记录的频谱以低于 2.5 kHz 的光谱特征为主，而高于 2.5 kHz 的特征对于 6 mm 泄漏显然占主导地位。加速度计数据也证实了这一趋势。同样，在 DAS 和加速度计数据之间可以找到良好的总体一致性，在两个呈现的图中都可以看到大部分主峰。在 6 mm 泄漏的加速度计数据中，1.23 kHz 和 1.32 kHz 附近寄生频率峰值的出现也很明显。

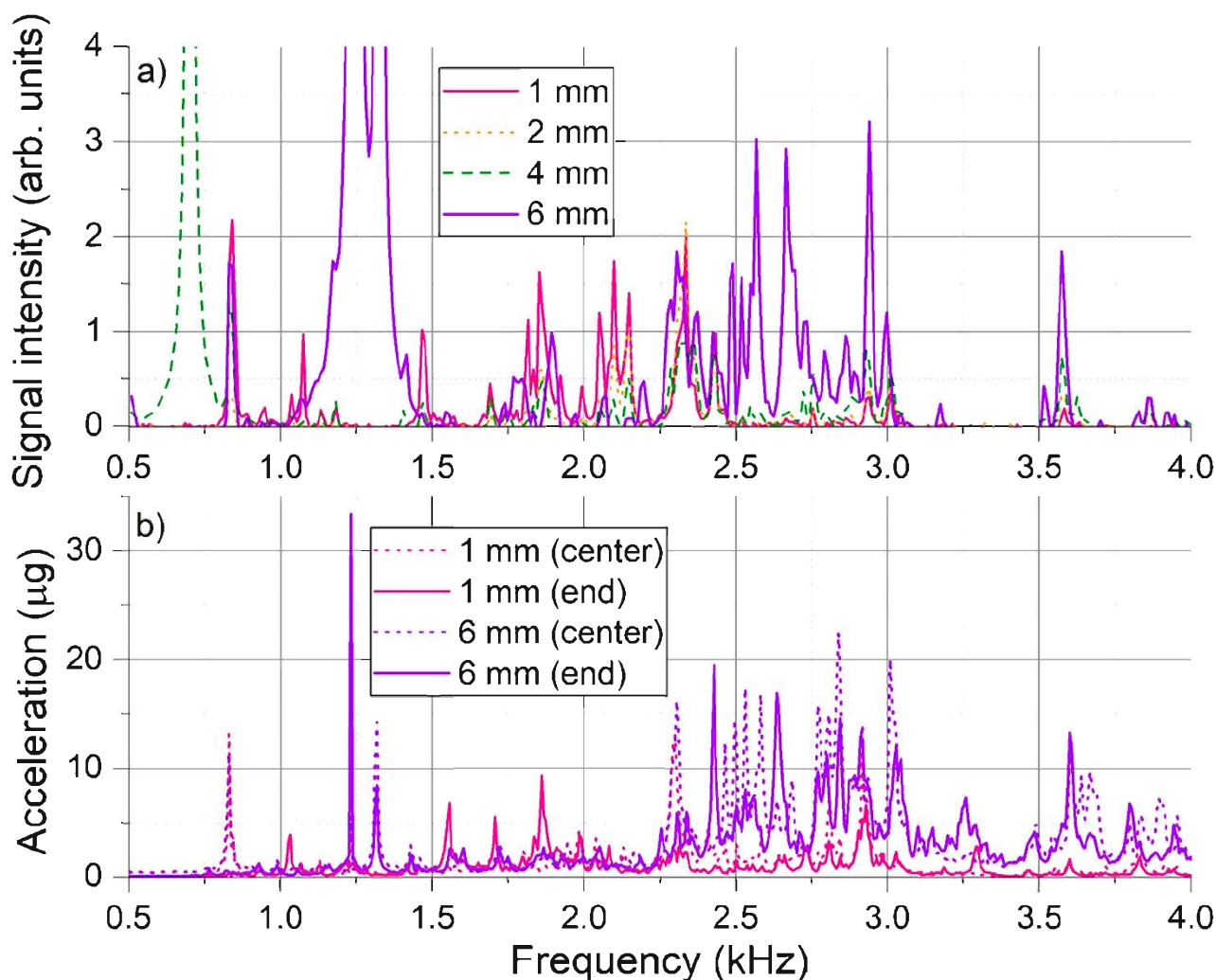


图 9. 管道区域 2 中记录的信号频谱，用于在 10 bar 的相同压力水平下具有不同尺寸泄漏的测量系列；

(a) 管区 2 的总体（时间和位置平均）DAS 信号频谱；

(b) 来自位于管道区域 2 中间靠近泄漏（中心）和管道区域靠近法兰（端部）的参考加速度计的时间平均信号频谱。

所呈现的结果表明，DAS 系统能够测量由管道泄漏引起的局部管道振动。DAS 系统使用直接应用于管道的传感光纤可检测到的这些信号可用作检测和定位管道泄漏的指示。对测得的 DAS 数据进行后处理和解释，以向运营商提供可靠且易于理解的管道状态报告，这是基于 DAS 的管道监测系统的关键部分。这些任务通常依赖于各种模式识别和机器学习方法，这些方法在过去几年中一直是深入研究的主题。