从智能燃气表到智能化 天然气配气网络中的公用仪表

Ghaith Matalkah 电气与计算机工程学院 佐治亚理工学院 美国佐治亚州亚特兰大 ghaith@gatech.edu

Edward J. Coyle 电气与计算机工程学院 佐治亚理工学院 美国佐治亚州亚特兰大 ejc@gatech.edu

摘要—我们提出了一种利用智能传感器节点监测燃气配气网络（GDNs）的新方法，这些节点可以与现有的智能燃气表（智能仪表）集成。该方法旨在实时检测和定位燃气配气网络中的燃气泄漏。智能仪表利用现有智能仪表中的无线连接，通过协作实现该方法。该方法包括主动声学探测阶段和被动线性成像阶段。在主动声学阶段，智能仪表协作使用一种新型声脉冲反射测量技术，发现受监测管道网络的拓扑结构。在被动线性成像阶段，智能仪表利用其掌握的管道网络拓扑结构，通过时间曝光声学（TEA）算法创建管道的线性图像。所得图像揭示了网络中活动燃气泄漏的存在及其位置。我们介绍了该方法的理论基础，并展示了在实验室采集的实验数据上实施该方法的结果。

关键词— 智能仪表、泄漏检测、分布式检测、天然气、配气管道、分布式自适应滤波

I. 引言

电力、天然气和水务行业采用智能公用事业仪表，是物联网应用革新整个行业的突出例证。智能公用事业仪表部署在公用事业消耗点，用于收集和汇总实时消耗数据，并将其传输回公用事业服务器，以便进行分析并获取洞见。数据通信部分通过由智能仪表和其他通信设备组成的数据网络完成，整个系统称为高级计量基础设施（AMI）。在天然气公用事业行业，智能燃气表收集的数据促成了诸多新应用，包括自动抄表、远程检测篡改和燃气盗窃、仪表健康状态报告，以及向公用事业公司和客户实时报告消耗情况 [1]。这些应用改进了燃气公用事业基础设施，并消除了手动完成相同任务所产生的成本和低效率。然而，尽管智能仪表和高级计量基础设施带来的实时数据分析具有诸多益处，天然气公用事业基础设施在利用物联网技术解决一些长期存在的问题方面，仍未充分发挥其全部效益。其中一个问题是燃气输配管道发生泄漏。因泄漏导致人员死亡和经济损失的事故仍在世界各地持续被报告。例如，在美国，天然气泄漏事故每年平均造成17人死亡、68人受伤以及1.33亿美元的财产损失[2]。此外，天然气主要由甲烷（CH4）构成。甲烷是一种温室气体，其全球变暖潜能是二氧化碳的28至36倍 [3] ，未经修复的泄漏将其不必要地释放到大气中，可能加剧当前的全球变暖问题。

天然气管道中的泄漏是由管道结构缺陷造成的。这些缺陷主要归因于管道腐蚀、安装故障以及管道附近的挖掘活动。尽管文献中已经提出了许多管道监测和泄漏检测解决方案[4], ，但其中大部分工作都集中于监测输气管道。输气管道是天然气输送系统中的上游管道层级，负责将天然气从上游生产场地输送至下游储存场地。另一方面，配气管道是最低层级的管道，负责将天然气从储存场地输送至住宅和商业目的地，却很少成为这些研究工作的对象。由于缺乏高效的配气管道监测技术，泄漏可能在很长时间内未被发现，从而增加其潜在危害。随着现有燃气配气管网逐渐老化，其发生泄漏和出现缺陷的可能性也随之增加；美国和欧洲一些老城市使用了数十年的燃气配气网络便是明证。例如，图1展示了一项在[5]开展的研究中测得的马萨诸塞州波士顿街道上的泄漏甲烷气体含量。

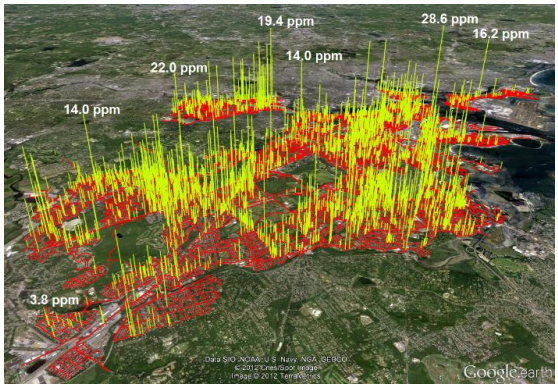

图 1—马萨诸塞州波士顿街道上的甲烷泄漏水平。（经 Nathan Philips 许可 **[5]**）

另一项研究在[6] 华盛顿特区街道上测得了相近水平的泄漏天然气。

本文提出了一种用于监测燃气分配管网（GDN）的新型基于物联网的方法。该方法通过智能仪表实现，这些智能仪表是与现有智能燃气表集成的智能无线传感器节点。具体而言，我们提出了一种实时全自动监测方法，智能仪表利用现有公用事业高级计量基础设施中的无线连接，相互协作，实施分布式声学信号处理和机器学习技术，以检测并定位燃气配气网络中的泄漏。智能仪表采用一种新颖的分布式主动声学探测技术，协作“学习”管网结构，并生成管道的线性声学图像，以揭示泄漏是否存在及其位置。此外，本文提出的泄漏检测技术在设计时充分考虑了燃气配气网络的实际限制；这些限制使现有泄漏检测方法无法应用于燃气配气网络。据我们所知，文献中尚未提出或讨论过类似的泄漏检测方法。下一节将讨论现有的基于声学的燃气泄漏检测方法，并在第三节详细介绍我们的方法及实验结果。

