

物流與資產追蹤技術突破： 告別通信盲區與電池束縛

編輯部整理

伴隨全球科技與半導體產業從“單純的生成式 AI 算力競逐”向“落地應用與全景物理感知”的演進過程，物流與資產追蹤 (Asset Tracking) 產業也開始了深刻的技術反覆運算。

全球資產追蹤產業演進趨勢與三大物理瓶頸

過去一兩年中，全球供應鏈生態經受了極端氣候頻發、地緣政治摩擦以及高通脹環境的多重洗禮。尤其是 2024 年底至 2025 年間紅海航運危機餘波與國際關稅壁壘的疊加，迫使跨國企業將供應鏈策略從“準時制 (Just-In-Time)”全面轉向“以韌性為核心 (Just-In-Case)”。在這一背景下，資產追蹤技術迎來爆發期：

1. 從“防盜防丟”升級為“供應鏈孿生”：企業不再僅僅滿足於知道高價值資產或集裝箱“在哪裡”，更迫切需要即時掌握“狀態如何”（溫度、震動、傾斜、氣密性），甚至將其作為企業計算碳足跡 (Carbon Footprint) 與進

行合規審計的核心資料來源。

2. 從“事後追溯 (Tracing)”躍升為“事前預測 (Predictive Tracking)”：通過端側感知的異常狀態結合雲端演算法，物流管理者需在貨物毀損或延誤發生前 72 小時即可介入調配，這要求追蹤資料必須實現極低延遲與零中斷上報。

據 Berg Insight 與 Counterpoint 在 2026 年初發佈的綜合分析預測，資產數位化的剛需推動了廣域與局域無線追蹤終端的採購量激增。然而，要真正實現“全域可視”，產業界必須首先跨越硬體層面固有的“三大物理瓶頸”。

回顧傳統資產追蹤技術（如早期 GPS+2G/3G 模組、有源 RFID 等），其規模化落地的核心痛點可歸結為以下物理與經濟瓶頸：

●運維災難：電池壽命的絕對制約

在海量可回收物流載具 (RTP, 如共用託盤、周轉箱)

場景中，部署追蹤器的設備採購成本 (CAPEX) 尚可承受，但電池耗盡後引發的尋找、拆卸與更換電池成本 (OPEX) 往往是設備本身的數倍。即便採用低功耗廣域網路 (LPWAN) 技術，傳統有源標籤通常也只能維持 2-3 年的壽命。面對數以萬計甚至百萬計的流動資產，定期更換電池不僅是巨大的財務黑洞，其廢棄鋰電池更是面臨著極高的環保回收合規風險。

●信號黑洞：通信與地磁的多重盲區

地球表面約 80% 的區域（大洋深處、沙漠、極地）無法被蜂窩基站覆蓋，這導致遠洋集裝箱在長達數周的航期中處於“失聯黑箱”狀態；而在港口多層金屬集裝箱堆疊區或深層地下轉運庫房中，嚴重的法拉第籠效應與多徑干擾，使得傳統的 GNSS 衛星定位與蜂窩通信瞬間失效。

●重資產陷阱：基礎設施的高度依賴

無論是藍牙到達角 (AoA)、傳統 UWB 還是主動式 RFID，

其室內高精度定位通常都需要在廠區或貨站頂部部署高密度的固定閱讀器與錨點網路 (Anchors)。對於機場偏遠機坪、多變的中轉貨站或非自有產權的協力廠商庫房而言，這種“強基建依賴”極大地限制了追蹤技術的推廣。

通信技術突破：衛星、eSIM 與 5G RedCap

為了徹底擊碎上述盲區與連接壁壘，2025 至 2026 年，通信界完成了三大基建與標準的全面商用落地：低軌衛星雙模化、GSMA SGP.32 eSIM 全球調度以及 5G RedCap 成本拐點的到來。

LEO 低軌衛星與蜂窩 NTN 雙模通信：消除全球盲區

長期以來，衛星追蹤由於模組體積龐大且資費高昂，一直局限於極其昂貴的特種資產。但隨著 3GPP Release 17 及其增強版 Release 18 中 NTN (非地面網路, Non-Terrestrial Network) 標準的正式凍結與落地。

如今的智慧追蹤終端廣泛採用了“蜂窩 + LEO (低軌衛星)”雙模架構。例如，在 2025 年底 Eseye 與 Sateliot 等衛星網路運營商達成的合作中，追蹤設備在城市與近海使用標準的 NB-IoT/LTE-M 網路，一旦進入遠洋或偏遠無人區，內置晶片可無縫、動態地切換

至 3GPP NTN 衛星協議，將關鍵心跳包與溫度狀態上報至低軌衛星座。

根據 Global Market Insights 於 2025 年發佈的最新資料，全球衛星物聯網 (Satellite IoT) 市場規模在 2025 年已達 24 億美元，並預計在 2026 年至 2034 年間將以 23.2% 的驚人複合年增長率 (CAGR) 狂飆，直接反映了能源、物流與航運巨頭對“全球零盲區互聯”的迫切渴求。

SGP.32 eSIM：物聯網設備的全球連接方案

在全球資產追蹤網路中，跨國界物流是一個永恆的話題。過去，當一個智慧集裝箱或高價值貨物從中國始發，途徑中東，最終抵達歐洲，其內置的物理 SIM 卡往往面臨高昂的國際漫遊費。更致命的是，2025-2026 年期間全球有 37 家運營商正在關閉 2G 網路，39 家正在關閉 3G 網路 (例如多國的 2G/3G 退網潮)，海量跨境 IoT 設備面臨瞬間斷網的“無信號倒計時”。

為解決這一頑疾，GSMA 經過數年打磨，於 2024 年底發佈了穩定的 SGP.32 v1.2 eSIM 規範，並在 2026 年 4 月迎來了大規模的商用爆發點。SGP.32 被業界譽為“IoT 連接史上的最強轉折”，其雲端遠端調度機制具有極高的技術革命性。

