Геометрическая волновая инженерия

Модо-разрешённое перераспределение потока Пойнтинга в псевдогиперболоиде 2-го порядка

Предварительное полновекторное цилиндрическое FDTD-сравнение на частотах, выбранных для PHB

Хаустов Владимир Игоревич

ORCID: 0009-0007-3657-2309

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

Лицензия: CC BY 4.0

Дата публикации: 17 июля 2026 года

DOI: 10.5281/zenodo.21415319

Научно-технический перевод с английского языка.

Редакция, адаптированная для русскоязычного инженера-исследователя.

Оригинал: Khaustov. V. Geometric Wave Engineering: Mode-Resolved Poynting-Flow Redistribution in an Axisymmetric Pseudohyperboloidal PEC Cavity — A Preliminary Full-Vector Cylindrical-FDTD Comparison at PHB-Selected Frequencies. https://doi.org/10.5281/zenodo.21415319

Аннотация

Геометрическая волновая инженерия ставит вопрос о том, можно ли использовать физическую отражающую границу для реорганизации заданного вынужденного электромагнитного отклика. В этом предварительном исследовании рассматривается введённая автором псевдогиперболоидальная (PHB) PEC-полость второго порядка, полученная вращением радиально смещённой гиперболической образующей. Открытая ветвь воронки при z>a обладает пространственно переменной отрицательной гауссовой кривизной, однако используемый эталон с прямой образующей не изолирует гауссову кривизну от одновременно изменяющихся нормалей поверхности, оптических путей, объёма полости и спектра. Поэтому расчёты устанавливают различия, связанные с PHB-образующей, но не причинное действие кривизны как независимого параметра. Шесть полновекторных цилиндрических FDTD-расчётов сравнивают PHB и согласованный эталон с прямой образующей для трёх заданных пар возбуждения (m,f_m). Внутри каждого сектора к обеим геометриям применяется одна и та же частота, выбранная для PHB; между секторами частота изменяется, поэтому исследование не является чистым сканированием m и не сравнивает независимо оптимизированные резонансы. Получены три различных рисунка вынужденного отклика. Для (m=0,f_0) PHB имеет более сильный внутренний отклик, но более слабую связь с выбранным кольцевым монитором. Для (m=1,f_1) в фиксированном окне со стороны R3 наблюдается локальная инверсия знака осевой компоненты относительно расчёта с прямой образующей (I_z=+0,983 против -0,907), а ненормированный поток монитора M1 больше в 2,84 раза при меньшей полной энергии поля. Для (m=2,f_2) широкая внутренняя кольцевая полоса имеет умеренное среднее обогащение, а отношения модулей компонент перед выходом радиально-доминантны; отношение радиальной и осевой составляющих соответствует угловому proxy около 72,1 градуса, но не направлению единственного среднего вектора. Повышенный сигнал на нижележащей по ходу распространения плоскости является вторичным выборочно измеренным каналом, а не доказанным дальним полем. Поскольку принятая от источников мощность не регистрировалась, приведённые отношения энергии и потоков являются ненормированными характеристиками вынужденного отклика и относительной селекции мониторов, а не эффективностями преобразования. Все признаки получены в одном расчёте при resolution=96 и seed=42 и требуют проверок сходимости, PML, ансамблей источников, частотных спектров, нормировки на входную мощность и преобразования ближнего поля в дальнее. Защищаемый результат состоит в модо-разрешённом перераспределении вынужденного отклика, связанном с PHB-образующей при указанном протоколе.

Ключевые слова: геометрическая волновая инженерия; псевдогиперболоидная PEC-полость; пространственно переменная отрицательная гауссова кривизна; полновекторный FDTD; цилиндрический решатель уравнений Максвелла; локальная инверсия знака осевой компоненты; модо-разрешённый вынужденный отклик; связь с кольцевым монитором; открытый резонатор.

Оглавление

Аннотация 2
Основные научные результаты 4
1. Научный приоритет и границы утверждения 4
2. Связь с соседними направлениями волновой физики 5
3. Геометрия РНВ, отрицательная гауссова кривизна и фокальное отображение 6
3.1. Псевдогиперболоидальная стенка второго порядка 6
3.2. Переменная отрицательная гауссова кривизна 7
3.3. Меридиональный виртуально-фокальный закон и кольцевое продолжение 7
3.4. Постоянная фокальная разность хода и геометрическое фазовое соотношение 7
3.5. Гипотеза модозависимой организации волнового потока 8
4. Полновекторная цилиндрическая FDTD-методология 8
4.1. Определения полей, правила интегрирования и ограничения нормировки 10
4.2. Мониторы и воспроизводимые зоны анализа 11
4.3. Воспроизводимость и архитектура данных 12
5. Результаты для заданных возбуждений (m, f_m) 12
5.1. Глобальная модозависимость 12
5.2. (m=0,f_0): усиленное внутреннее возбуждение при кольцевом переносе 13
5.3. (m=1, f_1): локальная инверсия знака осевой компоненты и связь с выбранным кольцевым монитором 15
5.4. (m=2, f_2): умеренное широкое кольцевое обогащение, радиально-доминантный предвыходной рисунок и вторичный канал нижележащего монитора 17
5.5. Количественное сравнение заданных возбуждений 19
5.6. Каталог отличительных признаков поля РНВ относительно linear 22
6. Межрежимный синтез и ограниченная интерпретация 23
6.1. Результат межрежимного сравнения в заданном протоколе 24
6.2. Роль отрицательного контроля m=0 24
6.3. Исправленная фокальная интерпретация 24
6.4. Ограниченная интерпретация наблюдаемого численного признака 25
7. Научные следствия и кандидатные применения 25
7.1. Модово-разрешённый СВЧ- или терагерцовый демонстратор 25
7.2. Кандидатный модо-обусловленный кольцевой ближнеполевой ответвитель 25
7.3. Дифференциальный модовый и средовой сенсор 26
7.4. Радиальный кольцевой аппликатор для режима m=2 26
7.5. Кандидатная стадия сбора на нижележащей плоскости 26
7.6. Внутриполевой режим m=0 26
7.7. Кандидатное семейство геометрий РНВ с различными заглушками 26
8. Программа подтверждения, аудит артефактов и ограничения 28
8.1. Защита от численных и интерпретационных артефактов 28
8.2. Обязательная численная верификация 28
8.3. Экспериментальная проверка 29
8.4. Численный статус и минимально необходимая верификация 29
8.5. Феноменологический зональный дескриптор и проверяемые гипотезы 29
9. Узкое заявление о приоритете 30
10. Выводы 30
Доступность данных 31
Литература 31

Основные научные результаты

- Результаты являются численными признаками одного расчёта с одним разрешением и одним seed и задают фальсифицируемую программу верификации, но не демонстрируют готовое модоселектирующее устройство.
- Для (m=2,f_2) предвыходное поле радиально-доминантно по модулям компонент; величина 72,1 градуса является угловым proxy, а сигнал на нижележащей плоскости не является результатом для дальнего поля.
- Для (m=1,f_1) фиксированное окно со стороны R3 показывает сильную локальную инверсию знака осевой компоненты относительно согласованного расчёта с прямой образующей и повышенную ненормированную связь с M1, но без нормировки на мощность источников.
- Три расчёта соответствуют заданным парам (m,f_m), причём f_m выбраны по модальному поиску PHB; поэтому межсекторные различия совместно зависят от азимутального порядка и частоты.
- Сравнение измеряет совокупный эффект замены прямой образующей на псевдогиперболоидальную; оно не изолирует гауссову кривизну как независимый причинный параметр.

1. Научный приоритет и границы утверждения

Геометрическая волновая инженерия (ГВИ) формулируется здесь как целенаправленное использование геометрии границы для исследования траекторий волн, пространственной организации поля и каналов утечки. Криволинейные зеркала, неустойчивые резонаторы и деформированные оптические микрополости являются сложившимися направлениями [1–5]. Настоящая конструкция представляет собой введённую автором открытую псевдогиперболоидальную PEC-полость, гладкая ветвь воронки которой обладает пространственно переменной отрицательной гауссовой кривизной и точным меридиональным гиперболическим инвариантом пути. Эталон с прямой образующей изолирует различие между двумя целостными геометриями, но не изолирует гауссову кривизну как независимый причинный параметр. Исследование продолжает авторскую программу геометрии PHB [25,26].

Насколько известно автору, настоящая работа представляет первоначальное полновекторное цилиндрическое FDTD-сравнение при указанной геометрии и протоколе возбуждения между открытой псевдогиперболоидальной PEC-границей и согласованным эталоном с прямой образующей с особым вниманием к локальным различиям знака осевой компоненты и связи с кольцевым монитором в заданных секторах m=0,1,2. Это заявление о научном приоритете протокола сравнения и наблюдений, а не патентное заключение и не утверждение, что отрицательная гауссова кривизна изолирована как единственная причина.

Таблица 1. Уровни утверждений, формулировки и доказательный статус.

Уровень утверждения	**Формулировка**	**Статус**
Точная геометрия	Введённая автором меридиональная PHB-граница; K<0 на открытой гладкой ветви z>a; кольцевые виртуально-фокальные множества	Задано аналитически
Рассчитанное наблюдение	Перераспределение вынужденного отклика, локальные различия знака Sz и отношения	Наблюдается в одном FDTD-

	кольцевого/нижележащего мониторов	расчёте resolution=96, seed=42
Ограниченная интерпретация	Различия связаны с PHB-образующей относительно эталона с прямой образующей	Кривизна не изолирована как независимый параметр
Характеристики устройства	Нормированная на входную мощность эффективность, полоса, конкуренция мод, Q и активная генерация	Не измерялись; будущая работа

2. Связь с соседними направлениями волновой физики

Для ограничения, а не расширения границ новизны выполнен целевой, но не исчерпывающий литературный поиск. Поисковые запросы объединяли термины pseudohyperboloid/hyperboloid, negative Gaussian curvature, microlaser, PEC cavity, Poynting flow, cylindrical FDTD и Cassegrain/dual-reflector antenna. Поиск последний раз обновлён 16 июля 2026 г. и не являлся патентным поиском. Полые волокна отрицательной кривизны, гиперболические решётки и гиперболические фотонные структуры образуют соседние, но физически отличные контексты [20–24]. Микролазеры на псевдосфере с постоянной отрицательной кривизной исследованы экспериментально и численно [32]. Гиперболоидальные и профилированные двойные отражатели известны в антеннах кассегреновского типа [33]. Эти работы относятся к иным поверхностям, ограничениям распространения и архитектурам устройств, но сужают границу новизны настоящего сравнения PHB.

Таблица 2. Связь с соседними направлениями волновой физики.

Соседнее направление	**Где находится «гиперболичность/отрицательная кривизна»**	**Отличие настоящей работы**
Гиперболические метаматериалы	Материальный тензор и дисперсионное соотношение	Здесь не требуется анизотропный метаматериал
Гиперболические решётки	Эффективный неевклидов граф с постоянной кривизной	PHB использует непрерывную физическую отражающую стенку
Полые волокна отрицательной кривизны	Вогнутые поперечные элементы границы сердцевины и антирезонансное ведение	Иная геометрия, направление распространения и механизм
Кассегреновские/гиперболоидальные отражатели	Отдельное вторичное зеркало в многоповерхностном приборе	PHB интегрирует гиперболический закон в границу полости
Деформированные/хаотические микрополости	Деформация границы для лучевого хаоса или направленной утечки	PHB имеет точный меридиональный двухфокусный инвариант

Настоящая программа PHB	Пространственно переменная отрицательная гауссова кривизна материальной стенки	Модо-разрешённые различия вынужденного отклика при заданных возбуждениях (m,f_m)
Микролазеры на псевдосфере постоянной отрицательной кривизны	Распространение ограничено диэлектрической искривлённой поверхностью с постоянной K<0	PHB является открытой объёмной PEC-полостью с переменной K и иным протоколом возбуждения/мониторинга

Этот аудит является научной оценкой новизны, а не исчерпывающим патентным заключением. Во всех заявлениях о приоритете сохраняется формулировка «насколько известно автору».

3. Геометрия PHB, отрицательная гауссова кривизна и фокальное отображение

3.1. Псевдогиперболоидальная стенка второго порядка

Термин «псевдогиперболоидальная полость второго порядка» вводится автором для определённой ниже конструкции и не представляется как общепринятая номенклатура. Пусть z — продольная координата, а r≥0 — цилиндрический радиус. На каждой воронке меридиональная граница является внутренней ветвью радиально смещённой гиперболы:

$$\frac{z^2}{a^2} - \frac{(r-R)^2}{b^2} = 1, \quad |z| \geq a \quad (1)$$

$$r(z) = R - b\sqrt{\left(\frac{|z|}{a}\right)^2 - 1}. \quad (2)$$

Для эталонной геометрии a=b=0,5, R=2, R3=0,10, c=√(a²+b²)=0.707107, а воронка достигает оси при L=a√[1+(R/b)²]=2.061553. Физический левый элемент R3 непрерывно соединён с устьем левой воронки. Над правым устьем отсутствует правый PEC-экран; область r>R справа является открытым воздухом.

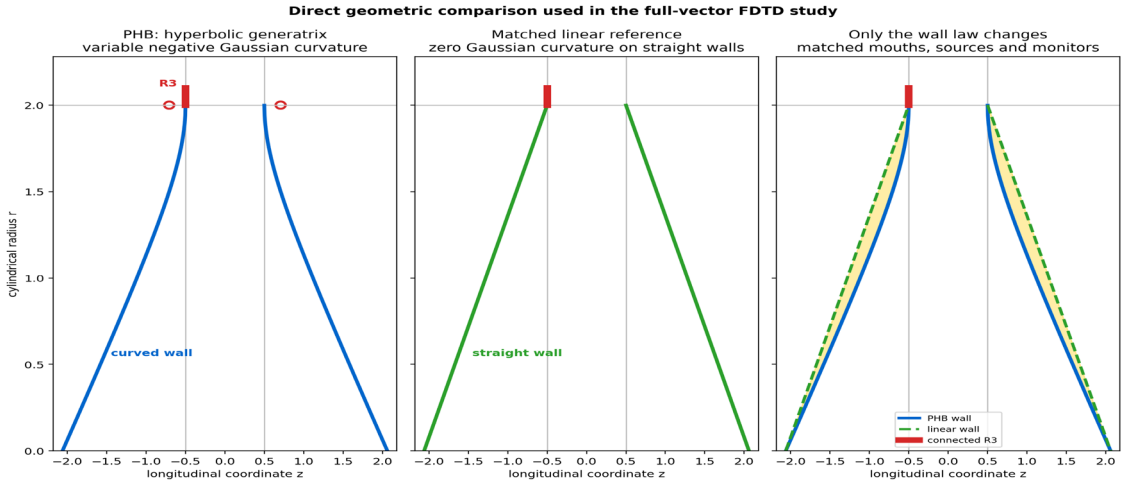

Рисунок 1. Прямое сравнение физических границ, использованных в полновекторном исследовании. PHB и эталон с прямой образующей имеют одинаковые устья, осевую длину, непрерывно соединённый левый элемент R3, источники и мониторы; изменяется только закон стенки. Все карты используют единственное меридиональное сечение: z по горизонтали, r по вертикали.