本文重点研究 DAS 检测微弱泄漏引起的管道振动的物理能力。对最合适的检测和定位策略的详细考虑超出了本文的范围。然而，我们提出了基于频域中时间平均 DAS 信号的简单频谱积分的基本泄漏定位方法。

检测到的信号主要代表由泄漏介质产生的宽带白噪声信号激发的各种管道振动模式。检测到的信号由一系列光谱不同的成分组成，这些成分广泛位于 500 Hz 和 5 kHz 之间的光谱范围内。我们表明根据泄漏参数，各个光谱特征的位置和幅度可能会略有变化。此外这些特征代表管道的特征频率，其也可能根据管道的特定安装和几何形状而改变。与单一频率特征（振动模式）的频谱过滤和跟踪不同，考虑整个频谱带中的积分强度可能是一种更适合稳健泄漏检测和定位的方法。图 10 描绘了在不同压力下具有 1 mm 泄漏的测量系列 (a) 和在 10 bar 恒定压力下具有各种泄漏尺寸的测量系列 (b) 沿光纤的信号积分光谱强度。顶行图分别通过图 5 和图 8 所示光纤沿线的单个时间平均 DAS 信号频谱演变的频谱积分制备。光谱积分是在 500-5000 Hz 光谱范围内进行的，分别针对光纤上的每个 bin。底部图形显示区域平均积分光谱强度，其中顶部行图形中显示的曲线在对应于各个管道区域的所有箱上进一步平均。

