

第十三章 指向性噪音計音源分離技術創新點

第十三章所要處理的，不再只是傳統意義下「看見哪裡有聲音」的問題，而是指向性噪音計如何從輔助定位工具，逐步演進為能支撐複合性音源辨識、相對貢獻估算、長期監測治理、事件告警與行政判讀的整體技術系統。近年歐洲共同噪音評估方法、環境噪音自動辨識研究、低成本感測網路、交通噪音事件偵測與聲學影像技術的進展都顯示，未來指向性量測的核心價值，已不僅在於提供一張漂亮的聲源熱圖，而在於能否把空間資訊、時間資訊、頻譜資訊、心理聲學特徵與交通運行資料整合成可量化、可追溯、可重現的證據鏈。這種由「看見聲音」走向「解釋聲音、分離聲音、治理聲音」的技術轉向，正是陸上運輸系統複合音源管理的下一個關鍵門檻。[1][2][3][4][5]

13.1 指向性量測由定位走向定量之創新趨勢，最核心的創新，在於波束形成（beamforming）與相關反演方法不再只服務於「哪裡最亮」的視覺化展示，而開始朝向「哪一個來源在多大程度上貢獻了受體端聲能」的定量問題推進。傳統聲學相機或平面陣列在工業診斷中常被用來找出顯著噪音熱點，但在道路、鐵路與高架結構等複合運輸環境中，真正困難的是多個線性、延伸性、部分相干且具方向性的音源會同時出現，使傳統熱圖容易出現能量擴散、旁瓣誤判與源強偏差。近年的研究已明確指出，若忽略鐵路噪音源自身的方向性，傳統波束形成在來源定量上會出現偏差；另一方面，新型演算法如針對變速機械或移動源的定量波束形成，則已開始把「定位」與「量化」合併處理，使聲源複數包絡、來源能量與位置資訊能在同一框架下估算。這代表指向性量測正從「影像化輔助研判」走向「可用於貢獻估算的半定量工具」，雖然尚未完全取代標準聲級量測，但其作為複合音源相對分離工具的價值已大幅提升。[6][7][8][9]

從陸上運輸系統角度來看，這種由定位走向定量的創新尤具意義。因為道路主線、高架段、匝道、橋下反射與軌道事件常不是一個一個獨立出現，而是疊加於相同時空框架中。若指向性量測只能指出「這裡有一團聲音」，仍不足以支撐責任歸屬；但若能進一步對不同方向、不同高度或不同事件窗內的相對能量進行穩定估算，便有機會作為複合性音源分離的關鍵前處理層。未來真正有潛力的發展，不是單純追求更高解析的熱圖，而是建立「陣列影像—頻譜貢獻—受體端驗證」之間的對應規則，使指向性量測的結果能與標準化環境噪音指標互相校準。[1][6][7]

13.2 從單次測量走向長期監測之創新，則是把指向性量測由「專案式取樣」升級為「治理式觀測」。過去指向性設備多用於短時間診斷、工程查核或特定研究場次，原因在於陣列設備價格高、資料量龐大、運算負荷重，且長時間架設與環境穩定性要求高。但近年的環境噪音自動化研究與分散式感測平台發展指出，來源分類、時段自動標記與分層運算架構已逐步成熟，長期噪音監測不再只能回傳單純的 L_{Aeq} ，而能進一步標註主要來源類型、事件時段與空間特徵。尤其是在都

市噪音監測場景中，無線感測與分散式架構已能支持持續資料收集、即時來源辨識與雲端彙整，為傳統「一次量測、一次報告」的模式帶來結構性改變。

[2][3][4][10][11]

對複合音源治理而言，長期監測的真正創新點，在於它讓我們不再只能問「今天這一刻最吵的是誰」，而能進一步回答「哪個來源在夜間最常成為主導」、「哪個來源在某種氣象條件下最容易變成最不利條件」、「哪一種複合組合最容易引發陳情」。若未走向長期監測，許多複合案件中的責任歸屬都會被單次測量的偶然性綁架。反之，只要系統能長時間累積方向性資訊與來源分類紀錄，即使每一時刻的定量能力仍有限，經由大量樣本統計後，仍可建立具有治理意義的主導來源機率分布。這正是指向性量測由研究儀器轉化為環境治理基礎設施的關鍵過程。

[2][4][10]

