Геометрическая волновая инженерия

Лучевой бильярд в псевдогиперболоидах второго порядка вертикального и горизонтального типов

Классификация траекторий и ориентационная асимметрия фокальной локализации

Хаустов Владимир Игоревич

ORCID: 0009-0007-3657-2309

Лаборатория геометрической волновой инженерии https://vihrihaosa.ru/

Лицензия: CC BY 4.0

Дата публикации: 30 мая 2026 года

DOI: 10.5281/zenodo.20458014

Научно-технический перевод с английского языка.

Редакция, адаптированная для русскоязычного инженера-исследователя.

Оригинал: Khaustov, V. Geometric Wave Engineering: Comparative Ray-Level Verification of Second-Order Pseudohyperboloids of the Vertical and Horizontal Types. https://doi.org/10.5281/zenodo.20458014

Аннотация

Этот препринт представляет сравнительную проверку на уровне лучей псевдогиперболоидов вертикального и горизонтального типа второго порядка в рамках геометрической волновой инженерии. Расчёт строго лучевой: точечный луч распространяется вдоль прямых отрезков и зеркально отражается от границы. Дифракция, интерференция, модальная структура, потери и полноволновые решения поля не включены на данном этапе. В этой модели результаты показывают, что вертикальные и горизонтальные формы не эквивалентны лучам. Центральным элементом анализа является введение трёх J-классов: low-J, mid-J и high-J. Эти классы разделяют лучи по нормализованному осевому содержанию момента импульса начальной траектории. Без этого разделения усреднение по всем лучам смешало бы физически различные семейства траекторий и заслонило бы основной результат. В вертикальном типе преобладают возвраты с высоким J к экваториальному фокальному кольцу, в то время как в горизонтальном типе преобладают возвраты с низким J к двум горловинным фокальным дискам. Геометрические фигуры показывают только внешние 2D и 3D формы двух типов вместе с фокусными зонами, используемыми в определениях метрики. Основным количественным результатом является то, что наибольшая скорректированная плотность строгой последовательности получается для вертикальной конфигурации G2 с замкнутой поверхностью при h/a = 0,30 в классе с высоким J, где метрика достигает 1,229%.

Для поддержки воспроизводимости вычислений исходный код и скрипты, используемые для лучевой проверки общедоступны на GitHub: https://github.com/vihrihaosa/psevdohyperboloids

Ключевые слова: Геометрическая волновая инженерия; псевдогиперболоид; лучевой бильярд; вертикальный тип; горизонтальный тип; J класс; угловой момент; фокусное кольцо; горловинные фокальные диски; плотность последовательности; сравнительная проверка.

Содержание

Аннотация 2
1. Область применения и научный статус 4
2. Вычислительная настройка 4
3. Определение и научная роль J-классов 6
4. Геометрия вертикального и горизонтального типов 9
5. Лучевые метрики 10
6. Вертикальный псевдогиперболоид: Результаты и интерпретация 12
7. Горизонтальный псевдогиперболоид: Результаты и интерпретация 14
8. Сравнительный анализ: различия и унификация двух типов 17
9. Полный пакет вычислений и основные варианты 20
10. Научная интерпретация и ограничения 21
11. Выводы 22
Доступность кода 22
Список литературы 22

1. Область применения и научный статус

Цель работы - дать подробный научный отчет о проведенной сравнительной проверке уровня лучей. Объектом изучения является не родовая полость и не классический гиперболоид, а пара псевдогиперболоидных геометрий, построенных в вертикальной и горизонтальной ориентациях и испытанных по одному вычислительному протоколу.

Статус доказательств намеренно ограничен. Настоящая работа еще не подтверждает полноволновое ограничение, резонансный добротность, усиление Перселла, спектральную избирательность или направленное излучение в волновом смысле. Это подтверждает более узкое, но важное утверждение: когда один и тот же конструктивный набор параметров реализуется в двух разных ориентациях, бильярдная динамика уже различает две формы воспроизводимым и интерпретируемым образом. Это правильная научная позиция настоящих результатов в рамках более широкой программы Geometric Wave Engineering.

В более широком контексте настоящая установка относится к изучению лучевого бильярда, волнового хаоса и геометрически управляемой динамики в резонаторных полостях [1-4].

В названии используется термин «second-order». Приведенный ниже анализ следует за геометрией, наборами параметров и метриками уровня луча, явно определенными в настоящем документе.

2. Вычислительная настройка

Для поддержки воспроизводимости вычислений исходный код и скрипты, используемые для лучевой проверки общедоступны на GitHub: https://github.com/vihrihaosa/psevdohyperboloids

Точечный луч инициализируется либо из центральной точки, либо из ансамбля распределенных поверхностей. Она распространяется вдоль прямых отрезков до тех пор, пока не достигнет ближайшей граничной точки, после чего её вектор скорости отражается зеркально относительно локальной нормали поверхности. Каждый луч отслеживается до 1000 реальных отражающих контактов в основных прогонах проверки. Исследование ограничено принятой моделью псевдотела, при этом контрольные органы исключены.

В источнике обозначений = center_point_100 ансамбль состоит из 100 лучей, запущенных из центральной точки с помощью предопределённого углового множества. В источнике обозначений = surface_100x100 ансамбль определяется на сетке 100 × 100 начальных положений поверхности и соответствующих начальных направлений согласно вычислительному пакету. Если в сценариях используется более конкретная внутренняя реализация, то приоритет отдается реализации на уровне кода.

В открытых конфигурациях выход завершает траекторию, и дальнейшие контакты не добавляются к метрикам.

Протягивание геометрии определяется десятью представительными геометрическими объектами G1-G10. Каждая геометрия характеризуется параметром triple (R, a, b) вместе с безразмерными дескрипторами beta = b/a и rho = R/a. Для каждой геометрии граничное условие является либо разомкнутым, либо замкнутым; источником является либо центропунктный ансамбль, либо surface_100x100 ансамбль; половину толщины фокальной зоны испытывают при h/a = 0,05, 0,10, 0,20 и 0,30; а начальный класс момента импульса классифицируется как низкий J, средний J или высокий J.

Центральный методологический момент заключается в том, что оба типа измеряются с

одинаковой логикой: фокально-зонный контакт считается только тогда, когда луч фактически достигает соответствующего отражающего фокального множества, а основная строгая метрика нормируется по количеству фактических отражающих контактов, а не по номинальному количеству шагов. Это делает сравнение консервативным и научно прозрачным.

Таблица 1. Набор геометрии G1-G10 использован при сравнительной проверке уровня луча.

