

УДК 621.391.6:004.725.5

© 2024 г. А.И. Пойда, И.А. Буртаков, А.А. Куреев, Е.М. Хоров

**ФОРМИРОВАНИЕ ШИРОКИХ ОТРАЖЕННЫХ ЛУЧЕЙ
РЕКОНФИГУРИРУЕМЫМИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ¹**

Реконфигурируемая интеллектуальная поверхность (англ.: reconfigurable intelligent surface, RIS) является перспективной технологией для увеличения зоны покрытия и пропускной способности существующих и будущих беспроводных систем за счет настройки коэффициентов отражения. Среди предложенных в научном сообществе алгоритмов настройки RIS выделяется иерархический поиск луча (ИПЛ) за счет высокой скорости и возможности использовать простые канальные метрики, такие как мощность сигнала. Для алгоритмов ИПЛ необходимо формировать отраженные лучи разной ширины и с разными направлениями. Существующие методы синтеза широких лучей обладают рядом недостатков, таких как высокая вычислительная сложность и использование элементов RIS со сложной архитектурой. В данной статье рассматриваются эти проблемы и предлагается метод синтеза отраженных двумерных лучей с заданными шириной и направлением, который основан на фазовом шивании узких лучей. Разработанный метод синтеза имеет низкую вычислительную сложность и позволяет RIS формировать лучи с десятками и сотнями тысяч элементов.

Ключевые слова: реконфигурируемые интеллектуальные поверхности, 5G, LTE, синтез лучей.

DOI: 10.31857/S0555292324030057, **EDN:** XATDIP

§ 1. Введение

Реконфигурируемая интеллектуальная поверхность (англ.: reconfigurable intelligent surface, RIS) является ключевой технологией для повышения области покрытия и пропускной способности систем связи шестого поколения (6G) [1]. RIS представляет собой двумерную поверхность, состоящую из множества пассивных элементарных ячеек (ЭЯ), которые могут воздействовать на распространение беспроводных сигналов путем изменения коэффициентов отражения. Например, RIS может перенаправлять и фокусировать отраженный сигнал от базовой станции (БС) на пользовательском устройстве (ПУ) для увеличения отношения сигнал/шум (англ.: signal-to-noise ratio, SNR) что приводит к увеличению пропускной способности, области покрытия и энергоэффективности беспроводных систем связи. Кроме того, это позволяет повысить защищенность беспроводных каналов связи [2, 3].

Для достижения описанных преимуществ необходимо осуществлять настройку коэффициентов отражения RIS. Применение традиционных подходов настройки на основе информации о состоянии канала [4] требует слишком большого числа пилотных сигналов, даже с учетом методов их снижения, таких как, например, compressed sensing [5, 6]. Поэтому важным требованием к алгоритмам настройки RIS является

¹ Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

использование простых канальных метрик, таких как SNR или мощность принимаемого опорного сигнала (англ.: reference signals received power, RSRP) [7]. Распространенным классом алгоритмов, основанных на использовании вышеуказанных метрик, являются алгоритмы поиска луча [8]. Они основаны на сканировании окружающей среды с помощью лучей различной формы и направления и выборе такого, который, например, максимизирует SNR.

Среди алгоритмов поиска луча выделяется алгоритм иерархического поиска луча (ИПЛ). Алгоритм ИПЛ начинает сканирование с широких лучей, а затем последовательно уменьшает их ширину, чтобы найти наилучшее направление. Поскольку технология RIS имеет ограничения, такие как дискретный фазовый сдвиг на ЭЯ и невозможность варьировать амплитуду отраженного сигнала, методы синтеза луча с заданным направлением и шириной, которые используются в технологии massive MIMO, неприменимы. В некоторых исследованиях предлагаются новые методы синтеза луча [9, 10], такие как настройка фазы с использованием метода Герхберга – Сакстона [9] и формирование луча путем деактивации подмножества ЭЯ [10]. Однако они обладают высокой вычислительной сложностью или требуют слишком сложных архитектур RIS с поглощающими ЭЯ.

В данной статье предложен новый метод синтеза широкого луча, который учитывает архитектурные ограничения RIS. В основе предложенного метода лежит принцип фазовой сшивки нескольких узких лучей.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В § 2 представлен обзор литературы. Далее, § 3 посвящен методу синтеза широкого луча. В § 4 приведены полученные численные результаты. Наконец, § 5 завершает статью.

§ 2. Обзор литературы

Для настройки RIS с помощью алгоритмов ИПЛ необходимо формировать лучи с заданными направлением и шириной. Распространенным подходом является рассмотрение синтеза луча как решения оптимизационной задачи.

Например, авторы статьи [11] предлагают использовать генетический алгоритм для построения многонаправленных лучей или одного широкого луча от RIS. В работе [12] предлагается оптимальный алгоритм для дискретных фазовых сдвигов на ЭЯ и локально оптимальное решение для непрерывных.