13.3 從人工判讀走向自動辨識之創新，則反映出環境聲學已逐漸走出「專家聽音檔、看頻譜、比影像」的高度人工模式。Murovec 等人的研究已示範，透過空間濾波、非監督分群與心理聲學特徵的結合，系統可以自動辨識環境中的個別噪音來源，並估算其對總噪音的貢獻；Maijala 等人則更早證明，在無線感測節點內嵌來源分類演算法，能把傳統只量測整體音量的監測系統，轉化為可辨識主要來源類型的智慧監測概念。這種轉變的意義，不僅是節省人力，更重要的是使資料處理從事後人工閱讀轉向近即時的、自動一致的、可規模化的分類流程。[2][3][12]

然而，自動辨識的真正創新，不在於把所有聲音硬分成幾類，而在於讓系統能在複合運輸場景中辨識「事件型來源何時浮現」、「持續型來源何時退居背景」、「多來源共存時何時不宜過度自信下結論」。環境噪音自動辨識若沒有不確定度概念，反而可能製造新的誤判。故成熟的創新方向應不是輸出單一類別，而是輸出分類信心、時間持續性、空間一致性與是否符合既有交通流條件的交叉檢核結果。這種多層驗證式自動辨識，才有可能在未來支撐爭議案件處理。[2][12][13]

13.4 指向性量測結合心理聲學特徵之創新，則標誌著環境噪音評估已不再滿足於單一聲壓位準。長期以來，複合交通噪音案件常出現一個困境：儀器顯示總量差異不大，但民眾主觀感受卻截然不同。這是因為人耳對聲音的厭煩感、刺耳感與注意力吸引程度，並不只由 A 加權等效音量決定，還與響度（loudness）、尖銳度（sharpness）、粗糙度（roughness）、起伏強度（fluctuation strength）與事件結構等因素相關。近年對心理聲學與聲景指標的綜述已明確指出，這些指標能補足傳統音量指標對感知差異的不足；而針對道路交通噪音煩擾的深度學習研究，也顯示心理聲學特徵對於建立主觀反應模型具有實質效果。[14][15][16][17]

當指向性量測與心理聲學特徵結合時，最大的創新點在於可以不只回答「哪裡最響」，還能回答「哪個方向的聲音最惱人」、「哪一類事件雖不一定貢獻最多能

量，卻對感知干擾最大」。例如在道路與鐵路複合場景中，列車通過事件可能在整體長時段能量占比有限，但若其尖銳度或事件突顯性顯著，居民卻可能將其視為主要擾動源。若未納入心理聲學層，指向性量測就只能處理物理能量分布，難以銜接實際陳情感知。未來在複合性音源分離上，最具潛力的方向之一，就是把方向資訊與心理聲學權重耦合，形成「方向性心理聲學貢獻」的新型指標。[14][15][16]

13.5 指向性量測結合交通流資料之創新，則把聲學證據從被動觀測推進到可解釋的交通機制層。CNOSSOS-EU、道路交通噪音官方模式與各國噪音圖資制度，早已證明流量、車速、重車比例、路面型式與交叉口行為是噪音排放解釋的基本變數。當指向性量測能與交通流監測資料，如車流計數、車種辨識、車速、號誌週期與列車時刻資料同步，就不再只是「聲音影像紀錄器」，而能成為「交通噪音事件解釋器」。這種整合可讓系統更精確地把特定方向出現的能量團塊與實際交通事件對齊，例如辨識某一時間窗內的高方向性聲能是否對應重車上匝道加速、列車通過、機車群起步或高架主線車流疊加。[1][18][19]

這類整合的治理價值極高。因為沒有交通流資料，指向性量測多半只能在聲學層面提出合理推測；有了交通流資料後，便可把空間與時間上的噪音特徵對應到可驗證的運輸行為，進而提升責任歸屬與改善設計的可信度。對複合性音源分離而言，交通流資料更像是強而有力的先驗條件，可用來限制演算法不致產生不合理的來源解釋。例如，若系統宣稱某方向的高頻事件來自列車，但該時刻根本沒有列車通過，則可自動降低該判讀權重。這種物理量測與運輸資料的交互約束，正是未來從聲學感測走向智慧治理的重要橋樑。[18][19][20]

