arXiv:2611.29531v1 [astro-ph.IM] 22 Nov 2026

基于公开轨道根数数据的 Cosmos 2612–ICEYE-X36交会与近距离操作分析

Brayan Nicolas Buitrago Montenegro*

哥伦比亚国立大学理学院国家天文观测站，*Av. Carrera 30 No. 45-03*，大学城，波哥大特区，*111321*，哥伦比亚

摘要

我们分析了2026年10月 Cosmos 2612（NORAD 68762）与商业雷达卫星 ICEYE-X36（NORAD 59103）之间的近距离接近事件。两者均处于太阳同步低地球轨道。我们旨在确定该事件是否属于交会与近距离操作（RPO），还是自然轨道演化的结果。我们使用 SGP4 传播了2026年4月至10月的公开通用摄动（GP）轨道根数历史数据，并对每个物体的预测误差进行了经验测量。通过无机动传播检验自然演化的零假设后发现，所有18种参数组合均可予以拒绝：此次交会需要 Cosmos 2612 执行机动，而无需 ICEYE-X36 执行机动即可重现这一事件。最近接近发生在协调世界时10月18日06:33，距离低于0.79千米（第95百分位数），局部相对速度为 $\approx$0.08米/秒，且连续41.4小时处于5千米范围内。这是一个行动序列的最后阶段，该序列于5月以轨道面匹配开始，随后经历相位漂移、接近和机动撤离，累计机动量至少为 Δv 174–180米/秒。数据精度不足以确定最小距离，也无法判定该行动是否为合作行动或其目的。

关键词： 交会与接近操作、机动检测、SGP4、双行轨道根数、空间态势感知、假设检验

*通讯作者。ORCID：0009-0004-8742-171X电子邮箱： brbuitragom@unal.edu.co (Brayan Nicolas Buitrago Montenegro)

1. 引言

交会与接近操作（RPO）是指航天器以预先规划的方式接近轨道上的另一个物体，并在其附近停留一段时间的机动。这类操作具有民用和商业用途，例如对卫星进行检查、维修服务、加注燃料或延长寿命；也有军事和情报用途，例如监视或使用共轨反卫星武器[1]。

根据观测到的行为，交会与近距离操作（RPO）已被记录并分类。其中一个拟议类别是挑衅性行为：以对抗方式实施的交会与近距离操作，因其对另一颗卫星构成物理威胁，或用于搜集情报。在运营方之间缺乏协调的情况下，这类活动也会给目标卫星及附近卫星带来碰撞风险 [2]。军事或情报目的的交会与近距离操作并非某个国家独有：例如，美国的相关计划中已有记录 [1] ，俄罗斯在低地球轨道（LEO）和地球静止轨道（GEO）上的活动中也有记录 [3]。

借助公开的轨道根数目录，并考虑到已知的局限性，可以独立重建这些事件。不过，并非所有天体都能以同样方式进行重建。数据提供方 Space-Track 提醒称，出于国家安全等原因，公开目录可能不包含所有天体的轨道根数，尽管所有天体至少每天都会被跟踪一次 [4]。因此，涉及轨道根数未予公布的军事或情报卫星的交会与近距离操作，无法利用公开数据进行重建；这些事件的公开记录取决于哪些天体出现在目录中。在本文研究的案例中，两个天体的轨道根数均为公开数据。

合作性交会与接近操作已有长期实践记录：Barnhart 等人回顾了截至2020年的交会任务，并提出了适用于未来在轨服务的安全指标 [5], ；而主动碎片清除等服务的设计包含了与非合作目标进行交会与近距离操作的各个阶段，从远距离交会到检查 [6]。研究人员已根据公开数据重建未申报的交会与接近操作。Serrano 等人利用两行根数分析了地球静止轨道和低地球轨道中的多个案例，包括 Kosmos 2542 与 USA 245（2019–2020年）以及 Kosmos 2558 与 USA 326（2022年）；在这些案例中，俄罗斯卫星所处的轨道平面几乎与目标相同，并以数十千米的距离进行周期性接近；他们还指出，由于每天约只有一组两行根数，因此无法确定确切的机动 [7]。Du 等人系统搜索了2020–2025年的公开两行轨道根数目录，寻找

交会与近距离操作候选目标，综合考察轨道平面相似性、距离和近距离接近的持续性，并确定了不同国家卫星之间少数无法解释的案例 [8]。这些研究描述了轨迹或应用固定距离阈值，但没有在自然演化与诱导接近之间进行正式检验，也没有针对每个物体测量预测误差，更没有确定两个物体中究竟是哪一个实施了必要的机动。这正是本文所采用的方法。

ICEYE-X36 是 ICEYE US 拥有的一颗合成孔径雷达（SAR）地球观测卫星，运行于太阳同步轨道，于2024年3月4日搭乘猎鹰9号火箭，从加利福尼亚州的范登堡太空军基地发射 [9]。2026年1月19日，ICEYE 与乌克兰国防部的一位客户签署协议，扩大该部获取该公司卫星星座高分辨率合成孔径雷达影像的权限 [10]；新闻稿并未说明由哪些卫星提供这项服务。据《科学美国人》报道，乌克兰军方曾使用 ICEYE-X36 [11]。Cosmos 2612 是一颗俄罗斯军用卫星，于2026年4月16日协调世界时23:17（莫斯科时间4月17日）搭乘联盟号火箭及伏尔加上面级发射。在此次发射的六个有效载荷中，已确认有 Cosmos 2609 至 Cosmos 2614；Cosmos 2612 与物体 NORAD 68762（国际编号 2026-083 H）之间的对应关系被认为尚属推定 [12]。

在2026年10月的交会之后，多家媒体报道说，Cosmos 2612 曾接近 ICEYE-X36。《科学美国人》根据公开跟踪数据称，两者间距最多只有几百米，估计值甚至低至 30 m，并称这是已知的低地球轨道上两颗在轨航天器之间最近的一次蓄意且未经请求的互动 [11]。据 CNN 引述的 LeoLabs 分析，交会期间的部分时段，两者间距曾达到 $\approx$500 m；由于反复机动以及跟踪几何关系，该估计存在不确定性 [13]。《华盛顿时报》提及，估计距离为 $\approx$26 m [14]。AeroTime 表示，此次接近发生在协调世界时01:35，距离可能只有几百米或更短；公开轨道数据的不确定性使得无法可靠地计算最小距离 [15]。这些说法促成本研究，但并未被当作前提：本研究将分析设计为一项假设检验，其结果原则上也可能表明此次交会是自然发生的。

本研究旨在利用公开数据和可复现方法回答三个问题：（i）这次接近能否由轨道的自然演化解释，还是需要进行机动？；（ii）如果需要，是由哪个物体实施的？；以及（iii）交会的几何和运动学特征是什么，其中哪些无法以数据的精度确定？

以及其中哪些无法以数据的精度确定?

2. 数据与方法

2.1. 数据

我们使用了来自 Space-Track 的通用摄动（GP）轨道根数历史 [16], ，数据以两行根数（两行轨道根数集）格式发布，涵盖2026年4月1日至10月28日期间的两个天体（表1）。当多个根数集具有相同历元时，保留最新创建的一组（从1408条记录中删除了54条重复记录）。交会分析窗口为2026年10月1日至27日；9月1日之前的时段用作参考时段，用于校准传播误差和机动探测器。

表1：使用的GP数据。

天体	NORAD	两行根数数量	首个/最后一个历元（2026 年）	每日两行根数数量
ICEYE-X36	59103	758	01-04 / 27-10	3.62
Cosmos 2612	68762	596	18-04 / 27-10	3.10

2.2. 传播与*SGP4*经验误差

使用 `sgp4` 库 [17], 在TEME坐标系（真赤道、平春分点）中，通过SGP4模型（简化通用摄动*4*）获取位置和速度，采样间隔为60秒。为重构观测轨迹，在每个时刻使用历元早于该时刻的最新两行根数（因果选择）；而假设检验（第2.5节）中的无机动传播则使用固定且不更新的两行根数。根据每组两行根数获得平均轨道根数：半长轴 a、近地点和远地点高度$h_{p,a} = a(1 \mp e) - R_\oplus$，其中 $R_\oplus$ 为地球赤道半径，倾角为 i，偏心率为 e，大气阻力项为 B^*。

两行根数不包含其不确定性（协方差）的形式估计，因此针对每个天体对SGP4预测误差进行了经验测量。在参考时段内，将每个两行根数传播至同一天体的后续两行根数的历元，该历元位于其后 $L \pm 0.25$ 天，并计算传播位置与后续两行根数在其自身历元给出的位置之间的距离。由于后续两行根数纳入了更新的观测数据，该距离近似表示预测位置时产生的误差 L