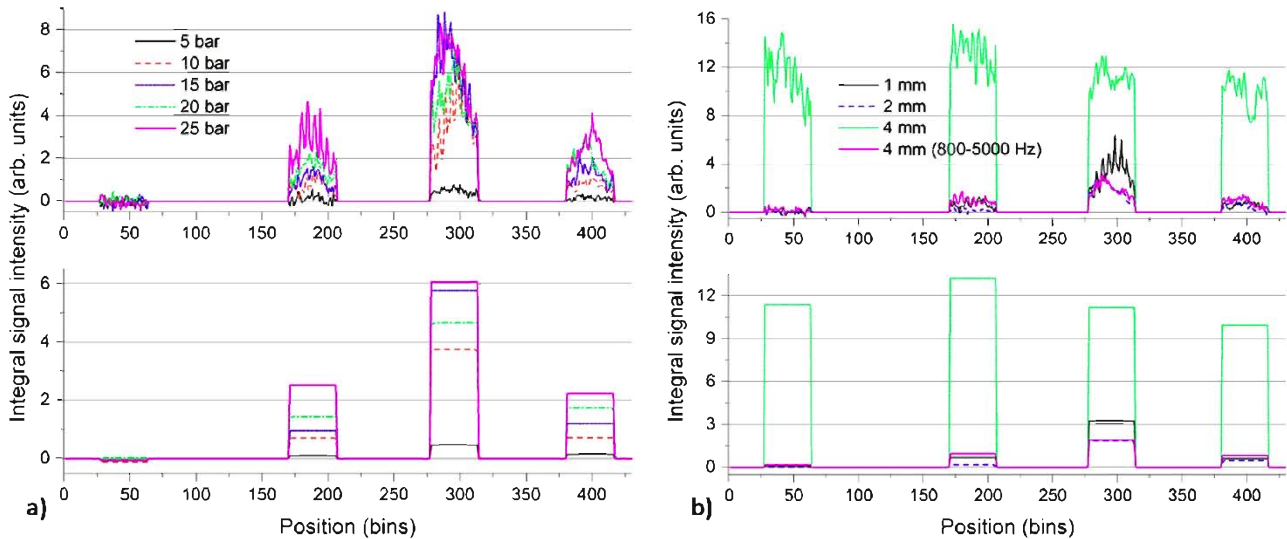


图 10. 沿光纤检测到的 DAS 信号的积分光谱强度，用于不同压力水平下 1 mm 泄漏的测量系列

(a) 和 10 bar 恒定压力水平和不同泄漏尺寸下的测量系列

(b) 来自单个测量的 DAS 信号的时间平均光谱在 500-5000 Hz 范围内积分。图 (b) 中包含使用 800-5000 Hz 范围内的光谱积分在 10 bar 下 4 毫米泄漏的附加曲线。顶行图显示了四个管区中各个区间的光谱积分信号。底行图显示了相应的区域平均信号积分频谱强度。

图 10 说明了所提出的方法在模拟管道区域 2 内指示泄漏的存在和定位的能力。对于 1 mm 泄漏的测量系列(图 10a)，显示的曲线表明区域 1-3 中存在泄漏引起的信号，而参考区域 0 中几乎不存在信号。区域中积分信号的优势 2 对于所有压力水平都是显而易见的，并提供良好的泄漏定位性能。积分光谱强度数据(底行图)的位置平均可能有助于提高该方法的定位能力，也适用于小泄漏率(5 条时 1 毫米)的情况，但代价是空间分辨率降低。如前所述，由于来自缓冲器-管道互连的寄生信号的出现，在 10 bar 恒定压力下，随着泄漏尺寸的增加(图 10b)，测量系列的情况更加复杂。图 10b 显示，使用针对较小泄漏尺寸(1 毫米和 2 毫米)的建议方法，可以在区域 2 内定位泄漏。然而，对于 4 mm 泄漏，由于存在 700 Hz 左右的强寄生信号，该信号落在感兴趣的频谱带(500-5000 Hz)内，因此评估会受到影响。该问题可以通过寄生信号的频谱鉴别来部分缓解。图 10b 还包含 10 条 4 毫米泄漏的曲线，其中仅在 800-5000 Hz 频谱带中执行频谱积分，从而避免了寄生信号的影响。通过这种调整后的策略，管道区域 2 内 4 毫米泄漏的定位也是可能的。寄生信号的后处理和超出这项工作的范围。这些测量人工制品代表了我们的实验设置的局限性，而不是所提出的测量方法的局限性，预计不会发生在现实的管道系统中。

实际上泄漏检测系统必须在存在各种背景振动的情况下运行，这些振动可能会掩盖泄漏引起的信号。最明显的背景信号来源是由介质本身的流动引起的管道振动。我们当前的管道系统不允许在同时通过管道的介质流下进行泄漏检测实验。然而，我们对管道中的流动引起的振动进行了单独的初步评估。为进行通流量测量，将测试管道的两端打开，并通过大直径橡胶软管将大型工业鼓风机连接到管道内端(0 区侧)。通过改变鼓风机转速设置来模拟在不同流速下通过无泄漏管道的气流。图 11 比较了测试管道系统在 10 bar 下 1 mm 泄漏和气流速度为 70 m/s 时流动引起的振动的情况下记录的信号。完全相同的时间平均方法和评估算法用于呈现的泄漏和通流测量。与微弱的泄漏引起的振动相比，通过管道的气流可能会引起明显更强的振动。然而，这些主要占据频谱的低频端。即使对于 70 m/s 的不切实际的高流速(天然气管道最大流速通常为 20 m/s 的水平)，测量的振动也主要包含在低于 500 Hz 的频谱范围内。由于在我们的实验中观察到的绝大多数泄漏引起的信号都位于 1 kHz 以上，因此所提出的泄漏检测方法可以提供与这些由介质流引起的常见背景信号的良好固有隔离。此外，流动诱导信号的幅度随着流速的减小而迅速减小(此处未提供数据)。这进一步降低了实际流速下问题的严重性。然而，与此同时，我们必须承认气流测量是在没有内部管道压力的情况下进行的，这可能会对产生的与流动相关的振动的幅度产生影响。

