Геометрическая волновая инженерия

Пассивное кодирование направления для акустических и электромагнитных волн

Единая псевдогиперболоидная архитектура в акустическом FDTD и Maxwell/FDTD

Хаустов Владимир Игоревич

ORCID: 0009-0007-3657-2309

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

Лицензия: CC BY 4.0

Дата публикации: 8 августа 2026 года

DOI: 10.5281/zenodo.21851952

Научно-технический перевод с английского языка.

Редакция, адаптированная для русскоязычного инженера-исследователя.

Оригинал: Khaustov. V. Passive Geometric Direction-to-State Encoding in Second-Order Pseudohyperboloidal Cavities: Cross-Physics Computational Evidence and Scientific Priority Disclosure within Geometric Wave Engineering. https://doi.org/10.5281/zenodo.21851952

Аннотация

Для псевдогиперболоидных полостей второго порядка (PHB-2) формулируется и вычислительно оценивается архитектура пассивного геометрического преобразования направления в состояние с использованием независимых лучевых, акустических FDTD- и Maxwell/FDTD-моделей.

Независимые вычислительные ветви устанавливают различные части положения. Точные лучи подтверждают закон гиперболического отражения и фокальную сепаратрису, тогда как при обычном плосковолновом возбуждении заселённость ниже равномерного эталона: G=0.7922 в 2D и G=0.33354 в полном 3D. Специально согласованное по фазе и фокусу периодическое семейство достигает G=13.763 в исследовательском диагностическом окне после начального переходного участка, охватывающем отражения 5–10, однако PHB-специфическое преимущество уже исчезает при наименьшем проверенном угловом рассогласовании 0.0005° (PHB/C2=0.977) и при малых амплитудных/фазовых возмущениях. Архивная запись не подтверждает, что точные границы 5 и 10 были заранее зарегистрированы как границы метрики характеристик устройства. Распределённая 3D-карта лучей содержит информацию о направлении, однако анализ после исключения ранних отражений показывает существенный вклад раннего транспорта в этот код.

Акустический FDTD устанавливает воспроизводимое широкополосное состояние, зависящее от геометрии. Знаковая широкополосная координата имеет R^2=0.98893 и 0.99322 на двух сетках. После комплексного вычитания пустого эталона PHB и гладкий контроль равной площади разделены на 54.6597° и 56.0830° в нормированном комплексном пространстве признаков, тогда как их широкополосные уровни остаются почти равными. Полнополевое сравнение на мелкой сетке даёт глобальные отношения PHB/контроль $\Sigma|H|^2$, равные 0.999638 при 0° и около 0.999723 при ±15°, однако медианные локальные спектральные углы остаются 26.54° и 30.81°, что демонстрирует распределённое перераспределение состояния, а не усиление энергии.

Maxwell/FDTD обеспечивает прямую локальную инверсию. В малоугловой TE-ветви PHB сохраняет обогащённое общее состояние G_E=1.144294–1.147149, тогда как знаковое нечётное поле почти одномерно: 99.997384% энергии нечётной компоненты приходится на первую главную компоненту. На полном наборе из 11 малоугловых состояний (7 калибровочных углов и 4 отложенных угла) полная нечётная координата следует $\sin\theta$ с R^2=0.999275; линейная аппроксимация только по калибровочному набору использует n=7 углов и имеет R^2=0.999168. Четыре отложенных угла восстанавливаются при идеальном доступе ко всему полю со средней абсолютной ошибкой MAE=0.0598° и максимальной абсолютной ошибкой 0.0834°. Отдельно внутренняя рабочая граница, производная от родительской PHB, поддерживает отслеживаемую обогащённую модальную ветвь с G=1.22432, 1.15422 и 1.19749 при Resolution 60, 80 и 120. В серии точной PHB на фиксированной частоте G PHB уменьшается с 0.9002 до 0.3401 при измельчении сетки; последовательность C2 немонотонна, поэтому значения PHB/C2 2.613 и 2.777 на двух наиболее мелких проверенных сетках являются описательными контрастами, а не сошедшимся отношением в непрерывном пределе.

Ключевые слова: Геометрическая волновая инженерия; PHB-2; псевдогиперболоидальная полость; пассивная аналоговая предобработка; преобразование направления в состояние; направление прихода; трассировка лучей; акустический FDTD; Maxwell/FDTD; слепая инверсия; внешние фокальные кольца; научный приоритет.

Содержание

Аннотация 2
1. Научное положение и граница приоритета 4
2. Геометрия PHB-2 и математическая формулировка 4
3. Оператор преобразования направления в состояние и иерархия свидетельств 8
4. Точная лучевая верификация 9
5. Акустическая полноволновая верификация 12
6. Верификация Maxwell/FDTD 14
7. Межфизический синтез 19
8. Предлагаемая технологическая архитектура 19
9. Ограничения и фальсифицируемая валидация 20
10. Доступность данных и воспроизводимость 21
11. Выводы 23
11.1. Пассивное геометрическое преобразование «направление → состояние» 23
11.2. Роль внешних фокальных колец 23
11.3. Общий лучевой транспорт и согласованное периодическое семейство 23
11.4. Акустическая волновая верификация 24
11.5. Кодирование направления в Maxwell/FDTD 24
11.6. Контрольные геометрии и границы заявления о научном приоритете 25
11.7. Толщина стенки, положение отражающей поверхности и рабочая геометрия 25
11.8. Смещение, вызванное толщиной стенки, как координата настройки GWE 26
11.9. Точная PHB и производная рабочая граница 27
11.10. Следствия для проектирования и изготовления PHB 28
11.11. Научное значение для Геометрической волновой инженерии 28
11.12. Следующий этап верификации 29
11.13. Итоговое заявление о научном приоритете 29
Приложение A. Сводные количественные таблицы 30
Методологические ссылки 33
Связанный научный контекст 34

1. Научное положение и граница приоритета

Предлагаемый научный объект представляет собой фиксированную пассивную границу, которая выполняет аналоговое преобразование падающей волны до измерения. Выход этого преобразования не определяется одной фокальной интенсивностью. Он представляет собой калиброванный вектор состояния, содержащий пространственную заселённость, спектральную структуру, комплексную фазу, координаты симметрии, модальные коэффициенты или амплитуды конечного набора датчиков. Оценка направления затем становится обратной задачей на многообразии состояний, создаваемом границей.

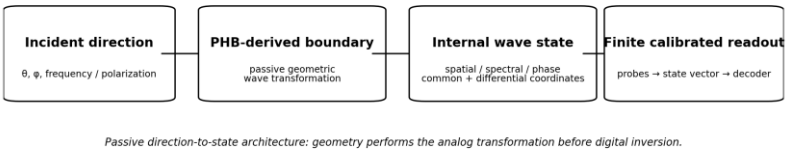

Рисунок 1. Пассивная архитектура преобразования направления в состояние, кодируемая геометрией.

Кодирование волны в сигнатуру, зависящее от направления, здесь не заявляется как новая общая концепция. Предыдущие исследования вычислительных апертур и пассивных оболочек продемонстрировали оценку направления прихода по зависящим от направления полевым или спектральным сигнатурам [8–10]. Заявляемый здесь приоритет намеренно уже: он относится к раскрытой геометрии PHB-2, её унаследованным локусам внешних фокальных колец, построению общего/дифференциального состояния, настройке нормальным смещением рабочей границы, считыванию конечным набором внутренних датчиков и интегрированной лучевой–акустической–максвелловской цепочке свидетельств.

Приоритет относится к этой архитектуре и вычислительно продемонстрированным эффектам. Он не утверждает, что все границы PHB фокусируют произвольные волны, что приёмник не содержит датчиков или не требует вычислений, что PHB уже превосходит каждую согласованную контрольную модель, либо что полные 3D-характеристики, дальность, работа с несколькими источниками, устойчивость к шуму и экспериментальные характеристики уже продемонстрированы.

2. Геометрия PHB-2 и математическая формулировка

В меридиональной плоскости (x,ρ) исходная гипербола радиально смещена на R относительно будущей оси вращения. Основная внутренняя воронка и центральное замыкание записываются следующим образом:

$$x^2/a^2 - (\rho - R)^2/b^2 = 1,\ c = \sqrt{(a^2 + b^2)}$$

$$\rho_h(x) = R - b\sqrt{[(|x|/a)^2 - 1]},\ \ a \le |x| \le |x_in|$$

$$\rho_cap(x) = R + \sqrt{(a^2 - x^2)},\ |x| \le a$$

$$|x_in| = a\sqrt{[1 + ((R - R_1)/b)^2]}$$

Плоские фокусы имеют координаты (±c,R). Вращение вокруг оси x переводит каждый фокус в круговое внешнее фокальное кольцо. Не предполагается наличие в кольцах датчиков, источников, стоков, сингулярных полей или материальных включений; их значение наследуется через всю границу. Для гладкой родительской границы идеальное семейство нормальных смещений задаётся выражением $r_d(s)=r_0(s)+d\ n(s)$, где $n(s)$ — единичная нормаль, а d — знаковое смещение. Поэтому Γ_d является отдельной рабочей границей;

реализация стенки конечной толщины в виде митерированной/полилинейной границы лишь приближает гладкую эквидистантную поверхность, а при $d \neq 0$ родительские фокальные кольца остаются наследуемыми опорными множествами, если точное фокальное свойство не установлено отдельно для смещённой поверхности.

В принятой широкополосной акустической серии используются $a=0.100$ m, $b=0.200$ m, $R=1.000$ m и параметр входного окна $R_1=0.200$ m. В электромагнитных расчётах используются $a=b=0.5$, $R=2.0$ и $R_1=0.4$ в нормированных единицах; в некоторых вычислительных манифестах тот же абсолютный радиус входного окна обозначен как Rin. Это разные физические масштабы, которые нельзя численно объединять; они реализуют одно и то же конструктивное семейство.

Таблица 1. Основные геометрические масштабы, использованные в независимых вычислительных ветвях.

Ветвь модели	**a**	**b**	**R**	**R_1**	**Назначение**
Базовая лучевая / Maxwell	0.5	0.5	2.0	0.4	безразмерная геометрическая и электромагнитная верификация
Базовая акустическая	0.10 m	0.20 m	1.00 m	0.20 m	широкополосная акустическая верификация

В разных вычислительных сериях используются три обозначения контрольных моделей, и их не следует смешивать. В акустическом широкополосном сравнении используется гладкий контроль равной площади; в малоугловой ветви Maxwell используется согласованный контроль C1; а в лучевых исследованиях и исследованиях Maxwell при фиксированной частоте используется C2. Это контрольные модели, специфичные для отдельных серий, а не одна общая геометрия. Их полные математические определения и условия согласования входят в архивные записи контрольных геометрий, описанные в разделе 10.

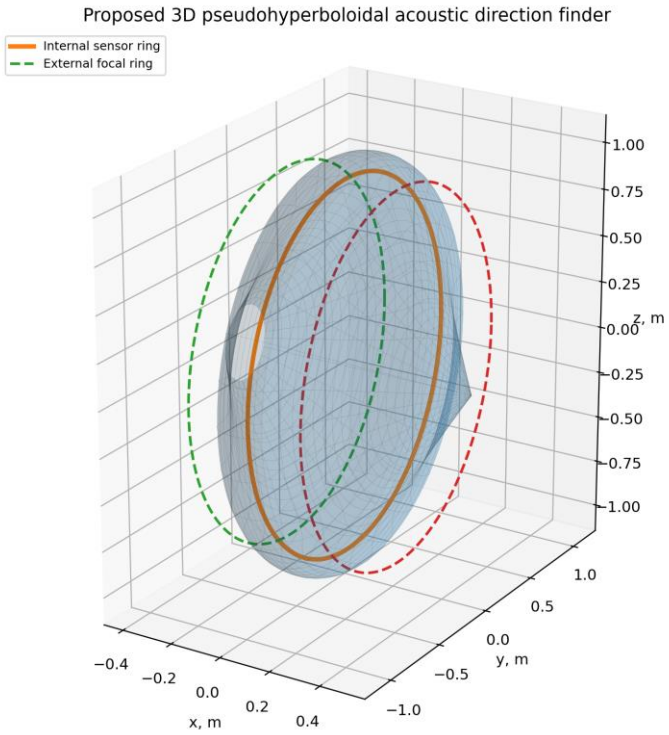

Рисунок 2. Трёхмерная акустическая архитектура, унаследованная от смещённой гиперболической образующей и её двух внешних кольцевых фокусов.

