Геометрическая волновая инженерия

Первая воспроизводимая волновая верификация псевдогиперболоида второго порядка методом цилиндрического Maxwell/FDTD

Межфокальное кольцевое удержание, сравнение с контрольными поверхностями и отклик кольцевой выходной щели

Хаустов Владимир Игоревич

ORCID: 0009-0007-3657-2309

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

Лицензия: CC BY 4.0

Дата публикации: 20 июня 2026 года

DOI: 10.5281/zenodo.20776864

Научно-технический перевод с английского языка.

Редакция, адаптированная для русскоязычного инженера-исследователя.

Оригинал: Khaustov. V. Geometric Wave Engineering: First Reproducible Cylindrical Maxwell/FDTD Wave Verification of a Second-Order Pseudohyperboloid — Inter-Focal Annular Confinement, Benchmark-Surface Comparison, and Annular-Slot Response. https://doi.org/10.5281/zenodo.20776864

Аннотация

В настоящем отчёте представлена первая завершённая воспроизводимая волновая верификация псевдоповерхности вращения — вертикального псевдогиперболоида второго порядка (PHB) — в рамках геометрической волновой инженерии, выполненная методом цилиндрического Maxwell/FDTD. Физический объект представляет собой трёхмерную поверхность вращения, однако расчёт проводится в цилиндрической модели с разложением по азимутальным модам, а не посредством прямого трёхмерного расчёта в декартовых координатах. Основной вопрос состоит в том, является ли PHB лишь необычным по форме резонатором либо геометрия его гиперболических раструбов с переменной отрицательной кривизной обеспечивает измеримый эффект управления волнами по сравнению с негиперболическими контрольными поверхностями.

Строго установленный результат положителен, но ограничен. Расчёт не доказывает, что кольцевая локализация при больших значениях m присуща исключительно PHB: в любой осесимметричной волновой задаче член, связанный с угловым моментом, m^2/r^2 может смещать поле к кольцевым, экваториальным или пристеночным областям. Поэтому специфическое для PHB утверждение не сводится к самому факту образования кольца. Более содержательное утверждение заключается в том, что при отдельных высоких азимутальных порядках PHB организует кольцевую энергию внутри межфокального коридора $|z| \le c$, определяемого гиперболической геометрией, и подавляет энергию вне фокальной области сильнее исследованных негиперболических контрольных поверхностей.

Завершённый аудит таблиц охватывает 143 CSV-файла. Полная таблица преимуществ PHB включает 23 содержательных расчёта: преимущество PHB по log10(CF) положительно в 21 случае, превышает 0,5 в 19 случаях; среднее значение составляет 1,20, медиана — 1,38. Пассивный режим малых азимутальных порядков не подтверждён: при m = 0 и m = 5 преимущества PHB не наблюдается. Перспективный пассивный диапазон соответствует m = 10–15. Анализ Harminv не обнаруживает устойчиво идентифицируемых мод с добротностью Q; работа лазера с усилением, плазменный или термоядерный режимы, равно как и лазерный режим Low-J, не установлены. Эти направления сформулированы как задачи будущей верификации, а не как результаты выполненной расчётной матрицы.

Геометрические параметры первой волновой верификации — a = 0,3, b = 0,6 и R = 3,0 — рассматриваются как первая эталонная конфигурация PHB, а не как универсальный оптимум. Они выбраны с учётом ранее выполненных геометрических и упрощённых лучеволновых расчётов, поскольку a, b и R определяют длину раструба, распределение кривизны, расстояние между фокальными кольцами, положение диагностического кольцевого уровня и организацию семейств лучевых траекторий. Поскольку геометрические параметры влияют на распространение лучей, ожидается их влияние и на волновой отклик в Maxwell/FDTD. Полноволновая проверка других семейств значений a, b и R выделена в самостоятельный следующий этап и не считается завершённым результатом данного отчёта.

Ключевые слова: геометрическая волновая инженерия; псевдогиперболоид; вертикальный псевдогиперболоидный резонатор; цилиндрический Maxwell/FDTD; MEEP; кольцевое удержание; межфокальное удержание; высокие азимутальные порядки m; кольцевая выходная щель; контрольные поверхности.

Содержание

Аннотация 2
1. Область исследования и основной тезис 4
2. Геометрия: псевдогиперболоид (РНВ) с внутренне переменной отрицательной кривизной 4
2.1. Геометрическое построение открытого РНВ и кольцевой выходной щели R2 5
2.2. Выбор геометрических размеров для первой волновой верификации 7
3. Контрольные поверхности и необходимость контрольных сравнений 9
4. Вычислительная матрица и аудит таблиц 9
5. Селективность по азимутальному порядку: само кольцо не является открытием 10
5.1. Подробная физическая интерпретация модовой селективности 10
6. Восстановленные распределения плотности энергии с ограничениями по метрикам 11
7. Устойчивость результатов и независимость от источника возбуждения 13
7.1. Научное значение устойчивости к изменению источника 13
8. Аудит при одинаковых частотах 15
9. Отклик слабо открытой кольцевой выходной щели 15
9.1. Физическая интерпретация исследования кольцевой щели R2 16
10. Что подтверждает выполненный расчёт 18
11. Научное значение для геометрической волновой инженерии 19
12. Плазменные, радиочастотные, акустические и технические перспективы 19
13. Перспективы дальнейшей верификации 20
14. Ограничения и фальсифицируемость 20
15. Заключение 21
16. Доступность данных и воспроизводимость 21
17. Литература и связанные вычислительные публикации 21

Таблица 1. Сводные сведения об исследовании.

Наименование	Значение
Исследовательская программа	Геометрическая волновая инженерия
Объект	Вертикальный псевдогиперболоидный резонатор
Геометрическая особенность	Гиперболический раструб с переменной отрицательной кривизной и внешними опорными фокальными кольцами
Тип верификации	Полновекторный цилиндрический Maxwell/FDTD-скрининг при заданном азимутальном порядке m
Завершённая матрица расчётов	Все 24 запланированные задачи MEEP завершились с кодом 0; проверены 143 CSV-файла; агрегированные таблицы согласованы
Основной положительный результат	Межфокальное удержание выбранной высокоазимутальной кольцевой энергии, устойчивое к изменению источника и слабому открытию
Основной результат контрольных сравнений	Сама по себе кольцевая локализация при больших m является общей и не заявляется уникальным свойством PHB
Статус прикладных применений	Перспективная геометрия управления волнами.

1. Область исследования и основной тезис

Настоящая статья представляет собой вычислительный отчёт, а не заявление о готовом изделии. В ней фиксируются воспроизводимые результаты волновой проверки нового вертикального псевдогиперболоидного резонатора. Термин «псевдогиперболоид» обозначает здесь конструктивно заданную поверхность, волновая функция которой определяется установленной связью между кривизной и фокальной геометрией, а не только обычным объёмом полости.

В научной аргументации не используется сравнение с историей разработки. Представленная численная матрица рассматривается как единый завершённый пакет верификации: геометрия, контрольные поверхности, полновекторный цилиндрический Maxwell/FDTD-скрининг, извлечение метрик и аудит таблиц. Выводы формулируются исключительно по результатам этого пакета.

2. Геометрия: псевдогиперболоид (PHB) с внутренне переменной отрицательной кривизной

Базовая геометрия PHB задаётся в цилиндрических координатах (r, z) параметрами a = 0,3, b = 0,6 и R = 3,0. Унаследованная фокальная координата образующей гиперболы равна $c = \sqrt{(a^2 + b^2)} = 0{,}67082$, а осевая полудлина $L = a\sqrt{(1 + (R/b)^2)} = 1{,}529706$. Центральная перемычка описывается формулой $r(z) = R + \sqrt{(a^2 - z^2)}$ при $|z| \le a$. Гиперболический раструб имеет профиль $r(z) = R - b\sqrt{((|z|/a)^2 - 1)}$ при $a < |z| \le L$. Диагностический кольцевой уровень соответствует r = R, а характерный для PHB межфокальный коридор определяется неравенством $|z| \le c$.

Раструб является тем геометрическим элементом, который отличает PHB от контрольных профилей. Согласно численной таблице кривизны, доля узлов с отрицательной кривизной на раструбе PHB составляет 100 %, тогда как негиперболические контрольные поверхности характеризуются нулевой, частичной либо численно сингулярной смешанной картиной. Эта

диагностика кривизны не представляется самостоятельной теоремой дифференциальной геометрии, а служит воспроизводимой характеристикой реализованного семейства поверхностей.