II. 天然气管道网络中的声学泄漏检测

文献中提出了多种燃气泄漏检测方法，采用了不同的传感技术，例如光学与热成像、化学与生物传感、流量测量以及声学传感 [4]。研究表明，基于声学的方法能够以较高的精度检测并定位远距离泄漏 [7][8]。在泄漏检测速度以及改造后应用于现有管道基础设施的能力方面，这些方法也优于基于其他传感技术的方法 [4][9]。因此，这类方法适用于燃气配气网络，因为此类网络大多埋于地下，通常只能在公用事业计量表所在的位置接触管道。

一般而言，基于声学的燃气泄漏检测方法分为两类。第一类包括被动声学方法，其原理是利用传感器持续测量管道内部或周围的声学活动，以检测管道中活动泄漏所产生的声发射波。虽然这一类方法的原理相似，但在信号处理和分类方面的实现方式有所不同。例如，在 [7] 中，燃气泄漏信号被建模为通过谱成形滤波器的白噪声信号。滤波器系数根据沿受监测管道等间距布设的传感器所进行的声学测量来估算。随后利用这些滤波器系数推导出LPC倒谱系数，并将其用作基于KNN的泄漏分类器的输入特征。检测到泄漏后，通过将传感器信号幅度与预先确定的信号衰减模型进行比较来确定泄漏位置。在 [10], 中，则根据传感器信号与泄漏特征之间的相关性度量来检测泄漏，而这些泄漏特征是在训练阶段预先确定的；泄漏位置则使用与 [7]中类似的方法来确定。

在多种被动声学方法中，已采用传感器信号互相关来定位泄漏 [11]。在 [9] 和[12], 中，使用离散小波变换（DWT）对传感器信号进行去噪，然后再执行互相关。

在 [13], 中，提出了一种基于分层无线传感器网络（WSN）的管道网络监测方法，采用被动声学方法；每个传感器节点将记录的声信号的离散小波变换（DWT）系数作为输入特征，输入基于支持向量机（SVM）的泄漏分类器。随后，汇聚节点会汇总各节点的本地判定，最终做出泄漏检测决策。在 [14] 中，提出了另一种基于 WSN 的被动声学方法，并将其用于检测供水和污水管网中的泄漏。这些被动方法的一大缺点是，都要求将声学传感器沿管道延伸方向直接耦合到受监测管道上，这妨碍了它们在地下燃气配送网络中的应用。

第二类是主动声学方法，其原理是测量燃气管道对声激励的响应，并通过管道的声学响应检测泄漏特征。在这类方法中，声学执行器（例如扬声器、电磁阀）用于从燃气管道一端向管道内注入声激励波，再使用传感器（例如麦克风、加速度计）在同一端（输入响应）或另一端（输出响应）测量管道的响应。泄漏的存在可通过注入信号的反射信号，或管道声阻抗的变化来检测 [15]。在 [16], 中，提出了一种主动声学方法：将宽带伪随机声信号注入管道的一端，并在两端进行测量。随后估算管道的脉冲响应，泄漏会表现为尖锐脉冲，其时间偏移对应于泄漏位置。另一种不同且应用更广泛的主动声学方法，是采用声脉冲反射法（APR）。在 APR 中，向管道内注入声脉冲，并分析其反射信号，以检测管道壁上的穿孔。APR 基于这样一项原理：声波在管道中传播时，若遇到管道横截面积的突变，就会在横截面积发生变化的边界处产生部分反射和部分透射 [17]。管道的横截面积 S 与其中介质的声阻抗直接相关：$z = \rho c/S$，其中 ρ 是介质的密度，c 是介质中的声速。因此，横截面积的变化会导致介质声阻抗发生变化，进而引起声波反射 [17]。振幅为 P_0^+ 的入射波在管道内传播，并经过横截面积由 S_0 变为 S_1的区域时，会产生振幅为 P_0^- 的反射波，其大小与变化幅度 [17]成正比：

$$\frac{P_0^-}{P_0^+} = \frac{S_0 - S_1}{S_0 + S_1} \quad (1)$$

管道壁中的导致泄漏的缺陷会引起管道横截面积的突变，从而导致

声学反射信号，这些信号可通过测量来检测泄漏。据报道，APR 首次应用于泄漏检测是在[18], 当时，研究人员通过比较来自被测管道的脉冲反射信号与从类似无泄漏管道采集的参考信号来检测泄漏。在 [15]，该方法通过一种算法得到改进：利用根据 APR 测量结果估算出的输入脉冲响应（IIR）重建被测管道的管道内孔轮廓。在[19], 一系列详细实验表明，APR 能够在包括 L 形和 T形管道接头在内的简单管网中检测泄漏。在 [8],实验结果表明，APR 可用于检测大口径管道中孔洞的存在，检测距离最远可达 22 米。然而，APR 的缺点之一是，小尺寸泄漏会产生信噪比较低且难以检测的反射信号。这一点可由公式（1）推断得出。因此，研究人员提出了多种旨在提高泄漏反射信号信噪比的方法。在[20], 采用最大长度序列（MLS）作为源信号，并通过互相关估算 IIR，可提高泄漏信号的信噪比。在[21], 研究中采用了啁啾源信号，并对 IIR 中脉冲进行频域分析，以区分泄漏与管道接头等其他会引起反射的特征。最后，在[22], 研究中采用正交小波变换（OWT）对脉冲反射信号进行去噪，并使用复倒谱分析检测与泄漏对应的反射信号。复倒谱中的泄漏相关峰值表现出更高的泄漏信噪比。

