Геометрическая волновая инженерия

Открытый псевдогиперболоидный резонатор с кольцевой выходной апертурой как кандидат нового класса резонаторов

Аналитическая поверхность, точный условный фокальный перенос и проверенные пассивные резонансы Максвелла

Хаустов Владимир Игоревич

ORCID: 0009-0007-3657-2309

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

Лицензия: CC BY 4.0

Дата публикации: 21 сентября 2026 года

DOI: 10.5281/zenodo.22863553

Научно-технический перевод с английского языка.

Редакция, адаптированная для русскоязычного инженера-исследователя.

Оригинал: Khaustov. V. Open Pseudohyperboloidal Resonator with an Annular Output Aperture: A Candidate New Geometry-Defined Class. https://doi.org/10.5281/zenodo.22863553

Аннотация

Резонатор обычно определяется геометрией его отражающих элементов и отдельным выбором отверстия, через которое выделяется излучение. Введем открытый псевдогиперболоидный (ПГБ) резонатор: пару обращенных друг к другу отражающих поверхностей, образованных вращением внутренней ветви радиально сдвинутой гиперболы, с кольцевой выходной апертурой, созданной усечением одного отражателя. Это построение предлагается как потенциально принципиально новый определяемый геометрией класс в рамках более широкого семейства открытых электромагнитных резонаторов, а не как новое использование только кольцевого вывода. Родительский конус индуцирует внешние фокусные круги и, для точно определенного меридионального семейства, точный закон переноса лучей, который связывает последовательные точки отражения с проектируемым отверстием. Настоящая работа выводит трехмерные граничные и апертурные условия, отличает эту ограниченную геометрическую теорему от полноволновой задачи и сообщает о резонансных модах истока, полученных путем решения уравнений Максвелла для нескольких форм полости и азимутальных секторов. Согласованные нефокальные деформации проверяют, как спектр реагирует на потерю точной генерирующей коники. Мы размещаем предложение относительно обычных стабильных, нестабильных, телескопических и кольцеобразно связанных резонаторов. Численные данные подтверждают воспроизводимое семейство пассивных PHB-резонаторов; уникальность его полноволнового механизма и любое общее преимущество в производительности остаются отдельными исследовательскими вопросами. Измеренные резонансные частоты и радиальные частотные характеристики показывают воспроизводимые зависящие от геометрии различия относительно нефокального контроля с согласованным объемом на обеих исследуемых сетках; эти наблюдения не устанавливают эксклюзивного модального механизма без источника. Сравнение на основе кривизны также отличает указанную границу PHB от обычных тороидальных отражателей с дугой окружности; ни одно из наблюдений не исключает любого обобщенного торического или свободноформного предшественника. В рамках более широкой программы GWE отдельные лучевые геометрические законы для псевдопараболоидальных и псевдоэллипсоидальных конструкций мотивируют предполагаемые дополнительные геометрически организованные открытые полости; здесь не утверждается проверка достоверности электромагнитного резонатора этих двух кандидатов.

Ключевые слова: псевдогиперболоидная поверхность; открытый электромагнитный резонатор; кольцевое выходное отверстие; точное фокально-транспортное право; пассивный квазинормальный режим; FDTD Максвелла цилиндрической формы; контролируемая деформация геометрии.

Содержание

Аннотация....2
1. Научный вопрос и позиция предложения....4
1.1. Точное рабочее значение «определяемого геометрией класса резонаторов»....4
1.2. Научное содержание предлагаемого подкласса и фальсифицируемые границы....5
2. Точная конструкция: от сдвинутой коники до открытой полости....5
2.1. Алгоритм построения, домены и неквадратичность....6
2.2. Независимые безразмерные параметры и сходство....7
3. Трехмерная поверхность, кривизна и фокусные круги....7
3.1. Основные кривизны, пределы конечных точек и измерение поверхности....9
3.2. Конечный объем с общим сердечником, а не объем с герметичной полостью....9
3.3. Предложение меридиональной кривизны: чем PHB математически не является....9
4. Точный перенос лучей и аналитический перехват апертурой....10
4.1. Условная лучевая лемма и структура закона отражения....12
4.2. Формула конечно-временного перехвата и область его действия....13
4.3. Что фокальный закон не предсказывает для конечной длины волны....13
4.4. Аналитическая оценка точной расчетной границы луч-апертура....14
5. Открыть пассивную граничную задачу Максвелла....14
5.1. Спектральный оператор, условие излучения и два различных понятия резонанса....15
5.2. Угловые секторы, масштабирование и область применения числовой модели....16
6. Первичные пассивные резонансы: доказательства от сетки к сетке....16
6.1. Количественная согласованность расчетных резонансов....17
6.2. Комплексно-частотные характеристики и отрыв от дрейфа сетки....18
7. Контролируемая деформация, спектральная специфичность и то, что контроль не доказывает....19
7.1. Точное совпадение континуума контроля и оставшейся причинной неоднозначности20
7.2. Минимальный различающий прогноз, без нового численного утверждения....21
7.3. Двухсеточное сравнение профилей пространственной частотной характеристики....21
7.4. Пассивное измерение кольцевого потока и пределы вывода....23
8. Где этот класс-кандидат сидит среди известных резонаторов....23
8.1. «Класс» резонатора - это многомерная таксономия, а не утверждение о всеобщем превосходстве....25
8.2. Непременное сравнение с более ранней асферической и «гиперболоидной» оптикой25
8.3. Формальные отношения включения и проверка физической отчетливости....25
8.4. Исторически более близкие цилиндрические, круглоторические и общие асферические предшественники....26
8.5. Более широкая программа-кандидат: гиперболическая, параболическая и эллиптическая генераторы....27
9. Уровни доказательности, фальсифицируемость и объем....28
9.1. Реестр претензий: теорема, прямое численное наблюдение и открытая гипотеза....29
9.2. Доказательный статус геометрических и электромагнитных результатов....29
10. Инженерные последствия и ограниченная исследовательская программа....30
10.1. Выходной поток, боковая утечка и не обманчивое определение эффективности....30
11. Выводы и заявление о приоритете....31
11.1. Компактное изложение математического и вычислительного вклада....31
12. Данные и воспроизводимость....32
Список литературы....33

1. Научный вопрос и позиция предложения

Цель состоит в том, чтобы идентифицировать резонатор по математически воспроизводимому граничному предписанию и по его пассивным электромагнитным состояниям без указания материала усиления лазера. В стандартных двухзеркальных схемах осевая полуосевая устойчивость часто характеризуется кривизной и разделением зеркал [1, 2]. Кольцевые обнажения и кольцевые собственные поля также исследовались в установленных неустойчивых и составных оптических полостях [3]. Таким образом, ни кольцевое отверстие, ни использование несферического зеркала не считаются беспрецедентными. Предложенное различие PHB представляет собой совместное предписание радиально перемещаемой гиперболической отражающей границы, ее внешней конструкции фокального кольца, точного закона переноса для одного наследуемого семейства лучей и выводного кольца при аналитически идентифицируемом прерывании этого семейства.

В этой рукописи используется «кандидат нового класса» в геометрическом и вычислительном смысле: семейство имеет независимые параметры формы, явное граничное уравнение и воспроизводимые резонаторы Максвелла с открытыми полостями. Он не утверждает, что в исторической литературе не существует математически эквивалентной границы; он не переклассифицирует каждый открытый резонатор в уникальный физический механизм; и он не претендует на более высокую добротность, направленную чистоту или эффективность экстракции по сравнению со всеми обычными конструкциями.

1.1. Точное рабочее значение «определяемого геометрией класса резонаторов»

В данном документе класс, определяемый геометрией, представляет собой параметризованное множество электромагнитных краевых задач, граница которых может быть задана без решения отдельной задачи обратного проектирования. Конкретный член - кортеж (a, b, R Δ R), с a, b, R> 0 и 0 <Δ R <R, вместе с правилом, что левый внутренний рупор PHB сохраняется, а правый усекается. Два элемента могут иметь различные модальные спектры, принадлежащие к одному и тому же геометрическому семейству. И наоборот, математическое семейство не должно представлять новый универсальный физический механизм: резонаторы с открытыми полостями по-прежнему подчиняются уравнениям Максвелла и обычным условиям излучения. «Новый класс-кандидат» относится к конкретной комбинированной границе, условному закону возврата фокальных лучей и аналитически расположенному кольцевому отверстию, а не к простому существованию некоторой несферической двухзеркальной полости.

Операционный подкласс PHB указывается более узко, чем родовое понятие параметризованной полости: (i) оба отражающих рога являются выбранными внутренними ветвями одной и той же радиально транслируемой гиперболы, с a> 0, b> 0 и R> 0; (ii) неусеченный родитель поддерживает специфически наследуемое семейство фокально-сопряженных меридиональных лучей, чьи последовательные регулярные отражения подчиняются точной карте сокращения раздела 4; и (iii) усечение рупора на выходной стороне определяет кольцевую область, перехват которой траекторией IDEAL родительского семейства может быть предсказан по этой карте. Эти три свойства совместно определяют описываемую конструкцию; не утверждается, что полный спектр Максвелла, глобальный перенос лучей или новый закон отражения являются уникальными для PHB. Геометрическое обозначение является предложением для подкласса внутри существующих открытых, вращательно-симметричных, асферических электромагнитных резонаторов, а не новой базовой категории волновой физики.

Условия членства различают конструкцию, кинематику выбранных лучей и геометрию связи. Они не взаимозаменяемы: рефлектор свободной формы с отверстием в кольце не является автоматически PHB, обычный гиперболоид не является радиально смещенной внутренней ветвью, и не следует полагать, что карта лучей для идеального неотсеченного родителя выдержит удар на отсутствующей выходной стенке. Историческая новизна за пределами этих оперативных различий остается предметом поиска эквивалентных более ранних граничных предписаний.

Предложение может быть расположено вдоль трех независимых осей классификации. Граничная ось различает плоские, сферические, обычные конические/квадратичные и свободные/асферические поверхности. Динамическая ось различает параксиально устойчивый, неустойчивый, вырожденный, хаотический или иным образом непараксиальный лучевой транспорт; эта ось не может быть назначена исключительно из знака гауссовой кривизны. Ось связи различает передачу через зеркало, осевые отверстия, кромочное или кольцевое извлечение и полностью открытые боковые границы. PHB определяет неквадратичную форму границы и условную точную карту лучей; его стабильность и селективность на выходе - это свойства, которые нужно определить, а не определения, контрабандно вложенные в имя класса.

В рамках этой операционной таксономии геометрический объект воспроизводим, в то время как историческое утверждение о том, что ранее не было эквивалентного предписания границы и связи, остается вопросом литературы. Эта рукопись делает это различие явным, потому что одна только новая параметризация не устанавливает недавно открытую теорию собственных значений. Фактические спектры Максвелла, представленные ниже, обеспечивают дополнительный отдельный тест на существование.

1.2. Научное содержание предлагаемого подкласса и фальсифицируемые границы

Предлагаемый резонатор задается одновременным заданием (а) выбранной внутренней ветви транслированного гиперболического меридиана, (б) двух противолежащих физических отражающих рогов с заданным асимметричным радиальным усечением и (в) наследуемой условной фокально-сопряженной меридиональной карты идеального неусеченного родителя. Это соединение уровня конструкции, а не утверждение, что здесь были изобретены общие асферические резонаторы, кольцевая связь, распространение радиальных волн или тороидальные зеркала. Дополнительный научный вопрос заключается в том, могут ли резонансы Максвелла быть разрешены для более чем одного члена аналитически определённого семейства; завершенное исследование IRA от источника отвечает на этот вопрос для протестированных членов.

Классификация намеренно двухуровневая. Геометрическая различимость является свойством граничных уравнений и условной карты выбранных лучей; электромагнитная отчетливость - эмпирическое свойство оператора исходящей волны для конкретной физической полости. Данные демонстрируют модальное существование и чувствительную к геометрии реакцию, в то время как уникальный инвариант полной волны, закрытый радиационный бюджет и абсолютный исторический приоритет не предполагаются. Эта формулировка делает научное предложение проверяемым независимо от какого-либо материала усиления лазера или предполагаемого превосходства конструкции.

2. Точная конструкция: от сдвинутой коники до открытой полости

Пусть z - координата оси вращения, $r = \sqrt{(x^2 + y^2)}$ - цилиндрический радиус, $a > 0$ - осевой масштаб, $b > 0$ - гиперболический радиальный масштаб и $R > 0$ - радиальный перенос. Два физических отражающих рожка используют внутреннюю радиальную ветвь (алгебраическая внешняя ветвь не используется):

$$z_{+}(r) = +a\sqrt{[1+((R-r)/b)^{2}]},\ z_{-}(r) = -a\sqrt{[1+((R-r)/b)^{2}]},\ 0 \le r \le R. \quad (1)$$

Эквивалентной параметризацией является r (u) = R − b sinh (u), z ± (u) = ± a cosh (u), 0 ≤ u ≤ asinh (R/b). Родительская гипербола представляет собой z ²/a ² − (r − R) ²/b ² = 1. Осевые конечные точки находятся на z = ± L, где L = a√[1+ (R/b) ²]; переходными кольцами являются (r, z) = (R, ± a). Для полного меридионального сечения со знаком используйте r = | x | для отображения обеих сторон оси вращения. Зеркало - это изогнутый интерфейс, а не оболочка конечной толщины.