天。两行根数之间的这种比较称为成对差分，是在没有协方差时估计两行根数误差的既有方法，也存在基于相同原理的加权变体 [18]。检测器识别出机动的两行根数对（第 2.3 节）被排除，因为其差异反映的是轨道变化，而不是模型误差。对每个 L，$\varepsilon_{95}(L)$ 所得分布的第95百分位数被用作参考不确定度（表2，图 A.1）。对于两个天体之间的相对位置，假定其误差相互独立，将各自误差按平方和开根号合并，$\varepsilon_{95}^{\mathrm{rel}}(L) = \sqrt{\varepsilon_{95,\ \mathrm{ICEYE}}(L)^2 + \varepsilon_{95,\ \mathrm{Cosmos}}(L)^2}$（表 *2* 的 Relative 行）。

表2：在无机动参考时段内，SGP4预测误差（第95百分位数，千米）随传播时间 L 的变化。

L (天)	0.25	0.5	1	2	3	5	7	10	14
ICEYE-X36	0.31	0.47	1.04	2.65	5.49	16.0	32.1	73.6	175
Cosmos 2612	0.32	0.50	0.76	1.52	2.93	8.33	21.2	47.5	120
相对	0.44	0.69	1.28	3.05	6.23	18.0	38.4	87.6	213

2.3. 机动检测与速度变化估算

轨道机动是通过启动推进系统来改变卫星速度的操作。其大小以产生的速度变化 Δv表示；这是衡量机动成本的常用指标，因为它决定了推进剂的消耗量。由于机动信息不会公开，因此必须根据连续两行根数之间的变化推断机动。

对于每对连续TLE，我们计算了半长轴变化 Δa、倾角变化 Δi 以及传播残差$\rho = \|\mathbf{r}_{k-1}(t_k) - \mathbf{r}_k(t_k)\|$，并按历元间隔进行归一化。随后将每个序列转换为稳健得分，以中位数和中位绝对偏差（MAD）取代均值和标准差，从而降低离群值的影响 [19]:

$$z = \frac{x - \mathrm{median}(x_{\mathrm{ref}})}{1.4826\ \mathrm{MAD}(x_{\mathrm{ref}})}, \tag{1}$$

其中，MAD 是绝对偏差的中位数，而因子 1.4826 使其与高斯分布的标准差保持一致 [19]。与其他基于两行根数的机动探测器一样，阈值

根据每个物体的统计数据 [20]推导得出；此处仅根据其参考时段计算。标记了满足 $|z| > 5$ 的配对，所采用的阈值比指示值 2 更为保守。5 [19], 以限制由 TLE噪声导致的误报。

间隔少于 1.5 天的标记对会被归入同一事件。对于 ICEYE- X36 和 Cosmos 2612，相邻两行根数历元之间间隔的中位数分别为 6.4 小时和 8.0 小时，99% 分位数分别为 25.5 小时和 23.9 小时。1.5 天（36 小时）的阈值超过了该分位数，因此，当两个标记对之间仅隔一个两行根数的正常间隔时（例如一次机动或多次点火转移跨越连续的标记对），它们会被归入同一事件；而相隔数天的机动则仍会被视为彼此独立的事件。分组不会直接纳入假设检验规则（第 2.5 节）；它会影响轨道机动表以及误差计算中对相关标记对的排除。在 0.5 至 3 天的阈值范围内，自 5月以来 Cosmos 2612 的累计Δv 值在 179.6 至 179.7 米/秒（总值）之间，以及 174.0 至 176.9 米/秒（净值）之间变化。

Δv 采用冲量式近圆轨道近似进行估算，

$$\Delta v_a \approx \frac{v}{2a}\,|\Delta a|, \qquad \Delta v_i = 2v \sin\frac{|\Delta i|}{2}, \qquad v = \sqrt{\mu/a}, \tag{2}$$

其中， μ 为地球引力参数， Δv_a 为与半长轴变化相关的冲量， Δv_i 为与倾角变化相关的冲量； Δv_a 的表达式由半长轴变化与切向冲量 [20]之间的线性关系得出。由于这两个分量相互垂直（分别沿轨道方向和轨道平面法向），因此按平方和合成，得到 $\Delta v = \sqrt{\Delta v_a^2 + \Delta v_i^2}$；这相当于一次点火同时产生这两种变化。 Δv 以两种方式报告：净值，即事件中首末两条两行根数之间的变化；以及总值，即对每一对连续两行根数之间的 Δv 求和，从而避免正负相反的点火相互抵消。两者都是下界，因为两条两行根数之间发生的多次机动会被视为一次。该检测器以相同方式应用于两个天体。

2.4. 相对运动

设$\mathbf{r}_A, \mathbf{v}_A$ 分别为 ICEYE-X36 的位置和速度，$\mathbf{r}_B, \mathbf{v}_B$ 分别为 Cosmos 2612 的位置和速度。相对位置为 $\Delta\mathbf{r}(t) = \mathbf{r}_B(t) - \mathbf{r}_A(t)$，距离为 $d(t) = \|\Delta\mathbf{r}(t)\|$，每 60 秒计算一次。TCA（最近接近时间）

是最近接时刻，即分析窗口内 $d(t)$ 的最小值，并将分辨率细化至 1 秒。

间距以 ICEYE-X36 的局部 RIC 坐标系描述，其坐标轴分别为径向方向、沿轨方向（沿轨方向）和轨道平面的法向（横轨方向）；该坐标系也称为 RTN 或 Hill 坐标系：$\hat{\mathrm{R}} = \mathrm{r}_A/r_A$，$\hat{\mathrm{C}} = \mathrm{h}_A/h_A$，$\hat{\mathrm{I}} = \hat{\mathrm{C}} \times \hat{\mathrm{R}}$，其中 $\mathrm{h}_A = \mathrm{r}_A \times \mathrm{v}_A$[21]。惯性速度之差包含坐标系旋转的影响（$\approx n\,d$，其中 n 为平均运动；对于位于同一轨道、相距 d的两个天体），因此相对速度以随 $\boldsymbol{\omega} = \mathrm{h}_A/r_A^2$旋转的局部坐标系表示：

$$\mathbf{v}_{\mathrm{loc}} = (\mathbf{v}_B - \mathbf{v}_A) - \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A). \tag{3}$$

在几公里的间距下，该量具有代表性；在数百公里的间距下，它还包含偏心率和轨道曲率的影响，而直线坐标系无法捕捉这些影响。

2.5. 假设检验

定义了两个假设：

- **零假设（自然演化）：** 两颗天体在最近接近时刻附近的相对轨迹，是此前双方轨道状态在无机动情况下的弹道延续。

- **H1（诱导接近）：** 若无机动，无法得到观测到的相对轨迹；差异可由至少一颗天体的机动解释。

R1，机动需求。对于每个提前时间 $L \in \{0.5,\ 1,\ 2,\ 3,\ 5,\ 7,\ 10\}$ 天（截断时刻），选取两颗天体历元为 $\leq \mathrm{TCA} - L$ 的最后一组两行根数，并在无机动情况下将其传播至最近接近时刻。定义如下：

- $\Delta\mathbf{r}_{\mathrm{obs}}(\mathrm{TCA})$：最近接近时刻的观测相对位置，采用因果两行轨道根数选择获得，其中纳入了所有已发生的机动；
- $\Delta\mathbf{r}_{(L)\ \mathrm{bal}}(\mathrm{TCA})$：最近接近时刻的弹道相对位置，通过在截断时刻 L 获取的两行根数并在无机动情况下传播得到；
- δ_L：两者之间的差异，

$$\delta_L = \left\| \Delta\mathbf{r}_{\mathrm{bal}}^{(L)}(\mathrm{TCA}) - \Delta\mathbf{r}_{\mathrm{obs}}(\mathrm{TCA}) \right\|. \tag{4}$$

如果两个物体在截断时刻之后都没有机动， δ_L 则仅反映传播误差。预期不确定度由表2中的两项误差平方和开平方得出：截断时刻时最早的TLE实际提前量对应的相对误差，L_{ef}，以及观测位置本身的误差；在最近接近时刻，这些两行根数已经 L_{obs} 陈旧：

$$\varepsilon_{95} = \sqrt{\varepsilon_{95}^{\mathrm{rel}}(L_{\mathrm{ef}})^2 + \varepsilon_{95}^{\mathrm{rel}}(L_{\mathrm{obs}})^2}. \tag{5}$$