基于APR的方法能够检测直管中的穿孔和泄漏。然而，在具有L形弯头、十字接头和T形接头等结构的复杂管道网络中，这些方法的表现非常糟糕。在上述所有研究中，只有[19] 研究了简单管道网络中的APR，并表明只有在特定条件下，较大的穿孔才能被可靠检测到。这是因为管道接头和连接处也会以与泄漏相同的机制产生脉冲反射，但其强度通常高出一个数量级 [19]。此外，在复杂管道中传播的声波会产生高阶反射，这些反射会与APR信号发生相消干涉，使泄漏信号几乎无法提取。因此，这类方法不适用于燃气配气网络等复杂管道网络。在下一节中，我们将介绍一种新型声学方法，该方法将改进版APR与被动声学技术相结合，以可靠地检测和定位燃气配气网络中的泄漏。

III. 系统架构与运行

如前所述，本文提出的监测方法旨在利用智能仪表节点对燃气配气网络中的泄漏进行实时检测和定位。因此，该方法在硬件、信号以及数据处理方面的设计要求必须适应燃气配气网络的实际限制条件，以及其中发生的泄漏信号的特征。

A. 燃气配气网络的实际约束 燃气配气网络旨在将燃气从一个

从源端（即储气站）输送至多个目的地（即住宅和商业用户），因此它们往往呈现树状拓扑，且管道分支密度较高。此外，GDN管道完全埋设于地下，除公用事业仪表位置外，服务点（即燃气配气网络终端）均位于地下，这限制了对管道的物理访问，见图2。因此，监测方法必须能够检测并定位复杂分支管道网络中的泄漏，而且必须严格通过网络终端（即仪表位置）完成。燃气配气网络的另一特点是，随着服务点周期性地上线和下线，其管道拓扑和气体流动模式会随时间发生变化。因此，智能仪表必须能够动态发现所监测网络的拓扑结构。

B. 声学泄漏信号的特性

燃气配气网络中的气体压力通常低于 10 psi [23]。因此，与输气管道中的泄漏相比，活动泄漏产生的声学信号较弱，而输气管道中的气体压力最高可达 1500 psi。此外，管道内稳定的气体压力会产生连续的泄漏信号，其波形取决于许多因素，包括泄漏的形状和大小、环境温度以及气体压力 [24]。因此，我们对泄漏信号特性所作的唯一假设是：它们是连续的、随机的，并且具有较低的信噪比。

C. 系统架构

该监测方法通过由智能仪表（IM）节点组成的网络实现，其中 IM节点被划分为多个簇。每个簇包括一个簇头/网关节点和若干个 IM节点。IM节点可以通过无线方式直接通信，也可以通过簇头节点间接通信。图 2 展示了由四个 IM节点组成的一个簇所监测的燃气配气网络片段。

除公用事业仪表模块外，每个IM节点还由以下组件构成：处理单元、无线通信模块、声学执行器（例如扬声器、脉冲发生器或阀门）以及声学传感器（例如麦克风、加速度计）。本文所述实验工作中使用了扬声器和麦克风，因此在下文讨论中，我们假定选用这两种声学换能器。

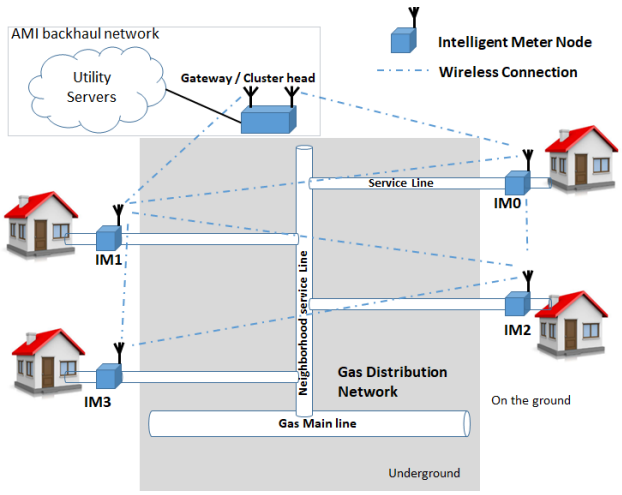

图 2 – 由智能仪表监测的燃气配气网络部分。灰色阴影区域表示埋于地下的部分管网。

D. 泄漏检测算法

IM节点所实现的泄漏检测与定位算法由两个阶段组成：主动声学探测阶段和被动声学线性成像阶段。两个阶段都要求IM节点采集的声学测量数据实现时间同步。文献中已提出多种适用于无线传感器网络的时间同步算法[25]。就本研究而言，我们不限定采用某一种特定算法。不过，出于实际考虑，建议使用低能耗同步算法。例如，我们研究组在 [26] 开发的时钟同步算法就是一种合适的选择。

