

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И РАДИОТЕХНИКА TELECOMMUNICATION AND RADIO ENGINEERING

Научная статья
УДК 621.396.67.012.12
<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.1.6>

Стабилизация лучей спутниковой многолучевой гибридной зеркальной антенны по сигналам антенной решётки при наличии шумов

П. В. Романов

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ,
Российская Федерация, 420111, Казань, ул. К. Маркса, 10
greenfreq@gmail.com

Аннотация. В работе рассматривается эвристический алгоритм стабилизации лучей спутниковой многолучевой гибридной зеркальной антенны, основанный на обработке сигналов антенной решётки, принимаемых от наземного маяка с известными угловыми координатами. Суть обработки сигналов заключается в расчёте и сравнении вблизи номинальной поверхности рефлектора двух полей: поля антенной решётки, возбуждённой сопряжёнными к принятым комплексными амплитудами, и поля распространяющейся в направлении маяка плоской волны, при этом профиль рефлектора, под который пересчитываются лучи, реконструируется как проходящая через центр номинального рефлектора поверхность, на которой разность фаз между фазовыми распределениями сравниваемых полей остаётся постоянной. Приводится анализ влияния шумов как на точность реконструкции профиля рефлектора, так и на эффективность стабилизации лучей. Демонстрируется неожиданное свойство алгоритма реконструкции профиля рефлектора фильтровать принимаемые сигналы.

Ключевые слова: многолучевая гибридная зеркальная антенна; стабилизация лучей; реконструкция профиля рефлектора; антенная решётка; сопряжённое возбуждение; маяк

Введение. Типовая спутниковая многолучевая гибридная зеркальная антенна (МГЗА) представляет собой крупный длиннофокусный рефлектор офсетной схемы, возле фокуса которого располагается антенная решётка (АР). Возбуждение элементов АР приводит к формированию на поверхности рефлектора токов, которым

соответствуют ориентированные в некоторых направлениях узкие лучеподобные диаграммы направленности (ДН) $f(\theta, \varphi) = \{f_1(\theta, \varphi), f_2(\theta, \varphi), \dots, f_n(\theta, \varphi)\}$, $n = 1, 2, \dots, N$, которые также иногда называют вторичными ДН (чтобы отличать от первичных ДН $\psi(\theta, \varphi) =$

© Романов П. В., 2022.

Для цитирования: Романов П. В. Стабилизация лучей спутниковой многолучевой гибридной зеркальной антенны по сигналам антенной решётки при наличии шумов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2022. № 1 (53). С. 6-20. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.1.6>

$= \{\psi_1(\theta, \varphi), \psi_2(\theta, \varphi), \dots, \psi_n(\theta, \varphi)\}$, ассоциирующихся с полями элементов АР, находящихся вне состава МГЗА). МГЗА покрывает область обслуживания, состоящую из K зон обслуживания, рабочими лучами $\mathbf{F}(\theta, \varphi) = \{F_1(\theta, \varphi), F_2(\theta, \varphi), \dots, F_k(\theta, \varphi)\}$, $k = 1, \dots, K$. Излучающая система АР МГЗА может быть разной. Лучи $\mathbf{F}(\theta, \varphi)$ могут формироваться отдельными элементами АР, группами элементов, называемыми кластерами, а также всей АР. В общем случае рабочие лучи $\mathbf{F}(\theta, \varphi)$ являются взвешенными суммами вторичных диаграмм: $F_k(\theta, \varphi) = \sum_n w_{n,k} f_n(\theta, \varphi)$, где $w_{n,k}$, $w_{n,k} \in \mathbf{W}$ есть комплексная амплитуда возбуждения n -го элемента АР при формировании k -го рабочего луча.

В зависимости от требований к рабочим лучам $\mathbf{F}(\theta, \varphi)$ векторы весовых коэффициентов (ВВК) $\mathbf{W}$, взвешивающие вторичные ДН $\mathbf{f}(\theta, \varphi)$, могут выбираться по-разному. Например, вторичные ДН $\mathbf{f}(\theta, \varphi)$ могут аппроксимировать заданные контурные ДН $\mathbf{F}_0(\theta, \varphi)$. Наиболее ходовым вариантом лучеформирования МГЗА является сопряжённое взвешивание – когда веса $\mathbf{W}$ выбираются пропорцио-

нальными комплексно-сопряжённым значениям вторичных лучей $\mathbf{f}(\theta, \varphi)$ в направлениях центров зон обслуживания $\{\theta_k, \varphi_k\}$, $w_{n,k} \sim f_n^*(\theta_k, \varphi_k)$, где звёздочка обозначает комплексное сопряжение. Такое взвешивание обеспечивает максимизацию энергетического потенциала спутниковой системы связи: максимизируются коэффициенты усиления (КУ) лучей $\mathbf{F}(\theta, \varphi)$ в направлениях $\{\theta_k, \varphi_k\}$ в режиме передачи, а также отношение сигнала к шуму на выходе АР при приёме сигналов с этих направлений.

На практике решение задачи формирования рабочих лучей МГЗА сталкивается со следующей проблемой: неточное развёртывание рефлектора МГЗА после её вывода на орбиту, тепловые нагрузки со стороны Солнца, а также некоторые другие факторы приводят к тому, что геометрия рефлектора МГЗА оказывается отличной от номинальной [1–2]. Это, в свою очередь, приводит к изменению вторичных диаграмм $\mathbf{f}(\theta, \varphi)$ и, как следствие, номинальные элементы массива $\mathbf{W}$ перестают быть оптимальными: формы, угловые положения и энергетика рабочих лучей оказываются существенно отличными от заданных (рис. 1 а, б).

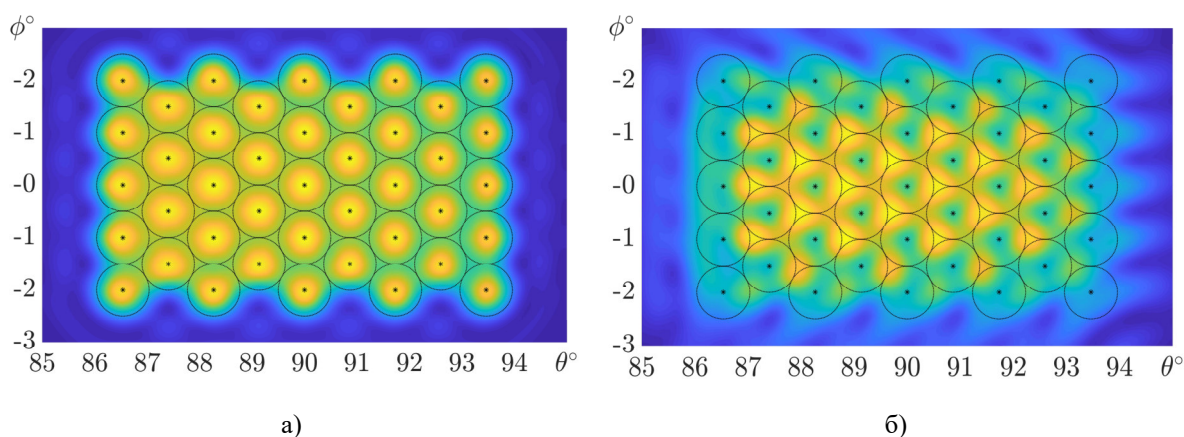


Рис. 1. Покрывание области обслуживания стабилизированными лучами (а) и нестабилизированными лучами (б)

