Геометрическая волновая инженерия

Перераспределение ближнего поля у выходной кольцевой апертуры псевдогиперболоидного резонатора относительно согласованного контрольного резонатора с прямолинейной образующей

Результаты согласованного FDTD-контроля

Хаустов Владимир Игоревич

ORCID: 0009-0007-3657-2309

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

Лицензия: CC BY 4.0

Дата публикации: 4 июня 2026 года

DOI: 10.5281/zenodo.21196425

Научно-технический перевод с английского языка.

Редакция, адаптированная для русскоязычного инженера-исследователя.

Оригинал: Khaustov. V. Geometric Wave Engineering –Matched FDTD Evidence for Aperture-Side Near-Field Redistribution in a Pseudohyperboloidal Resonator Compared with a Straight-Generator Reference. https://doi.org/10.5281/zenodo.21196425

Аннотация

Представлены результаты моделирования методом конечных разностей во временной области (FDTD), свидетельствующие о том, что псевдогиперболоидного резонатор способен перераспределять показатель плотности электрического поля в ближней зоне относительно согласованного контрольного резонатора с прямолинейной образующей. Основным результатом не является ни доказанное формирование коллимированного пучка в дальней зоне, ни обнаружение единственной в своём роде топологической линии стагнации потока Пойнтинга. Подтверждённый результат уже: в исследованных диагностических областях ближнего поля гиперболическая меридиональная образующая эффективнее, чем согласованная прямолинейная контрольная поверхность с тем же замыканием, расположением апертуры, конфигурацией источника и способом диагностики, смещает рабочие области вблизи щели и фокального коридора к выходной апертуре.

Локальное пересечение условия радиального баланса потока Пойнтинга $S_r \approx 0$ обнаружено как в PHB, так и в контрольной геометрии с прямолинейной образующей. Поэтому само существование $S_r \approx 0$ не объявляется уникальным свойством стенки PHB. Характерный для PHB признак состоит в пространственном перераспределении показателя E^2 и в привязке рабочего слоя к выходной стороне апертуры относительно выбранной радиальной подполосы.

В работе E^2 используется как показатель, характеризующий электрическое поле, а не как полная плотность электромагнитной энергии. Для утверждений о полной плотности энергии потребовалось бы учитывать электрический и магнитный вклады. Поэтому выводы сформулированы применительно к диагностике карт E^2 и локальных компонент вектора Пойнтинга.

Сопоставление $m = 0$ и $m = 1$ рассматривается как указание на зависимость от моды и выбранного окна, но не как завершённое однофакторное доказательство фундаментальной модовой зависимости: доступные строгие расчёты использовали неодинаковые случайные конфигурации источников. Для более строгой проверки необходимы идентичная геометрия источников, аналитическое возбуждение мод либо статистическое усреднение по реализациям источников.

Наиболее выраженная направленная упорядоченность наблюдается только в диагностической плоскости ближнего поля M1. Диагностика в расположенной далее плоскости M2 показывает расширение извлечённого распределения; следовательно, полученные результаты нельзя трактовать как доказательство формирования пучка в дальней зоне.

Расчёты устанавливают консервативно сформулированный вычислительный приоритет: геометрия PHB может служить пассивным перераспределителем ближнего поля, изменяющим то, как правая выходная апертура отбирает локальное радиальное поле вектора Пойнтинга, по сравнению с согласованным прямолинейным контролем.

Ключевые слова: PHB; геометрическая волновая инженерия; FDTD; контрольная геометрия с прямолинейной образующей; перераспределение ближнего поля; показатель E^2; радиальный баланс потока Пойнтинга; привязка к выходной апертуре; диагностика материальных масок; воспроизводимость; псевдогиперболоид; псевдогиперболоидальный резонатор.

Содержание

Аннотация 2

1. Научная цель и уточнённая формулировка приоритета 4

2. Геометрия и диагностика смещения кольцевого распределения E^2 4

3. Основной обнаруженный эффект: смещённая кольцевая концентрация показателя E^2 7

4. Зависимость от моды и окна; ограничение, связанное с неодинаковыми случайными конфигурациями источников 12

5. Согласованный прямолинейный контроль: отделение влияния гиперболической стенки от общих эффектов апертуры 14

6. Физический механизм: от кривизны к кольцевой области и управлению знаком S_r 17

7. Ограничения M2, материальной маски и согласованного контроля: что не следует из представленных данных 21

8. Технологические перспективы: значение управления потоком Пойнтинга одной геометрией 23

9. Итоговое утверждение и программа проверки 24

10.Точное определение PHB и комплект воспроизводимости Zenodo 25

Литература 26

1. Научная цель и уточнённая формулировка приоритета

Цель статьи — документально зафиксировать приоритет геометрического способа управления вектором Пойнтинга в ближнем поле с помощью границы PHB. Это утверждение намеренно отделяется от какой-либо прикладной программы. Не утверждается, что рассматриваемая конструкция уже формирует узконаправленное излучение в дальней зоне. Подтверждено, что в исследованных FDTD-режимах геометрия PHB перераспределяет показатель E^2 в рабочие области около щели и фокального коридора; выбранная радиальная диагностическая подполоса при этом может захватывать области, где S_r отрицателен, близок к нулю или положителен. Речь идёт о диагностике ближнего поля, а не об уникальной топологической линии стагнации либо формировании дальнего пучка.

Это различие принципиально. В скалярном описании внимание сосредоточено главным образом на амплитуде и фазе. Данные PHB показывают, что их недостаточно. Для широкого контрольного окна с материальной маской R2 = 0,03 среднеквадратичное отклонение фазы на апертуре очень мало — приблизительно 0,057 рад, но $\theta95_rz \approx 43{,}65°$ и L10 = 0 % в M1. Напротив, для варианта R2 = 0,009 фазовое RMS значительно больше — около 1,19 рад, зато $\theta95_rz \approx 7{,}97°$, поскольку в выбранной полосе M1 локальный векторный поток пересекает слой $S_r = 0$.

Следовательно, приоритетное утверждение имеет векторный характер. PHB не просто концентрирует интенсивность, а организует направление переноса энергии по слоям, зависящим от радиуса. В важнейшем варианте локальное полоидальное направление определяется отношением $|S_r|/S_z$, а не гладкостью скалярной фазы. При m = 1 азимутальная компонента S_φ остаётся большой, поэтому полный трёхмерный вектор не является осевым. Это не противоречит утверждению, а определяет эффект как локальное управление потоком Пойнтинга, а не обычное скалярное формирование волнового фронта.

Строгие расчёты m = 0 и m = 1 рассматриваются как свидетельства зависимости от моды и окна, но не как завершённое однофакторное доказательство фундаментальной зависимости от моды. Из-за различия случайных конфигураций источников нельзя исключить влияние конкретной реализации возбуждения. Сопоставление выявляет проверяемую закономерность: в разных исследованных конфигурациях максимум E^2 и область баланса S_r находятся на разных радиусах. Это обосновывает последующий контролируемый эксперимент с одинаковыми источниками или аналитическим модовым возбуждением.

Новый согласованный контроль с прямолинейной образующей дополнительно уточняет вывод. При m = 0, R2 = 0,03, смещении 0,035 и разрешении 320 пересечение $S_r = 0$ наблюдается в обеих геометриях. Вклад гиперболической формы заключается не в самом существовании линии радиального баланса, а в пространственном перераспределении рабочего слоя E^2 и привязке его к выходной стороне апертуры по сравнению с прямолинейной образующей.

2. Геометрия и диагностика смещения кольцевого распределения E^2

Исследуемый PHB представляет собой полукольцевую границу с полутороидальным замыканием, построенную на основе гиперболической меридиональной геометрии с радиальным смещением. В основном наборе данных опорный радиус R = 0,5. Поэтому номинальный радиус внешнего фокального кольца r = R. При упрощённой интерпретации можно было бы ожидать концентрацию энергии непосредственно вокруг этого кольца. Однако рассчитанные карты поля обнаруживают более сложное поведение: устойчивые структуры вблизи щели и фокального коридора смещаются наружу либо к меньшим радиусам относительно R, причём положение зависит от номера моды и способа отбора поля апертурой.

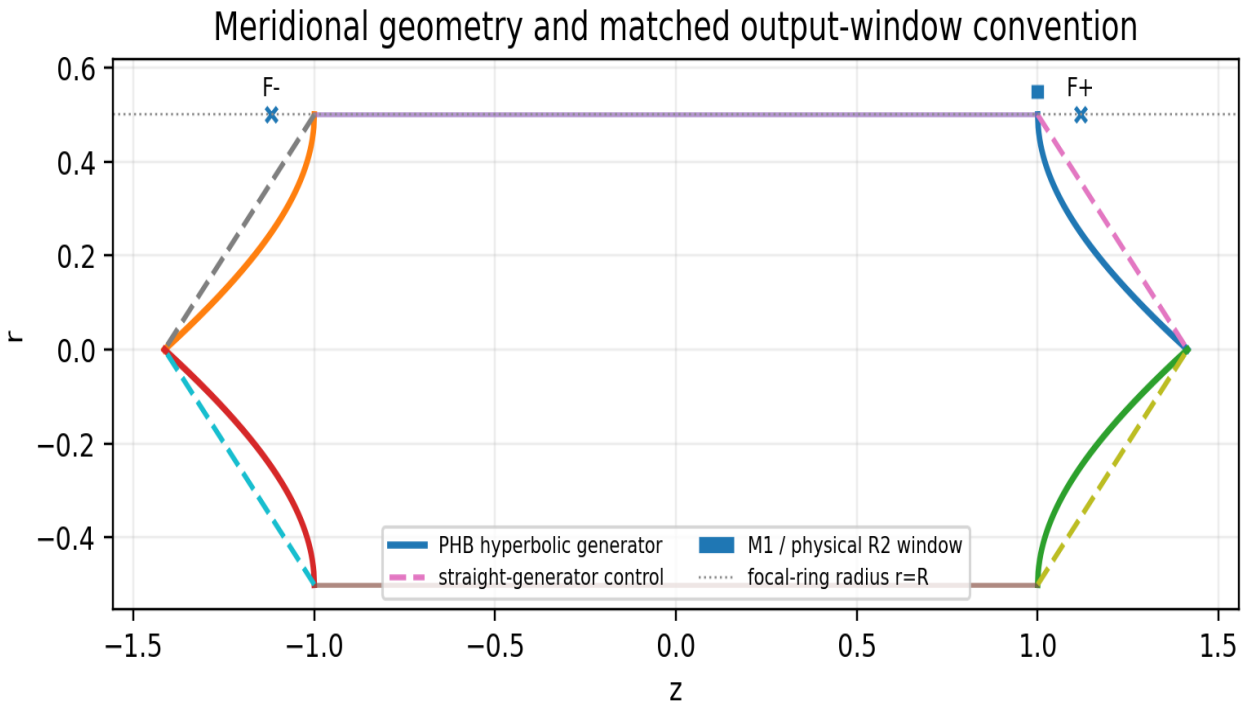

Рисунок 1. Меридиональная геометрия и соглашение о выходном окне. Согласованная контрольная геометрия с прямолинейной образующей заменяет только наружные гиперболические участки воронок, сохраняя центральное замыкание, апертуру и расположение измерительных областей.