1）第一阶段：主动声学探测

本阶段旨在发现受监测的GDN的拓扑结构。在本阶段，IM节点按照以下协议，以轮询方式实现扩展版APR方法：

1）簇中包含K 个节点（即 , … , ）的每个IM节点i （节点 i $i =$）都会从簇头节点接收一个时间计划，其中指定了两个时间帧：测量帧T_M 和数据收集帧T_C。这些时间帧被划分为多个时隙，每个时隙分配给一个传感节点。$T_M = \{t_m^1, t_m^2, \dots, t_m^K\}$, $T_C = \{t_c^1, t_c^2, \dots, t_c^K\}$。

1 K

2）在t_m^i中，执行以下步骤：

a. 节点i （即t_m^i中的活动节点）向簇中的每个节点j 广播START信标$j \neq i$。START信标包含一个计时器值，用于指示当前时隙的录制开始时间。b. 计时器到期时，节点i 向其管道末端注入一个声脉冲，并记录该脉冲及其反射信号。该信号记为 $r_i[n]$。与此同时，簇中的每个节点 j, $j \neq i$ 开始录制，以捕捉声脉冲经管道传输至其末端的过程。节点j 录制的信号记为$t_{ij}[n]$。c. 步骤b可以重复多次，并且

对重复测量结果取平均值 $\bar{r}_i[n]$ 和 $\bar{t}_{ij}[n]$ ，以消除噪声。d. 节点 i 广播 STOP信标，表示当前时隙的测量时间结束。

3) 对 T_M 中的每个 t_m^i 重复步骤 2，使簇中的每个节点都有机会成为活动节点。4) 此时，每个节点 i 都有一个脉冲反射信号$\bar{r}_i[n]$ 和 $K-1$ 个脉冲传输信号 $\bar{t}_{ji}[n]$ ，分别对应其他 $K-1$ 个节点。5) 数据收集帧 T_C 开始：在每个时隙 t_c^i 期间，节点 i 向簇发送其 $\bar{r}_i[n]$ 和 $\bar{t}_{ji}[n]$。

在步骤5结束时，簇头从所有节点收集K 脉冲反射信号 $\bar{r}_i[n]$ 和（K^2-K）脉冲传输信号$\bar{t}_{ji}[n]$ ，并处理这些信号以推断IM节点之间的距离，以及它们之间管道接头（例如 L 形、T 形或十字形接头）的位置，随后发现管网的拓扑结构。关键信息包含在 $\bar{r}_i[n]$ 信号中，其中包括对应其他 IM节点端子的脉冲反射（末端反射），以及对应管道接头的反射（接头反射）；后者出现在注入脉冲与第一个末端反射之间。这些脉冲反射是利用从$\bar{t}_{ji}[n]$ 信号中提取的信息识别出来的。图3所示的实验对此进行了说明：三个 IM节点（IM1-IM3）在充满空气的简单管网中执行了上述声学探测协议（未显示簇头）。图4绘出了 $\bar{r}_1[n]$ 、 $\bar{t}_{12}[n]$ 和 $\bar{t}_{13}[n]$ 在t_m^1 期间记录的测量值与声学距离（$c \times t$）的关系，其中 $c = 343\ m/s$ 为声速。使用 Symlet 6小波函数进行了 5 级离散小波变换去噪。

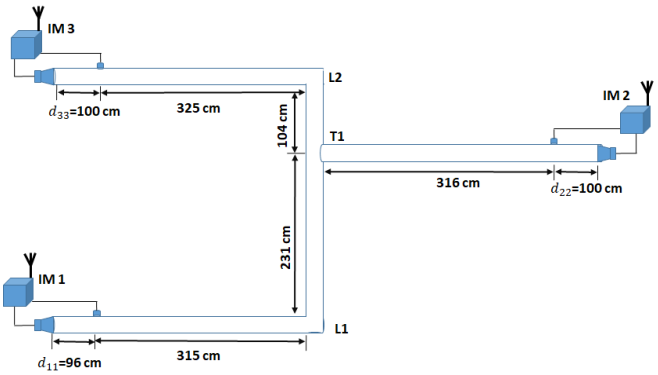

图3 - 含三个传感节点的管网中的主动声学探测实验

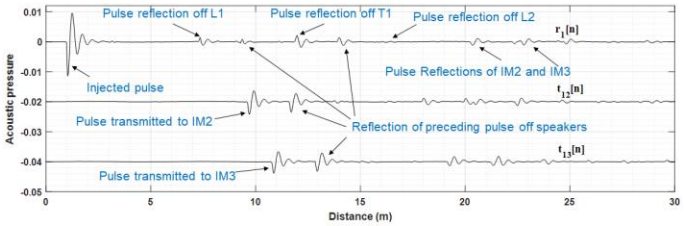

图4 - 在 t_m^1 期间测得的反射和传输脉冲信号（IM1处于活动状态时）

在图4中，末端反射和接头反射以蓝色文字标注在$\bar{r}_1[n]$上。其他脉冲是“扬声器反射”，即二次脉冲反射。当朝向IM末端传播的反射脉冲被其扬声器反射，并再次被其麦克风拾取时，这些二次脉冲反射会出现在信号中。一个脉冲与其扬声器反射之间的距离是IM节点麦克风—扬声器距离的两倍，在图3中，对于IMi，该距离表示为d_{ii} 。麦克风—扬声器距离d_{ii} 对于防止脉冲与其扬声器反射之间的干扰是必要的，其选择应满足以下条件：$2d_{ii} > c\Delta t$，其中Δt 为注入脉冲的宽度，c 为声速。由于该距离是一个已知的设计