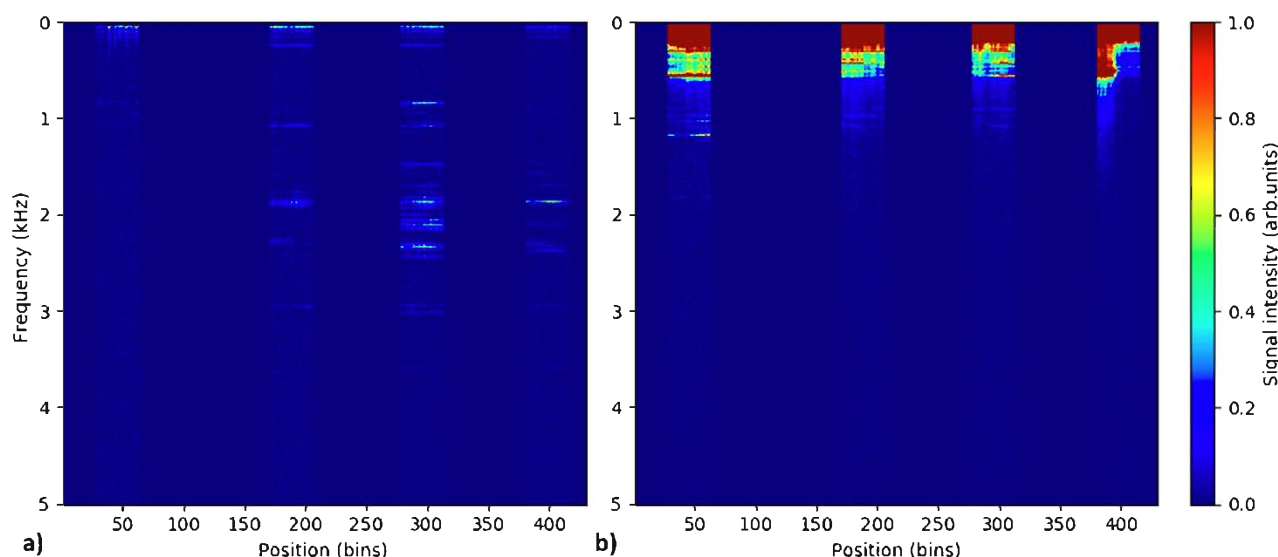


图 11. 沿光纤记录的时间平均 DAS 信号光谱，记录为 10 bar

(a)下的 1 mm 泄漏，以及在大气压力和 70 m/s 流速下通过无泄漏管道的气流

(b)来自受监管区之间的光纤死区的信号被丢弃，即设置为零。

4. 讨论

大多数 DAS 管道监控系统通常只关注低频信号（数百赫兹），以延长系统监控距离。DAS 测量的最大频谱限制（脉冲重复率）与可实现的最大监测长度成反比。在我们的案例中，几乎所有代表管道自然振动的测量信号的频率都在 0.5 kHz 到 5 kHz 之间。这意味着执行测量需要 10 kHz 的 DAS 脉冲重复率。以 10 kHz 脉冲重复率进行监测对应于大约 10 公里的 DAS 测量范围，这限制了这种方法对中短管道的监测。另一方面，仅关注 0.5–5 kHz 范围内的信号可以潜在地与通常占据低频范围的背景振动信号提供良好的隔离（图 11）。这些信号可能是由流经管道的介质或与管道运行或周围环境（例如交通）相关的其他外部源产生的信号。同时，所提出的方法基于连续泄漏生成信号的时间平均。这反过来又为短期（瞬态）噪声信号提供了一定程度的固有过滤。