В статье PHB означает кусочно-гладкую поверхность вращения конечной толщины, внешняя меридиональная воронка которой подчиняется гиперболическому радиальному закону, а центральная область замкнута полутороидальной границей. Термин используется как краткое геометрическое обозначение вычислительной границы резонатора, а не как утверждение, что конечный FDTD-объект является полным гладким математическим гиперболоидом.

Это не произвольный набор кривых. Граница именуется PHB потому, что физический объект FDTD-модели представляет собой составную материальную границу с конечной толщиной стенки, полутороидальным замыканием, маской среза/окна и открытой диагностической областью, а не единый полный гладкий гиперболоид.

Для основной геометрии строгих сравнений V47 меридиональная воронка задана законом $r_horn(z) = R - b\sqrt{((|z|/a)^2 - 1)}$, $a \le |z| \le L$, где $L = a\sqrt{(1 + (R/b)^2)}$. Опорный радиус фокального кольца равен R. Соответствующие внешние фокусы в меридиональном сечении: $F_- = (-c, R)$ и $F_+ = (+c, R)$, где $c = \sqrt{(a^2+b^2)}$. При осесимметричном вращении эти точки образуют внешние фокальные кольца радиуса R.

Строго определённая смещённая диагностическая полоса задана $r \in [R+\delta, R+\delta+R2]$, где R2 — абсолютная радиальная ширина, δ — смещение нижней границы относительно опорного фокального радиуса. Для главного варианта $\delta = 0{,}0525$ и $R2 = 0{,}009$, следовательно $M1 = [0{,}5525; 0{,}5615]$. Это соглашение необходимо отличать от физического отверстия в материальной маске, которое может быть шире: материальная функция открывает стенку на эффективном радиальном интервале, захватывающем часть её конечной толщины.

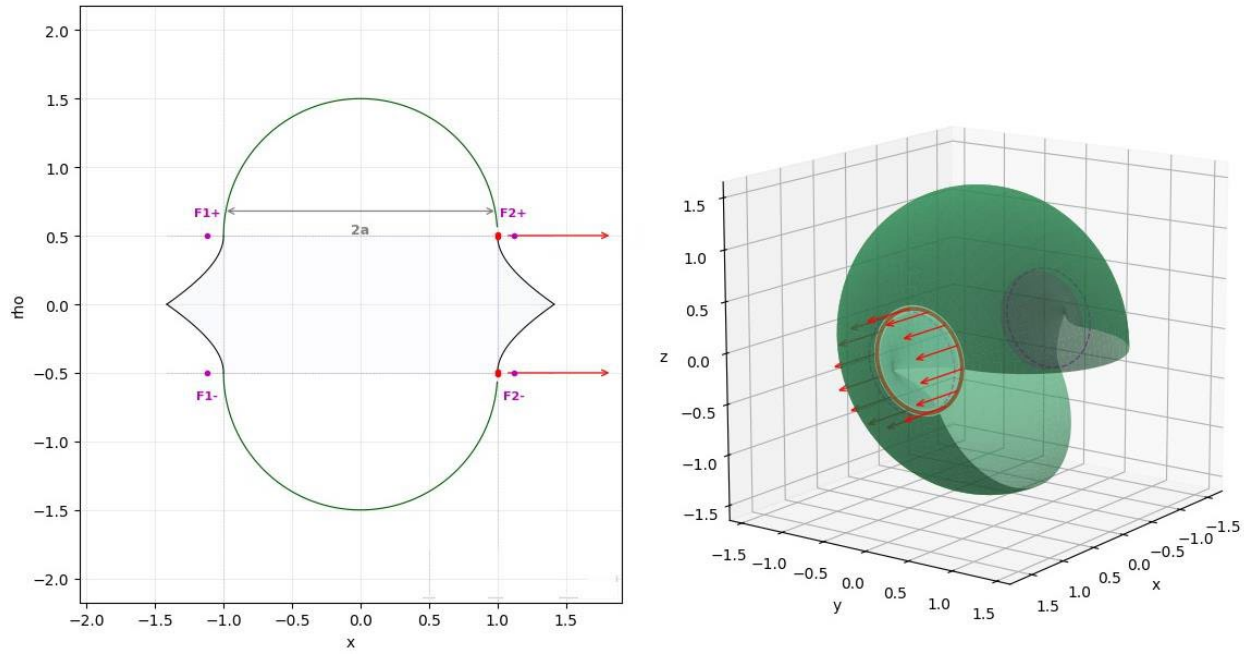

Рисунок 2. Построение РНВ: двумерный и трёхмерный виды.

Основная диагностическая плоскость M1 расположена в выбранной выходной полосе. Для главного строгого варианта M1 охватывает [0,5525; 0,5615]. Дальняя диагностическая плоскость M2 позволяет проверить сохранение распределения ближнего поля далее по ходу распространения. Карты поля регистрируются во внутренней области, фокальном коридоре, около щели, перед щелью и после неё. Диагностика координат источников и исключение их окрестностей необходимы, поскольку наиболее сильные исходные внутренние пики E^2 могут быть артефактами близости к источнику. Поэтому устойчивый вывод опирается прежде всего на особенности около щели и фокального коридора, не зависящие от источника, а не на некритическое истолкование отдельного глобального пика.

Расчёт с материальной маской вносит дополнительную поправку. Физическое окно может оказаться шире номинальной полосы M1. Для контроля R2 = 0,03 номинальная полоса M1 — [0,5525; 0,5825], тогда как окно маски, отображаемое в ближней к щели карте, примерно охватывает r от 0,5357 до 0,5993. Поэтому M1 следует рассматривать как диагностическую подполосу внутри более широкого физического отверстия. Это не отменяет обнаружения S_r = 0, но меняет трактовку: речь идёт не о выходе всей апертуры, а об отборе потока Пойнтинга подполосой.

В комплект данных статьи входят сводная электронная таблица, CSV-таблицы, извлечённые профили M1/M2, метрики областей карт поля, координаты источников, диагностика материальных масок и масок источников, а также выбранные карты поля. Статья обобщает физические выводы, тогда как полный набор таблиц позволяет независимо перепроверить каждый расчётный случай.

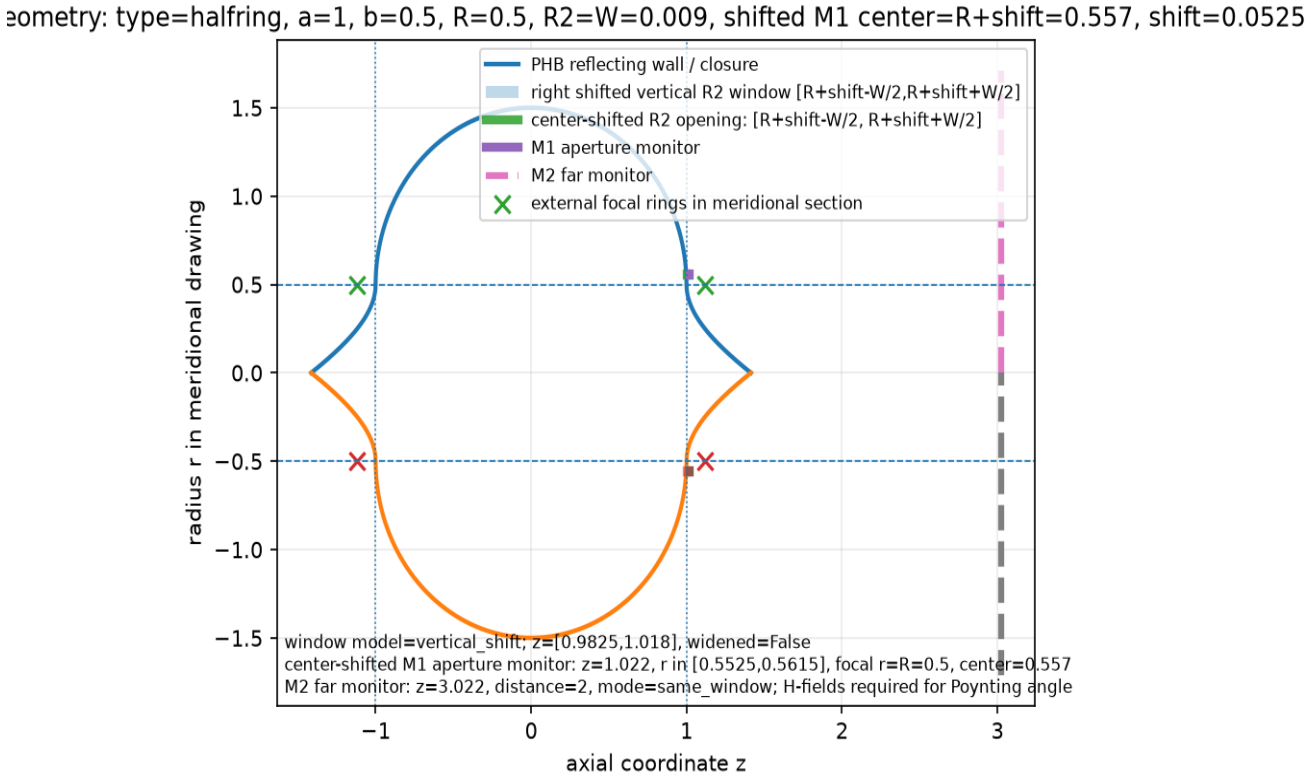

Рисунок 3. Геометрия PHB с полутороидальным замыканием и расположение датчиков ближнего поля.

Локальный усреднённый по времени вектор Пойнтинга вычислялся из комплексных частотных FDTD-полей с точностью до общего положительного множителя нормировки:

$$\langle S \rangle = 1/2\ \mathrm{Re}(E \times H^*).$$

Для отсчётов прямого потока $S_z > 0$ полоидальный угол в меридиональной плоскости r–z определён как:

$$\theta_{rz} = \mathrm{atan2}(|S_r|, S_z).$$

Соответствующий полный трёхмерный угол относительно направления +z вычислен как:

$$\theta_{3D} = \mathrm{atan2}(\sqrt{(S_r^2 + S_\varphi^2)}, S_z).$$

Пример с материальной маской является отдельным диагностическим расчётом широкой апертуры. Его не следует смешивать с последующим согласованным сравнением PHB и прямолинейной геометрии при m = 0, R2 = 0,03, смещении нижней границы 0,035 и M1 = [0,535; 0,565].