Некоторые работы используют итеративный метод Герхберга – Сакстона [13] для поиска фазы луча, чтобы формировать луч с заданной шириной. В исследовании [14] предлагается двумерная иерархическая схема синтеза луча для работы RIS в ближнем поле. Авторы предлагают алгоритм на основе метода Герхберга – Сакстона для получения первичной конфигурации каждой ЭЯ. Затем на основе первичной конфигурации предлагается использовать алгоритм попеременной оптимизации для получения конечной конфигурации всей RIS.

Существуют более сложные подходы к синтезу луча, которые не формируют луч заданной ширины, но позволяют RIS охватывать заданную область произвольной формы. Например, в работе [15] предлагается подход к синтезу луча для покрытия слепых зон в миллиметровом диапазоне. В работе [16] предлагается схема на основе мажоризации-максимизации для максимизации минимальной пропускной способности множества ПУ в определенной области.

Основным недостатком методов из работ [9, 14–16] является крайне высокая вычислительная сложность, не позволяющая применить предложенные алгоритмы для двумерных RIS с большим числом элементов.

Авторы работы [17] предлагают использовать детерминированный вид фазового сдвига на ЭЯ в явной форме, а именно, фазовый сдвиг каждой ЭЯ пропорционален квадрату номера ЭЯ по каждой оси. Однако в [17] рассматривается только

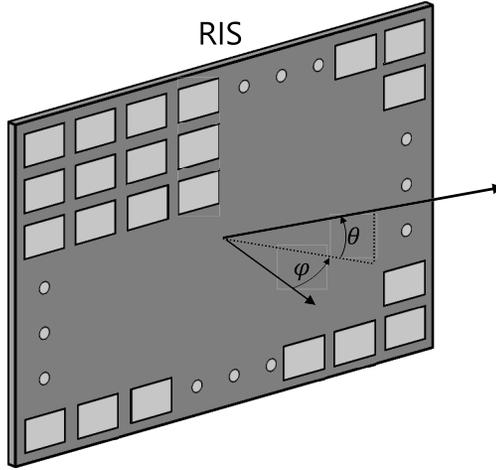


Рис. 1. Геометрия системы с RIS

RIS с непрерывными фазовыми сдвигами, что не позволяет напрямую использовать предложенный метод в RIS с дискретными фазовыми сдвигами. Кроме того, авторы не исследуют поведение боковых лепестков синтезированных лучей.

Таким образом, необходимо разработать метод синтеза широкого двумерного луча, учитывающий дискретные фазовые сдвиги и обладающий низкой вычислительной сложностью.

§ 3. Синтез лучей

В данном параграфе сначала рассматривается синтез узкого луча, основанный на классических подходах антенных решеток. Затем рассматривается метод синтеза широкого луча, который состоит из двух частей: синтез одномерного (1D) и двумерного (2D) широких лучей.

Для описания системы с RIS используется сферическая система координат с азимутальным углом φ и углом подъема θ , представленная на рис. 1.

3.1. Синтез узкого луча. Рассмотрим RIS с ЭЯ, обладающими непрерывными фазовыми сдвигами. Узким лучом назовем такой отраженный луч от RIS, который имеет максимальный амплитудный коэффициент усиления в желаемом направлении (φ, θ) при фиксированном числе ЭЯ.

Чтобы описать узкий луч, рассмотрим коэффициент усиления AF одномерной решетки [18]. В соответствии с геометрией, представленной на рис. 1,

$$AF_x(\varphi, \theta) = \left| \sum_{n_x=0}^{N_x-1} e^{jn_x(kd_x \cos \theta \sin \varphi + \delta_x)} \right|, \quad (1)$$

$$AF_y(\varphi, \theta) = \left| \sum_{n_y=0}^{N_y-1} e^{jn_y(kd_y \sin \theta + \delta_y)} \right|, \quad (2)$$

где k — волновое число, $d_{x/y}$ — расстояние между элементами, а $\delta_{x/y}$ — набег фазы между элементами в x/y -осях соответственно.

Если N_y одномерных решеток по оси x размещены с шагом $d_y = d_x = d$ вдоль оси y с набегом фазы δ_y , то образуется двумерная решетка с AF, равным

$$\text{AF}(\varphi, \theta) = \left| \sum_{n_y=0}^{N_y-1} \sum_{n_x=0}^{N_x-1} e^{jn_x(kd \cos \theta \sin \varphi + \delta_x)} e^{jn_y(kd \sin \theta + \delta_y)} \right|. \quad (3)$$

Чтобы сформировать узкий луч, необходимо максимизировать значение $\text{AF}(\varphi, \theta)$ для заданных φ, θ . Для достижения максимального значения (3) необходимо, чтобы значения δ_x и δ_y были равны

$$\delta_x = -kd \cos \theta \sin \varphi \pm 2\pi r_x, \quad r_x = 0, 1, 2, \dots, \quad (4)$$

$$\delta_y = -kd \sin \theta \pm 2\pi r_y, \quad r_y = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