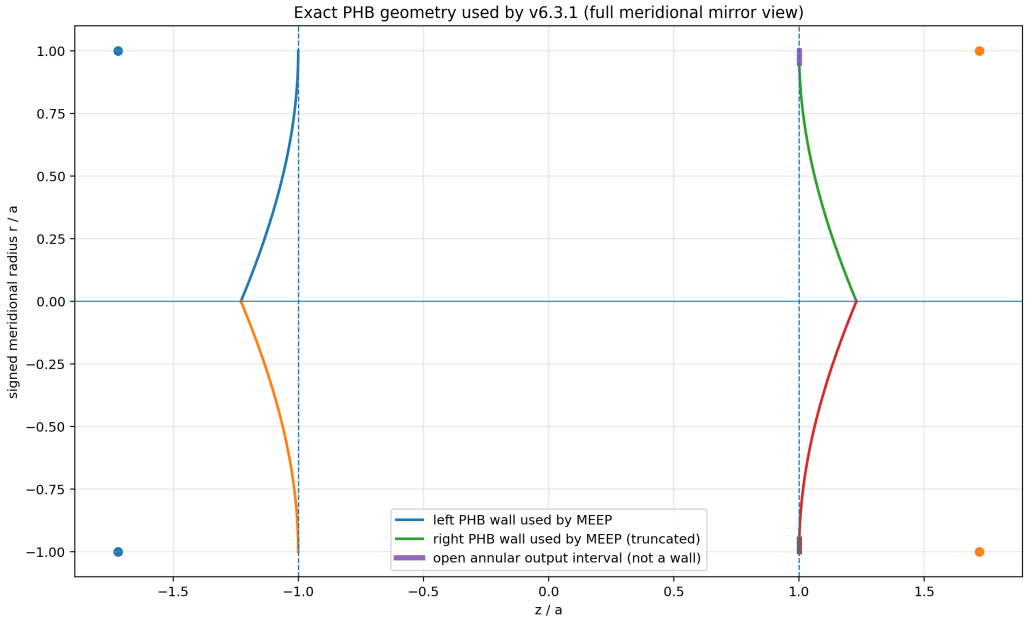

Рисунок 1. Полная знаково-меридиональная зеркальная геометрия, определяемая граничными функциями PHB. Правый отражающий рог усечён; короткая маркированная полоса - это проектируемый кольцевой выход, а не зеркало. Цветные маркеры фокальных точек указывают на пересечения с внешними фокусными кругами, а не на места расположения выходной мощности.

Первый (левый) отражатель сохраняется для всего радиуса 0 r R. На выходной стороне отражается только 0 r , где = R R и 0 < R <R. Непокрытый ленточный r_s<r<R является планируемым кольцевым выходом. Его площадь в плоскости, перпендикулярной оси z, составляет: Затрубное пространство является расчетной областью соединения; разделение фактической излучаемой мощности между ним и другими открытыми путями должно определяться по полю Максвелла, а не по площади апертуры.

$$= ( ) = (2R\ R\ R). \quad (2)$$

Для замороженной иллюстративной геометрии a = R = 1, b = 1,4 и Δ R = 0,05 получают r_s=0.95, L≈1.228904 и A_{ap}≈0.306305 в возведенных в квадрат единицах нормализованной длины. Эта прогнозируемая область не является прогнозом мощности на выходе. Поскольку внешняя цилиндрическая сторона не герметизирована, энергия волны может также уходить через другие открытые пути; их относительные веса должны быть найдены по электромагнитным полям.

2.1. Алгоритм построения, домены и неквадратичность

Выберите главную ось z и положительный физический радиус r. Переведите меридиональную гиперболу z ²/a ² − s ²/b ² = 1, записав s = r − R. Выберите только внутреннюю радиальную ветвь r = R − b sinh u с 0≤u≤asinh (R/b), сохраните оба осевых знака и поверните полученные кривые через 0≤φ<2π. Физическая граница раздела металл/вакуум ограничена указанными

радиальными диапазонами; неиспользуемая внешняя гиперболическая ветвь r> R не является дополнительным зеркалом. На выходе интервал $r_s<r<R$ намеренно отсутствует как отражатель. Аналитическая конструкция не подразумевает тороидального замыкания, наружной цилиндрической стенки или металлического листа конечной толщины.

Вращательно-симметричная квадратичная поверхность с симметрией отражения z↦−z будет иметь полиномиальное отношение A z ² + B r ² + C = 0 после выбора её осевого начала координат. Напротив, расширение меридионального уравнения PHB даёт z ²/a ² − (r ² − 2Rr + R ²)/b ² = 1. Линейный член 2Rr/b ² становится 2R√ (x ² + y ²)/b ² в декартовых переменных: на любом открытом кольце физических радиусов он не может быть поглощён в один вращательно-симметричный квадратичный многочлен от x, y, z для R> 0. Таким образом, эта заданная граница не является замаскированной центрированной сферической или гиперболоидной квадрикой. Это алгебраическое различие не доказывает, что никакая другая ранее исследованная полость произвольной формы не является геометрически эквивалентной.

Для полностью подписанного двумерного меридионального вида используйте горизонтальные координаты $x_m∈[−R,R]$, $r=|x_m|$ и две функции z_+ ($|x_m|$), $z_–$ ($|x_m|$). Четыре видимые граничные дуги на фиг.1 являются двумя сторонами каждого повернутого отражателя, а не четырьмя независимыми зеркалами. При $x_m=0$ продолжение абсолютного значения создает проблему осевой регулярности, обсуждаемую в разделе 3; графическое зеркалирование не сглаживает его.

Кольцевая область A_{ap} является спроецированной геометрической областью, а не копланарным отверстием, вырезанным в пластине. Правый отражатель имеет свой сохранившийся круглый край в точке $z_+ (r_s) =a√[1+ (Δ R/b) ²]$, в то время как опущенное идеальное продолжение встретит r = R в точке z = a. Их осевое смещение $Δz_{rim}=a\{√[1+ (Δ R/b) ²] − 1\}$ обычно ненулевое. Следовательно, электромагнитная «выходная плоскость» должна быть отдельно определена за физическим отражателем на выходной стороне; интеграция через произвольную плоскость, пересекающую металл и вакуум внутри полости, не является автоматически общей передаваемой мощностью.

2.2. Независимые безразмерные параметры и сходство

После того как длины нормализованы по a, вводят β = b/a, η = R/a и δ = Δ R/R. Нормализованный звуковой сигнал представляет собой $ζ ± (s) =±√[1+ ((η − s)/ β) ²]$, $s=r/a∈[0,η]$, а выходной фронт лежит в $s_s=η (1 − δ)$. В этом описании β управляет точным унаследованным фокусным сжатием, η фиксирует радиальную протяженность относительно осевой шкалы, а δ фиксирует долю удаленного номинального радиуса зеркала. Это разные геометрические роли: две полости могут иметь одинаковые κ при различии по η, δ, спектру или потерям излучения.

Доля проецируемой апертуры относительно диска радиуса R составляет /(R) = 1 (1) = 2 . Оптическая задача вводит дополнительную независимую безразмерную величину k a = 2 π a/ λ вместе с параметрами граничного материала и расстояниями до поглощающих числовых слоев. Масштабирование всех физических длин и длин волн на один и тот же положительный коэффициент сохраняет безразмерную проблему Максвелла с PEC-вакуумом, но изменение только размеров при сохранении фиксированной длины волны - нет. Следовательно, κ не является заменой безразмерной оптической частоты и не может сам по себе определять Q или эффективность извлечения.

3. Трехмерная поверхность, кривизна и фокусные круги

Вращающееся уравнение (1) дает поверхность, заданную в декартовых координатах

$$z /a \quad [(x \ + y) \ R] /b \ = 1, \ (x \ + y). \ (3)$$

Для ненулевого R это не обычная центрированная гиперболоидная квадрика: радиальный член $\sqrt{(x^2 + y^2)}$ обычно не может быть исключён для получения эквивалентного единственного квадратичного многочлена от x, y, z. Утверждение касается определенной поверхности, а не утверждения, что все радиально смещенные коники ранее были неизвестны. На рис. 2 показаны фактические поверхности вращения с геометрически удаленным правым затрубным пространством.

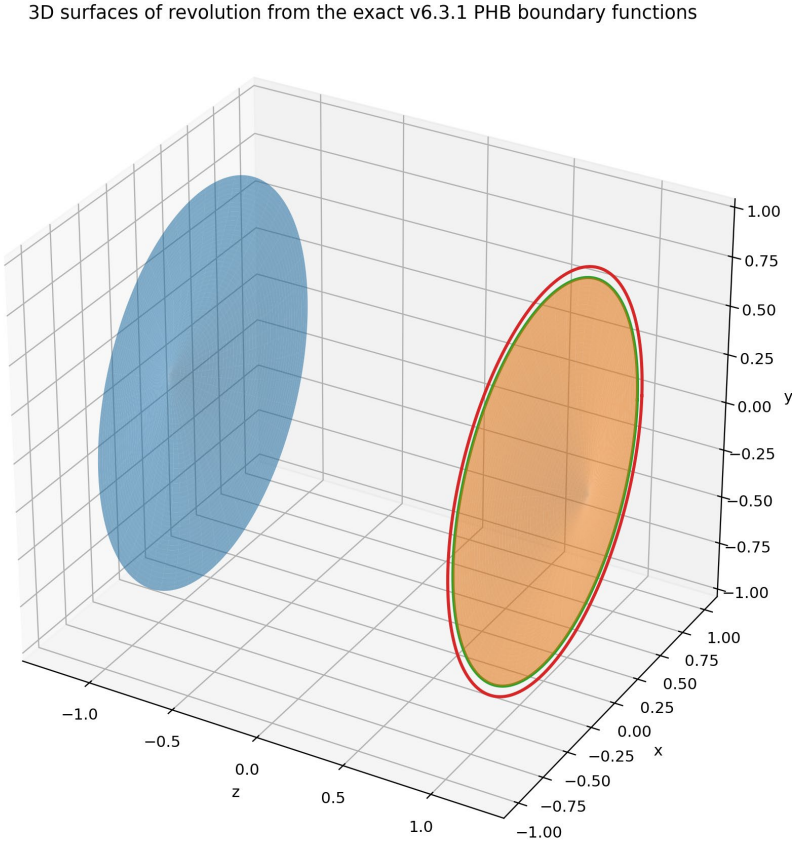

Рисунок 2. Трехмерные PHB поверхности вращения, определяемые той же границей, что и на рисунке 1. Правый зазор расположен между круговым ободом усеченного отражателя и исходным наружным радиусом. Тороидальное укупорочное средство или боковая проводящая боковая стенка отсутствуют.

Пусть $f(r) = a\sqrt{[1 + ((R - r)/b)^2]}$ обозначает верхний профиль. На правильной поверхности вращения $z = f(r)$ её гауссова кривизна равна $K(r) = f'(r) f''(r)/\{ r [1 + f'(r)^2]^2\}$. На $0 < r < R$ единица имеет $f'(r) < 0$ и $f''(r) > 0$, следовательно $K(r) < 0$; нижний рупор имеет тот же знак K. При $r = R$ регулярный предел равен нулю; ось вращения требует отдельной обработки регулярности, поскольку $f'(0)$ обычно ненулевая. Таким образом, правильным описанием является переменная отрицательная гауссова кривизна на гладкой внутренней поверхности рупора, а не глобально гладкая, строго отрицательная кривизна замкнутой поверхности.

$$f'(r) = -a(R - r)/\{ b^2\sqrt{[1 + ((R - r)/b)^2]}\}, \quad f''(r) = (a/b^2)[1 + ((R - r)/b)^2]^{-3/2}. \quad (4)$$

Родительская меридиональная гипербола имеет очаги $(r, z) = (R, \pm c)$, $c = \sqrt{(a^2 + b^2)}$. При вращении эти точки образуют две внешние окружности $\mathscr{F}_\pm = \{(r, \varphi, z): r = R, z = \pm c\}$. Они являются конструктивными локусами унаследованного свойства меридионального отражения; ни сам кольцевой выход, ни общая трёхмерная траектория луча не являются фокальной окружностью.

3.1. Основные кривизны, пределы конечных точек и измерение поверхности

Для регулярного графа вращения z = f (r) меридиональная и азимутальная главные кривизны (с одной последовательной нормальной ориентацией) равны $k_m = f''/(1+f'^2)^{3/2}$ а $k\varphi = f'/[r\sqrt{(1+f'^2)}]$. Их произведение воспроизводит кривизну Гаусса, уже использованную в уравнении (4). При d = R − r и $D = b^2 + d^2$ прямое дифференцирование даёт $f' = -ad/(b\sqrt{D})$, $f'' = ab/D^{3/2}$ и, следовательно, $K(r) = -a^2b^4d/\{r[b^4 + (a^2 + b^2)d^2]^2\}$, для 0 <r <R. Эта явная формула является новым алгебраическим разложением уравнения (4), а не независимо измеренной наблюдаемой волной. Его числитель имеет фиксированный отрицательный знак на гладкой внутренней части, в то время как его величина изменяется с r.

На радиусе перехода r → R снизу, d → 0 сверху и K → 0 снизу. На оси r → 0 сверху при R> 0, f ′ (0) ≠0 и азимутальная главная кривизна ведёт себя как ненулевая константа, делённая на r; это сигнализирует о вершине конического типа, а не о плавном продолжении через ось вращения. Поэтому численные вычисления РЕС аппроксимируют идеальный математический совет на конечной сетке. Любое утверждение о допуске на изготовление, сглаживании вершины или устойчивости моды при регуляризации наконечника потребовало бы дополнительного эксперимента. Существующий пассивный набор данных устанавливает резонансы объявленной идеализированной модели, а не их инвариантность при всех подобных модификациях.

Площадь любого правильного отражающего рупора, усеченного по радиусу , составляет S ( ) (r)] dr. Эта площадь поверхности отличается от площади проекции апертуры $\pi(R^2 - r_s^2)$. Идеальная граница представляет собой границу раздела нулевой толщины, и никакая оценка физического зеркального объема или потерь покрытия не следует из $S(r_e)$ без конкретной реализации материала.

3.2. Конечный объем с общим сердечником, а не объем с герметичной полостью

Для контролируемых сравнений форм можно определить общий объем радиального ядра $V_{core} = 2\pi\int_0^{rs} r[z_+(r) - z_-(r)]\,dr = 4\pi a\int_0^{rs} r\sqrt{[1 + ((R - r)/b)^2]}\,dr$. Положим y = (R − r)/b, $y_0 = R/b$ и $y_s = \Delta R/b$. Элементарное интегрирование даёт $V_{core} = 4\pi ab\{(R/2)[y\sqrt{(1 + y^2)} + \operatorname{asinh}(y)]|_{\gamma s}^{y0} - (b/3)[(1 + y^2)^{3/2}]|_{\gamma s}^{y0}\}$. Эта идентичность может быть оценена без вокселизации границы и обеспечивает общую ссылку континуума для подобранных по объему элементов управления.

