

用刚性波形流形在一束相干光上做原生感通一体：系统架构、同步、整单元判决、加键、光束指向与控制接口

性质：技术公开（防御性公开）

署名 / 发表方：V131 Lab

首次公开日期：2026-10-16

领域：相干光测距（FMCW 及同类）、自由空间光通信、感通一体（ISAC）、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 DP01_EN.md 逐段对应，发表以英文稿为主、中文稿同时发表。）

1. 刚性流形（manifold）作为发射单元

1.1 发射机发出一串发射单元。每个单元（一个 manifold，流形）是从一本收发双方事先共有的波形书里取出的、定长的 N 个复数样点。同一套系统里 N 固定，例如 N 取 32 到 65,536 之间，比如 256、512、788、1,000、1,024、2,048 或 4,096。

1.2 流形当作一个刚性整体：每个样点在单元内的相对坐标（序号、时间、相位）固定不变。接收、判决、认身份、反馈、改配置都以整个单元为单位；不把单元拆成小段分别判决，也不把不同单元的样点拼在一起判决。

1.3 书可以是任何复波形：线性或非线性扫频（啁啾）、阶梯形或样条形的频率 / 电流轨迹、相位编码序列、伪随机复序列、多音组合、带限随机波形，或它们的任意组合。书可以是实数（一路驱动），也可以是复数（I、Q 两路驱动，或两个偏振）。

1.4 采样率例如每秒 1,000 万到 1,000 亿个样点；单元时长例如 100 ns 到 10 ms。

2. 载荷就是流形（Manifold is payload，原生感通一体）

2.1 同一个发出的流形，在同一束光、同一个波长、同一段时间里，同时用于感知和通信；感知和通信不按时间、频率、码、偏振、光束或工作模式分开。

2.2 载荷由整条流形的几何携带：发射机从一组登记好的整流形状态里选出一个，选择本身就是载荷；接收机判断到达的是哪一个整流形状态。

2.3 登记状态的一种构成办法：在整个流形序号上定义一个扰动图样，叠加到书上。图样可以是 K 个基函数的加权和（ K 取 1 到 N ），每个权重取 L 档之一（ L 取 2 到 64）。基函数例如余弦、正弦、勒让德、切比雪夫、沃尔什 / 哈达玛、小波、长椭圆

函数、书的主成分，或任意正交 / 非正交函数组；扰动可以加在相位、幅度、瞬时频率或频率 / 电流轨迹上；在整个流形上取常数的那个基函数可以不放载荷。

2.4 给所有状态的最大扰动设一个上限（域界），用它在「每流形比特数」和「对器件、信道缺陷的容忍度」之间取舍，例如最大相位偏移 0.1 到 3.14 rad，比如 0.85 rad 或 1.57 rad。

2.5 同一本书上可以定义几个容量档位，运行时切换，例如每流形 1 到 4,096 bit，比如 12、24、60、120、240 或 480 bit；远距离、信道差或用便宜器件时用低档，近距离或器件好时用高档。

2.6 可以在一个流形内或跨几个流形加纠错码（例如 Golay、BCH、里德-所罗门、LDPC、极化码）；可以加一道置信门，判出的单元和所判状态拟合不好时不交付。

2.7 感知：接收目标反射回来的同一个流形。发射方知道自己发的是哪个状态，所以远端接收机当作载荷去读的那一个回波，本机同时用来得到距离和目标的运动状态。和另一台机通信：对方收到直射光，判出载荷，同时从同一束直射光得到发送方的运动状态。本机回波（「看」）按 $1/R^4$ 衰减，直射光（「听」）按 $1/R^2$ 衰减，所以机与机之间听得到的距离比看得到的远。

3. 同步钉：公共锁相钉与身份钉（Firstnail）

3.1 每个流形的一个固定序号上（例如序号 0），系统里所有机器都加一份额外光强，这就是公共钉。做法是在那个序号上给驱动信号或光强包络乘一个增益，书的数字样点和编码都不变。公共钉给出整个流形的帧位置、定时、相位基准和频率基准，在整个会话里一直保留。

