

道路系統多音源空間聲音量測分離辨識

就道路系統而言，「多音源空間聲音量測」、「聲源分離（Source Separation）」與「聲源辨識（classification / identification）」其實是三個層次不同、但必須串接思考的技術問題。

- 一、第一層是量到多少聲音，也就是法定量測最重視的聲壓級、均能音量、統計音量與頻譜結果；
- 二、第二層是把混在一起的聲音拆開，釐清不同車種、不同車道、不同高度或不同設施的貢獻；
- 三、第三層才是進一步說明那個被拆出的聲音「是什麼」，例如是機車、重車、輪胎與路面接觸噪音、引擎噪音、橋面振動再輻射噪音，或道路與軌道複合場景中的不同運具來源。[1][2][5][6][7]

現行國際與我國法制的核心，仍然建立在符合標準之噪音計與規範化量測程序之上；但陣列麥克風、聲學相機、聲源分離與深度學習辨識，已經非常適合做「診斷、歸因、治理優先排序與科技執法輔助」，只是原則上不能逕自取代法定聲級值本身。[1][2][3][4][14][15] 表中的「是否可用於法定量測」分成四種判讀：一是「可直接作為法定主體量測」；二是「可作為法定量測之輔助模組」；三是「可作為行政佐證或科技執法輔助」；四是「目前原則上不宜直接作為法定主體量測」。這樣分類的原因在於，法定量測要的不只是技術上可行，而是儀器性能、檢定／校正、測點幾何、動特性、測時規則、背景音處理、重現性與不確定度表達都必須能納入既有規範體系。[1][2][3][4][14]

從法定量測的角度看，最重要的原則不是「哪一種技術最先進」，而是「哪一種技術的輸出量，可以穩定對接現行法規中的受管制量」。ISO 1996-2 的目的，是決定作為環境噪音評估基礎的聲壓級；IEC 61672-1、61672-2、61672-3 則分別界定噪音計的性能、型式評估與定期檢測程序；我國《環境音量標準》亦明確要求道路環境音量測定須使用 CNS 7129 一型噪音計或 IEC 61672-1 Class 1 噪音計，並規定測高、測點、動特性與測定時間。因此，若輸出結果是法定 L_{eq} 、 L_{max} 、 L_{10} 或 1/3 八音階等標準聲學量，且儀器與程序可檢核，它就能進入法定主體量測；反之，若輸出是「聲像圖」、「方位角」、「來源機率」、「分類標籤」或「分離後的相對成分」，那通常就屬於輔助診斷或佐證體系，而不是直接替代法定值。[1][2][3][4][14]