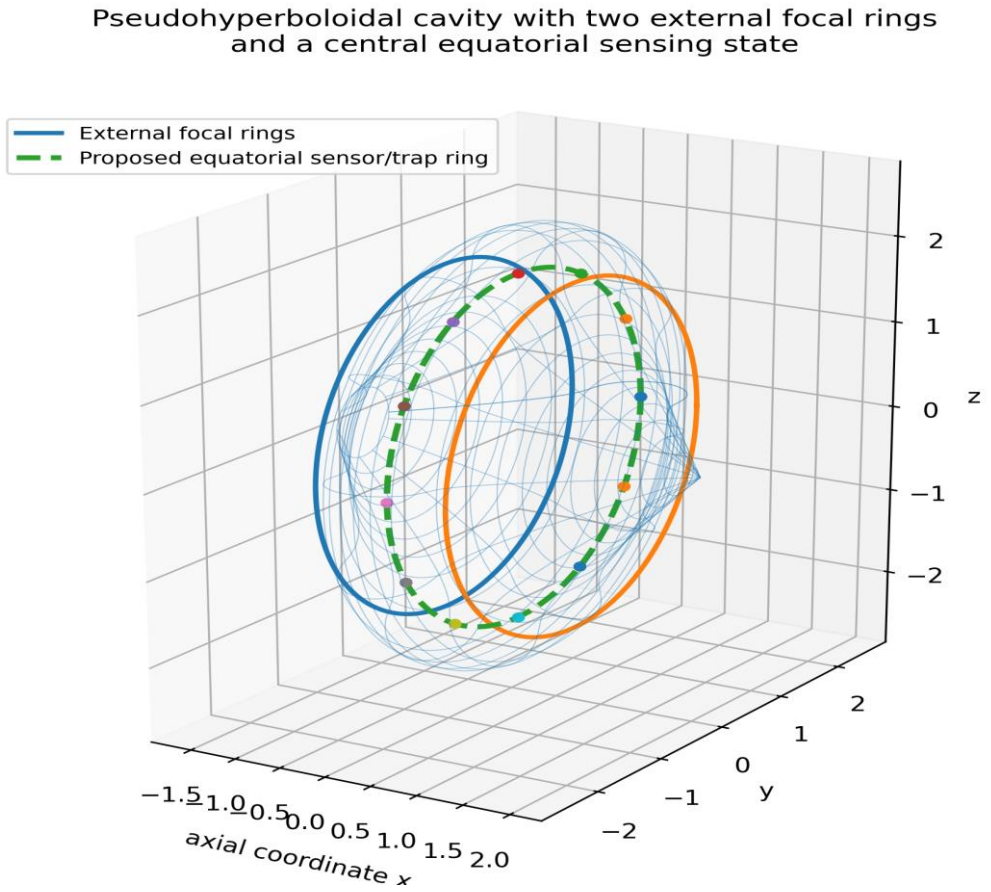

Рисунок 3. Концепция электромагнитной технологии, использующая ту же геометрию внешних фокальных колец и будущий экваториальный приёмник комплексного поля.

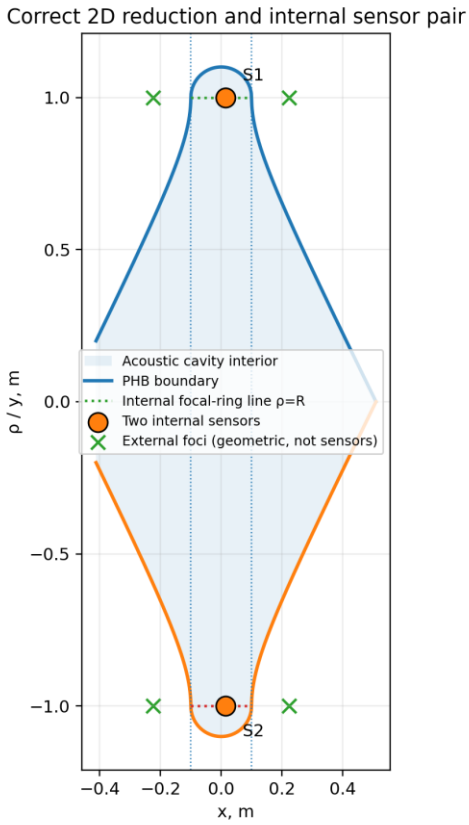

Рисунок 4. Акустическая меридиональная геометрия верификации, внутренняя линия датчиков и контрольные модели.

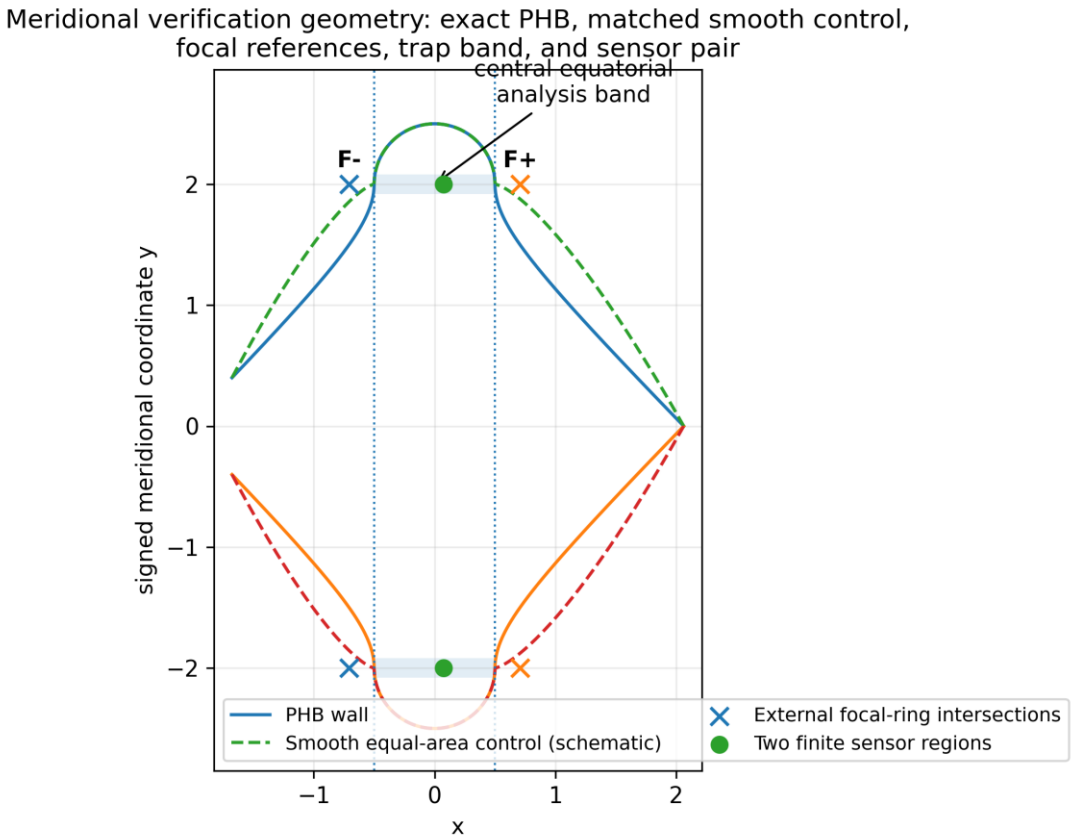

Рисунок 5. Электромагнитная меридиональная геометрия PHB и схема конечного дискретного отбора комплексного поля.

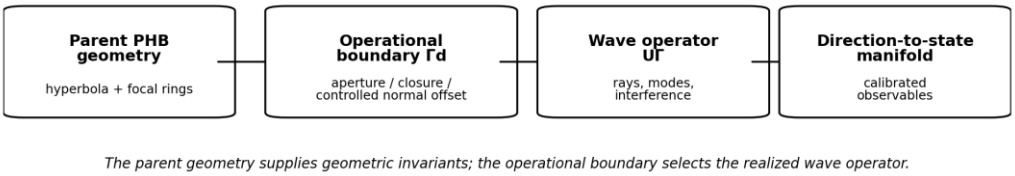

Рисунок 6. Исходная геометрия и рабочая граница играют различные роли в операторе преобразования направления в состояние.

3. Оператор преобразования направления в состояние и иерархия свидетельств

$$y(\theta,\omega;\Gamma) = P\, U_\Gamma(\theta,\omega)\, s$$

$$F_{even} = (F + M F)/2,\ F_{odd} = (F - M F)/2$$

Здесь s обозначает падающее возбуждение, U_Γ — зависящий от геометрии и среды оператор распространения/рассеяния, P — конечный оператор измерения, а M — оператор зеркального отражения относительно плоскости симметрии полости. Пассивное преобразование «направление → состояние» существует, если $y(\theta)$ воспроизводимо и различимо в интересующем угловом диапазоне. В зеркально-симметричной полости нормальное падение

преимущественно возбуждает чётное общее состояние, тогда как знаковое отклонение направления формирует нечётное дифференциальное состояние. Если $F_{odd}(\theta) \approx q(\theta)\psi_{odd}$, скаляр q становится компактной геометрической координатой направления. Такая постановка калиброванной обратной задачи согласуется со стандартными формулировками обработки антенных решёток [6].

Концентрация энергии и информация о направлении являются различными целями. $G<1$ не исключает обратимое направленное состояние, а $G>1$ само по себе не устанавливает наличие информации о направлении. Поэтому полная технология требует иерархии свидетельств, а не одной метрики усиления.

Символы G и G_E обозначают специфичные для отдельных расчётных серий нормированные метрики заселённости/обогащения, а не одну межфизическую наблюдаемую величину. В лучевой ветви $G=1$ является эталоном равномерной заселённости; G_E обозначает обогащение целевой области электромагнитного поля, используемое в серии Maxwell. Поэтому значения из различных физических ветвей не следует численно сравнивать так, как если бы они представляли одну и ту же физическую величину. Точные оцениватели, маски целевых областей и процедуры нормировки входят в запись воспроизводимости, описанную в разделе 10.

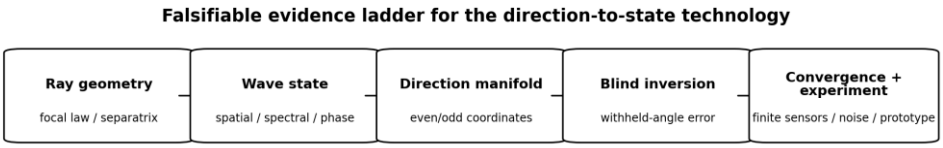

Рисунок 7. Дополняющая иерархия свидетельств, использованная для проверки научного положения.

4. Точная лучевая верификация

Аналитические нормали поверхности и точное зеркальное отражение подтверждают локальный гиперболический фокальный закон в пределах численной точности двойной точности в аудите с аналитическими нормалями и при физически правильной ориентации виртуального фокуса: выходящий луч распространяется от сопряжённого фокуса, а его обратное продолжение проходит через этот фокус. Это точное локальное геометрическое свойство не означает существования глобального аттрактора для произвольных лучей. Используемое правило отражения соответствует стандартной геометрической оптике [1].

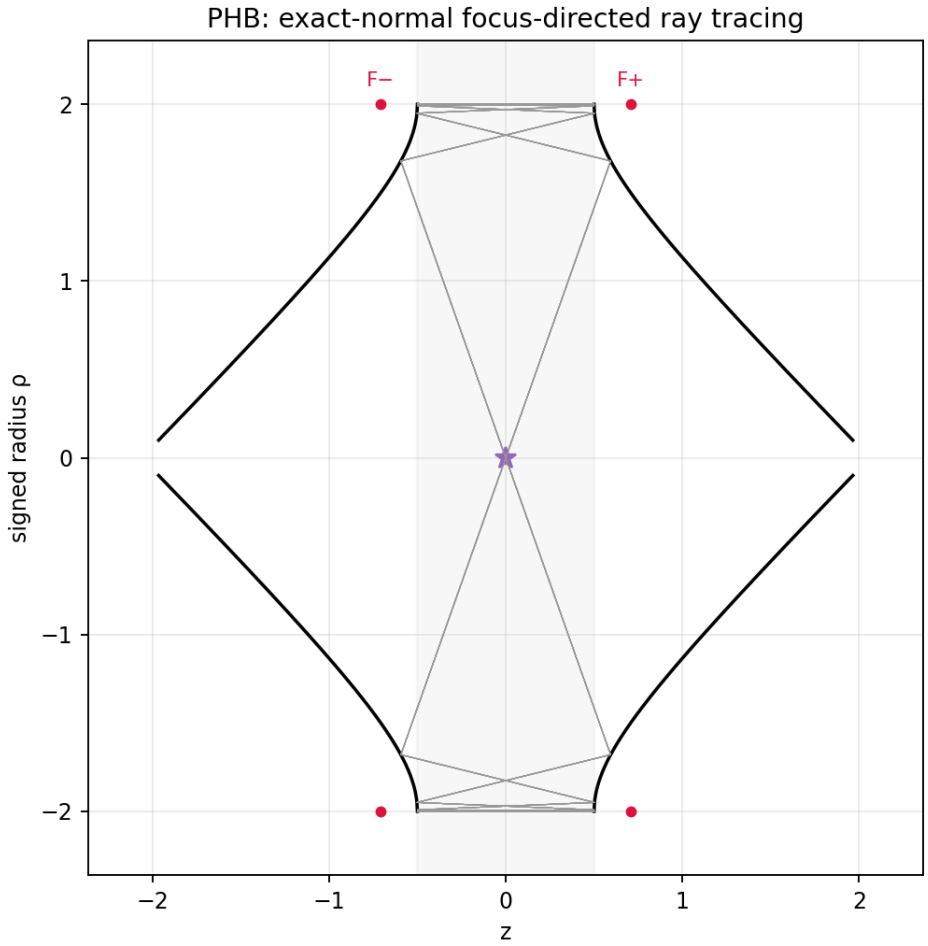

Рисунок 8. Точная лучевая верификация.