参数，扬声器反射在$\bar{r}_i[n]$ 和$\bar{t}_{ji}[n]$ 中可以很容易地识别出来。在 $\bar{r}_1[n]$ 中识别出这些反射后，$\bar{r}_1[n]$ 中的末端反射可通过估计IM1与其他IM节点之间的声学距离（即穿过管道的距离）来确定。这些距离$\{d_{1j}: j = 2,\ 3\}$可根据以下各项之间的互相关函数进行估计：$\bar{r}_1[n]$ 和$\bar{t}_{1j}[n]$ 信号：

$$d_{1j} = \frac{c}{F_s} \times \arg\max_m \left|\hat{R}_{\bar{r}_1\bar{t}_{1j}}[m]\right| + d_{jj} \qquad (2)$$

其中

$$\hat{R}_{\bar{r}_1\bar{t}_{1j}}[m] = \sum_{n=0}^{N-m-1} \bar{t}_{1j}[n+m]\bar{r}_1[n] \qquad (3)$$

对于 m、$n = 0$、……$N-1$，d_{jj} 是节点 IMj 的麦克风—扬声器距离。

确定了$\bar{r}_1[n]$ 中的端子反射后，注入脉冲与第一个端子脉冲之间的所有脉冲都被视为接头反射。接头反射也可以根据其反向极性来识别，因为它们会导致管道横截面积发生正向变化（见公式（1））。在图4中可以观察到，端子反射脉冲与注入脉冲具有相同的极性，而接头反射脉冲则具有相反的极性。通过查找$\bar{r}_1[n]$自相关函数中负峰的时间偏移，可以估算 IM1 与这些接头之间的距离；该自相关函数可使用公式（3）中的相同公式计算，只需将$\bar{t}_{1j}[n]$ 替换为$\bar{r}_1[n]$。

对$\bar{r}_2[n]$ 和$\bar{r}_3[n]$重复上述相同步骤后，簇头节点可以确认网络中所有接头的位置并识别其类型。图5显示了在图3实验中采集的所有 $\bar{r}_i[n]$ 和 $\bar{t}_{ji}[n]$ 信号上标注的这些距离。从 $\bar{t}_{ji}[n]$ 中提取的附加信息使该方法在识别管道特征方面优于上一节所述的传统 APR方法。

假设所有管道接头均为直角接头，则可以根据从图5中提取的距离推断管道接头的类型。然而，对于复杂的管网而言，这种解决方案难以实施。识别管道接头类型的一种更好方法是将该问题转化为分类问题，其中，接头反射脉冲的幅值用于识别管道连接件的类型；该幅值与接头处横截面积的变化成正比（见公式（1））。在本研究中，我们考虑了五种与燃气输配管道中常用接头相似的管道连接件类型：1英寸至1英寸L形弯头、1英寸至1英寸T形支管、1英寸至1.5英寸T形支管、1英寸至2英寸T形支管，以及1英寸至1英寸十字形接头。我们将反射脉冲幅值与注入脉冲幅值之比用作输入特征。该比例如下定义：

$$R_E = \frac{\frac{1}{t_4-t_3}\sum_{n=t_3}^{t_4} r_i^2[n]}{\frac{1}{t_2-t_1}\sum_{n=t_1}^{t_2} r_i^2[n]} \qquad (4)$$

其中，时间索引对 $\{t_1, t_2\}$ 和 $\{t_3, t_4\}$ 分别界定了注入脉冲和反射脉冲的起点与终点。训练数据集通过一系列实验收集，在这些实验中，IM节点与管道接头之间的距离有所变化。随后，将每个类别的数据拟合为形式为 $R_E = \alpha e^{\beta d}$ 的指数曲线，其中 d 为距离，并根据新的输入数据与这些曲线之间的欧几里得距离对其进行分类。训练数据及拟合结果如图6所示。对长度达7米的管道进行的9组不同实验测量所形成的测试数据显示，即使使用不同型号的声学换能器，分类器仍能准确预测管道接头的类型。