3. Основной обнаруженный эффект: смещённая кольцевая концентрация показателя E^2

Важнейшее физическое истолкование всего набора данных состоит в том, что PHB не просто направляет энергию вдоль номинального фокального цилиндра r = R. Вместо этого возникают смещённые кольцевые зоны E^2, радиальное положение которых зависит от моды и локальной геометрии границы и щели. Это не случайные локальные максимумы. Они воспроизводятся в одном семействе диагностических областей и коррелируют со знаком S_r и полоидальным углом вектора Пойнтинга; именно они составляют физическую основу наблюдаемого управления его направлением.

Для варианта m = 1, R2 = 0,009 максимумы E^2 в полных картах около щели и перед щелью находятся приблизительно при r = 0,5815, а после щели максимум смещается примерно к r = 0,5348. Взвешенные по энергии радиальные центроиды в областях около щели, перед ней, после неё и в фокальном коридоре остаются около r ≈ 0,558–0,561. Выбранная полоса M1 [0,5525; 0,5615] лежит внутри этой смещённой кольцевой структуры, а не на номинальном фокальном кольце R = 0,5. В этой полосе S_r меняет знак с отрицательного на положительный, чем объясняются небольшой полоидальный угол и высокий показатель L10.

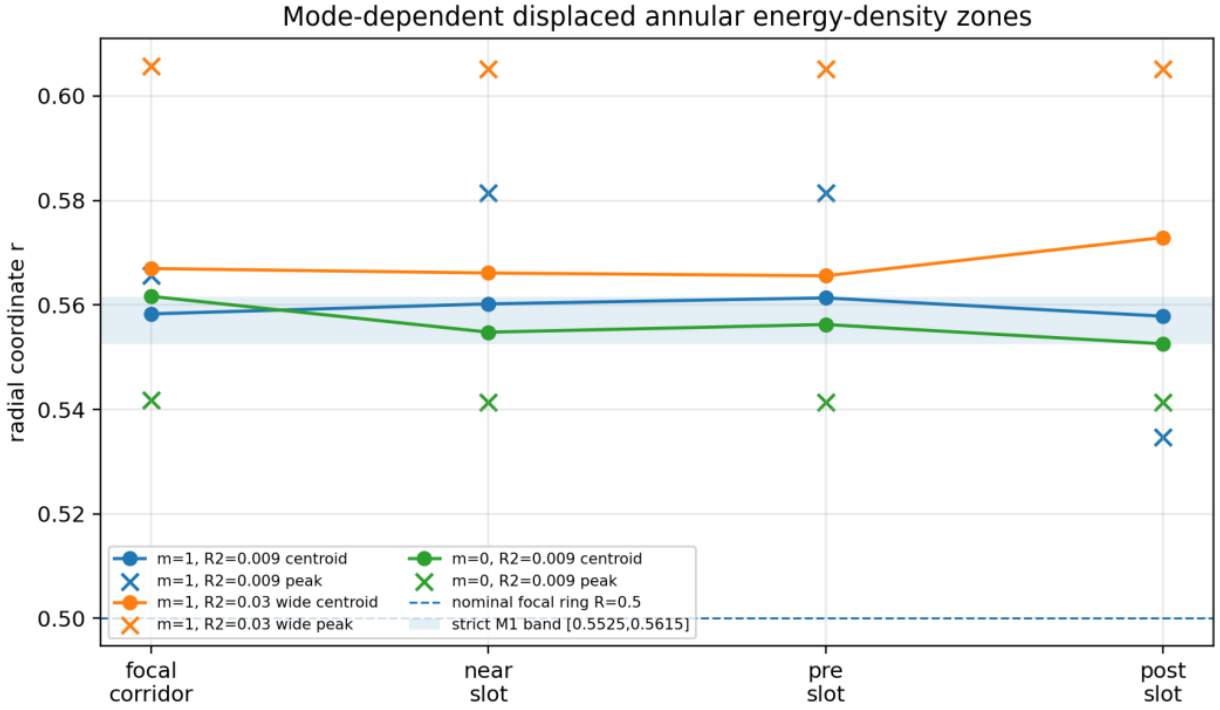

Рисунок 4. Смещённые кольцевые зоны показателя E^2 на картах фокального коридора и областей около щели. Номинальное фокальное кольцо R = 0,5 не совпадает с центром доминирующего распределения вблизи щели.

Таблица 1. Данные карт поля с исключёнными областями источников, подтверждающие смещённую кольцевую организацию E^2.

Случай	Область	r максимума	r центроида	Доля обратного S_z	|S_φ|/|S|	θ95_rz
m=1, R2=0,009, строго смещённая M1	фокальный коридор	0,5657	0,5583	0,6842	0,5958	83,73
m=1, R2=0,009, строго смещённая M1	около щели	0,5815	0,5602	0,0011	0,6574	57,94
m=1, R2=0,009, строго смещённая M1	перед щелью	0,5815	0,5614	0,0024	0,7464	65,92

m=1, R2=0,009, строго смещённая M1	после щели	0,5347	0,5578	0,0006	0,5572	48,13
m=0, R2=0,009, та же M1	фокальный коридор	0,5418	0,5617	0,1293	0,3269	77,25
m=0, R2=0,009, та же M1	около щели	0,5414	0,5548	0,0003	0,1892	64,98
m=0, R2=0,009, та же M1	перед щелью	0,5414	0,5563	0,0006	0,2885	66,29
m=0, R2=0,009, та же M1	после щели	0,5414	0,5526	0,0007	0,0376	57,66
m=1, R2=0,03, широкий контроль с материальной маской	фокальный коридор	0,6057	0,567	0,9725	0,3978	63,69
m=1, R2=0,03, широкий контроль с материальной маской	около щели	0,6051	0,5661	0,0176	0,9215	61,95
m=1, R2=0,03, широкий контроль с материальной маской	перед щелью	0,6051	0,5656	0,0295	0,9714	66,12
m=1, R2=0,03, широкий контроль с материальной маской	после щели	0,6051	0,5729	0,0005	0,5921	52,93

Для строгого контроля m = 0 картина иная. Максимумы E^2 вне окрестностей источников около щели, перед ней и после неё находятся близ r = 0,5414. Центроиды тоже смещены относительно R, но активная зона лежит ниже, чем для оптимального варианта m = 1. Текущая полоса M1 начинается с r = 0,5525 и, следовательно, отбирает преимущественно область с положительным S_r для m = 0. Это не означает принципиальной непригодности моды m = 0; результат показывает смещение радиального слоя баланса и необходимость иного положения окна.

Радиальное смещение здесь оценивается по выборочным картам показателя E^2. Поэтому до прямого вычисления полной электромагнитной плотности энергии термин «слой плотности E^2» необходимо понимать как показатель, характеризующий квадрат электрического поля.

Во всей статье, если не указано иное, под «плотностью» понимается выборочный показатель E^2. Полная электромагнитная плотность энергии U = W_E + W_H не вычислялась. Поэтому

результат не является завершённым доказательством перераспределения полной плотности электромагнитной энергии; это результат диагностики карт поля и вектора Пойнтинга.

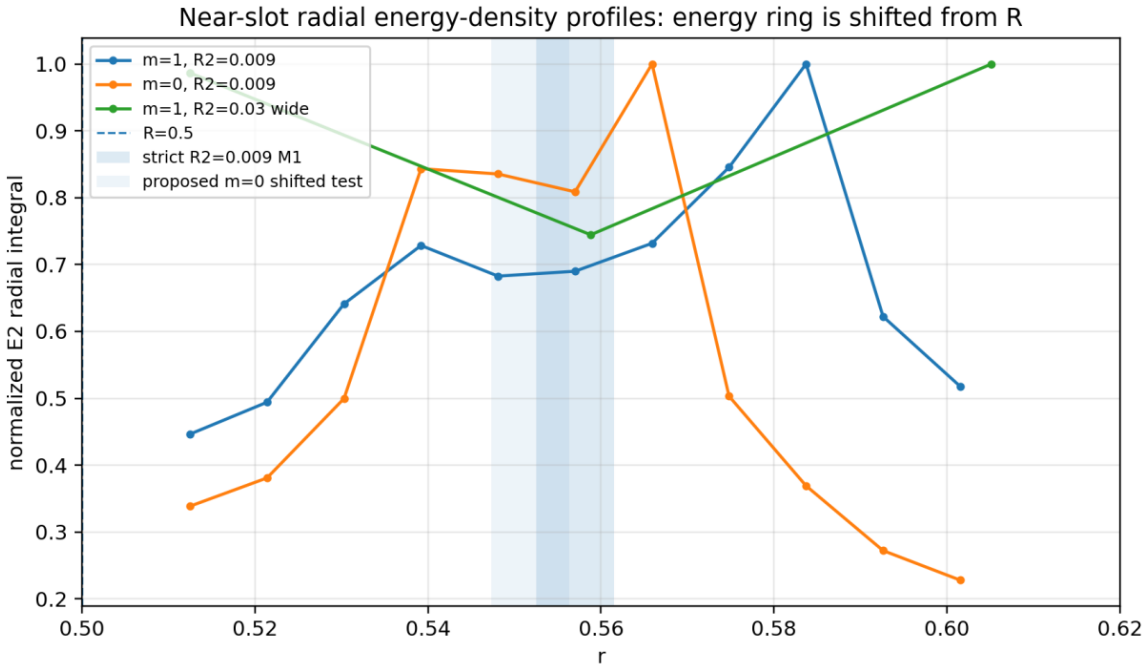

Рисунок 5. Радиальные профили E^2 вблизи щели. Максимум показателя E^2 смещён от номинального фокального кольца и зависит от сочетания моды и окна.

Широкий контроль с материальной маской R2 = 0,03 даёт третье свидетельство. Максимум около щели смещается наружу примерно к r = 0,605. RMS фазы мало, но полоидальная угловая селекция неудовлетворительна. Это ожидаемо, если широкое отверстие усредняет несколько радиальных слоёв: скалярная фаза может выглядеть гладкой, в то время как векторный перенос энергии направлен вбок или по азимуту. Поэтому полезным элементом является не самое широкое окно и не окно с наиболее гладкой фазой, а радиальный слой с требуемым локальным балансом потока Пойнтинга.

Именно этот результат составляет научное ядро статьи. Граница PHB с гиперболической меридиональной стенкой и полутороидальным замыканием может создавать смещённое кольцевое распределение волновой энергии. Направлением выхода затем управляют, выбирая часть этого распределения для отбора. Выбор внутренней стороны даёт отрицательный S_r; выбор слоя баланса — $S_r \approx 0$ и малый полоидальный угол; выбор внешней стороны — положительный S_r и расходящийся веер. В этом смысле PHB становится геометрическим преобразователем вектора Пойнтинга.