Преобразуем φ, θ в $\widehat{\varphi}, \theta$ так, чтобы δ_x формально не зависел от θ . Для этого введем

$$\widehat{\varphi} = g_\theta(\varphi) = \arcsin(\sin \varphi \cos \theta). \quad (6)$$

Подставив $\sin \widehat{\varphi}$ в (4), получим

$$\delta_x = -kd \sin \widehat{\varphi} \pm 2\pi r_x. \quad (7)$$

Теперь набег фазы вдоль оси x/y формально зависит только от соответствующего угла φ/θ . Поскольку угол $\widehat{\varphi}$ введен, чтобы заменить φ , преобразование φ в $\widehat{\varphi}$ следует рассматривать как параметрическое преобразование с θ в качестве параметра.

Обозначим векторы конфигурации одномерных RIS вдоль осей x и y через $\alpha^\varphi \in \mathbb{C}^{N_x}$ и $\alpha^\theta \in \mathbb{C}^{N_y}$ соответственно. В свою очередь, вектор конфигурации двумерной RIS в плоскости xu обозначим через $\alpha^{\varphi, \theta} \in \mathbb{C}^{N_x N_y}$. В результате сделаем следующее

Утверждение. Чтобы сформировать узкий луч с конфигурацией $\alpha^{\varphi, \theta}$ в направлении (φ, θ) , достаточно сформировать две независимые конфигурации RIS $\alpha^{\widehat{\varphi}}$ и α^θ в соответствующих направлениях $(\widehat{\varphi}, 0)$ и $(0, \theta)$ согласно (6). Тогда конечная конфигурация вычисляется как

$$\alpha^{\varphi, \theta} = \text{vec} \left((\alpha^\theta)^T \alpha^{\widehat{\varphi}} \right),$$

где

$$\alpha^\theta = (0, \delta_y, \dots, (N_y - 1)\delta_y), \quad \alpha^{\widehat{\varphi}} = (0, \delta_x, \dots, (N_x - 1)\delta_x).$$

Дополнительно введем вектор конфигурации RIS $\alpha^{\varphi, \theta, \psi}$, в котором фаза всех элементов повернута на одинаковый угол ψ . Отметим, что добавление ψ никак не влияет на AF луча, но изменяет его фазу, что позволяет контролировать суперпозицию нескольких лучей.

3.2. Синтез широких одномерных лучей. Сначала рассмотрим синтез широкого одномерного луча, например, в оси φ . Широкий одномерный луч полностью определяется двумя параметрами: ширина W^φ и угол центра φ^c .

Неформально целью синтеза широкого луча является обеспечение высоких значений AF внутри области широкого луча

$$\Phi_{\text{beam}} = \left[\varphi^c - \frac{W^\varphi}{2}, \varphi^c + \frac{W^\varphi}{2} \right]$$

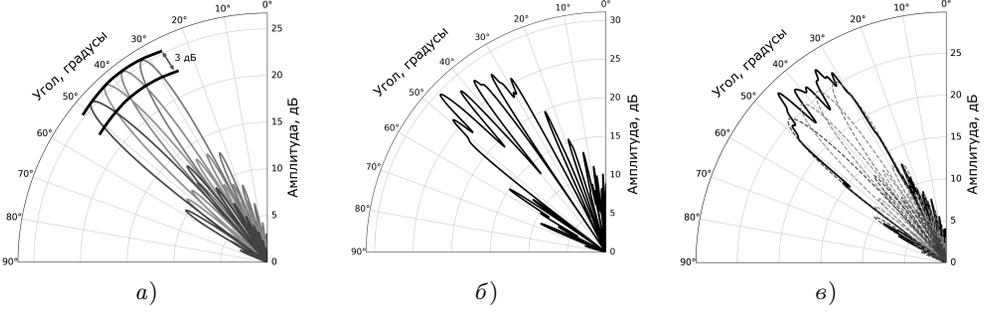


Рис. 2. Диаграмма широкого одномерного луча с параметрами $W^\varphi = 20^\circ$, $\varphi^c = 40^\circ$ для RIS с $N = 100$, $b = 4$: а) диаграмма узких лучей, сшитых по амплитуде; б) диаграмма широкого луча без сшивки по фазе; в) диаграмма широкого луча со сшивкой по фазе

и низких значений вне этой области

$$\Phi_{sl} = \left[-\frac{\pi}{2}, \varphi^c - \frac{W^\varphi}{2} \right) \cup \left(\varphi^c + \frac{W^\varphi}{2}, \frac{\pi}{2} \right].$$

Для формирования широкого луча RIS разделяется на M сегментов, где каждый сегмент формирует свой собственный узкий луч так, что направления центров лучей соседних сегментов сдвинуты (сшиты) по порогу половины мощности (англ.: half power beam width, НРВW) узких лучей. Разбиение на сегменты происходит так, чтобы все M узких лучей имели одинаковые НРВW и пиковые значения АФ. Описанная схема представлена на рис. 2,а).