如果 $\delta_L > K\,\varepsilon_{95}$，且满足 $K = 3$，则针对该截断时刻拒绝零假设。

的取值为 K ，其设定使得只有当差异大于无机动情况下观测到的任何差异时，才会拒绝零假设。经验误差分布并非高斯分布，其尾部延伸超过第95百分位数：在参考时段内（5087个无机动TLE对，涵盖所有提前时间和两个天体），最大误差为2。25 ε_{95}，有4对超过了 $2\,\varepsilon_{95}$，且没有一对超过 $3\,\varepsilon_{95}$。因此，在 $K = 3$的情况下，参考时段内的任何传播结果都不会拒绝零假设。该选择的影响将在第4.1节评估。

R3，效应方向。将在TCA ± 2 天内处于距离5千米以内的总计时间（所有时间区间之和，无论是否连续）在观测轨迹与无机动轨迹之间进行比较。仅评估具有功率的截断时长，即无机动情况下的最小距离减去 $K\varepsilon_{95}$后仍高于5千米的截断时长；对于其他情况，传播误差会妨碍作出判断。

R2，归因……对于每个截断时长，只有一个天体在不考虑机动的情况下进行传播，另一个则采用观测值。如果某个天体在不进行机动的情况下，其最近接近时刻的相对位置与观测值的偏差超过该天体误差的 K 倍，则认为该天体的机动是必要的。此检验具有对称性，且不受机动探测器阈值的影响。

如果满足 R1、所有具有功率的截断时长均满足 R3，且 R2 在所有截断时长中均识别出该天体，则拒绝零假设，并将此次接近归因于该天体。

3. 结果

3.1. 各天体的轨道历史

ICEYE-X36 保持在 $\approx$540千米平均高度的近圆轨道上，倾角为 97。84°，并缓慢衰减（图1）。检测器在整个历史记录中标记出 23 次事件，幅度均非常小（总值 Δv：中位数为 0.03 米/秒，最大值为 0.68 米/秒）；其在 9月至10月的频率（6

次事件）与参考时段的频率相符（预期为 6.7 次， $p = 0.66$）。在阈值 $z > 20$ 下，ICEYE-X36 在 9月至10月没有发生任何事件。其行为与两行根数噪声或轻微调整相符，且在交会期间没有显示出任何变化。

相比之下，Cosmos 2612 的轨道变化很大（图 2，表 3）。5月15日至16日，其倾角从 96.96° 变为 97.86°，几乎与 ICEYE-X36 的倾角相同（97.84°）。9月30日，其平均高度从 541 千米升至 588 千米；其中一组中间两行根数的偏心率为 0.0035、平均高度为 557 千米，与双脉冲转移相符。10月10日至12日，它再次下降至 ICEYE-X36 的高度，并进行了小幅倾角调整；10月15日至21日，检测器将18组连续两行根数中的11组标记出来，得分最高达 $z \approx 1400$。

图 1 和2 的最后一个面板显示了各组两行根数中的阻力项 B^*。对于两个天体，该项在相邻两组两行根数之间都有变化，但没有明显趋势；对于 Cosmos 2612，在接近和撤离期间还出现了孤立的极端值。分析中没有将这一参数用作指标，原因有二。首先，它在连续两行根数之间的变化很大，而本研究没有经过校准的判据来区分其中的机动与拟合噪声；事后根据结果设定判据会引入偏差。其次，其影响已纳入检验：SGP4 使用各组两行根数中的 B^*进行传播，因此无机动传播已纳入两个天体之间的差分阻力，而零假设也涵盖了这一自然漂移成因。

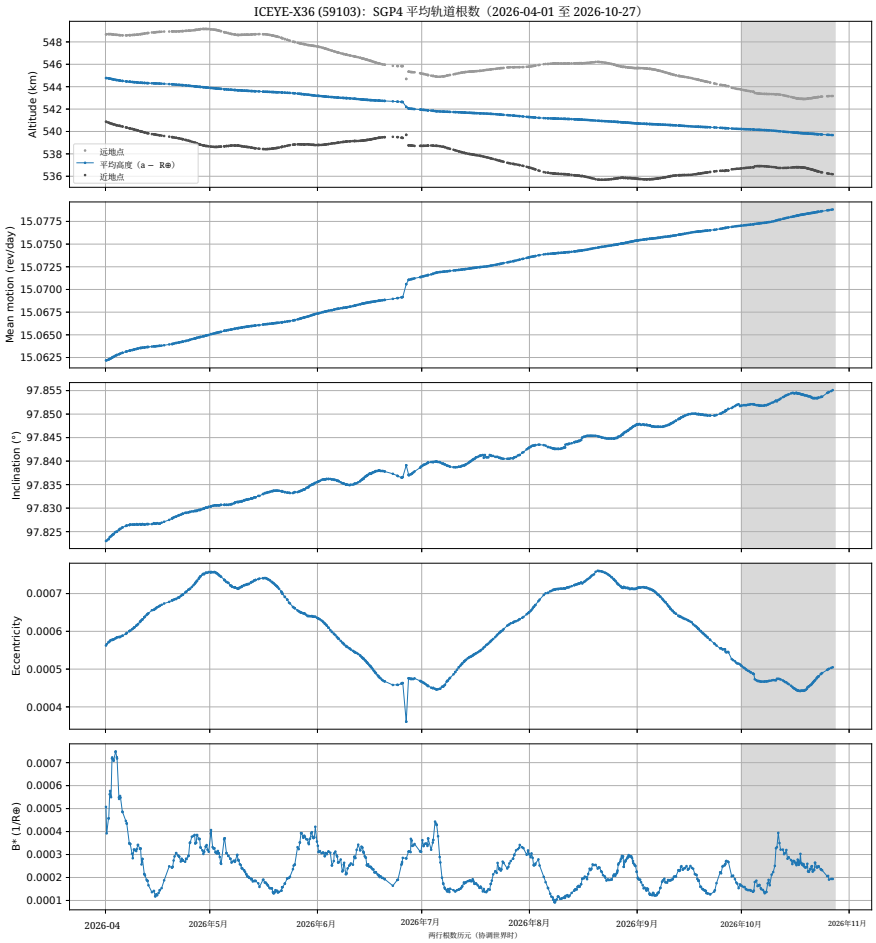


图1：ICEYE-X36（NORAD 59103）的 SGP4 平均轨道根数，2026年4月至10月。灰色带标示分析窗口。

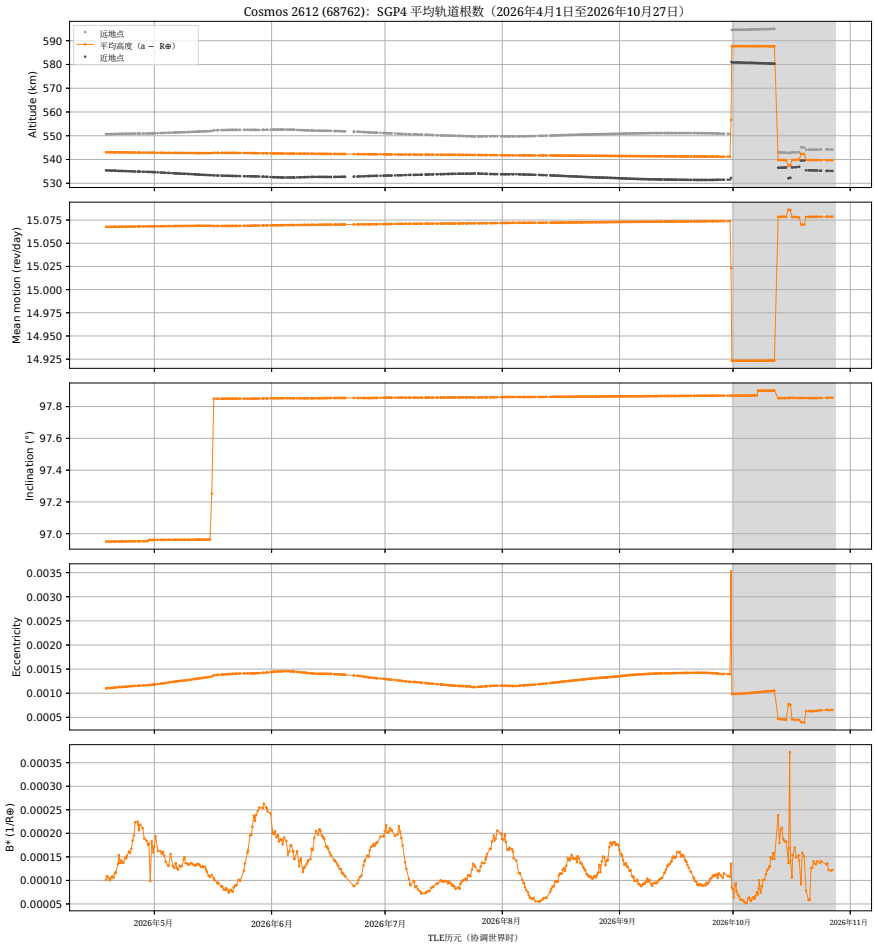


图2：Cosmos 2612（NORAD 68762）的 SGP4 平均轨道根数，2026年4月至10月。

表3：Cosmos 2612 自2026年5月以来的轨道机动事件，含 $z > 20$ 。 Δv 单位为米/秒（下界）。如果纳入自5月以来检测到的所有事件（$|z| > 5$），则总计为174.0（净值）和179.7米/秒（总值）；因此，正文中引用的范围为174–180米/秒。