技術或方法	主要功能定位	空間資訊能力	聲源分離能力	聲源辨識能力	面對道路多車併行/複合音源之適用性	典型輸出	是否可用於法定量測	在道路系統中的最佳角色	主要限制
Class 1 噪音計	法定聲級量測	低	無	低	可量總量，但難分離來源	dB(A)、Leq、Lmax、頻譜	可直接作為法定主體量測	法定判定、基準值、申訴處理	只能量「總暴露」或特定測點值，無法自行完成來源拆解
固定式環境噪音監測站	長期趨勢監測	低	無	低	可掌握時段變化，不擅長複合來源歸因	長期時序、統計量、頻譜	可作法定或準法定監測主體，視制度而定	趨勢管理、熱點偵測、政策評估	對單一來源貢獻不敏感
單一麥克風事件分析	事件偵測與初步分類	很低	低	中	對稀疏事件尚可，對高度重疊場景較弱	波形、頻譜、事件時間戳	原則上不宜直接作為法定主體量測	低成本前端監測	容易受背景音、重疊音、反射音影響
雙通道或小型陣列之到達角估測 (TDOA/DoA)	粗略方向判別	中	低至中	低	在單主源或稀疏車流可用，多車重疊時快速退化	方位角、到達時間差	可作法定輔助，不宜單獨作法定主體	判斷噪音來向、排除非目標方向干擾	空間解析度受基線、頻率、幾何配置限制
麥克風陣列波束成形 (Beamforming)	空間定位與熱點成像	高	中至高	低至中	對移動車輛、車道分離、部件熱點分析很有效	聲源聲像圖、方位、相對能量	原則上屬法定輔助，不取代噪音計	複合音源定位、工程改善診斷	多為相對量，不一定直接等於法定聲級；低頻解析與旁瓣問題明顯
聲學相機 (Acoustic Camera)	波束成形視覺化	高	中至高	中	對多車道與移動目標很實用	影像疊合聲圖、頻帶聲像圖	可作行政佐證；特定制度下可結合執法	科技執法、源頭熱點可視化	需要相機同步、視線條件、天候與演算法校核
盲源分離/矩陣分解 (ICA/NMF 等)	混合訊號拆解	中 (依感測器配置)	中	中	對部分重疊聲可改善分類前處理	分離後聲軌、成分譜	原則上不宜直接作法定主體量測	作為前處理，提高後端分類或歸因能力	對訓練資料、源數估計與場景穩定性敏感
深度學習聲源分離	非線性混合拆解	中至高	高	中	對複雜重疊場景最有潛力	分離波形、遮罩、來源機率	原則上不宜直接作法定主體量測	未來複合場景拆源核心工具	可解釋性、資料集偏差、跨場景泛化仍是瓶頸
聲音事件偵測與分類 (SED/ASC/CNN-LSTM 等)	「是什麼聲音」的辨識	低至中	低到中	高	在有良好前處理時可辨識車種、喇叭、引擎、煞車等	類別標籤、時間戳、置信度	可作輔助佐證，不宜直接取代法定量測	自動標註、源別統計、智慧治理	辨識正確不代表可直接作為法規責任歸屬
音訊+影像融合(聲音照相、音視同步)	定位、辨識與對象綁定	高	中至高	高	對多車同時通過與執法對象關聯最實用	車牌、影像、時序聲圖、超標事件	在特定制度設計下可作科技執法依據	車輛噪音執法、證據鏈補強	需法規授權、資料保全、同步精度與排除誤判機制
聲學向量感測器 (AVS)	單點方向與向量資訊量測	中	中	中	在低頻方向判別與被動監測有潛力	聲壓+粒子速度、方位、流量估計	目前多屬研究或輔助用途	未來低頻或智慧路側感測	制度標準化、場域校正與法律位階尚不足
分散式聲學感測 (DAS)	大範圍交通感知	中到高	中	中	對長距離線狀道路監測具潛力	時空分布、事件軌跡	目前原則上不宜直接作法定主體量測	區域級監測、交通與噪音聯合分析	還在快速發展，法定標準與聲學對應關係未成熟

也就是說，真正穩健的制度設計不應把「法定量測」與「複合音源診斷」混為一談，而應採雙軌架構：第一軌仍用 Class 1 噪音計取得可執法、可申訴、可重現的標準聲級；第二軌再用麥克風陣列、聲學相機、盲源分離、深度學習辨識等方法去回答行政管理最在意、但傳統噪音計難以回答的問題，例如哪一個車道、哪一種車輛、哪一個結構部件、哪一個時段，對受體端噪音暴露貢獻最大。[1][7][9][11][13][14] 這種分工其實最符合現代噪音治理需求，因為法規需要穩定，治理需要精細；若硬把還在快速演進的分離或辨識模型直接塞進法定主體量測，不但容易引發儀器等效性、演算法透明性、不確定度與訴訟攻防問題，也會讓制度失去操作穩定度。[2][3][4][7][11]

若從「道路系統多音源空間聲音量測」來看，傳統單點噪音計最大的優點是結果可直接對接法規，但最大的限制則是它只能在測點上量到「總和」，不能天然拆出不同來源。對於單一路段、單一主音源、交通組成相對單純的場景，這不是大問題；但對**多車道**、高架與平面併存、交叉口加減速、橋面與路面混合、甚至道路與鐵路相鄰的複合場景而言，總量雖然可以判斷是否超標，卻很難判斷治理責任與改善優先順序。這也是為何 **CNOSSOS-EU(Common Noise Assessment Methods in Europe)** 的縮寫，**歐洲共同噪音評估方法**。)與歐盟環境噪音管理制度一方面強調指標與評估一致性，另一方面又需要更細緻的模型與補充觀測去處理不同道路源、交通條件與空間分布的差異。[5][6][14]

麥克風陣列與波束成形的價值，正是在這裡開始顯現。**Chiariotti** 等人的綜述指出，波束成形本質上是利用感測器陣列進行空間濾波，藉由數學上「轉向」陣列關注某一方向或某一位置，進而完成聲源定位；而聲學相機只是把這種定位結果與光學影像耦合，使其可視化。[7]