Для определения значения M используется тот факт [19], что НРВW для одномерного RIS с N ЭЯ равен

$$W_0 = \frac{0,886\lambda}{Nd \cos \varphi^c}. \quad (8)$$

Таким образом, после разделения RIS на M равных частей суммарная ширина луча W^φ равна

$$W^\varphi \approx \frac{0,886\lambda}{\frac{N}{M}d \cos \varphi^c} M = \frac{0,886\lambda}{Nd \cos \varphi^c} M^2. \quad (9)$$

Поэтому для требуемого значения W^φ необходимое число сегментов равно

$$M = \left\lceil \sqrt{W^\varphi \frac{Nd \cos \varphi^c}{0,886\lambda}} \right\rceil. \quad (10)$$

Операция округления применяется для того, чтобы сформировать луч *не* уже, чем требуемое W^φ .

Теперь необходимо сшить полученные узкие лучи для формирования широкого луча. Сшивка состоит из двух этапов.

На первом этапе узкие лучи сшиваются по порогу НРВW. Для этого центры M узких лучей располагаются равномерно внутри области широкого луча. Обозначим центры узких лучей через φ_i^c , $i = 1, \dots, M$:

$$\varphi_i^c = \varphi^c - \frac{M/2 - i}{M} W^\varphi, \quad i = 1, \dots, M. \quad (11)$$

Теперь M сегментов с $N_i = \frac{N}{M}$ ЭЯ в каждом формируют M узких подлучей в различных направлениях (11). Следовательно, согласно (8) их НРВW немного отличаются. Для компенсации этого эффекта производится балансировка ЭЯ между сегментами, чтобы выровнять амплитуды и НРВW их узких лучей:

$$N_i \cos \varphi_i^c = \text{const}, \quad i = 1, \dots, M.$$

Это приводит к тому, что число ЭЯ в каждом сегменте равно

$$N_i = \left[\frac{N \cos \varphi_i^c}{M \sum_{i=1}^M \cos \varphi_i^c} \right], \quad i = 1, \dots, M. \quad (12)$$

В результате получены M узких лучей с одинаковыми амплитудами и НРВW, центры φ_i^c которых обеспечивают амплитудную сшивку по порогу -3 дБ. На рис. 2, б) представлен пример такой сшивки.

Можно заметить, что взаимная интерференция между узкими лучами может приводить к сильным пульсациям внутри широкого луча и высоким боковым лепесткам. Для борьбы с интерференцией на втором этапе производится фазовая сшивка узких лучей. Фазовая сшивка обеспечивается упомянутой ранее добавленной фазой ψ для каждого узкого луча.

Обозначим вектор фаз узких лучей через $\psi = (\psi_1, \dots, \psi_M)$. Тогда соответствующие векторы конфигурации каждого сегмента обозначаются как $\alpha^{\varphi_i^c, \psi_i}$, а полный вектор конфигурации – как

$$\alpha^{W^\varphi, \varphi^c, \psi} = \left[\alpha^{\varphi_1^c, \psi_1}, \dots, \alpha^{\varphi_M^c, \psi_M} \right].$$

Рассмотрим коэффициент усиления одномерного RIS $\text{AF}(\varphi)$ как функцию от α : $\text{AF}[\alpha](\varphi)$. Тогда фазовая сшивка может быть выполнена с минимизацией следующей функции потерь $f_{\text{loss}}(\alpha^{W^\varphi, \varphi^c, \psi})$:

$$\begin{aligned} \min_{\psi} f_{\text{loss}}(\alpha^{W^\varphi, \varphi^c, \psi}) &= \gamma \text{std}(|\text{AF}[\alpha^{W^\varphi, \varphi^c, \psi}](\Phi_{\text{beam}})|) - \\ &- (1 - \gamma) \left(\min(|\text{AF}[\alpha^{W^\varphi, \varphi^c, \psi}](\Phi_{\text{beam}})|) - \max(|\text{AF}[\alpha^{W^\varphi, \varphi^c, \psi}](\Phi_{\text{sl}})|) \right), \end{aligned} \quad (13)$$

где $\text{std}(\cdot)$ – стандартное отклонение $\text{AF}[\alpha]$ в области Φ , $\max(\cdot)$ – максимальное значение $\text{AF}[\alpha]$ в области Φ . Отметим, что величина $\text{std}(|\text{AF}[\alpha^{W^\varphi, \varphi^c, \psi}](\Phi_{\text{beam}})|)$ отражает уровень пульсаций внутри широкого луча, а оставшаяся часть отражает уровень боковых лепестков относительно луча. В результате минимизации f_{loss} , уровень пульсаций широкого одномерного луча значительно снижается, как показано на рис. 2, в). Кроме того, амплитуда боковых лепестков также снижается.