开始–结束（协调世界时，2026年）	说明	Δa （千米）	Δi （°）	净值 Δv	总值 Δv	$z_{\max}$
15-05 17:11 – 16-05 17:05	轨道面匹配	$+0.14$	$+0.886$	117.4	117.4	4025
30-09 05:09 – 30-09 16:22	升至漂移轨道	$+46.54$	-0.001	25.5	25.5	19 111
07-10 07:41 – 07-10 14:07	倾角调整	≈ 0	$+0.030$	4.0	4.0	204
10-10 17:45 – 12-10 22:39	降低和轨道匹配	-47.87	-0.048	26.8	26.8	22 021
15-10 01:37 – 21-10 15:17	接近和撤离	$+0.03$	$+0.000$	0.03	5.7	1420
总计				173.7	179.4	

3.2. 交会的相对几何关系和时间线

图3显示了轨道的汇聚过程。4月中旬，轨道平面之间的夹角为 $\approx 3^\circ$，此后在没有机动的情况下减小，到5月中旬降至$\approx 0.9^\circ$。这与不同倾角导致的差分轨道面进动一致：升交点因地球扁率而产生的长期漂移为 J_2，$\dot{\Omega} = -\frac{3}{2} J_2\, n\, (R_\oplus/p)^2 \cos\, i$，其中 J_2是与地球扁率相关的系数，$p = a(1-e^2)$为半通径，该漂移取决于倾角和半长轴 [22]。5月的机动消除了倾角差，使夹角保持在 $\approx 0.05^\circ$。6月至9月期间，夹角缓慢增大至 $\approx 0.23^\circ$；在更高轨道高度的漂移阶段，夹角再次减小至 $\approx 0.06^\circ$，10月调整后为 $\approx 0.003^\circ$。在最近接近时刻，轨道平面之间的夹角为0.0004°，半长轴之差为 -2米。

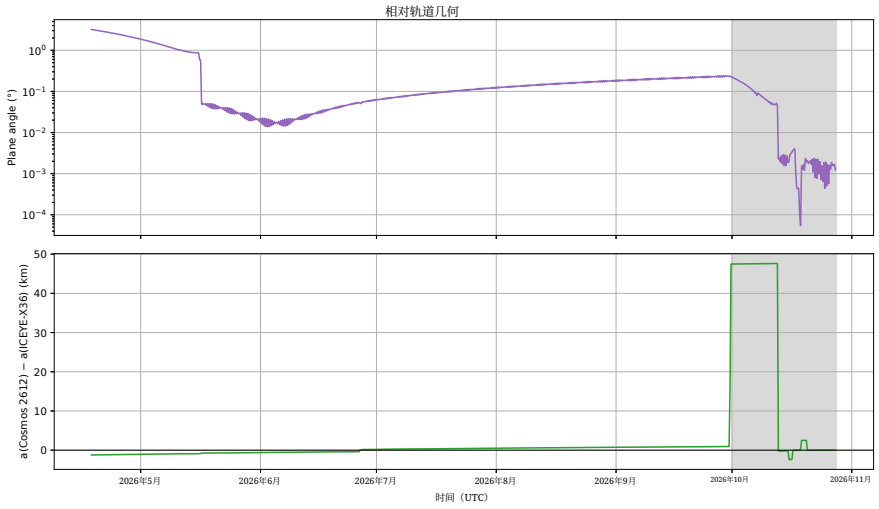


图3：轨道平面之间的夹角（上图，对数刻度）以及半长轴之差 $a_{68762} - a_{59103}$（下图）。

图4 总结了这一过程，具体分为五个阶段：

1. **相位漂移（9月30日—10月12日）**。Cosmos 2612 高出47.5千米，平均运动之差（15.077和14.923转/天的中位数）意味着会合周期为 $1/\Delta n \approx 6.50$ 天。观测到两次交会：10月5日协调世界时12:28（54.9千米）和10月12日协调世界时00:30（53.9千米），两次相隔6.50天。局部相对

速度在此阶段的中位数为 $\approx$79 米/秒，与预期的沿轨漂移 $\frac{3}{2}n\,\Delta a \approx 78$ 米/秒 [21]一致。2. **远距离停泊（10月13日至14日）**。降低后，Cosmos 2612 进入了 ICEYE-X36 所在的轨道，$\approx$454 沿轨方向落后千米，局部相对速度为 $\approx$0.7 米/秒。3. **接近（10月15日至16日）**。间距从 $\approx$430 千米减小到不足5千米。Cosmos 2612 的平均高度相对于 ICEYE-X36 降低了 $\approx$2.4千米，因此得以追上。4. **近距离接近（10月16日至18日）**。间距连续41.4小时保持在5千米以下（10月16日14:15至10月18日07:38协调世界时），并在14.6小时内保持在1千米以下（10月17日17:04至10月18日07:38协调世界时）。5. **撤离（10月18日至20日）**。Cosmos 2612 将其平均高度提高到高于 ICEYE-X36$\approx$2.5千米，并于10月20日退回至 $\approx$480 千米。在10月23日前，间距一直保持在 $\approx$478 千米，随后以 $\approx$4千米/天的速度增加，到10月27日结束时达到 $\approx$494 千米。

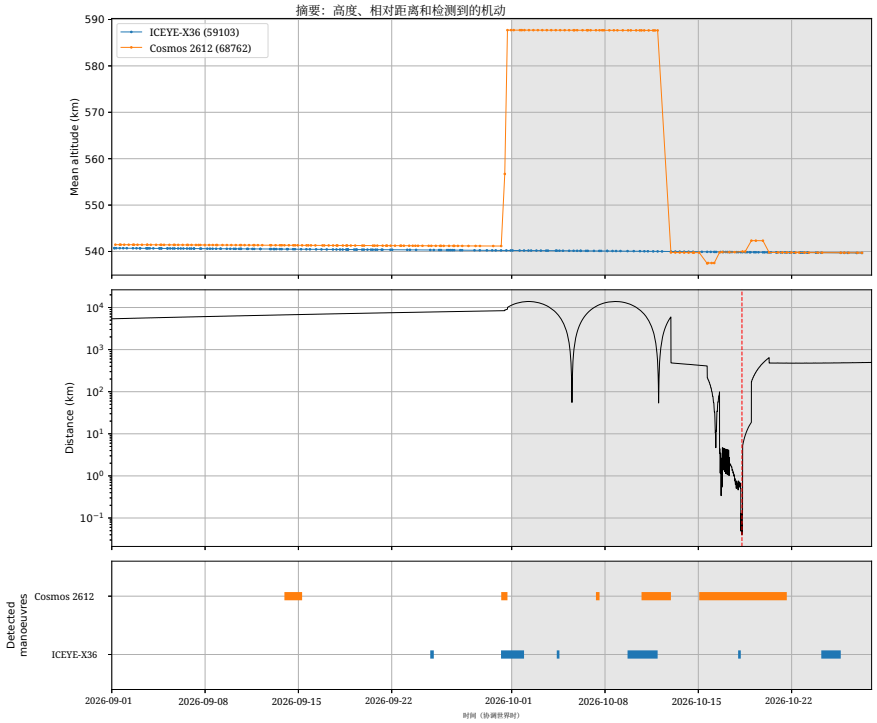


图4：2026年9月1日至10月27日的汇总：两个天体的平均高度（上）、采用对数刻度显示的相对距离（最近接近时刻以红色标出）（中），以及机动算法检测到的每个天体的事件（下）。ICEYE-X36的事件对应于幅度极小的变化（第3.1节）。