Таблица 2. Геометрия и численная диагностика кривизны PHB и контрольных поверхностей.

Геометрия	rho(c)	приближённый показатель объёма	приближённый показатель площади поверхности	узлы раструба с отрицательной K	минимум K раструба	средняя K раструба
PHB	1.800	37.60	79.37	100.00%	-4.526e-02	-1.431e-02
LINEAR	2.095	42.92	80.00	49.03%	-9.365e-12	-4.104e-16
POLY2	2.727	56.83	86.34	0.00%	1.392e-02	2.140e-01
SMOOTHSTEP	2.346	45.57	81.37	49.35%	-1.626e+03	-2.232e+01
HERMITE_SLOPE_MATCH	1.952	39.82	79.01	66.67%	-1.017e+02	-2.580e+00
POLY_VOL_MATCH	2.532	51.70	83.27	0.00%	1.362e-02	1.410e-01

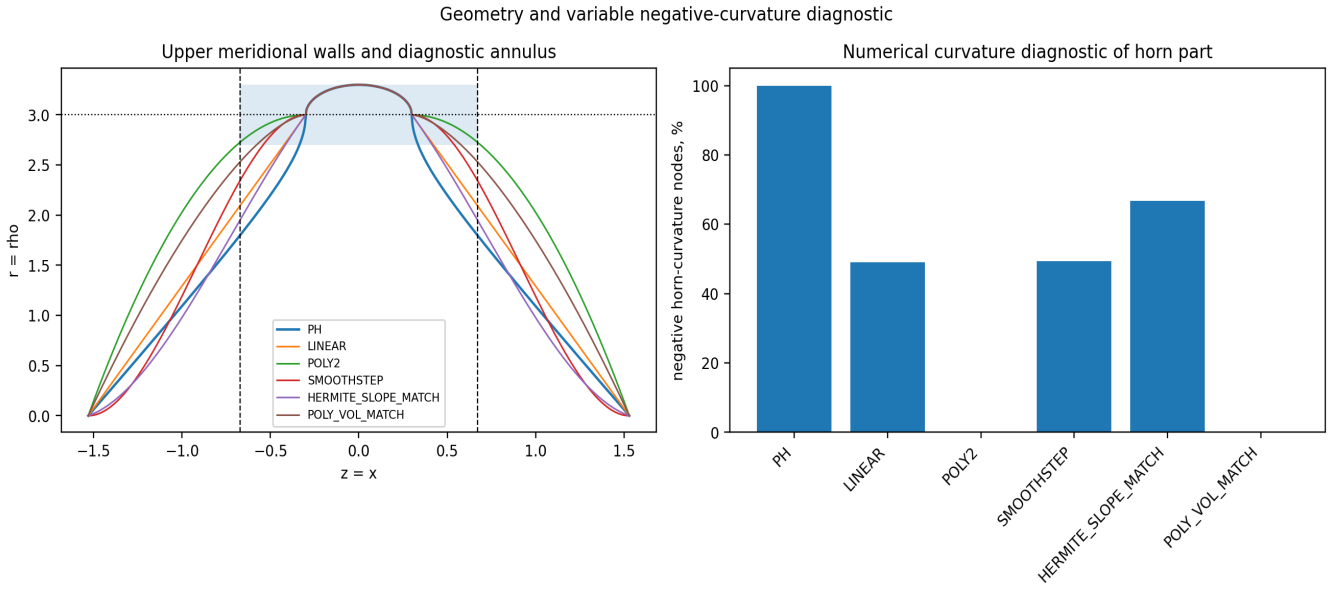

Рисунок 1. Геометрия PHB и контрольных поверхностей. Слева показаны верхние меридиональные стенки и диагностическая кольцевая область; справа — доля узлов раструба с отрицательной кривизной согласно геометрической сводке.

2.1. Геометрическое построение открытого PHB и кольцевой выходной щели R2

PHB следует рассматривать прежде всего как конструктивно заданную поверхность вращения, а не как декоративный контур полости. Замкнутая эталонная форма состоит из двух частей. В центральной области $|z| \le a$ меридиональная стенка задаётся зависимостью $r(z) = R + \sqrt{(a^2 - z^2)}$. В области раструба $a < |z| \le L$ она подчиняется гиперболическому закону $r(z) = R - b\sqrt{((|z|/a)^2 - 1)}$. Вращение этого меридионального профиля вокруг оси формирует трёхмерную псевдоповерхность, раструб которой наследует переменную отрицательную кривизну образующей гиперболы. Именно

раструб отличает PHB от линейного, полиномиального, сглаженного и эрмитова контрольных профилей, рассматриваемых в сравнительной матрице.

В слабо открытой конфигурации для исследования R2 на правом раструбе предусмотрена локальная кольцевая щель. Это не осевое отверстие и не плоская торцевая апертура. В меридиональном сечении её радиальная толщина равна $\Delta R_{total} = R \cdot R2$, половина толщины — $\Delta R_{half} = \Delta R_{total}/2$; выделенный участок стенки простирается от $z = a$ до $z = a\sqrt{1 + (\Delta R_{half}/b)^2}$, при этом радиус стенки уменьшается от $r = R$ до $r = R - \Delta R_{half}$. После вращения данный меридиональный отрезок образует узкую кольцевую выходную полосу на правом раструбе. Её физическое назначение — обеспечивать управляемый вывод или утечку уже организованной кольцевой энергии, сохраняя общую геометрию раструба, которая обусловливает эффект удержания.

Это геометрическое уточнение необходимо для интерпретации расчётов открытой щели. Параметр R2 не просто «открывает полость»: он задаёт расположение отверстия, его радиальную толщину и участок раструба, участвующий в выводе энергии. Поэтому рисунки 2–4 дополняют рисунок 1: на них показаны (i) замкнутый трёхмерный PHB без выходной щели, (ii) положение щели в двумерном меридиональном сечении и (iii) её истинная трёхмерная кольцевая форма с направлением вывода кольцевой энергии. Для наглядности на иллюстрациях принято R2 = 0,15, тогда как вычислительное сканирование охватывает R2 = 0,02…0,15.

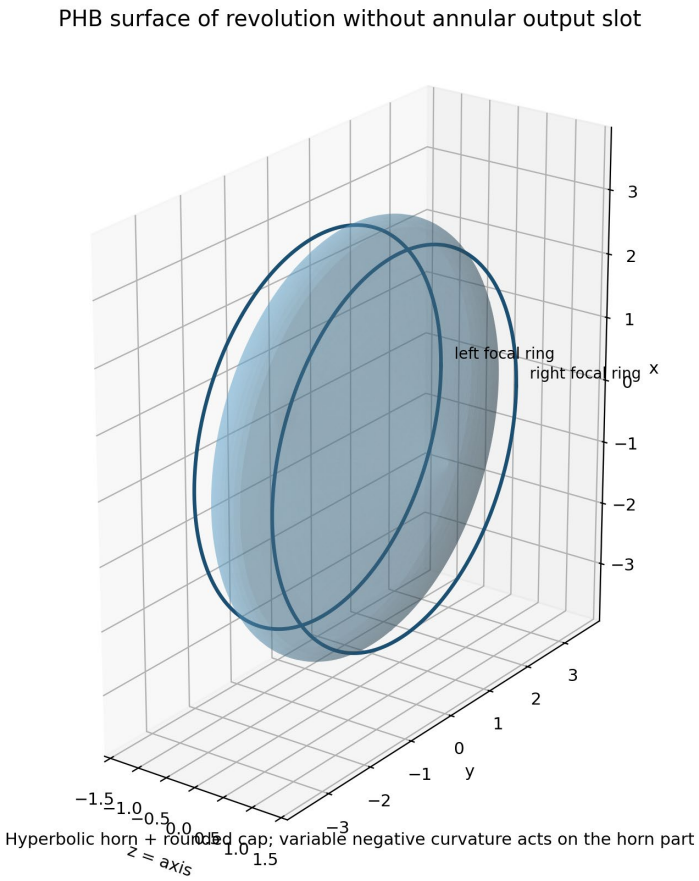

Рисунок 2. Трёхмерная поверхность вращения PHB без кольцевой выходной щели. Гиперболический раструб представляет собой часть геометрии с переменной отрицательной кривизной.