3.2. Переменная отрицательная гауссова кривизна

Для поверхности вращения X(z,φ)=(r(z)cosφ,r(z)sinφ,z) гауссова кривизна на гладком участке воронки равна

$$K(z) = -\frac{r''(z)}{r(z)\left[1+\left(r'(z)\right)^2\right]^2}. \quad (3)$$

При z>a величина r″(z)=ab/(z²−a²)³′²>0, а r(z)>0; следовательно, K(z)<0 на открытой ветви воронки. В параметризации r(z) производная r′ неограниченно возрастает при приближении z к a, поэтому гладкость утверждается только для z>a. Окрестность устья может быть описана альтернативной регулярной параметризацией, тогда как PEC-соединение конечной толщины рассматривается отдельно как кусочно заданная численная конструкция. Поскольку r, r′ и r″ меняются вдоль ветви, K пространственно переменна.

3.3. Меридиональный виртуально-фокальный закон и кольцевое продолжение

В меридиональной плоскости гипербола имеет внешние фокусы F−=(−c,R) и F+=(+c,R). Её нормаль делит пополам фокальные направления. Луч, согласованный с одним внешним фокусом, зеркально отражается в направлении, обратное продолжение которого проходит через противоположный фокус. Физический луч не проходит через внешний фокус. Вращение преобразует точечные фокусы в два соосных виртуальных фокальных кольца при z=±c, r=R. Эти кольца задают геометрически выделенный ориентир, но не являются PEC-объектами и заранее не принимаются за энергетические максимумы.

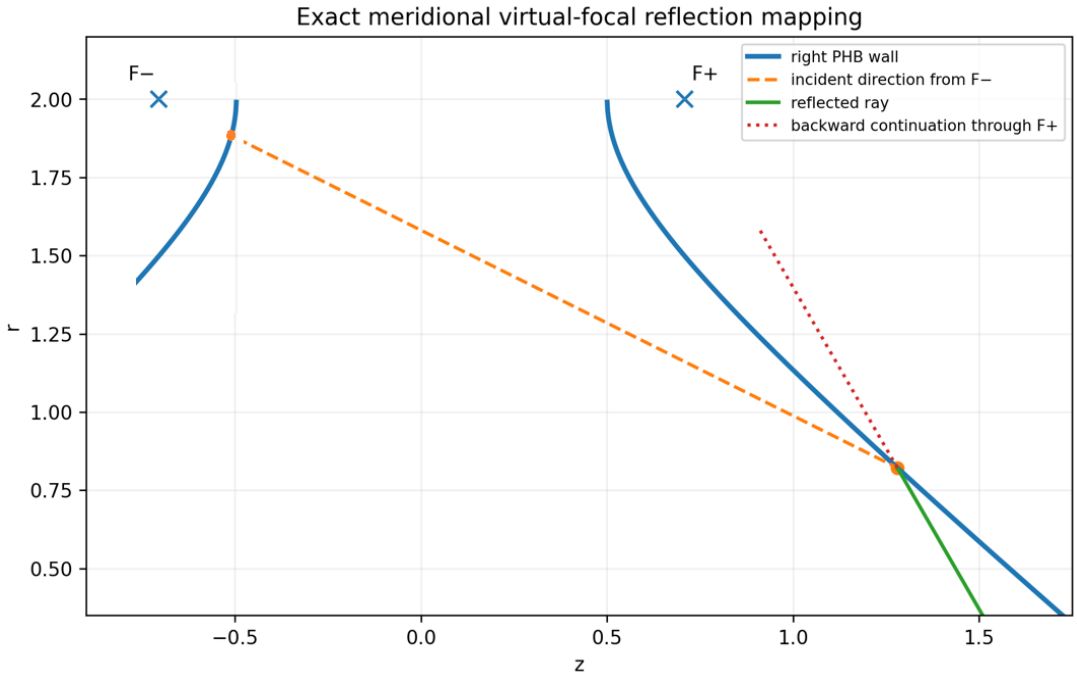

Рисунок 2. Точное меридиональное виртуально-фокальное отображение гиперболической образующей.

3.4. Постоянная фокальная разность хода и геометрическое фазовое соотношение

Для любой точки P меридиональной гиперболы абсолютная разность расстояний до двух фокусов является инвариантом. Поэтому стенка PHB несёт заданное границей оптическое соотношение путей, а не представляет собой произвольный криволинейный профиль.

$$||P - F_-| - |P - F_+|| = 2a. \quad (4)$$

Для монохроматического поля с длиной волны λ соответствующая геометрическая разность фаз равна

$$\Delta\varphi_{geom} = \frac{2\pi}{\lambda}(2a) = \frac{4\pi a}{\lambda}. \quad (5)$$

Это геометрический инвариант разности путей. Он может вносить вклад в фазовую организацию, но сам по себе не устанавливает когерентное модовое сложение, поскольку в полную задачу Максвелла входят векторная фаза отражения, поляризация, дифракция и зависящая от траектории фаза.

3.5. Гипотеза модозависимой организации волнового потока

Рабочая гипотеза состоит в том, что гиперболический инвариант путей, распределение нормалей поверхности и заданный азимутальный сектор совместно влияют на рисунок вынужденного отклика. Текущие данные не разделяют эти факторы и не дают подогнанного либо выведенного модового закона. Поэтому настоящий подраздел является только феноменологической мотивацией; количественные гипотезы и необходимые проверки сформулированы в §8.

4. Полновекторная цилиндрическая FDTD-методология

Расчёты выполнены в MEEP в цилиндрических координатах с заданной зависимостью exp(imφ). В осесимметричной структуре каждое целое m решается как отдельный инвариантный сектор; отдельные запуски поэтому демонстрируют модо-разрешённые вынужденные отклики, а не конкуренцию, преобразование или селекцию одновременно возбуждённых мод [27,28]. В каждом запуске эволюционируют Er, Eφ, Ez, Hr, Hφ и Hz. Использованы PEC-стенки и PML-окончания. Электромагнитная, FDTD, harmonic-inversion и резонаторная методическая основа соответствует стандартным источникам [12–19].

Для каждого m проверочная частота f_m выбиралась по модальному поиску PHB и затем без изменения задавалась эталону с прямой образующей. Следовательно, каждая пара PHB/linear является сравнением на одной частоте, выбранной для PHB. Три сектора используют разные частоты, причём f_2 примерно на 2,2% выше f_0 и f_1; поэтому межсекторные сравнения относятся к парам (m,f_m), а не только к m. Такой протокол может давать PHB преимущество относительно независимо оптимизированного прямолинейного резонатора. Требуются полные спектры и сравнение каждой геометрии на её собственной резонансной частоте.

Таблица 3. Конфигурация полновекторного FDTD и численные правила.

Параметр	Значение / правило
Геометрия	a=0,5, b=0,5, R=2, R1=R2=R4=0, R3=0,10
Выходное кольцо	r=2,00…2,10; диагностический M1 непосредственно снаружи правого устья
Стенка / разрешение	Толщина PEC 0,05; resolution 96; 4,8 ячейки поперёк стенки
R3 и ширина выхода	0,10; 9,6 ячейки
PML	1,2 длины волны; около 19 ячеек
Источники	24 точечных источника со случайными фазами; Ez, Er, Eφ; seed 42

Моды	m=0,1,2
Длительность	900 нормированных единиц времени после выключения источников
Ориентация карт	Массивы хранятся в порядке (r,z); строятся непосредственно с z по горизонтали и r по вертикали; транспонирование не применяется
Тип сравнения	Сравнение PHB/linear на одной частоте f_m, выбранной для PHB; не независимо оптимизированные резонансы
Межсекторная область	Три заданные пары (m,f_m); не чистое сканирование только m
Нормировка на мощность источников	В V43.2 отсутствует; отношения энергии и потоков ненормированы
Численный ансамбль	Одно разрешение (96), один seed (42), одна толщина PML и один набор окон анализа
Единицы	Все длины выражены в выбранной единице длины MEEP; c=1, частота — в обратных единицах длины, время — в единицах длина/c.
Обработка цилиндрической оси	accurate_fields_near_cylorigin=True. Courant=0,5 для m=0,1 и 0,357143 для m=2 по правилу min[0,5,1/(|m|+0,8)].
Конвенция комплексных полей	exp(−iωt) для формул фазоров в §4.1.

Таблица 4. Заданные пары возбуждения (m, f_m) и электрические размеры; f_m выбрана по модальному поиску PHB.

m	Частота f (1/единица длины)	Длина волны λ (единица длины)	**a/λ**
0	6.05006	0.16529	3.025
1	6.05295	0.16521	3.026
2	6.18373	0.16172	3.092

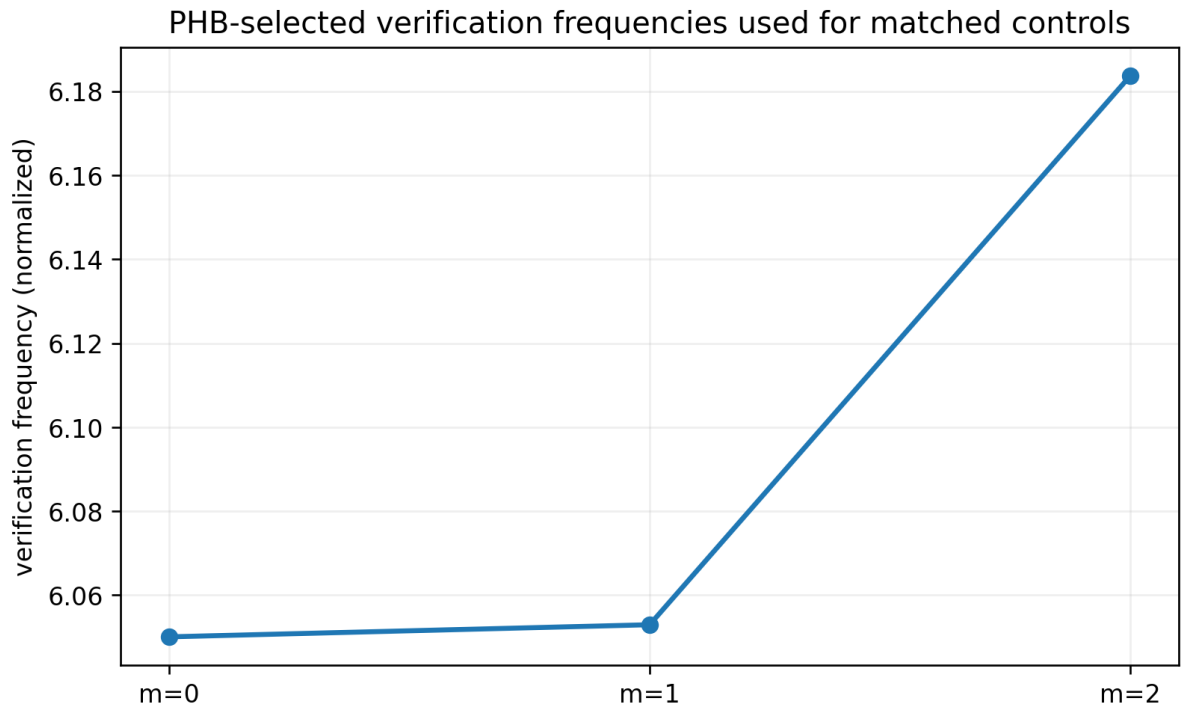

Рисунок 3. Выбранные по PHB проверочные частоты, без изменения использованные для прямолинейных эталонов.

4.1. Определения полей, правила интегрирования и ограничения нормировки

Для комплексных фазоров с временной конвенцией exp(−iωt) в недисперсионном вакууме усреднённые по циклу плотность энергии и вектор Пойнтинга определяются как

$$u = \frac{1}{4}(\varepsilon \mid \mathbf{E} \mid^2 + \mu \mid \mathbf{H} \mid^2), \quad \langle \mathbf{S} \rangle = \frac{1}{2}\mathrm{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}*). \quad (6)$$

Объёмные интегралы по массивам полного поля используют dV=2πr dr dz. Общие множители 2π, dr и dz сокращаются в сообщаемых долях, поэтому пользовательская постобработка экспортированных массивов сохраняет только радиальный вес r. Встроенные мониторы потока MEEP уже интегрируют кольцевую цилиндрическую меру и использованы без дополнительного множителя 2πr. Для BOUNDARY_LEFT, BOUNDARY_RIGHT и BOUNDARY_TOP наружные нормали направлены соответственно по −z, +z и +r, а P_{out} обозначает их знаковую сумму наружных потоков.

$$I_z(\Omega) = \frac{\int_\Omega S_z \, \mathrm{dV}}{\int_\Omega |S_z| \, \mathrm{dV}}. \quad (7)$$

Координаты, амплитуды и фазы источников одинаковы, но принятая системой мощность источников не записывалась. Равные амплитуды токов не гарантируют одинаковой работы источников в различных полостях. Поэтому отношения полной энергии, пиковой плотности и потоков мониторов являются ненормированными величинами вынужденного отклика, а не эффективностями преобразования энергии. В будущих расчётах необходимо записывать работу источников и применять нормировку на мощность источников либо на отдельный опорный расчёт [31]. При используемой временной конвенции комплексных амплитуд exp(−iωt) требуются следующие величины:

$$P_{src} = -\frac{1}{2}\mathrm{Re}\int \mathbf{J}* \cdot \mathbf{E} \, \mathrm{dV}$$
$$\eta_{M1} = \frac{P_{M1}}{P_{src}}, \quad \eta_{down} = \frac{P_{down}}{P_{src}}, \quad \tau_U = \frac{U}{P_{src}}. \quad (8)$$

Величина $\tau_U = \frac{U}{P_{src}}$ имеет размерность времени и являлась бы эффективным отношением энергии к принятой мощности, или proxy времени пребывания, а не безразмерной энергетической эффективностью. Отношение потока M1 к потоку через всё правое устье для PHB, делённое на соответствующее отношение эталона с прямой образующей, сообщается только как относительное отношение селекции монитора, а не как эффективность.