3.3. 最近接近

最近接近时刻经精细计算至1秒分辨率，发生于**2026年10月18日协调世界时06:33:14**（表4，图5 和6）。计算距离（39米）小于该方法的不确定性（0.75千米，第95百分位数或第95百分位，所用两行根数的年代分别为2.1小时和13.2小时），因此只能指出间距以95%的置信度**低于0.79千米**。《华盛顿时报》报道的数十米左右的估计值，例如 ≈26 《华盛顿时报》引用的米数 [14],与这一结果相符，但无法通过GP数据予以证实或证伪。

表4：接近特征。

最近接近时刻（协调世界时）	2026 年-10-2026 年 06:33:14
最小距离（95%分位数界限）	< 0.79 千米
最近接近时刻的局部相对速度	0.08 米/秒
处于距离 < 1 / < 5 / < 25 千米以内的时间（最长持续时间）	14.6 / 41.4 / 57.3 小时
< 1 千米以内的局部速度中位数（90%分位数）	0.08 (0.13) 米/秒
距離 < 5 千米范围内的局部速度中位数	0.13 米/秒
最近接近时刻的轨道面夹角	0.0004°
$a_{68762} - a_{59103}$ 在最近接近时刻	-2 m

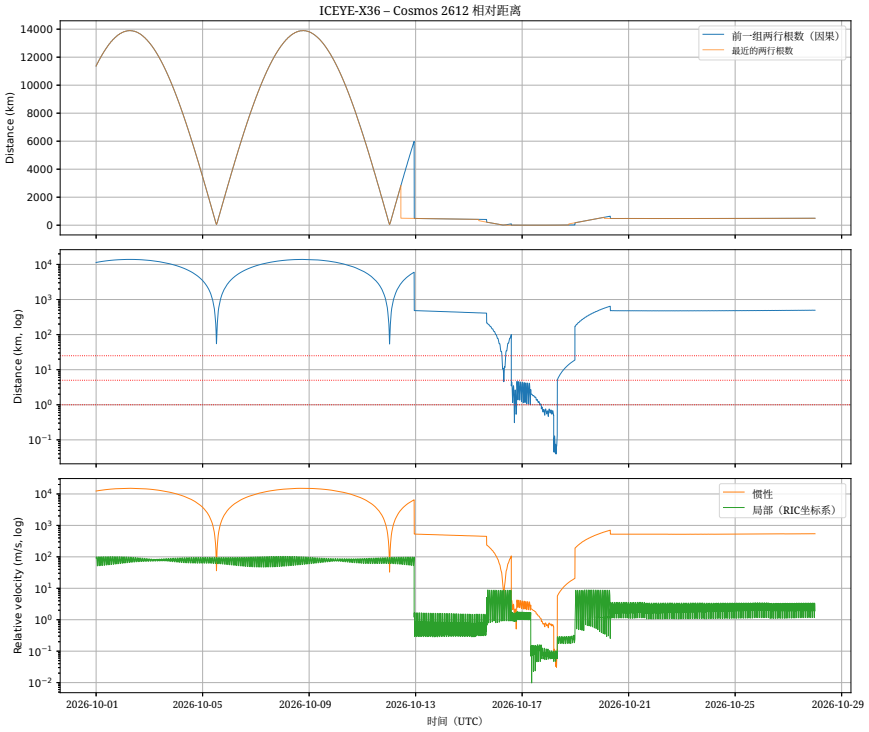


图5：10月1日至27日的相对距离，分别以线性刻度（上）和对数刻度（中）表示，并标出1、5和25千米的阈值；底部为惯性速度和局部相对速度。不连续点对应于机动后的两行根数变化。

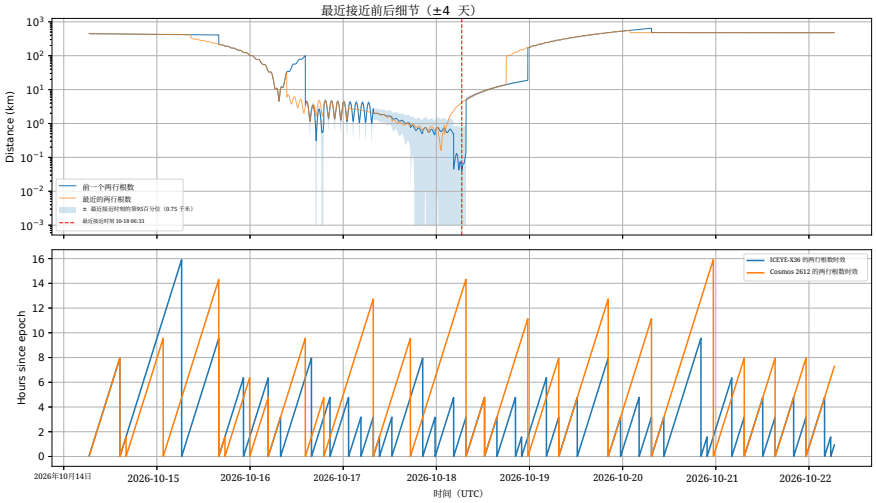


图6：最近接近时刻前后 ±4 天的细节，包括第95百分位不确定性带（上）以及所使用两行根数的时效（下）。

3.4. 相对运动学

在 ICEYE-X36 的局部坐标系中（图 7），从远距离停泊到该时段结束，Cosmos 2612 始终位于沿轨方向的后方，距离最大达到 $\approx$500 千米，但数据分辨率以下的位置除外。例外情况出现在因果序列传播机动前的两行根数，而下一组两行根数与其矛盾的时间段。最明显的情况发生在 Cosmos 2612 两行根数的历元，即10月16日 04:40 和 14:14 协调世界时之间：前者预测 Cosmos 2612 将超越 ICEYE-X36，并到达其前方 $\approx$100 千米处；但后者显示其位于后方 $\approx$3 千米处。同样，10月20日，在07:26协调世界时的两行根数之前，因果序列显示 Cosmos 2612 最多位于后方 $\approx$640千米处，而该两行根数将其带回到 $\approx$480 千米处。这些片段不被解释为真实运动。此次接近沿轨道轨迹从后方发生。横轨分量始终低于0.5千米，因此该交会基本上是共面的。在450千米间距处观测到的 ≈ -15 千米平均径向偏移对应于轨道曲率（$\approx I^2/2r$），而非高度差。低于一千米的相对位置，包括可能的位置保持位置，都低于数据分辨率，因此不予解释。

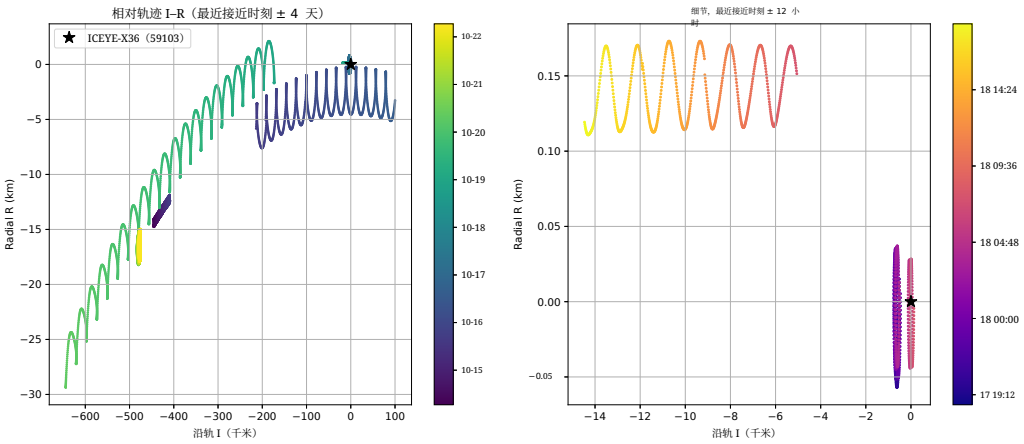


图7：在 ICEYE-X36（星标）的局部坐标系沿轨—径向平面内，围绕最近接近时刻，Cosmos 2612 在 ±4 天（左）和 ±12 小时（右）内的轨迹。低于≈0.8千米的位置无法分辨。

3.5. 假设检验与归因

表5 以及图 8和 9 总结了该测试。对于0.75天和1.48天的截断时长，无机动传播再现了最近接近时刻的观测结果；这可用于检验该方法。从2.08天的截断时长开始，在每种情况下都拒绝零假设，差异为预期误差的16至195倍。3.21天和5.33天的截断时长能够评估效应的方向：如果没有机动，最近接近时刻的间距将为 ≈340 千米，处于距离5千米以内的时间为零；相比之下，观测到的总计时间为41.6小时（连续时间为41.4小时）。在7.33天和10.35天的截断时长下，无机动传播预测相位漂移的下一次自然交会将于10月18日约12:10–12:27协调世界时发生，间距为 ≈55 千米，但其误差（44–99千米）使其无法用于评估方向。