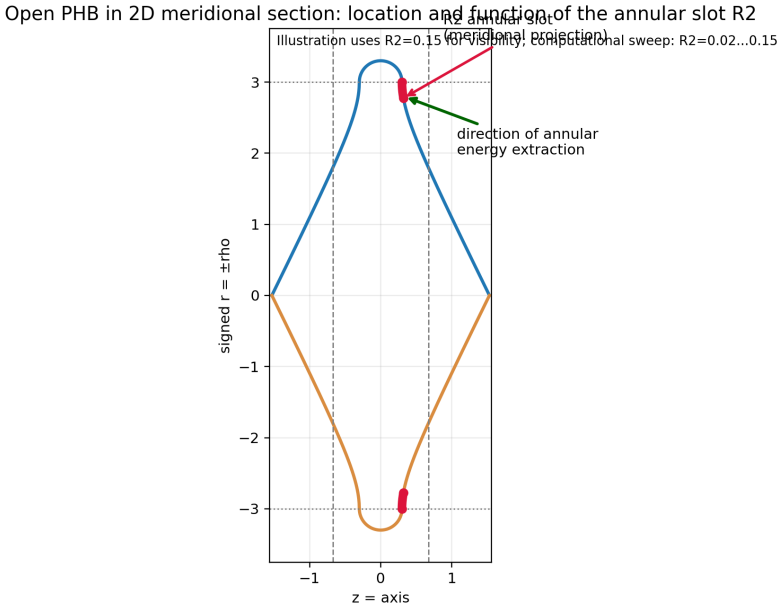

Рисунок 3. Открытый PHB в меридиональном сечении. Красным выделена меридиональная проекция кольцевой щели R2; при вращении она образует кольцевую выходную полосу на правом раструбе.

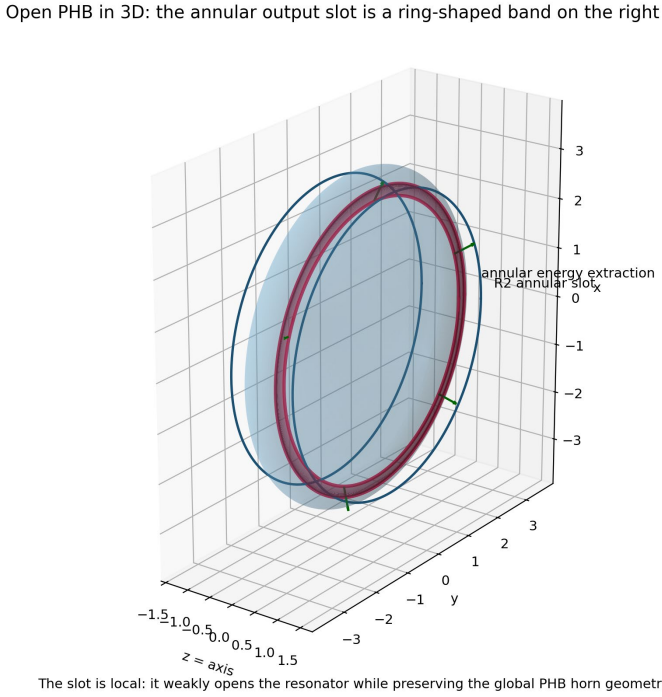

Рисунок 4. Трёхмерная форма кольцевой щели R2. Щель представляет собой локальную кольцевую полосу на правом раструбе; стрелками показано направление вывода кольцевой энергии в исследовании слабо открытого отклика.

2.2. Выбор геометрических размеров для первой волновой верификации

Численные параметры, применённые в первой цилиндрической Maxwell/FDTD-верификации, не являются произвольно выбранными визуальными пропорциями. Они задают первую эталонную

конфигурацию РНВ для волнового испытания, принятую после предшествующих геометрических и лучевых этапов, на которых гиперболический раструб, диагностический уровень фокальных колец и кольцевая выходная щель были выделены как значимые элементы управления волнами. Базовые значения a = 0,3, b = 0,6 и R = 3,0 определяют длину раструба $L = a\sqrt{(1 + (R/b)^2)}$, фокальную полудистанцию $c = \sqrt{(a^2 + b^2)}$, диагностический кольцевой уровень r = R и радиальный масштаб сканирования щели R2. Таким образом, параметры задают одновременно форму и физико-диагностический смысл волновых метрик.

Данный выбор связан с двумя предшествующими вычислительными публикациями. В более общей программе ГВИ были введены понятия индуцированной фокальности, конструктивных семейств псевдоповерхностей и операционных псевдообъёмов, а также поэтапная схема верификации (DOI: 10.5281/zenodo.20476327). Затем в упрощённой лучеволновой проверке открытого телескопического псевдогиперболоидного резонатора были исследованы меридиональные лучевые траектории, направляемые фокальной геометрией, и кольцевая щель как возможный открытый канал вывода (DOI: 10.5281/zenodo.20688646). Настоящее исследование Maxwell/FDTD не повторяет эти расчёты, а использует их геометрические выводы для задания первой волновой модели с явно определённой, воспроизводимой и вычислительно доступной геометрией.

Параметры a, b и R влияют на распространение лучей и, следовательно, предположительно должны влиять и на распространение волн. Изменение a изменяет масштаб центральной перемычки и переход к горловине; изменение b — наклон гиперболического раструба и фокальную координату c; изменение R — радиус кольца, цилиндрическое весовое распределение и относительные расстояния между осью, раструбом и диагностической кольцевой зоной. Поскольку высокоазимутальная локализация, межфокальное удержание и связь с выходной щелью зависят от границы и масштаба, другие значения a, b и R могут сместить рабочий диапазон азимутальных порядков, изменить log10(CF), характер зависимости связи от R2 либо даже уменьшить преимущество РНВ перед контрольными поверхностями.

Поэтому рассматриваемую конфигурацию следует понимать как первую эталонную геометрию программы волновой верификации РНВ, а не как глобальный оптимум. Полноволновая проверка иных троек (a, b, R), в том числе конфигураций, ориентированных на Low-J, и других размеров выходных щелей, выделяется в самостоятельный следующий этап. Это ограничение существенно: настоящий результат подтверждает специфический волновой отклик РНВ для проверенной геометрии, но ещё не описывает всё пространство возможных конструкций РНВ.

Таблица 3. Геометрические параметры первой волновой верификации.

Параметр	Геометрическая роль	Ожидаемое влияние на волновой отклик
a	Масштаб центральной перемычки; переход к горловине; вклад в $c = \sqrt{(a^2+b^2)}$	Может изменять переход между осевой/центральной областью и кольцевым откликом, направляемым раструбом
b	Наклон гиперболического раструба и фокальная полудистанция c	Может изменять фокусировку лучей, рабочий диапазон модовых порядков и межфокальное удержание
R	Радиус кольца, цилиндрическое весовое распределение и диагностический уровень r = R	Может изменять кольцевую локализацию при больших m, эффективный радиальный масштаб и связь через щель R2
R2	Радиальная толщина и расположение кольцевой выходной полосы на правом раструбе	Регулирует слабое открытие и вывод кольцевой энергии без изменения общего закона раструба РНВ

3. Контрольные поверхности и необходимость контрольных сравнений

PHB сравнивается с поверхностями LINEAR, POLY2, SMOOTHSTEP, HERMITE_SLOPE_MATCH и POLY_VOL_MATCH. Эти контрольные формы сохраняют основной масштаб, но заменяют гиперболический закон раструба негиперболическими профилями. Их роль принципиальна: если некоторое значение метрики велико как для PHB, так и для контрольных форм, оно не может считаться специфичным для PHB. Поэтому в исследовании разграничиваются общая для осесимметричных систем кольцевая локализация при больших m и более специфический эффект межфокального удержания, обусловленный сочетанием кривизны и фокальной структуры.

Сравнение намеренно построено по строгим критериям. Метрика eta_100R характеризует энергию около диагностического кольца и позволяет выявлять кольцевую локализацию, но недостаточна для доказательства уникальности. Специфической для PHB метрикой служит $CF = E(|z| \le c)/E(|z| > c)$, представляемая как log10(CF), поскольку она проверяет, удерживается ли кольцевая энергия внутри фокального коридора, а не просто вытесняется ли поле к кольцу.