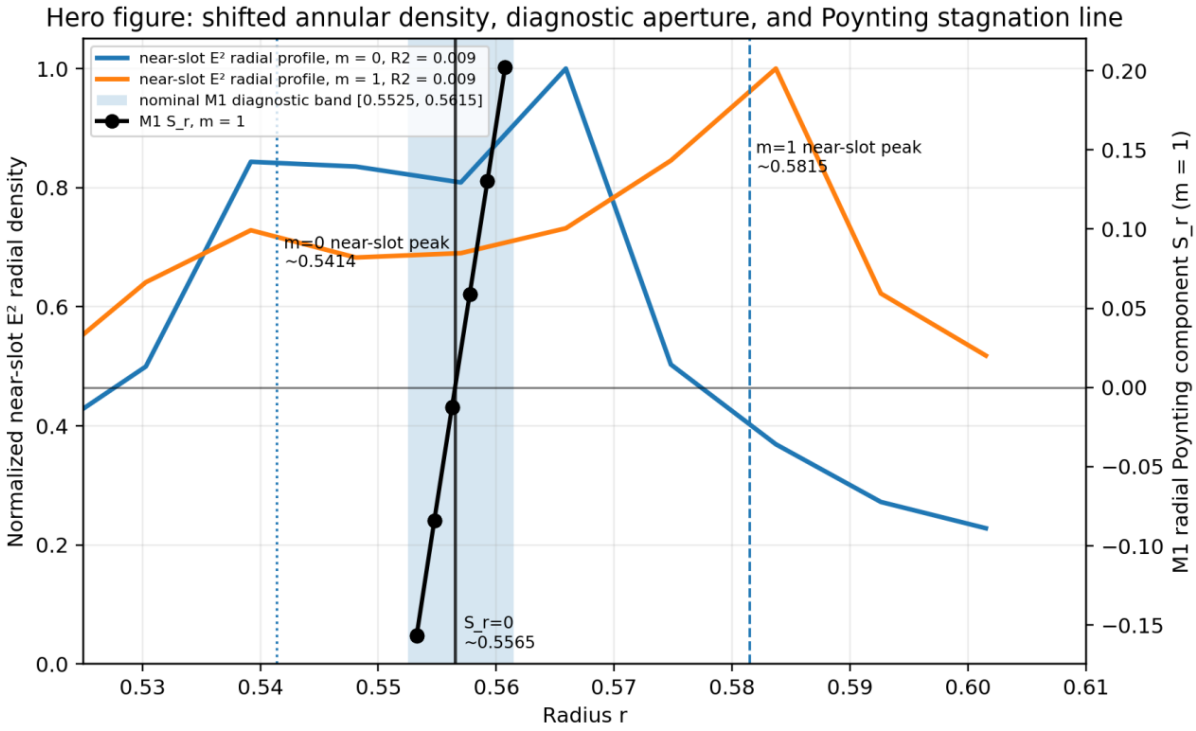

Рисунок 6. Ключевая диагностическая иллюстрация для фиксации приоритета в Zenodo. Смещённые кольцевые распределения E^2 у щели для $m = 0$ и $m = 1$ сопоставлены с номинальной полосой M1 и радиальной компонентой потока Пойнтинга S_r для $m = 1$. Одно и то же радиальное окно пересекает слой баланса $S_r = 0$ при $m = 1$, но не совпадает с максимумом E^2 при $m = 0$.

Рисунок 6 — главное графическое подтверждение утверждения о диагностике узким окном. Он отражает три обстоятельства. Во-первых, распределение E^2 у щели имеет кольцевой характер и смещено относительно опорного радиуса R = 0,5. Во-вторых, величина смещения зависит от моды: при m = 0 максимум радиального распределения около щели ниже, примерно r = 0,541, тогда как для m = 1 он смещён наружу, примерно к r = 0,581 в исследованном профиле карты поля. В-третьих, строгая полоса M1 выбрана не просто как малое отверстие: она находится там, где радиальная компонента вектора Пойнтинга для m = 1 проходит через ноль.

Поэтому одна и та же полоса R2 = 0,009 работает по-разному при m = 1 и m = 0. При m = 1 окно отбирает локальный слой радиального баланса; при m = 0 оно охватывает главным образом одну сторону собственной структуры баланса. Таким образом, здесь документируется новый физический объект — геометрически сформированная, зависящая от моды кольцевая карта E^2, связанная с локальным слоем радиального баланса потока Пойнтинга, который может выбираться окном.

3.1. Максимумы во всём внутреннем объёме и рабочие слои, привязанные к апертуре

При истолковании карт поля необходимо строго различать поточечный максимум на всей внутренней карте r–z, объёмно-взвешенное внутреннее распределение и рабочий слой около щели.

В согласованном широком контрольном расчёте m = 0 поточечный максимум E^2 во всей внутренней области, после исключения источников, располагается в центральной/осевой зоне как для РНВ, так и для прямолинейной геометрии. Это не опровергает характерный кольцевой

эффект РНВ, поскольку он не определяется единственным самым ярким пикселем внутри полости.

Характерный признак РНВ определяется диагностикой близ щели, перед щелью, после неё и в фокальном коридоре, с исключением областей источников. В этих областях гиперболическая образующая эффективнее прямолинейной совмещает рабочий максимум с правым выходным переходом и выбранной полосой M1/R2. Прямолинейная геометрия также может формировать центральный/тороидальный резервуар стоячего поля и локальное пересечение $S_r = 0$, однако её доминирующий максимум у щели оказывается за пределами выбранного диапазона апертуры, а максимум фокального коридора расположен около противоположного левого перехода.

Таким образом, утверждения о кольцевой концентрации следует относить к диагностическому рабочему слою, а не к абсолютному максимуму всей внутренней карты. Предпочтительны термины «смещённый кольцевой рабочий слой», «привязка к выходной стороне апертуры» и «пространственное перераспределение показателя E^2».

4. Зависимость от моды и окна; ограничение, связанное с неодинаковыми случайными конфигурациями источников

Сопоставление имеющихся строгих расчётов $m = 1$ и $m = 0$ не используется как завершённое доказательство фундаментальной модовой зависимости. Оно служит проверяемым указанием на то, что выбранное радиальное окно по-разному взаимодействует с различными рассчитанными конфигурациями поля. Поскольку случайные реализации источников неодинаковы, окончательный вывод о зависимости от моды требует последующих исследований с идентичным расположением источников, аналитическим модовым возбуждением либо статистическим усреднением по реализациям.

Оба строгих варианта используют $R2 = 0{,}009$ и одну номинальную полосу M1 [0,5525; 0,5615]. При $m = 1$ величина S_r отрицательна в нижней части полосы, приближается к нулю вблизи $r \approx 0{,}556–0{,}557$ и становится положительной ближе к верхнему краю. Полоса пересекает линию радиального баланса. При $m = 0$ значение S_r положительно на всём исследованном интервале M1: полоса уже находится выше соответствующего слоя баланса.

Тем не менее имеющиеся строгие расчёты $m = 0$ и $m = 1$ не являются полностью изолированным однофакторным сравнением, поскольку использовали неодинаковые случайные конфигурации источников. Поэтому результат следует рассматривать как воспроизводимое указание на зависимость от сочетания моды и окна, подтверждённое картами поля и профилями апертуры, но не как завершённое статистическое доказательство для всех реализаций источников.

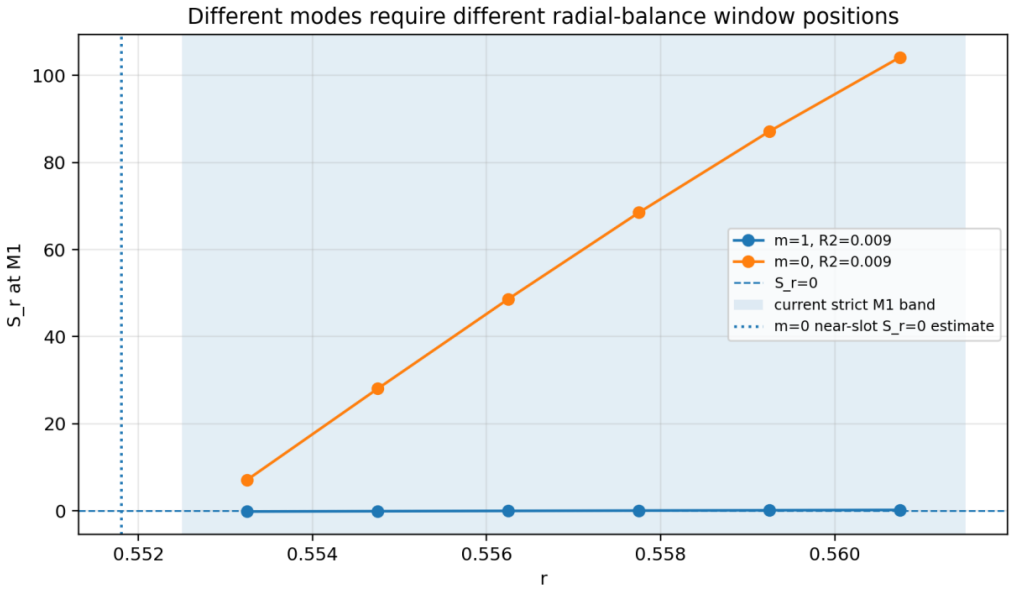

Рисунок 7. Профили S_r в M1 для m = 1 и m = 0. Одно и то же окно пересекает слой баланса при m = 1, но расположено выше него при m = 0.

Следовательно, результат при m = 1 нельзя объяснить только малой шириной апертуры. Он возникает благодаря расположению узкой апертуры поперёк нужного векторного слоя баланса данной моды. Результат при m = 0 не доказывает принципиальную непригодность этой моды, а показывает смещение её слоя радиального баланса относительно текущей полосы M1. Широкий строгий зондирующий расчёт m = 0 даёт интерполированное положение S_r = 0 около r ≈ 0,5539 между радиусами выборки r = 0,55375 и r = 0,55625. Для последующего узкого окна R2 = 0,009 это соответствует ориентировочному интервалу r от 0,5494 до 0,5584, либо смещению нижнего края около 0,0494. Оценку необходимо проверить отдельным строгим расчётом m = 0 с узким окном.