Задача (13) является невыпуклой [20], поэтому предлагается решать ее одним из двух подходов. Первым является жадный алгоритм (англ.: greedy algorithm, GA), при котором поиск осуществляется по конечному множеству Ψ для каждого ψ_i . Алгоритм GA для каждого ψ_i перебирает все значения ψ из Ψ и выбирает то ψ , которое минимизирует (13). Отметим, что этот алгоритм может более одного раза проходить по всем ψ_i для обеспечения еще лучшего результата.

Вторым из этих подходов является случайное семплирование (англ.: random sampling, RS), при котором случайным образом семплируются векторы ψ из Ψ^M , и в качестве приближенного решения выбирается тот, который минимизирует (13). Полностью синтез широкого одномерного луча с применением GA представлен в алгоритме 1.

Алгоритм 1 Синтез широкого одномерного луча

Вход: ширина луча W^φ , центр луча φ^c .

Выход: вектор конфигурации α^* .

- 1: Инициализация: нулевой вектор α^* , $Q \leftarrow f_{\text{loss}}(\alpha^*)$, нулевой вектор ψ .
 - 2: Вычислить число узких лучей M через (10).
 - 3: Вычислить центры узких лучей φ_i^c , $i = 1, \dots, M$, используя (11).
 - 4: Вычислить число ЭЯ N_i для каждого сегмента, используя (12), $i = 1, \dots, M$. /* Найти приближенное решение ψ^* для (13), используя GA, и построить соответствующую конфигурацию RIS α^* . */
 - 5: **for** $i \in 2 \dots M$ **do**
 - 6: $\psi^* \leftarrow 0$.
 - 7: **for** $j \in 1 \dots |\Psi|$ **do**
 - 8: $\psi_j \leftarrow \Psi_j$.
 - 9: $\alpha^{W^\varphi, \varphi^c, \psi} \leftarrow [\alpha^{\varphi_1^c, \psi_1}, \dots, \alpha^{\varphi_M^c, \psi_M}]$.
 - 10: **if** $f_{\text{loss}}(\alpha^{W^\varphi, \varphi^c, \psi}) < Q$ **then**
 - 11: $Q \leftarrow f_{\text{loss}}(\alpha^{W^\varphi, \varphi^c, \psi})$.
 - 12: $\psi^* \leftarrow \Psi_j$.
 - 13: $\psi_i \leftarrow \psi^*$.
 - 14: **return:** α^* .
-

Сравнение GA и RS рассматривается в § 4.

Синтез широкого двумерного луча. Широкий двумерный луч полностью определяется следующими параметрами: W^φ — ширина луча в оси φ , W^θ — ширина луча в оси θ , φ^c и θ^c — направление центра луча. Чтобы оставить вычислительную сложность синтеза такой же, как в случае широкого одномерного луча, предлагается формировать двумерный луч как композицию двух одномерных, одного в оси φ , а другого в оси θ .

Для этого воспользуемся утверждением, представленным в п. 3.1, где показано, что конфигурация узкого луча $\alpha^{\varphi, \theta}$ для двумерного RIS может рассматриваться как произведение двух конфигураций одномерного RIS $\alpha^{\varphi, \theta} = \text{vec}((\alpha^\theta)^T \alpha^\varphi)$, где α^φ — вектор конфигурации одномерного RIS для угла

$$\widehat{\varphi} = g_\theta(\varphi) = \arcsin(\sin \varphi \cos \theta).$$

Этот же подход можно применить и к широким лучам, так как широкие лучи формируются из множества узких лучей.

Однако в случае широких лучей преобразование φ^c с помощью (6) оказывается недостаточным, так как $g_\theta(\cdot)$ является нелинейной операцией относительно φ , и поэтому исходный геометрический центр луча не преобразуется в геометрический центр преобразованного широкого луча. Вместо преобразования φ^c и W^φ предлагается оперировать с левой φ^l и правой φ^r границами широкого луча, которые вычисляются как

$$\varphi^l = \varphi^c - \frac{W^\varphi}{2}, \tag{14}$$

$$\varphi^r = \varphi^c + \frac{W^\varphi}{2}. \tag{15}$$

После преобразования φ^l и φ^r новые значения $\widehat{\varphi}^c$ и \widehat{W}^φ вычисляются как

$$\widehat{\varphi}^c = \frac{g_\theta(\varphi^l) + g_\theta(\varphi^r)}{2}, \tag{16a}$$

$$\widehat{W}^\varphi = \frac{g_\theta(\varphi^l) - g_\theta(\varphi^r)}{2}. \tag{16b}$$