Fig. 1. Coverage of the service area with stabilized beams (a) and non-stabilized beams (b)

Естественно, в конструкции рефлектора используют разнообразные приёмы, повышающие жёсткость и температурную стабильность рефлектора [3]. Однако для крупногабаритных зонтичных конструкций, кои во многих случаях и представляют рефлектор МГЗА, этих средств часто оказывается недостаточно и требуются системы компенсации искажений рефлектора, включающие как оптические средства контроля его геометрии [4–7], так и механические средства устранения выявленных искажений [8–10].

С другой стороны, малые деформации рефлектора могут быть скомпенсированы исключительно электронным способом – путём адаптации элементов массива $\mathbf{W}$, что можно сделать сразу несколькими способами [11–13]. При наличии оптических средств контроля рефлектора способ компенсации может заключаться в пересчёте сначала вторичных ДН $\mathbf{f}(\theta, \varphi)$ под актуальный профиль рефлектора, а затем и соответствующих ВВК. Если оптические средства контроля рефлектора отсутствуют, а лучи $\mathbf{F}(\theta, \varphi)$ формируются по критерию максимума энергетического потенциала, то осуществлять адаптацию ВВК можно путём фокусировки элементов АР на размещённые в центрах зон обслуживания маяки: при приёме сигнала маяка, расположенного в центре i -й зоны обслуживания, комплексные амплитуды $\{s_n\}$ этого сигнала, снимаемые с элементов АР, пропорциональны вторичным ДН этих элементов в направлении маяка, $s_n \sim f_n(\theta_i, \varphi_i)$, но так как энергетические оптимальные комплексные амплитуды $w_n \sim f_n^*(\theta_i, \varphi_i)$, то $w_n \sim s_n^*$. Подобный способ компенсации малых деформаций рефлектора прост и надёжен, но малоприменим ввиду необходимости размещения большого числа наземных маяков, к тому же расположенных обязательно в центрах зон обслуживания. К слову, в работе [14] было показано, как можно осуществить коррекцию ВВК по сигналам маяков, смещённых из центров зон обслуживания, а

также в несколько раз сократить необходимое для стабилизации всех лучей количество маяков.

Заманчивой кажется идея реконструкции профиля рефлектора по сигналам единственного наземного маяка. Решение данной задачи позволяет отказаться от размещения оптических средств контроля рефлектора на борту МГЗА. В работах [15–16] рассматривается способ решения данной задачи. Данная же работа посвящена анализу влияния шумов на точность реконструкции профиля рефлектора МГЗА, а также на алгоритм стабилизации лучей МГЗА по зашумлённому сигналу наземного маяка в целом.

Расчёт МГЗА в акустическом приближении. Рассматриваемый в этой работе алгоритм реконструкции профиля рефлектора основан на расчёте МГЗА в акустическом приближении, которое является упрощённым вариантом метода физической оптики [17]. Использование акустического приближения оправдано при расчёте крупногабаритных длиннофокусных зеркал, как это имеет место в случае спутниковых МГЗА. Акустическое приближение позволяет корректно рассчитывать форму ДН в окрестностях главного и первых боковых лепестков [18].

При расчёте МГЗА в акустическом приближении её рефлектор представляется множеством точек $\{x_m, y_m, z_m\}$. Плоская волна, падающая на рефлектор со стороны расположенного в направлении (θ_i, φ_i) маяка, возбуждает на поверхности рефлектора распределение токов:

$$I_m = e^{j\beta[x_m\gamma(\theta_i, \varphi_i) + y_m\kappa(\theta_i, \varphi_i) + z_m\chi(\theta_i, \varphi_i)]}, \quad (1)$$

$$\gamma(\theta_i, \varphi_i) = \sin(\theta_i) \cos(\varphi_i) \quad (1 \text{ а})$$

$$\kappa(\theta_i, \varphi_i) = \sin(\theta_i) \sin(\varphi_i) \quad (1 \text{ б})$$

$$\chi(\theta_i, \varphi_i) = \cos(\theta_i), \quad (1 \text{ в})$$

где $\beta = 2\pi / \lambda$ – волновое число, j – мнимая единица. Комплексные амплитуды принятого элементами АР сигнала маяка определяются как:

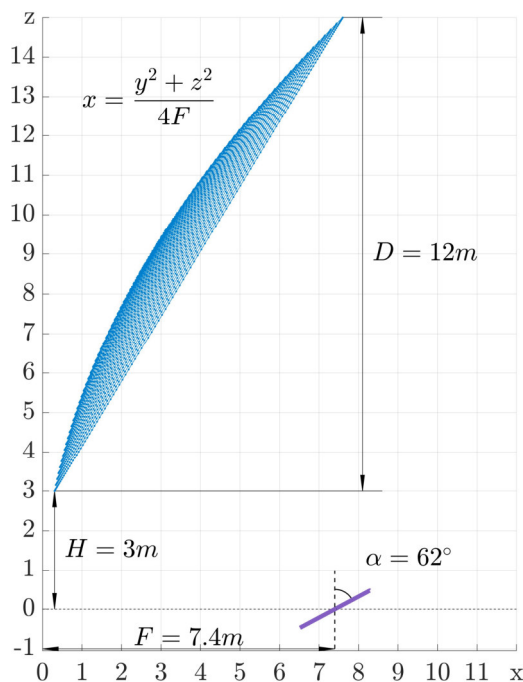


Рис. 2. Геометрия моделируемой МГЗА
Fig. 2. Geometry of the modeled multibeam hybrid reflector antenna (MHRA)

$$s_n = \sum_m I_m \psi_{m,n} e^{-j\beta r_{m,n}} / r_{m,n}, \quad (2)$$

где $r_{m,n}$ – расстояние между элементом n АР и точкой m рефлектора, $\psi_{m,n}$ – значение первичной ДН элемента n АР в направлении точки m рефлектора. Возбуждение АР вектором $\{w_n\}$ приводит к появлению на поверхности рефлектора следующего распределения токов:

$$I_m = \sum_n w_n \psi_{m,n} e^{-j\beta r_{m,n}} / r_{m,n}. \quad (3)$$

Наконец, токам (3) соответствует ДН:

$$F(\theta, \varphi) = \sum_m I_m e^{j\beta[x_m \gamma(\theta, \varphi) + y_m \kappa(\theta, \varphi) + z_m \chi(\theta, \varphi)]}. \quad (4)$$