Словосочетание «объём ядра» является намеренным: резонатор РНВ открыт со своей радиальной стороны и выходного кольца, поэтому вся его соединённая вакуумная область не является ограниченным герметичным объёмом. Равенство вышеупомянутого аналитического интеграла между двумя идеальными профилями также не предполагает равенства их растеризованных подсчётов вокселей РЕС при данной сетке. Это различие имеет значение при интерпретации конечно-сеточных разностей резонансов.

3.3. Предложение меридиональной кривизны: чем РНВ математически не является

Предложение (обычный круговой тор против РНВ, ограниченное геометрическое значение). Пусть a, b, R> 0 и $f(r) = a\sqrt{[1 + (R - r)^2/b^2]}$ на любом непустом регулярном радиальном интервале внутри 0 <r <R. Тогда меридиан РНВ не является дугой окружности при жёстком евклидовом движении или равномерном масштабировании. Следовательно, его повернутый регулярный отражающий участок не является соответствующим обычным тором с дугой окружности при жестком движении с сохранением оси и равномерном масштабировании. Предложение не исключает более широкий обобщенно-торический/асферический класс, который явно допускает гиперболические генераторы.

Доказательство. Положим d = R − r и $H(d) = b^4 + (a^2 + b^2)d^2$. Величина знаковой меридиональной кривизны плоской порождающей кривой равна $k_mer(r) = |f''(r)|/[1 + f'(r)$

²] ^ (3/2) =ab⁴/H (d) ^ (3/2). Дифференцирование по r даёт dk_mer/dr=3ab⁴ (a ² + b ²) d/H (d) ^ (5/2)> 0 для 0 <r <R. Дуга окружности имеет постоянную величину меридиональной кривизны 1/q для некоторого радиуса окружности q; жесткие движения сохраняют свою кривизну, а равномерное масштабирование просто умножает ее на константу. Таким образом, никакой интервал положительной длины этого меридиана РНВ не является дугой окружности. При r = R предельное k_mer=a/b²; по интерьеру строго меньше. Независимый коническо-дискриминантный тест даёт тот же ограниченный вывод: порождающая гипербола является отличной от окружности коникой.

Таблица 1 оценивает эту точную формулу для замороженной иллюстративной геометрии a = R = 1, b = 1,4. Значения являются математическими оценками указанной аналитической границы, а не измерениями моделирования новых волн. Осевая конечная точка r = 0 опущена, поскольку повернутая поверхность имеет дефект регулярности конического типа.

Таблица 1. Точные значения меридиональной и гауссовой кривизны для аналитического отражателя РНВ (a = R = 1, b = 1,4).

p/p	| k _ mer | (R^{-1})	K (R^{-2})
0.05	0.231122	-1.720694
0.50	0.391730	-0.183011
0.95	0.508733	-0.013648
1.00	0.510204	-0.000000

Доказательство кривизны усиливает отличие от известных торических зеркал с дугами окружности, обсуждаемых в некоторых исторических конструкциях резонаторов. Он не устанавливает новизну относительно всех обобщённых тороидальных, гиперболически-тороидальных или зеркал произвольной формы, а также не доказывает различную универсальность собственных значений Максвелла. В частности, более ранняя конструкция, которая явно включает в себя этот же гиперболический меридиан, не будет исключена одним словом «торическая».

4. Точный перенос лучей и аналитический перехват апертурой

Для наследуемого фокально подобранного меридионального семейства запишите r = R − b sinh u, | z | = a cosh u и введите переменную полуугла t = tanh (u/2). Для последовательных регулярных воздействий на чередующиеся идеальные полные рога точный результат, установленный для генерирующей гиперболы [5], составляет

$$t_{n+1} = \kappa t_n,\ \kappa=[\sqrt{(1+\beta^2)}-1]/[\sqrt{(1+\beta^2)}+1],\ \beta = b/a. \quad (5)$$

$$t_n = \kappa^n t_0,\ r_n=R-2bt_n/(1-t_n^2),\ |z_n|=a(1+t_n^2)/(1-t_n^2). \quad (6)$$

Физическое смещение от радиуса кольца перехода, $\varepsilon_n=R-r_n$, затем подчиняется точному непостоянному одноступенчатому отношению, которое имеет тенденцию к как $t_n\to 0$:

$$= /(\ ),\ =\ (\ )/(\ )\ . \quad (7)$$

Полные сегменты свободного пролёта приближаются к внутреннему предельному меридиональному сегменту $L_0=\{r=R,\ |z|\le a\}$; оборот этого сегмента даёт цилиндрический ограничивающий лист, а не собственно дополнительное зеркало. Это сокращение обусловлено наследуемой орбитой и не нарушает обратимость или сохранение площади фазового пространства для полного бильярда: соседние лучи вне этого выбранного

одномерного семейства могут вести себя по-разному. Внешние очаги организуют зеркальные направления; физический луч не должен касаться их.

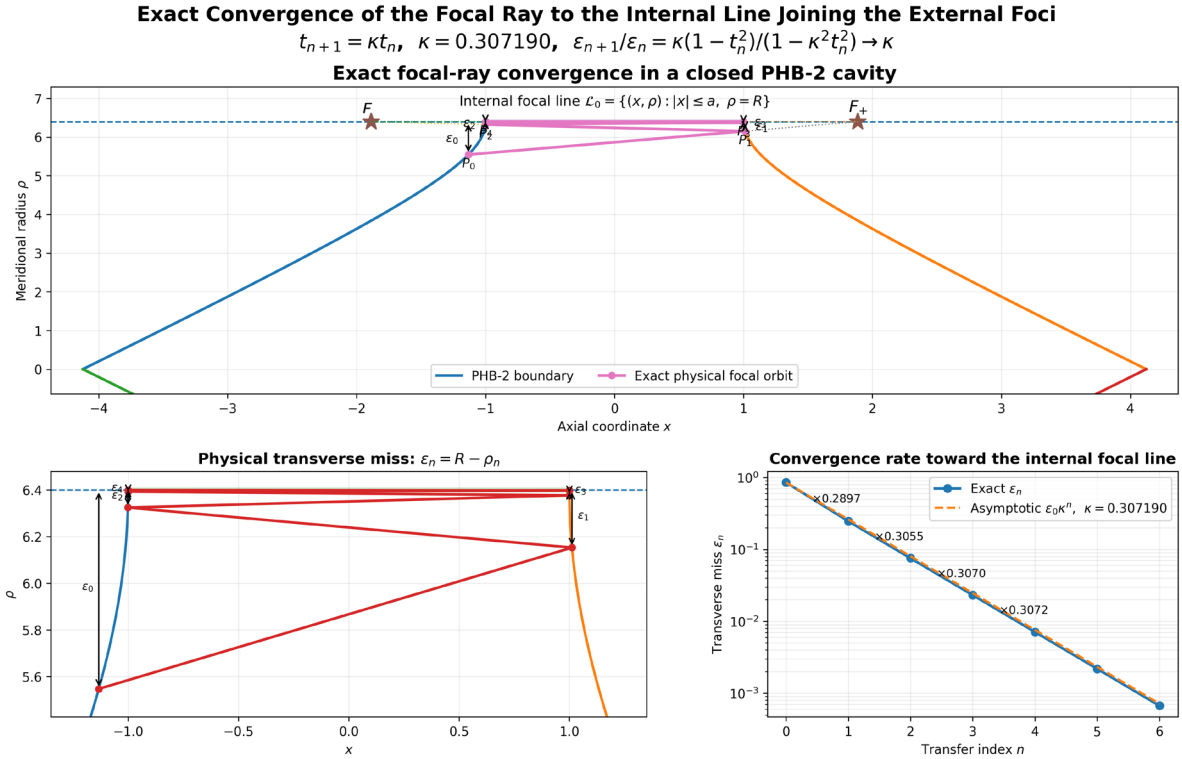

Рисунок 3. Иллюстрация фокальной орбиты из исследования фокального переноса [5]. Верхняя панель: чередующиеся события отражения, приближающиеся к внутренней ограничивающей линии; внизу слева: физический поперечный промах; внизу справа: логарифмический подход к κ. Этот пример имеет κ≈0.307190, в отличие от замороженного образца β = 1.4 ниже, который имеет κ≈0.264832. График представляет идеальную полную полость, а не усеченный резонатор или имитацию интенсивности волны.

Идеальное воздействие на правый рог приведет к попаданию в удаленное кольцевое пространство после $\varepsilon_n < \Delta R$. Решение $2bt/(1 - t^2) = \Delta R$ дает точный порог

$$t_{ap} = [\sqrt{(b^2 + \Delta R^2)} - b]/\Delta R = \Delta R/[\sqrt{(b^2 + \Delta R^2)} + b]. \quad (8)$$

Для a = R = 1, b = 1,4 и Δ R = 0,05, κ≈0.264832, t_{ap}≈0.017851 и t_{max}=tanh{asinh (R/b)/ 2}≈0.320465. С тех пор $\kappa^2 t_{max} \approx 0.022476 > t_{ap}$ пока $\kappa^3 t_{max} \approx 0.005952 < t_{ap}$, каждая подходящая идеальная правосторонняя траектория в указанном семействе сталкивается с потенциально удаленной правосторонней зоной после максимум трех или четырех унаследованных передач между рупорами, в зависимости от начальной стороны. Реальная открытая полость прерывает эту идеальную последовательность в этой точке. Это геометрическое утверждение о перехвате, а не теорема об эффективности оптического выхода.

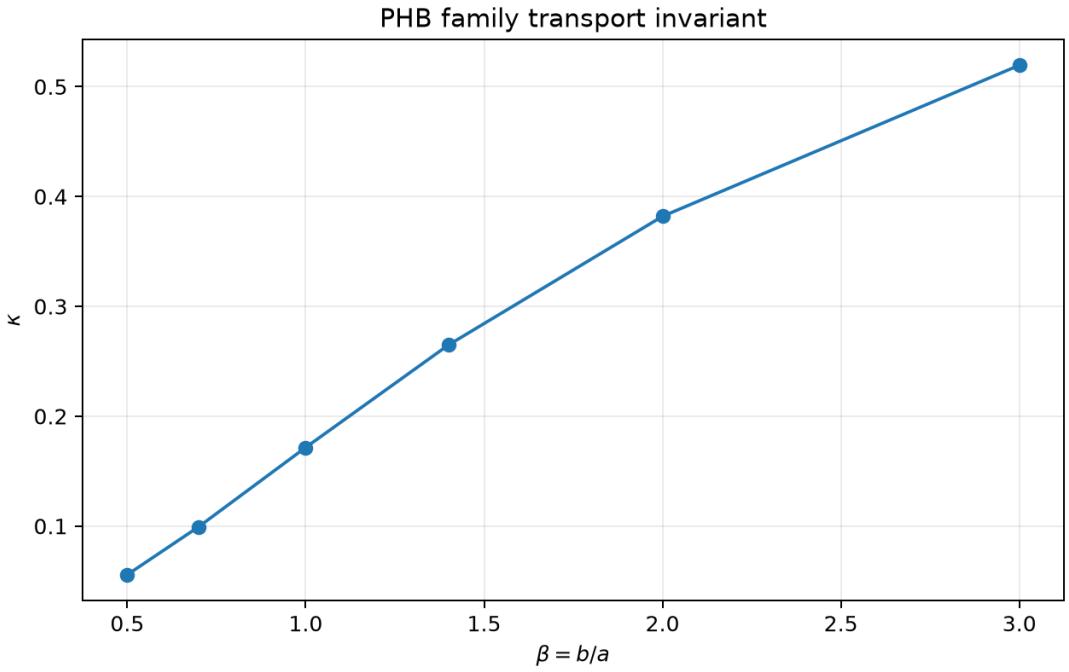

Рисунок 4. Точный коэффициент фокально-координатного сокращения как функция β = b/a. Эта геометрическая величина не является смоделированным коэффициентом качества, коэффициентом усиления волны или свидетельством модального превосходства.

4.1. Условная лучевая лемма и структура закона отражения

Условная фокально-транспортная лемма. Рассмотрим идеальную, неотсекаемую пару внутренних транслированных-гиперболических рогов. Выбрать регулярное начальное воздействие и входящее направление, относящиеся к наследуемому фокально-сопряженному меридиональному семейству, определенному в оригинальной работе по фокальным законам [5]; предположим, что последовательные передачи остаются регулярными, ударяют чередующимися рогами и несут нулевой осевой момент импульса. Тогда в полууглового координате t = tanh (u/2) последовательность последовательных ударов подчиняется уравнению (5). Теорема условна: она не утверждает поведение положительно-мерной окрестности произвольных 3D-лучей и не утверждает, что внешние фокусные кольца являются максимумами внутренней интенсивности.

Для ясности, «фокально согласованный» является ограничением начального направления, а не просто утверждением, что луч лежит в меридиональной плоскости. При каждом регулярном воздействии направление инцидента должно быть задано конструкцией фокальной сопряженности для родительской гиперболы в [5]; зеркально отраженный сегмент должен затем встретиться с противоположным рогом при следующем регулярном ударе в пределах унаследованного семейства. Исчезающий осевой момент импульса и чередование рогов являются необходимыми кинематическими условиями, но сами по себе недостаточны для получения $t_{n+1}=\kappa t_n$ для произвольного меридионального луча. Полное доказательство фокальной сопряженности и гипотезы его конечных точек остаются таковыми из [5]; настоящая лемма переносит установленный ограниченный результат в конструкцию резонатора.

Чтобы указать, что должно быть проверено при независимой проверке леммы, параметризуйте рог в меридиональных (z, r) координатах по P σ (u) = (σ a cosh u, R − b sinh u), σ = ± 1. Тангенс равен T σ (u) = (σ a sinh u, − b cosh u), а ненормализованная нормаль равна N

σ (u) = (b cosh u, σ a sinh u). Если v - входящее единичное направление, зеркальное отражение накладывает vout = v − 2 (v·N̂σ) N̂σ. Следующим регулярным попаданием является первое положительное пересечение P σ (u) +ℓvout с противоположным рупором. Требование унаследованного фокально-сопряженного направления при каждом событии дает одномерную точную карту, приведенную в уравнении (5); полное доказательство фокально-сопряжённости приведено в [5] и не заменяется здесь непроверенным утверждением о произвольных лучах. Эти уравнения касательности, нормали и пересечения обеспечивают независимую спецификацию испытания.