Используемые далее термины имеют операционное определение. «Энергия безопасного вакуума» означает интеграл u по ячейкам, выбранным архивной маской vacuum-safe, которая исключает PEC-ячейки и заранее заданный пристеночный буфер. «Физическое кольцо» — это интервал M1 r=2,00–2,10 непосредственно снаружи правого устья. RIGHT_FAR сохраняется как имя переменной архива, но описывается как монитор на нижележащей плоскости; статус дальнего поля не подразумевается. Категориальная метка «PHB-вправо/прямой-влево» означает $S_z>0$ в PHB-расчёте и $S_z<0$ в прямолинейном расчёте в одной и той же точке (r,z). Она не обозначает траекторию или путь деформации.

Для осевого монитора M1 сообщаемый полоидальный угол использует только радиальную и положительную наружную осевую компоненты. Точки с неположительным наружным S_z имеют нулевой вес положительной мощности. Точное архивное определение:

$$\theta_{pol}(r) = \operatorname{atan2}(|S_r|, S_z), \quad S_z > 0$$
$$w(r) = \max(S_z, 0)\ \mathrm{r\,dr} \qquad (9)$$

Величина θ_{95} является взвешенным 95-м процентилем θ_{pol} с весом $w(r) = \max(S_z(r), 0)\ \mathrm{r\,dr}$ на M1. Это полоидальный угол, содержащий 95% положительной наружной мощности; он не включает S_φ и не является трёхмерной расходимостью дальнего поля.

Для каждой заранее заданной области Ω архивные коэффициент обогащения и отношение обогащения PHB/прямолинейного эталона определены как:

$$G_\Omega = \frac{\frac{U_\Omega}{V_\Omega}}{\frac{U_{safe}}{V_{safe}}}, \quad \Gamma_\Omega = \frac{{G_\Omega}^{PHB}}{{G_\Omega}^{straight}}. \qquad (10)$$

Здесь U_Ω и V_Ω вычисляются с цилиндрической мерой объёма, а safe обозначает архивную маску безопасного вакуума.

Азимутальная доля модулей компонент на M1, используемая в феноменологическом дескрипторе, определяется как:

$$\eta_\varphi(M1) = \frac{\int_{M1} |S_\varphi|\ \mathrm{r\,dr}}{\int_{M1} (|S_r| + |S_\varphi| + |S_z|)\ \mathrm{r\,dr}}. \qquad (11)$$

Для эталона с прямой образующей и PHB соответственно $\eta_\varphi(M1)$ равна 4,40% и 5,58% для $(\mathrm{m} = 0, f_0)$, 18,65% и 0,93% для $(\mathrm{m} = 1, f_1)$, а также 0,75% и 20,99% для $(\mathrm{m} = 2, f_2)$.

4.2. Мониторы и воспроизводимые зоны анализа

M1 интегрирует физическое кольцо r=2,00…2,10 у правого устья. RIGHT_MOUTH_FULL охватывает всю плоскость правого устья. RIGHT_NEAR и RIGHT_FAR являются нижележащими по ходу распространения плоскостными мониторами, регистрирующими распространившееся поле, а соответствующие левые мониторы измеряют выбранную часть поля с противоположной стороны. BOUNDARY_LEFT, BOUNDARY_RIGHT и BOUNDARY_TOP образуют баланс наружного потока непосредственно перед PML. Объёмные интегралы используют цилиндрический вес 2πr dr dz. Основные заранее

заданные зоны включают ось, центральный внутренний промежуток, тонкую полосу r≈R, межфокусный кольцевой коридор, левый и правый кольцевые каналы, внутренние объёмы воронок и область вне номинального радиуса.

Для анализа инверсии знака особенно важны два пользовательских окна: стартовая зона со стороны R3 $1{,}90 \le r \le 2{,}10$, $-0{,}47 \le z \le -0{,}20$ и правая предвыходная зона $1{,}90 \le r \le 2{,}10$, $0{,}20 \le z \le 0{,}47$. Их границы фиксированы до сравнения PHB и linear и одинаково применяются ко всем модам.

4.3. Воспроизводимость и архитектура данных

Полный архив содержит шесть завершённых случаев: PHB и эталоны с прямой образующей для m=0,1,2. Каждый случай включает конфигурацию расчёта, координаты и фазы источников, геометрические и материальные маски, полные комплексные массивы поля, усреднённую по циклу энергию и компоненты Пойнтинга, профили мониторов, сводки заранее заданных объёмных зон и журналы выполнения. Порядок хранения массивов явно проверен как (r,z); все карты строятся в единственной меридиональной ориентации: z по горизонтали, r по вертикали. Прилагаемый исходный скрипт воспроизводит геометрию, возбуждение, мониторы и структуру результатов.

5. Результаты для заданных возбуждений (m, f_m)

Все приведённые ниже сравнения PHB/linear выполняются на одной частоте внутри заданной пары (m,f_m). Сравнения между m=0,1,2 совместно включают изменения m и f_m и далее называются межрежимными, а не чисто модовыми эффектами.

5.1. Глобальная модозависимость

Таблица 5. Сравнение полной энергии и пиковой плотности.

m	Linear total U (единицы моделирования)	PHB total U (единицы моделирования)	Отношение	Linear peak u (единицы моделирования)	PHB peak u (единицы моделирования)	Отношение
0	1.012e+09	2.098e+09	2.074	1.839e+06	5.679e+06	3.088
1	3.416e+09	1.020e+09	0.299	8.200e+06	1.639e+06	0.200
2	6.940e+08	4.672e+08	0.673	3.947e+05	5.970e+05	1.512

Глобальная амплитуда вынужденного отклика не изменяется монотонно между расчётами PHB и геометрии с прямой образующей. Для ($m=0,f_0$) PHB больше, для ($m=1,f_1$) меньше, а для ($m=2,f_2$) занимает промежуточное положение. Поскольку принятая мощность источников неизвестна, эти отношения нельзя интерпретировать как эффективности. Тем не менее они показывают, что различие монитора M1 при m=1 не является тривиальным следствием большего запасённого поля в PHB-расчёте.

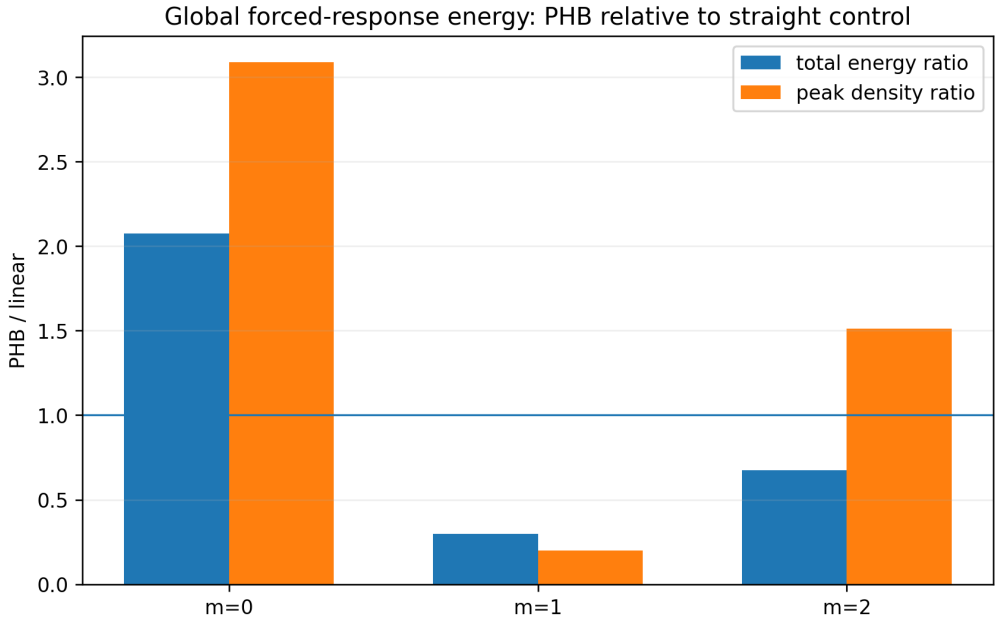

Рисунок 4. Отношения полной энергии вынужденного отклика и пиковой плотности энергии PHB к прямолинейному эталону.

5.2. (m=0,f₀): усиленное внутреннее возбуждение при кольцевом переносе

Для m=0 PHB содержит в 2,07 раза большую полную энергию безопасного вакуума и в 3,09 раза большую пиковую плотность. Глобальные максимумы остаются на оси. Доля энергии осевой зоны PHB равна 21,58% против 18,34% у прямолинейного контроля, а внутренние объёмы обеих воронок сильно возбуждены. Однако тонкая зона r≈R и межфокусный кольцевой коридор подавлены: отношения обогащения PHB/linear равны 0,661 и 0,607. Поток M1 уменьшается до 43,6% линейного значения, а нормированная селекция M1 относительно правого устья ослабевает в 2,74 раза.

Поле направлений даёт важный отрицательный контроль. В левом стартовом окне со стороны R3 в расчёте PHB 25,51% |S_z| направлено к +z, тогда как в расчёте с прямой образующей — 80,65%. Следовательно, заданный отклик PHB для (m=0,f₀) не показывает смещения осевой компоненты вправо со стороны R3, наблюдаемого для (m=1,f₁). Это сравнение свидетельствует против постоянного одностороннего смещения, обусловленного только асимметричной границей R3, но не изолирует m от сопутствующего изменения f_m.

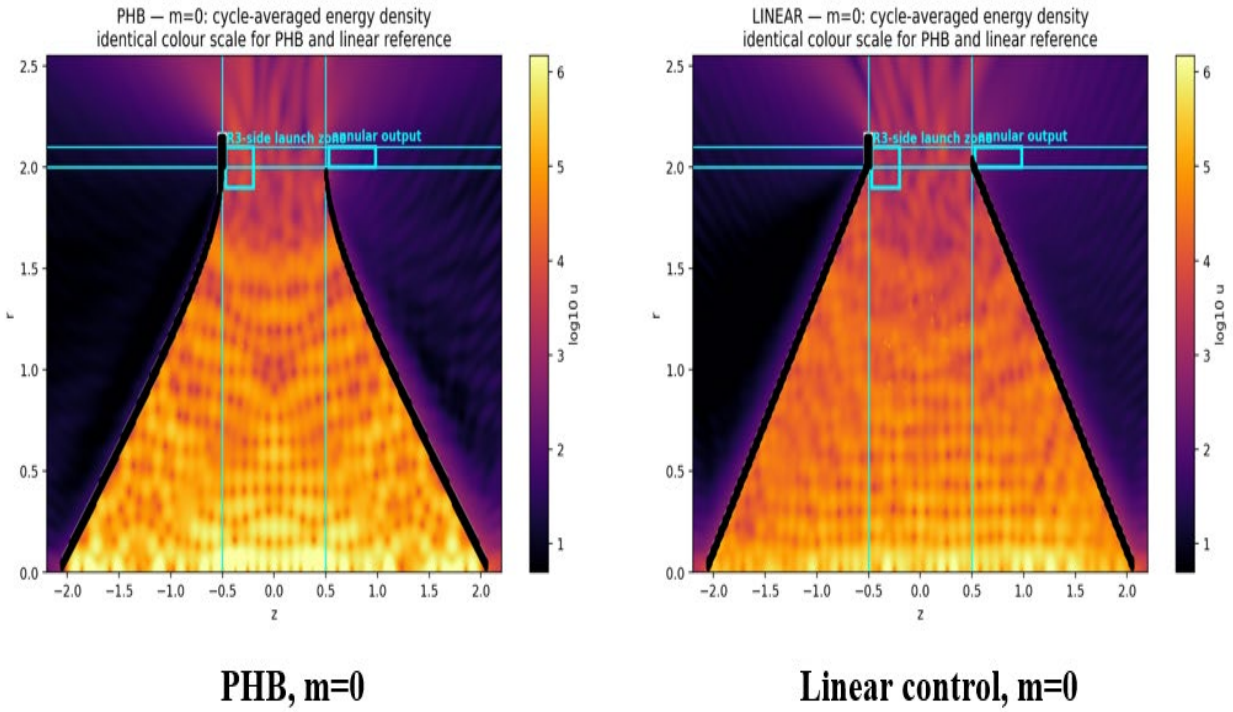

Рисунок 5. Карты плотности энергии для m=0 с одинаковыми осями и общей цветовой шкалой пары. Стенки показаны непрозрачными чёрными PEC-областями.

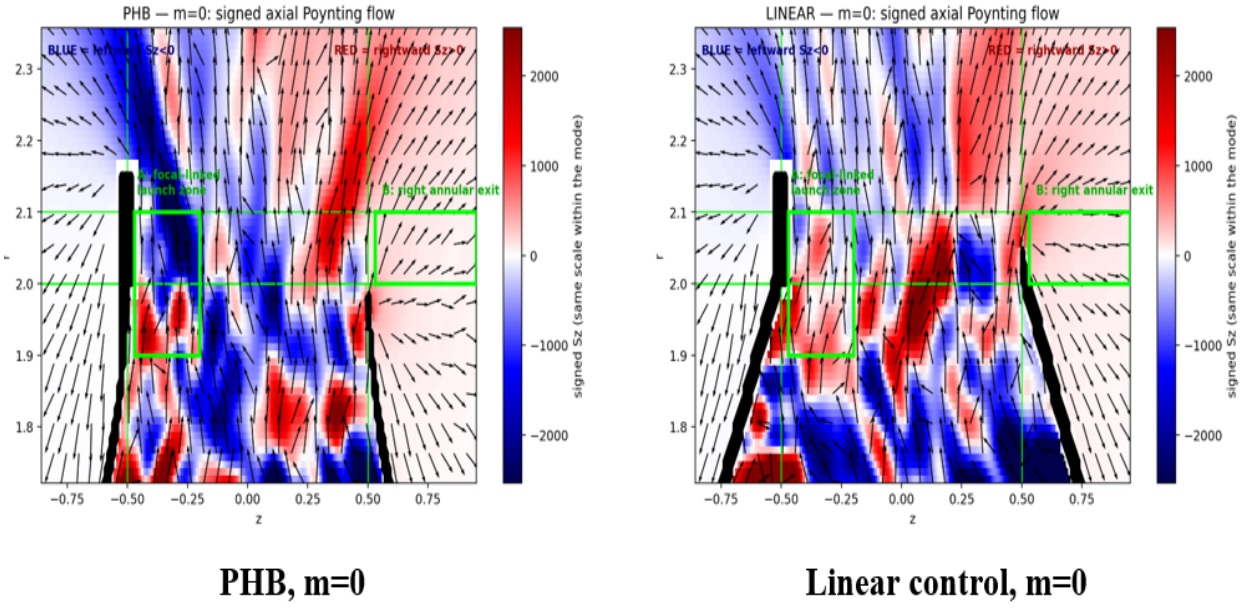

Рисунок 6. Знаковый осевой поток Пойнтинга для m=0 в одном и том же фокально-кольцевом окне и на единой цветовой шкале. Непрозрачные чёрные области являются PEC-стенками; красный цвет означает Sz>0 вправо, синий — Sz<0 влево. Выделенные зоны запуска и выхода позволяют непосредственно видеть различие PHB и линейного эталона.