Г	Метка	R	a	b	beta = b/a	rho = R/a
1	G1_vertical	5.000	0.100	0.500	5.000	50.000
2	G2_helical_whisper	5.000	0.500	0.500	1.000	10.000
3	G3_sticky	50.000	0.500	0.500	1.000	100.000
4	G4_ldos_label_only	5.000	0.100	1.000	10.000	50.000
5	G5_horn_axial_shuttle	10.000	0.500	1.000	2.000	20.000
6	G6_tip_trap	5.000	0.050	1.000	20.000	100.000
7	G7_cap_cycle	15.000	0.500	1.000	2.000	30.000
8	G8_periodic	50.000	0.050	1.000	20.000	1000.000
9	G9_directed_exit_label	45.000	0.050	0.500	10.000	900.000
10	G10_open_retention	25.000	0.100	0.100	1.000	250.000

Примечание: геометрические метки являются внутренними идентификаторами пакета и не кодируют ориентацию, используемую в сравнительных вертикальных/горизонтальных прогонах.

Таблица 2. Метрики скрипта

Наименовнаие	Значение	Наименование
object_type	вертикальный, горизонтальный	ориентация псевдогиперболоида
body_model	исключены	в модели учитывается только псевдотело
geometry_type	открытая, замкнутая	открытая или замкнутая конфигурация
источник	center_point_100, surface_100x100	точечно-центральный или поверхностный ансамбль лучей
geom_index	G1–G3	тройка параметров (R, a, b)
h_over_a	0,05; 0,10; 0,20; 0,30	безразмерная величина h/a
J_class	low-J, mid-J, high-J	класс осевого момента импульса
n_bounces	1000	лимит отражений на луч
n_scan	64	число шагов сканирования при поиске пересечения

Для поддержки воспроизводимости вычислений исходный код и скрипты, используемые для настоящей проверки raylevel, общедоступны на GitHub: https://github.com/vihrihaosa/psevdohyperboloids

3. Определение и научная роль J-классов

Классы J являются одним из ключевых элементов методологии верификации. В аксиально организованной геометрии луч не может быть полностью охарактеризован только по его начальной точке и по тому, попадает ли он в фокальную зону или нет. Также важно, насколько его движение связано с циркуляцией вокруг оси симметрии. По этой причине в настоящей работе вводится параметр Jhat, безразмерная мера содержания осевого момента импульса начальной траектории.

В используемой здесь нормализации

Jhat = | L _ axis |/(R * v0),

где L_axis - составляющая момента импульса относительно оси симметрии соответствующей геометрии, R - характеристический радиус, а v0 - величина начальной скорости луча. Для общей нормализации v0 = 1 это сводится к Jhat = | L _ axis |/R.

Операционно лучи делятся на три класса: low-J для слабой осевой циркуляции, mid-J для промежуточной циркуляции и high-J для сильной осевой циркуляции. В используемой здесь числовой классификации низкий J соответствует Jhat <0,2, средний J соответствует 0,2 ≤ Jhat <0,6, а высокий J соответствует Jhat ≥ 0,6. Эти пороги разделяют качественно разные семейства траекторий: почти меридиональные или челночные лучи, переходные лучи и сильно циркулирующие лучи.

Причина введения этих занятий скорее научная, чем косметическая. Если все лучи усредняются вместе, небольшой, но когерентный механизм локализации может быть скрыт гораздо большей популяцией нерелевантных траекторий. Классы J делают структуру фазового пространства более видимой и отвечают на вопрос: какой тип луча выбирается геометрией?

Использование момента импульса в качестве структурного дескриптора естественно в консервативной динамике [5,6], и различие между почти меридиональной и циркулирующей траекториями согласуется с более широкой картиной режимов микрокавитности и волново-хаотического распространения [3,4,7].

В вертикальном псевдогиперболоиде высоко-J лучи обладают сильной азимутальной составляющей вокруг оси симметрии и многократно возвращаются к экваториальному фокальному кольцу. У горизонтального типа фокальный набор состоит из двух горловинных дисков; соответственно, низкоинтенсивные лучи с более выраженным осевым челноком возвращаются к ним более эффективно. Поэтому основным сравнением статьи является изменение в доминирующем классе фазового пространства: вертикальный = high-J кольцевой селектор, горизонтальный = low-J двухгорловой селектор.

3.1. Детальное аналитическое считывание результатов вычислений после разделения J-класса

Введение J классов превращает вычисление из единого усредненного числа удержаний в диагностику в фазовом пространстве. Полный расчет содержит множество комбинаций геометрии, граничных условий, источника, толщины фокальной зоны и J-класса. Если их все свернуть в одно число, центральный механизм становится невидимым. Разделение J-класса показывает, какая часть исходного ансамбля лучей на самом деле совместима с

данной фокальной топологией. Вот почему J-анализ - это не вспомогательная таблица, а ключевая научная линза, через которую должен считываться весь расчет.

Первое глобальное наблюдение - асимметрия между вертикальной и горизонтальной ориентацией. Вертикальный тип имеет большую глобальную среднюю строгую плотность, большую максимальную строгую плотность и большее среднее участие лучей в действительных строгих последовательностях. Это не только говорит о том, что вертикальный объект лучше в неопределенном смысле. Это говорит о том, что экваториальная геометрия кольца более совместима с повторяющимися отражательными отражениями, чем геометрия с двумя горловинами по тестируемому протоколу с ограниченной псевдомоделью.

Второе наблюдение - это переключение доминирующего класса момента импульса. При вертикальном типе наиболее сильный отклик принадлежит лучам с высоким J. Эти лучи несут значительное азимутальное движение вокруг оси симметрии и поэтому, естественно, пересматривают экваториальную кольцевую полосу. В горизонтальном типе наиболее сильный отклик принадлежит лучам с низким J. В этих лучах меньше преобладает азимутальная циркуляция, и они могут легче перемещаться между двумя плоскостями горла. Таким образом, J-классы раскрывают фактический механизм: вертикальная локализация доминирует в кольцевой циркуляции, тогда как горизонтальная локализация доминирует в горле челнока.

Третье наблюдение касается разницы между строгой плотностью, долей лучей с последовательностью и максимальной полосой. Высокая строгая плотность означает, что фокальные контакты занимают большую долю всех реальных отражений. Высокая доля лучей с последовательностью означает, что многие лучи участвуют хотя бы один раз в строгой последовательности. Высокая максимальная полоса означает, что хотя бы один луч может оставаться в фокальной последовательности длительное время. Эти три величины не измеряют одно и то же свойство. Например, конфигурация может давать очень длинную максимальную полосу, но все же иметь более низкую среднюю плотность, если длинное событие является редким. И наоборот, конфигурация может иметь широкую популяцию участвующих лучей, но в основном короткие последовательности. Поэтому научное чтение должно сочетать в себе все три показателя.

Таблица 3. Аналитическое считывание численных результатов после разделения J-класса.