Коэффициент можно эквивалентно записать κ = (c − a)/(c + a) = b ²/(c + a) ², где c=√ (a ² + b ²). Поскольку c> a> 0 для b> 0, единица имеет 0 <κ <1 и ln κ <0. Точная геометрическая экспонента сжатия вдоль унаследованной последовательности составляет Λ F = − ln κ> 0 на регулярный перенос. Это сжатие в выбранной координате на инвариантном одномерном семействе лучей, а не диссипативный поток или оптический коэффициент усиления; полная динамика лучей без потерь остается обратимой.

4.2. Формула конечно-временного перехвата и область его действия

Пусть $t_0>0$ обозначает идеальную первую координату воздействия и пусть n индексирует последующие регулярные передачи. Правостороннее идеальное воздействие лежит за пределами фактического выходного отражателя, если $2b\kappa^n t_0/[\ 1-\kappa^{2n}t_0^2]<\Delta R$, эквивалентно $\kappa^n t_0<t_{ap}$, с t_{ap}, определенными в уравнении (8). Так как ln κ <0, для $t_0>t_{ap}$ достаточное количество целочисленных передач без ограничений четности равно n> ln (t_{ap}/t_0)/ln κ. Первая физически релевантная встреча с удаленной стеной - это первое n, удовлетворяющее этому неравенству, идеальное событие которого произойдет на правом роге. Выбор четности зависит от стороны запуска и имеет важное значение: нельзя считать левостороннее столкновение кольцевым выходом.

Для универсальной конечной границы над подходящим полным семейством рогов можно заменить t_{max}=tanh[asinh t_0 (R/b)/2]. В замороженной иллюстративной геометрии $\kappa^2 t_{max}$ превышает t_{ap}, тогда как $\kappa^3 t_{max}$ лежит под ним. Следующее корректное правостороннее событие происходит в пределах указанной границы четности для трех или четырех передач. Однако, как только правая стена отсутствует, никакого следующего зеркального события там нет. Фактический луч выходит или следует по другому открытому пути и должен быть прослежен с усеченной границей; идеальная повторяемость не может быть итерирована через несуществующее зеркало.

Критерий удаленной стенки определяет гипотетическое расположение отражения в родительской матрице COMPLETE. Чтобы вывести фактическое событие выхода в полости TRUNCATED, необходимо дополнительно проверить, что сегмент свободного пролета достигает незаблокированного отверстия без первого пересечения уцелевшего металла или другой границы, и указать принимающую плоскость вне полного зеркала выходной стороны. Для поля с конечной длиной волны доля мощности, передаваемая через это отверстие, может быть установлена только из подходящего исходящего бюджета потока Пойнтинга; ни уравнение (8), ни число итераций не дают эту дробь.

4.3. Что фокальный закон не предсказывает для конечной длины волны

Существование выделенной геометрической возвращаемой последовательности само по себе не является теоремой о собственной моде. поля Максвелла интерферируют, дифрагируют на кольцевом ободе и могут просачиваться через негерметичную сторону; их линейные ширины зависят от поляризации вектора, длины волны, граничных условий и всех каналов излучения. Даже численный режим, радиальный профиль которого достигает максимума вблизи прогнозируемого предельного листа, не доказывает, что точное семейство лучей вызвало этот

признак без согласованного теста модального продолжения без источника. Соответственно, результат математического луча является принципом проектирования, и резонансы Максвелла от источника в разделах 5-7 являются независимым тестом физического существования, а не преобразованием κ в предсказанное Q.

4.4. Аналитическая оценка точной расчетной границы луч-апертура

Условная карта также предоставляет количественную только геометрическую границу проектирования от указанной отражающей границы и проема. Для любого приемлемого первоначального регулярного воздействия в унаследованной семье, $0<t_0<t_{max}=\tanh\{\operatorname{asinh}(R/b)/2\}$; поэтому $t_n=\kappa^n t_0<\kappa^n t_{max}$. Порог удаленной стены равен $t_{ap}=\Delta R/[\sqrt{(b^2+\Delta R^2)}+b]$. Оба фиксируются только опубликованными границей и апертурой. Верхняя огибающая поперечного промаха родительской полости составляет $\varepsilon_n^{max}=2b\kappa^n t_{max}/[1-\kappa^{(2n)} t_{max}^2]$.

Для фиксированной иллюстративной геометрии верхние границы ниже пересчитываются из аналитической формулы. Это огибающие ЗНАЧЕНИЯ и не измеренные координаты столкновения одного конкретного физического луча. В частности, t_max соответствует единственной осевой конечной точке в качестве ограничивающей границы, а не регулярному начальному столкновению; физические лучи начинаются с $t_0<t_{max}$. Правостороннее усечение актуально только при событии, которое произошло бы на правом роге.

Таблица 2. Верхние огибающие для условной точной лучевой карты родитель-полость. Последний столбец применяется, только если это идеальное событие находится на правом роге; мощность волны не предполагается.

n	$\kappa^n t_{max}$	ε_n^{max}/R	$\kappa^n t_{max} < t_{ap}$
0	0.320465	1.000000	НЕТ
1	0.084869	0.239358	НЕТ
2	0.022476	0.062965	НЕТ
3	0.005952	0.016667	ДА
4	0.001576	0.004414	ДА

Оболочка входит в область удаленной стенки не позднее третьего идеального переноса (n = 3). В зависимости от стороны запуска и четности чередования первое соответствующее правостороннее событие возникает при n = 3 или n = 4, при условии регулярности и беспрепятственного полета. Как только полное родительское событие достигает удаленного сегмента стены, идеальное повторение не может быть продолжено как физическое отражение в полости OPEN. Из этой границы не следует доля излучаемой мощности. Граница касается потенциального воздействия в полной родительской геометрии; это не подтверждает, что каждая соответствующая траектория усеченной физической полости достигает выходного участка без предшествующего конкурирующего граничного события.

5. Открыть пассивную граничную задачу Максвелла

Для пассивной конструкции внутренние области и области излучения являются вакуумными, в то время как области позади двух номинальных отражающих поверхностей моделируются как идеальный электрический проводник (PEC). Левый проводник занимает $0\le r\le R$, $z\le z_-(r)$; правая занимает $0\le r\le r_s$, $z\ge z_+(r)$. В других местах модель содержит вакуум, включая негерметичную радиальную сторону. Для определения резонатора не требуется никакой активной среды, накачки, нелинейной поляризации, конечной зеркальной отражательной способности или поглощения материала.

$$( ) = \quad E;\ n \times E\ 'PEC = 0;\ \text{граница исходящей волны на бесконечности.} \quad (9)$$

В конечной числовой области исходящая граница аппроксимируется радиальными и осевыми идеально согласованными слоями (PML). Источник используется только для возбуждения пассивной полости и выключается перед модальным извлечением. Затухающая квазинормальная составляющая имеет сложную угловую частоту, $\omega=\omega_r+i\omega_i$ с $\omega_i<0$ и модальным $Q=\omega_r/(-2\omega_i)$. Для отдельно выделенного компонента затухания энергии $U(t) \propto \exp(-\gamma t)$ оценка эквивалентной энергии равна $Q = 2\pi f/\gamma$ ($\gamma > 0$). Ни Q, ни профиль пассивного поля не измеряют оптического усиления.

$$E(r, z, \varphi, t) = E_m(r, z, t)\, e^{im\varphi},\ m = 0,1;\ Q = \mathrm{Re}(\omega)/[-2\,\mathrm{Im}(\omega)]. \quad (10)$$

Геометрия является осесимметричной, что позволяет моделировать цилиндрические координаты в отдельных азимутальных секторах. Расчет $m = 1$ сохраняет ненулевой азимутальный фазовый коэффициент; это не общее нелинейное трехмерное моделирование или трехмерное моделирование произвольной геометрии. Модальные частоты извлекаются из множества зондов локального поля путем гармонической инверсии после источника и проверяются узкополосным повторным возбуждением, независимой аппроксимацией затухания энергии и парой разрешения [4, 6]. Численный результат зависит от конечной ячейки, размещения PML и дискретизации сетки; согласованность двух сеток - это проверка сходимости, а не доказательство ограничения континуума.

Сообщаемые частоты и значения Q являются численно извлеченными кандидатами резонанса с открытой полостью: их согласие двух сеток и согласие между оценками затухания и гармонической инверсии поддерживают идентификацию в заявленной численной задаче, но не исключают коррелированных ошибок от размещения PML, конечной продолжительности наблюдения, смешивания мод или растеризации на осевом конце. Поэтому в статье говорится о разрешенных резонансах от источника под задокументированными воротами приемки, а не о математически доказанном спектре континуума или независимой от сетки границе ошибки.

5.1. Спектральный оператор, условие излучения и два различных понятия резонанса

В вакуумной области без потерь можно записать гармоническое во времени электрическое поле как $E(x, t) = \mathrm{Re}\{K(x)\, e\ ^\wedge\ (-i\,\omega\, t)\}$. Для идеального проводника $n \times K = 0$ на открытой границе металл/вакуум; на неограниченной внешней стороне физически выходящее решение удовлетворяет условию исходящей волны. Резонансы с открытым резонатором являются полюсами непрерывной исходящей резольвенты (квазинормальные частоты), а не нормируемыми собственными значениями стоячей волны без потерь конечного замкнутого блока. Численно конечная область с идеально подобранными слоями аппроксимирует исходящее распространение по дискретизированной полосе и может также вводить ложные режимы, связанные с ПМЛ. Повторение частоты кандидата с измененным расстоянием между сетками и сравнение независимо подобранных кривых затухания снижает, но не устраняет этот риск.

Если один изолированный компонент комплексного поля ведет себя как $e\ ^\wedge\ (-i\omega_r t+\omega_i t)$ с $\omega_i<0$, его амплитуда поля затухает со скоростью $-\omega_i$, а его квадратичный энергетический прокси затухает со скоростью $\gamma=-2\omega_i$. Отсюда следует, что $Q=\omega_r/\gamma=2\pi f/\gamma$ и время распада $1/e$ этой энергетической составляющей составляет $\tau\ E = 1/\gamma = Q/(2\pi f)$. Это тождество применимо к хорошо изолированному экспоненциальному окну: подгонка многомодового биящегося следа к одной прямой не требует восстановления любого квазинормального режима Q.

Управляемый профиль ДПФ (дискретного преобразования Фурье) при выбранной частоте возбуждения и поле квазинормального режима без источника являются различными наблюдаемыми. Первая содержит перекрытие источников и форсирование истории, даже если её частота находится вблизи полюса. По этой причине радиальное сравнение в разделе 7

последовательно описывается как отклик в частотной области; утверждение о существовании режима после источника отдельно основывается на отслеживаемых частотах и проверках затухания.

5.2. Угловые секторы, масштабирование и область применения числовой модели

Азимутальный множитель e ^ (im φ) уменьшает осесимметричную трехмерную границу для разделения секторов векторного поля, но их уравнения сохраняют цилиндрические члены 1/r и свои собственные условия регулярности на оси. Вычисление m = 1 не является просто дубликатом m = 0 с другой меткой; на одной и той же физической полости могут возникать разные резонансы. И наоборот, проверка m = 0 и m = 1 не устанавливает полноту всех m, всех поляризаций или произвольных возмущений, нарушающих симметрию.

Все частоты, приведенные ниже, нормированы к числовой длине и соглашениям о скорости волны, используемым в RUN_CONFIG.json. В сравнительных заявлениях предполагаются одни и те же соответствующие вычислительные ячейки, радиальные и аксиальные поглощающие слои, места возбуждения и размещения зондов, а также вентили отслеживания частоты при каждом разрешении. Физическая реализация с дисперсией, проводимостью, шероховатостью поверхности или конечной толщиной зеркала не получается простым преобразованием нормализованных размеров в миллиметры.

6. Первичные пассивные резонансы: доказательства от сетки к сетке

Завершенный набор данных IRA v1.0.4 содержит точный PHB и нефокальный контроль с согласованным объемом при трех значениях β, оба протестированных азимутальных сектора и две пространственные сетки, что дает 24 завершенных случая. Все 12 отслеживаемых пар семейство/ β/м удовлетворяют заявленным двухсеточным модальным логическим элементам. В таблице 3 представлены шесть точных режимов PHB и их непосредственно архивированные высокие и низкие частоты сетки и коэффициенты Q; точки данных не были интерполированы.

Таблица 3. Пассивная частота резонанса PHB и коэффициент качества получены на двух сетках для всех исследованных геометрий и азимутальных секторов.