3.2 每台机另有一个身份钉，位置在登记的序号 $k = n$ ($1 \leq n \leq N-1$)，还可以带一个登记相位 ϕ 。接收方从身份钉的位置和相位认出是哪一台机发的，不需要问答、也不需要身份报文。连续 M 个流形认出同一个身份才算认定（ M 取 1 到 16，例如 2）。

3.3 顺序：(a) 锁住公共钉；(b) 对整个流形做判决（第 4 节）；(c) 从身份钉确认身份；(d) 在某个整流形边界撤掉身份钉的额外光强，公共钉保留。

3.4 捕获阶梯：锁住之前，发射方把公共钉的增益一档一档往上加，例如 $\times 1.25$ 、 $\times 2$ 、 $\times 4$ 、 $\times 5$ 、 $\times 6$ 、 $\times 6.5$ 、 $\times 8$ 、 $\times 10$ ，每档持续 1 到 64 个流形，档与档之间隔 1 到 1,000 个流形。接收方把超过捕获门限的最大接收幅度（或最大 $|y|^2$ ）所在的样点序号锁存下来，之后按 N 个样点的周期飞轮保持。锁住以后发射方把钉降回标称增益；锁由飞轮和整流形判决维持，降钉不丢锁。

3.5 捕获门限由实测接收电平定，例如一个流形周期内最大 $|y|^2$ 再加一点余量；锁住后把门限降下来用于保持。

3.6 防假钉的候选顺序：如果幅度锁存可能被干扰脉冲骗过，接收方按幅度从大到小依次试候选钉位，第一个能让整流形判决通过的为准。

3.7 变体：每个流形 1 到 8 颗钉、钉放在任意序号、钉做成几个样点组成的短图样、钉用别的波长或偏振，钉的强度由接收电平、距离和环境决定。

4. 分窗整流形判决（Coherent Vote）

4.1 接收方把收到的一个流形分成 W 个窗（ W 取 2 到 64，例如 8）。对每个候选的整流形状态，在每个窗里算接收样点和候选之间的归一化相干相关（例如归一化内积的实部）；某个候选在一个窗里相关最大就算赢了这个窗；赢的窗数达到 V 个（ $V > W/2$ ，例如 8 个窗里赢 5 个）就判为这个候选，否则整个流形拒收，不交付半截结果。

4.2 候选可以是全部登记状态，也可以先对整条接收流形做一次投影，挑出一小批最近的状态（例如 8、16、48 或 128 个）；挑出的每个候选都用同一个编码器重新做成完整流形，再拿去表决。

4.3 表决可以在可编程逻辑（FPGA / ASIC）里用每窗定点乘加做，也可以在处理器里做。

4.4 同一个表决用于：判载荷、确认锁住、确认身份、发射前自检（7.6）、反馈改动生效后在新流形上复核。

5. 收发反馈分两层

5.1 本机这一层。(a) 接收电平：接收光路上只放一只可调光衰减器，输入削顶或高于标定电平就加大衰减，偏低就减小，中间留一段不动区；步子可以用二分；衰减码只在整流形边界改。(b) 调制器偏置：锁住之前，用接收样点在整个流形上的和来调 IQ 调制器的 I、Q、相位三个偏置，这些和不需要先对齐帧，例如 Σy 看载波泄漏、 Σy^2 看两路正交误差；锁住之后再对着已知的书细调。每次调整的规则：动一步，误差变小就留下，变大就往反方向试，两个方向都不变小就把步子减半。(c) 发射功率和钉的增益按接收状态设。

5.2 两机之间这一层。每台机用「发哪一个登记的整流形状态」或在载荷里，报出自己的状态，例如没锁住、锁住了、锁住并读通对方。双方连续 M 个新流形都报「锁住并读通」，就判定相互锁定。每一步只在对方持续确认时保持，否则退回上一步。