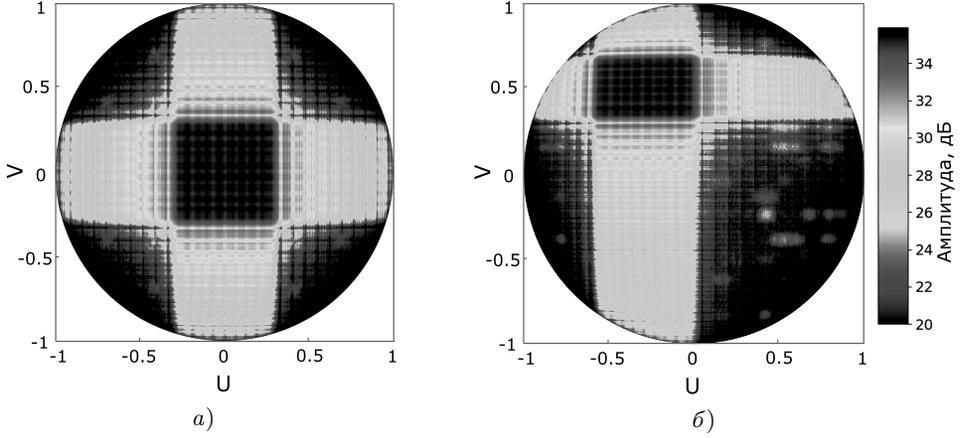


Рис. 3. Диаграммы широких двумерных лучей с различными параметрами: а) $W^\varphi = W^\theta = 30^\circ$, $\varphi^c = \theta^c = 0^\circ$; б) $W^\varphi = 20$, $W^\theta = 40^\circ$, $\varphi^c = 20$, $\theta^c = 30^\circ$

В результате вектор конфигурации для широкого двумерного луча с требуемыми $(W^\varphi, W^\theta, \varphi^c, \theta^c)$ вычисляется как

$$\alpha^{W^\varphi, \varphi^c, W^\theta, \theta^c} = \text{vec}\left(\left(\alpha^{W^\theta, \theta^c}\right)^T \widehat{\alpha}^{\widehat{W}^\varphi, \widehat{\varphi}^c}\right). \quad (17)$$

Примеры диаграмм широкого двумерного луча для RIS с $N = 200 \times 200$, $b = 4$ представлены на рис. 3. Можно заметить, что диаграмма имеет клеточную структуру, что обусловлено наличием, хоть и малых, но пульсаций в одномерных лучах.

Полностью синтез широкого двумерного луча представлен в алгоритме 2.

Алгоритм 2 Синтез широкого двумерного луча

Вход: ширины лучей и их центры в осях φ и θ : $W^\varphi, \varphi^c, W^\theta, \theta^c$.

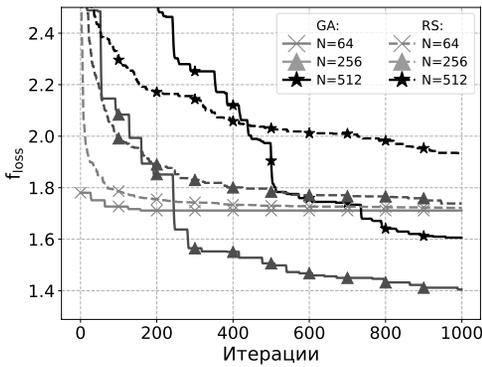
Выход: вектор конфигурации α^* .

- 1: Вычислить границы лучей φ^l, φ^r , используя (3.2).
 - 2: Вычислить $\widehat{\varphi}^c$ и \widehat{W}^φ , используя (16).
 - 3: Вычислить $\alpha^{\widehat{W}^\varphi, \widehat{\varphi}^c}, \alpha^{W^\theta, \theta^c}$, используя алгоритм 1.
 - 4: $\alpha^* \leftarrow \text{vec}\left(\left(\alpha^{W^\theta, \theta^c}\right)^T \alpha^{\widehat{W}^\varphi, \widehat{\varphi}^c}\right)$.
 - 5: **return:** α^* .
-

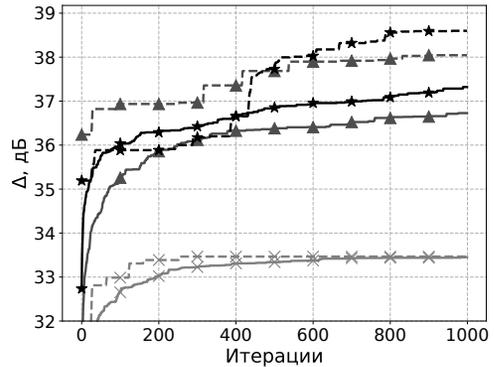
§ 4. Численные результаты

В данном параграфе проводится сравнение синтеза широких одномерных лучей с помощью GA и RS на основе различных метрик, изображенных на рис. 4, причем сплошные кривые соответствуют GA, а штрихпунктирные – RS.