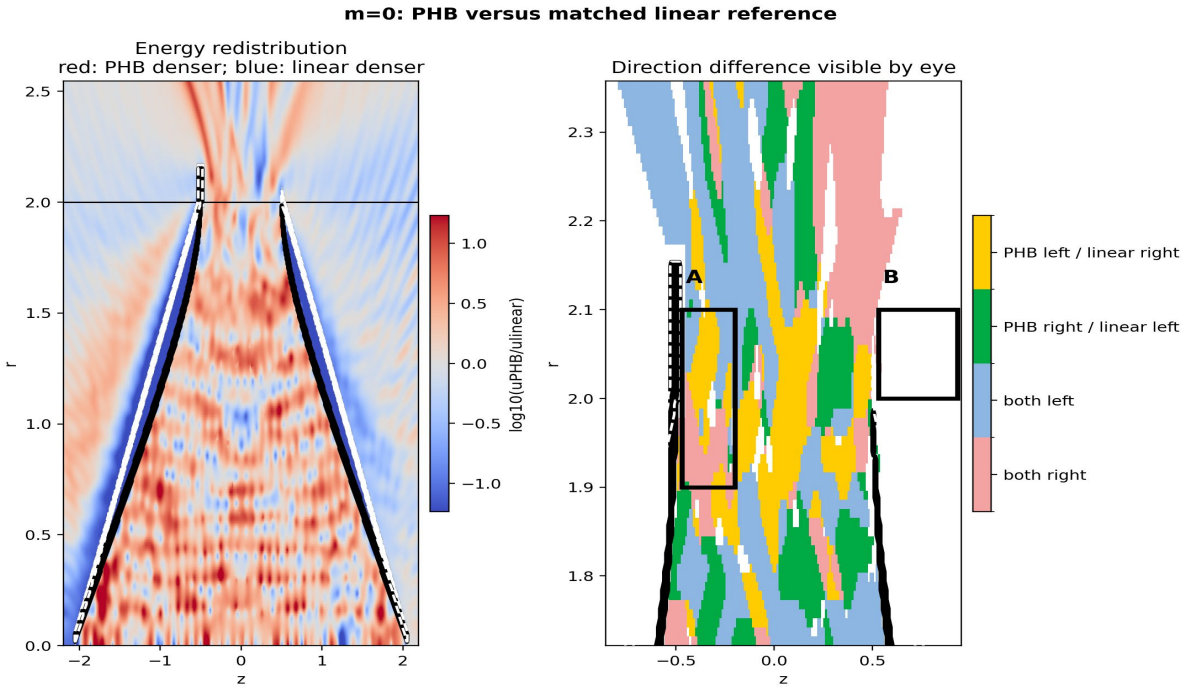

Рисунок 7. Прямое различие PHB и линейного эталона для m=0. Левая панель показывает отношение плотностей энергии. Правая панель классифицирует знак Sz в обеих геометриях; зелёным обозначен перенос PHB вправо / linear влево, жёлтым — PHB влево / linear вправо.

5.3. (m=1, f_1): локальная инверсия знака осевой компоненты и связь с выбранным кольцевым монитором

Для заданного возбуждения (m=1,f_1) получен наиболее сильный ближнеполевой транспортный признак. Хотя полная энергия PHB составляет только 29,9% значения прямолинейного эталона, а глобальный пик — 20,0%, ненормированный кольцевой поток M1 в PHB больше в 2,84 раза. Доля M1 относительно полного правого устья равна 12,58% для PHB и 2,36% для эталона, поэтому относительное отношение селекции монитора равно 5,33. При делении M1 на поток через замкнутую внешнюю границу соответствующее относительное отношение равно 4,44. Эти величины не являются эффективностями преобразования, поскольку принятая от источников мощность не регистрировалась. Доля правой границы возрастает с 6,38% до 8,25%, а отношение сигналов правого и левого нижележащих мониторов увеличивается с 2,15 до 3,15.

Определяющий локальный эффект возникает с внутренней стороны R3. В фиксированном стартовом окне PHB направляет 99,17% |Sz| к +z и имеет индекс осевого смещения +0,983. Согласованный прямолинейный контроль направляет к +z только 4,63% и имеет индекс −0,907. В обеих геометриях металл непрозрачен: энергия не проходит через PEC-стенку. Сравниваются вакуумные поля с внутренней стороны стенки. Следовательно, замена прямой образующей образующей PHB с отрицательной кривизной инвертирует локальное направление осевого переноса.

Эта же мода демонстрирует предпочтение кольцевых областей даже после нормировки на более слабое глобальное поле. По сравнению с linear обогащение PHB больше в 1,61 раза в тонкой зоне r≈R, в 2,03 раза в межфокусном кольцевом коридоре, в 2,74 раза в левом кольцевом канале, в 1,69 раза в правом канале и в 2,17 раза вне номинального радиуса. В правой внешней фокальной полосе отношение обогащений достигает 12,62, однако абсолютная доля энергии остаётся всего 0,009%; это направленная асимметрия, а не доминирующий накопитель энергии в фокальном кольце.

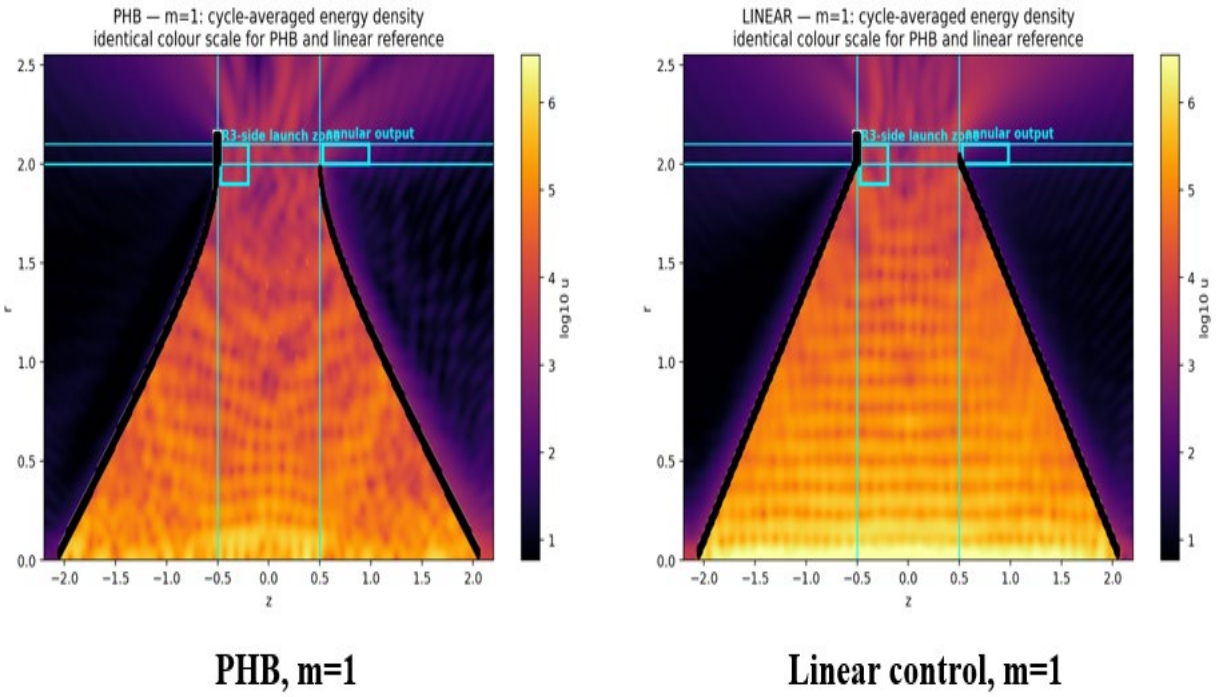

Рисунок 8. Карты плотности энергии для m=1. PHB имеет меньшую глобальную амплитуду, но большую относительную заселённость выбранных кольцевых зон.

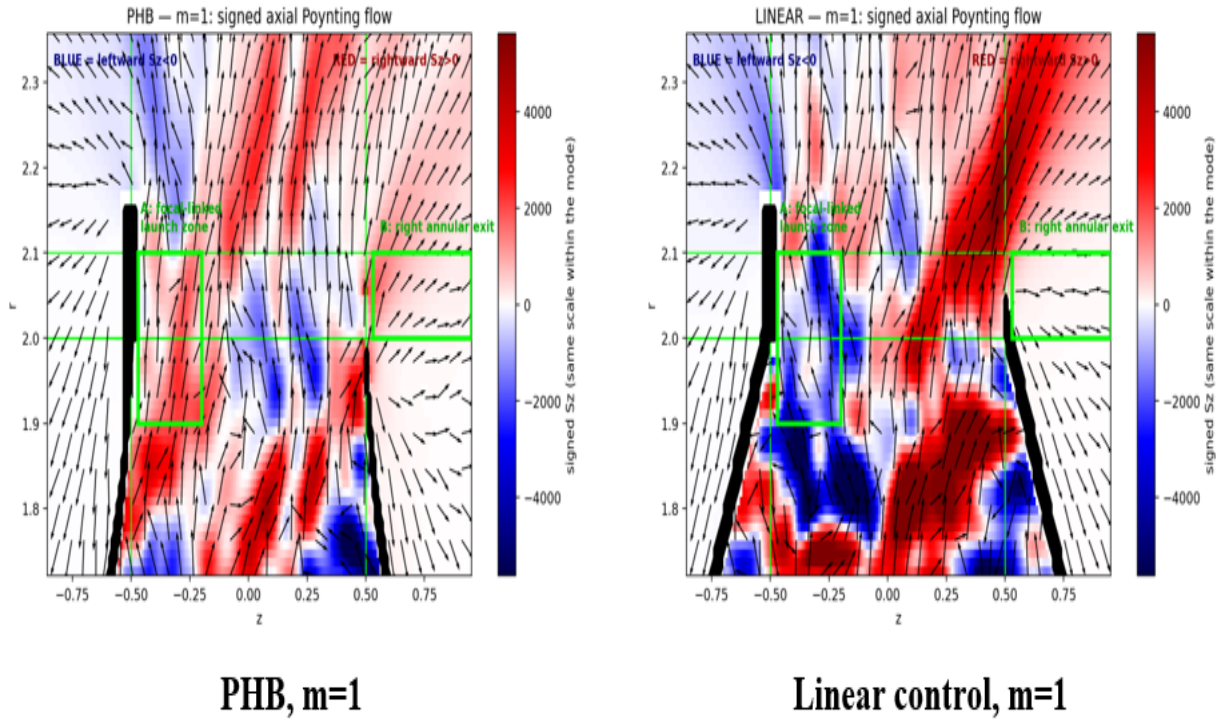

Рисунок 9. Знаковый осевой поток Пойнтинга для m=1 в PHB и согласованном эталоне с прямой образующей. Одинаковые оси и цветовые пределы, непрозрачные PEC-стенки, стрелки направлений и одни и те же заранее заданные зоны непосредственно показывают различие знака осевой компоненты PHB/эталон около R3.

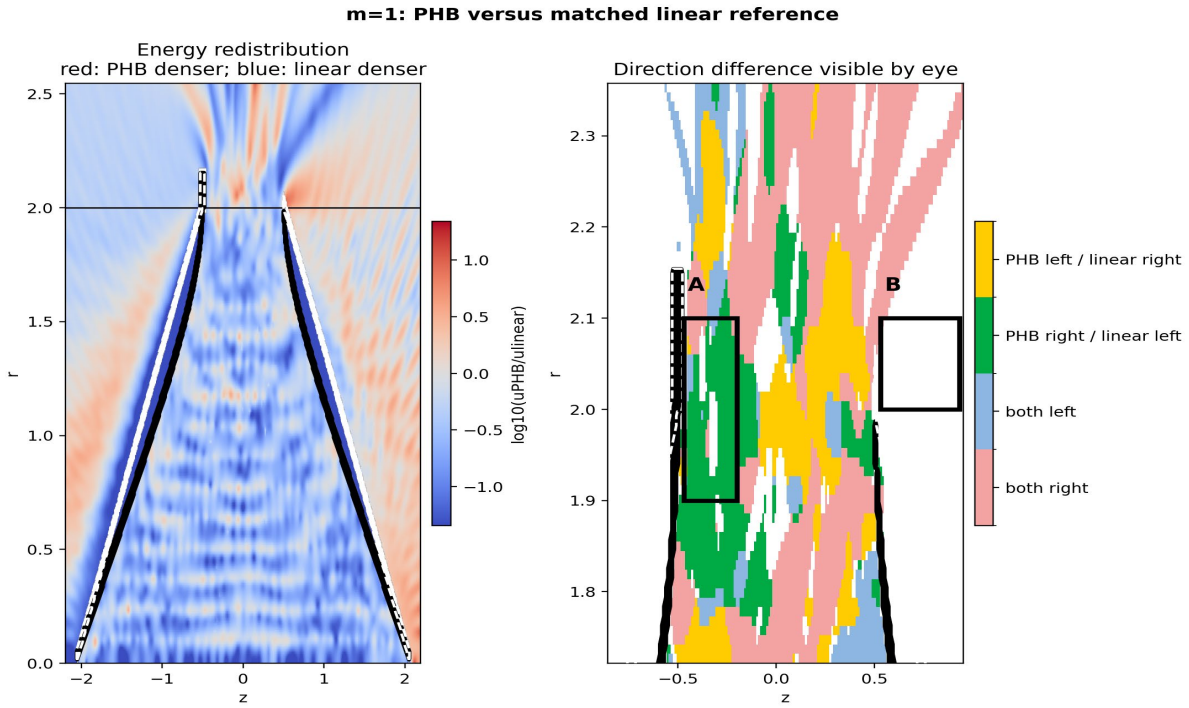

Рисунок 10. Прямое различие PHB и эталона с прямой образующей для ($m=1, f_1$). Панель отношения энергий показывает области большей относительной заселённости PHB при более слабом глобальном отклике. В категориальной панели «PHB вправо / эталон влево» означает $S_z>0$ в PHB и $S_z<0$ в эталонном расчёте в одной и той же точке; это не обозначает непрерывную траекторию между двумя геометриями.