В рамках данной работы объектом моделирования является МГЗА (рис. 2), рефлектор которой представляет собой пересечение параболоида $x = f(y, z) = (y^2 + z^2) / 4F$, $F = 7,4$ м, с цилиндром с радиусом $R = 6$ м, ось которого параллельна оси OX и пересекает плоскость YOZ в точке $(y = 0, z = 9)$ м. АР распола-

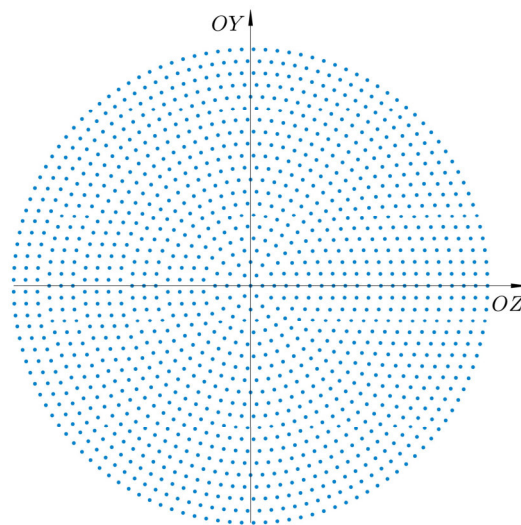


Рис. 3. Проекция точек рефлектора на плоскость YOZ
Fig. 3. Projections of reflector points onto the YOZ plane

гается в плоскости, которая проходит через фокус рефлектора и пересекается с плоскостью YOZ под углом $\alpha = 62^\circ$, где угол α отсчитывается от оси OZ в направлении оси OX . АР имеет квадратную форму, а её элементы располагаются в узлах прямоугольной сетки. Сторона АР L и расстояние между её элементами d по ходу работы меняются. ДН элементов АР принимаются изотропными. Рабочая частота $f = 2$ ГГц, что соответствует длине волны $\lambda = 0,15$ м.

Полезно отметить, что формулу (2) можно также использовать для расчёта фокальных пятен на мелкой сетке точек, что, в свою очередь, предоставляет дополнительные возможности при моделировании и анализе МГЗА.

Модели деформаций рефлектора МГЗА. В отсутствии статистики реальных деформаций рефлектора МГЗА логично предположить, что в ходе развёртывания и эксплуатации МГЗА позиционирование её рефлектора немного нарушается, а профиль рефлектора претерпевает малые

и плавные изменения. Моделирование подобных деформаций позволяет получить достаточно объективную оценку того, как реальные деформации рефлектора влияют на энергетические характеристики МГЗА, а также проверить работоспособность алгоритмов реконструкции профиля рефлектора и стабилизации лучей. В рамках данной работы предлагаются следующие модели деформаций рефлектора МГЗА:

- смещение рефлектора:

$$\{x_m, y_m, z_m\} \rightarrow \{x_m + \Delta x, y_m + \Delta y, z_m + \Delta z\};$$

- поворот рефлектора:

$$\{x_m, y_m, z_m\} \rightarrow \rightarrow M_x(\alpha) M_y(\beta) M_z(\gamma) \{x_m, y_m, z_m\}^T,$$

где $M_x(\alpha)$, $M_y(\beta)$ и $M_z(\gamma)$ являются матрицами поворота на углы α , β и γ вокруг осей OX , OY и OZ соответственно (понятно, что рефлектор можно вращать вокруг осей, проходящих через произвольную точку пространства; в работе это была центральная точка рефлектора);

- изменение фокусного расстояния рефлектора:

$$(y_m^2 + z_m^2) / 4F \rightarrow (y_m^2 + z_m^2) / 4(F + \Delta F);$$

- применение к профилю рефлектора деформации Фурье 1-го типа:

$$f(y_m, z_m) \rightarrow f(y_m, z_m) + \xi(y_m, z_m),$$

$$\xi(y_m, z_m) = \rho(r_m) g(a_m),$$

где r и a – полярные координаты, центр которых совпадает с проекцией центральной точки рефлектора, функция $\rho(r_m)$ модулирует профиль рефлектора вдоль его радиуса, функция $g(a_m)$ модулирует профиль по углу. Функцию $\rho(r_m)$ можно сделать как линейной, $\rho(r_m) = r_m / R$, так и нелинейной, например, $\rho(r_m) = \sin^2(0,5\pi r_m / R)$, функцию $g(a_m)$ очень удобно задавать в виде ряда Фурье (отсюда и название деформации), $g(a_m) = \sum_q [A_q \cos(qa_m) + B_q \sin(qa_m)]$, так

как это универсально и в то же время обеспечивает непрерывность деформированного профиля. Ограничивая количество гармоник гармониками третьего порядка включительно, можно получить плавные и естественно выглядящие деформации. Коэффициенты A_q и B_q можно задать как вручную, так и сгенерировать с помощью генератора случайных чисел.

- применение к профилю рефлектора деформации Фурье 2-го типа:

$$f(y_m, z_m) \rightarrow f(y_m, z_m) + \zeta(y_m, z_m),$$

$$\zeta(y_m, z_m) = \sum_p \sum_q \left[\begin{aligned} &A_{p,q} \cos(q\pi y_m / R) \cos(p\pi z_m / R) + \\ &+ B_{p,q} \sin(q\pi y_m / R) \cos(p\pi z_m / R) + \\ &+ C_{p,q} \cos(q\pi y_m / R) \sin(p\pi z_m / R) + \\ &+ D_{p,q} \sin(q\pi y_m / R) \sin(p\pi z_m / R) \end{aligned} \right].$$

Здесь функция $\zeta(y_m, z_m)$ является двумерным рядом Фурье. Задавая индексы p и q в интервалах от нуля до двух, можно получить плавные и естественные деформации. Как и в случае деформации 1-го типа, коэффициенты $A_{p,q}$, $B_{p,q}$, $C_{p,q}$, $D_{p,q}$ могут быть заданы как вручную, так и с помощью генератора случайных чисел.

Понятно, что приведённые выше деформации могут быть скомбинированы произвольным образом. Кроме того, умножением функций $\xi(y_m, z_m)$ и $\zeta(y_m, z_m)$ на оконные (весовые) функции можно добиться локализации деформации профиля рефлектора.

Основы алгоритма реконструкции профиля рефлектора МГЗА по сигналам АР. Как показывают расчёты, если расстояние между элементами АР оказывается меньше некоторого критического значения, а размер АР достаточен для перехвата лвиной доли отражаемой рефлектором мощности сигнала маяка, то возбуждённая сопряжёнными к принятым комплексными амплитудами АР формирует на поверхности рефлектора токи, фа-

зовое распределение которых практически полностью повторяет фазовое распределение распространяющейся в направлении маяка плоской волны.