Таблица 4. Иерархия диагностических показателей, используемых в отчёте.

Метрика	Определение	Научный смысл
eta_100R	Доля энергии при $\|r - R\| \le 0{,}1R$ и $\|z\| \le c$	Метрика кольцевой локализации; не доказывает уникальность
eta_025R / eta_050R	Доля энергии в более узких кольцевых зонах	Диагностика радиальной компактности
CF	E(|z| <= c) / E(|z| > c)	Основная специфическая метрика межфокального удержания PHB
log10(CF)	Десятичный логарифм CF	Основная метрика сравнения с контрольными формами
near_wall_90_frac	Доля энергии около стенки	Диагностика артефактов и пристеночных эффектов
slot_radial_flux	Поток через монитор кольцевой щели	Приближённая характеристика открытого вывода; не нормированная мощность лазера
Q / Harminv	Оценка времени жизни свободно затухающих мод	По этим данным не установлено

4. Вычислительная матрица и аудит таблиц

Завершённый пакет включает 143 CSV-файла. Из них 23 относятся к таблицам Harminv, причём в 23 таблицах отсутствуют разрешённые модовые записи. Сводная DFT-таблица содержит 1458 строк, агрегированная таблица лучших частот — 134 строки и агрегированная таблица потоков — 134 строки. Суммы индивидуальных таблиц совпадают со сводными результатами, что позволяет использовать агрегированные файлы для научного анализа завершённой вычислительной матрицы.

Расчёт MEEP/FDTD представляет собой исследование вынужденного отклика. При заданном азимутальном порядке m вычисляются компоненты векторного поля в цилиндрических координатах. Это волновой расчёт трёхмерной поверхности вращения посредством разложения по азимутальным модам, а не полное трёхмерное моделирование в декартовых координатах и не одновременный расчёт нескольких m.

Таблица 5. Сводные результаты аудита таблиц завершённого пакета верификации.

Элемент набора данных	Количество / статус
Запланированные задачи MEEP	24 из 24 завершились с кодом 0
CSV-файлы в табличном пакете	143
Строки агрегированной таблицы метрик DFT	1458
Строки агрегированной таблицы лучших частот	134
Строки агрегированной таблицы потоков	134
Таблицы мод Harminv	23 таблицы, все 23 пусты
Статус добротности Q	Не заявляется

5. Селективность по азимутальному порядку: само кольцо не является открытием

Сканирование по m в замкнутой полости даёт определяющий результат для пассивной модовой селекции. PHB не является универсальным резонатором для низших мод. При m = 0 и m = 5 значение CF у PHB невелико либо уступает лучшей контрольной форме. При m = 10 PHB становится сильным кандидатом: улучшаются и кольцевая локализация, и межфокальное удержание. При m = 15 кольцевая структура уже почти насыщена у ряда контрольных геометрий, поэтому специфический эффект PHB выражается прежде всего через CF, а не через более яркое кольцо. При m = 20 обычная высокоазимутальная кольцевая локализация приближается к насыщению и сводное преимущество PHB становится небольшим, хотя отдельные частотные строки показывают весьма высокие CF вблизи численного предела энергии вне фокального коридора.

5.1. Подробная физическая интерпретация модовой селективности

Сканирование замкнутой системы позволяет выделить несколько физически различных режимов. При m = 0 PHB не превосходит контрольные поверхности, что сразу исключает упрощённое предположение об универсальности резонатора для низших порядков лишь на основании его формы. При m = 5 начинает проявляться тенденция к кольцевому распределению, однако специфическое преимущество межфокального удержания PHB ещё уступает лучшим контрольным формам. Первый отчётливо положительный пассивный режим наблюдается при m = 10, когда PHB одновременно улучшает долю кольцевой энергии и коэффициент межфокального удержания. Именно при таком азимутальном порядке геометрия начинает делать больше, чем просто поддерживать кольцевой отклик.

При m = 15 научная интерпретация становится ещё определённее. Несколько контрольных геометрий достигают очень высоких значений eta_100R, поэтому сам факт существования кольца перестаёт служить различающим признаком. Отличительным показателем остаётся существенно более сильное подавление энергии вне фокальной области у PHB, выражаемое повышенным значением log10(CF). Иными словами, преимущество PHB состоит не просто в формировании кольца, а в более тесном удержании этого кольца внутри межфокального осевого коридора. При m = 20 кольцевой отклик контрольных геометрий близок к насыщению, и простая кольцевая метрика теряет доказательную силу. Поэтому наиболее убедительным пассивным диапазоном PHB является не «максимально возможное m», а более конкретный интервал m ≈ 10–15.

Полные таблицы DFT также указывают на то, что некоторые строки с исключительно высоким удержанием при наибольших m могут приближаться к численному порогу энергии вне фокальной

области. Это не опровергает результат, но требует осторожной формулировки: PHB представляет собой геометрию модово-селективного управления волнами при больших m, а не универсальный резонатор для всех мод и не доказанное устройство Low-J в рамках рассматриваемой пассивной модели.

Таблица 6. Сканирование мод в замкнутой полости. Рабочий пассивный диапазон PHB относится к большим m и обладает модовой селективностью.

m	PH eta100	Лучший контроль eta100	PH log10(CF)	Лучший контроль log10(CF)	Преимущество PHB по log10(CF)
0	25.91%	29.29% (POLY2)	1.131	1.224 (POLY_VOL_MATCH)	-0.093
5	47.59%	45.84% (LINEAR)	1.147	1.513 (HERMITE_SLOPE_MATCH)	-0.366
10	71.60%	56.45% (HERMITE_SLOPE_MATCH)	2.915	2.218 (HERMITE_SLOPE_MATCH)	+0.697
15	97.21%	97.50% (POLY2)	8.141	6.380 (HERMITE_SLOPE_MATCH)	+1.761
20	98.54%	98.58% (POLY2)	7.979	7.935 (HERMITE_SLOPE_MATCH)	+0.044

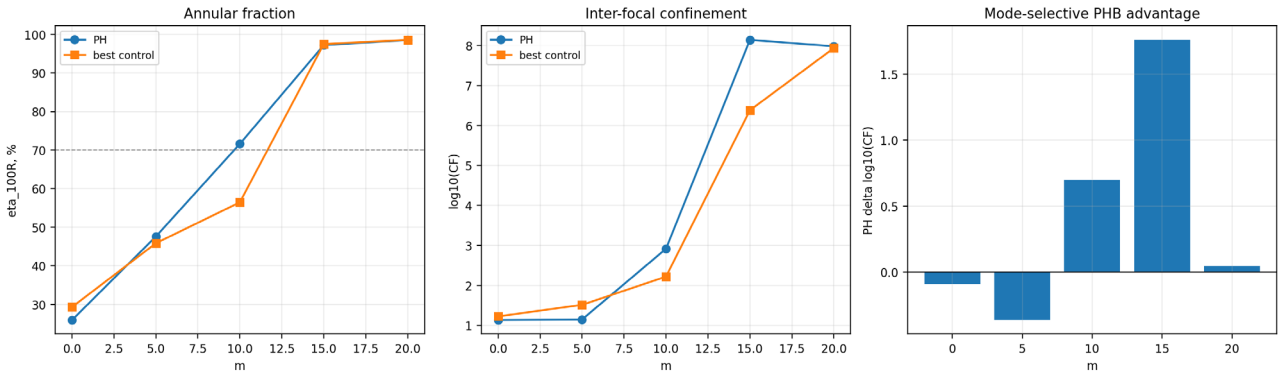

Рисунок 5. Сканирование мод. Доля кольцевой энергии возрастает и для PHB, и для контролей; специфический сигнал PHB наиболее выражен в log10(CF) в области m = 10–15.

6. Восстановленные распределения плотности энергии с ограничениями по метрикам

Внутренние PNG-карты поля, полученные блоком визуализации расчёта, здесь не используются как доказательство. Иллюстрации статьи построены заново по табличным метрикам при единой нормировке полной энергии. Они не являются реконструкциями исходных полевых данных. Это визуализации, ограниченные измеренными метриками: таблицы определяют eta_025R, eta_050R, eta_100R, CF, а также приближённые пристеночные и осевые показатели; на графиках представлено согласованное с ними пространственное распределение в точной реализованной геометрии.