傳統 eSIM 方案的局限

在 SGP.32 出現之前，產業主要採用 SGP.02 (M2M eSIM) 和 SGP.22 (Consumer eSIM)：

● SGP.02 (舊版機器對機器標準)：它採用了笨重的“拉取 (Pull)”與點對點集成機制。要為設備更換運營商 Profile，必須由舊網路運營商的 SM-SR 伺服器與新運營商對接交接。在百萬級跨國物流設備面前，由於牽涉到競爭對手之間的商業博弈與極高的技術集成成本，這種方案在全球規模下幾乎是操作上不可行的。

● SGP.22 (消費級標準)：專為智慧手機與手錶設計，它預設設備擁有螢幕 (UI 介面) 和人工交互，由使用者主動掃描 QR 碼或在螢幕上點擊確認來下載設定檔。對於被焊死在集裝箱鐵皮內、沒有螢幕且“無頭 (Headless)”的追蹤器而言，毫無用武之地。

2026 年 4 月，Telenor IoT 正式宣佈其基於 SGP.32 標準的 SIM 卡商業落地，Volvo、Scania 以及 Teltonika 等製造與通信巨頭成為了首批實盤驗證者；KORE 與 Kigen 等平臺也於同期開啓了 SGP.32 組件的交付。

5G RedCap：平衡頻寬與成本的新選擇

在追求高價值、多模態感

知的資產追蹤場景中 (如：冷鏈物流的即時視頻抓拍、高價值醫藥運輸車的密集溫濕度與震動頻率陣列上報)，傳統的 NB-IoT / LTE-M 速率過慢 (僅 Kbps 級別)，而完整的 5G NR 又存在功耗巨大與模組成本高昂 (動輒上百美元) 的致命傷。

就在 LEO 低軌衛星技術普及的同時，5G RedCap (Reduced Capability，輕量化 5G) 也終於完成了從概念驗證向規模化商用 (Scale Deployment) 的關鍵跨越。

作為 3GPP Release 17 引入的核心規範，RedCap 精準地瞄準了“中等頻寬”這一長期被忽視的痛點 (即 Sweet Spot)。全功能 5G 模組通常需要支援至少 100MHz 頻寬 (在 FR1 頻段下) 與 4 根接收天線 (4Rx)。而 RedCap 將最大頻寬暴力裁剪至 20MHz，並將接收天線降至 1Rx 或 2Rx，極大地簡化了射頻前端 (RF FE) 和基帶晶片面積。

更重要的是，RedCap 讓設備可以原生接入 5G SA (獨立組網) 核心網，享受 5G 特有的超低延遲、網路切片與高可靠性特性。

RedCap 產業落地與 eRedCap 展望

步入 2026 年春季，全球主要電信巨頭 (如 T-Mobile、AT&T、Vodafone 等) 均已全

面開啓 RedCap 網路的大規模商用測試與部署，促使硬體生態加速成熟。近期面世的如 Semtech FX86E 等工業級 5G RedCap 數據機，向市場有力證明瞭這一技術在保持高輸送量的同時兼顧了出色的功耗管理。

而在更前瞻的技術層面，基於 3GPP Release 18 的 eRedCap (Enhanced RedCap) 規範正從實驗室走向產品路線圖，其頻寬將進一步縮減至 5MHz，峰值速率限制在 10 Mbps 以內。這意味著在 2026 年下半年到 2027 年，eRedCap 將直接接棒並淘汰現有的 LTE Cat-1 / Cat-1bis 市場，使海量電池供電的低端物流追蹤器 (如單價幾十美元的包裹追蹤標籤) 能夠以毫瓦級的低功耗全面擁抱 5G 時代。

無源物聯網：擺脫電池依賴

長期以來，物聯網追蹤終端的生命週期完全受制於電池容量。對於擁有數百萬個共用託盤 (RTP) 或生鮮周轉箱的物流巨頭而言，傳統的定期更換電池模式不僅是一場吞噬利潤的運維災難 (OPEX)，更面臨著全球日益嚴苛的 ESG 電池廢棄物監管。2026 年，以微能抓取 PMIC (電源管理晶片) 與 5G-A 無源物聯網 (Ambient IoT) 為代表的雙軌技術，正式宣告了“零電池追蹤時代”的到來。

能量收集晶片：從環境中獲取電力

如果說過去幾年的能量收集技術 (Energy Harvesting) 多停留在實驗室概念或極低功耗的單項驗證，那麼 2025-2026 年則是專用能量收集 PMIC 迎來大規模商用爆發的時期。這類晶片的核心任務，是從環境中“壓榨”出每一微瓦的光能、熱能或動能，並將其高效轉化為驅動傳感與通信的穩定電流。

比利時微電子 AEM15820 企業 e-peas，於 2026 年初正式量產並大規模交付了其跨時代的 AEM15820 能量收集專用電源管理積體電路 (PMIC)。這款晶片徹底打破了傳統吸能晶片“只能適應單一環境”的脆弱性。A 現代複雜的物流場景中，單一能源往往不可靠。AEM15820 支援光伏 (PV) 與熱電發生器 (TEG) 雙源同步混合輸入。例如在冷鏈車廂內沒有光線，但晶片可以利用車廂內外巨大的溫差 (熱電效應) 持續汲取能量。EM15820 可最大限度地從室內外環境中提取能量，同時提供靈活智慧的電源管理。它支援在寬輸入功率範圍內從能量採集器進行最大功率點 (MPP) 轉換，確保對各種環境的適應性。