Продемонстрируем истинность приведённых выше положений на примере МГЗА, рефлектор которой деформирован в соответствии с деформацией Фурье 1-го типа, $\rho(r) = k \sin^2(0,5\pi r / R)$, $g(a) = \cos(2a)$, $k = 0,2\lambda = 0,03 \text{ м}$. Отражаемую рефлектором и перехватываемую АР мощность определим как $P_{\text{int}} = \sum |s_n|^2 \Delta S$, $\Delta S = S / N$, где N – количество элементов на полотне АР, а S – площадь полотна АР. За полную мощность P_{all} , отражённую рефлектором, примем мощность, которая перехватывается АР со стороны 5 м. Для расчёта разности фаз в точках, представляющих поверхность рефлектора, введём векторы E , H и T , элементы которых определяются как:

$$e_m = \exp \left[j \arg \left(\sum_n w_n \psi_{m,n} e^{-j\beta r_{m,n}} / r_{m,n} \right) \right], \quad (5)$$

$$h_m = \exp \left[-j\beta \begin{pmatrix} x_m \gamma(\theta_k, \varphi_k) + \\ + y_m \kappa(\theta_k, \varphi_k) + \\ + z_m \chi(\theta_k, \varphi_k) \end{pmatrix} \right], \quad (6)$$

$$t_m = \frac{180}{\pi} \arccos \left(\frac{\text{Re}(e_m, h_m)}{|e_m| |h_m|} \right), \quad (7)$$

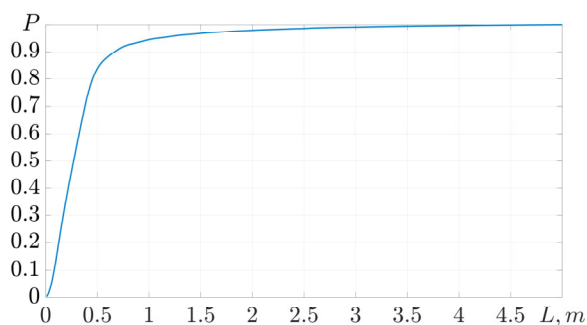


Рис. 4. Зависимость перехватываемой мощности от размера АР

Fig. 4. Dependence of the intercepted power on the size of the antenna array (AA)

где $w_n = s_n^*$, $\{s_n\}$ рассчитывается по формуле (2). Фазы комплекснозначных векторов E и H , рассчитываемых по формулам (5) и (6), определяют фазы полей АР и распространяющейся в направлении маяка плоской волны соответственно. Формула (7) даёт угол в градусах между элементами векторов E и H .

На рис. 4 – 6 продемонстрированы типовые зависимости перехватываемой мощности (нормирована к P_{all}) от размера АР, максимальные и средние значения разности фаз между сравниваемыми распределениями от перехватываемой мощности / размера АР, а также максимальные и средние значения разности фаз между сравниваемыми распределениями от шага АР соответственно. Из рис. 7 видно, что при шаге АР $d \geq 0,125 \text{ м}$ максимальные и средние значения разности фаз начинают резко увеличиваться, соответственно проиллюстрированные на рис. 4 – 6 зависимости характерны для ситуаций, когда шаг оказывается меньше этой величины. Исходя из этого можно заключить, что если размера АР достаточно для перехвата 90–95 % отражаемой рефлектором мощности и при этом шаг АР оказывается меньше некоторого критического значения, то рефлектор фактически оказывается лежащим в области равного значения разности фаз между двумя сравниваемыми фазовыми распределениями.

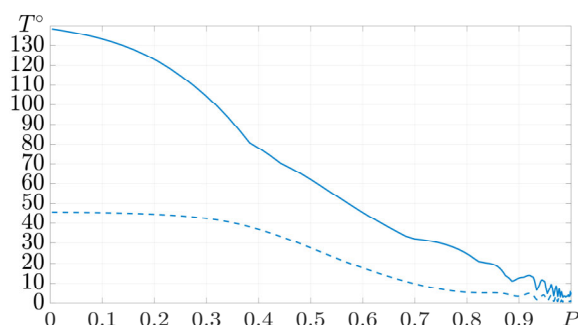


Рис. 5. Зависимость максимального и среднего значения разности фаз между сравниваемыми фазовыми распределениями от перехватываемой мощности

Fig. 5. Dependence of the maximum and average value of the phase difference between the compared phase distributions on the intercepted power

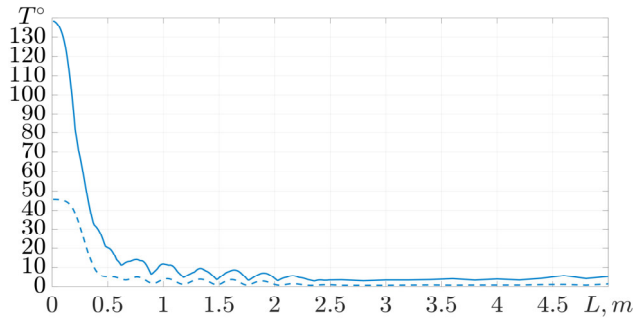


Рис. 6. Зависимость максимального и среднего значения разности фаз между сравниваемыми фазовыми распределениями от размера АР

Fig. 6. Dependence of the maximum and average value of the phase difference between the compared phase distributions on the size of the AA

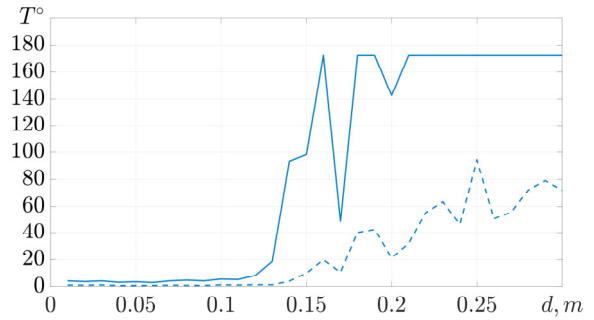


Рис. 7. Зависимость максимального и среднего значения разности фаз между сравниваемыми фазовыми распределениями от шага АР

Fig. 7. Dependence of the maximum and average value of the phase difference between the compared phase distributions on the AA stepp

Вообще, поверхности одинаковых значений разности фаз между полями сопряжено возбуждённой АР и распространяющейся в направлении маяка плоской волны имеют вид концентрических параболоидов с общим фокальным центром. Расстояние между смежными параболическими поверхностями близко к половине длины волны. Поэтому, так как на практике смещения повороты и деформации рефлектора МГЗА малы, текущий профиль рефлектора можно реконструировать как поверхность, которая проходит через центр номинального рефлектора и на которой разность фаз между двумя вышеперечисленными функциями остаётся постоянной, при этом проекцией реконструируемой поверхности на плоскость YOZ служит проекция номинального рефлектора.