13.6 指向性量測結合 AI 分類模型之創新，是近年最受關注的技術路線之一。傳統環境噪音分類多依賴特徵工程與統計分類器，但在複合運輸場景中，來源重疊、反射、遮蔽與多變的背景條件常使單純音訊分類效果受限。AI 模型，尤其深度學習與遷移學習模型，已逐步被用於環境聲音辨識、噪音源識別與城市聲音事件分析。2025 年的系統性研究更顯示，完整的聲學感測系統已可涵蓋從感測層、邊緣前處理、來源識別到雲端管理的全鏈路設計。當 AI 分類模型結合指向性量測時，優勢不只在聲音內容本身，而在於模型可同時讀取方向、能量分布與時間演化特徵，使「從哪裡來」與「像什麼聲音」兩個問題不再分開處理。[13][21][22]

不過，真正成熟的創新，不應只是把 AI 疊加在聲學相機之上，而是建立具可解釋性的分類框架。近年的可解釋 AI 交通噪音研究指出，若模型能同時呈現哪些特徵驅動了預測，就更有機會被工程與行政決策接受。對複合音源案件而言，這尤其重要，因為黑箱式分類結果即使準確率高，也未必足以作為跨機關協調或爭議處理的依據。故未來較可行的方向，是以 AI 負責初步分類與異常偵測，再由

模式模擬、交通流資料與標準量測共同完成最終判讀，而非由單一模型獨自做出全部結論。[20][21]

13.7 指向性量測結合三維模式模擬之創新，則是把量測現場與預測模型真正閉合起來。過去噪音模式模擬常依賴線音源、點音源與建築幾何的先驗輸入，再以道路流量、車速與路面修正估算受體位準；而指向性量測則提供現地空間分布與局部顯著來源。兩者若分開使用，模式可能缺乏現地校核，量測則可能缺乏可外推的結構。CNOSSOS-EU 與相關三維噪音資料模型研究已顯示，統一且結構化的資料模型對噪音模擬與地理資訊整合極為重要；另一方面，UAV 陣列與三維聲學影像研究則進一步展現出，以移動式或立體化陣列蒐集空間聲場資訊，已逐步成為可能。[1][23][24]

在陸上運輸複合場景中，三維模式模擬的重要性不只是做出一張噪音圖，而是能把平面段、高架段、橋下反射、高樓立面與遮蔽關係同時納入。若再把指向性量測結果回饋到模型參數校整，例如校正特定高架段的方向性放射特徵、橋下結構反射影響或列車通過事件在立面上的能量分布，則模式便不再只是理論推估，而會成為與現地量測互相修正的數位雙生（digital twin）雛形。這種「量測校模—模式反演—再驗證」循環，是未來複合性音源分離最具制度化潛力的方向。[1][23][24]

13.8 指向性量測結合事件偵測與告警之創新，則使環境噪音管理從靜態調查邁向動態治理。傳統環境監測多以時間平均值為主，對短時但高度擾動的事件反應不佳。近年關於噪音事件偵測的方法研究已提出多種固定或自適應閾值、轉態檢測與事件片段擷取方法；DYNAMAP 相關研究更進一步將異常噪音事件偵測納入動態道路噪音地圖框架，使交通底噪與非典型事件得以分開處理。若把這些事件偵測方法與指向性量測結合，系統便能不只知道「出現了一個異常高值」，還可知道「這個高值來自哪個方向、是否具有移動軌跡、是否對應特定交通事件」。[25][26][27]

這類創新的政策意義非常直接。對道路與鐵路複合環境而言，很多陳情不是針對平均噪音，而是針對某些夜間尖峰事件、異常車輛、突發性高聲源或結構反射造成的短時擾動。若事件偵測與指向性告警足夠成熟，主管機關便有機會在事件發生當下留下更完整的證據，包括時間戳記、方向資訊、音量歷程與可能來源類型。未來若再結合交通影像或車流辨識，這套系統甚至可以從被動監測邁向準執法支援或工程異常診斷支援。[25][26][27]

13.9 低成本分散式感測網路之創新，是讓指向性量測從少數高價設備走向大範圍、長時間、分層部署的關鍵前提。低成本噪音感測器與無線聲學感測網路的文獻已顯示，雖然單一低成本節點的精度通常不及實驗室等級設備，但透過冗餘部

署、節點校正、分散式共識與雲端融合，整體網路仍可提供具有高治理價值的時空資料。某些系統甚至已整合深度學習來源辨識、分散式資料處理與低功耗通訊，形成可擴充的城市聲音監測架構。[4][10][11][28]