Аналитический признак	Численное подтверждение в расчете	Научная интерпретация
Вертикальное доминирование	Глобальная максимальная строгая плотность достигает 1,229% в случае вертикальной замкнутой поверхности high-J; вертикальное глобальное среднее выше, чем	Вертикальное экваториальное кольцо является более эффективным фокальным селектором в тестируемом семействе лучевых бильярдов.
Горизонтальная специфичность	Горизонтальный оптимум проявляется в low-J, а не high-J; высокие J и средние J не доминируют в горизонтальном отклике.	Горизонтальный тип не является слабой копией вертикального типа; он выбирает другое семейство траекторий, связанное с двумя дисками горловины.

Переключатель J-класса	Vertical = high-J кольцевой селектор; horizontal = low-J двухгорловой селектор.	Ориентация изменяет предпочтительную область фазового пространства, а не только внешний вид поверхности.
Зависимость h/a	Наиболее сильные случаи обычно происходят при h/a = 0,30 в исследуемом диапазон.	Увеличение нормализованной толщины фокальной зоны фиксирует больше повторных возвратов; h/a - параметр диапазона измерений и
Зависимость от источника	Вертикальные наиболее сильные случаи в основном surface_100x100; варианты с горизонтальными интерлиньяжами включают варианты с центральной точкой и с поверхностью.	Вертикальный механизм представляет собой граничную/кольцевую выборку; горизонтальный механизм больше опосредован осью/горлом.
Интерпретация полос	Некоторые случаи показывают длинные максимальные полосы, даже когда их средняя строгая плотность не является максимальной.	Длинные полосы указывают на глубокие, но, возможно, узкие каналы удержания; плотность указывает на более широкий статистический вес.

Для вертикального типа ведущий результат G2 следует интерпретировать как широкий и воспроизводимый режим выбора кольца, а не как единственный исключительный луч. Его доля лучей с последовательностью высока, что означает, что поведение фокального кольца дискретизируется большой частью соответствующего ансамбля с высоким J. G5 и G7 образуют вторую группу вертикальных случаев, когда один и тот же механизм остаётся видимым, в то время как геометрии с очень большими ро или экстремальными соотношениями сторон менее эффективны. Эта картина предполагает, что лучшие режимы локализации кольца требуют баланса между длиной рупора, радиусом центрального кольца и толщиной горловины; чрезмерно растянутые геометрии разбавляют вероятность повторных возвратов в фокальную полосу.

Для горизонтального типа меньшие строгие значения должны интерпретироваться вместе с изменением топологии. Две фокальные зоны разделены в осевом положении, поэтому правильная строгая последовательность требует повторных возвратов либо к одному диску горловины, либо к чередующимся возвратам через область горловины. Это более ограничительное событие, чем оставаться вблизи одного экваториального кольца. Таким образом, доминирование с низким J является физически разумным: лучи с низким J сохраняют большую осевую подвижность, в то время как лучи с высоким J имеют тенденцию тратить свое движение в циркуляции боковой стенки и естественным образом не пересматривают горловинные диски как последовательность.

Зависимость от h/a имеет чёткий методологический смысл. Очень узкая фокальная полоса измеряет только почти точные результаты. Более широкая полоса измеряет конечный инженерный допуск вокруг идеального фокусного множества. Монотонный рост лучших значений с h/a не следует считать искусственным раздуванием результата; он показывает, насколько чувствителен выбор фокуса к допустимой рабочей толщине фокальной зоны. В более поздней волновой модели аналогичный параметр будет не только чисто

геометрической полосой: он будет связан с длиной волны, пограничным слоем, шириной апертуры и областью интегрирования поле-энергия.

Открытая и закрытая конфигурации также должны читаться по-разному. В замкнутом объекте повторяющиеся фокальные контакты могут накапливаться и выдавать строгую последовательность. В открытом объекте фокусное множество может функционировать как выход. Поэтому низкое строгое значение в открытом случае не означает автоматически, что геометрия не направляет лучи к фокальной области. Это может означать, что успешная маршрутизация прерывает траекторию вместо того, чтобы позволить ей продолжать накапливать отражающие контакты. По этой причине метрика строгой последовательности, наиболее естественно, является метрикой удержания для замкнутых геометрий и только косвенно индикатором маршрутизации выхода для разомкнутых геометрий.

Таким образом, вычисление дает многоуровневое заключение. На самом нижнем уровне это подтверждает, что фокальные последовательности существуют в рамках принятой зеркальной модели с ограниченной псевдомоделью. На следующем уровне показано, что эти последовательности неравномерно распределены по J классам. На самом важном слое он демонстрирует, что предпочтительный J-класс зависит от ориентации: вертикальные и горизонтальные псевдогиперболоиды реализуют разные правила геометрического отбора. По этой причине классы J занимают центральное место во всей работе.

4. Геометрия вертикального и горизонтального типов

Два объекта принадлежат одной конструктивной семье. Они используют одни и те же формальные параметры (R, a, b), один и тот же закон зеркального отражения и один и тот же контроль h/a толщины фокальной зоны. Их отличие - геометрическая ориентация. В вертикальном типе генерирующий профиль поворачивается вокруг продольной оси x, а главный фокальный набор является экваториальным кольцом радиуса R. В горизонтальном типе профиль поворачивается вокруг оси y, и главный фокальный набор разделяется на два симметричных диска горловины вблизи y = + R и y = -R.

Для вертикального типа длина рупора равна L = a sqrt (1 + (R/b) ^ 2). В меридиональном сечении замкнутая геометрия состоит из гиперболической боковой части, соединённой с центральной округлой экваториальной областью. Фокальной зоной, релевантной для метрики, является не вся центральная крышка, а узкая кольцевая полоса вблизи экваториального кольца rho = R. В открытом случае то же самое геометрическое положение становится апертурой, а не отражающей полосой.

Для горизонтального типа основным законом радиуса является rho (y) = a sqrt (1 + ((R - | y |)/b) ^ 2) внутри | y | <= R, с полусферическими замыканиями в замкнутой конфигурации. Его фокусное множество имеет другую топологию. Единого экваториального кольца, аналогичного вертикальному случаю, не существует. Вместо этого существуют два симметричных фокальных диска, центрированных по горловине. Это изменение фокальной топологии является основной геометрической причиной, по которой также изменяются предпочтительные классы лучей.