β	м	f (R144)	f (R192)	Q (R144)	Q (R192)	| Δ f |/f
0.6	0	2.691654	2.693405	94.44	95.43	0.065%
1.4	0	2.202390	2.204084	162.35	166.20	0.077%
2.8	0	2.276145	2.278342	79.77	82.18	0.096%
0.6	1	2.923407	2.925950	80.62	80.09	0.087%
1.4	1	2.079798	2.081490	72.00	72.18	0.081%
2.8	1	2.216814	2.218799	425.68	439.96	0.089%

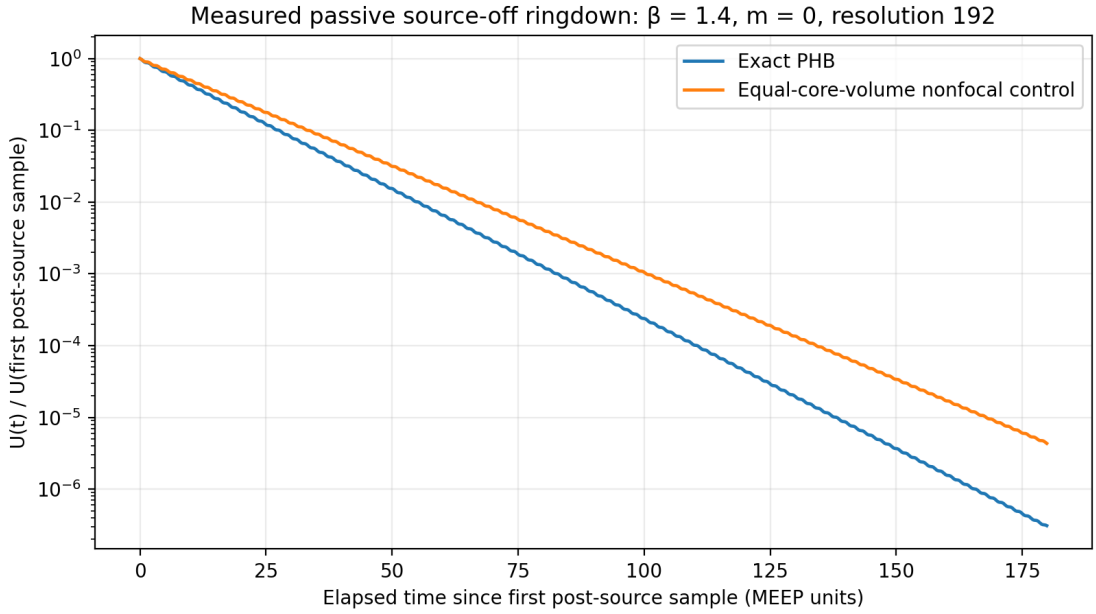

Рисунок 5. Измеренные пассивные кривые «источник-поле-энергия-прокси» из наборов данных IRA v1.0.4 ENERGY_TRACE.npz (β = 1,4, m = 0, R192): точный PHB и нефокальный контроль равного объема ядра. Каждая трасса нормализуется к своей собственной первой выборке после источника; логарифмическая ордината показывает относительное снижение частоты, а не абсолютную запасенную энергию или усиление. Кривые рассчитываются по записанным временным данным с помощью воспроизводимого сценария анализа, поставляемого с набором данных.

Шесть точных дрейфов частоты PHB лежат между примерно 0,065% и 0,096%; соответствующие дрейфы Q лежат между примерно 0,24% и 3,24%. Например, при β = 1,4 режим m = 0 близок к f = 2,204084 с Q≈166.20, тогда как режим m = 1 близок к f = 2,081490 с Q≈72.18 на верхней сетке. Их различие устанавливает, что в одной и той же аналитически заданной разомкнутой геометрии возникают различные секторно разрешенные резонансы источник-вне. Чрезвычайно высокий Q изолированного другого случая не используется для присвоения PHB общего превосходства.

6.1. Количественная согласованность расчетных резонансов

Необработанные табличные значения позволяют выполнять прозрачные диагностические вычисления, которые не требуют нового прогона Максвелла. Для β = 1,4 и m = 0 при R192, f = 2,204084 и Q = 166,20 дают $\gamma = 2\pi f/Q \approx 0.08333$ в обратных единицах времени моделирования и $\tau_E \approx 12.00$ единицах времени моделирования для одноэкспоненциальной компоненты энергии. Для m = 1 в одной и той же номинальной полости f = 2,081490 и Q = 72,18 подразумевают $\gamma \approx 0.18119$ и $\tau_E \approx 5.52$. Это алгебраические следствия сообщаемых (f, Q) пар, не независимо измеряемые новые константы распада, и имеют смысл только постольку, поскольку единичный поздний компонент был правильно выделен.

Двухсеточный $d_f = 2|f_2 - f_1|/$ дрейфа $(f_2 + f_1)$, определенный симметрично в архивном протоколе, количественно определяет согласованность конечной сетки без предоставления асимптотического порядка сходимости. В частности, два близких значения могут случайно согласовываться, если возможные режимы отличаются или если ошибка PML является общей для обоих. Точные режимы PHB на всех тестируемых β, m проходят оригинальные двухсеточные гейты; оператор ограничен этими шестью разрешенными дорожками и не является оценкой полосы ошибок в режиме континуума.

Модальное доказательство также нетривиально на уровне классификации: предложенное семейство не является пустым геометрическим именем, присоединенным к электромагнитной границе без наблюдаемого конечно-временного резонанса. В задаче пассивного отключения источника он проявляет колебательные затухания для нескольких различных форм, и выбранные частоты реагируют на β и m. Что не следует, так это то, что эти шесть мод исчерпывают спектр, что конкретный вход с высоким Q является оптимумом или что все элементы PHB имеют полезное кольцевое извлечение мощности.

6.2. Комплексно-частотные характеристики и отрыв от дрейфа сетки

Выделенные пары f и Q определяют алгебраически комплексную характеристику резонансной частоты. При временном соглашении E (t) ∝exp (−i2π$\tilde{f}$t) изолированный распадающийся компонент имеет $\tilde{f}$=f_r−if_r/(2Q). Это соотношение использует извлеченные f_r и Q и не восстанавливает отсутствующее комплексное пространственное собственное поле и не представляет собой независимое измерение комплексного режима. Полезно для отображения, что и реальная частота, и коэффициент потерь были записаны для одного и того же выбранного конечно-временного резонанса.

Для точного PHB и его согласованного по объему управления при β = 1,4 f_r высокой сетки, результирующая − Im ($\tilde{f}$) и симметричное парное частотное разделение приведены ниже. Парное частотное разделение делится на большее из двух наблюдаемых R144-R192 частотных дрейфов для одного и того же сектора. Безразмерное отношение сравнивает измеренные изменения в заявленном исследовании дискретизации; это не строгая численная ошибка или спектрально-инвариантное доказательство.

Таблица 4. Алгебраически выведенные комплексно-частотные характеристики из пар f, Q истока при β = 1,4; последний столбец регистрирует коэффициент на уровне сектора один раз для каждой пары. Это не сложное наложение пространственных режимов.

м	Граница	f_r (R192)	− Им $\tilde{f}$	Δf_pair/макс Δf_grid
0	PHB	2.204084	0.006631	3,62 ×
0	Нефокальный	2.197665	0.005449	—
1	PHB	2.081490	0.014420	4,41 ×
1	Нефокальный	2.074036	0.007198	—

Эти резонансные отпечатки истока и соответствующие расстояния ведомого одноплоскостного профиля являются двумя взаимодополняющими наблюдаемыми: первый регистрирует частоту и снижение частоты выбранного отклика, а второй - его вынужденную пространственную сигнатуру. В β = 1,4 анкер отличается между точными и нефокальными границами больше, чем соответствующие наблюдаемые изменения двух сеток. Это усиливает конечноволновое различие сравниваемых геометрий PARTICULAR, но не разрешает полное перекрытие комплексного вектора с полем, продолжение ветви моды при деформации или общие объяснения возмущения границы.

Числовая область. IRA v1.0.4 поддерживает радиальную/осевую толщину и положение ПМЛ, а идеальная конструкция осевого наконечника фиксируется при каждом сравнении сетки. Таким образом, указанные расчеты устанавливают двухсеточное соглашение внутри протокола, а не инвариантность к изменению PML/дополнения, сглаживанию вершины, всем азимутальным секторам или всем длинам волн. Полное независимое от решателя или ограничение континуума доказательство не может быть выведено только из этих результатов двух сеток.

7. Контролируемая деформация, спектральная специфичность и то, что контроль не доказывает

Согласованный элемент управления плавно изменяет разделение зеркал, сохраняя заявленный объем ядра с течением $0 \le r \le r_s$. Пусть , обозначает амплитуду управляющей деформации (отличную от доли апертуры = R/R), и h (x) = sin (x) sin (2 x). Поскольку $\int_0^1 x\, h(x)\, dx = 0$, модификации $z_- \to z_- - \varepsilon_d\, a\, h/2$ и $z_+ \to z_+ + \varepsilon_d\, a\, h/2$, с $\varepsilon_d = 0.035$, изменяют локальное разделение без изменения его интеграла взвешенного объёма. Правостороннее усечение и проектируемая площадь кольцевого пространства не изменились. Это более сильный контроль, чем сравнение с несвязанной зеркальной формой, но он не выравнивает каждое модальное или дискретизированное граничное свойство более высокого порядка.

$$V_{core} = 2\pi \int_0^{r_s} r[z_+(r) - z_-(r)]\, dr; \int_0^{r_s} r\, h(r/r_s)\, dr = 0. \quad (11)$$

В таблице 5 приведены все точные/контрольные пары высокой сетки для выбранного β = 1,4 якоря. Фракция Fout профиля представляет собой диагностику в частотной области, накопленную с помощью узкополосного возбуждения, а не полную фракцию энергии трехмерной собственной моды без источника или фракцию излучаемой мощности. Q элемента управления фактически больше в обоих опорных секторах; Поэтому PHB не характеризуется как конструкция с максимальным Q.

Таблица 5. Выбранные PHB/управляющие резонансы и приводимые радиальные фракции внешнего слоя при β = 1,4, R192.

м	Граница		f (R192)	Q (R192)	Фут (R192)
0	Точный PHB		2.204084	166.20	0.05342
0	Нефокальный контроль		2.197665	201.65	0.04176
1	Точный PHB		2.081490	72.18	0.06581
1	Нефокальный контроль		2.074036	144.07	0.03588

Таблица 5. Профили радиальной частотной характеристики при β = 1,4: $F_{out} = \int_{0.85}^{RR} rI(r)\, dr / \int_0^R rI(r)\, dr$, где $I(r) = |E_r|^2 + |E\varphi|^2 + |Ez|^2$ для выбранной дискретной частоты Фурье. Интеграл взвешивается по цилиндрическому радиусу; его название «фракция внешнего слоя» не следует путать с эффективностью вывода.

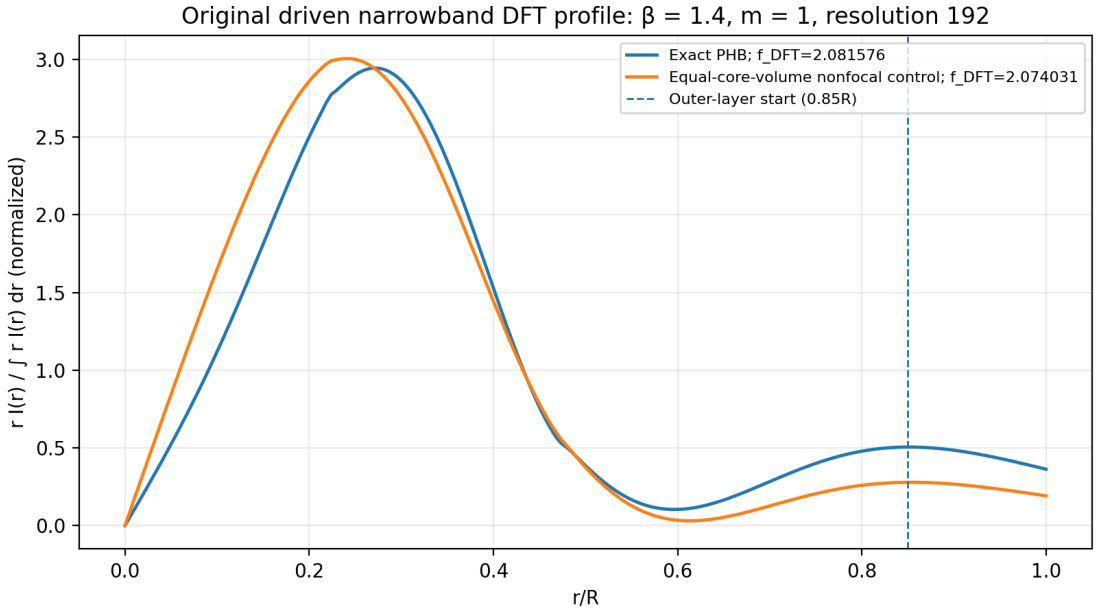

Рисунок 6. IRA v1.0.4 β = 1.4, m = 1, R192 управляемые узкополосные профили DFT, построенные на основе рассчитанных радиальных массивов. Ордината представляет собой нормированную цилиндрическую радиальную плотность rI (r)/ ∫rI (r) dr; пунктирная линия обозначает начало r≥0.85R внешнего слоя. Две кривые используют свои собственные зарегистрированные выбранные частоты DFT. Это управляемая диагностика в частотной области, а не независимо извлеченное собственное поле источника или измеренная мощность излучения в кольцевом пространстве.

Точная/контрольная разность частот составляет около 0,292% для m = 0 и 0,359% для m = 1. При m = 1 радиальные фракции внешнего слоя отличаются в этом измеренном профиле примерно в 1,83 раза. Тем не менее, собственные заранее объявленные причинные врата на уровне семьи проходят только для 2 из 6 пар точного/контрольного уровня с высокой сеткой, и персистенция знака сохраняется только для 4 из 6 треков против необходимых 5. Поэтому его окончательный статус - UNRESOLVED для сигнатуры фокальной волны для всей семьи. Было бы некорректно либо стирать два разрешенных ответа β = 1,4, либо продвигать их в универсальное доказательство фокальной причинности.

7.1. Точное совпадение континуума контроля и оставшейся причинной неоднозначности

Тождество $\int_0^1 x \sin^2(n \pi x)\, dx = 1/4$ для любого положительного целого n следует путем записи $\sin^2\theta = (1 - \cos 2\theta)/2$ и интегрирования $x \cos(2n \pi x)$ между 0 и 1. Следовательно, $\int_0^1 x h(x)\, dx = 0$ для $h(x) = \sin^2(\pi x) - \sin^2(2 \pi x)$, доказывая, что деформация, используемая в уравнении (11), оставляет Vcore неизменным как точный интеграл континуума. Кроме того, $h(0) = h(1) = 0$ и $h'(0) = h'(1) = 0$, так что расчетная зеркальная кромка и ее первая производная в конечных точках этой контрольной деформации сохраняются. Поэтому управление не достигается простым изменением кольцевого отверстия.

Тем не менее, деформация изменяет локальную нормаль поверхности, кривизну и распределение оптического пути во внутренней части. Общая теория резонансных возмущений позволяет собственным частотам и скоростям излучения изменяться при перемещении границы, независимо от того, существует ли какой-либо точный закон фокусировки. Наблюдаемые различия частоты β = 1,4 и управляемого профиля, следовательно, устанавливают чувствительную к геометрии электромагнитную реакцию, но причинно-следственная связь конкретно с фокально-сопряженной картой потребует

следования той же самой идентифицированной безисходной моде по меньшей мере на одной независимой основе деформации и, предпочтительно, серии доз. Архивированный переход для всего семейства остается неразрешенным и не перезаписывается этим математическим доказательством соответствия объема.