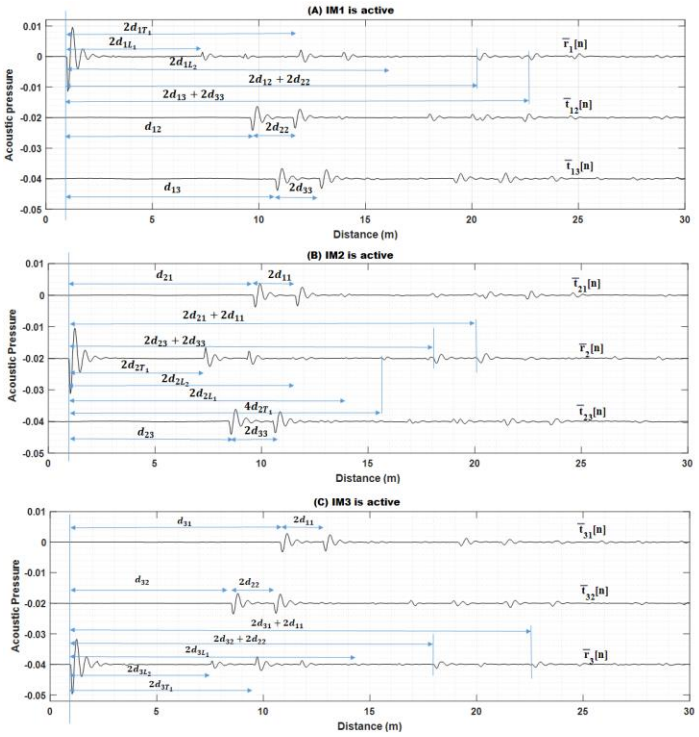

图5 – 图3实验中记录的脉冲反射和传输信号标注图：（A）IM1处于活动状态时，（B）IM2处于活动状态时，以及（C）IM3处于活动状态时。

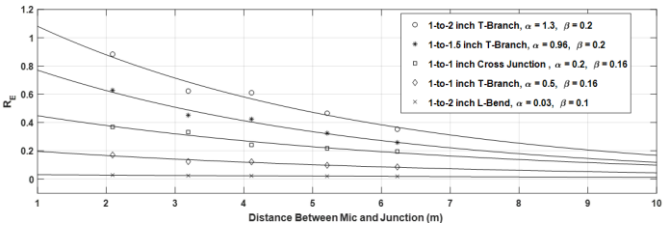

图6 - R_E的指数（αe^{β}）曲线拟合测量值随距离的变化

2）第二阶段：被动声学线性成像

主动声学探测阶段完成并发现管道网络拓扑后，IM节点开始被动成像阶段。在此阶段，传感节点会在一段时间内同步监听管道中的声学活动，并执行[27]中所述的改进版时间曝光声学（TEA）成像算法。与时间曝光摄影的原理类似，TEA算法旨在对低信噪比连续声源进行成像，其

基础是这样一种假设：此类声源的信号在空间上具有相关性，而背景噪声则不具相关性。因此，通过在时间上对相关信号进行相干叠加，源信号相对于不相关背景噪声的对比度会提高。在燃气配气网络中的泄漏检测场景下，泄漏声学信号，尤其是小型且距离较远的泄漏所产生的信号，具有低信噪比和连续性的特点。下面介绍IM节点如何应用TEA算法。

设每个 IM 节点 N_i 在笛卡尔空间 $l_i=(x_i,y_i,z_i)$ 中的位置，以及 N_i 记录的声学信号为 $p_i(l_i,t)$。为了对管道成像，首先沿管道长度将管道划分为像素，得到图像点，每个图像点在空间中的位置为 $l=(x,y,z)$。然后使用以下图像函数为每个图像点赋予一个图像强度值：

$$I(l)=\sum_{i=1}^{N}|\hat{p}_i(l_i,|l-l_i|/c)e^{K|l-l_i|/c}|^2 \tag{5}$$

其中，$\hat{p}_i(l_i,t)=p_i(l_i,t)*F(t)$，而 $\hat{p}_i(l_i,|l-l_i|/c)$ 是在空间中反向传播至点 $l=(x,y,z)$ 的信号；$F(t)$ 是应用于信号的滤波器；$e^{K|l-l_i|/c}$ 用于补偿管道中的波衰减；c 是声速，K 是波衰减系数。式 (5) 中的信号经过平方处理，因为声学测量信号的均值为零。然而，这可能会产生较大的直流偏置 [27]。为避免这种情况，采用以下无偏估计量：

$$I^{(j)}(l)=\left|\sum_{i=1}^{N}\hat{p}_i^{(j)}(l)\right|^2-\sum_{i=1}^{N}\left|\hat{p}_i^{(j)}(l)\right|^2 \tag{6}$$

Where $\hat{p}_i^{(j)}(l)=\hat{p}_i(l_i,|l-l_i|/c)e^{K|l-l_i|/c}$ is the backpropagated signal used at the j-th realization of $I(l)$.

$$\bar{I}(l)=\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}I^{(j)}(l) \tag{7}$$

为了将 TEA算法应用于真实数据，我们进行了图7所示的实验。在距离 IM节点1 260 cm 处使用扬声器播放预录制泄漏信号。该泄漏信号是在一根充有 4 psi 加压空气的管道中，于麦克风旁边打孔产生的。