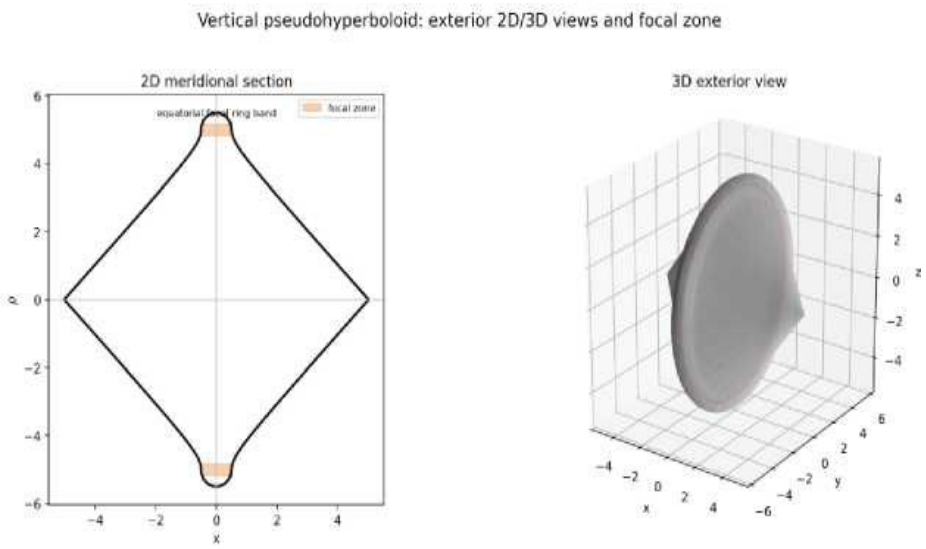

Рисунок 1. Вертикальный псевдогиперболоид: внешние 2D и 3D виды. Выделенная кольцевая полоса указывает экваториальную фокальную зону, используемую в строгой метрике.

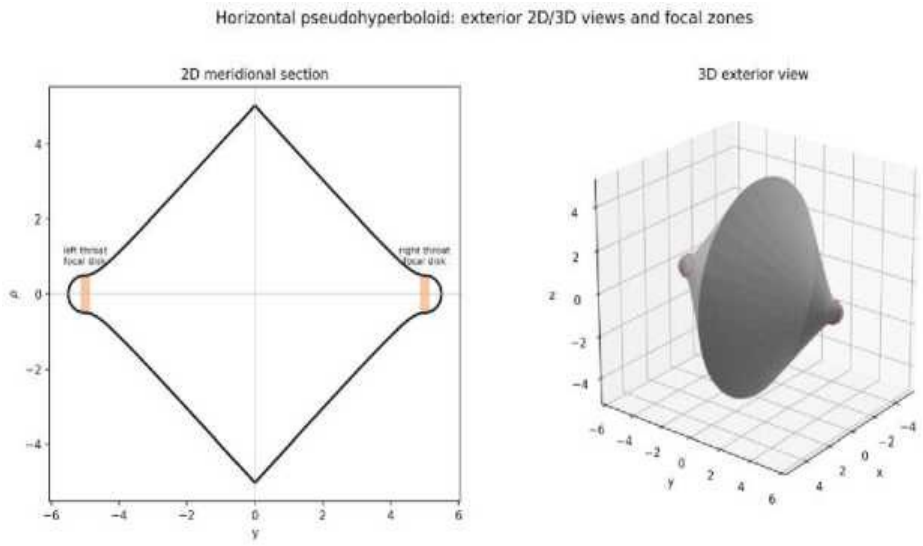

Рисунок 2. Горизонтальный псевдогиперболоид: внешние 2D и 3D виды. Выделенные диски указывают две зоны фокуса горловины, используемые в строгой метрике.

Геометрическое сравнение сразу же предполагает динамическую гипотезу, подтверждённую J-анализом. При вертикальном типе лучи с достаточно большим азимутальным содержанием могут многократно снимать экваториальное кольцо, не нуждаясь в сильных осевых отклонениях. В горизонтальном типе повторяющиеся возвраты к фокальному набору требуют движения, которое повторяет две плоскости горловины. Таким образом, одно и то же семейство форм поддерживает два различных механизма, зависящих от ориентации.

5. Лучевые метрики

Основной скорректированной метрикой является плотность строгих последовательностей

на фактический отражающий контакт, выраженная в процентах. Фокальный контакт учитывается только в том случае, если он принадлежит к последовательности из по меньшей мере двух последовательных фокальных возвратов. Отдельные единичные попадания отбрасываются.

Здесь N_strict - общее количество фокальных отражающих контактов, которые относятся к строгим сериям длины не менее 2, а N_actual_reflective - общее количество всех реально реализованных отражающих контактов в пробеге. Строгий ряд определяется как последовательность из двух или более последовательных отражающих контактов, каждый из которых принадлежит соответствующей фокальной зоне. Единичные очаговые попадания в N_strict не входят.

Дополнительные метрики также важны для интерпретации. Процент лучей по меньшей мере с одной действительной последовательностью указывает, насколько широк бассейн фокального отбора в фазовом пространстве. Максимальная отражающая полоса указывает, как долго отдельный луч может оставаться в фокальной области после захвата. Эти метрики дополняют основное значение плотности: геометрия может иметь скромную среднюю плотность, но все же давать очень длинные полосы на редких траекториях, или, наоборот, давать много коротких, но воспроизводимых фокальных возвратов.

Таблица 4. Метрические определения, используемые в скрипте.

Метрическая	Формула/определен	Смысл
strict_sequence_density_per_actual_reflection_pct	100 * N _ strict/N _ actual _ reflective	основная скорректированная плотность строгих фокальных последовательностей
qualified_rays_pct	доля лучей хотя бы с одной последовательностью> = 2	сколько лучей на самом деле участвовало в фокальной задержке
max_reflective_streak_max	максимальная длина строгой последовательности	экстремальная продолжительность местного возврата
rays_with_ge5_consecutive_pct	доля лучей с последовательностью >=5	показатель повышенного удержания
rays_with_ge10_consecutive_pct	доля лучей с последовательностью> = 10	показатель длительного хранения
exit_pct	доля лучей, вышедших через открытую зону	основное вспомогательное количество для открытой конфигурации
max_L_drift_norm/ max_speed_drift	дрейф углового момента и скорости	числовой контроль качества отражений

6. Вертикальный псевдогиперболоид: Результаты и интерпретация

Вертикальный тип является самым сильным селектором уровня луча в полной развертке. Его доминирующим режимом является конфигурация closed + surface_100x100 в классе high-J. Ведущий случай - G2 при h/a = 0,30, с исправленной плотностью строгой последовательности 1,229%, долей лучей с последовательностью 88,552% и максимальной полосой 22. Это не единичный численный выброс. G5 и G7 образуют последовательный вторичный уровень, в то время как G1 и G4 показывают, что одно и то же поведение, избирательное к кольцу, сохраняется в нескольких геометриях с различными соотношениями сторон.

Таблица 5. Вертикальная сводка по J-классу для закрытого + surface_100x100 подмножества.

J класс	Среднее строгое,%	Макс., %	Средние лучи с последовательностью,%	Макс лучей с последовательностью,%	Max Streak
high-J	0.178	1.229	28.630	88.552	111.000
low-J	0.045	0.363	15.332	82.637	76.000
mid-J	0.075	0.588	19.781	93.128	35.000

Таблица 6. Верхние вертикальные варианты по скорректированной строгой метрике.