低成本網路對複合音源分離的最大貢獻，不是讓每一個節點都變成高階聲學相機，而是形成「少數高精度指向性節點＋多數低成本背景節點」的分層監測架構。前者負責高解析診斷、方向性分析與模型校準；後者負責長期趨勢、時空覆蓋與事件初步觸發。當兩者互相搭配時，便能在有限預算下兼顧精度與覆蓋率。這對道路、高架、鐵路、交流道與高樓立面複合場景特別重要，因為單靠少數高價設備往往難以同時掌握多層次受體與多樣化時段條件。[4][10][11]

13.10 對陸上運輸系統複合音源分離的關鍵突破點，並不在單一演算法，而在多層系統整合。第一個突破點，是把方向資訊從單純視覺化輸出，轉化為可與受體端音量、頻譜與事件窗對應的量化特徵。第二個突破點，是把交通流、列車時刻、道路幾何與三維模式模擬納入分析，讓聲學判讀不再孤立。第三個突破點，是透過 AI 與自動辨識，讓長期資料中難以人工處理的大量事件與來源組合得以被系統性整理。第四個突破點，則是把心理聲學與陳情感知納入，使分離結果不只反映物理能量，也能反映實際擾動性。當這些層次真正整合後，複合性音源分離才有可能從研究展示，走向可服務治理、可支撐責任歸屬、可用於改善設計的實用技術。[2][14][18][21][23]

更具體地說，對高速公路平面段與高架段並存、高速公路與匝道複合、道路與鐵路並存，以及高樓層長期暴露等典型場景而言，未來最關鍵的不是「百分之百精確地把每一分貝都分給特定來源」，而是建立足夠穩健的相對貢獻排序、時段主導來源圖譜、最不利條件辨識能力與改善後驗證機制。這種務實型突破比追求理想化完美分離更符合行政與工程實務，也更有機會真正落地。[1][18][23]

13.11 技術創新之侷限、風險與落地條件，則必須誠實揭示。首先，指向性量測在複合運輸場景中仍受限於陣列孔徑、頻率解析度、旁瓣、反射、多源相干性與氣象條件，尤其對延伸性線音源與多重反射場，熱圖不必然等同真實源強分布。其次，AI 分類與自動辨識雖能大幅提高效率，但資料集偏差、場域轉移、裝置差異與黑箱問題都可能使模型在新場域失準。再者，低成本感測器雖有利於大量部署，但長期校正漂移、環境耐候性、通訊穩定性與法規證據效力仍是現實門檻。這些侷限在文獻中均已被反覆指出，因此任何創新若要進入正式治理與制度應用，都不能只展示成功案例，而必須說明何時可用、何時需保守解讀、何時必須回到標準化量測與人工複核。[6][10][11][13][21][28]

真正的落地條件，至少包括四點。其一，必須建立高精度基準設備與低成本網路設備之間的校準與比對制度。其二，必須建立「指向性結果如何轉譯為治理語言」

的標準程序，也就是何種輸出可用於工程診斷、何種輸出可用於陳情佐證、何種輸出仍僅屬研究輔助。其三，必須建立模式模擬、交通資料與聲學感測之交叉驗證機制，避免單一證據來源決定全部結論。其四，必須建立不確定度揭露與專家複核制度，使技術創新不是神化工具，而是提升決策品質。只有在這些條件成熟之下，指向性噪音計的技術創新，才有可能真正成為陸上運輸系統複合音源分離的制度性突破，而不只是短暫的展示性科技。[1][2][3][18][23]

總結而言，第十三章的真正主題，不是宣稱指向性噪音計已經可以單獨解決複合性音源分離的一切難題，而是指出它正在從傳統定位工具，演進為一個可以連接空間聲學、長期監測、自動辨識、心理聲學、交通資料、AI 分類、三維模式模擬與事件治理的中樞型平台。未來對陸上運輸系統最有價值的，不是某一項單點突破，而是把這些創新模組以層級化方式組成可操作、可驗證、可治理的技術架構。當指向性量測能與標準量測互補、與模式模擬互校、與 AI 分類互證、與交通資料互鎖時，它才真正有機會成為複合音源分離的關鍵基礎技術。[1][2][6][14][21][23]

文獻資料

[1] European Commission, Joint Research Centre. (2012). *Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU)*. Publications Office of the European Union.

[2] Murovec, J., Prezelj, J., & Bizjak, M. (2023). Automated identification and assessment of environmental noise sources' contribution to total noise levels. *Heliyon*, 9(1), e12919.