針對移動聲源，**Michel** 等人的工作更直接指出，**相位式**麥克風陣列已成為研究道路車輛、鐵路車輛與飛機移動聲源的重要方法，因為它能在目標運動中辨識主要發聲部位，如輪胎—路面噪音、輪軌噪音或氣動噪音。[8]

對道路系統來說，這類方法最強的不是產生一個更「法定」的 dB 值，而是讓管理者看見「哪裡在吵、哪一帶最強、不同頻帶是哪個部位在主導」。因此，若目的是複合音源診斷、隔音設施設計、車道別貢獻分析、熱點治理或工程前後改善評估，陣列方法通常明顯優於單點噪音計。[7][8][13]

但也必須精準指出，波束成形與聲學相機並不等於「天然可做法定量測」。第一，這類方法常以相對能量或成像強度呈現結果，未必直接等於法規所要求的受體端

聲級。第二，空間解析度受到陣列孔徑、頻率範圍、感測器數量、旁瓣、遮蔽、地面反射與近遠場假設影響。第三，移動車輛場景還要處理都卜勒效應與時間同步問題。正因如此，工程上常把波束成形用作來源定位與工程診斷，再由標準噪音計負責最終的合規值判讀。[7][8][13] 這種「量值由噪音計負責，空間歸因由陣列負責」的邏輯，才是目前最穩健、最可防禦的做法。[1][2][14]

如果進一步談到「聲源分離」，就不能只停留在幾何定位。因為道路噪音常見的困難，不只是兩個來源位於不同方向，而是它們在同一時間、相近頻帶、相似包絡下重疊，例如兩輛機車同向加速、汽車與重車並行、同一輛車的輪胎噪音與排氣／引擎噪音重疊，或道路與高架橋再輻射同時存在。這時候，光靠方位角還不夠，需要在時域、頻域、時頻域甚至深度特徵空間中把混合信號拆解。Mato-Méndez 等人以雙通道錄音結合盲分離來改善交通噪音自動分類，顯示分離可提升車輛分類與統計資訊提取的效果；這代表聲源分離在道路系統中最實際的角色，往往是作為分類前處理或歸因前處理，而不一定是直接輸出給法規端使用。[10] 就方法論來說，盲源分離（Blind Source Separation）、獨立成分分析（ICA）、非負矩陣分解（NMF）與其後續深度學習版本，本質上都在處理「觀測到的是混合訊號，而來源訊號本身不可直接觀測」的問題。傳統方法的優點是數學假設較清楚，對小型系統較容易解釋；缺點是當道路聲景高度非平穩、來源數量不明、殘響與反射強、或訓練場景與部署場景差異很大時，效能會快速下降。新一代深度學習分離則能用更強的非線性能力處理重疊來源，但代價是需要大量標註或半標註資料，也更容易碰到泛化能力與可解釋性問題。[7][10][12] 因此，若要把聲源分離作為未來複合性音源治理工具，最佳位置不是立即取代法定測值，而是先進入「輔助量測層」，專責處理混合聲景拆解、來源貢獻排序與後端辨識精度提升。[7][10][12]

再往下一層，就是「聲源辨識」。辨識與分離不同，分離重點是把訊號拆開，辨識重點是回答「這是什麼」。在道路場景中，辨識可以有不同粒度。最粗略的是把聲音分成道路交通、鐵路、航空、施工、鳥鳴或人聲等大類；再細一層是車種分類，如機車、小客車、大客車、重型車；更細者則是聲學機制分類，如輪胎—路面、動力總成、煞車、排氣、橋面結構輻射等。Mesaros 等人的聲音事件偵測（SED）教程很清楚地說明，這類系統的核心任務是辨識「什麼事件在何時發生」，所以它天然適合處理道路系統中的事件性噪音、喇叭、急加速、重車通過或特定異常聲事件。[12] 但必須注意，分類或偵測模型輸出的是類別與時間標記，不是

天然具有法律效力的環境音量值；它對治理決策極有幫助，對法定裁罰則通常仍需回接至規範化量測與證據鏈。[12][14][15]