5.4. (m=2, f_2): умеренное широкое кольцевое обогащение, радиально-доминантный предвыходной рисунок и вторичный канал нижележащего монитора

m=2 является ключевым случаем для различения знакового индекса осевой компоненты и направления полного вектора Пойнтинга. Полная энергия PHB составляет 67,3% эталонной, но пиковая плотность в 1,51 раза выше. В заранее заданной широкой внутренней зоне $1{,}9 \le r \le 2{,}1$ и $|z| \le 0{,}5$ обогащение PHB равно $G=1{,}148$ против 0,830 у прямолинейного эталона. Это лишь превышение средней плотности PHB на 14,8%, а не яркий фокальный кольцевой максимум. Узкие левая и правая внешние фокальные полосы содержат соответственно только 0,000278% и 0,005746% энергии PHB; буквальное накопление энергии во внешних фокальных плоскостях настоящими данными исключается.

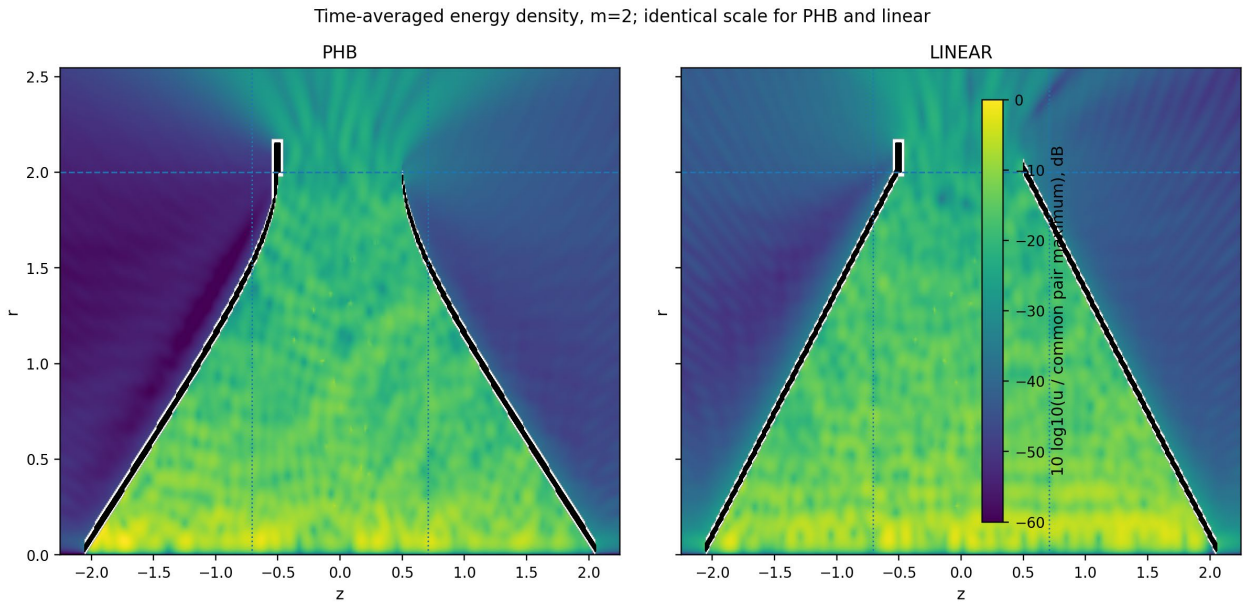

Рисунок 11. Усреднённая по времени плотность энергии для m=2 на одинаковой шкале PHB/linear. Глобальные максимумы остаются около оси или внутри воронок. Унаследованные фокальные плоскости и линия r=R являются геометрическими ориентирами, а не энергетическими максимумами.

В фиксированном правом предвыходном окне знаковый индекс равен I_z=+0,871 для PHB и −0,777 для прямолинейного эталона. Доли модулей компонент равны $|S_r|$=61,3%, |S_φ|=18,9% и $|S_z|$=19,8%. Отношение радиальной и осевой величин даёт агрегированный меридиональный угловой proxy по модулям компонент 72,1° относительно +z; это не направление однозначно определённого среднего вектора Пойнтинга, поскольку отдельные интегралы абсолютных значений компонент устраняют информацию о знаковой компенсации.

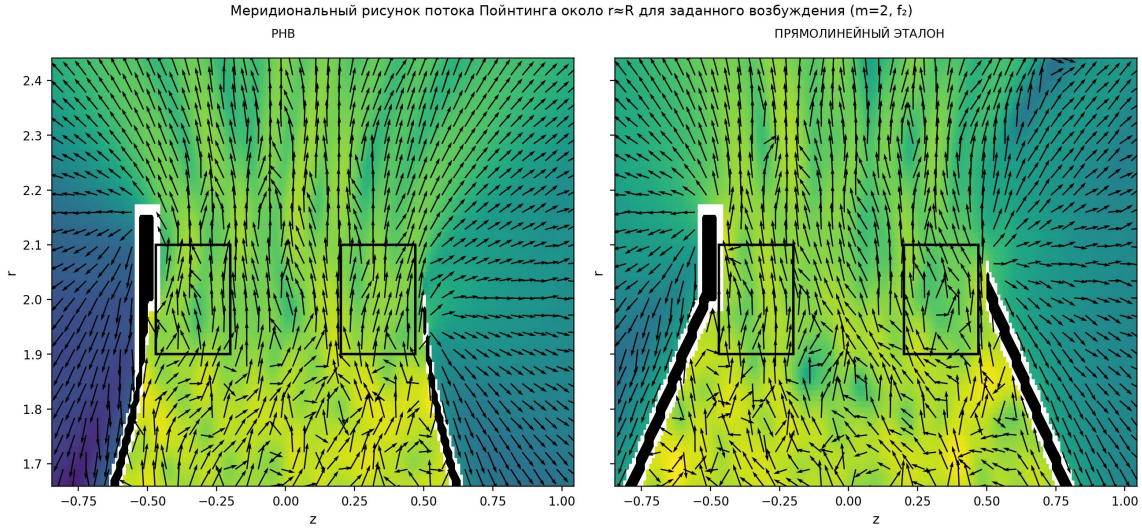

Рисунок 12. Меридиональный рисунок потока Пойнтинга около r≈R для заданного возбуждения (m=2,f_2). Заранее определённые окна со стороны R3 и перед правым выходом показывают различающиеся знаковые и направленные рисунки компонент в PHB и прямолинейном эталоне. Модули предвыходных компонент PHB являются радиально-доминантными, а не образуют горизонтальный осевой пучок.

Поток M1 составляет только 0,516 от эталона, тогда как нижележащий по ходу распространения поток в 1,90 раза больше. Следовательно, два монитора отбирают разные части эволюционирующего широкого поля. Сразу за устьем прошедшая часть становится более осевой, но представляет небольшую долю общего отклика. Решающее значение имеет баланс замкнутой границы: 93,97% потока PHB m=2 проходит через радиальную/верхнюю границу и только 4,73% — через правую. Усиленный нижележащий по ходу распространения сигнал является вторичным осевым каналом внутри глобально радиально-доминантной картины утечки.

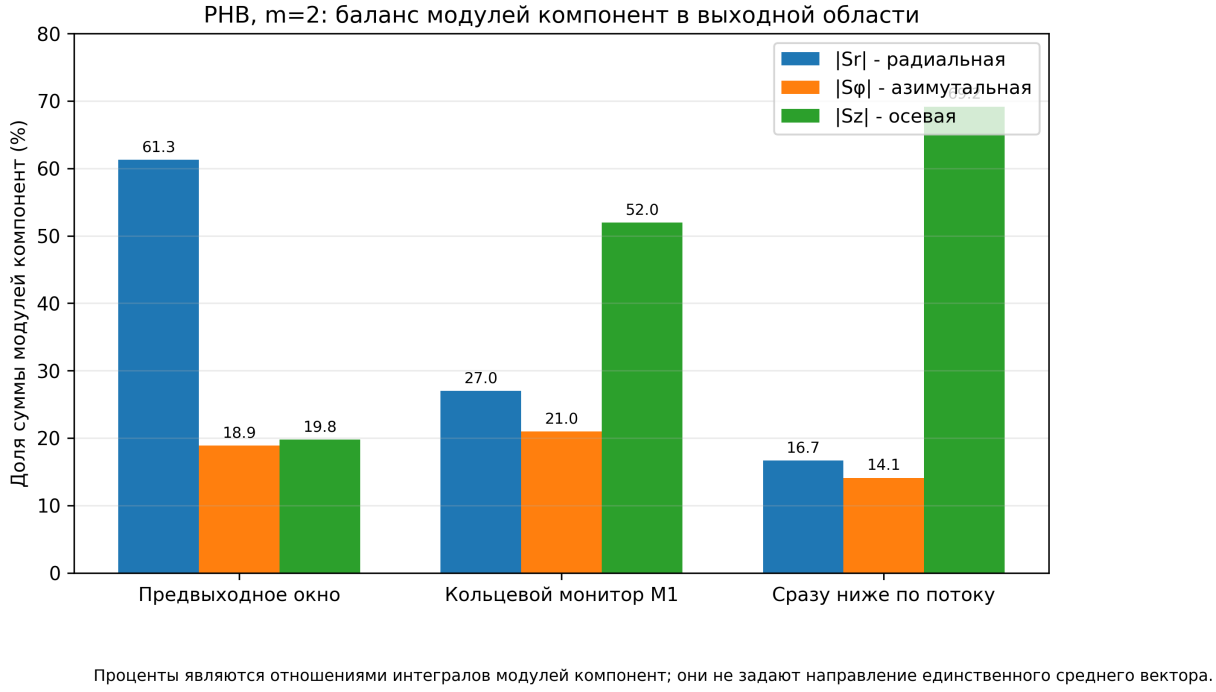

Рисунок 13. Баланс модулей компонент PHB при (m=2,f_2). Проценты являются отношениями интегралов $|S_r|$, $|S_\varphi|$ и $|S_z|$ и поэтому не могут быть объединены в направление однозначно определённого среднего вектора Пойнтинга. Отношение радиальной и осевой составляющих в предвыходном окне даёт агрегированный меридиональный угловой proxy около 72,1°, а не физический угол среднего вектора.

5.5. Количественное сравнение заданных возбуждений

Таблица 6. Отношения обогащения PHB/linear в заранее заданных зонах.

m	Тонкая r≈R	Межфокусное кольцо	Левый канал	Правый канал	Вне R
0	0.661	0.607	1.000	0.378	0.638
1	1.614	2.030	2.744	1.687	2.171
2	1.383	1.422	0.967	2.051	1.567

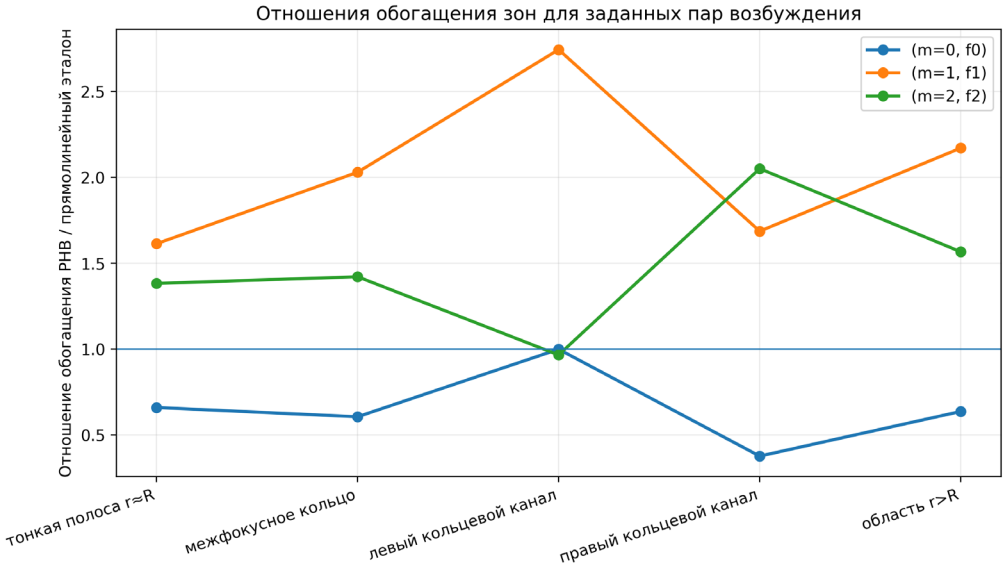

Рисунок 14. Отношения обогащения PHB/прямолинейный эталон для заданных пар возбуждения. Поскольку f_m различается между секторами, кривые представляют межрежимные сравнения, а не чистую зависимость только от m.

Таблица 7. Доли модуля осевой компоненты, приходящиеся на S_z>0, в стартовом и предвыходном окнах.

m	Левый запуск linear +z (%)	Левый запуск PHB +z (%)	Предвыход linear +z (%)	Предвыход PHB +z (%)
0	80.65	25.51	35.13	65.46
1	4.63	99.17	92.37	44.41
2	19.93	53.20	11.14	93.56

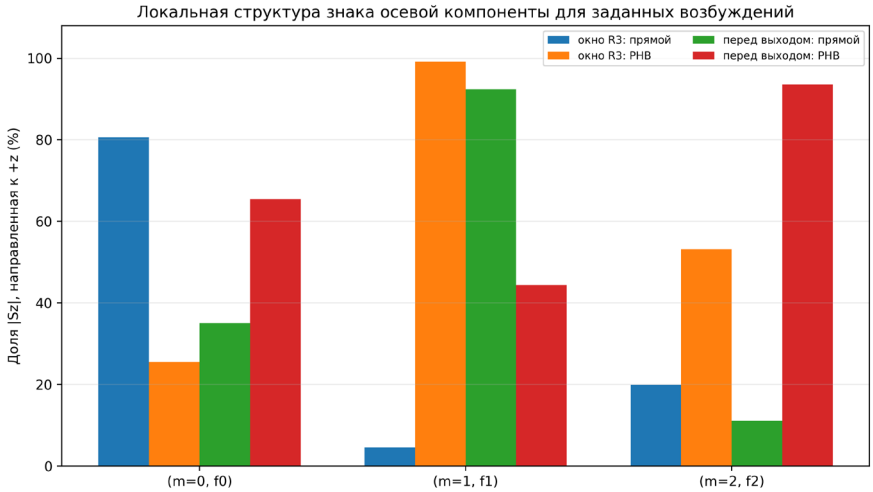

Рисунок 15. Локальная структура знака осевой компоненты в фиксированных окнах со стороны R3 и перед выходом. Значения являются долями $|S_z|$, направленными к +z, в двух отдельных геометриях при заданных возбуждениях.