在这项工作中，我们使用了 2.5 cm 的相当小的节距的光纤螺旋缠绕，以最大限度地提高光纤与管道的覆盖率 R ，从而提高系统对潜在微弱和高度局部化泄漏信号的灵敏度。与参考加速度计数据（例如，图 6）的比较表明，在执行的实验中可以检测到加速度值低至单 g 的管道振动。然而与此同时，这种光纤应用方法增加了仪器的复杂性并降低了系统最终监控范围，即可以用给定长度的光纤覆盖/监控的管道长度。呈现的结果（例如，图 10）表明，泄漏引起的信号部分地从管道区域 2 传播到相邻的区域 1 和 3。这是泄漏引起的振动沿管道传播的结果。然而这种传播会受到相对较高的阻尼/衰减，并且只能在有限的范围内检测到泄漏引起的信号。泄漏引起的信号沿管道的传播会将泄漏定位的空间分辨率限制在几米以内。然而，这仍然是非常有吸引力和可接受的空间分辨率，这对于其他 DAS 管道监测系统也是常见的。另一方面振动传播部分放宽了对光纤应用的要求。生成的信号不仅可以在泄漏附近检测到，而且可以在泄漏周围几米范围内检测到这一事实表明，也可以使用具有更大螺距（较低 R ）的螺旋应用，甚至可以使用简单的线性应用。这将有助于简化和加快光纤应用程序以及扩展系统监控范围。必须注意应用方法的变化可能会影响不同类型管道振动模式的检测效率，因为其中一些可能无法有效地引起光纤应变。

管道泄漏的来源和特征可能因多种因素而异，包括输送介质、管道类型和操作条件。因此，最佳泄漏检测方法的讨论代表了一个复杂的问题。管道泄漏检测系统通常需要针对个别应用案例进行定制和验证。提出的工作目标是进行 DAS 能力的基础研究，以检测天然气管道中的针孔泄漏。在这种情况下，执行的实验仅代表初始的、高度理想化的情况。进一步考虑所提出的方法的一些关键问题包括：

- * 各种管道类型和安装方式的管道自振谱变化有多大？
- * 附加减振对地下或水下管道的影响有多重要？
- * 特定的光纤应用方法如何影响不同管道振动模式的系统灵敏度（传递函数）？
- * 泄漏的特定几何形状如何影响生成的振动信号？

* 该方法是否也可以应用于液相和混合相管道？

尽管如此，我们表明，在管道上使用直接螺旋纤维应用，DAS 系统能够检测微弱的泄漏引起的管道振动。假设通过我们的 DN100 管道的实际流速为 10 m/s，成功检测到的最小泄漏（5 bar 时为 1 mm）对应的泄漏率约为体积流量的 0.14%。这是大多数常见泄漏检测系统通常无法达到的极小值。

5. 结论

所介绍的工作研究了使用光纤分布式声学传感在天然气管道中进行针孔泄漏检测的可行性，依赖于直接纤维缠绕管道的纤维应用方法用于检测微弱的泄漏引起的管道振动，参考加速度计测量用于分析记录的振动信号的性质。结果表明使用直接螺旋光纤应用的 DAS 测量能够检测由宽带泄漏噪声激发引起的管道固有振动模式。在进行的实验活动中，检测到加速度值低至单 g 的管道振动模式。研究了管道内压和泄漏尺寸对泄漏振动的影响，在恒定泄漏尺寸下增加管道压力会导致感应信号幅度增加，而其一般频谱内容保持相对稳定。另一方面通过越来越大的孔泄漏会导致更高频率的振动模式的激发。提出了一种基于频域（0.5–5 kHz）中时间平均 DAS 信号的频谱积分的简单泄漏检测方法。讨论了所提出的监测方法在其实际适用性方面的潜在优势和局限性，该方法被证明能够检测和定位泄漏率远低于管道流量 1% 的天然气管道泄漏，并且可能对中短长度的天然气管道系统感兴趣。