G	Label	Boundary	Source	h/a	J	Strict, %	Rays with sequence, %	Max streak
2	G2_helical_whisper	closed	surface_100x100	0.300	high-J	1.229	88.552	22.000
5	G5_horn_axial_shuttle	closed	surface_100x100	0.300	high-J	0.930	86.309	111.000
7	G7_cap_cycle	closed	surface_100x100	0.300	high-J	0.734	83.824	50.000
2	G2_helical_whisper	closed	surface_100x100	0.300	mid-J	0.588	93.128	35.000
1	G1_vertical	closed	surface_100x100	0.300	high-J	0.535	68.155	52.000
4	G4_ldos_label_only	closed	surface_100x100	0.300	high-J	0.533	76.411	56.000

2	G2_helical_whi sper	closed	surface_100x 100	0.20 0	high -J	0.50 4	71.813	21.000
5	G5_horn_axial_shuttl e	closed	surface_100x 100	0.30 0	mid- J	0.39 5	80.518	6.000
5	G5_horn_axial_shuttl e	closed	surface_100x 100	0.20 0	high -J	0.37 7	64.029	67.000
2	G2_helical_whi sper	closed	surface_100x 100	0.30 0	low- J	0.36 3	82.637	6.000
2	G2_helical_whi sper	closed	center_point _ 100	0.30 0	low- J	0.34 0	82.000	2.000
7	G7_cap_cycle	closed	surface_100x 100	0.20 0	high -J	0.29 6	60.577	31.000
6	G6_tip_trap	closed	surface_100x 100	0.30 0	high -J	0.29 2	57.490	53.000
7	G7_cap_cycle	closed	surface_100x 100	0.30 0	mid- J	0.27 5	69.045	32.000
2	G2_helical_whi sper	closed	surface_100x 100	0.20 0	mid- J	0.25 1	68.155	35.000

Таблица 7. Наилучший вертикальный вариант для каждого геометрического G1-G10.

G	Метка	Наилучшее значение h/a	J	Строгий,%	Лучи с последовательностью, %	Max Streak
1	G1_vertical	0.300	high-J	0.535	68.155	52.000
2	G2_helical_whisper	0.300	high-J	1.229	88.552	22.000
3	G3_sticky	0.300	high-J	0.216	59.539	10.000
4	G4_ldos_label_only	0.300	high-J	0.533	76.411	56.000
5	G5_horn_axial_shuttle	0.300	high-J	0.930	86.309	111.000
6	G6_tip_trap	0.300	high-J	0.292	57.490	53.000
7	G7_cap_cycle	0.300	high-J	0.734	83.824	50.000

8	G8_periodic	0.300	high-J	0.048	14.133	3.000
9	G9_directed_exit_label	0.300	high-J	0.055	16.161	7.000
10	G10_open_retention	0.300	high-J	0.094	32.349	26.000

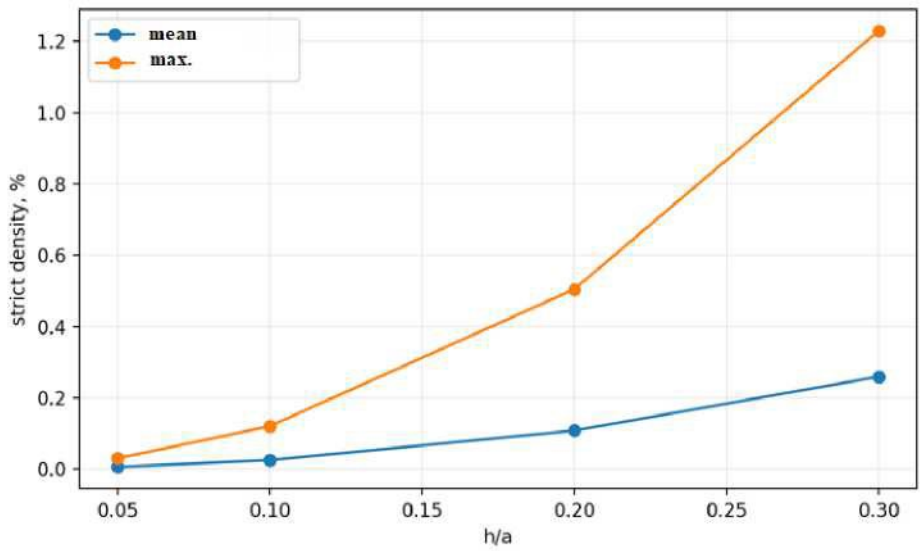

Рисунок 3. Вертикальный тип: зависимость от нормализованной толщины фокальной зоны h/a.

По-научному имеют значение три наблюдения. Во-первых, доминирование high-J устойчиво: средняя строгая плотность для high-J превосходит классы low-J и middle-J с явным запасом, а максимальное значение достигается только в секторе high-J. Во-вторых, зависимость от h/a монотонна в исследуемом диапазоне. Это означает, что для принятого определения фокальной зоны расширение допустимой кольцевой полосы захватывает больше повторяющихся возвратов ближнего кольца, а не просто вносит шум. В-третьих, поверхностный источник превосходит центральный источник в самых сильных режимах, что говорит о том, что соответствующий коллектор фазового пространства не является чисто осевым, а лучше отбирается более широким распределенным по границам стартовым ансамблем.

Поэтому вертикальный тип можно интерпретировать как архитектуру удержания кольца. Геометрия не просто задерживает лучи «в целом»; он смещает их в сторону кольцевой семьи повторных возвратов. На языке GWE это важно, поскольку демонстрирует, что фигура способна выбирать не только местоположение, но и класс траектории. Кольцо является геометрическим селектором, и предпочтительным классом является high-J.

7. Горизонтальный псевдогиперболоид: Результаты и интерпретация

Горизонтальный тип дает другой и более слабый, но все же воспроизводимый рисунок. Его доминирующий ответ не является кольцеобразной циркуляцией с высоким J. Вместо этого лучшие случаи лежат в классе low-J и соответствуют повторным ревизиям двух горловинных фокальных дисков. Ведущее строгое значение остается намного ниже вертикального оптимума, но его структура имеет научное значение, потому что предпочтительный класс переключается: high-J и mid-J практически исчезают, в то время

как low-J остается активным.

Околонулевые значения для горизонтального high-J и горизонтального middle-J должны считываться как наблюдаемый результат настоящего вычислительного протокола, а не как универсальная теорема для всех возможных установок. В рамках этого пакета вычислений они означают, что соответствующие траектории либо не образуют строгие фокальные ряды на практически обнаруживаемом уровне, либо делают это только ниже разрешения принятой метрики. Таким образом, нулевые значения в таблицах отражают конкретный протокол, определения фокальной зоны и критерий строгой последовательности, используемый здесь.

Таблица 8. Горизонтальная сводка по J-классу для закрытого + surface_100x100 подмножества.

J класс	Среднее строгое,%	Макс., %	Средние лучи с последовательностью,%	Макс лучей с последовательностью,%	Max Streak
high-J	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
low-J	0.035	0.265	8.484	41.799	94.000
mid-J	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Таблица 9. Верхние горизонтальные варианты по скорректированной строгой метрике.