Таблица 8. Ненормированные потоки ближнего кольцевого и нижележащего мониторов; значения не нормированы на принятую мощность источников.

m	M1 linear (необработанные единицы моделирования)	M1 PHB (необработанные единицы моделирования)	Отношение M1	Относительное отношение селекции монитора	Нижележащий linear (необработанные единицы моделирования)	Нижележащий PHB (необработанные единицы моделирования)	Отношение нижележащего
0	1162.6	507.3	0.436	0.365	1604.8	1209.6	0.754
1	1190.5	3380.8	2.840	5.333	4948.2	4114.9	0.832
2	970.8	501.3	0.516	0.586	929.9	1769.5	1.903

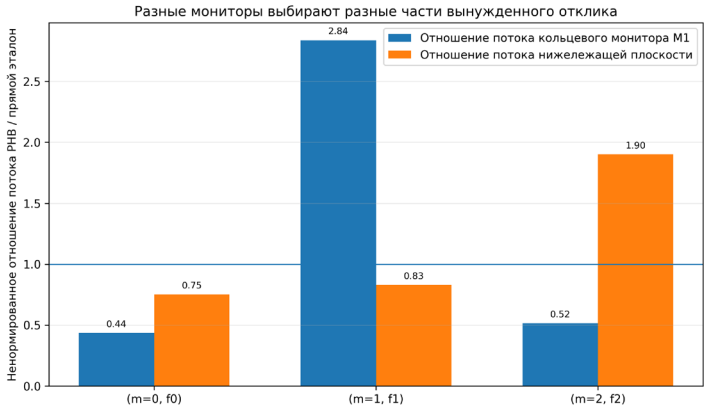

Рисунок 16. Ненормированные отношения потоков PHB/прямолинейный эталон на ближнем кольцевом мониторе M1 и нижележащей плоскости. Значения не нормированы на принятую мощность источников.

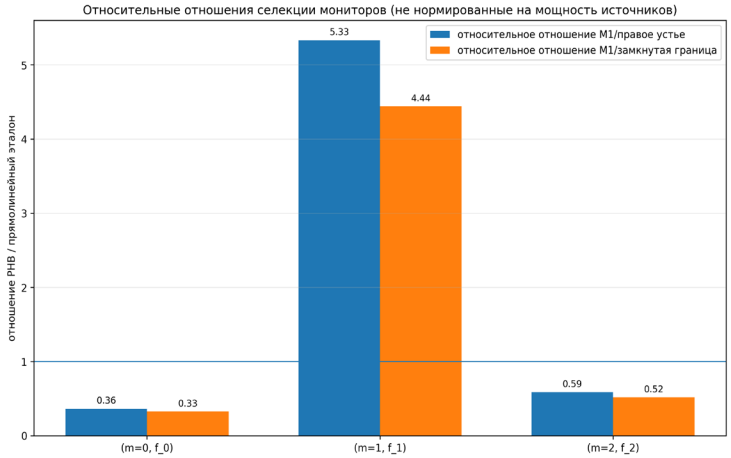

Рисунок 17. Относительные отношения селекции заданного кольцевого монитора M1. Показанные величины сравнивают PHB с прямолинейным эталоном и не являются эффективностями преобразования, нормированными на мощность источников.

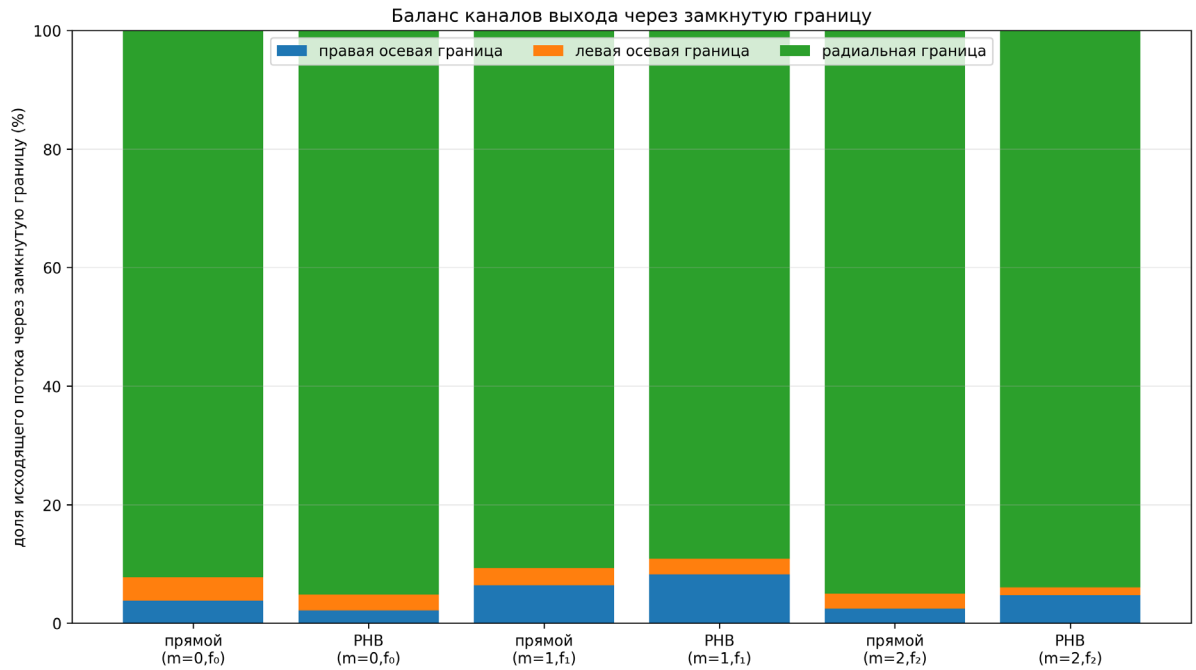

Рисунок 18. Баланс каналов утечки. Радиальная утечка доминирует во всех случаях, однако распределение между правым и левым осевыми каналами изменяется с геометрией и модой.

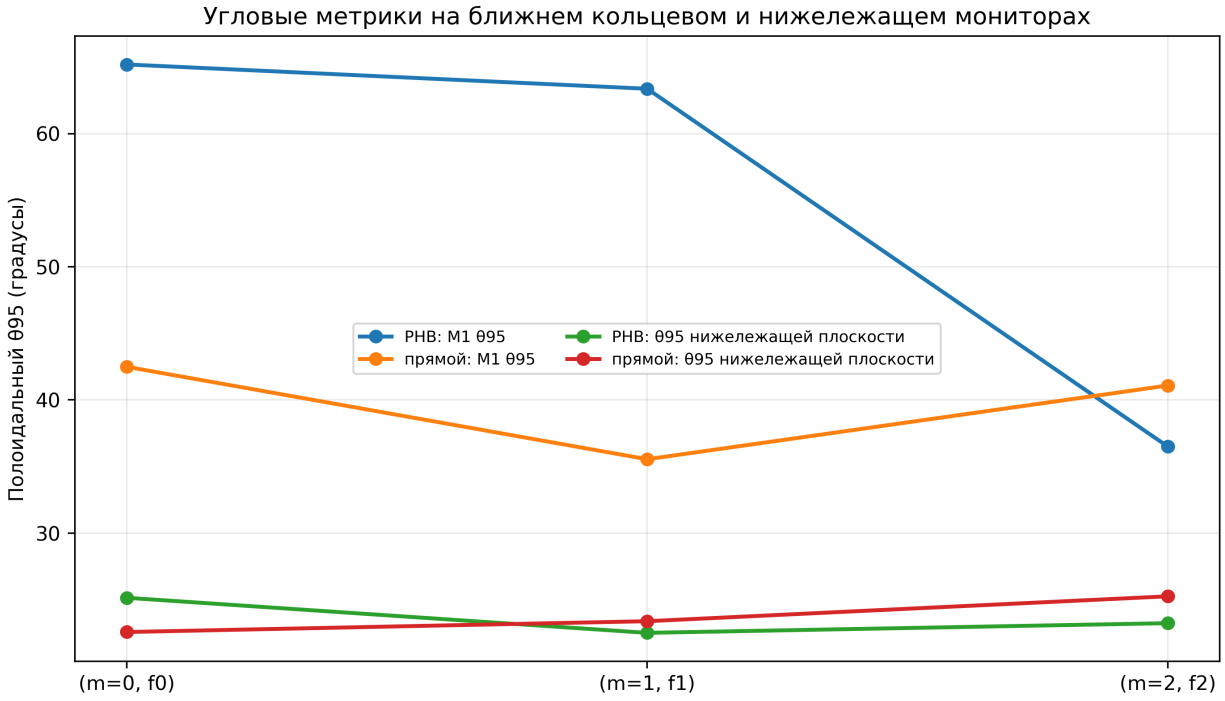

Рисунок 19. Полоидальный θ95 на ближнем кольцевом и нижележащем мониторах. Нижележащая плоскость не является преобразованием ближнего поля в дальнее.

5.6. Каталог отличительных признаков поля PHB относительно linear

Таблица 9. Каталог отличительных признаков PHB/linear и их интерпретация.

Наблюдаемый элемент	Прямое свидетельство	Корректная интерпретация
Модозависимый глобальный отклик	Отношение полной энергии PHB/linear: 2,07 (m=0), 0,299	PHB-образующая не является универсальным

	(m=1), 0,673 (m=2)	усилителем вынужденного отклика относительно эталона с прямой образующей.
Локальная инверсия знака осевой компоненты	m=1 у R3: I_z=+0,983 PHB против -0,907 linear	Сильное локальное связанное с геометрией различие знака в указанном окне
Выбор канала без общего усиления	m=1: отношение M1=2,84 при отношении полной энергии 0,299	Модо-разрешённое перераспределение, а не усиление всего поля
Широкое угловое распределение M1	m=1 PHB theta95≈63,4 градуса	Ближнеполевое сортирование не равно коллимации
Радиальное доминирование m=2	61,3% радиальной против 19,8% осевой составляющей перед выходом	Положительный I_z нельзя описывать как полный вектор вправо
Обеднение внешних фокальных полос	Доли энергии m=2: 0,000278% и 0,005746%	Виртуальные фокусы не являются доказанными энергетическими ловушками
Доминирующая радиальная утечка	Около 89–95% внешнего потока PHB радиально во всех проверенных модах	Текущая геометрия не является оптимизированным осевым излучателем
Эволюция между мониторами	Отношения M1 и нижележащий монитор сильно различаются для m=1 и m=2	Конечные мониторы выбирают разные прошедшие части поля
Доминирующие осевые пики	Глобальные максимумы около оси или внутри воронок	Для слабого кольцевого предпочтения нужны логарифмические карты
Один seed и одно разрешение	Один ансамбль случайных источников; стенка около 4,8 ячеек	Необходимы сходимость и статистика источников
Вынужденный отклик	Частота PHB без изменения задана эталону	Не установлены пассивная квазинормальная мода, Q и время хранения

6. Межрежимный синтез и ограниченная интерпретация

Замена прямой стенки на PHB одновременно изменяет гауссову кривизну, распределение нормалей поверхности, оптические длины путей, площадь поперечного сечения, объём полости и спектральный отклик. Поэтому текущий контроль связывает различия со всей псевдогиперболоидальной образующей как с составным геометрическим изменением. Причинное исследование роли кривизны требует непрерывного семейства деформаций или дополнительных искривлённых контролей, согласованных по объёму, длине пути и распределению апертур.

6.1. Результат межрежимного сравнения в заданном протоколе

Сравнение PHB и прямолинейной образующей связано с различиями пространственной организации вынужденного отклика, локального знакового баланса осевой компоненты, азимутального участия на M1 и распределения между зарегистрированными каналами выхода для заданных пар возбуждения. Эти различия возникают при полном изменении образующей, включая нормали поверхности, локальные углы падения, длины путей, объём полости и спектр; гауссова кривизна не изолирована как единственная причина.

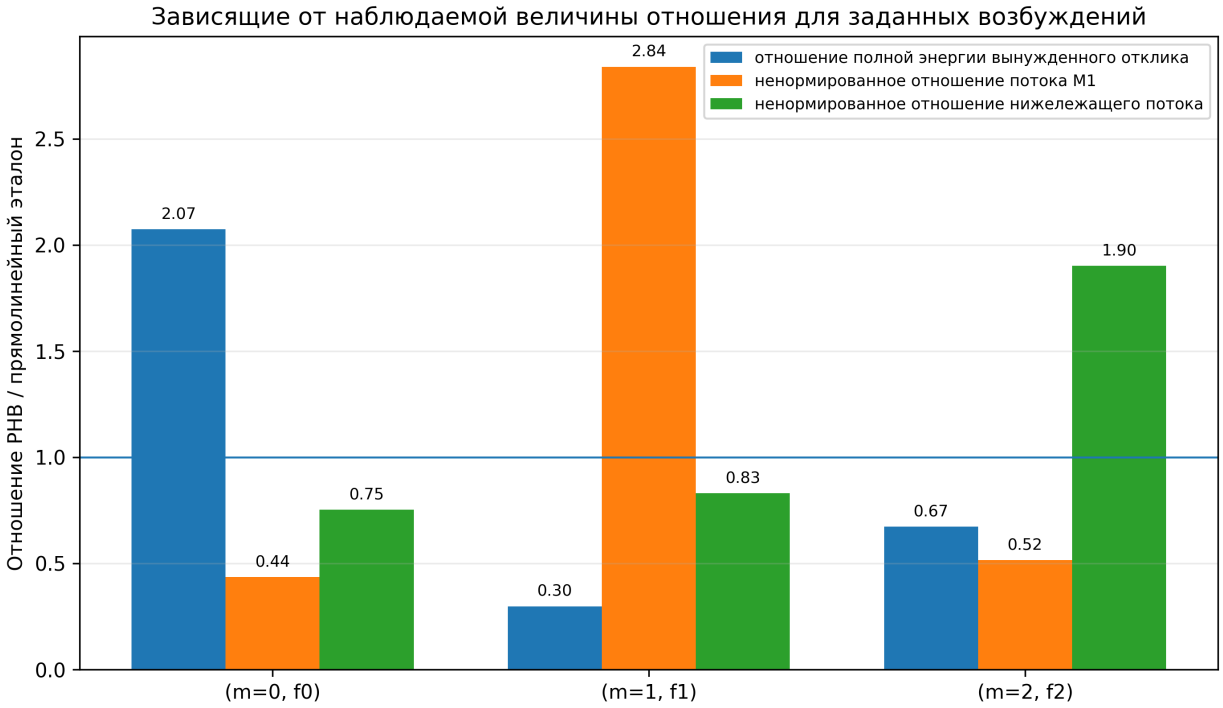

Рисунок 20. Зависящие от наблюдаемой величины отношения PHB/прямолинейный эталон для заданных пар возбуждения. Из ненормированных вынужденных откликов не выводится единое скалярное преимущество эффективности.