憑藉超低功耗冷啟動功能，它可在極低可用能量下運行，並監控儲存元件的進出功率。其可配置的保護等級、溫度監

圖說：e-peas AEM15820 高效能能量收集電源管理晶片



圖片來源：E-peas

控以及透過 GPIO 或 I²C 的雙配置功能，確保了相容性和控制性。AEM15820 還包含一個 5V 儲能充電器、一個寬範圍穩壓 DCDC 輸出以及一個用於防止能量損耗的運輸模式。晶片能在輸入電壓低至 380mV、輸入功率僅需 3 微瓦 (Microwatt) 的極端苛刻條件下實現自我喚醒 (Cold-start)。這意味著即使在只有微弱月光的深夜港口，追蹤器依然能夠收集足夠的能量來發送心跳資料包。

與此同時，為了配合這種微能收集，MCU (微控制器) 大廠也在底層製程上進行了“極限界流”。例如瑞薩電子 (Renesas) 在 2026 年大規模鋪開的 SOTB (Silicon-on-Thin-Buried-Oxide，薄埋氧層矽) 製程。傳統的矽製程即使在休眠狀態下也有無法避免的漏電流，而 SOTB 製程通過在晶圓層級加入超薄絕緣層，將待機漏電流直接斬斷並壓低至驚人

的 400nA 級別。

當 e-peas 的 AEM15820 配合瑞薩的 SOTB MCU，一個無需任何外接電池、僅靠一塊郵票大小的柔性太陽能板和環境溫差即可實現“10 年免維護永續運行”的高級資產追蹤器便誕生了。

5G-A 無源物聯網：擴大 RFID 覆蓋範圍

除了利用環境物理能源，2026 年供應鏈資產追蹤的另一大殺器是 3GPP Release 18/19 規範中正式落地的 5G-A 無源物聯網 (Ambient IoT)。

傳統的超高頻 (UHF) RFID 標籤雖然廉價且無電池，但其弱點在於讀取距離極短 (通常在 10 公尺以內)，且必須依賴昂貴的手持掃碼槍或固定式門禁通道，無法實現物流節點之間的連續追蹤。

5G-A Ambient IoT 則從根本上顛覆了這一邏輯。它通過環境射頻能量反向散射 (Backscatter) 技術，讓粘貼在包裹或託盤上一張成本不足 0.1 美元的柔性標籤，能夠直接吸收並反射基站或專用激勵器 (Exciters) 發射的 5G 射頻波來傳遞資訊。

在 2026 年中多國落地的 5G-A 智慧倉儲中，標籤不需要內部電源產生射頻信號，而是巧妙地“借用”倉庫頂部 5G 室內小基站發送的連續波。標

籤內部的微型電路捕獲這些電磁波，將其轉化為微小電流啟動內置記憶體，隨後通過改變自身天線的阻抗，將資產資料“調製並反射”回基站。

相比傳統 RFID，5G-A 無源標籤的有效讀取距離延伸到了數十公尺甚至上百公尺，且依託 5G-A 極強的併發處理能力，基站可以在一秒內同時盤點上千個處於快速移動狀態的無源標籤。

ITU-R (國際電聯) 在 2026 年的 IMT-2030 技術前瞻會議上明確指出：“以 5G-A 為底座的無源物聯網，首次在經濟性與廣域覆蓋之間找到了完美的平衡點，它將數百億個原本沉默的一次性快消品與流轉紙箱，正式編織進了全球數位化物流的神經網路中。”

工業 UWB 與 BLE 6.0 Channel Sounding 之間競爭

除了受限於電池續航能力，資產在廠區、樞紐與立體倉庫內的“室內精確定位”一直是產業痛點。產業長期面臨一個兩難的尷尬境地：使用傳統藍牙 (BLE RSSI) 定位誤差高達 3 到 5 公尺，在密集貨架區根本無法區分相鄰的託盤；而使用超寬頻 (UWB) 雖然能做到 714 / 5,000 公分級精準，但其高昂的晶片成本與複雜的射頻設計，使其註定只能服務於極少數的高價值資產。然而，這一僵局

有望在工業級 UWB 的成本下探與 BLE 6.0 Channel Sounding 的問世情況下被打破。

工業級 UWB：複雜環境下的公分級定位

過去幾年，UWB（超寬頻）技術主要因蘋果 AirTag 及智慧手機的採用而在消費級市場大放異彩。但將消費級 UWB 搬到工業物流現場，卻遭遇了嚴重的“水土不服”。滿是金屬貨架、鋼制集裝箱的立體倉庫是無線電波的“地獄”，嚴重的金屬反射會導致嚴重的多徑效應（Multipath Interference），使得傳統的飛行時間（ToF）測距產生巨大漂移。

在 2025-2026 年，以恩智浦（NXP NCJ29D6 系列）和 Qorvo（DW3000 升級版）為代表的半導體廠商，在工業級 UWB 晶片中引入了底層演算法糾錯機制：晶片內置了硬化處理的神經網路降噪演算法，能夠在一堆因金屬反射而雜亂無章的回波中，精準剝離出那條“最直接的視距（LoS）首達路

圖說：Qorvo QM3000



資料來源：Qorvo

徑信號”，即便在金屬干涉極強的環境中，依然能保持 10cm 以內的絕對定位精度。

藍牙 6.0 通道探測：低成本的亞米級（小於 1 公尺）定位精度

就在 UWB 準備大展拳腳之時，藍牙技術聯盟（Bluetooth SIG）在 2024 年底拋出了一枚重磅炸彈——藍牙 6.0 核心規範，並引入了革命性的 Channel Sounding（通道探測）技術。在經過一年多的晶片流片與生態適配後，2026 年上半年，搭載 BLE 6.0 CS 功能的 Nordic、Silicon Labs 及 NXP 晶片迎來了大範圍量產，直接