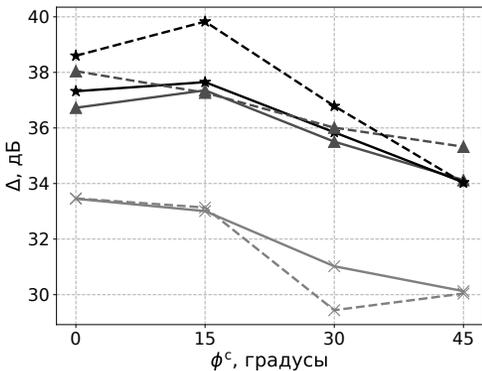
На рис. 4,а) представлена зависимость f_{loss} с $\gamma = 0,9$ от числа итераций (количества вычислений диаграмм луча) для широкого одномерного луча с $W^\varphi = 20^\circ$, $\varphi^c = 0^\circ$. Для малых RIS с количеством элементов равным $N = 64$ GA превосходит RS при любом числе итераций. Однако при $N = 256$ или $N = 512$ GA проигрывает RS при малом числе итераций, но потом GA начинает выигрывать. Это связано с тем, что большее число ЭЯ N приводит к большему числу подлучей M , и GA не успевает оптимизировать все подлучи.



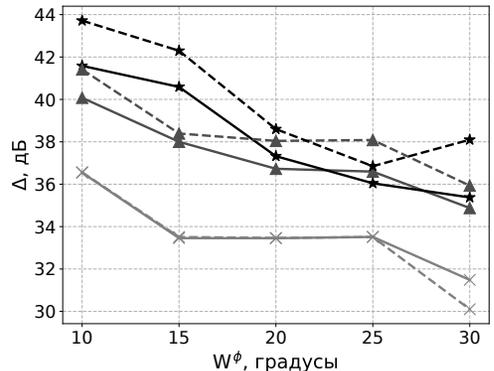
а) Зависимость f_{loss} от числа итераций



б) Зависимость Δ от числа итераций



в) Зависимость Δ от φ^c после 1000 итераций



з) Зависимость Δ от W^φ после 1000 итераций

Рис. 4. Синтеза луча с помощью RS и GA

В дополнение к f_{loss} также рассматривается альтернативная метрика качества луча $\Delta = \text{mean}(\text{AF}(\Phi_{\text{beam}})) - \text{mean}(\text{AF}(\Phi_{\text{sl}}))$, которая отражает разницу между средней мощностью луча и боковых лепестков, что показано на рис. 4,б). Поведение Δ похоже на поведение f_{loss} : при большом размере RIS и малом количестве итераций RS превосходит GA, в остальных случаях GA демонстрирует лучший результат.

Наконец, рассмотрим результат синтеза для различных φ^c и W^φ после 1000 итераций. Как показано на рис. 4,в), в среднем для различных φ^c и $N > 64$ метод GA обеспечивает лучшее Δ . Однако для малого RIS с $N = 64$ RS обходит GA. В то же время для больших φ^c , например, $\varphi^c = 45^\circ$, эффективность RS и GA становится близкой. Эти же свойства остаются верными и для различных W^φ , изображенных на рис. 4,з).

В результате можно сделать следующие эмпирические рекомендации по выбору GA и RS. Если RIS состоит из большого числа ЭЯ и время синтеза сильно ограничено, то следует использовать RS. В иных случаях следует выбирать GA.

§ 5. Заключение

В данной статье рассмотрена задача синтеза широких двумерного и одномерного лучей с помощью RIS. Предложенный метод обладает низкой вычислительной сложностью и позволяет формировать широкий луч с низкими уровнями пульса-