6.2. Роль отрицательного контроля m=0

Расчёт (m=0,f₀) служит внутренней проверкой против тривиального однонаправленного смещения утечки. При той же асимметрии R3 и открытой правой стороне расчёт PHB имеет направленную влево осевую компоненту со стороны R3 и меньший ненормированный сигнал M1, тогда как расчёт (m=1,f₁) имеет противоположный локальный знак осевой компоненты и больший ненормированный сигнал M1. В пределах этих заданных пар возбуждения результат зависит от отклика, а не является постоянным однонаправленным смещением, созданным только асимметричным окончанием. Чистая зависимость от m остаётся смешанной с зависимостью от f_m.

6.3. Исправленная фокальная интерпретация

Точный меридиональный фокальный закон остаётся аналитически справедливым, но волновой результат нельзя описывать как буквальное осаждение энергии на внешних фокальных кольцах. Дифракция и интерференция связаны с конечными транспортными слоями, встречными потоковыми областями и зависящими от возбуждения весами каналов; анализ разделяющих линий тока и критических точек не выполнялся. Наиболее защищаемое описание (m=1,f₁) — локальная инверсия знака осевой компоненты относительно расчёта с прямой образующей в фиксированном кольцевом окне. Для (m=2,f₂) корректно говорить об умеренном широком кольцевом обогащении, радиально-доминантном предвыходном рисунке и более сильном сигнале на вторичном нижележащем мониторе.

6.4. Ограниченная интерпретация наблюдаемого численного признака

Для указанных геометрии, ансамбля источников, частот, выбранных для РНВ, и фиксированных аналитических окон наблюдаемый численный признак состоит в различиях пространственной организации вынужденного отклика, локальной знаковой структуры осевой компоненты и связи с мониторами между расчётами РНВ и прямолинейного эталона. Он связан с полной РНВ-образующей и не приписывается причинно одной лишь гауссовой кривизне.

Феноменологический зональный дескриптор и явно проверяемые гипотезы приведены в §8.5; они не представляются как динамическая теория или модель переноса.

7. Научные следствия и кандидатные применения

Новая прикладная программа выводится из измеренных признаков, а не из предположения об узком пучке. Для каждого концепта ниже указано, какую рассчитанную величину он использует и какие дополнительные доказательства необходимы до инженерного утверждения.

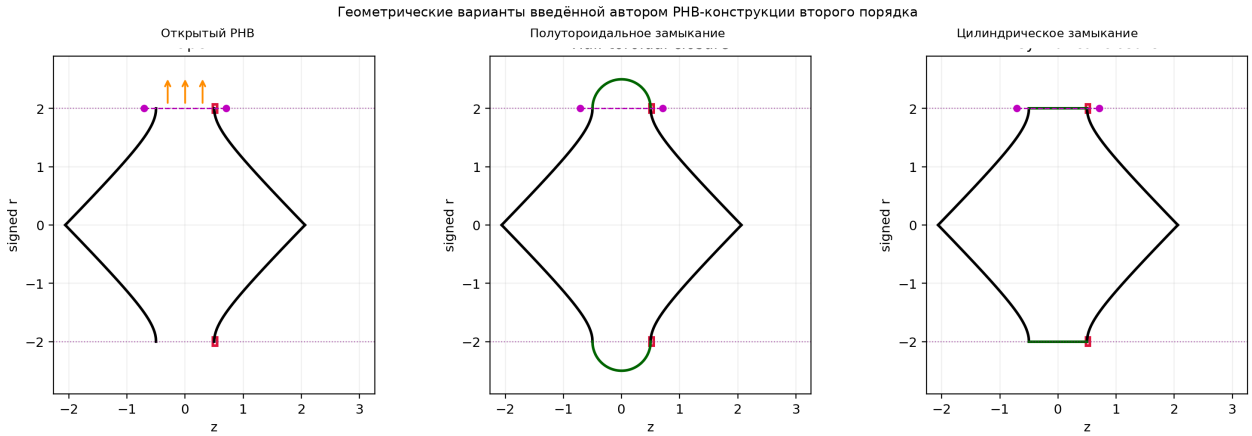

Рисунок 21. Геометрические варианты введённой автором РНВ-конструкции второго порядка, построенные одним аналитическим скриптом: открытый, полутороидально замкнутый и цилиндрически замкнутый случаи. Это кандидатные проектные семейства, а не устройства, подтверждённые расчётом V43.2.

7.1. Модово-разрешённый СВЧ- или терагерцовый демонстратор

Первоочередная реализация — металлическая полость со сменными стенками РНВ и linear и независимым возбуждением m=0,1,2. Комплексные зонды E и H должны картировать стартовый слой R3, широкую кольцевую область, предвыходную зону, M1 и внешнее поле. Решающий признак — локальная инверсия m=1 РНВ вправо / linear влево вместе с измеренным коэффициентом передачи M1/полное устье.

7.2. Кандидатный модо-обусловленный кольцевой ближнеполевой ответвитель

Кольцевой порт можно расположить там, где заданное возбуждение (m=1,f_1) демонстрирует повышенный поток выбранного канала и очень малое азимутальное участие. Будущей метрикой устройства должна служить нормированная на входную мощность матрица связи между контролируемыми амплитудами возбуждений и мощностями кольцевых портов; такая матрица в настоящей работе не измерялась. Жизнеспособное будущее модо-обусловленное устройство связи должно сохранять контраст при изменении положения источника, полосы, потерь проводника и допусков изготовления.

7.3. Дифференциальный модовый и средовой сенсор

Образец, размещённый около чувствительного кольцевого транспортного слоя, может изменять I_z, отношение M1/правое устье, фазу, частоту или положение нуля S_z. Дифференциальное сравнение заданных пар возбуждения может подавлять общий дрейф. Это кандидатная сенсорная концепция, поскольку она требует воспроизводимого контраста; эффективность, шум и повторяемость пока не измерены.

7.4. Радиальный кольцевой аппликатор для режима m=2

Исправленный результат m=2 указывает на окружную рабочую область, а не на осевой пучок. Радиальный кольцевой аппликатор может связывать энергию с окружающей плазмой, поглотителем, технологическим кольцом или цилиндрической нагрузкой. Возможные направления — СВЧ- и терагерцовый нагрев, зажигание плазмы, кольцевая обработка материалов и ближнеполевое воздействие. Конструкция должна собирать доминирующий радиальный поток, а не считать его потерей.

7.5. Кандидатная стадия сбора на нижележащей плоскости

Хотя при m=2 доминирует радиальная утечка, нижележащий по ходу распространения компонент в 1,90 раза выше эталона. Наружный рупор, диэлектрический преобразователь или кольцево-осевой коллектор может превратить часть широкого радиального поля в полезный осевой канал. Это двухступенчатая архитектура, а не прямая коллимация самой РНВ.

7.6. Внутриполевой режим m=0

m=0 создаёт наиболее сильный глобальный вынужденный отклик, но слабый кольцевой вывод. После проверки свободного затухания и добротности этот режим может использоваться для внутреннего реактора поля, спектроскопической ячейки, нелинейного объёма взаимодействия или накопительного резонатора. До таких проверок это усиленный вынужденный отклик, а не доказанная высокодобротная мода.

7.7. Кандидатное семейство геометрий РНВ с различными заглушками

Открытый, полутороидальный и цилиндрический варианты образуют кандидатное семейство геометрий для раздельной проверки выходной связи, внутреннего замыкания и модо-обусловленных вынужденных откликов. Полутороидальный вариант подходит для проверки слабой кольцевой связи, вариант с цилиндрическим замыканием — для сенсорных исследований и измерений свободного затухания, открытый вариант — для ближнеполевого вывода и радиальных аппликаторов.

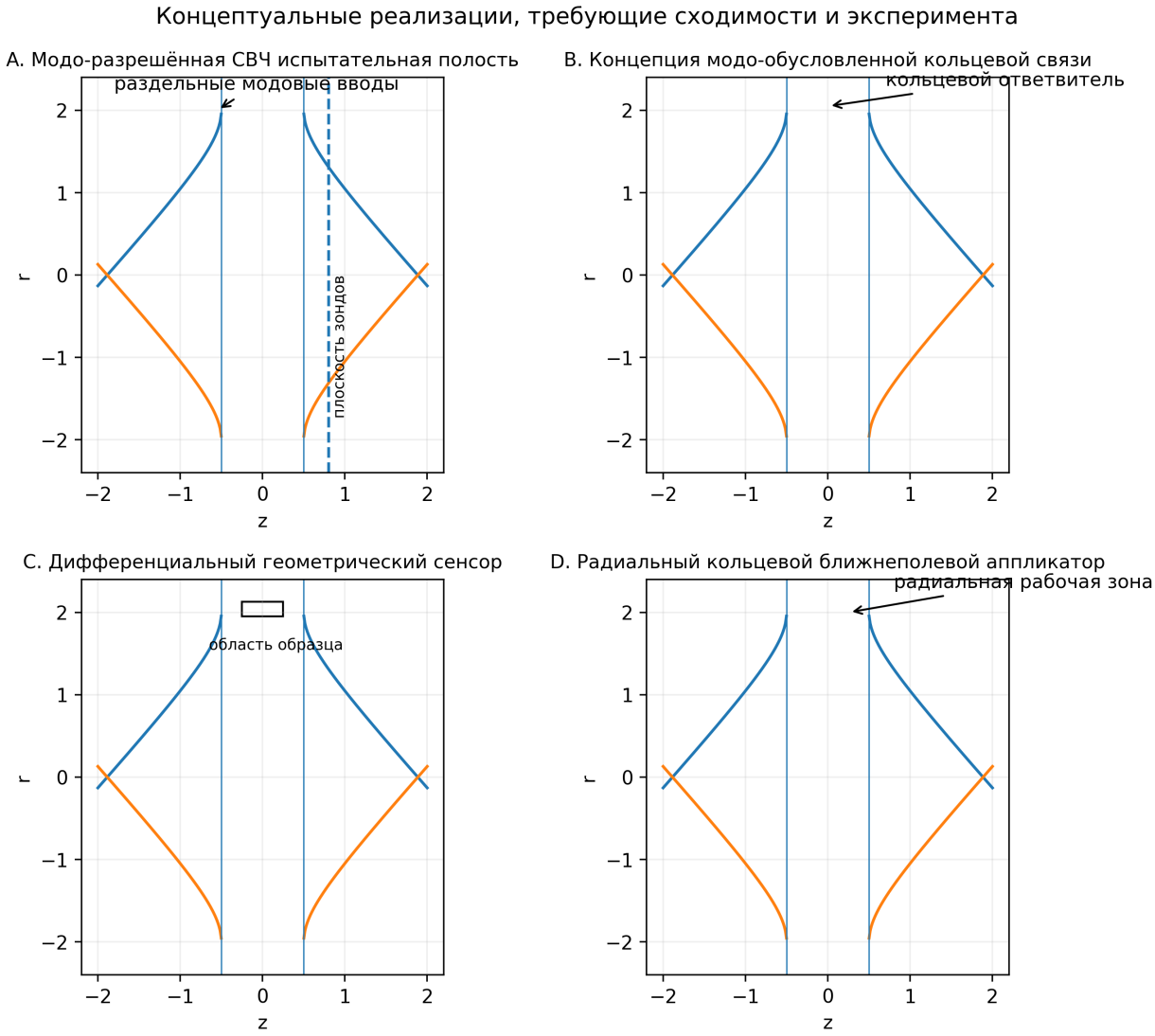

Рисунок 22. Концептуальные реализации на основе геометрии PHB. Подписи описывают испытательные конфигурации и кандидатные концепции связи, а не доказанные функции устройств.

Таблица 10. Концепции применений, необходимая доказательная база и текущий доказательный статус.

Концепт	Используемый признак V43.2	Необходимое следующее доказательство	Текущий доказательный статус
СВЧ-демонстратор	Локальная инверсия m=1 и все межмодовые контрасты	Прямое картирование поля и matched-linear контроль	Требует сходимости и экспериментальной демонстрации
Кольцевой ответвитель	Усиление M1 и малая S_φ при m=1	Матрица передачи, полоса и допуски	Концепция; требует нормированной на мощность связи и полосы
Дифференциальный сенсор	Зависящие от возбуждения I_z и отношения каналов	Шум, повторяемость, возмущение	Концепция; требует тестов возмущения, шума и

		образцом	повторяемости
Радиальный кольцевой аппликатор	Радиально-доминантный выход m=2	Связь с нагрузкой и эффективность	Вычислительный кандидат; требует эффективности связи с нагрузкой
Концепция сбора на нижележащей плоскости	Усиленный нижележащий по ходу распространения компонент m=2	Наружный преобразователь и полный баланс	Концепция; требует преобразования ближнего поля в дальнее и полного баланса
Внутриполевой резонатор	Большая энергия вынужденного отклика m=0	Ring-down, собственная мода и сходимость Q	Требует собственных мод, ring-down и сходимости Q
Оптическая/ТГц реализация	Масштабируемость идеальной геометрии Максвелла	Дисперсия, шероховатость, конечная проводимость	Концепция; требует анализа потерь для конкретных материалов

8. Программа подтверждения, аудит артефактов и ограничения

Научный приоритет усиливается разделением измеренных величин, артефактов и пока не проверенных характеристик. Архивный шестислучайный набор V43.2 внутренне перекрёстно проверен в пределах заявленного протокола с одним разрешением, но не является исследованием сходимости, сравнением эффективностей с нормировкой на принятую мощность или доказательством собственной моды.