Доля кромки, указанная как Fout в столбцах исходных данных и таблице 5, является безразмерной взвешенной долей отклика DRIVEN radial DFT. Для предотвращения путаницы с долей ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ, проходящей через апертуру, обозначим ту же величину Fedge в следующем обсуждении: Fedge≡Fout (радиальный профиль). Он не равен сумме Ф кольцо/ Ф. В случае β = 1,4, m = 1 при высокой сетке измеренное отношение Fedge PHB/контроль составляет приблизительно 1,83; это перспективная пространственная сигнатура для последующего модального эксперимента без источника, а не измеренное увеличение эффективности извлечения.

Радиальные пределы этого наблюдаемого являются 0.85R≤r≤R, тогда как обозначенная полоса MISSING MIRROR составляет только 0,95R <r <R. Таким образом, измеренный внешний слой включает в себя 0.85R≤r≤0.95R, область, расположенную радиально перед уцелевшей частью отражателя на выходной стороне; кроме того, радиальный профиль ДПФ дискретизируется во внутреннем поперечном сечении, а не на поверхности позади выходного отражателя. Его отношение PHB/контроль описывает широкий внутриполостной периферический ответ, а не концентрацию поля апертурной плоскости или непосредственно измеренный коэффициент извлечения. Нельзя уравнивать два наблюдаемых.

7.2. Минимальный различающий прогноз, без нового численного утверждения

Будущий причинный тест может определить конкретный режим PHB позднего времени при β = 1,4 по его сложной частоте и нормированному перекрытию векторного поля, продолжить его при двух независимо выбранных деформациях равного объема ядра и проверить, изменяется ли его радиальный вес около прогнозируемого предельного листа воспроизводимо с известным дефектом фокального закона. Наложение полей, полная конфигурация ПМЛ/излучения и эффективная геометрия вокселизированного металла - все это должно быть записано. В этом пункте говорится о поддающемся фальсификации протоколе; никакие такие завершенные двухосновные результаты не подразумеваются архивом версии 1.0.4.

7.3. Двухсеточное сравнение профилей пространственной частотной характеристики

Нормализованные приводимые радиальные частотные характеристики были оценены для всех 24 пассивных случаев IRA v1.0.4: точный PHB и нефокальный CONTROL_VM с подобранным объемом при β = 0,6, 1,4 и 2,8, азимутальные сектора m = 0 и 1 и пространственные разрешения R144 и R192. Каждый MODE_RADIAL_PROFILE.npz обеспечивает радиальную интенсивность на частоте ДПФ для конкретного случая. Численные входные данные документируются в RUN_CONFIG.json, а целостность данных оценивается по манифесту расчета из 128 записей. Результирующее двухсеточное сравнение характеризует измеренный вынужденный пространственный отклик; критерии независимого резонанса истока оцениваются в разделе 6. Сохраненные радиальные выборки представляют собой сумму интенсивностей имеющихся цилиндрических составляющих электрического поля на номинальной общей матрице r; набор данных не сохраняет покомпонентные координаты Yee-grid. Следовательно, расстояние D ниже является диагностикой этого явно заданного выборочного представления, а не сертифицированного совмещенного с компонентами перекрытия векторного режима.

Для каждой зарегистрированной радиальной интенсивности I (r) ≡E2 (r) при ее частоте ДПФ, зависящей от конкретного случая, определяют p (r) = rI (r)/ $\int_0^R$ sI (s) ds (0≤r≤R), так что $\int_0^R$ p (r) dr = 1. Для двух профилей A и B определите общее расстояние D (A, B) =½$\int_0^R$'pA (r) − pB (r) |

dr. Рассчитанные профили были линейно интерполированы на общую 1001-точечную сетку с течением 0≤r/R≤1, каждый из которых был повторно нормализован трапецеидальным интегрированием, и только затем сравнивались. D = 0 означает идентичные нормализованные формы RADIAL INTENSITY; D не является комплексным перекрытием режима векторного поля и не является эффективностью оптической энергии.

Таблица 6. Нормализованные пройденные расстояния радиального профиля для моделирования IRA v1.0.4. Dgrid - разность R144↔R192 внутри геометрии; Dpair - разность PHB/контроль при фиксированной сетке. Значения определяются по записанным радиальным интенсивностям в частотной области, а не по комплексным собственным полям, свободным от источника.

β	м	Dgrid PHB	Управление Dgrid	Dpair R144	Dpair R192
0.6	0	0.0629	0.0096	0.1293	0.1751
0.6	1	0.0089	0.0077	0.0570	0.0494
1.4	0	0.0015	0.0010	0.0508	0.0517
1.4	1	0.0013	0.0010	0.0934	0.0944
2.8	0	0.0058	0.0046	0.0415	0.0459
2.8	1	0.0020	0.0063	0.0837	0.0775

В шести исследованных (β, m) комбинациях измеренная точная/контрольная разница радиальной формы при R192 превышает изменение профиля PHB между двумя сетками. Якорь β = 1,4 является наиболее внутренне последовательным случаем: для m = 0, Dgrid, PHB = 0,00150 и Dpair, R192 = 0,05167; для m = 1 соответствующие значения составляют 0,00126 и 0,09436. Контрольные профили на том же якоре также имеют небольшие изменения сетки (0,00097 и 0,00103). Точные/контрольные расстояния на R144 и R192 составляют соответственно 0.05078→0.05167 (m = 0) и 0.09343→0.09436 (m = 1). Следовательно, различия в этом якоре не объясняются только наблюдаемым изменением радиальной дискретизации между R144 и R192.

Это сравнение усиливает измеренную геометрически-чувствительную конечноволновую сигнатуру предлагаемого семейства PHB: как резонансы, основанные на кольце, так и связанный с ними управляемый пространственный отклик отличают точную границу от тщательно подобранной по объёму нефокальной границы. Он не преобразует возбужденное одноплоскостное радиальное поле ДПФ в трехмерное собственное поле, не доказывает, что две границы поддерживают одну и ту же аналитически непрерывную комплексную моду, и не устанавливает, что отклик является уникальным для фокального закона, а не для возмущения обычной формы. В частности, для β = 0,6, m = 0 точное/контрольное расстояние заметно изменяется между сетками (0.12930→0.17510), так что равномерная сходимость разности по всем геометриям не заявляется. Причинный критерий для всей семьи остается НЕРАЗРЕШЕННЫМ (2/6 предопределенных парных проходов); расстояние радиального профиля является дополнительным описательным наблюдаемым, а не заранее заданным критерием. Небольшие внутрипротокольные расстояния не могут быть повышены до физической точности подрешетки: шаговое расположение компонентов, назначение номинальных радиальных координат, интерполяция и общие ошибки дискретизации не были независимо ограничены хранимыми массивами.

Для воспроизведения PHB_PASSIVE_RADIAL_PROFILE_ARCHIVE_AUDIT_v1_0_1.py читает набор данных IRA v1.0.4, проверяет его 128-файловый манифест и записывает

PHB_DFT_RADIAL_PROFILE_DISTANCES_v1_0_1.csv с расстояниями для всех шести (β, m) пар. Сценарий, записанные интенсивности и производная таблица представлены в сопровождающем вычислительном наборе данных.

7.4. Пассивное измерение кольцевого потока и пределы вывода

Пассивные модальные расчеты IRA v1.0.4 не содержат конвергентного, неперекрывающегося закрытого бюджета Poynting для каждого выбранного режима истока. Отдельный пассивный расчет, IRA v1.0.3, обеспечивает разрешенную по времени диагностику правого кольца, внешней области и бокового потока в TRACE.npz и соответствующие интегралы положительного времени в CASE_SUMMARY.json. Эти измерения характеризуют заявленную геометрию мониторинга и временное окно и не сочетаются с различными модальными профилями IRA v1.0.4.

Для общей β = 1,4, R192 геометрии, сводки случаев IRA v1.0.3 дают следующие доли обозначенного кольцевого пространства сообщенной правой плюс-боковой интегральной диагностики исходящего потока. Выбранная правая плоскость лежит позади уцелевшего зеркала для этой геометрии; числовые дроби остаются зависимыми от определения и временного окна. Они не являются долей энергии одной независимо изолированной комплексной квазинормальной моды.

Таблица 7. IRA v1.0.3 пассивная позитивная интегрированная правосторонняя диагностика потока, β = 1,4, R192. Эти измеренные доли окна не составляют пассивную эффективность вывода собственных мод с закрытой поверхностью.

Граница	Доля затрубного пространства	Наружная фракция
PHB	1.0803 %	98.9195 %
Нефокальный	1.1431 %	98.8567 %

В этом более раннем протоколе внешняя область учитывает почти все сообщенные исходящие положительные интегрированные правосторонние диагностические данные для обеих поверхностей. Кольцевая фракция PHB немного НИЖЕ, чем согласованный контроль в примере β = 1,4, поэтому данные не подтверждают утверждение, что PHB обязательно усиливает кольцевую развязку или что проектное кольцевое пространство является доминирующим путем эвакуации. Боковой монитор, записывающий нулевой положительный интеграл в соответствии с этим протоколом, не является доказательством того, что любой другой немониторизированный канал излучения исчезает. Вычисленная геометрическая апертура, закон перехвата луча и измеренный пассивный резонанс остаются действительными независимо от этого инженерного ограничения.

Физически закрытая претензия на извлечение мод потребует согласованного по времени или частоте внешнего потока Пойнтинга через непересекающиеся кольцевые, внешние, боковые и оставшиеся каналы с поверхностью сбора, расположенной за всем выходным отражателем. Он не должен заменять фракцию внутреннего ведомого края, F_edge из раздела 7, какой-либо фракцией извлечения мощности.

8. Где этот класс-кандидат сидит среди известных резонаторов

Описательное сравнение в таблице 8 использует оптическую геометрию, а не оценочное ранжирование. Знакомые плоские, стабильные/конфокальные и нестабильные/телескопические полости обычно обсуждаются через плоскую или сферическую кривизну и параксиальное распространение [1, 2]. Кольцевое соединение установлено в предшествующем уровне техники [3]. Предложение PHB является не общей

заменой для этих семейств, а другой параметризацией границ в сочетании с условным точным правилом проектирования фокальной карты.

Размещение в установленной иерархии может быть заявлено без создания новой эксклюзивной категории верхнего уровня: электромагнитные резонаторы ⊃ открытыми оптическими полостями ⊃ осесимметричными неквадратичными/асферическими граничными семействами; кандидатная конструкция PHB представляет собой специально предписанное подсемейство, перекрестно классифицированное по кольцевому соединению на выходной стороне и по его ограниченному точному наследуемому отношению лучей. Известные планарные/сферические/нестабильные системы занимают другие местоположения вдоль осей SHAPE или PARAXIAL-DYNAMICS, в то время как установленные кольцеобразно связанные конструкции могут совместно использовать ось COUPLING. Это отношение между независимо заданными атрибутами, а не доказательство того, что наборы шаблонов физической моды не пересекаются.

Таблица 8. Геометрическое и динамическое отношение предлагаемой конструкции PHB к установленным конфигурациям открытого резонатора.

Конфигурация	Определение геометрии	Связь с PHB
Плоскопараллельная	Плоские противоположные отражатели	Отсутствует внутренняя кольцевая граница или карта лучей транслированной гиперболы
Стабильный конфокальный	Сферические зеркала; общая параксиальная аксиальная очаговая область	Аксиально-параксиальная конструкция отличается от внешних фокальных окружностей
Телескопическая неустойчивость	Обычно сферические вогнуто-выпуклые элементы; увеличение луча	Выделение кольцевого края может быть общим; Границы PHB и фокальная карта различаются
Композит с кольцевыми связями	Ранее описанный сопряженный многоэлементный кольцевой режим [3]	Один кольцевой выход не является новым; геометрия PHB является отдельным предложением
Открытый PHB, текущая работа	Гиперболические рога со смещением в радиальном направлении, один усеченный обод	Внешние фокальные круги + ограниченный точный рецидив лучей + пассивные режимы отключения источника

Следовательно, кандидат «принципиально нового класса» относится к аналитически различимому семейству границ резонатора с целенаправленно связанным законом луч/апертура и наблюдаемыми электромагнитными резонансами. Это не утверждение нового уравнения Максвелла, нового физического вида оптического усиления или глобального приоритета литературы, установленного численным моделированием. Официальное всемирное исследование предшествующего уровня техники остается необходимым для оценки абсолютной исторической новизны.

Сохраненное моделирование в настоящее время поддерживает два отдельных наблюдения на уровне волн: резонансы с конечным временем на границе PHB и устойчивые к сетке различия измеренных форм радиального отклика относительно нефокального контроля с согласованным объемом на якоре $\beta = 1{,}4$. Вместе с точным граничным и условным законом луч/апертура они обеспечивают более прочную воспроизводимую основу для предложения

отдельного, определяемого геометрией подкласса РНВ-резонатора; они не сводятся к теореме об исключительной электромагнитной или исторической единственности.

8.1. «Класс» резонатора - это многомерная таксономия, а не утверждение о всеобщем превосходстве

Обычный параксиальный язык g-параметров классифицирует двухзеркальную полость по локальным кривизнам и разделению зеркал: для сферических зеркал $g_1=1-L/R_1$ и $g_2=1-L/R_2$, с $0<g_1g_2<1$ знакомой стабильной областью под соответствующим соглашением знака [1,2]. Эти условия описывают локальное параксиальное линеаризованное движение в оба конца. Профили РНВ имеют радиусозависимую кривизну, осевую негладкую точку в идеализации и ограниченное точное непараксиальное фокальное семейство; они не могут быть полностью охарактеризованы назначением одного глобального сферического радиуса любому отражающему рупору. Это различие математических описаний, а не доказательство того, что РНВ всегда параксиально стабилен или нестабилен.