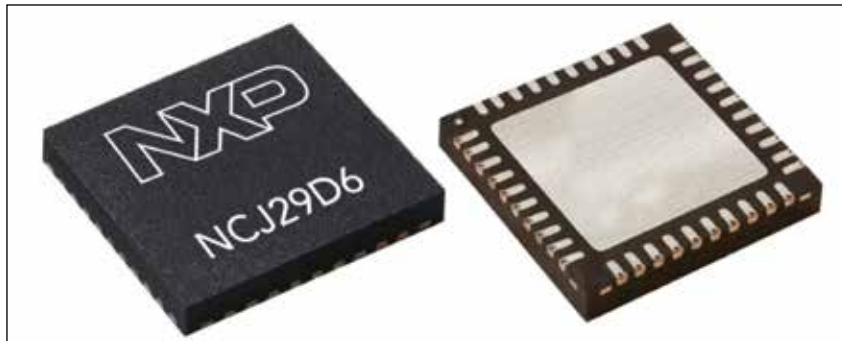
點燃中端資產追蹤市場。

早期的藍牙定位依賴於 RSSI（接收信號強度指示）。其邏輯很簡單：信號越弱，距離越遠。但這極其不靠譜，因為空氣濕度變化、人體遮擋或一個紙箱的阻擋，都會讓信號大幅衰減，導致系統誤判資產距離偏遠了幾公尺。

BLE 6.0 CS 完全拋棄了基於信號強度的玄學，轉而採用了極其硬核的射頻物理測量手段，主要結合了兩種技術：相位測距（PBR, Phase-Based Ranging）：發射端在多個不同的通道（頻率）上連續發送射頻載波。接收端收到信號後，測量不同頻率載波之間的相位差（Phase Difference）。作為輔助與安全校驗機制，系統精確計算信號從發出到對方回應並返回所需的奈秒級時間。

通過 PBR 與 RTT 的雙重校驗，BLE 6.0 CS 僅憑一顆標準的藍牙 SoC 晶片，無需額外增加昂貴的 UWB 射頻前端天線，就直接實現了 $\pm 0.3m$ 到 $0.5m$ （亞米級）的超高精度測距。更為關鍵的是，BLE 6.0 CS 在底層協定中內置了安全距離綁定（Secure Distance Bounding）機制，通過密碼學防禦手段徹底杜絕了駭客利用“中繼攻擊（Relay Attack）”來偽造貨物位置或竊取智能汽車鑰匙的可能性。

圖說：恩智浦（NXP NCJ29D6 系列）



資料來源：NXP

4.3 UWB vs. BLE 6.0 CS 各有所長

微能收集晶片與 5G-A 無源物聯網從根本上清除了阻礙資產數位化的“電池地雷”；而 BLE 6.0 協定的規模化落地，則以一種廉價的方式，賦予了海量邊緣節點敏銳的“空間觸覺”。為接下來 AI 演算法接管並重塑實體供應鏈，鋪平了道路。

多技術融合定位與智慧省電策略

在現實世界的複雜供應鏈中，單一的定位技術無法應對全路徑的挑戰。一個跨國運轉的冷鏈集裝箱，可能會經歷“高

緯度遠洋（只有衛星信號）→ 繁忙海港堆場（蜂窩與 Wi-Fi 信號交織，金屬遮罩嚴重）→ 高速公路運輸（GNSS 高速移動）→ 高密度地下立體倉庫（完全無 GNSS 信號）”等多種極端環境。若全程開啓高功耗的 GNSS 衛星定位，設備電池將在數周內消耗殆盡；而若完全依賴區域網路，則在跨洋階段將陷入漫長的“資料黑箱”。

為了破解這一矛盾，2025 年至 2026 年中，全球頂尖物聯網硬體廠商與晶片巨頭（如 Digital Matter、Semtech 及 移遠通信）全面導入了“GNSS + Wi-Fi 指紋 + BLE 近場 +

蜂窩基站”四位一體的多模態融合定位演算法，並輔以基於物理感知的低功耗有限狀態機 (FSM, Finite State Machine) 機制，實現了全流程無中斷點追蹤與能效的極致平衡。

四位元一體融合定位演算法與場景自我調整

四位一體融合定位的核心在於“按需調用、多源演算法補償”。晶片數位基帶不再死板地按固定時間間隔進行衛星搜星，而是根據邊緣端即時的電磁環境與感測器資料，動態調用最合適、最省電的定位組合：

●室外開闊場景 (GNSS 主導)：

表：兩種核心定位技術深度對比：

對比	工業級 UWB (IEEE 802.15.4z)	BLE 6.0 Channel Sounding (藍牙 6.0)	產業影響
絕對測距精度	公分級 (< 10 cm) 極具穿透力，抗多徑干擾極強。	亞米級 (±0.3m ~ 0.5m) 依賴相位與 RTT 混合測算。	BLE 6.0 的精度已能滿足 80% 以上物流場景（如確認貨箱在具體哪個貨架通道），徹底打破了過去“要麼 UWB 要麼不准”的極端選擇。
硬體成本	偏高 需專屬 UWB 收發器與特殊寬頻天線設計。	極低 複用現有 2.4GHz 藍牙天線架構，僅需晶片數位基帶支援新協定棧。	BLE 6.0 呈現壓倒性成本優勢。使海量中低價值包裹（如快遞袋、普通周轉箱）的高精度追蹤在財務上變得可行。
峰值運行功耗	中高 寬頻脈衝發射瞬間電流消耗較大。	超低 繼承 BLE 優異的休眠與窄帶微功耗基因，極其省電。	BLE 更契合微能抓取 PMIC 架構，更容易實現“光能驅動、永不換電池”的極致設計。
底層防偽安全	極高 基於納秒級不可預測密碼脈衝序列。	極高 內置距離邊界演算法防禦中繼攻擊。	兩者均滿足最新的歐盟零信任數位網路安全合規要求。
2026 核心應用場景	AGV/ 機器人高頻導航、危險化工品精準定位、高度密集的全自動化立體黑燈庫。	共用託盤 (RTP) 盤點、醫藥冷鏈大範圍軌跡感知、貨站門禁無感記錄。	市場格局走向“高低搭配”：基建開道集成 UWB 與 BLE 雙模。