Для общих ансамблей нормально падающих плоских волн нормированная метрика заселённости целевой области даёт G_PHB=0.7922 и G_C2=0.6705 в 2D; в полном 3D G_PHB=0.33354 и G_C2=0.39936. Поскольку G=1 является эталоном равномерной заселённости, все четыре значения не соответствуют концентрации. Тем не менее геометрия изменяет транспорт и определяет фокальную сепаратрису.

Специально подготовленное возбуждение, согласованное по фокусу и фазе, формирует периодическое семейство между переходными областями. В исследовательском диагностическом окне после начального переходного участка, охватывающем отражения 5–10, получено G_PHB=13.763 против G_C2=5.128. В аналитической лучевой модели это численно воспроизводимое высокоселективное состояние фазового пространства, однако оно структурно сингулярно. При наименьшем проверенном угловом рассогласовании 0.0005° G_PHB падает до 2.235, тогда как расчётное значение C2 составляет приблизительно 2.288 (PHB/C2=0.977), то есть PHB-специфическое преимущество уже исчезает. Рассогласование амплитуды приблизительно на 0.02%, коррелированная фазовая рябь менее приблизительно 0.01% и полигональная аппроксимация поверхности также разрушают экстремальное состояние. Следовательно, узкий отклик не является уникально PHB-специфическим.

Происхождение окна отражений и граница систематической ошибки выбора. Исключение ранних отражений имеет физический диагностический смысл: оно подавляет прямой проход и ранний транспорт до оценки многоотражательного семейства. Однако сохранённый архив не подтверждает, что точные границы 5 и 10 были заранее зарегистрированы до просмотра полученных значений G. Поэтому G=13.763 приводится как исследовательский

диагностический максимум, условный по выбранному окну, а не как несмещённая или заранее зарегистрированная метрика характеристик устройства. В подтверждающем тесте число исключаемых отражений, конечный номер отражения, целевая область, возбуждение, контроль и основная метрика должны быть зафиксированы до оценки углового сканирования.

Граница численной точности. Наименьшее проверенное рассогласование 0.0005° составляет приблизительно 8.73×10^{-6} rad, то есть на много порядков превышает машинный эпсилон binary64; поэтому одна только величина шага не является свидетельством ошибки округления с плавающей точкой. Тем не менее нелинейная многоотражательная карта пересечений/отражений способна усиливать ошибки конечной точности и поиска корней. Настоящая запись не отделяет непрерывную неустойчивость биллиардной динамики от численной чувствительности конкретной реализации. До интерпретации субмиллиградусного коллапса как физического углового допуска требуется независимый расчёт с повышенной точностью или вторая реализация лучевой трассировки.

Распределённая 3D-карта с 11 осевыми поясами и 24 азимутальными секторами содержит информацию о направлении падения. При использовании всей карты MAE оси прихода по модулю 180° составляет 4.13° для PHB и 16.13° для C2. После удаления вклада первых пяти отражений/прямого прохождения ошибки становятся соответственно 12.19° и 5.63°. Таким образом, информация о направлении присутствует, однако благоприятное значение PHB для всей карты нельзя однозначно приписать поздневременному аттрактору возврата PHB.

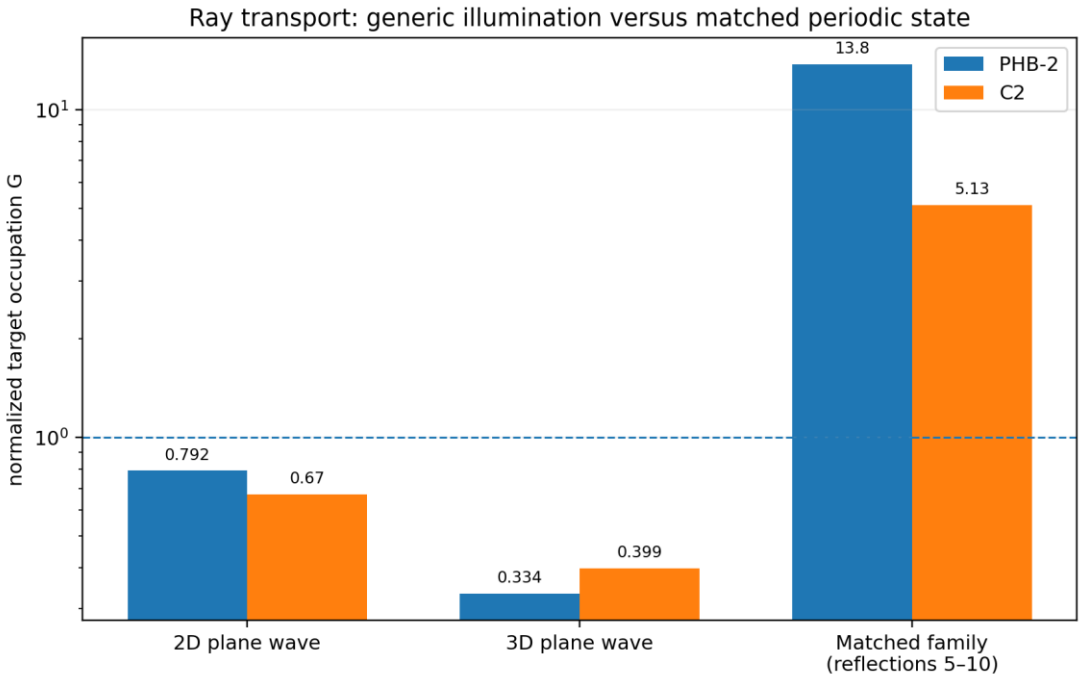

Рисунок 9. Общая лучевая заселённость ниже равномерного эталона; высокое G относится к специально согласованному периодическому состоянию.

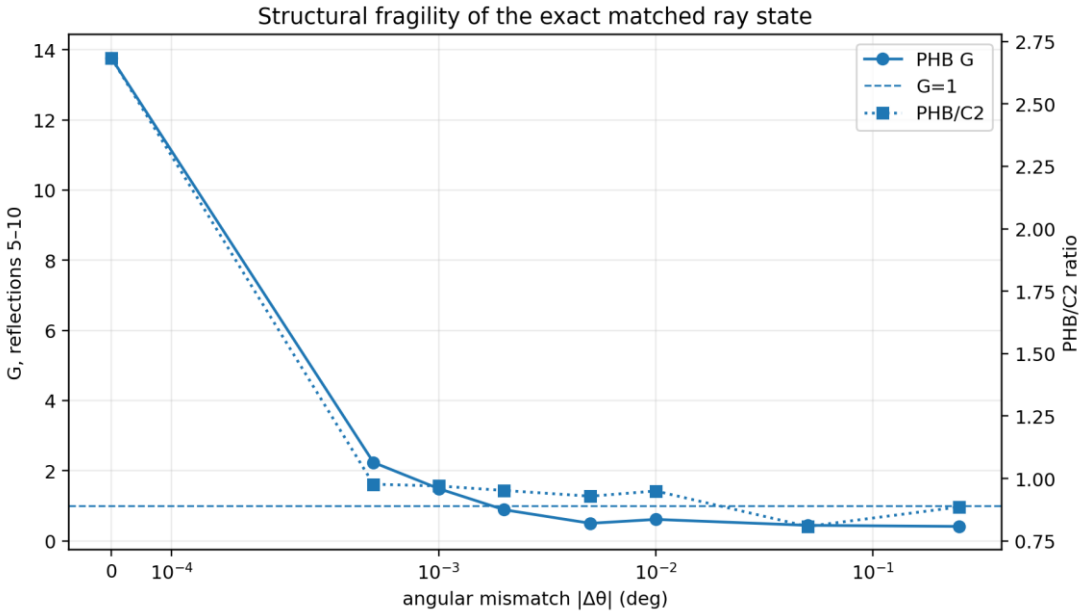

Рисунок 10. Угловая хрупкость точно согласованного лучевого семейства.

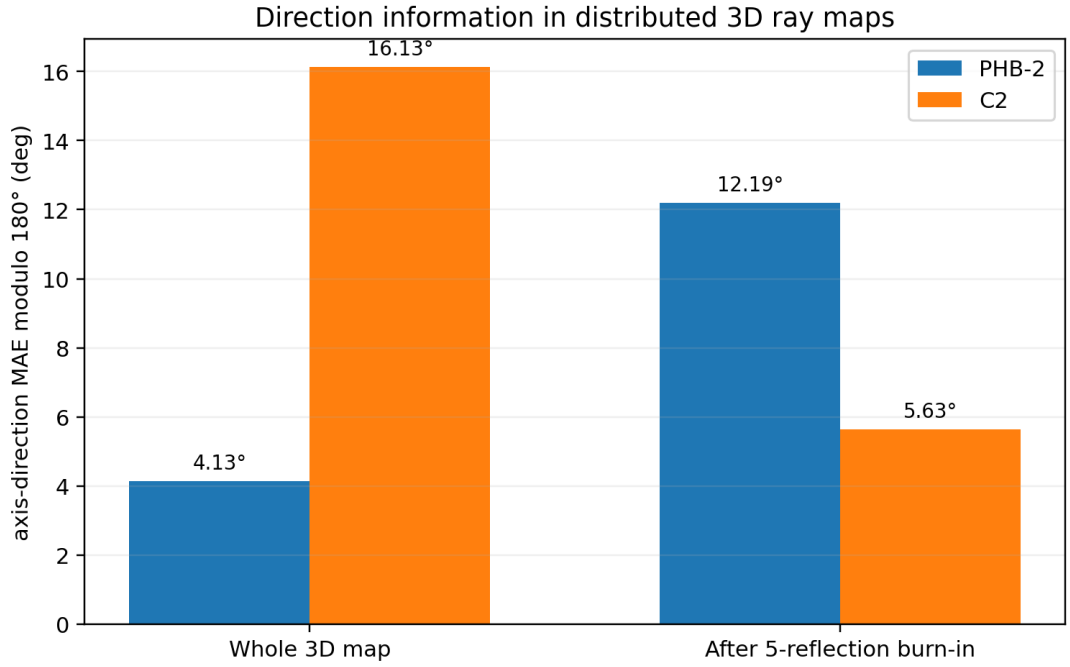

Рисунок 11. Информация о направлении в распределённых 3D лучевых картах и эффект удаления раннего транспорта.

5. Акустическая полноволновая верификация

Приведённые в этом разделе акустические полноволновые данные получены в двумерных скалярно-акустических FDTD-расчётах меридиональной модели; это не полный трёхмерный акустический расчёт. Отклик оценивается как комплексное состояние, а не как одна метрика уровня. PPW обозначает число узлов сетки на длину волны и используется здесь как мера пространственной дискретизации акустического расчёта. Широкополосная знаковая координата двух датчиков монотонна по углу падения, с R^2=0.98893 и 0.99322 на двух сетках. Это устанавливает упорядоченное многообразие отклика, но лишь умеренное преимущество

по необработанной чувствительности относительно контролей. Стандартные ссылки по акустическим волнам приведены в [2,3].

Более сильный широкополосный результат использует комплексное вычитание пустого эталона, $R_g(\theta,f)=H_g(\theta,f)-H_{empty}(\theta,f)$, за которым следует нечётное состояние $O_g(f)=[R_g(+15°,f)-R_g(-15°,f)]/2$. В выбранной внутренней координате $x=-0.020$ m PHB и гладкий контроль равной площади разделены на 54.6597° при PPW 38.1 и на 56.0830° при PPW 56 в нормированном комплексном пространстве признаков. Соответствующие нормированные расстояния равны 0.918 и 0.940. Отношения норм нечётной компоненты PHB/smooth составляют лишь 1.03617 и 1.03412, а уровень PHB немного ниже (−0.023 и −0.056 dB). Следовательно, устойчивой сигнатурой является спектрально-фазовая форма, а не усиление.