Кольцевая балка или кольцевое отверстие не определяют уникальность РНВ. Например, опубликованная кольцевая конвергентно-волновая полость Ходзько, Мейсона и Кросса [3] содержит внешнюю конфокальную неустойчивую подсистему, двухстороннее сцепное зеркало и плоский отражатель обратной связи; это устоявшееся многоэлементное расположение, отличающееся от двух противоположных РНВ-рогов транслированной гиперболы. Содержательный контраст - это явная аналитическая граница и её теорема об апертурном перехвате, а не ранее известный факт, что излучение может оставить вокруг меньшего отражателя.

8.2. Непременное сравнение с более ранней асферической и «гиперболоидной» оптикой

Асферические оптические полости сами по себе не новы. Bondarescu и Thorne [7] обсуждают семейство гиперболоидных световых пучков и связанные с ними несферические формы опорных зеркал, мотивированные гравитационно-волновыми интерферометрами; Гальди и соавторы [8] анализируют их оптическую структуру и двойственности. Слово «гиперболоидный» в этих работах описывает конструкцию семейства пучков и связанные с ней зеркала, поддерживающие волновой фронт, и не должно рассматриваться как синоним настоящего радиально переведенного гиперболического меридиана. Их существование исключает аргумент новизны, основанный исключительно на использовании несферического зеркала, прилагательного гиперболоидного или настраиваемого семейства профилей.

Конкретное утверждение, выдвинутое здесь, является более узким и проверяемым: отражающая граница РЕС является внутренней поверхностью вращения радиально перемещаемой меридиональной гиперболы; его строительные очаги становятся наружными кругами; ограниченное наследственное семейство лучей допускает уравнение (5); предлагаемый усеченный противоположный рупор помещает номинальный кольцевой выходной сигнал в вычисляемое положение относительно этого семейства; пассивный источник-off резонансы Максвелла разрешаются для нескольких членов семейства. Формальный обзор предшествующего уровня техники все же должен был бы проверить, указывает ли другая публикация или патент эквивалентную физическую границу и апертуру даже при другой терминологии. Представленная литература устанавливает соответствующие близлежащие традиции, а не исчерпывающее доказательство исключения.

8.3. Формальные отношения включения и проверка физической отчетливости

Пусть Копен обозначает широкий набор открытых электромагнитных краевых задач и Cax⊂Copen осесимметричное подмножество. Указанное семейство РНВ CPHB = {B (a, b, R Δ R): a, b, R> 0, 0 <Δ R <R} является параметризованным подмножеством Cax, а не отдельной заменой теории Максвелла. Она отличается алгебраически от обычной центрированной

вращательной квадрики при R> 0; его ограниченное фокальное отображение добавляет структурную теорему. Однако ни непересекаемость из каждого возможного семейства зеркал свободной формы, ни единственность квазинормального спектрального инварианта не устанавливаются шестью пассивными дорожками. Настоящее обозначение «класса», следовательно, является предложенным геометрическим подклассом, поддерживаемым непустым вычисленным резонансным спектром, а не доказанным новым классом спектральной универсальности.

Две полости с одинаковыми κ могут иметь разные η, δ или ka и, следовательно, разные операторы границы исходящей волны. И наоборот, асферическое управление может совместно использовать одну измеренную резонансную частоту без получения фокального закона PHB. Это отделение геометрического определения от модальной сигнатуры является причиной того, что сообщается как о математических выводах, так и об управлении конечными волнами, но не сводится к единому утверждению физической единственности.

8.4. Исторически более близкие цилиндрические, круглоторические и общие асферические предшественники

Соответствующее историческое сравнение шире, чем планарные, конфокальные и телескопические двухзеркальные полости. Кассер [9] описал цилиндрические лазерные резонаторы с частично радиальным распространением излучения; Картер [10] изучал трехмерные резонансные распределения поля в цилиндро-резонаторной теории. Их существование предотвращает аргумент новизны, основанный только на цилиндрических координатах, радиальном распространении или специальном пространственном режиме. Определяющее утверждение PHB вместо этого касается его точного граничного уравнения, выбранной карты отражения гиперболического меридиана и их совместной конструкции с односторонним кольцевым усечением.

Фергюсон и Смитерс (Ferguson and Smithers) [11] изучали торические неустойчивые резонаторы, построенные из двух кольцевых зеркал, получая неоднородные по увеличению геометрические моды, дифракционные и краевые волновые эффекты. Это близкая функциональная предшественница в геометрии КОЛЬЦЕВОЙ и не должна рассматриваться как несвязанное управление сферическим резонатором. Доказательство в разделе 3.3 отличает PHB от явно тороидальных меридианов с дугами окружности; сама по себе метка «toric» не устанавливает, какое меридиональное уравнение использовали Фергюсон и Смитерс. Тем не менее, «торический» может относиться более широко к обобщённым поверхностям, и опубликованный анализ сам по себе не устанавливает, что произвольное обобщение не может воспроизвести границу PHB и закон выбранных лучей.

Боргезе и его коллеги [12] сообщили о резонаторах с тороидальными отражателями и смешанной стабильной/нестабильной динамикой в ортогональных направлениях; Chao и Shealy [13] изучили изменения режимов и потерь, вызванных изменением параметров асферической полости. Таким образом, ни геометрия тороидального зеркала, ни кольцевая/кромочно-волновая развязка, ни общая модальная чувствительность к форме границы здесь не заявлены как новые. На уровне проверенных источников, на которые ссылаются, раскрытая в настоящее время конструкция JOINT представляет собой противоположную пару определенных внутренних рогов транслированной гиперболической, условной наследуемой фокально-сопряженной карты и аналитически размещенного одностороннего кольцевого усечения с независимо наблюдаемыми пассивными резонансами Максвелла.

Сравнение литературы устанавливает точное геометрическое отличие от обычных центрированных квадрик и явно тороидальных отражателей с дугами окружности и

идентифицирует ближайшего функционального предшественника. Это не является универсальным исключением предшествующего уровня техники, анализом всех патентных записей или доказательством того, что полный электромагнитный спектр не является изоспектральным для каждого более старого резонатора. Согласно более широкой таксономии, PHB наиболее безопасно описывается как недавно предложенное, аналитически определенное гиперболически-меридианное подсемейство существующих открытых, осесимметричных, обобщенно-асферических/тороидальных резонаторов, с его конкретной связью граница/карта/апертура, предлагаемой для независимой проверки.

8.5. Более широкая программа-кандидат: гиперболическая, параболическая и эллиптическая генераторы

Geometric Wave Engineering (GWE) также изучает псевдопараболоидальные (PPB-2) и псевдоэллипсоидальные (PEB-2) границы второго порядка, чьи лучево-геометрические законы разработаны в отдельных рукописях [14, 15]. Эти результаты мотивируют более широкую программу геометрически организованных открытых полостей, но настоящая статья устанавливает пассивный резонанс Максвелла только для его специально определенной геометрии PHB. Соответственно, более широкая группировка, приведенная ниже, является предлагаемой конструкцией, а не демонстрируемым общим классом полноволновых резонаторов.

Принцип совместного строительства состоит в том, чтобы собрать выбранные транслированные ветви родительских коник и наложить физическое правило первого допустимого пересечения для отраженных лучей, а не назначать следующий фокус просто путем проверки схемы. Математическая общность касается способа построения отражающих границ и условных карт лучей; три поверхности не имеют общего универсального коэффициента сжатия лучей, идентичной трехмерной метрики, идентичной апертурной топологии или общего спектра. Отрицательная гауссова кривизна на регулярных заплатах - геометрический дескриптор, не достаточное условие для резонансного удержания или критерий, однозначно идентифицирующий эти конструкции.

PHB (предмет этой статьи). Внутренняя ветвь радиально смещенной гиперболы определяет противоположные отражающие рога. Для указанного согласованного по фокусу меридионального семейства точный одноступенчатый закон сжатия сохраняется на неусеченном родительском объекте, и один отражатель усекается, чтобы предписать кольцевое отверстие на выходной стороне. Настоящий пассивный корпус IRA независимо разрешает резонансы Максвелла источника этого открытого резонатора для выбранных форм и азимутальных секторов с учетом уже раскрытых численных ограничений. Данные режима не передаются ни в одно из других семейств образующих.

PPB-2 (перспективная резонаторная архитектура). Его общее меридиональное построение со знаком использует противоположные, радиально сдвинутые параболические ветви, $X_(b, s)(u) = [b(h + fu^2), s(R - 2fu)]$, с метками ветвей $b, s = \pm 1$. Точная формулировка фокального возврата включает в себя выбор самого раннего положительного физического удара и уменьшенную алгебраическую карту на выделенном семействе после фокусировки; конкретные семейства периодических лучей доказаны и дополнительные семейства охарактеризованы на конечной числовой области [14]. Горизонтальные и вертикальные трёхмерные обороты имеют общую регулярную меридиональную карту после координатной перемаркировки, но разные азимутальные метрические коэффициенты, $(R - 2fu)^2$ и $(h + fu^2)^2$ соответственно; их отверстия и немеридиональная динамика не должны согласовываться. Эта лучевая теорема не предписывает уникальную электромагнитную выходную связь и не устанавливает максвелловский резонанс источника реализованной PPB-полости.

РЕВ-2 (перспективная резонаторная архитектура). Его отражающий меридиан собран из выбранных четвертьэллиптических родительских ветвей. Точный локальный закон сопрягает луч, падающий на гладкий физически активный родитель через один родительский фокус, с линией его сопряженного фокуса, при условии выбора самого раннего попадания. При K = b/a родительские фокальные пары аксиально ориентированы для 0 <K <1, сливаются при K = 1 и радиально ориентированы для K> 1; горизонтальная трехфокусная конфигурация возникает при указанном условии сборки h = − f [15]. Эти топологические утверждения описывают геометрические фокальные локусы, а не доказанный спектральный переход или универсальный повторный фокальный возврат произвольных лучей. Из расчетов лучей не выводится электромагнитный резонанс без источника РЕВ или эффективность извлечения кольца.

Доказательная иерархия. Открытые электромагнитные резонаторы ⊃ предложенные основанные на конике геометрические конструкции, организованные ⊃ специально определенных кандидатов конструкции РНВ, РРВ и РЕВ. В вычислительных данных, собранных для ЭТОЙ статьи, член РНВ рассчитал пассивные резонансы Максвелла; РРВ и РЕВ имеют специальные исследования геометрических лучей, но нет сопоставимого набора данных электромагнитной моды в двух сопутствующих работах. Таким образом, фраза «представитель, подтвержденный первой волной» относится ТОЛЬКО к настоящей программе GWE и к доступному набору данных РНВ, а не к приоритету над каждым историческим цилиндрическим, торическим или асферическим резонатором. Поскольку обычные эллипсы, параболы и гиперболы уже имеют знакомые фокусные свойства, содержание предложения заключается в явно собранных границах, физически допустимых последовательностях ветвей и перспективных конструкциях открытых полостей, а не в утверждении открытия этих классических оптических тождеств.

Конкретное будущее исследование резонатора РРВ или РЕВ должно сначала объявить его полную физическую отражающую область, швы и краевую модель, открытые выходные/боковые каналы, материальные и радиационные условия и независимую от возбуждения резонансную диагностику. Наиболее различительное сравнение затем соответствует выбранному комплексному режиму истока по сеткам и контролируемым изменениям геометрии при независимом измерении исходящего бюджета Пойнтинга. Ни одна из этих задач не заявлена как выполненная прилагаемыми рукописями лучевого закона. Поэтому настоящее доказательство концепции РНВ остается результатом автономного резонатора, в то время как [14, 15] идентифицируют математически обоснованные направления для последующей работы.

9. Уровни доказательности, фальсифицируемость и объем

Таблица 9. Уровни доказательности для аналитических, электромагнитных и перспективных утверждений этой работы.

Претензия	Наличие доказательного статуса
Аналитическая поверхность и апертура	Определяется уравнениями (1)–(4)
Наследственная очаговая семья	Точная условная карта; см. [5]
Пассивное модальное существование	Разрешенные режимы истока в исследуемых м и β секторах на двух сетках
Полносемейные причинно-следственные связи	Не закрыт: шибер управления 2/6

Претензия	Наличие доказательного статуса
Эффективность радиационного кольцевого выхода	Не определено количественно пассивным модальным архивом
Произвольная 3D стабильность/эксперимент	Не установлено настоящим пассивным исследованием

Из построения следует прямой путь фальсификации: независимая трассировка лучей должна нарушать уравнение (5), если наследуемое семейство было ошибочно идентифицировано; независимые вычисления Максвелла от источника могут не восстановить табличные резонансы при сходящейся дискретизации границ; или согласованная последовательность деформаций может не проявлять воспроизводимого эффекта за пределами нормальной чувствительности к форме. Эти возможности отличаются от уже поддерживаемого существования геометрического семейства. Само по себе обнаружение режима без источника не доказывает, что каждое волновое состояние наследует фокальную карту лучей.

9.1. Реестр претензий: теорема, прямое численное наблюдение и открытая гипотеза

Уравнение поверхности, её кривизна на 0 <r <R, спроецированная выходная площадь и алгебраические следствия условной фокальной карты являются математическими утверждениями при явно заявленных допущениях. Частоты истока и основанные на затухании значения Q в таблице 3 и управляемые доли фронта в таблице 5 являются численными наблюдениями, обусловленными архивной моделью Максвелла с конечной областью идеального PEC. Предположение о том, что фокальная карта выбирает однозначно выгодную векторную квазинормальную моду, является отдельной гипотезой: она не была выведена из оператора Максвелла и не прошла полные заданные деформационные вентили. Эти три логических уровня не должны заменяться такими терминами, как «доказанный уникальный» или «внутренний выигрыш».

Еще одно различие касается числовой верификации. Счетчик целостности файлов 218/218 устанавливает побайтовое соответствие с архивными манифестами, а не независимость прямого решателя. Переход 12/12 с двумя сетками указывает на успех при заявленных допусках, а не на математическую границу для всех режимов. Счетчик контроля причинно-следственной связи с высокой сеткой 2/6 описывает указанные критерии эффекта, а не долю всех возможных деформаций, которые были бы различимы. Эти количества отвечают на разные вопросы и не должны объединяться в единый процент успеха.