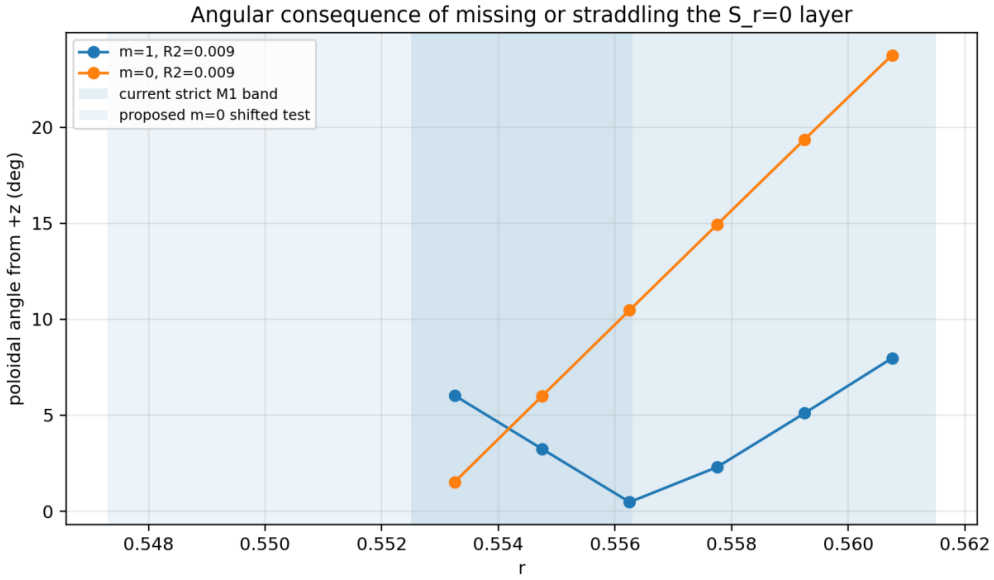

Рисунок 8. Угловое следствие зависимости радиального баланса от моды. Следующей проверяемой гипотезой является смещённое окно для m = 0.

Таблица 2. Сводка трёх случаев, показывающих зависимость управления потоком Пойнтинга от моды и окна.

Случай	m	R2	Полоса M1	θ95 в M1	L10 в M1	Доля S_φ в M1	Интерпретация
m=1, R2=0,009, строго смещённая M1	1	0,009	[0,5525;0,5615]	7,97	1,000	0,641	Окно пересекает слой S_r=0; наиболее сильная полоидальная селекция ближнего поля
m=0, R2=0,009, та же M1	0	0,009	[0,5525;0,5615]	23,75	0,346	0,009	Окно расположено слишком высоко, захватывает область положительного S_r; требуется сканирование меньших смещений
m=1, R2=0,03, широкий контроль с материальной маской	1	0,030	[0,5525;0,5825]	43,65	0,000	0,591	Широкая апертура смешивает слои; плоская фаза не означает направленного векторного потока

Появляется новая и технологически важная степень свободы: выход РНВ нельзя полностью задать одной величиной R2. Необходимо три параметра: номер моды m, радиальное смещение окна и его ширину. Одна геометрия способна по-разному преобразовывать вектор Пойнтинга различных мод. В перспективном устройстве это может обеспечить модоселективную маршрутизацию или выбор направления локального воздействия ближнего поля без изменения всей конструкции. Само поле несёт зависящую от моды кольцевую карту, а выходное окно отбирает её часть.

Сопоставление m = 0 и m = 1 также проясняет роль азимутальной циркуляции. При m = 1 доля S_φ в M1 велика — приблизительно 64 %, следовательно, в ближнем поле присутствует винтовая составляющая. Для m = 0 доля S_φ подавлена примерно до 0,9 %, но угловая селекция при текущем положении окна хуже. Это означает, что наилучшая наблюдавшаяся полоидальная селекция ближнего поля может требовать либо винтовой векторной структуры m = 1, либо правильно смещённого невинтового окна m = 0. Данные не позволяют делать универсальный вывод обо всех модах; они обосновывают утверждение о геометрическом управлении с зависимостью от моды.

5. Согласованный прямолинейный контроль: отделение влияния гиперболической стенки от общих эффектов апертуры

Добавлен согласованный контрольный расчёт: полутороидальное замыкание, ширина апертуры, её смещение, номер моды, разрешение, конфигурация источника и диагностика сохранялись, а гиперболическая меридиональная воронка заменялась прямолинейной образующей. Такой контроль отделяет вклад апертуры и центрального полутороидального замыкания от специфического влияния гиперболической образующей РНВ.

Согласованные случаи используют m = 0, R2 = 0,03, смещение нижней границы 0,035, разрешение 320 и одну номинальную радиальную полосу M1 [0,535; 0,565]. Они намеренно не

представляются как лучший вариант PHB. Это контроль, ориентированный на опровержение гипотезы: если наблюдаемый эффект является тривиальным следствием наличия щели, прямолинейная образующая должна воспроизвести ту же пространственную организацию поля и апертуры. Если у стенки PHB есть особая роль, различие должно проявиться в пространственном перераспределении относительно прямолинейного контроля.

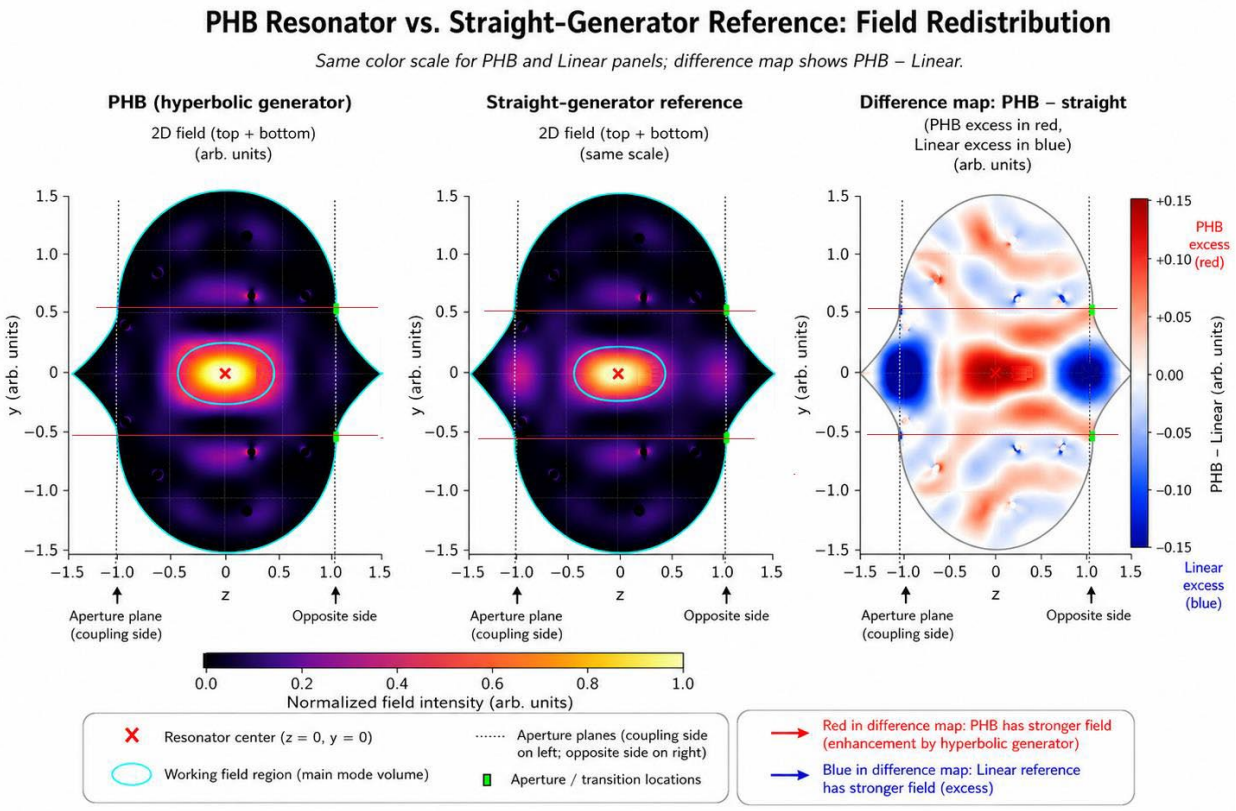

Рисунок 9. Согласованное сравнение PHB и прямолинейной геометрии по полной двумерной внутренней карте в точной геометрии скрипта. Слева — PHB с гиперболической меридиональной образующей; в центре — контроль с прямолинейной образующей, сохраняющий центральное замыкание, правую выходную апертуру, конфигурацию источников и диагностические соглашения, но заменяющий наружные гиперболические участки воронок прямыми. Справа — карта разности PHB минус прямолинейная геометрия. Для первых двух панелей использована одна шкала интенсивности; разность показана расходящейся шкалой. Красным обозначены области преобладания E^2 в PHB, синим — преобладания в прямолинейном контроле. Внешние фокусы PHB отмечены для геометрической ориентации. Верхняя и нижняя полосы справа — зеркальное представление со знаковым радиусом единственной физической выходной апертуры.

Научная интерпретация рисунка 9

Карта разности PHB и прямолинейной геометрии — важнейший новый контрольный результат. Она показывает, что гиперболическая образующая не просто увеличивает энергию поля повсеместно в полости. Центральная область стоячего поля существует в обеих геометриях, причём в некоторых внутренних областях она сильнее в прямолинейном контроле. Поэтому PHB нельзя описывать как равномерный усилитель E^2.

Избирательный вклад PHB проявляется около правого перехода к выходной апертуре, рядом с z = +a и выбранным слоем R2. Наиболее выраженный избыток поля прямолинейного контроля находится у противоположного левого перехода.

Это устанавливает основное физическое различие: гиперболическая образующая перераспределяет рабочую часть внутреннего поля в сторону перехода у выходной апертуры; прямолинейная сохраняет более сильный избыток стоячего поля у противоположного перехода либо в обширном центральном резервуаре.

Следовательно, корректно утверждать не то, что РНВ глобально сосредоточивает всю энергию полости на фокальном кольце, а то, что гиперболическая меридиональная образующая перестраивает внутреннее распределение, благодаря чему рабочие максимумы у щели и в фокальном коридоре лучше совмещаются со слоем выходной апертуры.

В данном широком контрольном случае m = 0 РНВ не превосходит контроль по каждому скалярному показателю выхода. Прямолинейная геометрия формально обеспечивает меньший θ95 в M1 и больший локальный поток через апертуру. Следовательно, выявленная особенность РНВ не состоит ни в большем суммарном извлечении энергии, ни в повсеместно более узком угловом распределении. Подтверждено пространственное различие: РНВ размещает рабочие максимумы около щели и в фокальном коридоре ближе к правому выходному слою, тогда как прямолинейный контроль сохраняет более сильный относительный избыток у противоположного перехода либо в широком центральном резервуаре стоячего поля.

Таблица 3. Показатели согласованного сравнения РНВ и прямолинейной образующей при m=0, R2=0,03, смещении 0,035 и разрешении 320.