（資料參考：綜合 ABI Research、Counterpoint 2026 年第一季度物聯網晶片成本分析）

當設備處於高速公路運輸或露天貨場時，在開闊天空下優先喚醒 GNSS 模組進行 3—5 公尺級精確定位。

- 港口堆場與密轉樞紐 (Wi-Fi 指紋 + 蜂窩 Cell-ID 補償)：當集裝箱進入高密度金屬堆疊區，GNSS 衛星信號發生嚴重多徑衰減時，演算法自動無縫降級至 Wi-Fi 嗅探 (Scan)。設備只需數毫秒靜默抓取周圍路由器的 MAC 位址與 RSSI，上報至雲端地圖資料庫進行交叉三角定位，即可在室內外過渡區實現 5—10 公尺指級的室內外無縫定位，且功耗僅為 GNSS 搜星的 1/10。

- 立體倉庫與室內高架位 (BLE 6.0 CS / 近場 Anchor)：一旦貨物進入室內轉運庫區，系統切入 BLE 近場測

距模式，利用庫區已有的藍牙錨點或 BLE 6.0 Channel Sounding 協議，實現亞米級的貨架定位。

智慧狀態機：根據運動狀態自動省電

實現極致低功耗的關鍵，在於如何讓設備在 90% 以上的時間裡處 μA 級別的深度休眠，同時又絕不漏掉任何一次關鍵的位置或碰撞變更。這依賴於一套高度精密的低功耗狀態機 (FSM) 切換邏輯：

結語：

2025 年至 2026 年期間，全球資產追蹤技術經歷了大規模的技術升級，迎來新的應用階段：

1. 連接層：低軌衛星 (LEO) NTN 雙模消滅了遠洋與無人

區的全球通信盲區，GSMA SGP.32 eSIM 徹底打破了跨國漫遊與運營商鎖定的傳統藩籬，而 5G RedCap 則以極具競爭力的 BOM 成本接棒中高速物聯網大能。

2. 能源層：以 e-peas AEM15820 為代表的全動態範圍微能抓取 PMIC，配合 5G-A 無源物聯網 (Ambient IoT) 的反向散射技術，正在將數以億計的包裹與共用載具 (RTP) 帶入“部署即遺忘、永久免換電池”的零碳新時代。
3. 定位與演算法層：工業級 UWB 的公分級破局與 BLE 6.0 Channel Sounding 的亞米級降維打擊，結合四位一體多模態融合定位狀態機，使空間感知能力以極低成本滲透至供應鏈的每一個末梢角落。CTA

狀態機運行階段	邊緣感測器與環境觸發條件	啟動的通信與定位模組	功耗與定位精度表現
深度休眠 (Deep Sleep)	6 軸 IMU 檢測到資產處於完全靜止狀態 (如靜止集裝箱、庫房碼放狀態)。	僅留低功耗加速度計與微能 PMIC 心跳保活，主控 MCU 休眠。	微功耗 ($< 5 \mu\text{A}$) 位置不更新，確保零無效上報。
運動啟動 (Motion Triggered)	IMU 檢測到持續位移或震動 (如吊車起吊、卡車啟動)。	啟動低功耗蜂窩基站 (Cell-ID) 快速盲定位，判定位精度 100m—1km，快速確認資產啟運。	低功耗 (毫安培級短脈衝) 斷是否發生大範圍跨區位移。
環境探測 (Environment Scan)	判定處於運動中，RF 前端靜默掃描周圍頻譜信號。	優先掃描 BLE/Wi-Fi 廣播包。若捕獲到密集信號，放棄 GNSS，直接採用 Wi-Fi/ BLE 三角定位。	中低功耗 ($< 15 \text{ mA}$) 定位精度 5—10 公尺，避免室內無效搜星耗電。
高精度校準 (GNSS/UWB Burst)	RF 探無局域信號，且 IMU 顯示處於室外勻速移動，或到達關鍵地理圍欄 (Geofence)	短暫開啓 GNSS 快捕 (A-GNSS) 或 UWB 脈衝進行高精度絕對位置校準。	短時峰值功耗 ($\sim 50 \text{ mA}$) 定位精度 < 3 公尺，校準後迅速回退至休眠。

(資料參考：綜合 Semtech、等機構硬體實測能效評估報告)

AI 如何改變物流與資產追蹤

編輯部整理

引言：從獲取資料到消費資料

資產追蹤產業正在進入由邊緣 AI、雲端 AI 與物理 AI 共同驅動的新階段。真正的技術價值不僅在於獲取資料，更在於如何利用資料做出決策。

AI 技術的融合與實際應用

AI 在資產追蹤領域的應用，不是簡單的增加一個對話介面，而是從邊緣到雲端，再到對物理世界的理解，完成了一套完整的架構演進。

邊緣 AI(Edge AI)：TinyML 與資料降採樣

在物聯網領域，一條基本的物理規律是：通過射頻天線發送 1 比特資料的能耗，通常是在本地微控制器 (MCU) 內執行上千次運算能耗的數百倍。這一規律在 2026 年推動了 Edge AI (尤其是 TinyML) 在資產追蹤終端的廣泛應用。

傳統的追蹤器是簡單的資料搬運工。例如，一台監控精密儀器的防震追蹤器，其內置的 6 軸加速度計會以每秒數百

次的頻率持續採集震動資料。如果將這些原始資料全部通過 5G RedCap 或衛星傳回雲端，不僅需要消耗大量頻寬，設備電池也會在短時間內耗盡。

TinyML 的端側自主決策：

2026 年，以意法半導體 (STMicroelectronics) 的 STM32N6 系列 (內嵌神經處理單元 NPU) 以及 Nordic 低功耗 SoC 為代表的邊緣算力晶片，將精簡的機器學習模型 (TinyML，模型大小通常只有幾十到幾百 KB) 直接部署到追蹤器的本地記憶體中。