[3] Maijala, P., Heittola, T., Virtanen, T., & others. (2018). Environmental noise monitoring using source classification in sensors. *Applied Acoustics*, 129, 258–267.

[4] Vidaña-Vila, E., Alsina-Pagès, R. M., Alías, F., & Navarro, J. (2020). Low-cost distributed acoustic sensor network for real-time urban sound monitoring. *Electronics*, 9(12), 2119.

[5] Picaut, J., Fortin, N., Bocher, E., Petit, G., Aumond, P., & Guillaume, G. (2020). Low-cost sensors for urban noise monitoring networks—A literature review. *Sensors*, 20(8), 2256.

[6] Zhang, J., Squicciarini, G., & Thompson, D. J. (2019). Implications of the directivity of railway noise sources for their quantification using conventional beamforming. Conference paper, University of Southampton / railway acoustics proceedings.

- [7] Kottakota, K., et al. (2025). Order-based beamforming to identify tonal noise sources under variable speed conditions. *Applied Acoustics*.
- [8] Chu, N., et al. (2021). Rotating acoustic source localization: A power propagation based source-to-array beamforming review. *Measurement / related review literature*.
- [9] Fredianelli, L., et al. (2024). Features for evaluating source localization effectiveness in acoustic imaging and beamforming applications. *Sensors*, 24(14), 4696.
- [10] Peng, B., et al. (2024). Environmental noise monitoring using distributed hierarchical wireless acoustic sensor networks. *Results in Engineering*.
- [11] Silva, B. N., Khan, M., & Han, K. (2019). Review of wireless acoustic sensor networks for environmental noise monitoring. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2019, 7634860.
- [12] Murovec, J., Prezelj, J., & Bizjak, M. (2023). Automated identification and assessment of environmental noise sources' contribution to total noise levels by spatial filtering and psychoacoustic features. *Heliyon*, 9(1), e12919.
- [13] Gunatilaka, D., et al. (2025). An acoustic sensing system for noise monitoring and source identification using transfer learning. *Expert Systems with Applications*, 130014.
- [14] Engel, M. S., Fiebig, A., Pfaffenbach, C., & Fels, J. (2021). A review of the use of psychoacoustic indicators on soundscape studies. *Current Pollution Reports*, 7, 359–378.
- [15] Yu, B., Kang, J., & others. (2016). Development of indicators for the soundscape in urban shopping streets. White Rose / urban soundscape research papers.
- [16] Wang, J., et al. (2023). Deep learning-based road traffic noise annoyance assessment. *Applied Sciences / PMC indexed article*.
- [17] EuroNoise 2025 proceedings. (2025). Psychoacoustic assessment of loud vehicles based on recorded environmental data. FA Euronoise 2025 proceedings.
- [18] Environmental Protection Agency Ireland. (2025). *Guidance Note for Strategic Noise Mapping, Part 2: Calculation Methodology*. EPA Ireland.
- [19] Cormier, K., et al. (2022). Innovative approach to quantify and qualify the real traffic noise pollution using directional environmental sensors. Project/technical report.

- [20] Patel, R., et al. (2025). An automated framework for traffic noise level analysis using explainable artificial intelligence. *Scientific Reports*.
- [21] Yeow, J. W., et al. (2025). Environmental acoustic intelligence through sound event localization and detection. *Nature affiliated engineering / AI acoustics publication*.
- [22] Kumar, K., et al. (2020). A harmonized data model for noise simulation in the EU. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(2), 121.
- [23] Minea, M., et al. (2023). Urban traffic noise analysis using UAV-based array of microphones for 3D monitoring and mapping. *Sensors*, 23(4), 1912.
- [24] Kephelopoulos, S., Paviotti, M., & Anfosso-Lédée, F. (Eds.). (2012). *Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU)*. European Commission, Joint Research Centre.
- [25] Alsina-Pagès, R. M., et al. (2021). Methods for noise event detection and assessment of the related annoyance. *Applied Sciences*, 11(17), 8031.
- [26] Socoró, J. C., et al. (2017). An anomalous noise events detector for dynamic road traffic noise mapping. *Sensors*, 17(10), 2323.
- [27] Molina-Moreno, M., et al. (2024). A noise monitoring system with domain adaptation based event detection for environmental scenarios. *Applied Acoustics*.
- [28] Smart Wireless Acoustic Sensor Network Design for Noise Monitoring in Smart Cities. (2025). MDPI Books / compiled review volume.