5.3 所有改动都在将来某个整流形边界生效，并在新收到的整个流形上复核。

6. 光束指向：扫描、锁存即停、盯、锁、保持

6.1 两轴扫描器（振镜、MEMS 镜、光学相控阵、液晶或 Risley 棱镜，可以装在云台上）按流形节拍做光栅扫描：每个流形更新一次，X、Y 轮流或同时更新。

6.2 锁存即停：接收幅度锁存一报告探测到，可编程逻辑就在同一个流形里把扫描器停在当前码上并记下这个码，不等处理器。

6.3 盯：之后扫描器走小步（例如先 8 个码，再减半到 1 个码），哪一步让接收电平变大就留下，直到电平最大。

6.4 锁住和保持：锁住（第 3 节）并相互锁定（5.2）以后，扫描器停止扫描，保持指向进入通信状态；通信光比感知回波强，强出的倍数随 R^2 增长。

6.5 先扫一遍，之后只盯危险的邻机：先全场扫一遍，把所有邻机都找到；之后用每架邻机的运动状态外推它的位置，按到最近点的时间（或按距离）排序，挑出最危险的 K 架（ K 取 1 到 50），只在每架的外推位置周围扫一个小区；小区大小随邻机的最大加速度和经过的时间增大，扫到就停。

6.6 光束发散角可以放宽到扫描行距的一半，让一行扫下来不漏、扫过任何一点都至少停留一个流形；一台机看到有扫描光束扫过自己，就停止扫描，转向光源那一边。

7. 每机一书、链路推出的因子和发射前自检

7.1 每机一书：所有机器用同一本母书，各自乘一个固定的本机键。键可以是在流形每条谱线上（ N 点离散变换的每条线上）加一个随机相位，也可以再加一个带内谱线置换，或者其他任何可逆的逐线变换。录下一台机发出的光，既得不到母书，也得不到别的机器的书。

7.2 随时间变的因子：每个发出的流形再乘一个随流形序号 t 变的因子 m_t 。 m_t 从链路推出：可以来自上一个流形、一个计数器，或一个带密钥的哈希；起点是两台机在相互锁定那一刻共有的秘密。接收方算出同一个 m_t ，在标定和判决之前先除掉。丢帧就回到锁定握手重来。

7.3 会话秘密：每一对机器有一把配对时写入的配对秘密；锁住后双方各发一个新鲜的随机数（nonce）；会话秘密 = $H(\text{配对秘密} \parallel \text{nonce}_A \parallel \text{nonce}_B)$ ， $m_t = \text{derive}(\text{会话秘密}, t)$ 。重放旧会话，因子对不上，表决拒收。

7.4 配对秘密可以放在安全芯片里，由芯片在内部算出会话种子，处理器手里永远只有一次会话的种子。

7.5 计数错拍的恢复：对 $t-2 \dots t+2$ 各试一次判决，留下能通过的那个。

7.6 发射前自检：一组载荷准备提交发射之前，处理器先拿这组内容对没加键的母书做一次整流形表决；只有表决不通过才允许提交，所以即便出故障跳过了加键，也发不出母书。

7.7 感知不受影响，因为本机确切知道自己发了什么。

8. 书的中频预旋转

8.1 为了经得起交流耦合（高通）的驱动和接收电路，每个流形发射前乘 $\exp(j2\pi m n / N)$ （ m 为整数），把频谱搬到一个中频上；接收方乘它的共轭搬回来。例如中频 1 到 40 MHz，比如 8 或 16 MHz； m 的取值保证搬过去的频谱还在转换器的带宽内。