— 智慧資料降採樣 (Smart Data Downsampling)：設備在本

地以 200Hz 的頻率採集原始波形，但不上傳原始資料。本地的 TinyML 演算法利用羽量級神經網路 (如一維卷積神經網路 1D-CNN 或隨機森林) 即時提取波形特徵，判斷當前的震動是正常的卡車引擎怠速抖動，還是異常的叉車裝卸摔落。

— 從傳資料到傳結果：當判定為正常震動時，設備靜默記錄；一旦識別出特定的“破壞性衝擊事件”，設備才喚醒射頻模組，向雲端發送一條精簡的語義結論 (例如：“警告：在座標 X/Y 處發生 8.5G 的垂直跌落事件，置信度 99%”)，並附帶跌落瞬間

圖說：AutoTrak 公司使用 STM32N6 建立的貨車司機行為追蹤系統



前後的 2 秒關鍵波形切片。

權威機構的報告顯示，採用 TinyML 端側異常識別技術後，新一代工業級追蹤器在保持異常事件捕獲率的前提下，無效資料上報流量減少了 85% 至 92%，設備續航時間顯著延長。Edge Impulse 的 CEO 在近期的訪談中表示：“2026 年最好的物聯網傳輸協議，就是減少傳輸。在無網或弱網環境下，賦予邊緣節點自主決策能力，是實現永續供應鏈追蹤的有效途徑。”

雲端 AI(Cloud AI)：ETA 預測與全鏈路優化

如果說邊緣 AI 的任務是“資料過濾與局部感知”，那麼雲端 AI 的核心使命則是“全域時空挖掘與時效預測”。在全球供應鏈中，承運人與貨主最關心的指標是預計到達時間 (ETA, Estimated Time of Arrival)。

過去，ETA 的計算較為粗放，往往基於固定的航線時刻表加上簡單的距離除以速度。然而，真實的物理世界充滿變數：蘇伊士運河通行受阻、巴拿馬運河乾旱限行、港口工人罷工、暴風雪災害等，任何一個因素都會讓傳統的 ETA 失效，引發下游工廠停工。

2026 年基於大模型的 ETA 預測系統：

過去一年半，隨著雲端

算力基礎設施的發展，頭部供應鏈平臺（如 Project44 聯合 Google Cloud 等）將生成式 AI 與海量時空軌跡分析結合，推出了新一代 Predictive ETA（預測性到達時間）系統。

這一系統將多維特徵流持續輸入雲端的時空圖神經網路 (Spatio-Temporal GNN)：

1. 資產硬數據：數百萬個集裝箱追蹤器傳回的即時座標、移動速率與滯留狀態。
2. 基建軟數據：全球各大港口碼頭作業系統 (TOS) 的即時擁堵指數、泊位排隊船舶數量、內陸鐵路轉運站的底盤車 (Chassis) 可用率。
3. 宏觀環境變數：全球高解析度氣象預測模型資料、即時洋流風向，以及結合 NLP（自然語言處理）技術從全球新聞中抽取的“地緣衝突與罷工情緒指數”。

通過這種全域特徵的融合計算，雲端 AI 能夠發現人類難以察覺的非線性關聯。

物理 AI (Physical AI)：數位孿生與智慧控制塔

2026 年科技界關注的概念之一是“物理 AI (Physical AI)”（由 NVIDIA 等算力巨頭在 2026 年初的行業大會上重點推廣）。物理 AI 強調 AI 模型必須理解和遵循真實物理世界的重力、空間拓撲、動力學以及時間連續性。在資產追蹤領域，物

理 AI 的落地形態是供應鏈數位孿生 (Supply Chain Digital Twin) 與智慧控制塔 (Control Tower)。

傳統的供應鏈控制塔大多是一個靜態的 BI（商業智慧）儀錶盤，用紅綠燈顯示貨物狀態，且滯後於物理現實。而 2026 年的物理 AI 控制塔，是建立在千萬個邊緣追蹤節點即時資料基礎上的全景模擬與編排引擎。

系統在雲端 1:1 構建了一個三維數字世界。每一條行駛在大西洋上的貨輪、每一輛在公路上行駛的冷鏈卡車、每一個堆疊在倉庫深處的智慧託盤，都在雲端擁有同步移動、同步感知溫度與震動的數位分身。

基於物理 AI 的空間計算與物理模擬能力，這個數位孿生控制塔具備了“假設性 (What-if) 沙盤推演”功能。

當系統捕捉到某港口突然發生擁堵時，物理 AI 會在虛擬沙盤中生成數千條平行的應對策略進行演練。如果將這批集裝箱緊急在另一港口卸貨，然後通過鐵路轉運，沿途的氣溫是否會導致醫藥產品超溫？鐵路轉運的額外成本與延誤的違約罰金相比，哪種方案的總體財務量化資料更優？沙盤推演完畢後，控制塔輸出最優的物流路由重新規劃 (Rerouting) 指令，並自動派發給承運商系統。

得益於全程視覺化與精準預測，企業不再需要因為“擔

心貨物丟失或晚到”而堆積高額的安全庫存 (Safety Stock)。當整個企業的物流調度、財務理賠甚至碳稅核算都依賴於這些 IoT 追蹤終端時，一個潛在風險暴露出來：如果注入雲端 AI 的底層資料從一開始就被篡改或偽造呢？

截至 2026 年 8 月，隨著歐盟《網路韌性法案》(CRA) 進入強制執法階段，資產追蹤行業開始重視零信任安全。同時，AI 在接管控制塔後，正從“僅提供建議”的預測階段，向能夠自主談判、自主改簽的 Agentic AI (代理人工智慧) 方向發展。

