刚性波形流形原生感通一体（续）：共口径扫描头的窗口与结构、主机加僚机的机群、移动山势场控制、同一束光的视频回传与无线备用

性质：技术公开（防御性公开）
署名 / 发表方：V131 Lab
首次公开日期：2026-11-03
前序公开：DP01，DOI 10.5281/zenodo.23420482（2026-10-16）。本文沿用 DP01 的术语：流形（manifold）、看（本机回波）、听（直射光）、运动状态张量、势场、场表。
领域：相干光测距（FMCW 及同类）、自由空间光通信、感通一体（ISAC）、光束扫描与云台结构、无人机、自动驾驶、机器人、机群。

本文公开的是一族系统和方法。每个编号段落写一种做法及其各种替代形式。除非某段另有说明，任何一种做法都可以和其他做法、也可以和 DP01 中的任何做法组合；文中列出的每一种替代、每一个数值范围、每一种组合都属于本次公开的内容。

（本中文稿与 DP03_EN 逐段对应，发表以英文稿为主、中文稿同时发表。）

---

1. 共口径扫描头的窗口斜装

1.1 问题：同一只准直器既发又收（DP01 第 9.2 节）时，保护窗口的表面反射（增透后例如 0.1 % 到 1 %）是出射光的一部分。窗口垂直于出射光时，这道反射原路回到准直器，再经环形器进入接收端，比目标回波强很多。接收光路上的可调衰减器把它和回波一起衰减，两者的比例不变，所以衰减器解决不了。

1.2 做法：让窗口在扫描范围内的任何出射方向上都不垂直于光束。窗口法线相对扫描中心轴的倾角 θ 大于该轴的最大光学扫描角加一段余量（余量例如 1° 到 15°，比如 5°），使法线落在扫描方框之外。例如每轴光学 ±15° 时斜约 20°，±25° 时斜 30° 以上；θ 可取 3° 到 60°。

1.3 倾斜方向：两轴扫描时，沿离窗口较近的那片反射镜的扫描方向倾斜。光束在这个方向上扫过窗口的范围窄，窗口加大得少。法线放在这一轴的方框之外、另一轴的零位上时，倾角不必按方框对角线计算。

1.4 窗口尺寸与镀膜：倾斜方向上的尺寸按 1/cos θ 加大。增透膜按实际入射角范围设计，不按 0° 设计，例如倾斜 20°、扫描 ±15° 时入射角范围约 5° 到 38°，按 20° 设计，S、P 两个偏振都做到反射率不高于 0.5 %。

1.5 反射光的去向：斜装不减少反射量，只让反射光回不到光纤。光纤的耦合角度容限约等于模场半径除以准直器焦距（例如 5.2 μm / 35 mm，约 0.15 mrad），只要偏开这个量级就进不了接收端。反射光引到壳体内的吸光面，不打回反射镜。

1.6 扫描限位与倾角配套：把扫描驱动器的增益定标，使主机板模拟输出的满量程正好对应最大光学扫描角（例如单端 ±10 V 对应光学 ±15°），再加软件限位。这样硬件上也扫不到窗口法线的方向。放开扫描范围时要同时加大倾角。

1.7 变体：楔形窗；曲面窗口的曲率中心偏离光束枢轴；一块窗口对应两个以上出射口；石英、BK7、蓝宝石等材料，厚度 1 mm 到 10 mm；1,310 nm、1,550 nm、2,000 nm 波段；扫描器为振镜、MEMS 镜、光学相控阵或 Risley 棱镜。

2. 胶囊形两轴扫描头的结构

2.1 外形：扫描头在俯仰方向只绕一根轴转动，壳体做成胶囊形（一段圆柱加两端半球，圆柱轴线沿俯仰轴），不做成圆球。相同内容物时胶囊比圆球矮，例如外径约 100 mm、长约 140 mm 到 170 mm；窗口贴在胶囊面上，不需要内凹。

2.2 内骨架：扫描器和准直器都固定在一块内骨架上，不靠外壳定位。外壳分成两半，把内骨架合在里面。俯仰轴穿过扫描头的重心，偏差例如不超过 3 mm；偏了就改轮毂或加配重。