Такое различие принципиально для научной интерпретации. Сводные численные метрики не позволяют однозначно восстановить полное поле в каждом пикселе. Поэтому первичную доказательную силу имеют таблицы, а рисунки служат наглядными сводными представлениями метрик в PHB и контрольных формах.

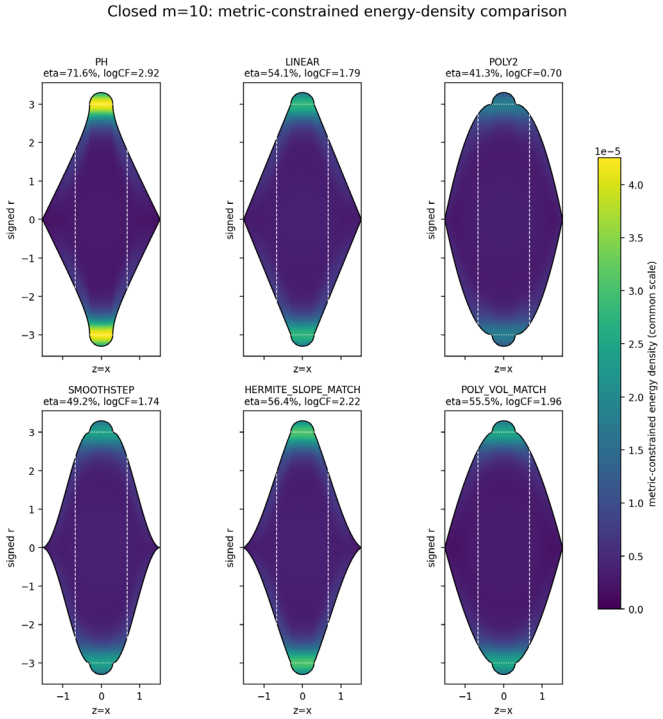

Рисунок 6. Карты плотности энергии, ограниченные табличными метриками, для замкнутого случая m = 10. По сравнению с выбранными контрольными формами PHB демонстрирует более сильную кольцевую локализацию и межфокальное удержание.

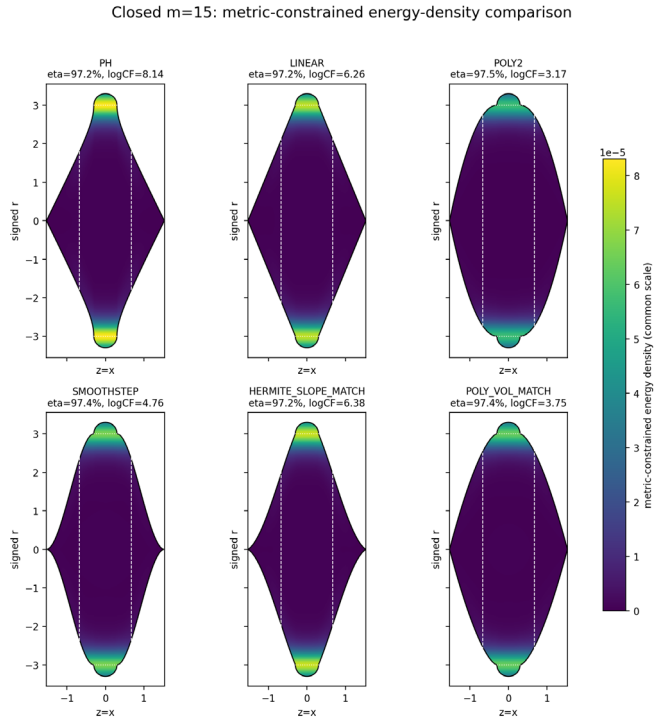

Рисунок 7. Карты плотности энергии, ограниченные метриками, для замкнутого случая m = 15. Само кольцо отчасти представляет общий эффект; специфическим признаком PHB является меньшая утечка за пределы фокальной области.

7. Устойчивость результатов и независимость от источника возбуждения

Последовательность расчётов при изменении разрешения и параметров PML поддерживает интерпретацию на основе CF. Величина преимущества не постоянна: в наиболее жёсткой из проверенных точек она снижается до +0,427 по log10(CF). Следовательно, наиболее сильное утверждение следует сделать умереннее, однако преимущество PHB сохраняется во всей последовательности проверок устойчивости.

Таблица 7. Последовательность проверок устойчивости при изменении разрешения и PML.

Точка проверки устойчивости	PH eta100	PH log10(CF)	Лучший контроль log10(CF)	Преимущество PHB по log10(CF)
res20, PML 0.8	97.67%	8.726	7.347 (HERMITE_SLOPE_MATCH)	+1.379
res24, PML 0.8	97.21%	8.141	6.380 (HERMITE_SLOPE_MATCH)	+1.761
res28, PML 1	98.86%	7.844	7.026 (HERMITE_SLOPE_MATCH)	+0.818
res32, PML 1.2	97.50%	7.587	7.160 (HERMITE_SLOPE_MATCH)	+0.427

Сканирование источников — один из наиболее убедительных результатов. PHB сохраняет наибольшее значение log10(CF) для источников Ep, Er, Ez, Hz и симметрично смещённых источников Ez. Случаи z = −0,335 и z = +0,335 дают совпадающие значения PHB в пределах указанной точности, что подтверждает внутреннюю симметрию цилиндрической реализации.

7.1. Научное значение устойчивости к изменению источника

Эффект, обусловленный геометрией, не должен зависеть от единственного удачного варианта возбуждения. Именно этому посвящено сканирование источников. PHB сохраняет преимущество по основной метрике удержания для Ep, Er, Ez и Hz, а также при симметричном смещении положения источника Ez. Это означает, что наблюдаемое удержание не является артефактом выбора одной компоненты поля, одной схемы возбуждения, подобной определённой поляризации, или асимметричного расположения источника.

Особенно полезно симметричное совпадение результатов для z = −0,335 и z = +0,335. Оно показывает, что цилиндрическая реализация соблюдает внутреннюю симметрию геометрии в пределах сообщённой численной точности. С научной точки зрения это усиливает аргумент о связи измеренного преимущества PHB именно с геометрией, а не со случайным положением источника или односторонним численным смещением.

Таблица 8. Устойчивость межфокального удержания PHB к выбору источника.

Источник	PH eta100	PH log10(CF)	Лучший контроль log10(CF)	Разность log10(CF)	Отношение CF
Ep, z=0	97.21%	8.141	6.380 (HERMITE_SLOPE_MATCH)	+1.761	57.7x
Er, z=0	95.25%	8.198	6.497 (HERMITE_SLOPE_MATCH)	+1.701	50.2x

Ez, z=-0.335	97.63%	7.365	5.974 (HERMITE_SLOPE_MATCH)	+1.391	24.6x
Ez, z=0	97.36%	6.903	5.805 (HERMITE_SLOPE_MATCH)	+1.098	12.5x
Ez, z=0.335	97.63%	7.365	5.974 (HERMITE_SLOPE_MATCH)	+1.391	24.6x
Hz, z=0	97.62%	8.668	6.604 (HERMITE_SLOPE_MATCH)	+2.063	115.7x

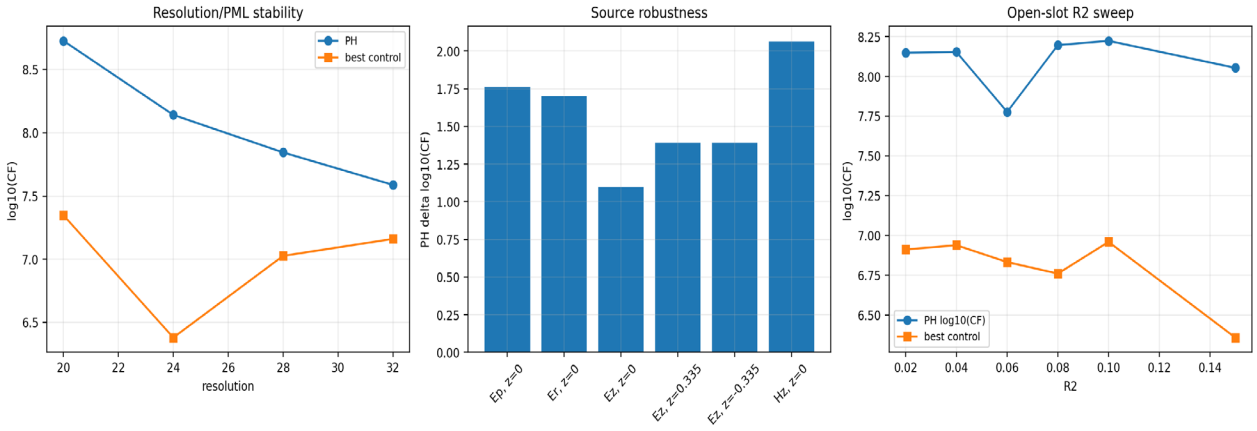

Рисунок 8. Устойчивость, независимость от источника и сканирование R2 в основной метрике CF.