網路安全與零信任硬體 (應對歐盟 CRA 法案)

物流資產追蹤的硬體設備常年暴露在不可控的環境中——它們可能散落在偏遠港口、公路驛站，甚至落入貨物盜竊團夥手中。這種物理暴露使得傳統的基於軟體密碼的網路防禦體系面臨挑戰。

在 2024 至 2025 年間，針對高價值供應鏈的“資料投毒 (Data Poisoning)”與“感測器欺騙 (Sensor Spoofing)”案件明顯增多。例如，跨國醫藥盜竊團夥利用軟體定義無線電 (SDR) 設備，對承載高價疫苗的冷鏈卡車實施 GPS 信號欺騙，讓雲端控制塔誤以為卡車仍在既定路線上行駛，而實際上車輛已被劫持。在另一些

案件中，不法承運商為了逃避冷鏈失溫導致的違約金，通過物理手段破解追蹤器，修改本地快閃記憶體中的溫度歷史記錄，以此騙取保險理賠或向貨主掩蓋藥品已失效的事實。

面對 IoT 終端安全問題，歐盟在 2024 年底通過了《網路韌性法案》(CRA, Cyber Resilience Act)，並在 2026 年初進入過渡執法期。CRA 法案規定，所有帶有數位元元素的硬體產品 (特別是直接接入網路的工業級 IoT 終端)，在進入歐洲市場前必須具備“默認安全 (Secure by Default)”與“設計安全 (Secure by Design)”的資質。如果因設備安全性漏洞導致資料洩露或供應鏈基礎設施癱瘓，設備製造商將面臨高達全球營業額 2.5% 或 1500 萬歐元的罰款。

歐洲網路與資訊安全局 (ENISA) 執行主任在 2026 年 3 月的布魯塞爾網路安全峰會上向全球硬體廠商表示：“在物理 AI 統治供應鏈的時代，資料就是決策本身。如果不能在硬體層面保證感測器資料的完整性與不可抵賴性，那麼雲端的大模型和數位元孿生，也只是建立在不可靠基礎上的虛像。”

為了跨越歐盟 CRA 的合規門檻並防範資料篡改，2025 年至 2026 年，全球資產追蹤硬體廠商開始從單純依賴軟體加密的架構，轉向引入獨

立硬體安全元件 (SE, Secure Element) 與物理不可克隆功能 (PUF, Physically Unclonable Function) 晶片。

以恩智浦 (NXP) 的 EdgeLock SE050 升級版以及英飛凌 (Infineon) 的 OPTIGA Trust M 系列為代表的安全晶片，已成為高端資產追蹤器的標配。這種硬體級零信任架構的運作邏輯如下：

首先，PUF 技術利用半導體製造過程中的微觀物理差異，為每一台追蹤器生成一個獨一無二、且無法被讀取或複製出矽片外部的底層私密金鑰。即便是追蹤器的製造廠商或雲平臺管理員，也無法知道這個私密金鑰。

其次，當設備邊緣端的感

圖說：NXP EdgeLock SE050 晶片



資料來源：NXP

圖說：Infineon OPTIGA Trust M 晶片



資料來源：Infineon

測器 (如溫度計、IMU 震動感測器、GNSS 模組) 採集到資料後, 資料流程會直接送入獨立的 SE 安全晶片中。SE 晶片利用 PUF 生成的底層私密金鑰, 在晶片內部的隔離 "安全飛地 (Secure Enclave)" 中, 對每一條溫度記錄和座標打上不可篡改的加密數位簽章 (Digital Signature), 然後再通過蜂窩網路發送至雲端。

在這個閉環中, 任何試圖在外部匯流排上截獲並修改溫度資料的行為, 或者試圖用模擬器偽造 GPS 座標的欺騙攻擊, 都會因為無法生成匹配的數位簽章而在雲端驗證時被識別。通過這種 "硬體加密上鏈" 的機制, 企業不僅符合了歐盟 CRA 的要求, 更確保了給物理 AI 進行沙盤推演的資料是真實、可信且具有法律審計效力的。

預測性韌性 (Predictive Resilience)

2025-2026 年的地緣政治

變化中, 海峽封鎖、港口罷工以及極端氣候帶來的斷航事件頻發。物流業界意識到僅僅做到 "全域可視" 是不夠的, 必須走向 "預測性韌性 (Predictive Resilience)"。

傳統供應鏈的回應機制是一種 "事後補救 (Reactive)" 模型。當貨輪被堵在蘇伊士運河外, 或者集裝箱已在中轉港口被錯誤堆放三天, 控制塔才會亮起紅燈。此時, 交期延誤已成為事實, 供應鏈經理只能向客戶道歉、支付違約金, 並花費高額運費緊急包機補發貨物。

在 2026 年由多模態 AI 驅動的 "預測性韌性" 模型下, 這種情況被提前阻斷。得益於 "千萬級無源 IoT 節點" 與 "低軌衛星全天候推流" 技術, 雲端圖神經網路 (GNN) 如今擁有了細顆細微性的即時物理坐標系。當這些軌跡資料與全球海關政策變動、港口氣象雷達以及新聞情緒監控 (NLP) 模型結合時, AI 便具備了 "事前規避

" 能力。

Agentic AI 與零碳無源 IoT

在未來三年內, 兩大趨勢將改變行業的操作方式。

在當前的預測性控制塔中, AI 的角色是 "顧問" —— 它負責收集資料、發現危機、計算方案並給出建議, 但最終在系統中點擊確認、發送改道郵件、向承運商談判運費動作的, 依然是人類調度員。