Полнополевое мультисинусное сравнение на мелкой сетке с согласованной дефокусированной контрольной моделью near-PHB подтверждает распределённую реорганизацию состояния. Глобальные прокси-метрики отклика по давлению почти идентичны: PHB/defocused-control $\Sigma|H|^2=0.999638$ при 0° и около 0.999723 при ±15°. Тем не менее медианный локальный спектральный угол составляет 26.54° при 0° и 30.81° при ±15°, а значения P90 — 37.91° и 46.50°. Исключение всех точек в пределах 50 mm от изменённых ячеек стенки оставляет 80.7% общей внутренней области, где медианные углы остаются 25.91° и 29.94°. Следовательно, эффект распространяется во внутреннюю область и не является исключительно артефактом растрированной стенки. Поскольку колебательная скорость частиц в этом архиве недоступна, $\Sigma|H|^2$ является прокси-метрикой отклика по комплексному давлению, а не полной акустической энергией.

$$R_g(\theta,f) = H_g(\theta,f) - H_{empty}(\theta,f)$$

$$O_g(f) = [R_g(+15°,f) - R_g(-15°,f)] / 2$$

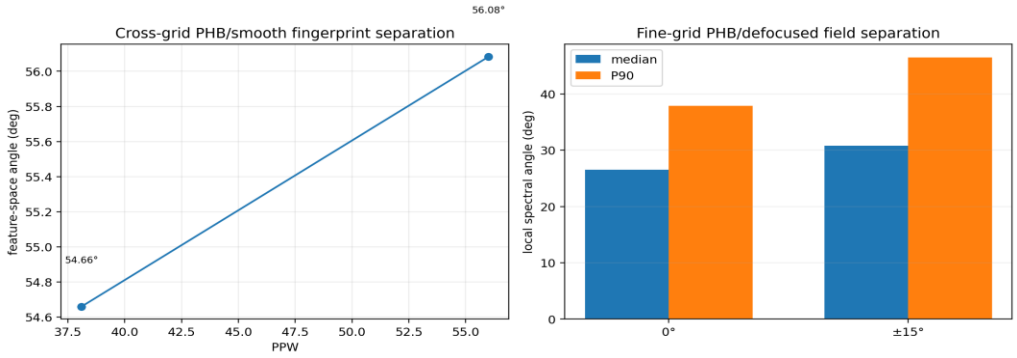

Рисунок 12. Разделение акустических сигнатур устойчиво по сеткам и сохраняется во внутреннем поле на мелкой сетке.

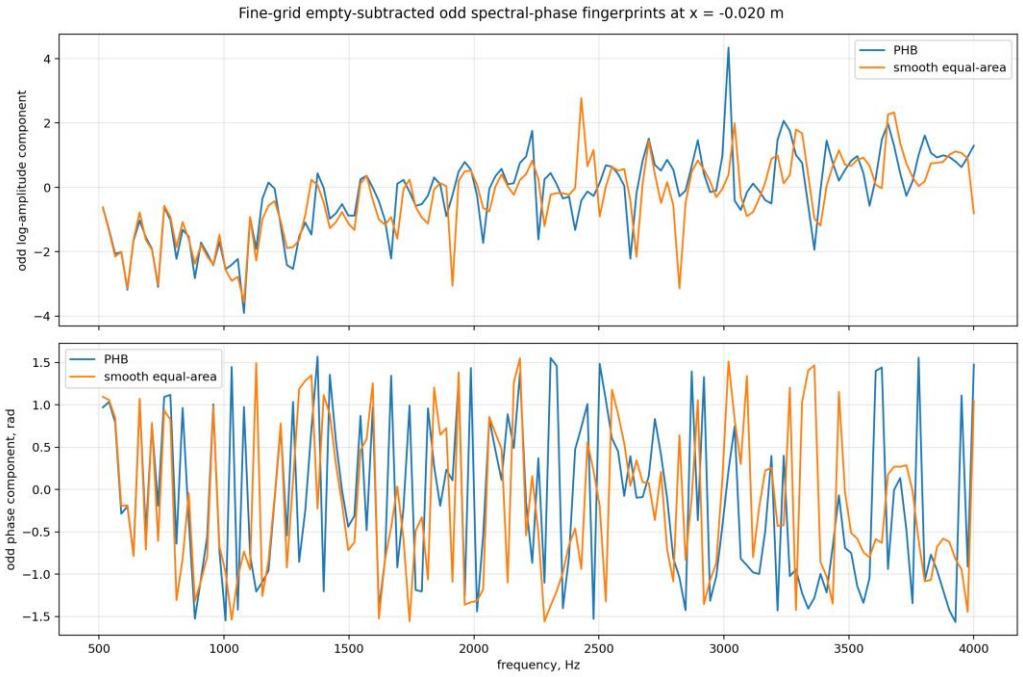

Рисунок 13. Репрезентативные нечётные спектрально-фазовые сигнатуры после вычитания пустого эталона; информация о направлении переносится комплексной частотно-зависимой формой.

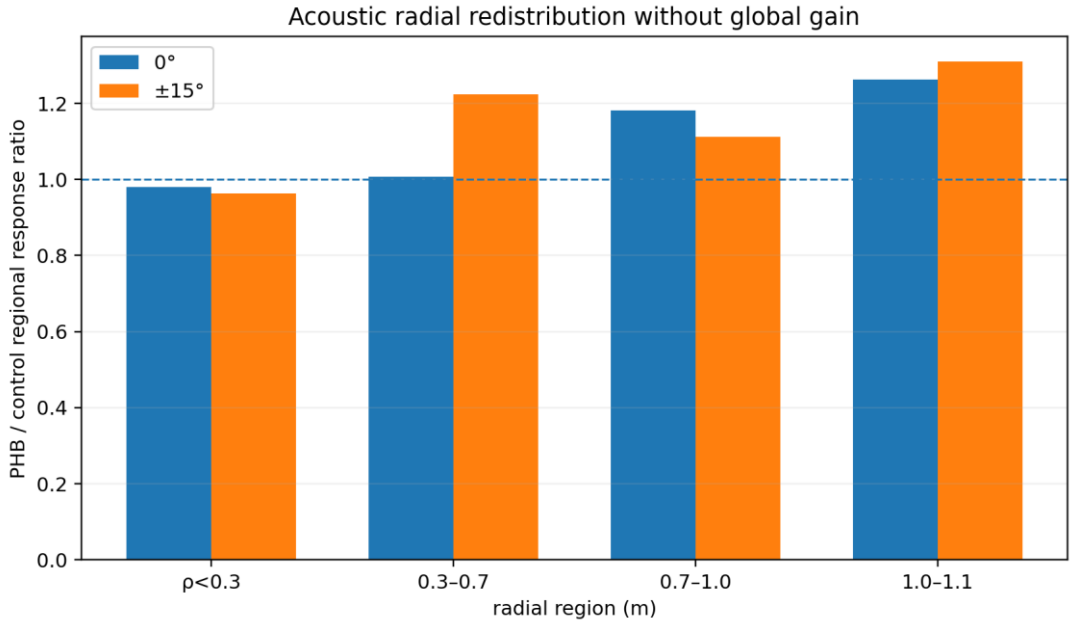

Рисунок 14. Радиальное перераспределение акустического отклика относительно согласованной контрольной модели near-PHB.

6. Верификация Maxwell/FDTD

Электромагнитные данные этого раздела получены в двумерных TE Maxwell/FDTD-расчётах меридиональной модели с сохранением комплексных полей H_z, E_x и E_y. Эти расчёты не являются демонстрацией полной трёхмерной электромагнитной локализации. В расчётах Meep параметр Resolution обозначает число пространственных пикселей сетки на единицу нормированной длины, поэтому номинальный шаг сетки Δ≈1/Resolution [12]. Для отслеживаемой более широкоугольной ветви PHB даёт G_E=1.1280 при нормальном падении

и 1.1384 и 1.1606 при |θ|=7.5° и 15°, тогда как гладкий равноплощадный и пустой контроли в том же сравнении остаются ниже единицы. Затем малоугловая полнополевая серия более подробно разрешает общий и дифференциальный каналы. Методика FDTD соответствует стандартной практике вычислительной электродинамики [4,5].

При Resolution 80 величина PHB G_E изменяется лишь от 1.144294 при 0° до 1.147149 при 3.75°. Физическое зеркально-чётное состояние изменяется менее чем примерно на 0.75%, тогда как нечётная доля плавно возрастает от нуля до 2.940%. Согласованный контроль C1 остаётся обеднённым по заполнению общего состояния, но развивает значительно большую нечётную долю, достигающую 61.949% при 3.75°. Первая главная компонента нечётного состояния PHB содержит 99.997384% его энергии. На всех 11 смоделированных малоугловых состояниях (7 калибровочных плюс 4 отложенных) полная нечётная проекция следует sinθ с R^2=0.999275. Линейная аппроксимация только по калибровочному набору использует n=7 углов и имеет R^2=0.999168. Поскольку калибровочный набор мал и гладко упорядочен по углу, эти значения R^2 рассматриваются как описательные меры низкоразмерной структуры, а не как независимое статистическое доказательство; прогнозная проверка обеспечивается четырьмя отложенными состояниями.

Семь калибровочных углов: −3.75°, −2°, −1°, 0°, +1°, +2° и +3.75°. Четыре отложенных угла: −3°, −1.5°, +1.5° и +3°. Для отложенного набора PHB даёт MAE=0.0598° и максимальную ошибку 0.0834°; C1 даёт MAE=0.0711° и максимальную ошибку 0.1008°. Это идеализированная демонстрация локальной обратимости многообразия, а не измеренное угловое разрешение аппаратуры: декодер имеет доступ ко всему смоделированному полю, используется одно семейство численных моделей и одна частотная ветвь, отсутствуют измерительный шум и производственные ошибки. При всего четырёх симметричных отложенных углах и отсутствии стохастического ансамбля шумов различие между MAE PHB и C1 не следует интерпретировать как статистически установленное преимущество характеристик.

Два взаимодополняющих сеточных исследования ограничивают электромагнитное утверждение. В серии точной PHB на фиксированной частоте G PHB монотонно уменьшается от 0.9002 при Resolution 80 до 0.3401 при 140. Соответствующая последовательность C2 немонотонна: 0.2479 → 0.4931 → 0.1760 → 0.1225. Поэтому отношения PHB/C2 нельзя интерпретировать как сошедшееся отношение или как свидетельство отношения в непрерывном пределе. Значения 2.613 и 2.777 приводятся только как относительный контраст, наблюдаемый на двух наиболее мелких доступных сетках; происхождение выброса C2 при Resolution 100 имеющимися данными не установлено и может быть связано с численной расстройкой или чувствительностью ветви контрольной геометрии. Абсолютная концентрация не сходится к значению выше единицы. В отдельной отслеживаемой модальной ветви внутренне смещённой рабочей границы G остаётся выше единицы в собственном максимуме ветви: 1.22432 при f=2.13750 (Res60), 1.15422 при f=2.14417 (Res80) и 1.19749 при f=2.15040 (Res120). Частота ветви систематически смещается при измельчении сетки, что показывает необходимость отслеживать идентичность моды, а не сравнивать только одну фиксированную частоту.

Нормальное смещение также выступает координатой настройки передаточной функции в независимом сравнении на фиксированной частоте. При толщине стенки t=0.12, пространственном Resolution 160 пикселей на единицу нормированной длины и f=4 в нормированных единицах моделирования смещение интерфейса d=0.06 даёт G=0.2106, тогда как d=0.12 даёт G=0.3610; отношение равно 1.714. Оба значения остаются ниже единицы. Следовательно, результат демонстрирует чувствительность передаточной функции к фактически реализованному положению отражающей поверхности; он не является ни

доказательством абсолютной концентрации, ни сам по себе изолированным эффектом материальной толщины, независимым от положения границы.