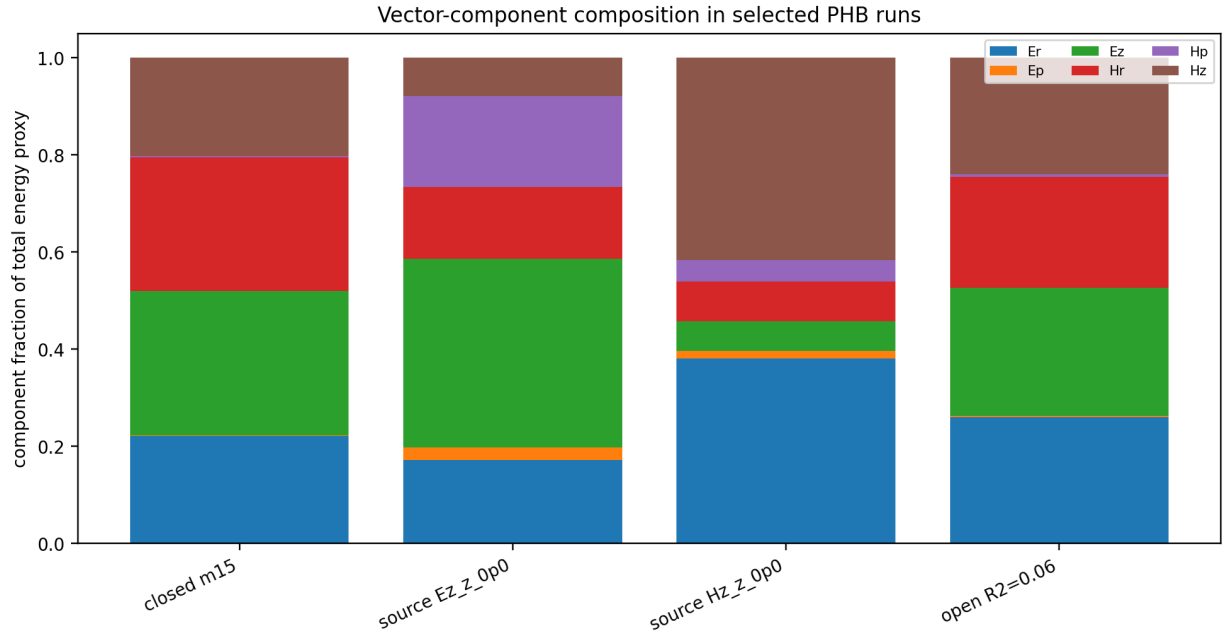

Рисунок 9. Состав векторных компонент в выбранных расчётах PHB. Отклик не сводится к одной скалярной компоненте; доминирующие компоненты меняются с конфигурацией источника.

8. Аудит при одинаковых частотах

Возможное возражение состоит в том, что PHB может превосходить контрольные поверхности лишь потому, что частота его наилучшего отклика отличается от оптимальной частоты контроля. Полные таблицы DFT позволяют провести более строгий аудит при совпадающих частотах: при одном и том же расчётном kR значение PHB сопоставляется с лучшим негиперболоидным контролем. При усреднении по всем строкам с одинаковыми частотами преимущество PHB по log10(CF) положительно. Это не заменяет сводки по оптимальным частотам, но уменьшает риск того, что преимущество обусловлено исключительно выбором частоты.

Таблица 9. Проверка совпадающих частот по всем рассчитанным значениям kR.

Показатель совпадающих частот	Значение
Число сравниваемых строк	249
Средняя разность log10(CF)	1.105
Медианная разность log10(CF)	1.211
Минимальная разность log10(CF)	-0.985
Максимальная разность log10(CF)	3.107

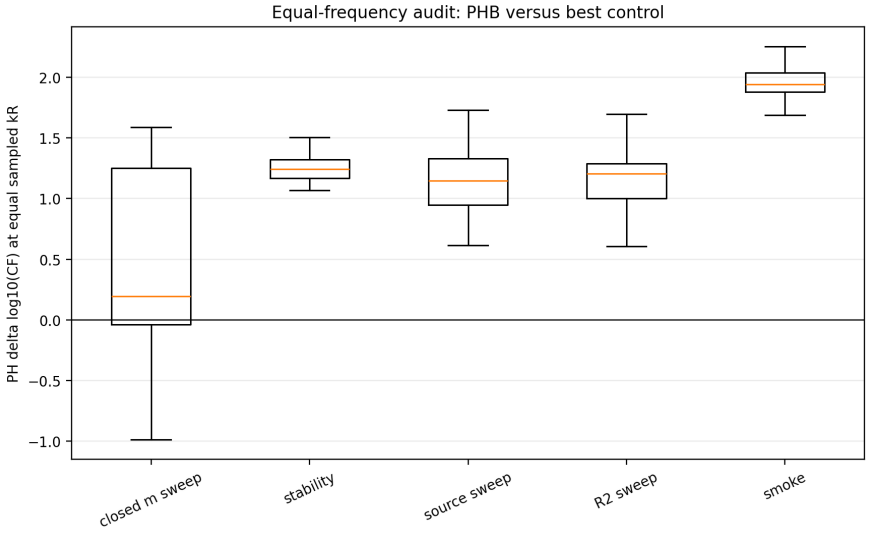

Рисунок 10. Сравнение на одинаковых частотах. PHB сопоставляется с лучшей доступной контрольной поверхностью при одинаковом расчётном kR.

9. Отклик слабо открытой кольцевой выходной щели

Практически полезная геометрия резонатора не должна терять способность организовывать поле сразу после небольшого открытия. Полное сканирование R2 от 0,02 до 0,15 показывает, что PHB сохраняет высокое значение log10(CF) во всех проверенных конфигурациях. Абсолютный поток через щель возрастает с увеличением R2, хотя соответствующие метрики ещё не позволяют утверждать, что получен оптимизированный выходной элемент связи или пучок лазерного качества.

9.1. Физическая интерпретация исследования кольцевой щели R2

Сканирование R2 представляет собой одну из важнейших частей отчёта, поскольку проверяет сохранение организующего эффекта PHB при переходе от идеально замкнутого резонатора к слабо открытому. Во всём испытанном диапазоне PHB сохраняет очень высокую долю кольцевой энергии и высокий коэффициент удержания, тогда как поток через щель существенно возрастает по мере её расширения. Следовательно, щель главным образом изменяет степень связи с внешним пространством, не разрушая немедленно исходную межфокальную кольцевую организацию энергии.

Это различие имеет существенное научное значение. Обычное кольцевое поле внутри замкнутого тела само по себе ещё не является полезным свойством резонатора, если не показан управляемый отклик при небольшом открытии. Результаты PHB указывают на геометрию, допускающую локальное открытие на раструбе с ясным физическим смыслом при сохранении характерной концентрации энергии около фокального кольца. Пока это не расчёт нормированного выходного элемента связи и не оптимизация лазера, но значимый положительный шаг за пределы наблюдения исключительно замкнутой полости.

Сравнение с классическими контрольными профилями также даёт важную информацию. Ряд контролей способен поддерживать кольцевую локализацию, однако PHB сочетает её с более сильным подавлением энергии вне межфокальной зоны и слабо открытым кольцевым каналом вывода, размещённым непосредственно на гиперболическом раструбе. Поэтому исследование открытой щели R2 целесообразно трактовать как проверку геометрически специфической связи с внешним пространством, а не как простое варьирование размера отверстия.

Таблица 10. Сканирование слабо открытой кольцевой щели R2.