G	Метка	Boundar Y	Источник	ч/д	J	Строгий,%	Лучи с последовательностью,%	Max Streak
2	G2_helical_whis на	closed	center_point_100	0.300	low-J	0.288	80.000	2.000
2	G2_helical_whis на	closed	surface_100x100	0.300	low-J	0.265	41.799	54.000
5	G5_horn_axial_ шаттл	closed	center_point_100	0.300	low-J	0.181	56.000	6.000
4	Только G4_ldos_label_	closed	surface_100x100	0.300	low-J	0.166	39.608	94.000
5	G5_horn_axial_ шаттл	closed	surface_100x100	0.300	low-J	0.161	35.216	36.000
7	G7_cap_cycle	closed	center_point_100	0.300	low-J	0.137	43.000	3.000
2	G2_helical_whis на	closed	surface_100x100	0.200	low-J	0.120	29.868	30.000

6	G6_tip_trap	closed	surface_100x100	0.300	low-J	0.116	27.026	53.000
2	G2_helical_whis на	closed	center_point_100	0.200	low-J	0.110	45.000	2.000
5	G5_horn_axial_ шаттл	closed	center_point_100	0.200	low-J	0.094	36.000	4.000
1	G1_vertical	closed	center_point_100	0.300	low-J	0.084	37.000	2.000
4	Только G4_ldos_label_	closed	surface_100x100	0.200	low-J	0.081	20.971	94.000
1	G1_vertical	closed	surface_100x100	0.300	low-J	0.078	21.354	56.000
7	G7_cap_cycle	closed	surface_100x100	0.300	low-J	0.074	18.848	70.000
5	G5_horn_axial_ шаттл	closed	surface_100x100	0.200	low-J	0.073	21.243	36.000

Таблица 10. Наилучший горизонтальный вариант для каждого геометрического G1-G10.

G	Метка	Наилучшее значение h/a	J	Строгий,%	Лучи с последовательностью,%	Max Streak
1	G1_vertical	0.300	low-J	0.078	21.354	56.000
2	G2_helical_whisper	0.300	low-J	0.265	41.799	54.000
3	G3_sticky	0.300	low-J	0.003	1.085	5.000
4	G4_ldos_label_only	0.300	low-J	0.166	39.608	94.000
5	G5_horn_axial_shuttle	0.300	low-J	0.161	35.216	36.000
6	G6_tip_trap	0.300	low-J	0.116	27.026	53.000
7	G7_cap_cycle	0.300	low-J	0.074	18.848	70.000
8	G8_periodic	0.300	low-J	0.001	0.249	2.000
9	G9_directed_exit_label	0.300	low-J	0.001	0.277	3.000
10	G10_open_retention	0.300	low-J	0.000	0.111	2.000

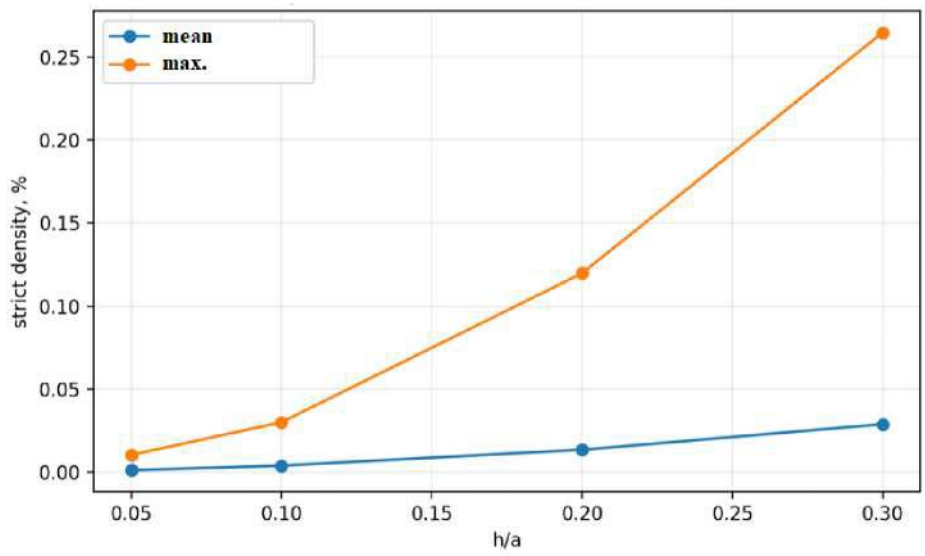

Рисунок 4. Горизонтальный тип: зависимость от нормализованной толщины фокальной зоны h/a.

Горизонтальный тип не следует оценивать только по меньшей числовой величине. Его научная роль является сравнительной: он показывает, что простая переориентация конструктивной схемы изменяет топологию фокального множества и тем самым изменяет, какие траектории продвигаются. В горизонтальной геометрии повторяющиеся фокальные контакты требуют возврата к двум разделенным плоскостям горловины. Это благоприятствует лучам с более челночным осевым движением и ухудшает траектории с высоким J, которые продолжают снимать боковые стенки, не пересекая диски горловины. В этом смысле горизонтальный тип не является неудачным вертикальным типом; это отдельный геометрический селектор с другой сигнатурой фазового пространства.

Еще одно важное отличие заключается в том, что некоторые из самых сильных горизонтальных случаев появляются вместе с источником center_point_100. Это согласуется с картиной двух глоток: инъекция в ближнюю ось, естественно, лучше подходит для возвратно-поступательного повторного введения в глотку, чем инъекция в широкую глотку. Таким образом, горизонтальный тип является более опосредованным по оси, тогда как вертикальный тип является более опосредованным по рингу.

8. Сравнительный анализ: различия и унификация двух типов

Таблица 11. Сравнение по всем случаям.

Тип	Среднее строгое,%	Макс.%	Средние лучи с последовательностью,%	Макс лучей с последовательностью,%	Количество случаев
горизонтальная	0.008	0.288	2.448	80.000	480
вертикальная	0.042	1.229	9.705	93.128	480

Таблица 12. Сравнительная сводка по типу и J-классу для выбранного подмножества.