8.1. Защита от численных и интерпретационных артефактов

- Сохранять проверенный порядок массивов (r,z) и строить карты непосредственно с z по горизонтали и r по вертикали без транспонирования.
- Показывать PEC непрозрачно и исключать металл и буфер около металла из энергетической и потоковой интерпретации.
- При использовании I_z всегда приводить полный баланс $|S_r|$, $|S_\varphi|$ и $|S_z|$.
- Для пар PHB/linear применять одинаковые абсолютные шкалы и логарифмические карты, когда слабая кольцевая структура сравнивается с осевыми максимумами.
- Различать M1, полное устье, ближний, дальний и замкнутый баланс: это не взаимозаменяемые характеристики одного пучка.
- Отделять виртуальные фокальные кольца от физических стенок и измеренных энергетических максимумов.

8.2. Обязательная численная верификация

- Повторить все шесть случаев при resolution 144 и 192 с неизменными физическими размерами и получить интервалы сходимости знаковых индексов и отношений каналов.
- Использовать несколько независимых seed и контролируемые ансамбли источников; привести вариации и доверительные интервалы.

- Провести отдельный модальный поиск для PHB и linear и представить как сравнение на одной частоте, так и независимо оптимизированные случаи.
- Выполнить свободное затухание и извлечь сходящиеся комплексные частоты, Q и времена спада энергии.
- Провести сетку по a/b, R/lambda, R3/lambda, толщине стенки и ширине выходного кольца.
- Добавить конечную проводимость, дисперсию, скругления и производственные допуски.
- Проверить локальную инверсию знака осевой компоненты независимым частотным или конечно-элементным решателем.
- До утверждения о пучке выполнить полное преобразование ближнее–дальнее поле или угловой спектр.

8.3. Экспериментальная проверка

Масштабированный СВЧ-эксперимент должен использовать сменные вставки PHB и linear, модоселективные источники и фазочувствительные зонды. Минимальный решающий набор — знак и баланс компонент поля со стороны R3 и перед выходом для m=0,1,2, а также полный учёт мощности M1, всего устья и замкнутой границы. Только после этого оправдан переход к терагерцовым и оптическим вариантам.

Текущие данные поддерживают предварительный вычислительный результат в волновой физике. Они не устанавливают оптимизированный высокодобротный резонатор, активную лазерную генерацию, пассивный однонаправленный перенос, накопление во внешней фокальной плоскости, универсальную коллимацию или узкий полый пучок в дальнем поле.

8.4. Численный статус и минимально необходимая верификация

Все различия наблюдались в одном численном расчёте с одним разрешением и одним ансамблем источников: resolution 96, толщина PEC 0,05, seed 42, одна толщина PML и один набор диагностических окон. Цилиндрический PML может иметь повышенное численное отражение; документация MEEP рекомендует проверять отступ и толщину PML, а сходимость в общем случае требует изменения разрешения, времени расчёта и параметров PML [28,29]. Доминирующий радиальный выход делает эту проверку особенно важной. Необходимы resolution 96, 144 и 192; не менее двух толщин PEC; несколько толщин PML и радиальных отступов; 3-5 source seeds; смещение окон на несколько ячеек; общие частотные спектры обеих геометрий; расчёт каждой геометрии на собственной резонансной частоте; нормировка на мощность источников и остаток энергетического баланса.

$$\varepsilon_{balance} = \frac{|P_{src} - P_{out} - \frac{dU}{dt}|}{|P_{src}|}. \quad (12)$$

Фиксированная нижележащая плоскость не является диагностикой дальнего поля. Для диаграммы излучения требуется преобразование ближнего поля в дальнее на охватывающей поверхности ближнего поля и достаточно большое расстояние наблюдения [30].

8.5. Феноменологический зональный дескриптор и проверяемые гипотезы

Для систематизации каждую заданную пару возбуждения можно представить описательным вектором D_{m,f_m}, содержащим значения I_z в окнах, долю модулей азимутальной компоненты на M1 $\eta_\varphi(M1)$, определённую в §4.1, и ненормированные

отношения мониторов. D_{m,f_m} не является динамическим состоянием, матрицей переноса или теорией; он лишь фиксирует измеряемые величины. Нулевая точка по частоте, оптимальный электрический размер или связанный с кривизной порог могут существовать и должны проверяться, но не следуют из текущего набора данных.

$$D_{m,f_m} = \left[I_z(R3), I_z(pre), \eta_\varphi(M1), \frac{P_{M1}}{P_{mouth}}, \frac{P_{down}}{P_{out}}\right]. \quad (13)$$

9. Узкое заявление о приоритете

Насколько известно автору, настоящая работа представляет первоначальное полновекторное цилиндрическое FDTD-сравнение при указанной геометрии и протоколе возбуждения между открытой псевдогиперболоидальной PEC-границей и согласованным эталоном с прямой образующей с особым вниманием к локальным различиям знака осевой компоненты и связи с кольцевым монитором в заданных секторах m=0,1,2. Заявление ограничено этим протоколом сравнения и приведёнными наблюдениями; оно не утверждает, что отрицательная гауссова кривизна изолирована как независимая причина.

Автор не заявляет приоритет на отрицательную кривизну как математическое понятие, гиперболическую дисперсию, синтетические гиперболические решётки, волокна отрицательной кривизны, микролазеры на псевдосфере, отдельные гиперболоидальные отражатели, произвольные кольцевые поля или радиальное излучение. Заявление ограничено указанным сравнением PHB с эталоном с прямой образующей и приведёнными численными наблюдениями.

10. Выводы

1. Расчёты PHB и геометрии с прямой образующей различаются по распределению энергии вынужденного отклика, локальной структуре знака осевой компоненты и связи с мониторами для заданных возбуждений (m,f_m).
2. Эти различия связаны со всей псевдогиперболоидальной образующей. Текущий контроль не изолирует отрицательную гауссову кривизну от других геометрических и спектральных изменений.
3. Межсекторное сравнение совместно включает m и f_m. Внутри каждого сектора сравнение выполняется на частоте, выбранной для PHB, и не является сравнением независимо оптимизированных резонансов.
4. Для (m=1,f_1) фиксированное окно со стороны R3 показывает сильную локальную инверсию знака осевой компоненты относительно расчёта с прямой образующей: I_z=+0,983 против -0,907. Устойчивость к положению окна, частоте, seed и разрешению ещё не проверена.
5. Ненормированное отношение потока M1, равное 2,84, и относительное отношение селекции монитора, равное 5,33, не являются эффективностями, нормированными на мощность источников, поскольку принятая мощность не регистрировалась.
6. Для (m=2,f_2) широкое кольцевое обогащение умеренно. Модули предвыходных компонент радиально-доминантны; 72,1° является агрегированным меридиональным угловым proxy, а не направлением единственного среднего вектора.
7. RIGHT_FAR является нижележащим плоским монитором, а не преобразованием в дальнее поле. Повышенный нижележащий сигнал представляет вторичный выборочно измеренный канал, тогда как радиальный поток через внешнюю границу остаётся доминирующим.

8. Отдельные цилиндрические расчёты m демонстрируют модо-разрешённое перераспределение вынужденного отклика, но не многомодовую конкуренцию, преобразование m в m или доказанное модоселектирующее устройство.
9. Результаты наблюдались в одном численном расчёте resolution=96, seed=42. До утверждений об устройстве или причинном механизме необходимы проверки сходимости, PML, мощности источников, ансамблей источников, спектров, преобразования ближнего поля в дальнее и эксперимент.
10. Узкий защищаемый вклад состоит в первоначальном воспроизводимом сравнении, показывающем связанные с геометрией модо-разрешённые различия между открытой PHB PEC-полостью и согласованным эталоном с прямой образующей при указанном протоколе.

Доступность данных

Полный численный архив V43.2 из шести расчётных случаев, точный исходный скрипт расчёта и архивной постобработки, конфигурационные манифесты каждого случая, README и контрольные суммы SHA-256 включены в запись Zenodo под именами PHB_V43_2_FULL_VERIFY_PHB_LINEAR_m012_RES96_ALL_RESULTS.zip, PHB_CO2_v43_2_OPEN_RIGHT_CLEAN_PLOT_MEEP.py. Экспериментальные данные отсутствуют.

Литература

1. Born M, Wolf E. Principles of Optics. 7th ed. Cambridge University Press; 1999.
2. Siegman AE. Lasers. University Science Books; 1986.
3. Fox AG, Li T. Resonant modes in a maser interferometer. Bell Syst Tech J. 1961;40:453–488. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1961.tb01625.x.
4. Nöckel JU, Stone AD. Ray and wave chaos in asymmetric resonant optical cavities. Nature. 1997;385:45–47. https://doi.org/10.1038/385045a0.
5. Vahala KJ. Optical microcavities. Nature. 2003;424:839–846. https://doi.org/10.1038/nature01939.
6. Berry MV, Upstill C. Catastrophe optics: morphologies of caustics and their diffraction patterns. Prog Opt. 1980;18:257–346.
7. Nye JF, Berry MV. Dislocations in wave trains. Proc R Soc Lond A. 1974;336:165–190. https://doi.org/10.1098/rspa.1974.0012.
8. Allen L, Beijersbergen MW, Spreeuw RJC, Woerdman JP. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre–Gaussian laser modes. Phys Rev A. 1992;45:8185–8189. https://doi.org/10.1103/PhysRevA.45.8185.
9. Rubinsztein-Dunlop H, Forbes A, Berry MV, et al. Roadmap on structured light. J Opt. 2017;19:013001. https://doi.org/10.1088/2040-8978/19/1/013001.
10. Bliokh KY, Rodríguez-Fortuño FJ, Nori F, Zayats AV. Spin–orbit interactions of light. Nat Photonics. 2015;9:796–808. https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.201.
11. Berry MV. Optical currents. J Opt A. 2009;11:094001. https://doi.org/10.1088/1464-4258/11/9/094001.
12. Jackson JD. Classical Electrodynamics. 3rd ed. Wiley; 1999.
13. Yee KS. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. IEEE Trans Antennas Propag. 1966;14:302–307. https://doi.org/10.1109/TAP.1966.1138693.

14. Berenger JP. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. J Comput Phys. 1994;114:185–200. https://doi.org/10.1006/jcph.1994.1159.

15. Taflove A, Hagness SC. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. 3rd ed. Artech House; 2005.

16. Oskooi AF, Roundy D, Ibanescu M, et al. MEEP: a flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method. Comput Phys Commun. 2010;181:687–702. https://doi.org/10.1016/j.cpc.2009.11.008.

17. Mandelshtam VA, Taylor HS. Harmonic inversion of time signals and its applications. J Chem Phys. 1997;107:6756–6769. https://doi.org/10.1063/1.475324.

18. Kristensen PT, Hughes S. Modes and mode volumes of leaky optical cavities and plasmonic nanoresonators. ACS Photonics. 2014;1:2–10. https://doi.org/10.1021/ph400114e.

19. Lalanne P, Yan W, Vynck K, Sauvan C, Hugonin JP. Light interaction with photonic and plasmonic resonances. Laser Photonics Rev. 2018;12:1700113. https://doi.org/10.1002/lpor.201700113.

20. Alagashev GK, Pryamikov AD, Kosolapov AF, Kolyadin AN, Lukovkin AY, Biriukov AS. Impact of geometrical parameters on the optical properties of negative curvature hollow-core fibres. Laser Phys. 2015;25:055101. doi:10.1088/1054-660X/25/5/055101.

21. Wang Y, Ding W. Confinement loss in hollow-core negative curvature fibre: a multi-layered model. Opt Express. 2017;25(26):33122–33133. doi:10.1364/OE.25.033122.

22. Kollár AJ, Fitzpatrick M, Houck AA. Hyperbolic lattices in circuit quantum electrodynamics. Nature. 2019;571:45–50. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1348-3.

23. Maciejko J, Rayan S. Hyperbolic band theory. Sci Adv. 2021;7(36):eabe9170. doi:10.1126/sciadv.abe9170.

24. Huang L, He L, Zhang W, et al. Hyperbolic photonic topological insulators. Nat Commun. 2024;15:1647. doi:10.1038/s41467-024-46035-y.

25. Khaustov VI. Higher-Order Pseudohyperboloids with the Merge Operation: A Geometric Foundation for Programmable Wave Confinement. Zenodo; 2026. https://doi.org/10.5281/zenodo.19926174.

26. Khaustov VI. Geometric Wave Engineering of Ring-Localized States in Open Pseudo-Hyperbolic Cavities. Zenodo; 2026. https://doi.org/10.5281/zenodo.19944381.

27. MEEP Documentation. Python User Interface: cylindrical coordinates, m sectors, Courant factor and accurate_fields_near_cylorigin. Online master/latest documentation. https://meep.readthedocs.io/en/latest/Python_User_Interface/. Accessed 16 July 2026.

28. MEEP Documentation. Tutorial: Cylindrical Coordinates. Online latest documentation. https://meep.readthedocs.io/en/latest/Python_Tutorials/Cylindrical_Coordinates/. Accessed 16 July 2026.

29. MEEP Documentation. Perfectly Matched Layer. Online latest documentation. https://meep.readthedocs.io/en/latest/Perfectly_Matched_Layer/. Accessed 16 July 2026.

30. MEEP Documentation. Tutorial: Near-to-Far Field Spectra. Online latest documentation. https://meep.readthedocs.io/en/latest/Python_Tutorials/Near_to_Far_Field_Spectra/. Accessed 16 July 2026.

31. MEEP Documentation. Tutorial: Basics — incident-flux normalisation and convergence checks. Online latest documentation. https://meep.readthedocs.io/en/latest/Python_Tutorials/Basics/. Accessed 16 July 2026.

32. Girin H, Bittner S, Checoury X, et al. Exploring non-Euclidean photonics: pseudosphere microlaser. Phys Rev A. 2025;111:043512. doi:10.1103/PhysRevA.111.043512.

33. Xiang B-B, Wang C-S, Lian P-Y, Wang N, Ban Y. Optimal subreflector position determination of shaped dual-reflector antennas based on the parameters iteration approach. Res Astron Astrophys. 2019;19:062. doi:10.1088/1674-4527/19/4/62.