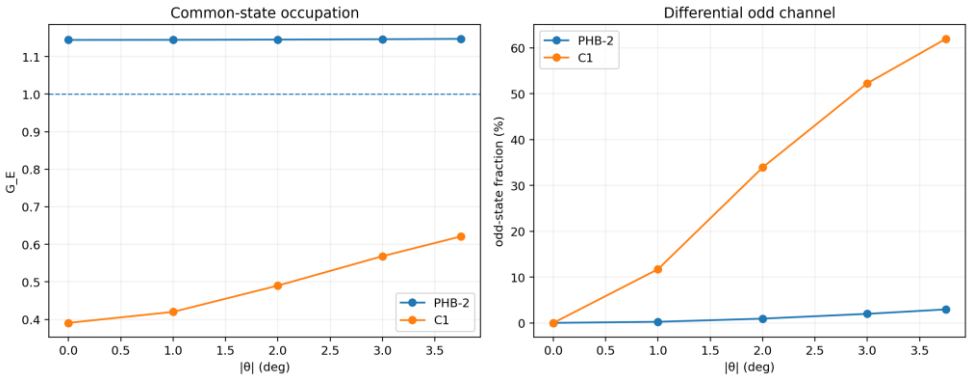

Рисунок 15. Малоугловая общая несущая Maxwell и дифференциальный нечётный канал для PHB-2 и C1.

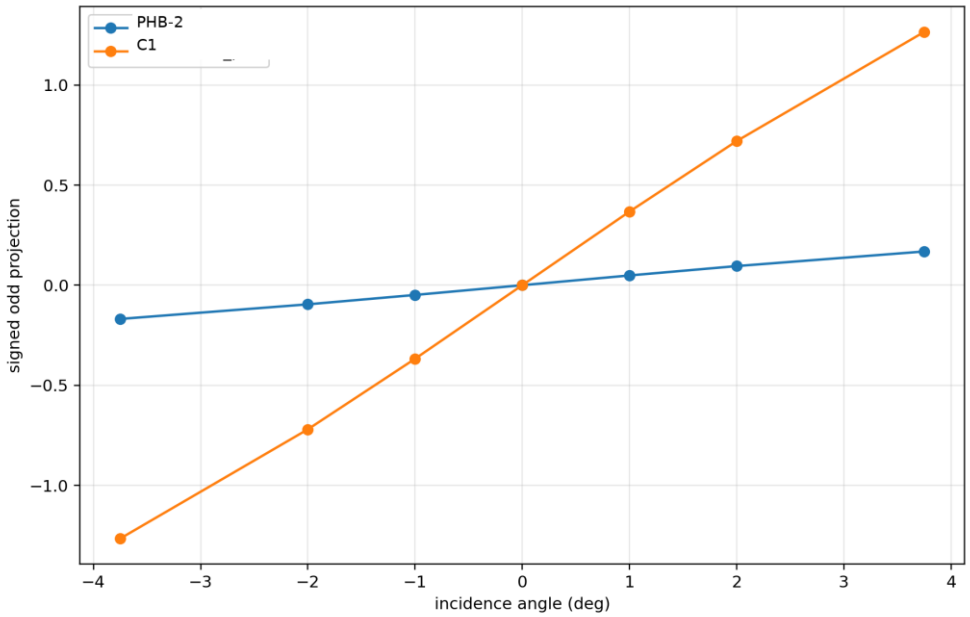

Рисунок 16. Знаковая полнополевая нечётная координата в зависимости от угла падения для PHB-2 и согласованного контроля C1. На графике показана последовательность калибровочных углов; анализ 11 состояний, включая четыре отложенных, даёт $R^2=0.999275$, тогда как аппроксимация только по $n=7$ калибровочным точкам даёт $R^2=0.999168$.

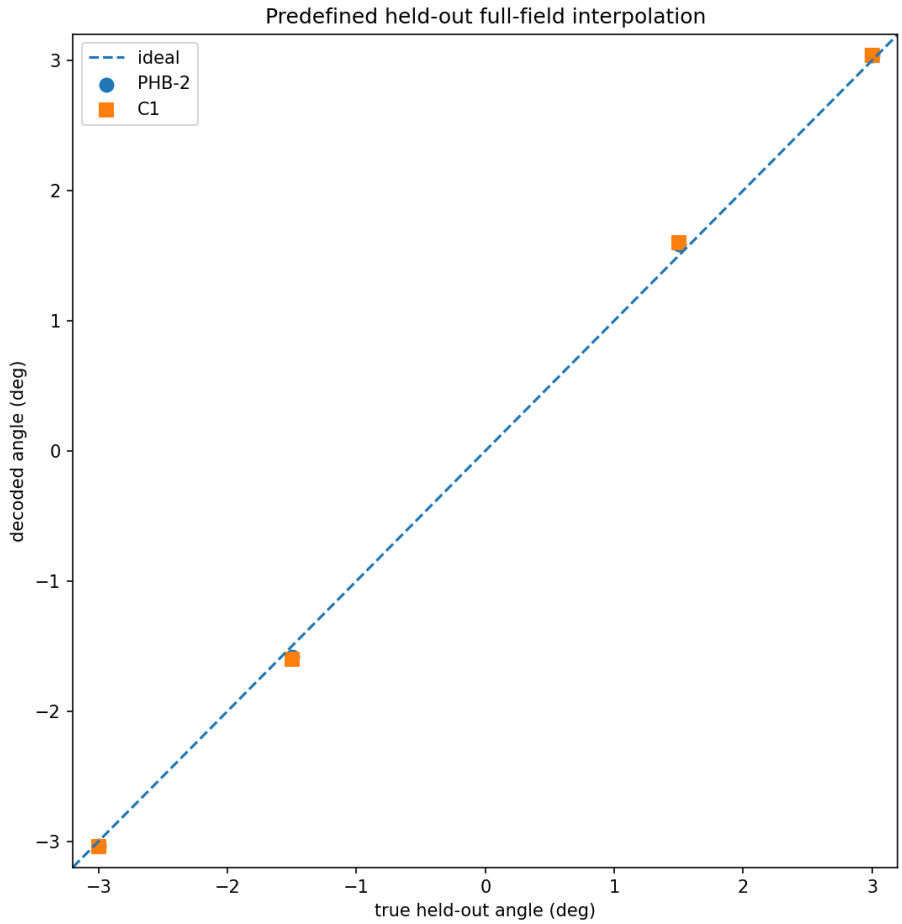

Рисунок 17. Предопределённая интерполяция четырёх отложенных углов Maxwell при идеальном доступе ко всему полю.

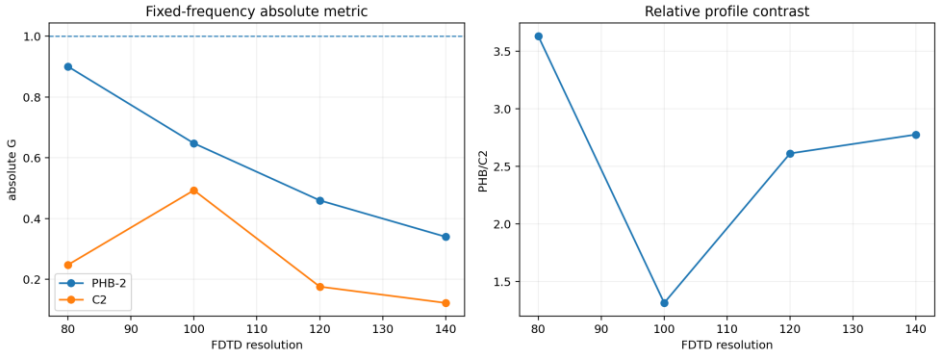

Рисунок 18. Уточнение сетки при фиксированной частоте: абсолютная заселённость уменьшается, тогда как относительный контраст PHB/C2 остаётся конечным.

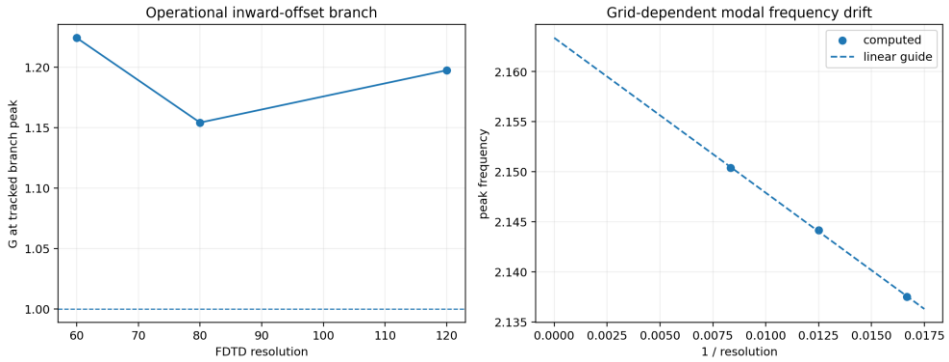

Рисунок 19. Рабочая ветвь с внутренним смещением и отслеживанием моды и её зависящий от сетки дрейф пиковой частоты.

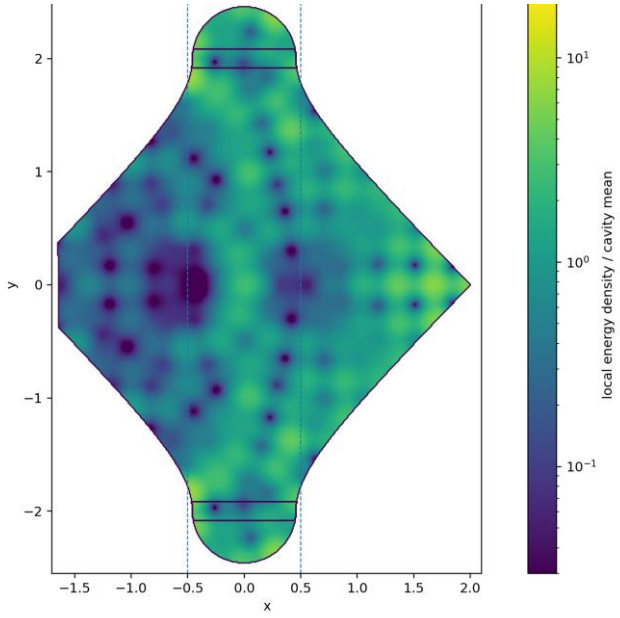

Рисунок 20. Репрезентативная нормированная карта поля рабочей ветви с внутренним смещением вблизи её отслеживаемого пика; состояние пространственно структурировано, а не равномерно фокально.

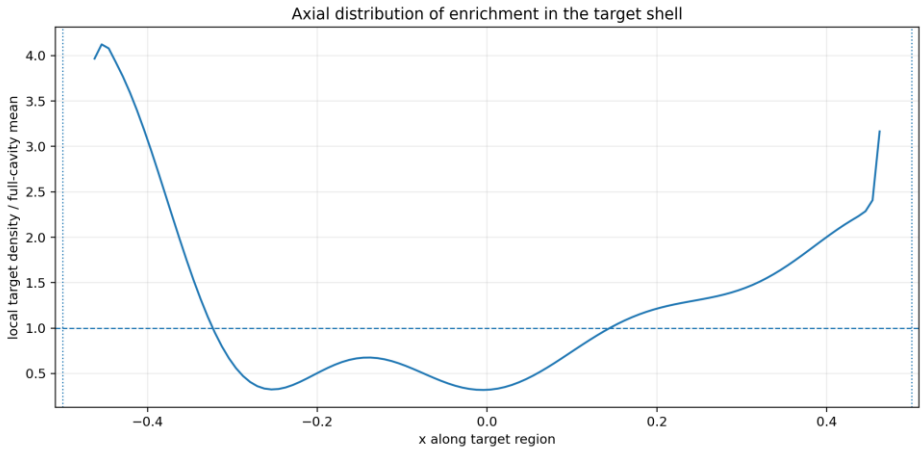

Рисунок 21. Осевое распределение обогащения целевой области для рабочей ветви с внутренним смещением.

7. Межфизический синтез

Акустические и электромагнитные расчёты решают разные физические уравнения и используют разные граничные условия; поэтому их численные величины напрямую несопоставимы. Общей является структура преобразования. Знаковое падение вызывает воспроизводимые изменения комплексного поля, согласованные контрольные модели также могут кодировать направление, а полезная информация содержится в зависящей от геометрии форме состояния, а не в универсальном коэффициенте усиления.

Причинная цепочка, поддерживаемая совокупными свидетельствами, имеет вид: фокальные данные исходной гиперболы → поле касательных/нормалей рабочей границы и семейство длин траекторий → лучевой/модовый/интерференционный оператор → структурированное внутреннее состояние → конечное измерение → калиброванная инверсия. Поэтому внешние фокальные кольца лучше всего интерпретировать как унаследованные геометрические организующие множества, а не как удалённые материальные фокальные детекторы.

$$I_\Gamma(\theta) = \{\text{региональная заселённость, модальные коэффициенты, амплитуды/фазы датчиков, спектральные координаты}\}$$

Такая формулировка превращает проектирование PHB в задачу информационного кондиционирования. Оптимизированная геометрия не обязана максимизировать G. Вместо этого она должна максимизировать разделимость и обратимость $I_\Gamma(\theta)$, сохраняя устойчивость к дрейфу частоты, потерям, шуму, сокращению числа датчиков и производственным допускам. Независимые лучевые, акустические и Maxwell-наблюдаемые являются различными проекциями этой более общей цели проектирования.