Практическая реализация алгоритма реконструкции профиля рефлектора МГЗА. Введём функции $U(x, y, z)$ и $V(x, y, z)$, которые ассоциируются с фазовыми распределениями полей оптимально возбуждённой АР и распространяющейся в направлении маяка плоской волны, а также функцию $W(x, y, z)$, равную квадрату модуля их разности:

$$U(x, y, z) = \exp \left[j \arg \left(\sum_n \frac{w_n \psi_n(x, y, z) e^{-j\beta r_n(x, y, z)}}{r_n(x, y, z)} \right) \right], \quad (8)$$

$$V(x, y, z) = \exp[j\alpha_0] \exp \left[-j\beta \begin{pmatrix} x\gamma(\theta_k, \varphi_k) + \\ y\kappa(\theta_k, \varphi_k) + \\ z\chi(\theta_k, \varphi_k) \end{pmatrix} \right], \quad (9)$$

$$W(x, y, z) = |U(x, y, z) - V(x, y, z)|^2. \quad (10)$$

Здесь $w_n = s_n^*$, $\{s_n\}$ рассчитывается по формуле (2). В (9) фаза плоской волны поворачивается на α_0 , чтобы в центральной точке номинального рефлектора фазы обоих распределений совпали. Это приводит к тому, что профиль реконструированного рефлектора будет проходить через центральную точку номинального рефлектора, на которой $W(x, y, z) = 0$. Вообще говоря, область нулевого значения $W(x, y, z)$ простирается и за пределы рефлектора, но так как в задаче стабилизации лучей МГЗА смещение рефлектора априори мало, можно считать, что деформации рефлектора заключаются только в изменении его x -координат, а проекции точек на плоскость YOZ остаются неизменными.

Для того чтобы реконструированный профиль оказался непрерывным, проекции реконструируемых точек целесообразно распределить с одинаковой плотностью в пределах круга радиуса R (рис. 3). Для этого, выбрав шаг ρ , строят окруж-

ности радиусов $\{r_k = k\rho\}$ и на них располагают $N_k = \lceil 2\pi r_k / \rho \rceil$ точек (квадратные скобки означают целую часть числа). В центре минимальной окружности также размещается точка – проекция центральной точки рефлектора. Нумерация точек в общем векторе осуществляется следующим образом. Первой точкой является проекция центральной точки рефлектора, за ней следуют точки с окружности минимального радиуса, очередность которых определяется возрастанием их полярной координаты (отсчитывается от оси OZ против часовой стрелки). За точками с первой окружности аналогичным образом следуют точки со второй окружности и так далее. В простейшем варианте реконструировать все точки рефлектора, начиная со второй, можно с помощью алгоритма градиентного спуска:

$$x_m^{(i)} = x_m^{(i-1)} - \eta \frac{\partial W(x_m^{(i-1)}, y_m, z_m)}{\partial x}, \quad (11)$$

где $x_m^{(0)} = x_{m-1}$ количество итераций i и скорость обучения η подбираются экспериментально таким образом, чтобы спуск в минимум функции $W(x, y, z)$ осуществлялся плавно и без перескоков на смежные поверхности минимума. Перескоки на смежные поверхности возможны в том случае, если шаг ρ выбран большим настолько, что $x_m^{(0)}$ и x_{m-1} оказываются на различных скатах функции $W(x, y, z)$. Для устранения возможности перескока в процессе реконструкции между $m-1$ и m проекциями могут быть дополнительно размещены промежуточные точки, в которых будет осуществляться реконструкция в соответствии с (11).

Несмотря на простоту и понятность градиентного спуска, подбор оптимальной комбинации i и η может оказаться непростой задачей. Часто оказывается так, что при малом значении η , обеспечивающем плавный спуск, минимум $W(x, y, z)$ достигается после слишком большого

числа итераций i , что требует немалого объёма и времени вычислений.

Без преувеличения потрясающие результаты (в плане надёжности и скорости реконструкции) можно получить сменой метода градиентного спуска на метод локальной оптимизации второго порядка, называемый Trust region method, алгоритм реализации которого подробно изложен в [19]. Ключевыми особенностями данного метода являются ограниченная сверху и адаптивно меняющаяся скорость обучения η , а также использование информации о кривизне оптимизируемой функции, т. е. о её второй производной.

Численные результаты. Данный раздел посвящается анализу устойчивости алгоритмов стабилизации лучей МГЗА к воздействию шумов. Будем считать, что сигнальный отпечаток $\{u_n\}$, формирующийся на выходе АР в ходе приёма сигнала наземного маяка, есть не что иное, как взвесь сигнальной составляющей $\{s_n\}$, рассчитываемой по (2) в соответствии с (1), и «отпечатка» аддитивного белого гауссовского шума $\{h_n\}$, $u_n = s_n + h_n$, причём отсчёты $\{h_n\}$ задаются распределением Гаусса:

$$h_n(p, q) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{p-\mu}{\sigma}\right)^2} + j \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{q-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad (12)$$

где $\mu = 0$, и СКО σ определяет мощность шумов. Под отношением мощности сигнала к мощности шума в данной задаче будем понимать следующую величину:

$$SNR = \frac{\sum_n |s_n|^2}{\sum_n |h_n|^2} \quad (13)$$

или её логарифмический вариант:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left[\frac{\sum_n |s_n|^2}{\sum_n |h_n|^2} \right]. \quad (14)$$

В качестве деформации рефлектора МГЗА зададим всё ту же деформацию Фурье 1-го типа: $\rho(r) = k \sin^2(0,5\pi r / R)$, $g(a) = \cos(2a)$, $k = 0,2$, $\lambda = 0,03$ м. Длину стороны АР квадратной формы положим равной $L = 2$ м, шаг $d = 0,1$ м. В качестве углового положения маяка, по сигналу которого будем реконструировать профиль рефлектора, выберем угловую координату $(\theta_r = 90^\circ, \varphi_r = 0^\circ)$. Радиус зоны обслуживания $\Delta r = \sqrt{(\theta_r - \Delta\theta)^2 + (\varphi_r - \Delta\varphi)^2} = 0,4^\circ$.

Рассчитывая для каждого значения уровня шума из диапазона $SNR_{dB} \in \{0, 1, 2, \dots, 30\}$ по 100 выборок $\{u_n\}$, будем реконструировать на их основе профиль рефлектора, сравнивать ВВК и рассчитывать рабочий луч. Что касается вопроса реконструкции, будем интересоваться влиянием SNR_{dB} на точность реконструкции профиля рефлектора, а именно величинами $\delta_{\lambda \max}$, $\delta_{\lambda \text{mean}}$ и $\delta_{\lambda \min}$, под которыми понимается максимальное, среднее и минимальное из 100 выборок максимальное отклонение реконструированного профиля от фактического, измеряемое в длинах волн. Результаты расчётов представлены на рис. 8, где

максимальным, средним и минимальным значениям δ_λ соответствуют синий, зелёный и фиолетовый графики.