Диагностическая величина	Гиперболический РНВ	Прямолинейный контроль	Научная интерпретация
Условия сравнения	m=0; R2=0,03; смещение=0,035; разрешение=320; M1=[0,535;0,565]	те же	Изменяется только меридиональная образующая
θ95_rz в M1	32,21°	27,63°	Широкий выход m=0 не является однозначно лучшим для РНВ: прямолинейный контроль формально уже по θ95
θ50_rz в M1	13,33°	11,05°	Локальный угловой показатель при широком m=0 не доказывает превосходства РНВ
L10 / L20 в M1	44,54 % / 78,69 %	43,19 % / 84,79 %	L10 сопоставим; по L20 в этом расчёте лучше прямолинейный контроль
Поток через апертуру MEEP	23,65	41,35	В широком расчёте m=0 прямолинейный контроль извлекает больший локальный поток
κ_R2_escape_proxy	0,137	0,112	РНВ несколько более избирателен по этому показателю выхода; самого по себе этого недостаточно

Пересечение S_r=0 внутри M1	r≈0,55391	r≈0,55328	Радиальный баланс потока Пойнтинга не уникален для гиперболической стенки
Минимальный полоидальный угол в M1	0,288° при r≈0,55375	0,737° при r≈0,55375	У обоих вариантов есть локальный слой радиального баланса; в этой точке угол PHB несколько ближе к нулю
Поточечный максимум E^2 во всей внутренней области	r=0, z≈−0,0079	r=0, z≈−0,0172	Обе полные карты имеют центральный/осевой поточечный максимум
Трёхмерный объёмный центроид внутреннего поля	r≈0,711, z≈+0,003	r≈0,702, z≈−0,017	Объёмно-взвешенное поле не сосредоточено исключительно на оси; в обоих случаях распределение широко тороидальное/центральное
Максимум E^2 около щели, без источников	r≈0,5362, z≈+1,0016; внутри M1	r≈0,5760, z≈+0,9984; выше M1	PHB совмещает максимум у щели с полосой апертуры; прямолинейная геометрия смещает его наружу
Максимум E^2 фокального коридора, без источников	r≈0,5364, z≈+0,9993	r≈0,5425, z≈−0,9964	PHB располагает максимум коридора у правого выходного перехода, контроль — у противоположного левого
Основной результат	Избирательное перераспределение к выходной апертуре	Обширный резервуар стоячего поля с максимумом у щели за пределами окна	Эффект PHB — пространственное перераспределение и привязка к апертуре, а не равномерное усиление энергии

6. Физический механизм: от кривизны к кольцевой области и управлению знаком S_r

Предлагаемый механизм включает четыре этапа. Во-первых, граница PHB задаёт криволинейное гиперболическое меридиональное граничное условие вместо плоского либо цилиндрического. Такая стенка не просто отражает поле подобно плоскости: она изменяет локальную взаимосвязь радиальной, осевой и азимутальной компонент потока энергии. Во-вторых, полутороидальное замыкание и край щели формируют область, где показатель E^2 перераспределяется в кольцевой слой, смещённый относительно номинального фокального радиуса. В-третьих, радиальная компонента S_r меняет знак внутри этого смещённого слоя или вблизи него. В-четвёртых, узкая диагностическая полоса M1 либо будущая физическая подполоса выбирает определённую часть векторного поля.

Термин «концентрация энергии» требует осторожности. Наиболее сильные исходные внутренние максимумы не используются как основное свидетельство, поскольку часть из них может быть артефактом близости к источнику. Устойчивый результат не означает

неограниченного накопления энергии. Он состоит в воспроизводимом радиальном смещении признаков E^2, полученных с контролем источников либо независимо от их близости, и их связи с локальной знаковой структурой вектора Пойнтинга. Поэтому РНВ корректнее характеризовать как формирователь кольцевого распределения E^2, а не как простой накопитель энергии.

Управляющей величиной в этом механизме служит знак S_r. Если окно расположено ниже слоя баланса, выбранный поток может иметь один радиальный знак, выше — противоположный; если окно перекрывает нулевое пересечение, полоидальный угол выхода может быть мал, поскольку $|S_r|$ подавлен, тогда как S_z остаётся положительным. Именно такая картина выявлена в строгом варианте $m = 1$ и отсутствует у строгого контроля $m = 0$ при том же расположении окна.

6.1. Гиперболическая образующая как пространственный перераспределитель, а не равномерный усилитель

Согласованный контроль меняет трактовку механизма РНВ. Гиперболическую стенку нельзя описывать как устройство, просто усиливающее E^2 повсюду внутри полости. Она действует как пространственный перераспределитель показателя E^2 и локального поля вектора Пойнтинга. Центральная область стоячего поля сохраняется, но гиперболическая образующая избирательно усиливает рабочую часть около выходной апертуры относительно прямолинейного контроля.

Это согласуется с векторной интерпретацией потока Пойнтинга. Значимой проектной переменной является не общая скалярная яркость полости, а радиальное и осевое положение слоя, из которого апертура отбирает локальный поток энергии. Стенка РНВ изменяет пространственное соответствие между внутренней организацией поля и выходной апертурой. Прямолинейная стенка воспроизводит некоторые общие эффекты стоячих волн и апертуры, но без столь же выраженной привязки рабочего слоя к выходной стороне.

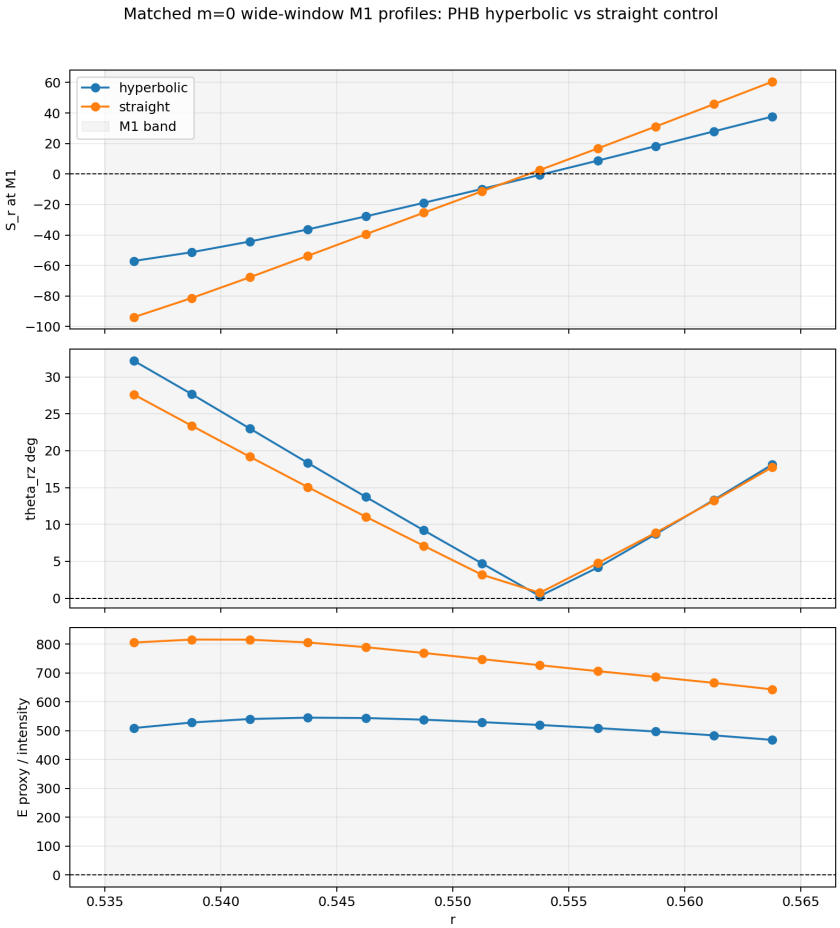

Рисунок 10. Сопоставление профилей M1. Согласованный широкий контроль m=0 показывает, что S_r=0 может возникать как в PHB, так и в прямолинейной геометрии; следовательно, само S_r=0 не является уникальным признаком PHB. Специфическая интерпретация должна опираться на взаимное расположение слоя радиального баланса, локального максимума E² и диагностического слоя у выходной апертуры.

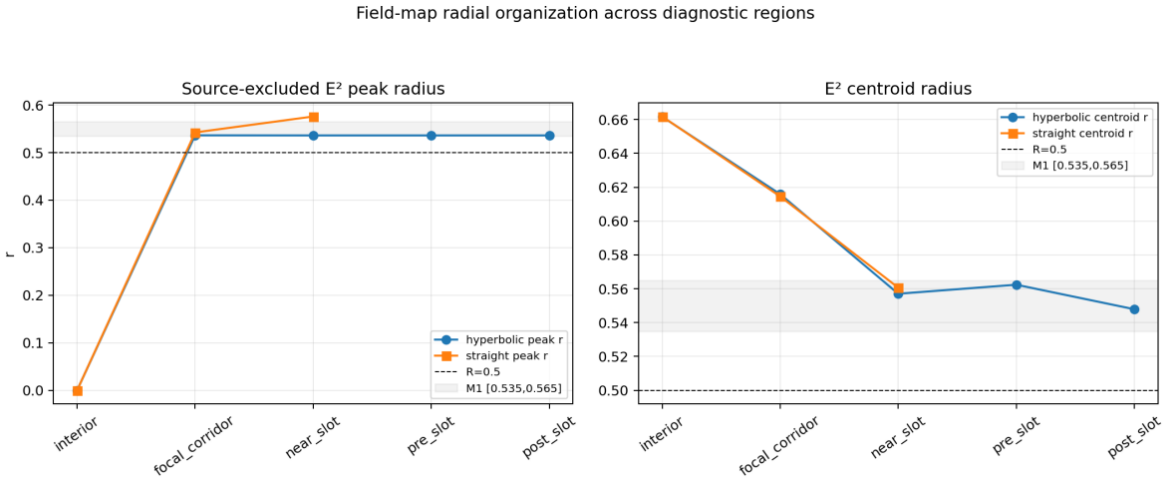

Рисунок 11. Сопоставление максимумов и центроидов по областям. Иллюстрация подчёркивает, что наиболее информативное различие связано не с глобальным максимумом всей внутренней карты, а с положением максимумов и центроидов без областей источников около щели и в фокальном коридоре.

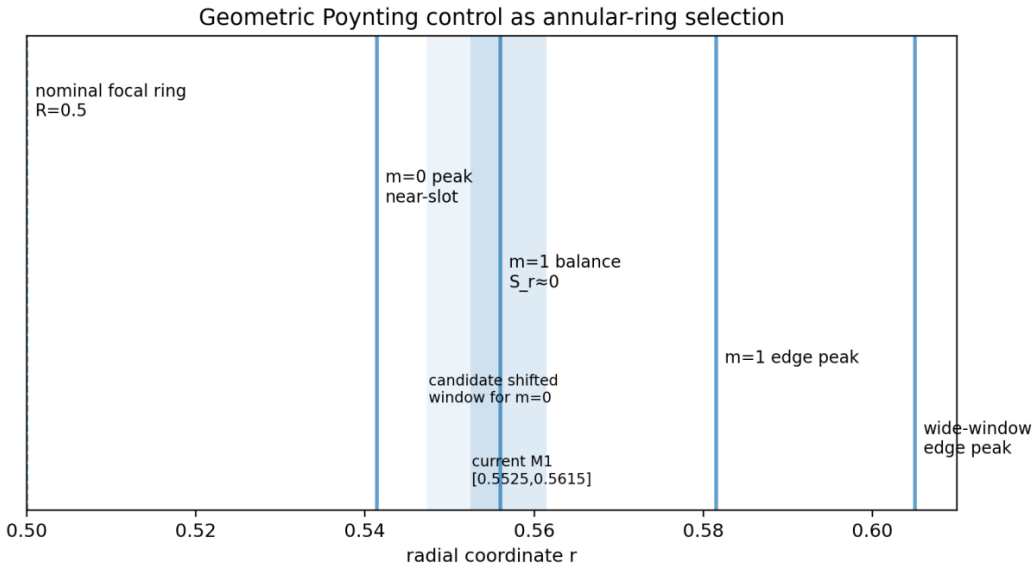

Рисунок 12. Концептуальное обобщение: геометрия формирует смещённую кольцевую карту E^2, а радиальное окно выбирает локальный знак и угол вектора Пойнтинга.