9.2. Доказательный статус геометрических и электромагнитных результатов

АНАЛИТИЧЕСКИ УСТАНОВЛЕНО в заявленной идеализированной модели: граница PHB и кольцевое усечение, непостоянная меридиональная кривизна на регулярной области, отличие от обычных тороидальных генераторов с дугой окружности, условная рекуррентная частота фокальных координат и геометрическая граница перехвата отсутствующей стенки.
ЧИСЛЕННО РАССЧИТАНО с использованием уравнений Максвелла: резонансные частоты истока и Q на основе затухания для указанных β и m секторов, возбужденные радиальные частотные характеристики и установленная диагностика ограниченного кольцевого потока.
ПОЛУЧЕННЫЕ ИЗ ЧИСЛЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И АНАЛИТИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ: значения комплексной частоты из извлеченных f и Q, парные разности частоты PHB/управления и изменения двух сеток, значения кривизны и границы луч-апертура. Проверка целостности файлов отличается от независимой числовой репликации.

НЕ УСТАНОВЛЕНО этим корпусом: полная сложная пространственная идентичность форм истока через деформации, специфический для фокального закона универсальный

спектральный инвариант, устойчивость к континууму/PML/апекс-регуляризации, обычно доминирующее кольцевое извлечение и отсутствие каждого исторически эквивалентного обобщенно-асферического или торического дизайна. Термин «кандидат принципиально нового определяемого геометрией класса» является приоритетным раскрытием воспроизводимой конкретной конструкции и её наблюдаемого резонансного поведения; это не требование нового закона Максвелла или окончательно нового класса спектральной универсальности.

10. Инженерные последствия и ограниченная исследовательская программа

Геометрия обеспечивает возможность прямых изменений конструкции через a, b, R Δ R, сохраняя известный унаследованный дескриптор луча и явно построенное кольцевое отверстие. Возможные применения включают в себя пассивные микроволновые, терагерцовые или оптические полости, модоселективные датчики и компоненты резонатора, но их инженерная ценность требует отдельных исследований потерь материала, допуска, связи и полного векторного поля. Никакие результаты в этом пассивном наборе данных не подтверждают производительность активного лазера, устройства газового потока, зеркала высокой мощности или изготовленного прототипа.

Самые короткие научно полезные следующие тесты не являются неограниченной разверткой параметров: во-первых, убедитесь, что один и тот же выбранный пространственный режим истока может быть сопоставлен по сеткам и смежным контрольным деформациям на β≈1.4; во-вторых, интегрируют излучаемую энергию на надлежащим образом определенной замкнутой контролирующей поверхности с отдельными кольцевыми и боковыми каналами; в-третьих, протестируйте ту же пассивную геометрию с конечной проводимостью и неосесимметричным возмущением или масштабированным лабораторным прототипом. Их отсутствие ограничивает только более сильный волновой механизм и требования устройства, а не математическое определение семейства потенциальных PHB-резонаторов.

Таким образом, расширение на другие генераторы GWE является конструктивной гипотезой, а не экстраполяцией спектра PHB: законы лучей PPB и PEB [14, 15] мотивируют различных кандидатов отражать границы, для которых физические апертуры, моды Максвелла и радиационные потери должны быть установлены независимо.

10.1. Выходной поток, боковая утечка и не обманчивое определение эффективности

Для измерения выходной фракции необходимо усредненное по времени или разрешенное по частоте потока Пойнтинга (1/2) Re (Ê Ψ *)· n дA через правильно расположенную ориентированную измерительную поверхность S. Полезный коэффициент вывода можно тогда определить как кольцо = кольцо/[кольцо + сторона + другое] для заявленного набора неперекрывающихся каналов внешнего потока в стационарном пассивном эксперименте. Только A_{ap} номинальной площади не дает ни одного из Ф терминов. Для открытой цилиндрической геометрии пропуск Ф стороны или отсчет плоскости, частично находящейся внутри полости, не может обеспечить извлечение с доминированием кольца.

Текущий пассивный корпус поддерживает пассивные резонансные состояния; он не был разработан для обеспечения конвергентного бюджета Пойнтинга с закрытой поверхностью для всех вариантов геометрии. Это отсутствие не является провалом геометрической конструкции. Это граница на инженерных заявлениях, которые могут сопровождать настоящее приоритетное раскрытие. Наиболее экономичным следующим шагом является единый четко определенный пассивный модальный тест и тест потока на уже разрешенных β и частоте, а не широкий поиск активных параметров.

11. Выводы и заявление о приоритете

Мы предлагаем открытый псевдогиперболоидный резонатор со встроенной кольцевой выходной апертурой в качестве кандидата на принципиально новый определяемый геометрией класс пассивных электромагнитных полостей. Предложение состоит из неквадричной радиально перемещаемой гиперболической границы, двух внешних фокальных окружностей, математически ограниченного точного меридионального закона переноса и апертуры, пересечение которой с идеальной наследуемой траекторией аналитически вычислимо. Независимое пассивное моделирование Максвелла в заявленной цилиндрической модели PEC разрешает резонансы истока для нескольких форм PHB и азимутальных секторов на двух сетках. Контролируемая нефокальная деформация дает обнаруживаемые различия мод на тестируемой геометрии якоря, в то время как заранее заявленный причинный затвор для всего семейства остается нерешенным. Эти результаты оправдывают раскрытие архитектуры PHB и ее измеренных резонансов как воспроизводимого научного предложения; они не доказывают эксклюзивную глобальную новизну, универсальное резонансное преимущество или извлечение энергии только из кольца.

Для геометрии $\beta = 1{,}4$ управляемые различия радиального отклика между точным PHB и нефокальным контролем сохраняются как на R144, так и на R192 и превышают наблюдаемые изменения внутри геометрии на две сетки. Это измеримый геометрически-зависимый отклик конечных волн, но предопределенный причинный критерий для всего семейства остается нерешенным, и сложное пространственное перекрытие собственных полей, свободных от источника, не было измерено.

Аналитическое отношение меридиональной кривизны отличает границу ПГБ от обычных тороидальных генераторов с дугами окружности. При $\beta = 1{,}4$ разности резонансных частот истока между ПГБ и контролем превышают наблюдаемые двухсеточные изменения частоты; различаются и ведомые радиальные профили. Пассивная диагностика потока показывает, что номинальное кольцевое отверстие не обязательно является доминирующим контролируемым выходным каналом. Комбинированное граничное построение, условный фокальный закон, явное кольцевое усечение и резонансы Максвелла поддерживают предложенный геометрически определяемый подкласс PHB-резонатора с учетом заявленных физических и исторических пределов новизны.

Предлагаемый подкласс PHB также является проверенной волной отправной точкой в рамках настоящей исследовательской программы GWE для исследования геометрически организованных полостей на основе параболических и эллиптических родительских ветвей [14, 15]. Их установленные законы условного излучения мотивируют различные архитектуры-кандидаты, но не распространяют электромагнитные доказательства PHB на резонаторы PPB или PEB.

11.1. Компактное изложение математического и вычислительного вклада

Новый математический объект, раскрытый в этой рукописи, представляет собой явное подсемейство неквадратичных, частично усеченных, вращательно-симметричных проводящих границ вместе с условной картой лучей и точно определенным геометрическим критерием прерывания. Его физическим доказательством является непустой численно отслеживаемый пассивный спектр открытых полостей; ни один из пунктов не зависит от указания коэффициента усиления лазера. В систематике известных оптических резонаторов ПГБ относится к открытым, осесимметричным, асферическим резонаторам, с кольцеобразно обозначенной областью связи на выходной стороне. Он представлен как кандидат в подкласс, определяемый геометрией внутри этой большей категории.

Утверждение намеренно не сильнее: ни одна теорема не исключает всех исторических геометрических эквивалентов; ни один инвариант полного векторного спектра Максвелла еще не оказался исключительным для PHB; и представленные результаты конечных волн не показывают равномерного превосходства Q, потерь или полезной выходной доли. Эти ограничения не уменьшают тот факт, что геометрия, точный ограниченный перенос и фактические пассивные резонансы могут быть проверены независимо другой группой с использованием предоставленных определений и данных.

12. Данные и воспроизводимость

Научные утверждения этой работы основаны на трех слоях воспроизводимой записи: (i) аналитическая граница, кривизна и лучевые транспортные отношения разделов 2-4; (ii) пассивные результаты Максвелла от источника по разделам 6-7; и (iii) сопутствующая численная диагностика и диагностика потока. Полный набор сценариев, конфигураций выполнения, машиночитаемых сводок вариантов, необработанных временных рядов после источника, массивов радиальных ответов и контрольных сумм представлен в дополнительном вычислительном архиве. На основе этих материалов была определена предложенная архитектура открытого резонатора из аналитических Eqs. (1) - (11) и численно обоснованы цилиндрическим моделированием FDTD (MEEP), документированным в разделах 5-7.

Все электромагнитные результаты были получены в рамках одной объявленной пассивной модели: идеальные отражатели PEC, вакуумная внутренняя часть, азимутальные сектора m = 0 и 1, цилиндрическая PML и два пространственных разрешения (R144 и R192). Дополнительный архив содержит файлы, необходимые для воспроизведения зарегистрированных модальных частот, Q-факторов на основе затухания и управляемых профилей радиального отклика, а также сценарии постобработки, которые восстанавливают рисунки 5-6 из проверенных числовых массивов. Каждый собранный случай несет SHA-256 записи о целостности; проверка целостности файла подтверждает побайтовое соответствие с манифестами архива и отличается от независимого повторного запуска прямого решателя.

Воспроизведение результатов не требует внутренней структуры каталогов исходного архива. Минимальная независимая проверка должна: сверить границу с уравнением (1) и правилом апертуры уравнения (2); запустить $\beta = 1.4$, $m = 0$ и $m = 1$ пассивных случаев истока в обоих размерах сетки с заявленной геометрией, PML и окнами наблюдения; изолировать одни и те же частотные дорожки на соответствующих зондах; и соответствуют независимым окнам затухания в конце времени для Q. Точное аналитическое совпадение объема ядра с уравнением (11) должно быть проверено отдельно от занятости металла конечной сетки, и независимый индикатор лучей должен обеспечивать соблюдение правил первого положительного пересечения и зеркальной нормы раздела 4.

Архив выделяет три категории материала: аналитически установленные геометрические результаты, численно вычисленные наблюдаемые Максвелла и производные величины (сложные частоты, парные контрольные разности, двухсеточные изменения, значения кривизны). Их доказательственный статус изложен в разделе 9. Аналитические граничные и расчетные соотношения могут быть проверены любым исследователем только из опубликованных уравнений; модальные и профильные результаты являются численно рассчитанными наблюдаемыми данными объявленной модели конечной области идеального PEC. В рамках настоящей программы GWE эти материалы обосновывают предложенную резонансную архитектуру PHB; они не представляют собой исключительный исторический приоритет или универсальное превосходство в производительности, как указано в разделах 9-11.

Список литературы

H. Kogelnik and T. Li, «Laser Beams and Resonators», Applied Optics 5, 1550-1567 (1966). DOI: 10.1364/AO.5.001550.

[2] A. E. Siegman, Lasers, University Science Books (1986), главы об оптических резонаторах.

[3] Р. А. Ходзько, С. Б. Мейсон и Е. Ф. Кросс, «Кольцевая сходящаяся волновая полость», Прикладная оптика 15, 2137-2144 (1976). DOI: 10.1364/AO.15.002137.

[4] A. F. Oskooi et al., «MEEP: Гибкий пакет свободного программного обеспечения для электромагнитного моделирования методом FDTD», Computer Physics Communications 181, 687-702 (2010). DOI: 10.1016/j.cpc.2009.11.008.

[5] В. Хаустов, «Закон фокально-транспортных лучей в псевдогиперболоидальных полостях с переменной отрицательной гауссовой кривизной: точное фокальное сжатие, транспорт в порядке событий, развертывание косых лучей и вычислительные тесты с конечной длиной волны», Zenodo (2026), DOI: 10.5281/zenodo.21969312.

[6] MEEP documentation, Cylindrical Coordinates and Harminv/source-off mode extraction, https://meep.readthedocs.io/ (accessed September 2026).

[7] М. Бондареску и К. С. Торн, «Новое семейство световых лучей и форм зеркал для будущих интерферометров LIGO», Physical Review D 74, 082003 (2006). DOI: 10.1103/PhysRevD.74.082003.

[8] V. Galdi et al., «Analytic structure of a family of hyperboloidal beams of potential interest for advanced LIGO», Physical Review D 73, 127101 (2006). DOI: 10.1103/PhysRevD.73.127101.

[9] Л. В. Кассер, «Цилиндрические лазерные резонаторы», Журнал Оптического общества Америки 63, 25-29 (1973). DOI: 10.1364/JOSA.63.000025.

[10] W. H. Carter, «Stable and unstable cylindrical-laser-resonator theory in an angular spectrum representation», Journal of the Optical Society of America 64, 1100-1106 (1974). DOI: 10.1364/JOSA.64.001100.

[11] Т. Р. Фергюсон и М. Е. Смитерс, «Торические нестабильные резонаторы», Прикладная оптика 23, 2122-2126 (1984). DOI: 10.1364/AO.23.002122.

[12] А. Боргезе, Р. Каневари, В. Донати и Л. Гарифо, «Неустойчивые резонаторы с тороидальными зеркалами», Прикладная оптика 20, 3547-3552 (1981). DOI: 10.1364/AO.20.003547.

[13] С. Х. Чао и Д. Л. Шили, «Теоретический анализ стабильных и нестабильных асферических лазерных полостей», Прикладная оптика 27, 75-79 (1988). DOI: 10.1364/AO.27.000075.

[14] В. Хаустов, «Закон идеальной геометрической динамики лучей в псевдопараболоидах второго порядка: точная структура фокального возврата, семейства периодических лучей и топологическое расщепление горизонтального и вертикального типов», Zenodo (2026), DOI: 10.5281/zenodo.22737421.

[15] В. Хаустов, «Закон идеальной геометрической динамики лучей в псевдоэллипсоидах второго порядка: точное аналитическое описание фокальной структуры, замкнутые классы периодических траекторий, зоны концентрации плотности и топологический переход», Zenodo (2026), DOI: 10.5281/zenodo.22737467.