При анализе рис. 8 важно отметить следующее: при возбуждении АР сопряжёнными к принятым амплитудами она формирует своеобразную секторную ДН, описывающую рефлектор, при этом периметр рефлектора практически не облучается, фазовая структура поля на периметре начинает отличаться от плосковолновой, а недалеко от периметра присутствует область с резким скачком амплитуды – полный аналог эффекта Гиббса. По этой причине в большинстве случаев максимальные отклонения приходятся именно на края рефлектора. Из рис. 5–7 видно, что средние значения разности фаз между сравниваемыми полями заметно меньше максимальных. Следствием этого является то, что и среднее значение отклонения реконструированного профиля оказывается существенно меньше максимального, статистика которого как раз и отражена на рис. 8. С другой стороны, из рис. 8 видно, что при $SNR_{dB} \geq 15$ δ_λ уже находится на уровне сотых долей длины волны, что позволяет достигать отличных результатов в задаче стабилизации лучей МГЗА.

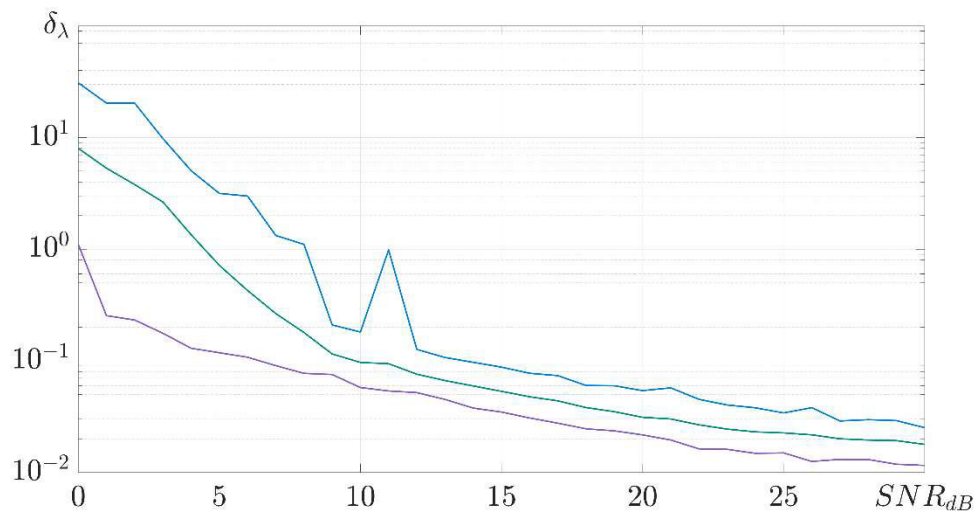


Рис. 8. Зависимость точности реконструкции от уровня шума
Fig. 8. Dependence of the reconstruction accuracy on the noise level

В ходе расчётов ВБК будем интересоваться их следующими вариациями: $\mathbf{W}_0 = \{w_n^{(nom)}\}$ – сопряжённый к (2), вычисленному через (1), вектор, рассчитанный под номинальный профиль рефлектора; $\mathbf{W}_1 = \{w_n^{(opti)}\}$ – сопряжённый к (2), вычисленному через (1), вектор, рассчитанный под фактический профиль рефлектора; $\mathbf{W}_2 = \{w_n^{(noise)}\}$ – предыдущий с добавлением шумов; $\mathbf{W}_3 = \{w_n^{(rec)}\}$ – сопряжённый к (2), вычисленному через (1), вектор, рассчитанный под реконструированный профиль рефлектора. После расчёта квадраты норм векторов нормируются. Сравнить схожесть этих векторов удобно по метрике, эквивалентной (7):

$$\phi_{i,k} = \frac{180}{\pi} \arcsin \left(\sqrt{1 - \frac{|\langle \mathbf{W}_i, \mathbf{W}_k \rangle|^2}{\|\mathbf{W}_i\|^2 \|\mathbf{W}_k\|^2}} \right), \quad (15)$$

которая есть угол в градусах между сравниваемыми векторами в многомерном пространстве. Основным интерес здесь представляет сравнение векторов $\mathbf{W}_0$, $\mathbf{W}_2$ и $\mathbf{W}_3$ с $\mathbf{W}_1$, т. к. именно последний является энергетически оптимальным. Результаты расчётов приведены на рис. 9, где $\phi_{1,0}$, $\phi_{1,1}$, $\phi_{1,2}$ и $\phi_{1,3}$ представлены чёрными, зелёными, синими и фиолетовыми графиками соответственно, причём сплошные, прерывистые и пунктирные вариации графиков обозначают соответствующие максимальные, средние и минимальные из 100 выборок значения. Глядя на рис. 9, можно сделать следующие важные выводы: 1) существует значение SNR_{dB} , ниже которого фокусировка на маяк и алгоритм стабилизации лучей под реконструируемый профиль рефлектора дают отрицательный эффект; 2) несколько неожиданным является то, что алгоритм стабилизации лучей МГЗА, основанный на предложенном выше алгоритме реконструкции профиля рефлектора, играет роль своеобразного фильтра: подавая на вход алго-

ритма зашумлённый ВБК $\mathbf{W}_2$, получаем на выходе более схожий с $\mathbf{W}_1$ ВБК $\mathbf{W}_3$. Ниже даётся ответ на вопрос о том, отражается ли этот выигрыш на энергетике формируемого луча. В целом же по мере увеличения SNR_{dB} $\mathbf{W}_1$ и $\mathbf{W}_2$ ожидаемо приближаются к $\mathbf{W}_3$.

Обозначим формирующиеся при возбуждении АР весовыми коэффициентами $\mathbf{W}_0$, $\mathbf{W}_1$, $\mathbf{W}_2$ и $\mathbf{W}_3$ лучи как $F_0(\theta, \varphi)$, $F_1(\theta, \varphi)$, $F_2(\theta, \varphi)$ и $F_3(\theta, \varphi)$. Оценивать эффективность стабилизации луча будем посредством расчёта максимального A_{imax} , среднего A_{imean} и минимального A_{imin} из 100 выборок уровня КУ формируемого рабочего луча $F_i(\theta, \varphi)$ по отношению к уровню номинального рабочего луча $F_0(\theta, \varphi)$ в направлении центра зоны обслуживания (маяка). Результаты соответствующих расчётов представлены на рис. 10. К рисункам 9 и 10 также добавляется вспомогательный рис. 11, на котором изображена зависимость энергетических потерь луча от угла между оптимальным и используемым ВБК.

Из рис. 10 видно, что выигрыш в плане КУ луча алгоритма стабилизации, имеющего в составе алгоритм реконструкции профиля рефлектора, составляет до 1,5 дБ при работе на уровне шумов и уменьшается по мере увеличения SNR_{dB} . При $SNR_{dB} = 6$ проигрыш модифицированного таким образом алгоритма стабилизации лучей оптимальному решению составляет всего 0,25 дБ, что можно считать несущественным даже для спутниковых систем связи, отличающихся весьма высокими требованиями к энергетическому бюджету канала связи, при этом проигрыш немодифицированного алгоритма на 0,75 дБ больше и находится на уровне 1 дБ. При $SNR_{dB} = 15$ оба алгоритма можно считать практически нечувствительными к шумам.