2.3 驱动板位置：扫描器的驱动板不进头部，放在方位平台上随方位一起转动，头部因此变轻，俯仰和方位的电机扭矩要求都降低。平台下方通风，不封闭。

2.4 走线：电源线、信号线和光纤两头都带接头，接头不能剪掉，所以走线路径上不留封闭孔。做法是壳体分两半，平台和底座的缺口开到板边，叉臂用开口槽加盖板，俯仰轴承只起支撑作用、不穿线；线和光纤在壳与叉臂之间、在方位电机外面绕圈，留够行程余量。方位行程有限（例如 ±160°），不用滑环。

2.5 独立成套、底座通用：每个扫描头是独立的一套，有自己的底座、线和驱动板，底座安装孔位通用，不做死在某一种载具上。一台载具可以装 1 到 8 个头，各头负责不同方向。装到车上时同一套件正过来放。

2.6 装在机腹下方：无人机上的扫描头全部装在机腹下方，整个下半球不被遮挡。起落架留够高度（例如机腹以下约 200 mm），起落架腿挡到的方位写进程序禁区。起降时把俯仰转到窗口朝上，减少扬尘落到窗口上。

2.7 不靠卫星导航的自主飞行：卫星导航不可用或不用时，由同一束光打地面得到的对地距离和对地运动状态作为飞行依据，交给飞控（DP01 第 10.1 节）。同一时刻扫描器只覆盖一个有限方框（例如 30° × 30°），下视和前视之间分时调度，或者由不同的头分担。这同一束光在下视和前视时都继续携带载荷。

2.8 变体：圆球、圆柱或扁平外壳；金属、塑料或 3D 打印件；三轴云台；载具为无人机、地面车辆、船舶或机器人；驱动板放在头部或机身内。

3. 少数主机加多数僚机的机群

3.1 两种节点：主机带本文和 DP01 所述的相干光收发，同时带无线发射。僚机没有相干光收发，只带无线接收和飞控或线控接口。整个机群里主机是少数，例如 50 架里有 2 到 10 架，比如 6 架；比例可以从 1 : 2 到 1 : 100。

3.2 组场、一架发：主机之间把各自新看到的几条运动状态记录互相传送，用无线短包或光都可以。主机里约定的一架（例如编号最小的）把自己看到的和收到的并成一张场，以每秒 f 次广播整张场（f 取 1 到 100，例如 10）。这一架停发超过一段时间后，由下一个编号接着发。无线信道上因此只有一张整场加主机之间的短包，占用不随主机数量明显增长。主机之间用光互送时，无线信道上只剩这一张场。

3.3 场是活的：场不是一张按条论新旧的数据表。每座山（每架机）在两次被看到之间，按它的运动状态张量往前外推，主机看到一次就校正一次。僚机拿到场之后，在两张场之间同样外推。

3.4 僚机的飞行：僚机只按收到的这张场沿谷底走（DP01 第 10.2 节、本文第 4 节），和主机、和其他僚机都不需要连接、配对或握手。广播不要求确认、不重发，丢包由下一张整场补上。每张场带序号和带密钥的鉴权标签（例如 HMAC），防伪造和防重放。一条运动状态记录例如 16 到 64 字节。

3.5 急停靠场扩散：一架机停下或急停，这件事体现在它那座山的运动状态里，主机看到后进场，全群从场里知道，不需要另外发急停命令（DP01 第 10.3 节）。

3.6 主机数量与位置：主机按初始位置尽量分散选取，也可以随机选取。主机数量按「任意去掉一架主机后，僚机手里邻机记录的新鲜度和冲突的预警时间仍满足要求」来定。主机本身和僚机一样飞行，也可以专门摆到高处或地面。

3.7 变体：无线为 Wi-Fi、无连接的 Wi-Fi 帧广播（例如 ESP-NOW 一类）、蓝牙、UWB、Sub-GHz 或蜂窝；广播改由光发出；僚机额外带小型传感器，或者也发送少量自身状态；全群分区、每区一张场；固定基站或地面站担任主机；无人机、车辆、机器人和船舶混编。