Широкий контроль R2 = 0,03 объясняет, почему ширина апертуры столь же важна, как её смещение. Широкая полоса одновременно захватывает несколько слоёв векторного потока. Даже при гладкой скалярной фазе векторный поток усредняется по направленным внутрь, сбалансированным и направленным наружу составляющим. В результате угловое распределение расширяется и меридиональная селекция ослабевает. Поэтому проектирование управления потоком Пойнтинга с помощью PHB необходимо рассматривать как задачу выборки векторного поля, а не как традиционную задачу пропускной способности отверстия.

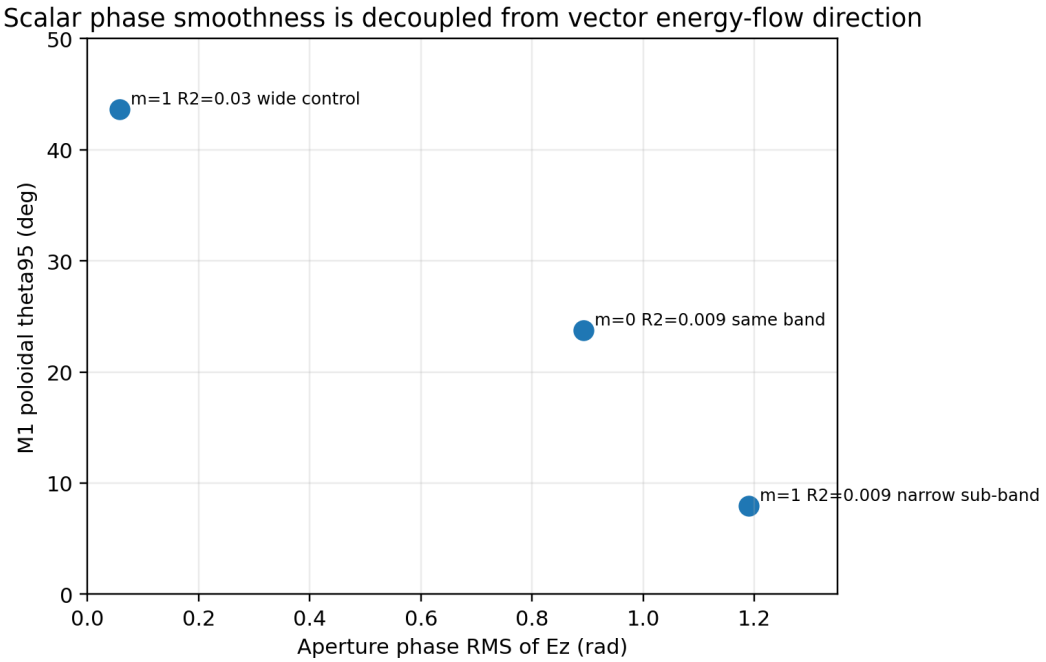

Рисунок 13. Фазовый парадокс: гладкость скалярной фазы и направление векторного потока Пойнтинга не определяют друг друга однозначно. Широкий контроль R2 = 0,03 имеет почти плоскую фазу, но большой угол θ95 в M1, тогда как узкая диагностическая подполоса m = 1 демонстрирует высокий RMS фазы и сильную локальную полоидальную упорядоченность.

7. Ограничения M2, материальной маски и согласованного контроля: что не следует из представленных данных

Согласованный контроль с прямолинейной образующей одновременно вводит важное ограничение и усиливает достоверность более узкого результата. Он ограничивает утверждение, поскольку локальное пересечение S_r = 0 и сопоставимый угловой отклик широкой апертуры наблюдаются также в негиперболическом прямолинейном контроле. Поэтому само по себе S_r = 0 не является уникальным радиальным маркером баланса гиперболической стенки РНВ. Вместе с тем контроль усиливает вывод, поскольку карта разности выявляет более конкретный эффект РНВ: гиперболическая образующая перераспределяет внутреннее поле, создавая положительный избыток около правого перехода к выходной апертуре, тогда как максимальный относительный избыток прямолинейной геометрии сохраняется около противоположного левого перехода.

Таким образом, представленные данные подтверждают механизм геометрически управляемой селекции вектора Пойнтинга в ближнем поле, но не создание коллимирующего устройства для дальней зоны. Диагностика M2 и материальных масок остаётся важной защитой от чрезмерных интерпретаций. Для количественных проектных законов необходимы дальнейшие проверки сходимости при высоком разрешении, статистическое повторение с источниками и сканирование смещения для обеих геометрий.

Диагностика M2 опровергает представление, будто узкий слой M1 уже формирует узкое поле при дальнейшем распространении. Для варианта m = 1, R2 = 0,009 угол θ95_rz увеличивается примерно с 7,97° в M1 до 35,94° в M2, а L10 снижается со 100 % примерно до 23,6 %.

Это не опровергает открытие в ближнем поле, а точно определяет область его применимости. В настоящее время РНВ подтверждён как селектор и преобразователь вектора Пойнтинга, но не как доказанное устройство формирования пучка дальней зоны.

Результат с материальной маской выявляет второе существенное ограничение: физическое окно может быть шире номинальной полосы M1. Такое расширение возникает из-за представления конечной толщины стенки материальной маской в диагностической реализации V47.2 и специально проверено в варианте V47.3 со строгим определением апертуры. Следовательно, нельзя утверждать, что вся физическая апертура излучает узконаправленно на основании результата M1. Корректная формулировка: узкая диагностическая либо потенциальная физическая подполоса внутри более широкого отверстия. Это методологическое уточнение усиливает статью, поскольку ясно определяет измеренную величину.

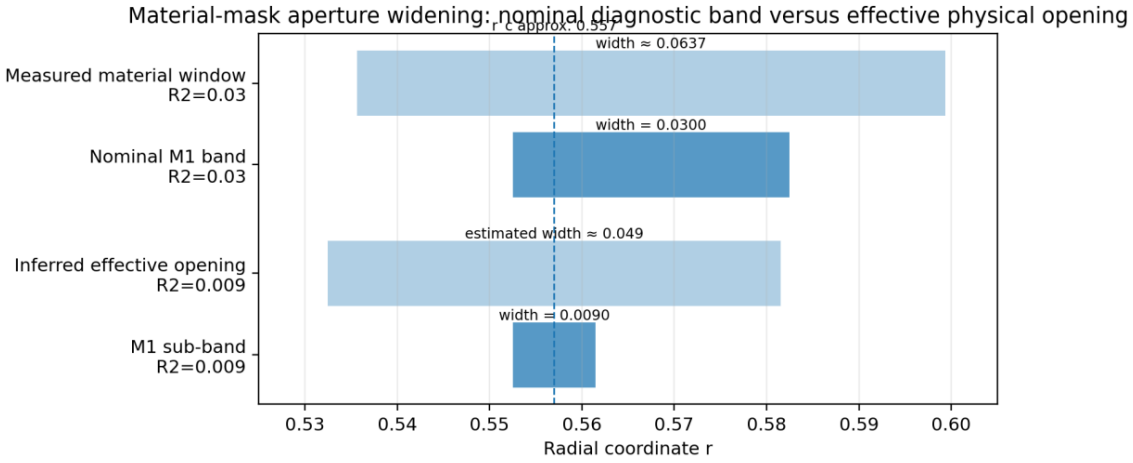

Рисунок 14. Поправка на материальную маску: физическое отверстие около щели может быть шире номинальной диагностической полосы M1.

Первая численная уязвимость — апертура шириной примерно четыре ячейки. Основной вариант R2 = 0,009 при разрешении 448 занимает около 4,03 сеточной ячейки по ширине номинальной диагностической полосы. Этого достаточно, чтобы выделить воспроизводимый кандидат на векторный баланс ближнего поля, но недостаточно, чтобы объявлять точное значение локального угла сеточно-сошедшимся. В работе фиксируются смещение центроида и, для кандидата m = 1, пересечение $S_r = 0$ в области $r \approx [0{,}552; 0{,}561]$. Численное значение $\theta_{95} = 7{,}97°$ — показатель ближнего поля, полученный на четырёхъячеечном профиле апертуры. Для окончательного значения угла требуется отдельная проверка сходимости.

Это ограничение не отменяет приоритета, поскольку главное утверждение не касается последнего десятичного знака θ_{95}. Устойчивый вывод — зависящее от моды смещение кольцевого распределения E^2 и различное положение слоя баланса S_r при m = 1 и m = 0. Его подтверждают центроиды более широких карт поля, расположения максимумов с исключёнными источниками, диагностика масок и строгое сравнение m = 0 / m = 1, а не только четырёхъячеечный профиль M1.

Вторая терминологическая уязвимость снимается приведённым выше явным определением геометрии. Выражение «псевдогиперболоидальная граница PHB» не означает расплывчатую либо произвольную поверхность.

Речь идёт о вычислительной границе конечной толщины, построенной по PHB, с меридиональным каркасом, подчиняющимся гиперболическому радиальному закону, тогда как физическая модель включает полутороидальное замыкание, материальные маски и выходное окно. Поэтому употребляется слово «граница PHB»: рассматриваемый объект является составной волновой границей, а не единым идеальным гладким гиперболоидом.

Таблица 4. Меры предосторожности, добавленные в статью Zenodo с учётом возможных замечаний рецензента.