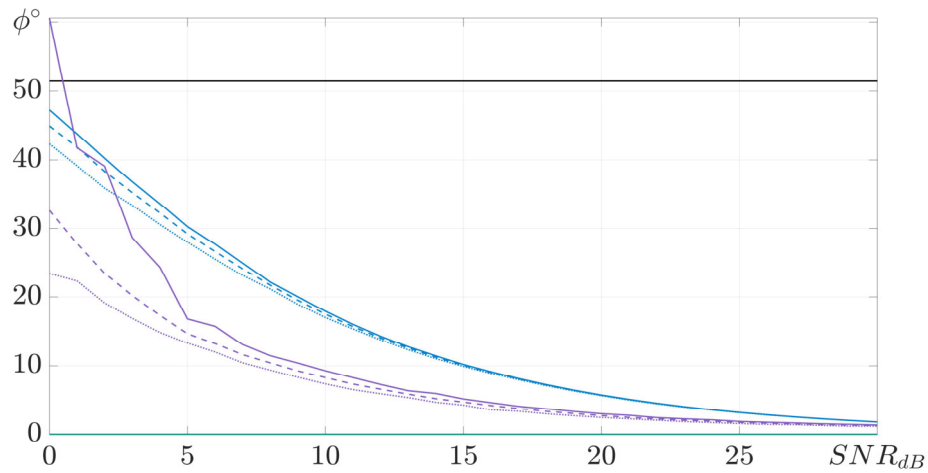


Рис. 9. Зависимость эффективности стабилизации луча от уровня шума
Fig. 9. Dependence of beam stabilization efficiency on noise level

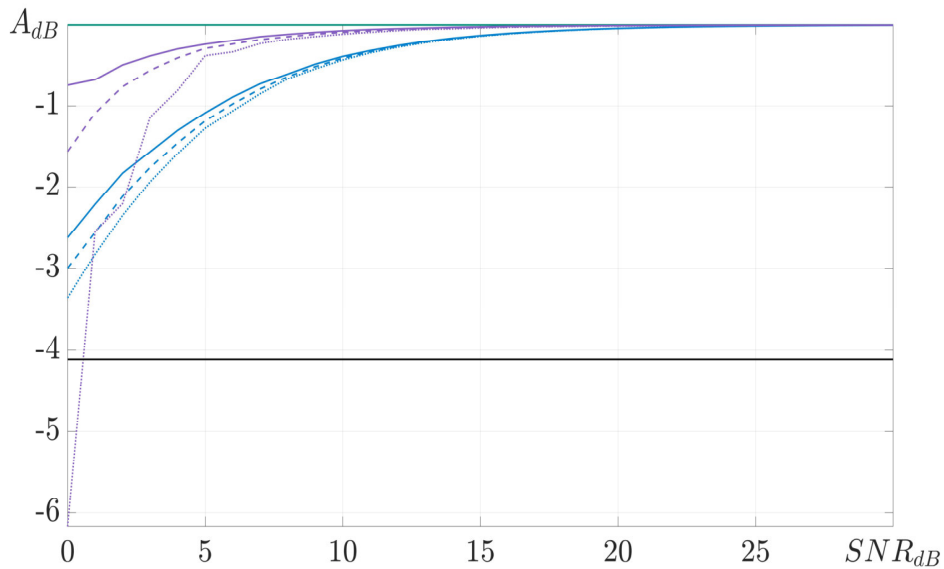


Рис. 10. Зависимость схожести между сравниваемыми ВВК от уровня шума
Fig. 10. Dependence of the similarity between the compared weight coefficients vectors (WCVs) on the noise level

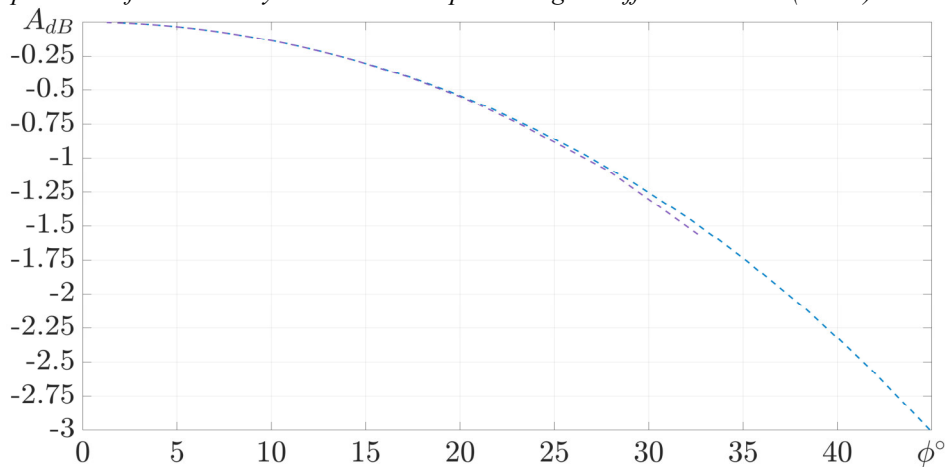


Рис. 11. Зависимость энергетических потерь луча от угла между оптимальным и используемым ВВК
Fig. 11. Dependence of the energy losses of the beam on the angle between the optimal and used WCV

Заключение. В рамках данной работы было продемонстрировано, что если в ходе приёма сигнала наземного маяка АР МГЗА перехватывает 90–95 % отражаемой рефлектором мощности, а шаг АР оказывается меньше некоторого критического значения, то поверхность рефлектора оказывается лежащей в области постоянного значения разности фаз между полями сопряжённо возбуждённой АР и распространяющейся в направлении маяка плоской волны. Эта особенность используется для реконструкции профиля рефлектора МГЗА. Анализ чувствительности алгоритма реконструкции профиля рефлектора к шумам показывает, что при отношении $SNR_{db} \geq 15$ максимальное отклонение реконструированного профиля от фактического имеет порядок сотых долей длины волны. В работе также прове-

дён анализ чувствительности к шумам алгоритмов стабилизации лучей: классического алгоритма фокусировки МГЗА на маяки, расположенные в центрах зон обслуживания, и модифицированного варианта этого алгоритма, имеющего в составе алгоритм реконструкции профиля рефлектора. Модифицированный алгоритм решает ту же задачу, но при использовании всего лишь одного маяка. Было обнаружено, что алгоритм реконструкции профиля рефлектора обладает фильтрующими свойствами и при одинаковом значении SNR_{db} даёт более оптимальные в плане энергетики лучей решения, выигрывая у базового алгоритма стабилизации до 2 дБ. При $SNR_{db} \geq 15$ оба алгоритма стабилизации лучей дают решения, которые практически неотличимы от энергетически оптимальных.