ций и боковых лепестков. Кроме того, эти методы могут быть применимы на RIS с простейшей архитектурой, подразумевающей, что ЭЯ обладают дискретной фазой и постоянной амплитудой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2030 and Beyond. International Telecommunication Union (ITU) Recommendation (ITU-R), 2023.
2. *Hua M., Wu Q., Chen W., Dobre O.A., Swindlehurst A.L.* Secure Intelligent Reflecting Surface-Aided Integrated Sensing and Communication // *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2023. V. 23. № 1. P. 575–591. <https://doi.org/10.1109/TWC.2023.3280179>
3. *Gao B., Башконюш Х.М., Каттани К.* Эффективность передачи данных при атаках с точки зрения варианта изолированной жесткости // *Пробл. передачи информ.* 2023. Т. 59. № 2. С. 83–101. <https://doi.org/10.31857/S0555292323020067>
4. *Kim I.-S., Bennis M., Oh J., Chung J., Choi J.* Bayesian Channel Estimation for Intelligent Reflecting Surface-Aided mmWave Massive MIMO Systems with Semi-Passive Elements // *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2023. V. 22. № 12. P. 9732–9745. <https://doi.org/10.1109/TWC.2023.3273284>
5. *Wang P., Fang J., Duan H., Li H.* Compressed Channel Estimation for Intelligent Reflecting Surface-Assisted Millimeter Wave Systems // *IEEE Signal Process. Lett.* 2020. V. 27. P. 905–909. <https://doi.org/10.1109/LSP.2020.2998357>
6. *Фернандес М., Кабатянский Г.А., Круглик С.А., Мяс И.* Коды для точного нахождения носителя разреженного вектора по ошибочным линейным измерениям и их декодирование // *Пробл. передачи информ.* 2023. Т. 59. № 1. С. 17–24. <https://doi.org/10.31857/S0555292323010023>
7. *Yan G., Zhu L., Zhang R.* Channel Autocorrelation Estimation for IRS-Aided Wireless Communications Based on Power Measurements // *Proc. 2023 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. Kuala Lumpur, Malaysia. Dec. 4–8, 2023. P. 1457–1462. <https://doi.org/10.1109/GCWkshps58843.2023.10465210>
8. *Zhang H., Shlezinger N., Guidi F., Dardari D., Imani M.F., Eldar Y.C.* Beam Focusing for Near-Field Multiuser MIMO Communications // *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2022. V. 21. № 9. P. 7476–7490. <https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3158894>
9. *Chen Y., Dai L.* Coded Beam Training for RIS Assisted Wireless Communications, <https://www.arxiv.org/abs/2406.15802> [cs.IT], 2024.
10. *Wu C., You C., Liu Y., Chen L., Shi S.* Two-Stage Hierarchical Beam Training for Near-Field Communications // *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2024. V. 73. № 2. P. 2032–2044. <https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3311868>
11. *Bagheri A., Safaei M., Araghi A., Mahdi Shahabi S.M., Wang F., Khalily M., Tafazolli R.* Mathematical Model and Real-World Demonstration of Multi-Beam and Wide-Beam Reconfigurable Intelligent Surface // *IEEE Access.* 2023. V. 11. P. 19613–19621. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3248501>
12. *Ghanem W.R., Jamali V., Schellmann M., Cao H., Eichinger J., Schober R.* Optimization-Based Phase-Shift Codebook Design for Large IRSs // *IEEE Commun. Lett.* 2022. V. 27. № 2. P. 635–639. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2022.3225585>
13. *Gerchberg R.W., Saxton W.O.* A Practical Algorithm for the Determination of Phase from Image and Diffraction Plane Picture // *Optik.* 1972. V. 35. № 2. P. 237–246.
14. *Lu Y., Zhang Z., Dai L.* Hierarchical Beam Training for Extremely Large-Scale MIMO: From Far-Field to Near-Field // *IEEE Trans. Commun.* 2024. V. 72. № 4. P. 2247–2259. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2023.3344600>
15. *Torkzaban N., Khojastepour M.A., Farajzadeh-Tehrani M., Baras J.S.* RIS-Aided mmWave Beam-Forming for Two-Way Communications of Multiple Pairs // *ITU J. Future Evol. Technol.* 2023. V. 4. № 1. P. 87–101. <https://doi.org/10.52953/VBEX2484>
16. *Shen D., Dai L., Su X., Suo S.* Multi-Beam Design for Near-Field Extremely Large-Scale RIS-Aided Wireless Communications // *IEEE Trans. Green Commun. Netw.* 2023. V. 7. № 3. P. 1542–1553. <https://doi.org/10.1109/TGCN.2023.3259579>

17. *Jamali V., Najafi M., Schober R., Vincent Poor H.* Power Efficiency, Overhead, and Complexity Tradeoff of IRS Codebook Design—Quadratic Phase-Shift Profile // *IEEE Commun. Lett.* 2021. V. 25. № 6. P. 2048–2052. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2021.3058063>
18. *Balanis C.A.* Antenna Theory: Analysis and Design. Hoboken, NJ: Wiley, 2016.
19. *Björnson E., Demir Ö.T., Sanguinetti L.* A Primer on Near-Field Beamforming for Arrays and Reconfigurable Intelligent Surfaces // *Conf. Record: 55th Asilomar Conf. on Signals, Systems & Computers*. Pacific Grove, CA, USA. Oct. 31–Nov. 3, 2021. P. 105–112. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF53345.2021.9723331>
20. *Zhang S., Zhang R.* Capacity Characterization for Intelligent Reflecting Surface Aided MIMO Communication // *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 2020. V. 38. № 8. P. 1823–1838. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3000814>

Пойда Арсений Игоревич

Институт проблем передачи информации
им. А.А. Харкевича РАН, Москва
poyda@wnlab.ru

Буртаков Илья Андреевич

Институт проблем передачи информации
им. А.А. Харкевича РАН, Москва
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет), Москва
burtakov@wnlab.ru

Куреев Алексей Андреевич

Хоров Евгений Михайлович
Национальный исследовательский университет
“Высшая школа экономики”, Москва
Институт проблем передачи информации
им. А.А. Харкевича РАН, Москва
kureev@wnlab.ru
khorov@wnlab.ru

Поступила в редакцию
26.08.2024

После доработки
26.11.2024

Принята к публикации
29.11.2024