8.2 可以把预旋转好的表存起来，逻辑原样播放；这时标定只需要每条链路一个固定延迟加一个复增益，用同一本书测一次就行。

9. 硬件架构

9.1 雷达本体 = 一只可插拔的相干光收发模块（例如 CFP2-ACO 一类，或其他带模拟相干接口的封装），里面有可调激光器、带线性驱动的双偏振 IQ 调制器、集成相干接收机和调制器偏置控制。主机板上有模块插座、驱动调制器输入的数模转换器、采样接收机输出的模数转换器，和一颗 FPGA / SoC（例如 Zynq 或 Zynq UltraScale+ 一类）。感知时同一只激光既是发射光源，也是本振。

9.2 光学前端：模块发射口 → 光放大器（例如 EDFA，0.1 到 100 W）→ 三端口环形器的端口 1；端口 2 ↔ 准直器 → 两轴扫描器（加云台）；端口 3 → 一只可调衰减器 → 模块接收口。前端可以单独做成一个自由空间前端模块，和光子核心之间只连两根光纤和几根控制线。

9.3 发一个或两个偏振，收两个偏振（X、Y，共 I/Q × 2 四路）；把 X / Y 的比值当作目标的一个额外观测量（例如表面类型、粗糙度、潮湿与否），也用来避免两机相对滚转时的衰落。

9.4 两机各用独立激光通信：每台机用自己的激光当本振，频率和相位以收到的流形里的公共钉为基准。

9.5 替代形式：分立 IQ 调制器加 90° 混频器和平衡探测器；直调激光加干涉式（自外差）接收；1,310 nm、1,550 nm 或 2,000 nm 波段；光纤或自由空间光路；任何部分用 ASIC 或光子集成电路实现。

9.6 安全加固：启动镜像加密并签名、调试口永久关闭、每机密钥、原始帧永不外送、配对秘密放安全芯片、数模转换器到调制器的走线放在电路板内层。

10. 运动状态张量作控制量；机群即张量场

10.1 每收到一个流形，由一个估计器输出发射源或目标的运动状态张量：三轴的位置、速度、加速度、加加速度。估计器不限：最小二乘拟合、多项式或样条模型、状态空间滤波器、基于物理的反演、学习模型或查表都可以。张量直接交给载具的控制系统当控制量，例如经标准飞控接口（如 MAVLink 接 PX4 / ArduPilot）或 CAN、以太网、串口，作为位置、速度或加速度设定值。

10.2 势场导航：所有感知到的物体的张量合成一个标量或张量势场，载具沿这个场的谷底走（例如沿梯度下降方向）；运动的物体就是运动的山。

10.3 机群即张量场：每台机是场里的一个节点，靠看（回波）和听（直射光）感知邻机，手里一张场表。每一条记录写着一架邻机的身份（来自身份钉）、它的运动状态张量、测量时刻和来源（看、听或转来）。两机相互锁定时，场表放在载荷里传给对方；每台机对每架邻机按测量时刻只留最新的一条。急停靠感知扩散：一台

机的运动状态变了，邻机感知到就反应，邻机的变化又被再外一圈感知到，不需要靠消息一台一台转发。

10.4 用途：无人机和无人机机群（编队飞行、穿越、避撞、在 GNSS 受扰时以手持端或地面锚点为基准导航）、道路车辆（感知别的车和它的速度，同时和它交换数据）、机器人、船舶、卫星和星间链路、基站、手持控制器。

11. 组合举例

11.1 一架无人机装 9.1 的模块、9.2 的前端和第 6 节的扫描器；它和另一架无人机锁定（第 3 节）、确认身份，用每流形 60 bit 的档位（2.5）加每机一书（7.1–7.3）交换场表（10.3），并把 10.1 的运动状态张量交给自己的飞控。

11.2 一套车载感知系统：同一束相干光测量周围车辆的距离和运动状态，同时和装了同类设备的车辆交换数据；电路是交流耦合的，用第 8 节的中频预旋转。

11.3 一个地面站：用 6.5 盯住几架无人机，用 10.3 的场表协调它们。