在所有截断时长中，归因都很明确：如果仅移除 Cosmos 2612 的机动，则在每个拒绝零假设的截断时长中，差异都是其误差的29至367倍；如果仅移除 ICEYE-X36 的机动，则在任何截断时长中，差异都不超过其误差的1.2倍。此外，在较短的截断时长内，无机动传播本会使天体总计保持接近75–95小时，而观测到的时长为41.6小时，这表明撤离过程同样经过了机动。

表5：反事实测试。 d_{bal}：无机动情况下最近接近时刻的间距； δ/ε_{95}：归一化差异； $h_{<5}$：TCA ± 2 天无机动情况下 5 千米以内的时长（观测值：总计 41.6 小时，连续 41.4 小时）；归因列：仅移除每个物体的机动时的归一化差异。

截断时刻（d）	d_{bal} (千米)	ε_{95}(千米)	δ/ε_{95}	R1	功率	$h_{<5}$ (小时)	仅 ICEYE-X36	仅 Cosmos 2612
0.75	0.04	1.24	0.03	–	–	95.3	0.03	0.00
1.48	3.97	2.26	1.75	–	–	75.2	0.39	2.52
2.08	659	3.39	194.6	Yes	–	0.15	0.17	367.1
3.21	345	7.48	46.1	Yes	Yes	0	0.14	96.4
5.33	342	21.4	15.9	Yes	Yes	0	0.38	31.9
7.33	1564	43.9	35.7	Yes	–	0	0.26	65.2
10.35	1646	98.5	16.7	Yes	–	0	1.23	28.8

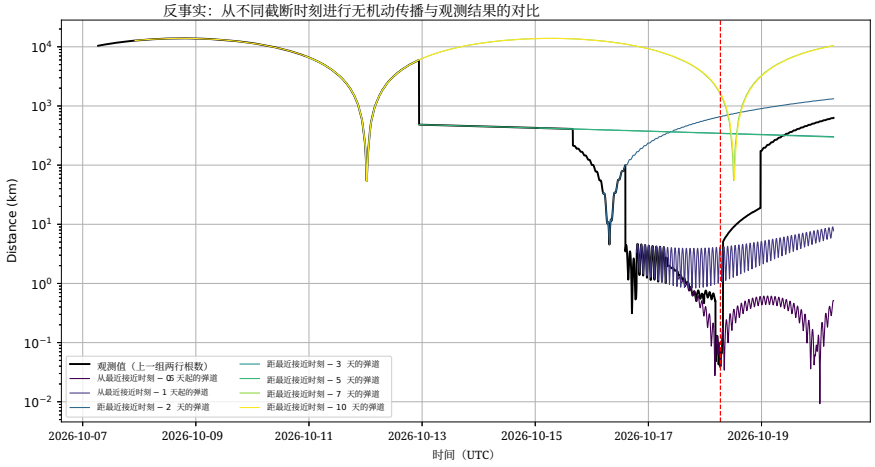


图8：观测距离（黑色）以及从最近接近时刻之前不同截断时长开始的无机动传播（红色虚线）。

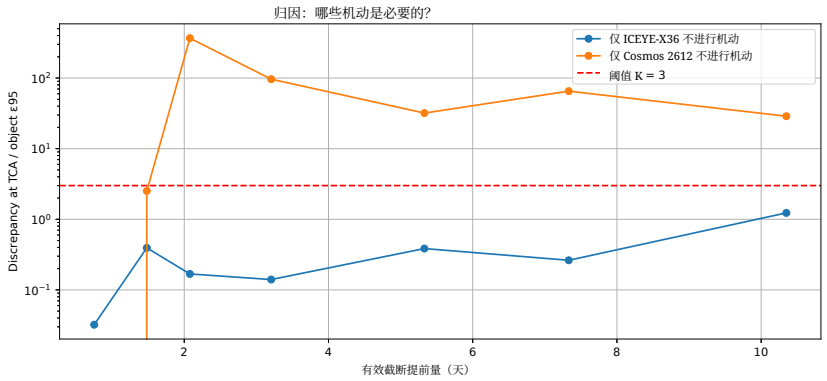


图9：归因：仅移除 ICEYE-X36 的机动（蓝色）或仅移除 Cosmos 2612 的机动（橙色）时，最近接近时刻的差异相对于每个物体的第95百分位误差进行归一化后的结果。红线表示阈值 $K = 3$。

4. 稳健性与偏差控制

4.1. 参数敏感性

对以下参数组合 $K \in \{2,3,4\}$、接近阈值$\in \{1、5、25\}$ 千米和误差百分位数 $\in \{95,99\}$，共进行了18种组合的完整评估。18种组合均得出相同结果：零假设被拒绝，且接近归因于Cosmos 2612；没有任何一种组合将必要机动归因于ICEYE-X36。由于在拒绝零假设的截断时长中，最小归一化差异为15.9（表5），因此对于任何 $K < 15.9$，所有组合仍满足R1。尽管该归因在所有其他拒绝零假设的截断时长下也成立，但这一结论基于两个具有相应功率的截断时长（3.21天和5.33天）。

4.2. 阴性对照

对分析窗口内所有其他低于100千米的局部距离极小值，均采用了完全相同的程序（表7）。10月12日的交会未拒绝 $\mathbf{H_0}$：通过无机动传播重现了该交会。10月5日的交会在9月30日之前的截断时刻拒绝 $\mathbf{H_0}$，因为它是抬升机动的结果；但由于在5千米以内没有停留时间，因此不将其归类为接近事件。由此，该方法能够将快速掠过（即使由更早的机动造成）与持续接近区分开来。此外，还对具有已知真实情况的合成场景采用了相同的程序；这些场景使用 SGP4 生成，并在轨道根数中加入了噪声（表6）。在四次无机动的自然交会中，最小

间距为0.15–0.26 千米，且在5千米以内约持续10 小时，判定结果为 未拒绝 H_0。在由单个目标的机动（轨道面匹配、相位漂移、远距离停泊、接近、保持和撤离）诱导的三次接近中，接近被归因于该目标，而非另一个目标。由于合成轨道根数的噪声小于真实两行根数中的噪声，并且使用了表 2中的经验误差表，因此该检验验证的是判定规则的逻辑，而非误差模型。

表 6：合成数据检验。目标 A（目标）不进行机动；目标 B 仅在诱导场景中进行机动。

场景	最近接近时刻（协调世界时，2026 年）	$d_{\min}$ （千米）	$h_{<5}$ （小时）	判定
自然	06-10 05:58	0.25	10.6	未拒绝 H_0
自然	12-10 06:05	0.26	10.7	未拒绝 H_0
自然	18-10 06:12	0.25	10.2	未拒绝 H_0
自然	24-10 05:32	0.15	10.0	未拒绝 H_0
诱导	12-10 12:28	0.06	33.2	由 B 诱导
诱导	18-10 01:26	0.02	33.2	由 B 诱导
诱导	22-10 23:16	0.02	32.4	由 B 诱导

表 7：阴性对照：采用相同程序评估同一对目标的局部接近。 $h_{<5}$：每次接近前后 ± 2 天内，5 千米以内的总小时数； v_{loc} 最小值时刻。

日期（协调世界时）	$d_{\min}$ (千米)	v_{loc} (米/秒)	$h_{<5}$ (小时)	结果
05-10 12:28	54.9	93.9	0	未增加接近程度
12-10 00:30	53.9	91.3	0	未拒绝 H_0
18-10 06:33	< 0.79	0.08	41.6	由 Cosmos 2612 诱导

4.3. 判定规则变更说明

在对真实数据进行分析之前，判定规则便已确定；首次运行后，其中两项规则经过修订。本节介绍初始版本、应用初始版本时观察到的情况，以及所采用的修改。

最初，R3 要求在 TCA 前 ± 2 天的观测到的最小距离，在减去 $K\varepsilon_{95}$后，小于弹道情况下的距离；并且在所有拒绝零假设的截断时长中，R2 根据截断时刻与 TCA 之间是否存在 $|z| > 5$ 机动探测器事件来判定此次接近。

按照这些规则，R1 得到满足（从 2.08 天的截断时刻起，零假设即被拒绝），但总体结论是无法归因。

检查测试后发现如下情况：

- 在 2.08、7.33 和 10.35 天的截断时长下，R3 均未满足。在这三种情况下，弹道最小距离（4.5、54.8 和 56.3 千米）均小于$K\varepsilon_{95}$（10、132 和 296 千米），因此比较结果低于数据的分辨率，在任何情境下都不可能有利。