Уязвимость	**Риск**	**Как статья ограничивает утверждение**
Апертура в 4 ячейки	R2 = 0,009 при разрешении 448 даёт около 4,03 ячейки поперёк M1	$\theta_{95} = 7{,}97°$ используется как показатель ближнего поля, а не окончательный сошедшийся угол; требуется проверка при res ≥ 800
Терминология	Без формулы термин «граница PHB» может выглядеть тавтологично	Явно определены гиперболический каркас, конечная толщина стенки, полутороидальное замыкание, материальная маска и маска окна
Расширение апертуры материальной маской	Физическое окно может быть шире диагностической полосы M1	M1 трактуется как диагностическая подполоса внутри более широкого отверстия около щели
Распространение далее	Расширение в M2 опровергает утверждение о готовом коллиматоре дальней зоны	Приоритет ограничен управлением вектором Пойнтинга и локальной фильтрацией потока в ближнем поле

Эти ограничения уточняют и технологическую интерпретацию. Ближайшая область применения — не дальнее распространение, а локальное управление энергопотоком:

маршрутизация в ближнем поле, извлечение поля у края, селекция потока с учётом моды, управление поверхностными силами, интегральные и направляемые волновые системы, где локальное направление вектора потока важнее угловой расходимости дальней зоны.

Следующий решающий этап проверки — не очередной предварительный расчёт с широкой апертурой, а сканирование смещения, зависящего от моды, и тест сходимости при более высоком разрешении. Для m = 0 в строго определённом окне следует исследовать смещения нижней границы 0,0450; 0,0475; 0,0494; 0,0500 и 0,0525, считая 0,0494 центральным интерполированным кандидатом по широкому строгому расчёту. Для m = 1 требуется расчёт примерно при res = 800, чтобы проверить сохранение пересечения $S_r = 0$ и минимума θ на более тонкой сетке.

Локализация эффекта в ближнем поле ограничивает непосредственные технологические выводы. Представленные данные не показывают свободно распространяющегося пучка или механизма извлечения излучения в дальней зоне. Практическое использование потребовало бы конструкции, в которой внешний элемент непосредственно связан с ближним полем: например, субволнового зонда, интегрального волновода, эванесцентного ответвителя либо элемента поверхностного силового воздействия, помещённого рядом с апертурой. Передача пучка на большие расстояния выходит за рамки подтверждённых результатов.

8. Технологические перспективы: значение управления потоком Пойнтинга одной геометрией

Технологическая ценность результата не в том, что исследованный РНВ уже выполняет функцию готового устройства. Она состоит в выявлении управляемой физической переменной для будущих приборов: радиального положения зависящего от моды кольцевого рабочего слоя E^2 относительно выбранной подполосы. Эта переменная геометрическая. Её можно изменять кривизной РНВ, параметрами полутороидального замыкания, смещением и шириной окна, а также способом возбуждения моды.

Одно из возможных направлений — клапан вектора Пойнтинга. В таком устройстве геометрия не просто открывает или закрывает путь энергии, а выбирает, направлена ли локальная радиальная компонента потока внутрь, находится в балансе или направлена наружу. Обычный клапан интенсивности управляет количеством проходящей энергии; клапан вектора Пойнтинга — локальным направлением её переноса. Это иной класс функциональности.

Второе направление — маршрутизация с учётом моды. Поскольку карты m = 0 и m = 1 характеризуются разными слоями баланса, одна геометрия границы РНВ потенциально может по-разному направлять либо фильтровать моды посредством окон с разными радиальными смещениями. Это может быть полезно в интегральных волновых системах, где требуется разделять модовые состояния без громоздких традиционных преобразователей мод.

Таблица 5. Возможное технологическое значение механизма управления потоком Пойнтинга в РНВ.

Направление	**Физический смысл**
Клапан вектора Пойнтинга	Геометрия выбирает радиальный поток внутрь, состояние баланса или поток наружу, а не только изменяет проходящую интенсивность
Модоселективная маршрутизация	Разные моды имеют разные кольцевые слои баланса и могут разделяться радиальным положением окон
Датчики ближнего поля	Малое возмущение смещает слой $S_r=0$ и обнаруживается по изменению угла либо знака

Извлечение краевого поля	Структуры около щели обеспечивают извлечение выбранных компонент прямого потока из сложных внутренних полей
Интегральные волновые системы	Геометрия становится пассивной управляющей переменной локального направления энергопотока в компактных компонентах
Аналогии в других физических областях	Принцип можно проверять в электромагнитных, акустических, упругих и направляемых волновых системах

Третье направление — датчики ближнего поля. Если небольшое изменение границы, внешней среды или локальной нагрузки сдвигает кольцевой слой E^2 либо линию $S_r = 0$, выходной угол или знак S_r могут стать чувствительными диагностическими величинами. Вместо измерения одной интенсивности датчик мог бы регистрировать направление векторного потока, подавление обратного потока либо радиальное смещение слоя баланса Пойнтинга.

Четвёртое направление — геометрически программируемое управление силой и крутящим моментом в структурированных ближних полях. Поле с управляемыми компонентами S_r, S_z и S_φ способно оказывать различное локальное силовое либо вращательное воздействие на небольшие объекты и поверхности.

Имеющиеся данные не демонстрируют такой исполнительный механизм, но определяют тип векторного управления полем, необходимый для соответствующей технологии.

Более общий вклад носит концептуальный характер. Данные РНВ позволяют предположить новое семейство волновых компонентов с границей РНВ, в которых геометрия создаёт внутреннее кольцевое распределение показателя E^2, а выход формируется путём отбора определённой части этого распределения. Подход потенциально переносим на электромагнитные, акустические, упругие либо волны материи, если для них можно определить и измерить локальный вектор потока энергии.

Эти технологические трактовки являются перспективными предположениями, а не доказанными функциями устройства. Статья выявляет только величину ближнего поля, которую могут использовать будущие устройства: взаимное положение апертуры, рассчитанного рабочего слоя E^2 и локальной области радиального баланса потока Пойнтинга.

9. Итоговое утверждение и программа проверки

Итоговое положение статьи: представленные FDTD-данные формируют воспроизводимую вычислительную основу приоритета геометрического управления локальным потоком электромагнитной энергии в псевдогиперболоидальной структуре. Особенность РНВ — не уникальное создание линии радиального баланса потока Пойнтинга и не доказанный коллимированный пучок дальней зоны. Подтверждённый эффект заключается в обусловленном гиперболической образующей перераспределении показателя E^2 и привязке рабочего слоя около щели к выходной апертуре, что изменяет отбор локального вектора Пойнтинга выбранным радиальным окном. В согласованном прямолинейном контроле также возникают общая центральная концентрация стоячего поля и локальное пересечение $S_r = 0$, но преобладающие максимумы около щели и фокального коридора менее удачно совмещены с выходной апертурой. Сопоставление определяет кривизну РНВ как геометрический механизм перераспределения поля в рамках геометрической волновой инженерии.

Более сильное утверждение потребует проверки сходимости, независимого воспроизведения другим решателем, систематического сканирования номера моды, смещения и ширины окна, а также геометрии полутороидального замыкания. Первый практический шаг — сканирование смещения $m = 0$ около расчётного радиуса баланса и тест сходимости при $res = 800$ для варианта $m = 1$, $R2 = 0{,}009$. Если пересечение $S_r = 0$ и угловой минимум сохранятся,

доказательная база геометрического механизма управления потоком Пойнтинга существенно укрепится.

Статья предназначена для фиксации приоритета в Zenodo, поскольку ограничивает утверждения вычислительными свидетельствами ближнего поля и исключает чрезмерные выводы. Она документирует численные данные, отвергнутые интерпретации и подтверждённый механизм ближнего поля, фиксируя новый физический объект: смещённый кольцевой слой показателя E^2 у границы PHB, выборка которого позволяет управлять локальным вектором Пойнтинга.

Техническое значение состоит в том, что будущий волновой компонент может управлять потоком энергии не только показателем преломления материала, поглощением, активной модуляцией или внешними фазовыми масками. Управление возможно через физическую либо диагностическую апертуру, расположенную в нужном радиальном слое баланса, сформированном самой геометрией. В этом заключается зафиксированное здесь приоритетное положение геометрической волновой инженерии.

10.Точное определение PHB и комплект воспроизводимости Zenodo

В версии для Zenodo название и приоритетные утверждения сформулированы консервативно: заявлены подтверждённые результаты о зависящих от моды радиальных слоях баланса ближнего поля, смещённом кольцевом распределении показателя E^2 и результатах согласованного контроля пространственного перераспределения к апертуре. Не заявляются коллиматор дальней зоны, готовый излучатель либо устойчивый распространяющийся вихревой пучок.

Цепочка «данные — скрипты — текст» подробно определена в архивном комплекте. Вычислительная воспроизводимость механизма модозависимого смещения центроидов обеспечивается сравнением выходов fieldmap_near_slot и профилей апертуры M1 для строгих расчётов m = 1 и m = 0, а также согласованных контрольных случаев V47.4 PHB против прямолинейной геометрии при R2 = 0,03, смещении 0,035 и разрешении 320. Сопоставление использует области карт поля с исключением источников, профили S_r в M1, контроль M2 ниже по потоку и парную таблицу сравнения PHB с прямолинейной геометрией.

Запись Zenodo содержит сводную электронную таблицу, полный комплект CSV, пакет скриптов и точные архивы выполненных расчётов. Решающий путь воспроизведения: сравнить карты около щели для m = 1 и m = 0; извлечь радиальные центроиды и положения максимумов E^2; сравнить профили S_r в M1; проверить, что окно m = 1 пересекает S_r = 0, тогда как то же окно m = 0 его не пересекает; изучить расчёт материальной маски R2 = 0,03 как ограничение широкой апертуры; изучить контроль V47.4 «гиперболическая против прямолинейной образующей» как проверку гипотезы на опровержение.

Статью следует понимать как фиксацию приоритета нового геометрического способа локального управления волновым потоком. Перспективный технологический путь — проектирование элементов с границей PHB, в которых геометрия позволяет выбирать радиальный знак и угол локального вектора Пойнтинга перемещением апертуры относительно зависящих от моды кольцевых рабочих слоёв E^2.

Узкое окно R2 = 0,009 разрешено сеткой минимально. При приведённом разрешении оно занимает лишь около четырёх ячеек в выбранной полосе M1. Поэтому пересечение S_r и связанный с ним угловой минимум следует рассматривать как кандидат на признак радиального баланса, а не как сеточно-сошедшуюся топологическую линию. Перед утверждениями о независимой от сетки топологии или количественных проектных законах необходима проверка сходимости, предпочтительно при res ≥ 800, с тем же строгим определением апертуры.

Что не утверждается. Данная публикация не заявляет: (i) уникальной топологической линии стагнации потока Пойнтинга на стенке PHB; (ii) сеточно-сошедшейся топологии S_r = 0 для четырёхъячеечной апертуры R2 = 0,009; (iii) завершённого доказательства фундаментальной модовой зависимости, независимой от реализации источников; (iv) перераспределения полной плотности электромагнитной энергии, поскольку карты поля используют E^2 как показатель; (v) коллимации пучка в дальней зоне. Эти ограничения определяют следующие этапы верификации.

Литература

A. F. Oskooi et al., MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method, Computer Physics Communications 181, 687–702 (2010).

A. Taflove and S. C. Hagness, Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, Artech House.

J. D. Jackson, Classical Electrodynamics, 3rd ed., Wiley.