R2	PH eta100	PH log10(CF)	Лучший контроль log10(CF)	Разность log10(CF)	Поток через щель PHB	Доля через щель PHB
0.02	97.24%	8.148	6.912 (HERMITE_SLOPE_MATCH)	+1.236	6.394e-07	4.40%
0.04	97.26%	8.152	6.939 (HERMITE_SLOPE_MATCH)	+1.213	1.009e-06	5.81%
0.06	98.20%	7.776	6.833 (HERMITE_SLOPE_MATCH)	+0.944	8.207e-06	8.63%
0.08	97.37%	8.196	6.760 (HERMITE_SLOPE_MATCH)	+1.435	3.183e-06	7.68%
0.10	97.58%	8.223	6.960 (HERMITE_SLOPE_MATCH)	+1.263	3.465e-05	8.20%
0.15	97.98%	8.053	6.359 (HERMITE_SLOPE_MATCH)	+1.694	7.966e-05	9.27%

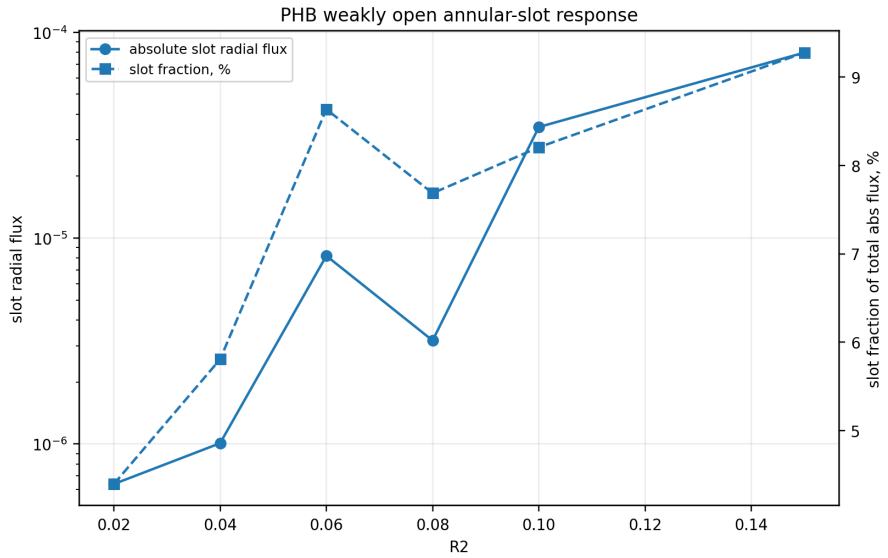

Рисунок 11. Отклик PHB со слабо открытой кольцевой щелью. Поток через щель возрастает с R2, тогда как межфокальное удержание остаётся высоким.

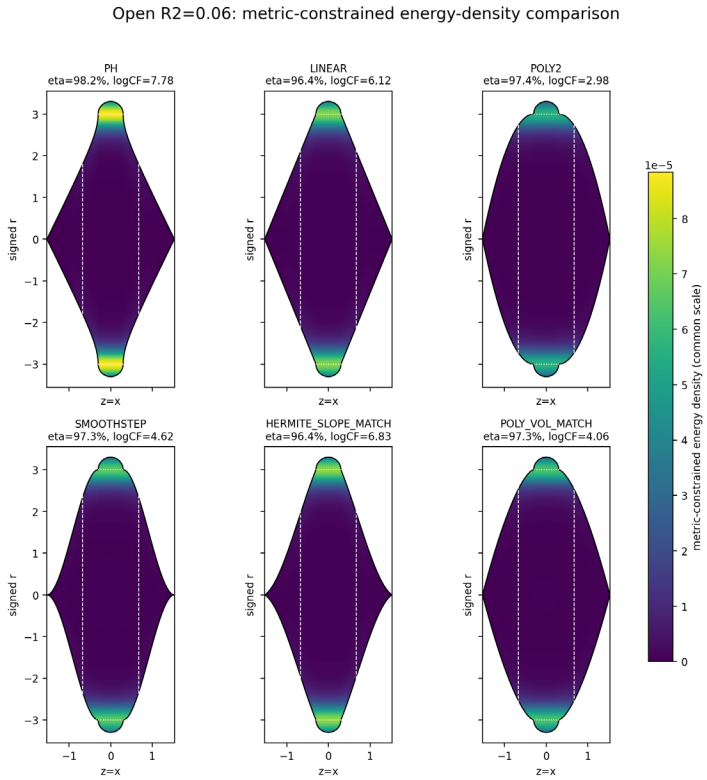

Рисунок 12. Карты плотности энергии, ограниченные метриками, для открытой конфигурации R2 = 0,06 при сравнении PHB и контрольных поверхностей.

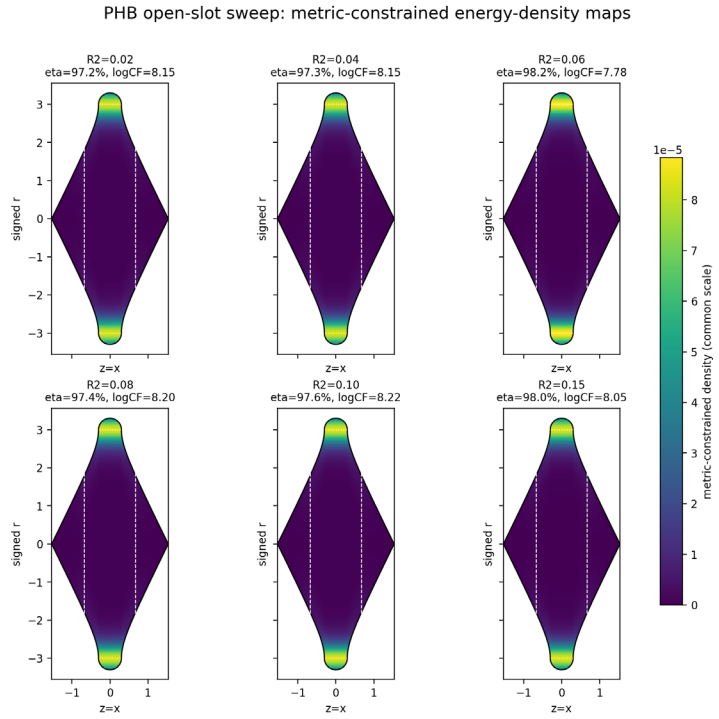

Рисунок 13. Карты плотности энергии PHB при сканировании R2, ограниченные метриками. Визуальная модель построена по табличным показателям, а не по отклонённым исходным PNG-картам.

10. Что подтверждает выполненный расчёт

Завершённая вычислительная матрица подтверждает пять ограниченных положений. Во-первых, PHB — не просто необычный контур: он воспроизводимо проявляет эффект управления волновой энергией в метрике CF. Во-вторых, этим эффектом не является само образование кольца, поскольку высокоазимутальная кольцевая локализация отчасти универсальна. В-третьих, характерный отклик PHB устойчив к изменению источника в рассмотренных конфигурациях. В-четвёртых, преимущество остаётся положительным при проверке устойчивости, хотя наибольшие проверенные разрешение и параметры PML уменьшают отрыв. В-пятых, эффект сохраняется при небольшом кольцевом открытии во всём проверенном диапазоне R2.

Таблица 11. Подтверждённые и неподтверждённые интерпретации.

Утверждение	Статус по завершённой вычислительной матрице
Существует кольцевая локализация при больших m	Подтверждено, но не уникально для PHB
PHB улучшает межфокальное удержание в рабочем высокоазимутальном диапазоне	Подтверждено
PHB является универсальным резонатором низших мод m = 0/1	Не подтверждено
PHB обладает устойчиво определяемыми показателями Harminv/Q	Не подтверждено; таблицы Harminv пусты
PHB сохраняет организованное распределение при слабом открытии R2 = 0,02–0,15	Подтверждено в рамках пассивного DFT-скрининга и расчётов потока
PHB представляет собой верифицированный лазерный резонатор	Не подтверждено этой матрицей

PHB удерживает плазму или обеспечивает термоядерный режим	Не подтверждено этой матрицей
Работа PHB в режиме Low-J с селекцией усилением	Физически мотивированное направление будущих исследований; здесь не продемонстрировано

11. Научное значение для геометрической волновой инженерии

Главный вклад работы состоит в последовательном разграничении общих кольцевых мод и специфического для геометрии управления волнами. Многие поверхности вращения способны поддерживать кольцевые распределения при больших m. Результат PHB приобретает научный смысл, когда кольцевая энергия дополнительно удерживается внутри межфокального коридора, определяемого гиперболическим построением. Именно на такой ограниченный, но существенный механизм управления волнами указывает завершённая вычислительная матрица.