Тип	J	Среднее строгое,%	Макс.%	Средние лучи с последовательностью, %	Макс лучей с последовательностью,%	Max Streak	Количество случаев
горизонтальная	high-J	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	40
горизонтальная	low-J	0.035	0.265	8.484	41.799	94.000	40
горизонтальная	mid-J	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	40
вертикальная	high-J	0.178	1.229	28.630	88.552	111.000	40
вертикальная	low-J	0.045	0.363	15.332	82.637	76.000	40
вертикальная	mid-J	0.075	0.588	19.781	93.128	35.000	40

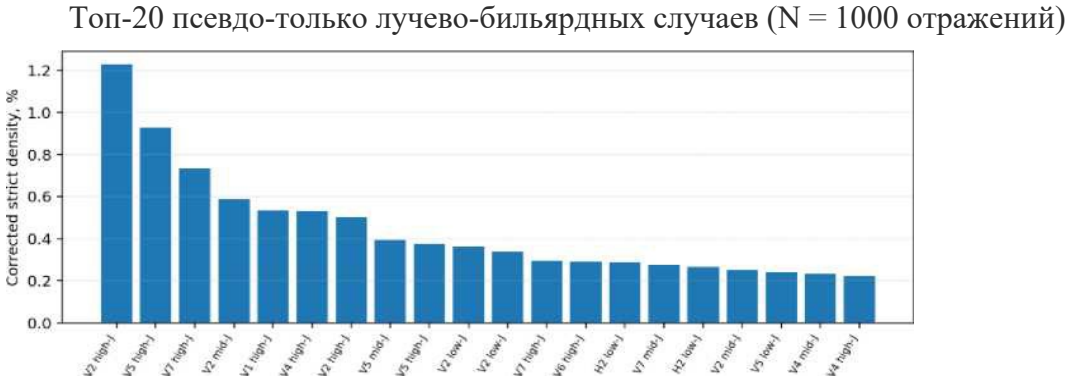

Рисунок 5. Глобальный топ-20 случаев от псевдомодельного ограниченного охвата.

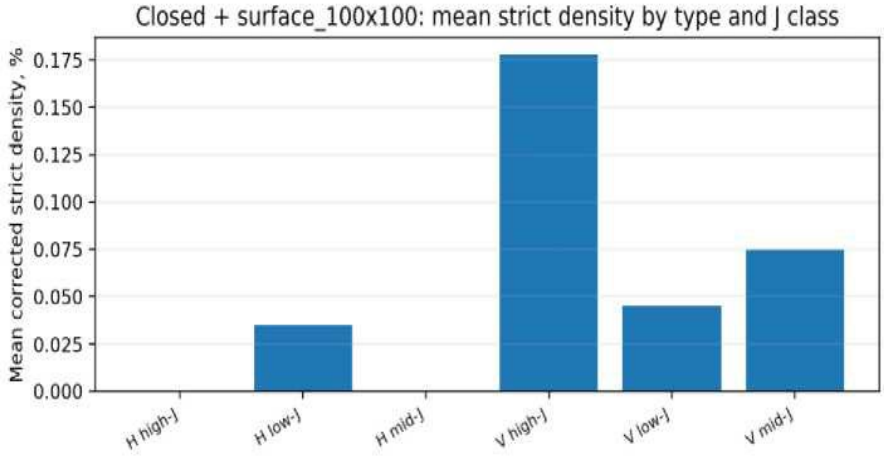

Рисунок 6. Замкнутый + surface_100x100: средняя строгая плотность по типу и J-классу.

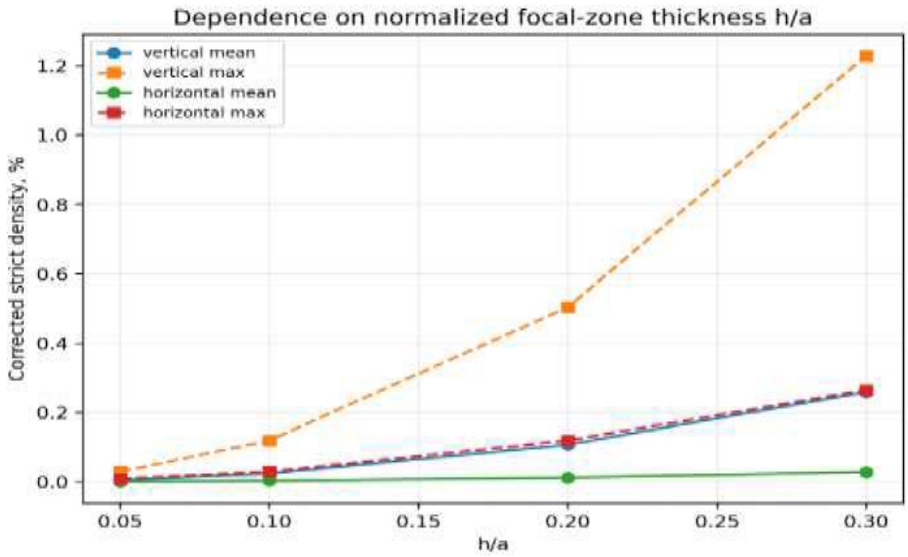

Рисунок 7. Зависимость скорректированной строгой плотности от нормализованной толщины фокальной зоны h/a.

Два типа унифицированы по конструкции и разделены динамикой. Их единство состоит из пяти общих элементов: (1) один и тот же набор параметров (R, a, b); (2) тот же самый зеркальный закон, ограниченный псевдомоделью; (3) одно и то же открытое/закрытое различие; (4) одинаковую нормализацию h/a; и (5) та же метрика строгой последовательности. Их отличие состоит из пяти одинаково чётких элементов: (1) топология фокального множества, кольцо против двух дисков; (2) предпочтительный J класс, высокий J по сравнению с низким J; (3) предпочтительный исходный сценарий, поверхностный или осевой; (4) общая сила локализации, более сильная по сравнению с более слабой в тестируемой развертке; и (5) физическая интерпретация, азимутальная рециркуляция в зависимости от динамики осевого челнока.

Это сравнение является центральным научным результатом препринта. Если бы обе ориентации производили один и тот же доминантный J-класс и одно и то же поведение фокуса, конструктивное различие между ними было бы динамически поверхностным. Вместо этого они производят взаимодополняющее поведение. Вертикальный тип действует как селектор с центром в кольце, который вознаграждает ненулевую угловую циркуляцию. Горизонтальный тип действует как двухгорловой селектор, который вознаграждает повторные осевые ревизии. Поэтому конструктивная ориентация не является декоративным выбором; это контрольный параметр динамики внутренних лучей.

С точки зрения проектирования геометрических волн этот сравнительный результат более важен, чем один наилучший процент. Это показывает, что семейство псевдоповерхностей может быть организовано в таксономию поведения маршрутизации. Более широкое утверждение GWE заключается не в том, что одна универсальная геометрия решает каждую проблему, а в том, что сама геометрия может служить программируемым оператором над классами траекторий или, на более поздних стадиях, над классами волновых состояний. Существующая вертикальная/горизонтальная дифференциация - это именно то доказательство, которое необходимо для этой программы.

9. Полный пакет вычислений и основные варианты

Таблица 13. Глобальный топ-30 кейсов из вычислительного пакета.