8. Предлагаемая технологическая архитектура

Технологическим следствием является гибридный аналого-цифровой приёмник. Пассивная полость выполняет физическое преобразование признаков; конечный набор внутренних датчиков дискретизирует преобразованное поле; фиксированная калибровка отображает вектор датчиков в направление и уверенность. На стадии геометрического преобразования активное электронное сканирование луча не требуется, хотя измерение, оцифровка и вывод остаются активными операциями.

- Пассивная аналоговая предобработка акустической или электромагнитной информации о направлении до цифровой оценки.
- Конечные кольцевые или многопоясные компоновки датчиков, которые считывают созданное геометрией состояние, а не синтезируют электронно сканируемый луч.
- Информационно обусловленная оптимизация геометрии по апертуре, замыканию, гладкости, нормальному смещению, частоте и размещению датчиков.
- Исследовательское узкополосное по углу выравнивание или пороговое угловое детектирование на основе высокоселективного согласованного периодического семейства — сначала при условии независимой численной проверки повышенной точности и воспроизведения заранее заданного окна отражений, а затем при проверке допусков, потерь и шума.
- Многочастотные сигнатуры, которые могут обменивать требования к синхронизированной пространственной базе на калиброванное разнообразие пространства состояний.

Концептуальная акустическая архитектура с конечным числом датчиков для будущей трёхмерной валидации, показанная с 12 микрофонами и параметрами геометрии a=0.1 m,

b=0.2 m, R=1.0 m и R1=0.20 m. На основании этой иллюстрации не заявляются дальность обнаружения, характеристики сопровождения или точность локализации при конечном числе датчиков.

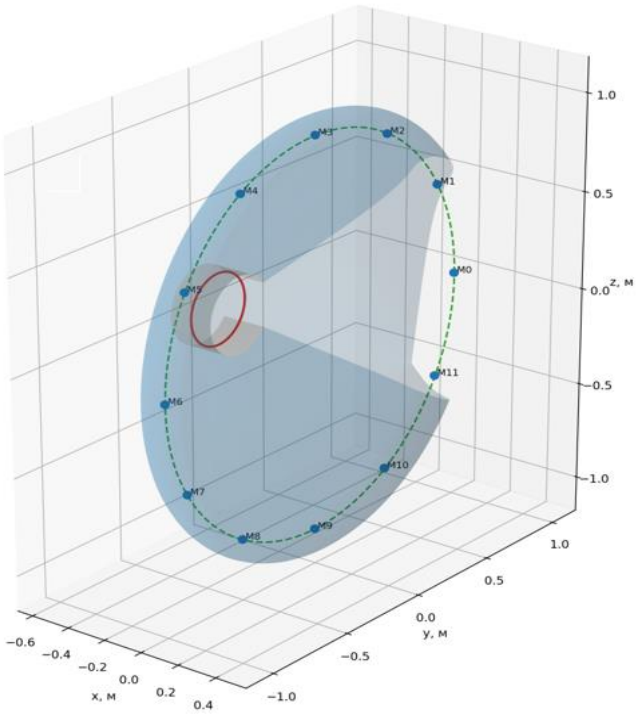

Рисунок 22. Концептуальная геометрия PHB-2 для будущего трёхмерного исследования с конечным числом микрофонов. Сектор поверхности скрыт только для визуализации, чтобы было видно внутреннее кольцо из двенадцати микрофонов.

9. Ограничения и фальсифицируемая валидация

- При общем лучевом возбуждении G ниже единицы и в 2D, и в 3D; согласованный результат G=13.763 является исследовательским диагностическим максимумом, зависящим от выбранного окна, а узкий отклик не является уникально PHB-специфическим, поскольку при наименьшем рассогласовании C2 остаётся сопоставимо сильным. Поэтому данный результат не является продемонстрированным устойчивым механизмом широкоугольного определения направления.
- Акустические величины 54.66°/56.08° и 26.54°/30.81° являются углами в пространстве признаков или локальными спектральными углами, а не декодированными пеленгами источника.
- Слепую акустическую инверсию для отложенных направлений при конечном числе микрофонов ещё предстоит продемонстрировать.
- Maxwell MAE=0.0598° — это идеальный локальный результат инверсии по четырём углам, всему полю и без шума; C1 также точно декодирует.
- Абсолютное G exact-PHB при фиксированной частоте уменьшается с ростом разрешения; утверждение о континуальном пределе требует дополнительного уточнения с отслеживанием ветви.

- Полная 3D внеосевая электромагнитная задача, поляризационное разнообразие, нагрузка конечных датчиков, потери в материалах, вариации спектра источника, конечная дальность, несколько излучателей, производственные допуски и экспериментальная работа остаются непроверенными.

PHB-специфическое заявление о характеристиках следует считать неподтверждённым, если заранее зарегистрированное сравнение с конечным набором датчиков, учётом шума/потерь, нормированием по потоку и отслеживанием ветви не показывает воспроизводимого преимущества над лучшим согласованным контролем по заранее заданной основной инженерной метрике или метрикам. Для любого теста согласованной орбиты окно отражений, число исключаемых ранних отражений, конечный номер отражения, целевая область, возбуждение, контроль и угловое сканирование также должны быть зафиксированы до просмотра результата подтверждающего теста. Одних отличительных изображений поля недостаточно.

Оценка неопределённости. Для детерминированных однорасчётных лучевых и FDTD-наблюдаемых величин в настоящей записи статистические доверительные интервалы не назначаются. Приведённые значения являются точечными оценками для архивированных численных конфигураций. Там, где данные доступны, численная чувствительность оценивается по сходимости по числу лучей, измельчению пространственной сетки, временной сходимости, отслеживанию моды/ветви, согласованным контролям, тестам возмущений и сравнению формы полей. Полный бюджет неопределённости, включающий зависимость от PML, материальные потери, шум конечных датчиков, вариации источника и производственные допуски, пока не установлен.

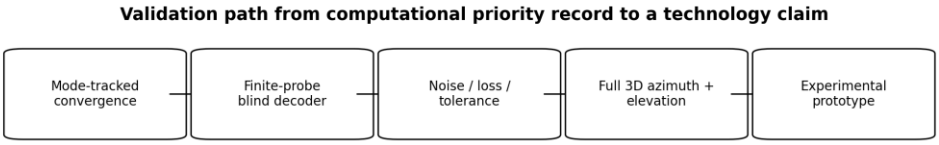

Рисунок 23. Фальсифицируемый путь валидации от вычислительной фиксации приоритета к верифицированному устройству.

10. Доступность данных и воспроизводимость

Количественная база получена из многоархивного вычислительного корпуса объёмом приблизительно 10 GB, содержащего продукты точного лучевого расчёта, акустические поля FDTD, поля Maxwell/FDTD, машиночитаемые продукты CSV/JSON/NPZ/HDF5, рисунки, манифесты запусков и контрольные суммы. Пакет воспроизводимости, необходимый для реконструкции представленных результатов, включает исполняемые генераторы геометрии, определения источников, контрольные геометрии, критерии сходимости, исходные комплексные поля, маски, производные таблицы и сопроводительные файлы SHA-256. Независимо от того, депонированы ли они вместе с этой рукописью или в связанной сопутствующей записи Zenodo, эти машиночитаемые материалы образуют авторитетную вычислительную запись. Если округлённое повествовательное значение отличается в последней отображаемой цифре, авторитетным является архивное машиночитаемое значение.

Вместе с PDF-версией настоящей рукописи та же запись Zenodo будет включать два сопутствующих ZIP-архива:

SCRIPTS.zip — исполняемые вычислительные скрипты и генераторы геометрии, использованные в представленных лучевых, acoustic-FDTD и Maxwell/FDTD исследованиях;

COMPUTATIONAL_RESULTS.zip — машиночитаемые вычислительные результаты, необходимые для проверки, воспроизведения и независимого повторного анализа количественных результатов настоящей работы.

Эти два ZIP-архива образуют пакет воспроизводимости, сопровождающий рукопись. В него, где применимо, входят исполняемые генераторы геометрии, определения источников, контрольные геометрии, критерии сходимости, исходные или архивированные комплексные поля, пространственные маски, производные продукты CSV/JSON/NPZ/HDF5, таблицы, манифесты запусков, точные команды запуска при их наличии и файлы контрольных сумм SHA-256.

Архивированные машиночитаемые материалы образуют авторитетную вычислительную запись для численных результатов настоящей рукописи. Если округлённое значение в описательном тексте отличается последней отображаемой цифрой от соответствующего архивного значения, авторитетным следует считать машиночитаемое значение из COMPUTATIONAL_RESULTS.zip.

Для каждого численного утверждения, рассматриваемого в рукописи как установленное свидетельство, индекс воспроизводимости должен указывать исполненный скрипт (либо явно фиксировать ограничение происхождения), точную командную строку при её наличии, манифест запуска, соответствующий машиночитаемый файл результата и строку/поле, а также контрольную сумму SHA-256. Отрицательные контроли и результаты, ограничивающие интерпретацию, являются частью той же авторитетной записи и не должны исключаться из депонируемого пакета.

Таблица 2. Минимальный пакет воспроизводимости для интегрированной доказательной цепочки.

Серия	Основной архивируемый продукт	Научное назначение
Точные лучи	аналитическая поверхность, точные нормали, ансамбли запусков, журналы попаданий/траекторий	независимое геометрическое воспроизведение
Акустическая широкополосная	комплексные спектры empty/PHB/control на обеих сетках	повторный расчёт нечётных сигнатур и углов пространства признаков
Акустическое поле на мелкой сетке	комплексные поля, маски общей воздушной области, радиальные области	повторный расчёт распределённого перераспределения
Малоугловая Maxwell	H_z, E_x, E_y для обучающих и отложенных углов	повторный расчёт чётной/нечётной PCA и декодера
Отслеживание моды Maxwell	частотные сканы и пиковые поля на каждой сетке	проверка идентичности моды и сходимости

11. Выводы

11.1. Пассивное геометрическое преобразование «направление → состояние»

Совокупность вычислительных данных позволяет сформулировать полость второго порядка псевдогиперболоидальной формы PHB-2 как пассивный аналоговый преобразователь направления в состояние. В этой архитектуре направление падающей волны определяется не исключительно путём последующей цифровой обработки исходного, ещё не преобразованного волнового поля. Сначала действует вся физическая граница полости: она преобразует падающую волну в зависящее от геометрии комплексное внутреннее состояние, пространственное распределение, фазовая структура, спектральный состав, заполнение общей моды и дифференциальные компоненты которого могут содержать информацию о направлении падения.

Определяющую физическую операцию поэтому можно концептуально представить в виде

направление падающей волны → волновое состояние, сформированное границей → конечное число измерений → калиброванная инверсия

Полученные вычислительные результаты не означают, что датчики или декодирование становятся ненужными. Напротив, они устанавливают иное функциональное разделение: геометрия выполняет пассивную аналоговую предварительную обработку до того, как начинает работать цифровой оцениватель. Именно это является центральным научным положением настоящей работы и основной частью заявляемого вклада в рамках Геометрической волновой инженерии.

11.2. Роль внешних фокальных колец

Два внешних фокальных кольца, наследуемые от вращаемой родительской гиперболы, следует интерпретировать как геометрические фокальные множества и организующие опорные множества, а не как материальные элементы, датчики, источники энергии или универсальные аттракторы волновой энергии. Волновое поле взаимодействует с физической отражающей границей, а не непосредственно с математическими фокальными множествами.

Поэтому их значение является косвенным, но фундаментальным. Родительская гиперболическая геометрия определяет специфическую организацию касательных и нормалей к стенке, направлений отражения, семейств длин путей, сепаратрис и фазового накопления. После вращения точечные фокусы меридиональной гиперболы превращаются в круговые геометрические множества, однако сами по себе эти множества не обеспечивают концентрацию произвольных волн.

Следовательно, фокальные кольца целесообразно рассматривать как наследуемые инварианты родительской конструкции PHB, тогда как фактическое электромагнитное или акустическое состояние определяется всей рабочей границей, включая входные окна, замыкания, размещение стенки, её конечную толщину и любое намеренно введённое смещение по нормали.