對多音源道路系統而言，一個特別值得重視的方向，是把「空間分離」與「語意辨識」耦合起來。也就是先用陣列或多感測器取得方向與位置線索，再讓分類器對某個空間分區或某個分離後音軌做辨識。這比直接對原始混合聲做分類通常更穩健，因為模型不必同時承擔全部重疊聲源的辨識負擔。Murovec 等人提出的陣列式自動環境噪音量測系統，就結合了自動排除非相關噪音事件、主導來源方向辨識與事件分類三個功能，目標是降低人工判讀負擔並提升環境噪音監測可靠性。[9] 這對道路系統有很高啟發性：未來真正有價值的不是單一演算法，而是「法定聲級量測+空間定向+事件分類+來源貢獻估算」的一體化架構。[9][12][13] 若進一步問「是否可用於法定量測」，最精確的回答應該是這樣。第一，符合 IEC 61672 與相應國內規範的 Class 1 噪音計，當然可直接作為法定量測主體。[2][3][4][14] 第二，陣列麥克風與聲學相機若只是輸出聲像圖與相對強度，原則上不能直接替代法定 L_{eq} ，但可以作為法定量測之輔助模組，特別適合說明主導方向、干擾排除與治理對象。[7][8][9] 第三，盲源分離與深度學習辨識原則上屬診斷與佐證工具，現階段宜作為「技術輔助」而非「法定主體」。[10][11][12] 第四，若法規本身已為某種科技執法工具建立明確程序、排除條件與判定鏈，例如我國車輛噪音聲音照相制度，那麼該工具可以在「特定制度」下具有實質執法功能，但這並不代表它已全面取代一般環境音量標準之法定量測架構。[14][15] 這種區分非常重要，因為它同時保留法規穩定性與技術創新空間。[14][15]

以我國現況來說，《環境音量標準》已明文要求道路環境音量測定使用 Class 1 噪音計，並對測高、測點與測時作出規範；這意味著一般道路環境噪音之法定主體，仍是標準化聲級量測。[14] 但在車輛噪音科技執法上，環境部又已透過聲音照相制度建立另一套執法邏輯，包括背景音修正、前後三秒比對排除環境干擾、天候限制，以及在多車同時經過時結合影像資料與噪音時序圖辨識違規改裝情形。[15] 這正好說明一個制度設計原則：當科技工具要進入執法端，不是只靠技術本身，而是必須搭配法規授權、證據鏈設計、排除誤判條件與程序正義。對道路系統多音源量測未來若要正式納入制度，也應循這條路徑前進，而不是直接宣稱「某模型辨識準確，所以可直接當法定量測」。[14][15]

從工程治理的角度再往前一步看，真正完整的道路系統多音源架構，應該至少包含五個連續模組。第一是法定基底模組，即 Class 1 噪音計或等效固定站，用來

取得可比較、可稽核的聲級與頻譜。第二是空間量測模組，也就是陣列麥克風、聲學相機或方向估測系統，用來掌握多車道、多高度、多結構面的空間分布。第三是聲源分離模組，用 NMF、ICA、陣列空間濾波或深度學習把重疊來源拆解。第四是辨識模組，以 SED、ASC、CNN、LSTM 或音視融合模型把來源加上語意標籤。第五則是責任與治理模組，把上述結果重新投影到車種別、時段別、車道別、設施別與受體別的管理決策中，最後仍以法定量測值作為行政與司法上最穩定的落點。[1][7][9][11][12][13][14] 這樣的架構既能保住法律穩定，也能真正處理複合音源現場的複雜性。[1][7][11][14]

若把問題聚焦到「可作為未來複合性音源分離工具」這一點，我會建議優先發展三種組合，而不是孤立看某一項技術。第一種組合是「Class 1 噪音計+麥克風陣列(聲學相機)」，它最適合做道路多車道、高架平面並存、交流道與橋下場景的空間歸因。第二種組合是「陣列前端+深度學習分離+事件辨識」，它最適合高度重疊的都市交通場景，能把空間資訊與語意資訊耦合。第三種組合是「音訊+影像+法規程序」，也就是類似聲音照相或未來更完整的音視同步執法系統，它最適合需要把噪音事件綁到特定車輛、特定時刻與特定證據鏈的行政場景。[7][9][11][12][15] 其中，第一種最成熟，第二種最具研究潛力，第三種最接近執法實務。[7][9][11][15]