- 从截断时刻到最近接近时刻，检测器在两个天体上都标记出了事件。ICEYE-X36 上的事件发生率与参考时段相同（$p = 0.66$），且幅度非常小（第 3.1 节），与两行根数噪声一致，因此仅凭事件的存在不足以将接近归因于该天体。

因此，R3 被限定在具有功率的截断时长内，其定义标准仅取决于传播误差和弹道轨迹；R2 则被第2.5节所述的逐物体反事实测试取代，该测试不依赖检测器。R1 未作修改：无论采用初始规则还是修订后的规则，结论都相同，即接近需要进行机动。修订影响的是效应的方向以及将其归因于特定天体。

由于这一修订是在得知首个结果后作出的，因此这种归因不具备完全预先设定的检验所具有的效力。因此，我们还通过敏感性分析（第 4.1 节）、阴性对照和合成数据检验进行补充，并将两项判定均保留在可复现材料中。

5. 讨论

5.1. 交会的性质

结果排除了此次接近是轨道自然演化所致的可能性。观测到的过程（轨道面匹配、从较高轨道进行相位漂移、在一定距离处进行轨道匹配、沿轨道从后方接近、近距离接近以及受控撤离）符合交会与近距离操作的定义：通过一系列机动，使两个物体在计划的时间和地点汇合，并使其中一个物体在给定时间内保持相对轨迹[1]。促成交会的机动由 Cosmos 2612 执行；无需用 ICEYE-X36 的机动来解释此次交会，而且在

数据的分辨率范围内，该物体在整个期间都表现为被动状态。自5月以来，累计机动量最低为 174–180 米/秒，其中轨道面匹配占主导（117 米/秒，占总计的 65–67%）。

轨道面之间的夹角变化表明，可能有意利用了差分轨道面进动：4月至5月期间，在没有机动的情况下，夹角有所减小；在更高轨道高度漂移期间，夹角也再次减小，从而降低了对齐轨道面的 Δv 成本。这种说明与数据相符，但本文并未对此加以证实。

5.2. 与公开信息的比较

已公布的最小距离与本文结果相符。LeoLabs估算的 $\approx$500 米 [13] 以及《科学美国人》估算的数百米 [11] 均处于本文得出的0.79千米界限内。AeroTime将接近时间定在协调世界时01:35 [15]；如果指的是10月18日，那么本分析计算得出的该时刻距离为0.65千米，处于连续低于1千米的时段内（10月17日协调世界时17:04至10月18日协调世界时07:38）。数十米的估算 [14]低于GP数据的分辨率。AeroTime认为，公开数据的不确定性使得无法可靠计算最小间距 [15] ，这与本文量化的局限性一致。

仅凭运动学数据无法评估其他说法。非合作性质（未经运营方许可）涉及协议与通信，而非轨迹：经同意的接近也会产生相同的轨道特征；ICEYE-X36 未实施机动，既可能是因为其未察觉或没有机动余量，也可能是因为其接受了这一行为。无论意图是检查、干扰还是其他目的，也都无法确定。有人提出根据交会与近距离操作期间观察到的行为推断意图 [2], ，但这超出了本文的讨论范围；将该事件定性为蓄意且未经请求[11] ，是一种运动学数据既无法证实也无法排除的说明。同样，没有轨道证据表明发生了与 ICEYE-X36 的接触或对其造成了扰动，但只有其运营方才能确认其状态。

5.3. 局限性

- **数据精度**。传播后的两行根数误差范围从数百米到数千米（表2）；无法将最小距离和几何关系解析到低于 $\approx$0.8 千米。

- **没有协方差**。两行根数不包含形式不确定性，因此不会计算碰撞概率；所用的不确定性为经验值。
- **机动分辨率**。 机动只能定位在相邻的两行根数历元之间，而 Δv 值是下界。
- **差分阻力**。 B^* 的差异会产生自然漂移；SGP4包含了这一因素，其正常变化性属于经验误差 ε_{95}的一部分。姿态或面积的突变可能在检测器中表现为一次小型机动，或导致无机动传播中出现未被 ε_{95}捕捉的差异；然而，主事件中观测到的差异（为 ε_{95}的16至195倍）远大于参考时段内测得的变化性。

- **大间距下的局部速度**。 在数百千米的距离上，局部速度包含偏心率和曲率效应，并不代表实际漂移。

- **控制**。 只有两个真正的负对照，且它们属于同一对天体；它们验证了该方法的行为，但无法据此估计假阳性率。

- **规则修订**。 判定规则在首次运行后进行了修订（第 4.3节），文中对此有明确说明。

6. 结论

1. 2026年10月，Cosmos 2612 与 ICEYE-X36 之间的接近与自然轨道演化不相容：在测试的全部 18 种参数组合中，零假设均被拒绝。2. 这次接近需要 Cosmos 2612 进行机动；无需将 ICEYE-X36 的机动纳入其中即可重现观测结果。3. 此次交会是一个始于五个月前的序列的最后阶段：5月进行轨道面匹配，9月30日起发生相位漂移，10月12日至12日进行轨道匹配，10月15日至16日接近，10月16日至18日进行近距离接近，10月18日至20日机动撤离，最小 Δv 间距为 174–180 米/秒。4. 最近接近时刻发生于 2026年10月18日 06:33 协调世界时，间距低于 0.79 千米（第95百分位），局部相对速度为 $\approx$0.08 米/秒，且有 41.4 小时

在 5 千米范围内，并有 14.6 小时处于 1 千米范围内；这是一次沿轨道轨迹从后方进行的共面接近。5. 公开数据无法确定确切的最小距离、是否发生接触、该操作是否具有合作性质，或其目的。

作为未来的工作，应使用时间线公开的近距离接近操作来验证该流程，并将其应用于大量互不相关的对象对，以估算其假阳性率；对公开目录进行系统性候选目标搜索 [8]可提供此类样本。

数据可用性

代码和衍生结果可在 https://github.com/bnbuitragom/cosmos2612-iceye-x36-rpo-analysis 获取。完整分析（包括原始和修订后的判定规则）包含在笔记本 `cosmos2612_iceye-x36_proximity_analysis.ipynb`中，该笔记本使用 NumPy、pandas、SciPy、Matplotlib 和 `sgp4` [17]。GP数据来自 Space-Track [16]。由于 Space-Track 用户协议对再分发有所限制，仓库中不包含原始根数集；脚本 `src/download_data.py` 可通过门户网站的免费账户下载这些数据，并重现本研究所用的数据集。

CRediT 作者贡献声明

Brayan Nicolas Buitrago Montenegro：概念化、方法学、软件、正式分析、调查、数据整理、验证、可视化、撰写——初稿、撰写——审阅与编辑。

利益冲突声明

作者声明不存在已知的可能被认为影响本文所报告工作的竞争性经济利益或个人关系。

资金资助

本研究未获得来自公共、商业或非营利部门资助机构的任何专项资助。

参考文献

[1] V. Samson，《美国军事与情报会合及近距离操作：事实概况》，Secure World Foundation，2026年6月。 https://www.swfound.org/publications-and-reports/u-s-military-and-intelligence-rendezvous-and-proximity-operations-fact-sheet （访问于2026年11月21日）。[2] T. Kelecy、S. Abernethy、F. Jones、E. Gerber、H. Wurzel，《根据实时会合与近距离行为推断预测意图》，载于：毛伊岛先进光学与空间监视技术会议（AMOS）论文集，毛伊岛，夏威夷州，2022年，第1–16页。[3] M. Mowthorpe、M. Trichas，《俄罗斯在低地球轨道和地球静止轨道反空间活动的成功发展》，The Space Review，2026年1月19日。 https://www.thespacereview.com/article/5138/1 （访问于2026年11月21日）。[4] Space-Track.org，常见问题。 https://www.space-track.org/documentation#/faq（访问于2026年10月30日）。[5] D.A. Barnhart、R. Rughani、J.J. Allam、K.W. Clarke，《地球轨道会合及近距离操作的初步安全态势调查》，《空间安全工程杂志》7（2020年）519–524。 https://doi.org/10.1016/j.jsse.2020.06.010。[6] G. Borelli、G. Gaias、C. Colombo，《面向大型星座群的主动碎片清除服务的交会与接近操作设计》，《宇航学报》205（2023年）33–46。 https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.01.021。[7] J. Serrano、Á. Gallego、Á. Martínez、D. Moreno，《结合空间监视与跟踪和空间领域感知技术对交会与接近操作进行监测》，载于：毛伊岛先进光学与空间监视技术会议（AMOS）论文集，毛伊岛，夏威夷州，2024年。 https://amostech.com/TechnicalPapers/2024/Poster/Serrano.pdf （访问于2026年11月21日）。[8] B. Du、Y. Tian、L. Izhikevich，《低地球轨道星座时代的近距离风险与政策缺口》