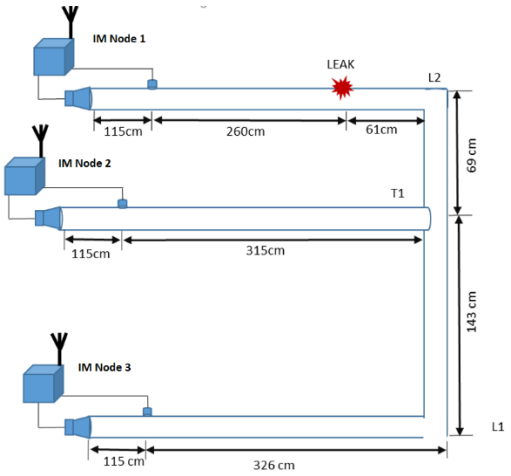

图7 – 使用三个IM节点应用TEA算法进行泄漏检测与定位的实验。

将 TEA算法应用于三个 IM节点采集的信号后得到的线性图像如图8所示。该图像使用公式（7）通过 100 次实现生成，每次实现均将公式（6）应用于长度为 = 0.4 秒的信号片段。线性图像在泄漏位置显示出明显的峰值。与其他支路相比，IM节点1 所在支路（支路 1）上的图像值也整体较高。这是因为 IM节点2 和 IM节点3 记录的泄漏信号在整个支路 1 上完全相关。换言之，对于 IM节点 2 和 IM节点3，泄漏信号看起来像是来自接头 T1；而 IM节点1 记录的信号对于确定泄漏的确切位置至关重要。

请注意，尽管通过对一段时间内的信号进行平均来消除不相干的背景噪声，图8中的线性图像仍包含多个次峰值。这些次峰值是由$p_i(l_i,t)$信号中的管内反射引起的。可以在方程（5）中使用回声消除滤波器来抑制$F(t)$。一种方法是使用形式为[28]的理想回声消除滤波器：

$$H(z)=\frac{1}{1-\alpha z^{-\tau}}$$

该滤波器假设 $p_i(l_i,t)$具有$p(t)=s(t)+\alpha s(t-\tau)$的形式，其中 $s(t)$是泄漏信号，$\alpha s(t-\tau)$是其扬声器反射版本。可以在主动探测阶段根据$\bar{t}_{ji}[n]$ 估计参数α 和τ，因为τ 与IM节点的麦克风—扬声器距离直接相关（见图5中的d_{ii}）。然而，该滤波器只能消除扬声器反射。抑制反射的一种更有效方法是使用图9所示的自适应滤波器。利用这种方法，IM节点可以通过无线连接相互训练各自的自适应滤波器。在图9中，IM节点j将一系列正交声学信号（例如正弦信号）$x[n]$ 注入管道，IM节点i则将其记录为 $x[n]*\mathrm{h}[n]$。与此同时，IM节点J通过无线方式向IM节点I发送$x[n]$，后者使用$x[n]$ 训练回声消除滤波器$\hat{\mathrm{h}}[n]$。还可以使用来自簇中其他IM节点的训练信号进一步训练该滤波器。

对经过回声消除滤波器滤波的信号应用TEA算法后得到的管道线性图像与图8中的线性图像一同显示于图10中。被抑制的次峰值用箭头标出。

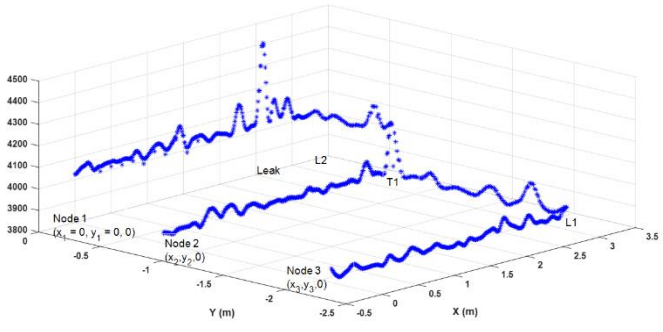

图8 – 使用TEA成像算法生成的管道线性图像（$c=343\ m/s$ $F\ t$ =、$K=0$ 和 ( ) ( )）$\delta\ t$

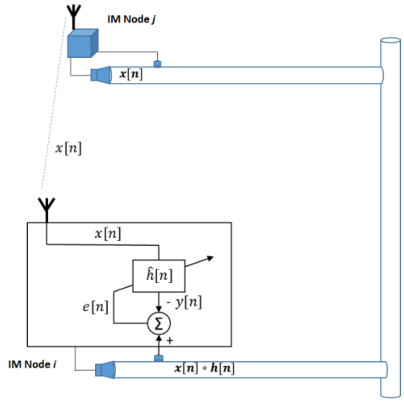

图9 – 用于回声消除的跨IM节点自适应滤波器训练。

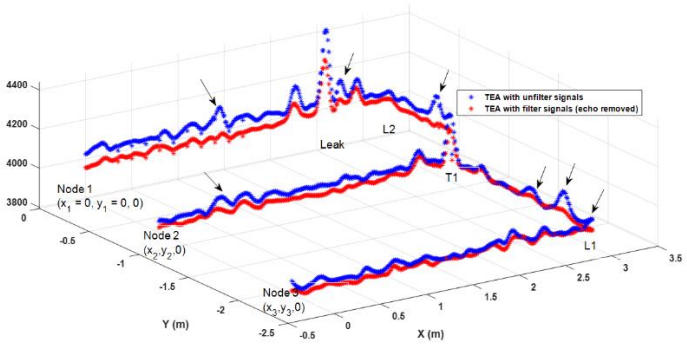

图10 - 使用原始声学信号（蓝色）与经回声消除滤波器滤波的信号（红色）获得的TEA线性图像比较。最后，我们指出，该方法可以集成无线
关闭泄漏影响区段中用于停止气流的阀门。该方法还可以扩展用于监测供水网络。