11.3. Общий лучевой транспорт и согласованное периодическое семейство

Точная трассировка лучей показывает, что общее падающее излучение не позволяет утверждать наличие универсальной пассивной концентрации в выбранной фокально-связанной области. Для обычных ансамблей плоских волн нормированная метрика заполнения остаётся ниже уровня равномерного распределения $G = 1$ как в двумерных, так и в трёхмерных тестах. Таким образом, лучевые расчёты демонстрируют изменение транспорта, обусловленное геометрией, а не существование безусловного фокального аттрактора.

Одновременно точная геометрия PHB поддерживает принципиально иной класс траекторий — крайне селективное фокально-согласованное периодическое или почти периодическое семейство. При точном выполнении условия согласования в выбранном окне после нескольких отражений возникает сильное увеличение метрики заполнения. Это подтверждает существование математически реальной структуры фазового пространства, связанной с геометрией PHB.

Однако это состояние исключительно хрупко. PHB-специфическое преимущество исчезает уже при чрезвычайно малом угловом рассогласовании, даже когда абсолютная метрика заполнения ещё может оставаться выше единицы. Поэтому согласованное состояние с высоким G не следует интерпретировать как продемонстрированный механизм широкоугольного определения направления. Более обоснованная интерпретация состоит в том, что геометрия PHB обладает резко выраженной структурой сепаратрисы/периодического семейства, потенциально релевантной резонансному выравниванию, угловой фильтрации, пороговому детектированию или будущему специально фазово-согласованному возбуждению. Поскольку наблюдаемый коллапс возникает в нелинейной многоотражательной карте, субмиллиградусную ширину нельзя приписывать физическому допуску до её воспроизведения независимым расчётом повышенной точности или второй реализацией.

11.4. Акустическая волновая верификация

Акустические FDTD-расчёты дают независимое волновое проявление принципа преобразования направления в состояние. Главным воспроизводимым результатом является не широкополосное акустическое усиление, а зависящий от геометрии комплексный спектрально-фазовый отпечаток.

После вычитания вклада свободного пространства PHB и согласованный гладкий контроль демонстрируют существенно различающиеся формы нечётного направленного отклика на двух независимых пространственных сетках. Разделение PHB и гладкого контроля в пространстве признаков остаётся приблизительно равным 54.66° и 56.08°, тогда как норма нечётного отклика PHB изменяется между двумя исследованными сетками всего примерно на 0.61%. Эти угловые значения являются углами между векторами в пространстве признаков и не должны интерпретироваться как восстановленные направления на источник.

Акустические расчёты полного поля на более мелкой сетке дополнительно показывают, что различие распределено по внутреннему объёму, а не сводится к одному точечному фокусу. Следовательно, данные подтверждают картину, в которой граница PHB реорганизует комплексное широкополосное состояние при приблизительно неизменной глобальной интенсивности отклика.

Это непосредственно согласуется с концепцией «направление → состояние»: полезный пассивный геометрический кодировщик не обязан увеличивать полную собранную энергию, если он создаёт устойчивое и различимое многообразие состояний.

11.5. Кодирование направления в Maxwell/FDTD

Электромагнитные расчёты дают наиболее прямое вычислительное подтверждение возможности локальной инверсии состояния, сформированного геометрией. В выбранной малоугловой ветви PHB общая несущая компонента остаётся сравнительно стабильной, тогда как знаковая нечётная компонента поля систематически изменяется с направлением падения.

Нечётная компонента является чрезвычайно низкоразмерной: первая главная компонента содержит приблизительно 99.997384% её энергии, а её проекция демонстрирует очень высокую линейность относительно знаковой угловой координаты.

В идеализированном слепом тесте по полному полю четыре направления, исключённые из обучающего набора, были восстановлены для PHB со средней абсолютной ошибкой MAE = 0.0598°, тогда как согласованный контроль C1 дал MAE = 0.0711°. Эти значения являются вычислительными ошибками интерполяции для незашумлённой двумерной модели с доступом ко всему полю, а не угловым разрешением физического приёмника. Результат C1 также показывает, что точное локальное кодирование направления не является уникальным свойством PHB.

Поэтому PHB-специфическим наблюдением является не просто «большая угловая чувствительность», а совместное формирование сравнительно устойчивого общего состояния и когерентной знаковой дифференциальной координаты. Это различие принципиально важно, поскольку контрольная геометрия может демонстрировать более сильный необработанный дифференциальный отклик и одновременно разрушать несущую компоненту.

11.6. Контрольные геометрии и границы заявления о научном приоритете

Согласованные контрольные геометрии являются обязательной частью интерпретации результатов. C1, C2, гладкий равноплощадный контроль, пустое пространство и линейный контроль показывают, что некоторые внешне привлекательные показатели — большие изменения поля, большое различие между двумя датчиками, нечётная симметрия или даже точное локальное декодирование — могут наблюдаться и в геометриях, отличных от PHB.

Поэтому научно обоснованное заявление о приоритете не состоит в утверждении, что PHB всегда сильнее фокусирует, всегда обладает максимальной чувствительностью к направлению или является единственной геометрией, способной кодировать направление падения.

Более узкое и устойчивое заявление относится к раскрытой здесь PHB-специфической архитектуре преобразования геометрии в состояние: псевдогиперболоидальная родительская геометрия второго порядка; наследуемые внешние фокальные кольца; рабочая отражающая граница; пассивное формирование структурированного внутреннего состояния; симметрийно-разрешённые переменные состояния; согласованные причинные контрольные геометрии; последующая калиброванная инверсия.

Научный вклад состоит именно в этой геометрической архитектуре и в объединённой лучевой, акустической и электромагнитной вычислительной доказательной базе.

11.7. Толщина стенки, положение отражающей поверхности и рабочая геометрия

Особенно важным результатом геометрического аудита является вывод о том, что толщина стенки не всегда может рассматриваться исключительно как материальный или механический параметр.

В Maxwell-реализации стенки конечной толщины, заданной относительно средней линии, аналитическая кривая PHB использовалась как средняя линия PEC-полосы конечной толщины t. Поэтому обращённая к воздуху поверхность, с которой фактически взаимодействовало поле, была смещена внутрь приблизительно на

$$d \approx t / 2$$

Следовательно, в такой геометрической постановке изменение t изменяет не только количество проводящего материала, но и положение физической отражающей поверхности. В результате могут изменяться эффективная геометрия полости, действительный размер и положение апертуры, положение замыкающей части, длины волновых путей, фазовое накопление, условия утечки и спектр собственных и квазисобственных мод.

Точная лучевая реконструкция явно различает аналитическую родительскую поверхность d = 0, обращённый к воздуху интерфейс средней-линейной реализации d = t/2, более глубокую внутреннюю поверхность d = t и случай d = 3t/2.

$$d = 0 \; ; \; d = t / 2 \; ; \; d = t \; ; \; d = 3t / 2$$

Это различие также проясняет важный геометрический момент. Для идеальной гладкой эквидистантной поверхности смещение по нормали само по себе не приводит к произвольному повороту нормали в соответствующих регулярных точках. Однако точка отражения перемещается. Поэтому луч, отражающийся в новой точке, уже не обязан удовлетворять исходному фокальному соотношению родительской гиперболы в той же форме. При дискретизированной или митерированной конструкции стенки конечной толщины дополнительно могут возникать локальные изменения ориентации отдельных сегментов.

Следовательно, толщина стенки и способ её размещения должны указываться совместно в любом воспроизводимом расчёте PHB. Формулировки «PHB со стенкой толщины t» недостаточно, если одновременно не указано, какой вариант реализован:

1. Аналитическая поверхность PHB является внутренней отражающей поверхностью, а материал стенки добавляется наружу.

2. Аналитическая поверхность PHB является средней линией стенки, вследствие чего внутренняя отражающая поверхность смещается приблизительно на t/2.

Эти две конструкции представляют разные электромагнитные полости, даже если для них заданы одинаковая родительская PHB и одинаковая номинальная толщина стенки.

11.8. Смещение, вызванное толщиной стенки, как координата настройки GWE

Вычислительные результаты дополнительно показывают, что такое геометрическое смещение является не просто численной особенностью. Оно может выступать самостоятельной конструктивной координатой Геометрической волновой инженерии.

Наиболее сильная воспроизводимая обогащённая электромагнитная ветвь в архивированной реализации стенки, заданной относительно средней линии, относится к внутренней рабочей поверхности со стороны воздуха, приблизительно d = t/2, а не автоматически к точной аналитической поверхности PHB. Отслеживание моды даёт следующие значения ветви:

Resolution	Отслеженная частота f	G	Интерпретация
60	2.13750	1.22432	Обогащённая отслеженная ветвь рабочей границы
80	2.14417	1.15422	Обогащённая отслеженная ветвь рабочей границы
120	2.15040	1.19749	Обогащённая отслеженная ветвь рабочей границы

Систематический сдвиг частоты с измельчением сетки показывает, почему узкую модальную ветвь необходимо отслеживать по идентичности поля и самой моды, а не просто сравнивать разные сетки на одной фиксированной частоте.

Независимое Maxwell-сравнение поверхностей с различным нормальным смещением даёт дополнительную количественную демонстрацию. При толщине стенки t = 0.12 сравнивались две отражающие поверхности d = t/2 = 0.06 и d = t = 0.12 при Resolution = 160 и нормированной частоте f = 4:

Толщина t	Смещение d	Resolution	f	G	Смысл
0.12	0.06 = t/2	160	4	0.2106	Ниже 1; опорное смещённое состояние
0.12	0.12 = t	160	4	0.3610	Ниже 1; изменённая передаточная функция
—	Отношение	—	—	1.714	G(d=t) / G(d=t/2)

Оба значения остаются ниже единицы, поэтому этот результат не является доказательством абсолютной концентрации. Однако он прямо показывает, что изменение фактически реализованного положения отражающей поверхности на величину, сопоставимую с толщиной стенки, существенно меняет передаточную функцию волновой системы. Поэтому отношение 1.714 является мерой чувствительности геометрии/передаточной функции для двух реализованных интерфейсов; это не коэффициент энергетического усиления и оно не отделяет чисто материальный эффект толщины от сопровождающего смещения границы.

Это изменяет инженерную интерпретацию толщины стенки. В реализации, где стенка строится относительно средней линии,

$$t \rightarrow d(t) \rightarrow \Gamma_d \rightarrow H_{\Gamma_d}(\omega)$$

образует причинную последовательность: толщина стенки → положение рабочей границы → волновой оператор → модальное заполнение и направленно-зависимое внутреннее состояние.

Следовательно, толщину t, нормальное смещение d, размер апертуры, геометрию переходной области и рабочую частоту необходимо рассматривать как единое совместное пространство проектных параметров, а не как независимые вторичные поправки.

11.9. Точная PHB и производная рабочая граница

Родительскую PHB и рабочую границу необходимо рассматривать как связанные, но физически различные научные объекты.

Родительская PHB задаёт аналитическую гиперболическую структуру, внешние фокальные множества, точное меридиональное отношение отражения и фокально-сепаратрисный геометрический каркас.

Рабочая граница определяет фактическую краевую задачу для волны. Она может отличаться от родительской поверхности вследствие размещения стенки, смещения по нормали, конечной толщины, конечной апертуры, центрального замыкания, дискретизации и особенностей изготовления.

Такое разделение согласует два на первый взгляд различных вычислительных результата. С одной стороны, последовательность расчётов точной PHB на фиксированной частоте и всё более мелкой сетке может оставаться в режиме абсолютного обеднения $G < 1$, сохраняя при

этом относительное отличие PHB от C2. С другой стороны, производная внутрь смещённая рабочая граница может поддерживать воспроизводимую обогащённую модальную ветвь при её правильном отслеживании.

Эти результаты не противоречат друг другу, поскольку относятся к разным физическим отражающим поверхностям. Для GWE это имеет важное следствие: исходная аналитическая коническая поверхность не обязательно должна быть окончательной оптимальной поверхностью волнового устройства. Она может служить геометрически содержательной родительской конструкцией, из которой формируется и оптимизируется семейство рабочих поверхностей.

11.10. Следствия для проектирования и изготовления PHB

Результат, связанный с толщиной стенки, непосредственно влияет на будущие численные и экспериментальные исследования. Для физически изготовленного PHB-приёмника прежде всего необходимо определить обращённую внутрь рабочую отражающую поверхность. Если предполагается, что именно эта поверхность должна совпадать с аналитической родительской PHB, то увеличение механической толщины стенки желательно выполнять наружу, сохраняя внутреннюю электромагнитную или акустическую геометрию неизменной.

Если же стенка строится симметрично относительно аналитической кривой, то каждое изменение её толщины одновременно изменяет внутреннюю отражающую геометрию. Следовательно, такое сканирование по толщине одновременно является и геометрическим сканированием.