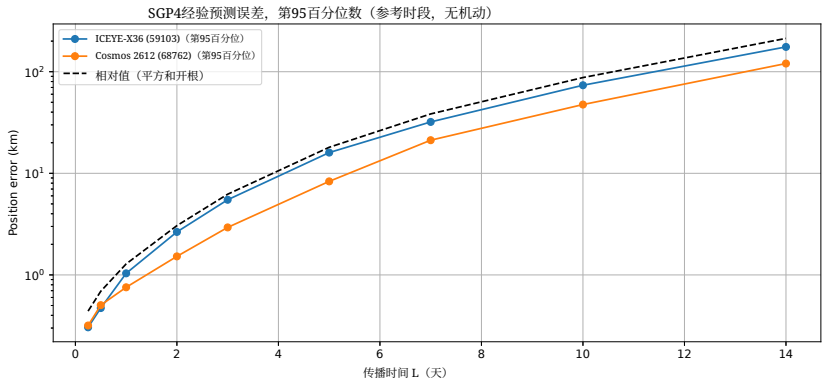
，载于：《通信研究会议》，

《信息与互联网政策》（TPRC '26），美国华盛顿哥伦比亚特区，2026年。https://lizizhikevich.github.io/assets/papers/leostalk.pdf（访问于2026年11月21日）。[9] ISS Tracker，ICEYE-X36，59103：补充信息。 https://isstracker.pl/en/satellites/59103 （访问于2026年10月30日）。[10] ICEYE，《乌克兰扩大与 ICEYE 的合作伙伴关系》，新闻稿，赫尔辛基，2026年1月19日。 https://www.iceye.com/newsroom/press-releases/ukraine-expands-partnership-with-iceye （访问于2026年11月21日）。[11] M. Randolph，《俄罗斯卫星正在轨道上跟踪一艘美国航天器。专家对此表示担忧》，《科学美国人》，2026年10月19日。 https://www.scientificamerican.com/article/alarm-grows-over-russian-satellites-provocative-approach-to-u-s-owned-satellite/（访问于2026年11月21日）。[12] A. Zak，《联盟号火箭发射一枚军事有效载荷》，RussianSpaceWeb，最后更新于2026年10月21日。 https://www.russianspaceweb.com/spacecraft-military-soyuz2-volga-2026-0417.html（访问于2026年11月21日）。[13] CNN，《俄罗斯卫星未经许可接近另一艘航天器，此举可能前所未有》，2026年10月19日。 https://www.cnn.com/2026/10/19/science/russian-satellite-iceye-x36-approach（访问于2026年10月27日）。[14] 《华盛顿时报》，《俄罗斯撤离前，太空战一度近在85英尺之内》，2026年10月19日。 https://www.washingtontimes.com/news/2026/oct/19/inside-russias-cosmos-2612-operation-kremlin-scrap-planned-attack-key/（访问于2026年10月27日）。[15] AeroTime，《俄罗斯卫星近距离接近 ICEYE-X36》，2026年10月。 https://www.aerotime.aero/articles/russian-satellite-cosmos-2612-iceye-x36-close-approach （访问于2026年10月27日）。[16] Space-Track.org，通用摄动（GP）历史，NORAD 编目编号 59103 和 68762，2026年4月1日—2026年10月28日。 https://www.space-track.org（访问于2026年10月27日）。

[17] B. Rhodes，sgp4：C 语言++ SGP4 程序，可根据地球卫星两行根数计算其位置，版本 2.27，Python包索引，2026年7月3日。 https://pypi.org/project/sgp4/（访问于2026年11月21日）。[18] J. Geul、E. Mooij、R. Noomen，使用稳健加权差分估计两行根数不确定性，《Adv. Space Res.》59 (2017) 2522–2535。 https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.02.038。[19] P.J. Rousseeuw、M. Hubert，稳健统计异常检测，《WIREs Data Min. Knowl. Discov.》8 (2018) e1236。 https://doi.org/10.1002/widm.1236。[20] W. Cui、C. Guo、W. Zhang，基于两行根数的航天器机动检测方法，《中国空间科学杂志》44 (2024年) 151–158（中文）。 https://doi.org/10.11728/cjss2024.01.2023-0001。[21] J.-D. Seong、H.-D. Kim，编队飞行卫星空间碎片碰撞规避机动优化，《J. Astron. Space Sci.》30 (2013) 291–298。 https://doi.org/10.5140/JASS.2013.30.4.291。

[22] P. Gurfil，使用平均非密切轨道根数分析受 J_2 扰动的运动，Celest.Mech. Dyn.Astron.90 (2004) 289–306。 https://doi.org/10.1007/s10569-004-0890-x。

附录 A. 补充图



图A.1：SGP4经验预测误差（第95百分位数）随传播时间的变化。

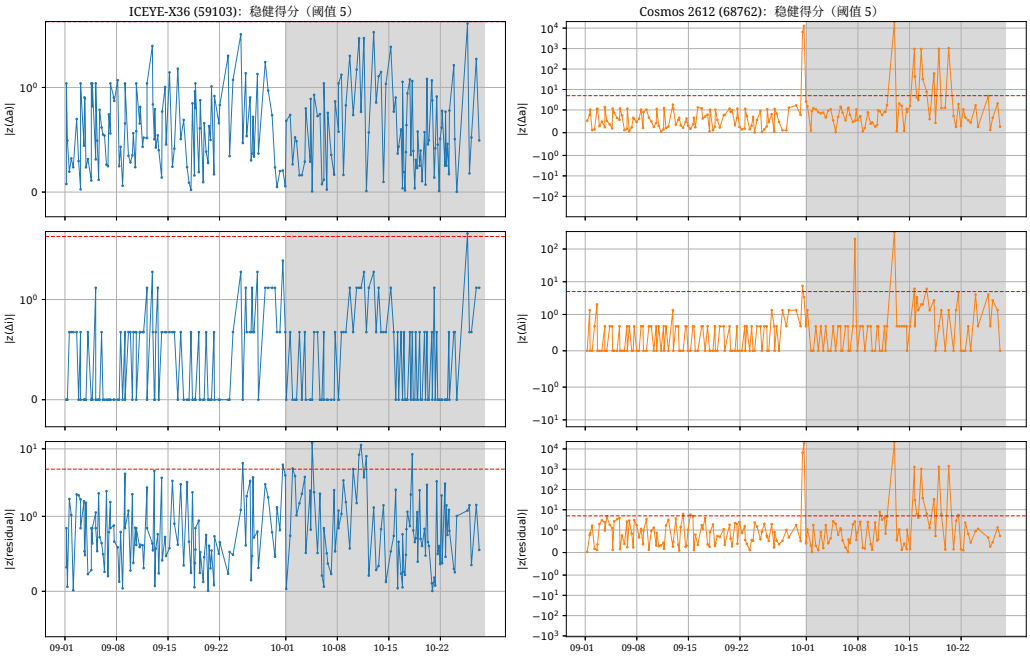


图 A.2：9月1日机动探测器对每个物体的稳健得分（红色为阈值 $|z| = 5$）。

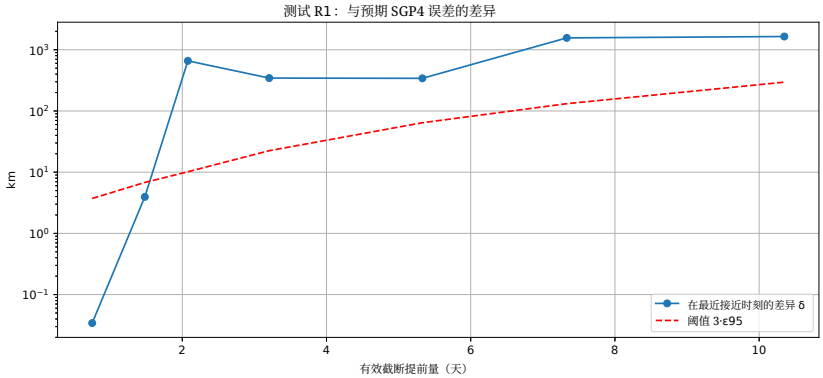


图 A.3：测试 R1：最近接近时刻的差异相对于阈值 $K\varepsilon_{95}$ 随截断提前时间的变化。