Тип	Граница	Источник	G	ч/д	J	Строгий,%	Лучи с последовательностью, %	Max Streak
вертикальная	закрыто	surface_100x100	2	0.300	high-J	1.229	88.552	22.000
вертикальная	закрыто	surface_100x100	5	0.300	high-J	0.930	86.309	111.000
вертикальная	закрыто	surface_100x100	7	0.300	high-J	0.734	83.824	50.000
вертикальная	закрыто	surface_100x100	2	0.300	mid-J	0.588	93.128	35.000
вертикальная	закрыто	surface_100x100	1	0.300	high-J	0.535	68.155	52.000
вертикальная	закрыто	surface_100x100	4	0.300	high-J	0.533	76.411	56.000
вертикальная	закрыто	surface_100x100	2	0.200	high-J	0.504	71.813	21.000
вертикальная	закрыто	surface_100x100	5	0.300	mid-J	0.395	80.518	6.000
вертикальная	закрыто	surface_100x100	5	0.200	high-J	0.377	64.029	67.000
вертикальная	закрыто	surface_100x100	2	0.300	low-J	0.363	82.637	6.000
вертикальная	закрыто	center_point_100	2	0.300	low-J	0.340	82.000	2.000
вертикальная	закрыто	surface_100x100	7	0.200	high-J	0.296	60.577	31.000
вертикальная	закрыто	surface_100x100	6	0.300	high-J	0.292	57.490	53.000
горизонтальная	закрыто	center_point_100	2	0.300	low-J	0.288	80.000	2.000
вертикальная	закрыто	surface_100x100	7	0.300	mid-J	0.275	69.045	32.000
горизонтальная	закрыто	surface_100x100	2	0.300	low-J	0.265	41.799	54.000
вертикальная	закрыто	surface_100x100	2	0.200	mid-J	0.251	68.155	35.000
вертикальная	закрыто	surface_100x100	5	0.300	low-J	0.241	69.292	18.000
вертикальная	закрыто	surface_100x100	4	0.300	mid-J	0.234	48.358	13.000

вертикальная	закрыто	surface_100x100	4	0.200	high-J	0.222	44.695	36.000
вертикальная	закрыто	surface_100x100	1	0.200	high-J	0.218	45.244	33.000
вертикальная	закрыто	surface_100x100	1	0.300	mid-J	0.217	52.888	12.000
вертикальная	закрыто	surface_100x100	3	0.300	high-J	0.216	59.539	10.000
вертикальная	закрыто	center_point_100	5	0.300	low-J	0.210	64.000	2.000
горизонтальная	закрыто	center_point_100	5	0.300	low-J	0.181	56.000	6.000
вертикальная	закрыто	surface_100x100	5	0.200	mid-J	0.167	53.807	4.000
горизонтальная	закрыто	surface_100x100	4	0.300	low-J	0.166	39.608	94.000
горизонтальная	закрыто	surface_100x100	5	0.300	low-J	0.161	35.216	36.000
вертикальная	закрыто	surface_100x100	7	0.300	low-J	0.160	54.483	18.000
вертикальная	закрыто	surface_100x100	2	0.200	low-J	0.153	53.222	4.000

Список топ-30 подтверждает модель доминирования, уже видимую в анализе по разделам. Верхняя часть рейтинга сильно заполнена вертикальными закрытыми поверхностными случаями с высоким J, в то время как лучшие горизонтальные случаи появляются позже и остаются низкими J. Это полезно, поскольку показывает, что различие не является артефактом выбора одной предпочтительной диаграммы. Он сохраняется, когда вся таблица результатов отсортирована глобально по одному единому критерию.

10. Научная интерпретация и ограничения

Настоящие результаты подтверждают тщательно разграниченное научное утверждение. Они указывают на то, что протестированное семейство псевдогиперболоидов генерирует геометрический выбор фазового пространства на уровне лучей. Это уже имеет смысл, поскольку показывает, что форма полости не является динамически нейтральной. Тем не менее, он еще не устанавливает полноволновое улучшение, резонансное хранение, спектральную адресуемость или производительность на уровне приложений. Они относятся к более поздним ступеням проверки.

В более широком смысле этот результат согласуется с установленной зависимостью динамики лучей от формы полости и структуры фазового пространства [1-4].

Тем не менее, результат на уровне луча является основополагающим по трем причинам. Во-первых, он обеспечивает поддающуюся фальсификации базовую линию. Любое более позднее моделирование или эксперимент на уровне волн должны учитывать или объяснять асимметрию ориентации на уровне лучей, обнаруженную здесь. Во-вторых, он определяет, какие геометрии и какие сценарии источника/J заслуживают приоритета в более дорогостоящих исследованиях полной волны. В-третьих, это помогает отделить

действительно геометрические эффекты от случайного численного повествования: эти два типа рассматривались по одному протоколу и все еще различались.

Классы J, используемые здесь, являются определяемым автором аналитическим разбиением исходного ансамбля лучей, введенным для диагностики содержания осевого момента импульса, а не стандартным литературным термином.

Окончательное ограничение - терминологическое. В отчете иногда используются интуитивно понятные метки, такие как «селектор кольца» или «селектор двух горл». Это аналитические сводки, а не заявления о проверенной функции устройства. Правильное научное чтение состоит в том, что геометрия преимущественно организует отражательные траектории в эти соответствующие семьи в рамках принятой бильярдной модели.

11. Выводы

Проверка на уровне лучей в рамках принятой зеркально-лучевой модели показывает, что вертикальные и горизонтальные псевдогиперболоиды второго порядка принадлежат к одному конструктивному семейству, но демонстрируют различные лучевые динамические сигнатуры. В вертикальном типе преобладают возвраты с высоким J в экваториальное кольцо, в то время как в горизонтальном типе преобладают возвраты с низким J в два горловинных фокальных диска. Следующий этап работы - полноволновое вычисление Гельмгольца/FDTD/FEM и сравнение выбора уровня луча со структурой поля.

Доступность кода

Исходный код и сценарии, используемые для настоящей верификации на уровне лучей, находятся в открытом доступе по адресу: https://github.com/vihrihaosa/psevdohyperboloids

Список литературы

[1] Gutzwiller, M.C. Chaos in Classical and Quantum Mechanics. Springer-Verlag, 1990.

[2] Штёкманн, Х.-Ж. Квантовый хаос: Введение. Cambridge University Press, 1999.

[3] Noeckel, J. U., and Stone, A. D. «Ray and wave chaos in asymmetric resonant optical cavities». Nature 385 (1997): 45-47.

[4] Harayama, T., and Shinohara, S. «Two-dimensional microcavity lasers». Laser & Photonics Reviews 5, № 2 (2011): 247-271.

[5] Goldstein, H., Poole, C. P., and Safko, J. L. Classical Mechanics. 3-е под ред. Addison-Wesley, 2002.

[6] Арнольд В. И. Математические методы классической механики. 2-е под ред. Шпрингера, 1989.

[7] Chang, R.K., and Campillo, A. J., eds. Оптические процессы в микрополостях. World Scientific, 1996.

[8] Jackson, J.D. Classical Electrodynamics. 3-е под ред. Вайли, 1998.