В будущих сравнительных расчётах необходимо как минимум указывать:

$$t,\ d,\ \Gamma_d,\ R_1,\ \text{способ размещения стенки, модель материала, } f,\ \text{Resolution}$$

Это требование принципиально для воспроизводимости, поскольку две полости с одинаковыми номинальными параметрами PHB a, b, R, R_1, но с различным способом размещения стенки представляют разные волновые задачи.

11.11. Научное значение для Геометрической волновой инженерии

Совокупность расчётов позволяет сформулировать более общий проектный принцип GWE. Полезным объектом является не только одна идеальная аналитическая поверхность, а семейство рабочих границ, производных от геометрически содержательной родительской конструкции.

Поэтому основная проектная задача должна постепенно смещаться от вопроса «Максимизирует ли точная PHB энергию в одной фокальной области?» к более общей постановке: «Какая рабочая граница, производная от PHB, создаёт наиболее информативное, устойчивое и физически реализуемое направленно-зависимое состояние?»

В эту постановку естественным образом входят нормальное смещение, толщина стенки, апертура, гладкость переходных областей, частота, материальные потери и размещение датчиков. При этом необходимо чётко разделять две независимые инженерные цели:

- Локализация энергии, характеризуемая соответствующей метрикой регионального заполнения.
- Формирование информационно пригодного состояния, характеризуемого разделимостью состояний, производной отклика по направлению, неоднозначностью, чувствительностью к шуму и ошибкой слепого декодирования.

Геометрия может быть полезной для второй цели даже при G < 1. И наоборот, чрезвычайно большое G, существующее лишь в практически нулевой угловой полосе, может оказаться непригодным для широкоугольного определения направления.

11.12. Следующий этап верификации

Следующим решающим этапом должна быть не ещё одна изолированная демонстрация большого G, а верификация полной архитектуры «направление → состояние» с фиксированной геометрией, отслеживанием моды и конечным набором датчиков.

Необходимая последовательность следующая:

1. Выбрать и зафиксировать физическую внутреннюю рабочую границу Γ_d, включая точное правило задания толщины стенки.

2. Продемонстрировать межсеточную непрерывность одной и той же моды, а не совпадение результатов на одной фиксированной частоте.

3. Заменить идеальный доступ ко всему полю конечным кольцевым или многопоясным набором датчиков.

4. Выполнить слепое восстановление направлений, которые не использовались при калибровке.

5. Ввести аддитивный шум, конечную проводимость, ошибки усиления и фазы датчиков, изменение спектра источника и производственные допуски.

6. Перейти к истинному трёхмерному возбуждению с изменением азимута и угла места.

7. Экспериментально проверить полученную архитектуру.

Только после прохождения этих этапов численно установленное кодирование состояния может быть преобразовано в количественные заявления о реальном угловом разрешении, дальности, устойчивости и рабочих характеристиках устройства.

11.13. Итоговое заявление о научном приоритете

Таким образом, имеющаяся вычислительная база поддерживает следующее ограниченное и научно проверяемое заключение.

PHB-2 может функционировать как пассивный геометрический аналоговый фронт-энд, в котором направление падающей волны преобразуется в структурированное внутреннее волновое состояние до цифрового анализа. Родительская псевдогиперболоидальная геометрия задаёт наследуемый фокально-сепаратрисный каркас. Акустические и электромагнитные волновые расчёты демонстрируют воспроизводимую организацию внутренних состояний, зависящую от направления. Точная трассировка лучей выявляет одновременно ограничения общего лучевого транспорта и существование исключительно селективного согласованного периодического семейства. Согласованные контрольные геометрии показывают, что заявление о приоритете должно относиться именно к PHB-производной архитектуре, а не к универсальному превосходству над всеми альтернативами.

Дополнительным центральным результатом является установление того, что положение физической отражающей поверхности, включая смещение, возникающее вследствие конечной толщины стенки, само является функциональным параметром волновой инженерии. Обнаруженная зависимость от внутреннего нормального смещения показывает, что рабочая граница, производная от PHB, может обладать передаточной функцией, существенно отличающейся от функции точной аналитической родительской поверхности. Следовательно, толщина стенки не всегда является нейтральным механическим параметром. Если её изменение

изменяет внутреннюю отражающую поверхность, толщина становится частью самой волновой геометрии.

Таким образом, заявление о научном приоритете является более широким и одновременно более точным, чем заявление о пассивной фокусировке. Оно относится к семейству пассивных PHB-производных геометрических преобразований «направление → состояние», в которых родительская геометрия, рабочее нормальное смещение, толщина стенки, апертура и модальная рабочая точка совместно определяют кодируемое волновое состояние.

Настоящая работа не устанавливает существование завершённого радара или сонара, универсального механизма фокусировки либо универсально превосходящего пеленгатора. Она устанавливает вычислительно фальсифицируемую архитектуру геометрической обработки волн и определяет физические и численные параметры, которые должны контролироваться на следующем этапе для превращения этой архитектуры в практически работающее устройство.

Приложение A. Сводные количественные таблицы

Таблица A1. Метрики заселённости для точных лучей.

Возбуждение / метрика	**PHB-2**	**C2**	**PHB/C2**	**Интерпретация**
Плоская волна, 2D	0.7922	0.6705	1.1815	оба G<1; зависящая от геометрии маршрутизация
Плоская волна, полное 3D	0.33354	0.39936	0.8352	PHB ниже C2 и G<1
Согласованное семейство, отражения 5–10	13.763	5.128	2.684	исследовательское периодическое состояние, зависящее от выбранного окна

Таблица A2. Угловой коллапс согласованного лучевого состояния. Значения G для C2 рассчитаны из приведённых G PHB и отношений PHB/C2; при 0.0005° расчётное значение C2 (≈2.288) немного превышает PHB (2.235).

Угловое рассогласование	**PHB G (5–10)**	**PHB/C2**	**G C2 (расчётное)**
0°	13.763	2.684	5.128
0.0005°	2.235	0.977	2.288
0.001°	1.487	0.970	1.533
0.002°	0.886	0.952	0.931
0.005°	0.500	0.929	0.538
0.01°	0.611	0.950	0.643

Угловое рассогласование	**PHB G (5–10)**	**PHB/C2**	**G C2 (расчётное)**
0.05°	0.443	0.808	0.548
0.25°	0.411	0.886	0.464

Таблица A3. Метрики широкополосных акустических нечётных отпечатков.

Сетка	**Норма нечётной компоненты PHB**	**Норма нечётной компоненты Smooth**	**Отношение норм**	**Угол формы**	**Расстояние**	**Уровень PHB относительно smooth**
PPW 38.1	1.60448	1.54847	1.03617	54.6597°	0.918	−0.023 dB
PPW 56	1.59478	1.54217	1.03412	56.0830°	0.940	−0.056 dB

Таблица A4. Полнополевое акустическое разделение на мелкой сетке.

Метрика	**0°**	**±15°**
Глобальное PHB/дефокусированный контроль $\Sigma\|H\|^2$	0.999638	≈0.999723
Медианный локальный спектральный угол	26.54°	30.81°
Локальный спектральный угол P90	37.91°	46.50°
Медиана после исключения 50-mm области у стенки	25.91°	29.94°

Таблица A5. Малоугловое общее и дифференциальное состояние Maxwell.

$\|\theta\|$	**PHB G_E**	**C1 G_E**	**Нечётная доля PHB**	**Нечётная доля C1**
0°	1.144294	0.390796	≈0	≈0
1°	1.144528	0.420166	0.238%	11.711%
2°	1.145197	0.490039	0.922%	33.908%
3°	1.146217	0.568403	1.973%	52.262%

|θ|	**PHB G_E**	**C1 G_E**	**Нечётная доля PHB**	**Нечётная доля C1**
3.75°	1.147149	0.621061	2.940%	61.949%

Таблица A6. Значения Maxwell-интерполяции на отложенных углах.

Модель	**Истинный угол**	**Декодированный угол**	**Абсолютная ошибка**
PHB-2	−3.0°	−3.0362°	0.0362°
PHB-2	−1.5°	−1.5834°	0.0834°
PHB-2	+1.5°	+1.5834°	0.0834°
PHB-2	+3.0°	+3.0362°	0.0362°
C1	−3.0°	−3.0415°	0.0415°
C1	−1.5°	−1.6008°	0.1008°
C1	+1.5°	+1.6008°	0.1008°
C1	+3.0°	+3.0415°	0.0415°

Таблица A7. Сеточная серия точной PHB на фиксированной частоте. Последовательность C2 немонотонна; отношения PHB/C2 являются описательными контрастами, а не сошедшимся отношением.

Resolution	**G exact PHB**	**C2 G**	**PHB/C2**
80	0.9002	0.2479	3.632
100	0.6476	0.4931	1.313
120	0.4598	0.1760	2.613
140	0.3401	0.1225	2.777

Таблица A8. Отслеживаемая модальная ветвь рабочей границы, смещённой внутрь.

Resolution	Отслеживаемая пиковая частота	G на пике ветви
60	2.13750	1.22432
80	2.14417	1.15422
120	2.15040	1.19749

Таблица A9. Сводная доказательная база и допустимая интерпретация.

Ветвь свидетельств	Репрезентативный результат	Научная интерпретация
Точные лучи	G=0.7922 (2D), 0.33354 (3D)	зависящий от геометрии транспорт, а не общая концентрация
Согласованные лучи	G=13.763	исследовательское высокоселективное периодическое семейство; зависит от окна и при рассогласовании не является уникально PHB-специфическим
Акустическая широкополосная	угол формы 54.66–56.08°	устойчивая по сетке специфичная для геометрии сигнатура
Акустическое поле на мелкой сетке	медианный локальный угол 26.54–30.81°	распределённое внутреннее перераспределение
Нечётная мода Maxwell	R^2=0.999275; PCA=99.997384%	низкоразмерная знаковая координата направления
Maxwell, отложенные углы	PHB MAE=0.0598°	идеальная локальная полнополевая обратимость
Рабочее смещение	G=1.22432/1.15422/1.19749	нормальное смещение настраивает модальную заселённость

Методологические ссылки

1. Born, M.; Wolf, E. Principles of Optics, 7th ed., 60th Anniversary Edition. Cambridge University Press, 2019. DOI: 10.1017/9781108769914.

2. Morse, P. M.; Ingard, K. U. Theoretical Acoustics. McGraw-Hill, 1968.

3. Pierce, A. D. Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications. Acoustical Society of America, 1989.

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

5. Oskooi, A. F. et al. Meep: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method. Computer Physics Communications 181 (2010) 687–702. DOI: 10.1016/j.cpc.2009.11.008.

6. Van Trees, H. L. Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory. Wiley, 2002. DOI: 10.1002/0471221104.

Связанный научный контекст

Следующие публикации описывают смежные архитектуры с отражателями, вычислительными апертурами и направленным кодированием с одним датчиком [7–11]. Они включены для научного контекстуального сопоставления PHB-специфических заявлений и не представляют собой исчерпывающий поиск новизны или анализ патентоспособности.

7. Granet, C. Designing Classical Offset Cassegrain or Gregorian Dual-Reflector Antennas from Combinations of Prescribed Geometric Parameters. IEEE Antennas and Propagation Magazine 44(3) (2002) 114–123. DOI: 10.1109/MAP.2002.1028736.

8. Yurduseven, O.; Abbasi, M. A. B.; Fromenteze, T.; Fusco, V. Frequency-Diverse Computational Direction of Arrival Estimation Technique. Scientific Reports 9 (2019) 16704. DOI: 10.1038/s41598-019-53363-3.

9. Hoang, T. V.; Fusco, V.; Abbasi, M. A. B.; Yurduseven, O. Single-pixel polarimetric direction of arrival estimation using programmable coding metasurface aperture. Scientific Reports 11 (2021) 23830. DOI: 10.1038/s41598-021-03228-5.

10. Sun, X.; Jia, H.; Zhang, Z.; Yang, Y.; Sun, Z.; Yang, J. Sound Localization and Separation in 3D Space Using a Single Microphone with a Metamaterial Enclosure. Advanced Science 7 (2020) 1902271. DOI: 10.1002/advs.201902271.

11. Peic Tukuljac, H.; Lissek, H.; Vandergheynst, P. Localization of Sound Sources in a Room with One Microphone. Proceedings of SPIE, Wavelets and Sparsity XVII (2017). DOI: 10.1117/12.2271249.

12. Meep Documentation. Python User Interface. The resolution parameter specifies the number of pixels per unit distance. Accessed 8 August 2026. https://meep.readthedocs.io/en/stable/Python_User_Interface/.