В этом смысле PHB можно рассматривать как кандидата в более широкий класс кривизно-фокальных псевдоповерхностей: поверхностей, где стенка служит не просто оболочкой, а проектируемым оператором, определяющим области сохранения волновой энергии после проверок по модам, источникам и слабому открытию. Представленная матрица — первый полный пассивный электромагнитный скрининг такой поверхности PHB, а не окончательная сертификация устройства.

Существенный итог сравнения заключается в необходимости точно формулировать новизну PHB. Линейный, полиномиальный, сглаженный и эрмитов контрольные профили показывают, что сочетания «поверхность вращения + большое m» уже достаточно для формирования различных вариантов кольцевой локализации. Следовательно, новизна PHB не состоит в существовании любого кольца. Потенциально новый эффект связан с сочетанием унаследованной гиперболической геометрии раструба, закона переменной отрицательной кривизны стенки и возникающей тенденции к межфокальному осевому удержанию. Если такая интерпретация сохранится в будущих исследованиях собственных мод и при проверке независимыми решателями, PHB окажется не просто ещё одним контуром полости, а иным геометрическим принципом управления волнами.

12. Плазменные, радиочастотные, акустические и технические перспективы

В представленную матрицу не включены диэлектрическая проницаемость плазмы, ионизация, столкновения, температура электронов, физика пристеночных слоёв или самосогласованное взаимодействие плазмы с полем. Поэтому она не доказывает удержание плазмы. Технически правдоподобное направление уже: PHB можно испытать как микроволновый или радиочастотный кольцевой плазменный резонатор, в котором кольцевое распределение поля формирует или диагностирует кольцо низкотемпературной плазмы. Для этого потребуется сначала модель холодной плазмы либо диэлектрическая модель Друде, а затем гидродинамическая модель или расчёт методом частиц в ячейках (PIC).

Высокий азимутальный порядок m не обязательно является недостатком. Такие моды востребованы в специализированных резонаторах, микроволновых и миллиметровых полостях, устройствах типа мод шепчущей галереи, полях с орбитальным угловым моментом (OAM), кольцевых антеннах, датчиках и акустических аналогах. Поэтому корректная инженерная постановка — не универсальная замена классических низкомодовых резонаторов, а специализированная кривизно-фокальная геометрия управления волнами с возможными приложениями в кольцевых и модово-селективных системах, ВЧ- и СВЧ-технике, акустике или плазменной диагностике.

13. Перспективы дальнейшей верификации

Следующую программу проверки необходимо разделить на независимые направления. Каждое из них проверяет отдельное физическое утверждение и не должно смешиваться с уже полученным пассивным результатом по CF.

Таблица 12. Направления дальнейшей верификации и соответствующие фальсифицируемые критерии успеха.

Направление	Цель	Необходимый критерий успеха
Исправление исходных полевых данных	Экспорт и построение массивов DFT-поля с корректными координатами	Исходные карты воспроизводят тенденции метрик без артефактов повторяющихся изображений
Независимый решатель	Повторить расчёты PHB и контролей в другом решателе Максвелла	Преимущество PHB по CF сохраняется при смене решателя
Собственные моды свободного затухания и Q	Выполнить длительное затухание и оптимизированное выделение мод Harminv/собственных мод	Получить непустые устойчивые оценки Q и частот
Полная декартова 3D-модель / несколько m	Проверить наклонные и неосесимметричные возмущения	Эффект PHB сохраняется за пределами одного заданного m
Модель Low-J с селекцией усилением	Ввести усиление, потери и конкуренцию мод	Меридиональное семейство Low-J имеет меньший порог, чем конкурирующие моды
Лазерное направление	Учесть усиление, насыщение, вывод, дальнее поле, M^2 и потери на стенках	Продемонстрирована полезная когерентная выходная мода
Оптимизация выходной щели	Оптимизировать R2, форму щели и импеданс	Одновременно достигаются высокий CF и полезный нормированный выход
Плазменное направление	Ввести среду холодной плазмы/Друде, затем гидродинамику/PIC	Кольцевые распределения поглощённой мощности и плотности плазмы формируются вдали от стенок
Оптимизация геометрии	Варьировать a, b, R и закон раструба, сохраняя принцип PHB	Рабочие m и CF изменяются предсказуемым образом
Экспериментальная СВЧ-модель	Построить масштабированную металлическую полость и измерить карты полей	Измеренные карты полей соответствуют прогнозам CF и кольцевой локализации

14. Ограничения и фальсифицируемость

Результаты работы допускают опровержение. Если исходные карты поля с корректными координатами не согласуются с табличными метриками, визуальная интерпретация должна быть пересмотрена. Если независимый решатель устранит преимущество PHB по log10(CF), соответствующее утверждение следует ослабить. Если повышение разрешения либо полное трёхмерное или многомодовое моделирование уничтожит межфокальное удержание, результат PHB необходимо трактовать как артефакт цилиндрической модели. Если расчёты усиления и потерь не выявят пригодных выходных мод, лазерную интерпретацию следует отвергнуть.

Строгие ограничения таковы: не получена надёжная добротность Q; не рассмотрены усиление и порог генерации лазера; отсутствуют плазменная физика, тепловая и материальная модели, полный декартов трёхмерный расчёт, доказательство Low-J и экспериментальное подтверждение. Эти ограничения не отменяют полученный пассивный результат управления волнами, а точно определяют оставшиеся задачи.

15. Заключение

Завершённая цилиндрическая матрица Maxwell/FDTD позволяет рассматривать псевдогиперболоид второго порядка как новый перспективный класс псевдоповерхностей для геометрической волновой инженерии. Решающим результатом является не общая высокоазимутальная кольцевая структура, а более сильное межфокальное удержание выбранной кольцевой энергии по сравнению с негиперболическими контрольными поверхностями. Преимущество PHB зависит от модового порядка, сохраняется при изменении источника, остаётся положительным при проверках устойчивости и не исчезает при слабом кольцевом открытии.

Полученный результат представляет научный интерес и обладает техническим потенциалом, однако его границы строго очерчены. Он не подтверждает готовность лазера, плазменной ловушки, термоядерного устройства, универсального низкомодового резонатора или полости с оптимизированной добротностью Q. Его ценность в выявлении воспроизводимого кривизно-фокального механизма, который заслуживает проверки независимыми решателями, исправления исходных карт поля, выделения собственных мод и Q, исследования усиления с селекцией Low-J, а также прикладных ВЧ-, СВЧ-, акустических, плазменных и лазерных испытаний.

16. Доступность данных и воспроизводимость

Вычислительные материалы, прилагаемые к препринту на ZENODO, включают основной сценарий MEEP, использованный для цилиндрической Maxwell/FDTD-верификации, и полный набор табличных расчётных данных MEEP, извлечённых из завершённого архива PHB_FULL. Численные выводы статьи основаны на этих CSV-таблицах. Рисунки уровня статьи построены на основе табличных метрик и явных геометрических функций. Исходные PNG-карты внутреннего визуализатора не используются как доказательства, поскольку сравнительный PNG-вывод был признан непригодным. Аудит таблиц включён в комплект данных, чтобы любое численное утверждение можно было проверить непосредственно по CSV-файлам.

17. Литература и связанные вычислительные публикации

[1] Хаустов В. И. Геометрическая волновая инженерия: первая воспроизводимая цилиндрическая Maxwell/FDTD-верификация псевдогиперболоида второго порядка — межфокальное кольцевое удержание, сравнение с контрольными поверхностями и отклик кольцевой щели. Препринт, 20 июня 2026 г. DOI: 10.5281/zenodo.20776864. https://doi.org/10.5281/zenodo.20776864

[2] Хаустов В. И. Упрощённая лучеволновая верификация открытого телескопического псевдогиперболоидного резонатора с кольцевой выходной щелью. Препринт, 14 июня 2026 г. DOI: 10.5281/zenodo.20688646. https://doi.org/10.5281/zenodo.20688646

[3] Хаустов В. И. Геометрическая волновая инженерия: индуцированная фокальность, конструктивные семейства псевдоповерхностей, операционные псевдообъёмы и последовательность проверок. Препринт, 6 июня 2026 г. DOI: 10.5281/zenodo.20476327. https://doi.org/10.5281/zenodo.20476327