然而, 自 2026 年年中開始, 隨著大模型推理能力的提升, 行業正向 Agentic AI (自主代理人工智慧) 方向發展。

在 Agentic 時代, AI 不僅擁有 "眼睛" 和 "大腦", 更被賦予直接作業系統與商業談判的 "手腳"。當未來的智慧醫藥冷藏箱探測到乾冰即將耗盡時, 它將不再只是向雲端報警。嵌入控制塔的 Agentic AI 將作為一個獨立的數位元代理, 自主運行一套複雜的邏輯流:

它會自主登錄航空公司的

表：2026 供應鏈追蹤終端安全架構演進對比中：安全防禦

安全防禦維度	傳統軟體加密架構 (Pre-2025)	零信任硬體 SE/PUF 架構 (2026 歐盟 CRA 合規版)	防範價值
金鑰存儲機制	存儲於主控 MCU 的普通快閃記憶體中。易通過物理探針或固件提取被駭客攻破。	PUF 矽片指紋。金鑰在設備斷電時消失, 通電時利用物理特性即時重建, 實體層面上無法提取。	杜絕設備被惡意克隆, 防止駭客偽造假設備向雲端發起資料污染攻擊。
感測器資料防偽	僅在網路傳輸層 (TLS/SSL) 加密。本地資料產生到發送前仍為明文, 可被攔截篡改。	端到端硬體數位簽章。溫度與座標在生成的微秒內即被 SE 晶片打上專屬防偽印記。	防止 "篡改溫度逃避理賠" 的行為, 確保醫藥冷鏈溯源檔案具備法律效力。
OTA 固件升級	驗證機制較弱, 易被植入惡意木馬, 淪為發起 DDoS 攻擊的跳板。	基於信任根的硬體安全啟動 (Secure Boot)。非官方簽名的任何底層代碼將被物理拒絕執行。	滿足 CRA 法案對設備生命週期內安全補丁更新的監管要求。

貨運 API 介面，比對當天所有可用的艙位；它能通過自然語言或 EDI 與機場的地勤系統進行「機對機 (M2M)」交互，自主下單並支付費用，雇傭一輛冷鏈轉運車前往停機坪進行搶救；它甚至可以根據最新的電子合同條款，自動生成理賠報告併發送給保險公司的自動化定損系統。

NVIDIA 創始人黃仁勳 (Jensen Huang) 在近期的產業對話中指出："Agentic Workflow (代理工作流) 將是工業數位化的重要方向。未來的供應鏈不再需要人類坐在螢幕前去點擊按鈕應對異常。海量的智慧硬體將與自主 AI 代理對話，它們會在人類休息的時候，修復那些即將斷裂的物流鏈條。"

零碳無源 IoT 與碳交易體系

隨著技術與商業模式的成熟，合規性將在 2026 年之後成為主導硬體架構的重要推手。正如前文分析的，歐盟的 DPP (數位化產品護照) 只是一個開始。

隨著全球碳邊境稅 (CBAM) 與 Scope 3 (價值鏈上下游間接排放) 審計常態化，2026 年之後，任何帶有電池且生命週期結束後面臨回收成本的傳統追蹤器，都將面臨市場壓力。

以 5G-A 環境射頻能量收集和微光能 PMIC 為核心的「零碳無源 IoT」，將與全球碳交易與綠色金融體系進行綁定。未來的每一個木託盤、每一個共用周轉箱，其內置的無源標籤不僅僅是在上報軌跡，更

是在即時生成經過零信任晶片加密的綠色數位資產。企業不僅能通過精確的里程換算免除環境稅，甚至可以通過向碳交易市場出售經過驗證的減排額度，將資產追蹤從「合規工具」轉化為「綠色收益來源」。

結語：物理世界的數位元化

「萬物互聯」這一概念，正在與物流與資產追蹤產業結合。從被動的靜態記錄，到中途的動態介入，再到未來自主協商的 Agentic AI。物流與資產追蹤產業已跨越了僅僅回答「貨物在哪裡」的階段。它正在將數以億計的集裝箱、託盤與卡車，編織成一個具備感知、修正與思考能力的有機網路。

CTA

國海院發布 MDImageNet 高品質海廢資料集啟動海廢辨識國際 AI 競賽

為提升海洋垃圾監測效率並加速海洋治理數位轉型，海洋委員會國家海洋研究院 (下稱國海院) 近日發布全臺首套 AI-Ready「MDImageNet 海廢影像資料集」，同步啟動「2026 海廢影像辨識國際 AI 競賽」。本次活動由海洋委員會指導，Amazon Web Services (AWS) 提供 AI 技術支持與雲端服務資源，工業技術研究院 Aldea 人工智慧共創平臺負責競賽執行，透過資料集開放與國際競賽雙軌推動，攜手產官學研共同發展海洋垃圾智慧辨識技術，打造海洋治理數位公共基礎。

國海院表示，海洋垃圾會隨海流跨境漂移，臺灣海岸同時承受在地與境外海廢累積，傳統海岸調查須仰賴大量人力進行撿拾、分類、量測、拍照及登錄，後續仍需耗費時間整理照片、核對資料與統計分析，效率有限且不易維持一致的判讀標準。為提升監測效率，國海院歷時多年建置 MDImageNet 海廢影像資料集，目前已累積超過 2 萬張真實海岸影像，完成逾 4.2 萬個海廢物件標註，建立符合 AI 模型訓練需求的高品質資料集。資料集以國際淨灘行動 (ICC) 分類為基礎，進一步建立 NAMR 三層級分類架構，兼顧國際接軌與國內調查需求，並依循《人工智慧基本法》推動資料治理、資料開放、共享及再利用方向，以 CC BY 4.0 授權釋出，提供研究機構、教育單位及產業界共同投入海洋 AI 創新應用。

國海院指出，透過公私協力與國際社群參與，逐步建立從資料、模型到治理應用的海洋科技生態系，讓 AI 成為提升海洋調查效率、支援科學決策及守護海洋環境的重要力量。