4. 移动山势场控制

4.1 山的定义：别的载具或物体是势场上的一座山。这座山大小有限（等于它自己的外形或投影面积，可加一圈余量），是场上最高的，跟着它的运动状态张量走（画在它要去的路上，按速度、加速度等外推）。不是载具要走的路上处处是山，也没有固定的山；固定不动的只有墙等静止结构。

4.2 地形：势场的底是沿可走区域到目的地的路程，而不是到目的地的直线方向，就像水往低处流。这样在墙前不会形成局部的坑。

4.3 一张场、一套规则：所有载具用同一张场、同样的规则和参数，各自沿谷底走，就像水流过石头。不另外加次序、先后或协商规则。相遇时通过同一条通行偏向（例如都往同一侧让）自然互补，不是各躲各的。

4.4 安全检查覆盖「刹到停」的全过程：对当前时刻起刹到停止的整段时间，检查移动的山会不会撞上来，不只检查按当前速度开过去的情况。载具外形、制动和加速能力使用真实载具的数据。制动和控制足够好时，载具之间的净距可以很小。

4.5 控制出口：谷底方向翻译成标准设定值（速度、或加速度加航向、或姿态加推力），经标准接口交给飞控或线控底盘，飞控固件不改，姿态稳定、混控和失控保护仍由飞控负责。势场计算放在感知模块一侧。

4.6 按目标类型定山的大小：目标的类型（例如人、车、木头、飞行器）由 DP01 第 9.3 节所述的偏振比等物理观测量和运动状态判断，不同类型使用不同的山的大小和余量。

4.7 变体：山的形状为高斯形、硬边界或任意单调形；一张场覆盖二维平面或三维空间；场由本机独立生成，或由第 3 节的主机广播，或两者融合；用于无人机、车辆、机器人、机械臂和船舶。

5. 同一束光的视频回传与无线备用

5.1 视频回传：主机板上除了连接飞控或上位机的网口之外，再设一个网口连接摄像头或录像机。压缩视频（例如 H.264 或 H.265，每路 1 到 50 Mbit/s，常用 3 到 8 Mbit/s）按流

形写入发射状态队列，作为流形的载荷发出（DP01 第 2 节）。同一束光继续感知，不为视频另开时隙、通道或光路。

5.2 用法：一架无人机前出拍摄，把视频经激光传回另一架或地面站；中间机可以转发；风电场、园区等场地内组成光网回传。

5.3 无线模块三档：板上的无线模块（例如 Wi-Fi 6 加蓝牙）由处理器控制，分关闭、只收、收发三档，上电默认关闭。需要时发，不需要时静默。

5.4 就近接入与低速备用：无线模块用于手机、手持控制器等就近接入，也用于光路被挡时的低速备用，传运动状态、控制量和少量数据，不当高速通道。例如连续 M 个流形失锁时切到备用，重新锁定后回到光路。

5.5 感知备用：雾、烟等把光路切断时，由毫米波雷达接管感知，无线备用继续传输，光路恢复后切回。

5.6 变体：视频改为其他传感器数据；摄像头经 USB、MIPI 或光纤接入；多路视频按优先级分配载荷；备用链路为蜂窝、卫星或 Sub-GHz。

6. 组合举例

6.1 一架主机无人机：机腹下方装一个第 2 节的胶囊形扫描头，窗口按第 1 节斜装；前视看邻机，下视打地面（2.7）；把场按第 3 节广播给僚机，自己按第 4 节飞行；第 5 节的摄像头视频经同一束光传回地面站。

6.2 一个 50 架的机群：其中 6 架是主机，44 架是僚机；僚机只收第 3.2 节的那一张场，按第 4 节沿谷底走；一架主机停发时由下一架接替。

6.3 一组车辆：车顶装第 2.5 节的通用底座扫描头，按第 4 节行驶，互相之间按 DP01 第 2 节交换数据；光路被挡时用第 5.4 节的备用，雾中用第 5.5 节的雷达。