至於聲學向量感測器 (Acoustic Vector Sensor, AVS)，它值得列入「未來工具」而不宜過早列為「現行法定主體」。原因是 AVS 能在單點同時量測聲壓與粒子速度，因此在方向判別、被動監測、低頻感知與交通流監測上有相當潛力。AIP 的研究已指出，AVS 可用於交通量估計與車輛計數，雖然其車速量測精度仍不如多普勒雷達，但它具有不主動發射訊號、較不受電磁干擾、且能進一步分析音訊特徵等優點。[16] 換言之，AVS 對於道路多音源的「被動式方向感知」很有前景，但若要進入法定量測，還需要更完整的標準化、校正流程、重現性驗證與法規銜接。[2][4][16]

綜合來看，對道路系統多音源空間聲音量測、聲源分離與辨識的完整判斷應是：法定量測的核心仍應由標準化噪音計掌握，因為它直接對應法規的受管制量與程序要求；麥克風陣列與聲學相機最適合回答「從哪裡來、哪裡最強、哪個部位主導」；盲源分離與深度學習最適合處理「混在一起的聲音如何拆開」；聲音事件偵測與分類最適合回答「那是什麼聲音、什麼時候出現」；音視融合最適合回答「是哪一個對象造成、能否形成執法證據鏈」。因此，在制度上最成熟的策略不

是選邊站，而是分層整合：用法定量測守住法律穩定，用空間量測強化診斷，用分離與辨識提升治理精度，用特定程序化科技執法處理需要對象綁定的車輛噪音場景。[1][7][9][11][12][14][15] 這樣的架構，才最有可能成為未來道路複合性音源分離與治理的可操作版本。[7][11][12][15]

資料來源

- [1] International Organization for Standardization. (2017). *ISO 1996-2:2017 Acoustics—Description, measurement and assessment of environmental noise—Part 2: Determination of sound pressure levels*. ISO.
- [2] International Electrotechnical Commission. (2013). *IEC 61672-1:2013 Electroacoustics—Sound level meters—Part 1: Specifications*. IEC.
- [3] International Electrotechnical Commission. (2013). *IEC 61672-2:2013 Electroacoustics—Sound level meters—Part 2: Pattern evaluation tests*. IEC.
- [4] International Electrotechnical Commission. (2013). *IEC 61672-3:2013 Electroacoustics—Sound level meters—Part 3: Periodic tests*. IEC.
- [5] European Parliament and the Council of the European Union. (2002). *Directive 2002/49/EC relating to the assessment and management of environmental noise*. EUR-Lex.
- [6] Kephelopoulos, S., Paviotti, M., & Anfosso-Lédée, F. (Eds.). (2012). *Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU)*. Publications Office of the European Union, Joint Research Centre.
- [7] Chiariotti, P., Martarelli, M., & Castellini, P. (2019). Acoustic beamforming for noise source localization—Reviews, methodology and applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 120, 422–448.
- [8] Michel, U., Barsikow, B., Böhning, P., & Hellmig, M. (2004). Localisation of moving sound sources with phased microphone arrays. In *Proceedings of Inter-Noise 2004*.
- [9] Murovec, J., Prezelj, J., & Batistič, L. (2018). Microphone array based automated environmental noise measurement system. *Applied Acoustics*, 143, 143–154.
- [10] Mato-Méndez, F. J., Orosa, J. A., & Cidrás, J. (2011). Blind separation to improve classification of traffic noise. *Applied Acoustics*, 72(9), 590–597.

- [11] Liang, R., Li, Y., Zhang, Y., & colleagues. (2022). A traffic noise source identification method for buildings adjacent to multiple transport infrastructures based on deep learning. *Building and Environment*, 214, 108909.
- [12] Mesaros, A., Heittola, T., & Plumbley, M. D. (2021). Sound event detection: A tutorial. *IEEE Signal Processing Magazine*, 38(5), 67–83.
- [13] Liu, C., Zhang, Y.-H., Zhang, X.-Z., Zhang, Y.-B., & Chen, L.-Q. (2023). Source contribution analysis of vehicle pass-by noise using a moving multi-band model based OPAX method. *Measurement*, 218, 113170.
- [14] 環境部。〈環境音量標準〉。臺灣環境部主管法規系統。
- [15] 環境部。〈聲音照相科技執法〉。空氣品質改善維護資訊網。
- [16] Czyżewski, A., Kotus, J., & colleagues. (2021). Comparing traffic intensity estimates employing passive acoustic radar and microwave Doppler radar sensor. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 42(1), 030001.