参考文献

[1] Sun、Qie 等人。《智能能源网络中的智能电能表综述》。IEEE《物联网学报》3.4（2015）：464-479。[2] PHMSA数据与统计，美国交通部（PHMSA）：华盛顿特区，2012；http://www.phmsa.dot.gov/pipeline/library/data-stats （访问于2019年10月30日）。[3] 美国环境保护署，了解全球变暖。检索自：https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials （访问于2019年9月3日）。[4] Murvay, P. S., & Silea, I.（2012）。燃气泄漏检测与定位技术综述。《过程工业损失预防杂志》，25(6)，966-973。[5] Phillips, N. G., Ackley, R., Crosson, E. R., Down, A., Hutyra, L. R., Brondfield, M., ... & Jackson, R. B.（2013）。绘制城市管道泄漏地图：波士顿的甲烷泄漏。《环境污染》，173，1-4。[6] Jackson, R. B., 等。Down, A., Phillips, N. G., Ackley, R. C., Cook, C. W., Plata, D. L., & Zhao, K.（2014）。华盛顿特区的天然气管道泄漏。《环境科学与技术》，48(3)，2051-2058。

[7] Brodetsky, I., & Savic, M.（1993年4月）。燃气管道泄漏监测系统。载于《1993年IEEE国际声学、语音与信号处理会议》（第3卷，第17-20页）。[8] Papadopoulou, K. A., Shamout, M. N., Lennox, B., Mackay, D., Taylor, A. R., Turner, J. T., & Wang, X.（2008）。声反射测量法在泄漏与堵塞检测中的评估。《IME会议录，C辑：机械工程科学杂志》，222(6)，959-966。[9] Davoodi, S., & Mostafapour, A.（2014）。使用小波变换和互相关法定位钢管中的燃气泄漏。《国际先进制造技术杂志》，70(5-8)，1125-1135。pective," EEI-AEIC-UTC白皮书，华盛顿特区，美国，2011。[10] Rajtar, J. M., & Muthiah, R.（1997）。油气输送管线泄漏检测系统。《制造科学与工程杂志》（ASME汇刊），119(1)，105-109。[11] Fuchs, H. V., & Riehle, R.（1991）。声信号分析泄漏检测的十年经验。《应用声学》，33(1)，1-19。[12] Shehadeh, M., Steel, J. A., & Reuben, R. L.（2006）。钢管及管道应用中的声发射源定位：到达时间估计的作用。《机械工程师学会会议录，E辑：过程机械工程杂志》，220(2)，121-133。[13] Wan, J., Yu, Y., Wu, Y., Feng, R., & Yu, N.（2012）。天然气管道监测传感器网络中的分层泄漏检测与定位方法。《传感器》，12(1)，189-214。[14] Stoianov, I., Nachman, L., Madden, S., & Tokmouline, T.（2007年4月）。PIPENET：用于管道监测的无线传感器网络。载于《第6届ACM信息处理传感器网络国际会议论文集》（第264-273页）。[15] Sharp, D. B., & Campbell, D. M.（1997）。使用声脉冲反射测量法检测管道泄漏。《声学学报》，83(3)，560-566。[16] Watanabe, K., & Himmelblau, D. M.（1986）。利用一种新型声学方法检测并定位输气管道泄漏。《AIChE学报》，32(10)，1690-1701。[17] Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sanders, J. V.（2000）。《声学基础》，John Wiley & Sons, Inc，纽约。[18] Morgan, E. S., & Crosse, P. A. E.（1978）。声学测距仪：一种用于管道检测的新型仪器。《NDT国际》，11(4)，179-183。[19] Shamout, M. N.（2002）。管网泄漏检测（博士论文，曼彻斯特大学）。[20] Liou, C. P.（1998年12月1日）。“基于脉冲响应提取的管道泄漏检测。”ASME。《流体工程杂志》，1998年12月；120(4)：833–838。[21] Yunus, U., Tsunasaki, M., He, Y., & Kominami, M.（2006）。利用声波检测管道不连续性。《IEEJ电子、信息与系统汇刊》，126，1344-1350。[22] Beck, S. B., Curren, M. D., Sims, N. D., & Stanway, R.（2005）。管道网络特征及通过反射波互相关分析检测泄漏。《水利工程杂志》，131(8)，715-723。[23] Naturalgas.org，《天然气运输》。检索自：http://naturalgas.org/naturalgas/transport/（访问于9月 1st日，2019年）。[24] Hunaidi, O., & Chu, W. T.（1999）。塑料供水管道中泄漏信号的声学特征。《应用声学》，58(3)，235-254。[25] Sivrikaya, F., & Yener, B.（2004）。传感器网络中的时间同步：综述。《IEEE网络》，18(4)，45-50。[26] Phanish, D. 等（2015年12月）。用于监测足球场结构健康的无线传感器网络。载于《2015年IEEE第二届物联网世界论坛（WF-IoT）》（第471-477页）。[27] Norton, S. J., & Won, I. J.（2000）。时间曝光声学。《IEEE地球科学与遥感汇刊》，38(3)，1337-1343。[28] Hayes, M. H.（1996）。《统计数字信号处理与建模》。John Wiley & Sons。