Список источников

1. Temperature distribution and influence mechanism on large reflector antennas under solar radiation: solar thermal effect on reflector antenna / C.S. Wang, S. Yuan, X. Liu et al. // *Radio Science*. 2017. Vol. 52. № 10. Pp. 1253-1260.
2. Саятин С.Н. Анализ и синтез раскрываемых на орбите прецизионных крупногабаритных механизмов и конструкций космических радиотелескопов лепесткового типа: дис. докт. техн. наук: 05.13.18. Москва. 2003. 457с.
3. Multibeam antennas for very high throughput satellites in Europe: Technologies and trends / B. Palacin et al. // 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Paris, 2017. Pp. 2413-2417. 1.doi: 10.23919/EuCAP.2017.7928493.
4. Следящий оптоэлектронный мониторинг деформаций в задаче динамической юстировки устройств пространственного наблюдения / Под ред. А.В. Ушакова. СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2008. 216 с.
5. Subrahmanyam R. Photogrammetric measurement of the gravity deformation in a Cassegrain antenna // *IEEE Trans. Anten. Propag.* 2005. Vol. 53. № 8. Pp. 2590–2596.
6. Kalabegashvili G.I., Bikeev E.V., Matylenko M.G. Selection of the device for orbital alignment of a large transformable antenna reflector // *Reshetnev Readings*. 2018. Pp. 121–122.
7. Scheid R.E. Precision pointing compensation for DSN antennas with optical distance measuring sensors // *TDA Progress Report*. 1989. Pp. 127–140.
8. Способ компенсации деформаций конструкции крупногабаритной антенны космического аппарата / Е.В. Бикеев, Е.Н. Якимов, М.Г. Матленко и др. // *Вестник СибГАУ*. 2016. Т. 17, № 3. С. 673–683.
9. Гряник М.В., Ломан В.И. Развертываемые зеркальные антенны зонтичного типа. М.: Радио и связь, 1987. 72 с.
10. Active surface compensation for large radio telescope antennas / C. Wang, H. Li, K. Ying et al. // *HIJ Ant. and Propag.* 2018. Vol. 1. Pp. 1-17. DOI: 10.1155/2018/3903412
11. Rahmat-Samii Y. Array feeds for reflector surface distortion compensation: concepts and implementation // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 1990. Vol. 32, no. 4. Pp. 20-26. doi: 10.1109/74.80554.
12. Acosta R.J. Compensation of reflector surface distortions using conjugate field matching // *IEEE A/P-S Internat. Symposium and National Radio Science-Meeting*. Philadelphia. Pennsylvania. June 1986. Pp. 1-6.
13. Roberto J., Zaman A. Adaptive feed array compensation system for reflector antenna surface distortion // *IEEE AP-5 Internat. Symposium and URSI Radio Science Meeting*. San Jose. California. June 1989. Pp 1-7.
14. Романов П.В., Чони Ю.И., Романов А.Г. Электронная стабилизация лучей спутниковой системы связи при использовании разреженной сетки наземных маяков. Обзор // *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2020. № 2. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb20/4/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.2.4
15. Romanov P. Multibeam Antenna Reflector Distortions Reconstruction via Processing Antenna Array Signals // 2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC). 2020. Pp. 155-158. doi: 10.1109/RMC50626.2020.9312357.

16. Romanov P. and Choni Y. Stabilization of Beams of a Satellite Hybrid Reflector Antenna via Processing Signals from the Ground Beacon // 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2021. Pp. 1-5. doi: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438853.

17. Ismatullah and T. F. Eibert. Modeling and Design of Offset Parabolic Reflector Antennas using Physical Optics and Multilevel Fast Multipole Method Accelerated Method of Moments // 2006 IEEE Inter-

national Multitopic Conference, Islamabad. 2006. Pp. 377-382, doi: 10.1109/INMIC.2006.358196.

18. Мочалов В.В. Аттестация алгоритма акустического приближения // Успехи современной радиоэлектроники. 2019. № 12. С. 124–128.

19. Wenhe Ye, Dajun Yue, Fengqi You. Trust-region methods [Электронный ресурс]: Northwestern University Open Text Book on Process Optimization. URL: https://optimization.mccormick.northwestern.edu/index.php/Trust-region_methods (дата обращения 03.03.2022).

Статья поступила в редакцию 15.02.2022; одобрена после рецензирования 02.03.2022; принята к публикации 10.03.2022

Информация об авторе

РОМАНОВ Павел Валерьевич – аспирант 4-го года обучения, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – антенны, СВЧ - устройства, методы оптимизации, численные методы, нейронные сети. Автор 13 научных публикаций, в том числе одного патента РФ.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 621.396.67.012.12

<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.1.6>

Stabilization of Beams of a Satellite Multibeam Hybrid Reflector Antenna Based on Antenna Array Signals in the Presence of Noise

P. V. Romanov

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI,
10, K.Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation
greenfreq@gmail.com

Keywords: multibeam hybrid reflector antenna; stabilization of beams; reflector profile reconstruction; antenna array; conjugate field matching; beacon

ABSTRACT

Introduction. Maintaining the orientation of the beams of a multibeam hybrid reflector antenna (MHRA) of a geostationary satellite with deformations of the reflector profile caused by the variability of the thermal load is a challenging technical problem, that need to be solved to provide the required energy characteristics of satellite communication systems. Along with mechanical systems for compensating reflector profile distortions, operating in tandem with optical devices for profile monitoring, there is currently an increasing interest in electronic beam stabilization. In particular, there has been proposed an effective stabilization method by focusing beams on ground beacons located in the centers of service areas. This method is simple and reliable, but unattractive due to the need to place a large number of ground beacons located strictly near the centers of service areas. The **aim** of the research is to perform an analysis of the effect of noise on the accuracy of the reconstruction of the MHRA reflector profile, as well as on the algorithm for stabilizing the MHRA beams according to the noise-contaminated signal of the ground beacon. **Research algorithm.** There is studied an algorithm for stabilizing MHRA beams based on the signals of a single beacon. This algorithm includes an algorithm for reconstructing the reflector profile from beacon signals, which reconstructs the reflector profile as a surface that passes through the center of the nominal reflector and has the constant phase difference between the field of the antenna array (AA), excited proportionally to the complex conjugate of the received amplitudes and the field of the plane wave propagating in the direction of the beacon. **Findings.** There is shown that proposed technique allows to reconstruct the reflector profile with an accuracy of hundredths of a wavelength, provided that the AA size is sufficient to intercept 90-95% of the reflected beacon signal power, and the distance between the AA elements is less than a certain critical value. The influence of additive white Gaussian noise on both the accuracy of reflector profile reconstruction and the energy efficiency of beam stabilization algorithms is analyzed. The filtering properties of the reflector profile reconstruction algorithm are presented. There is considered an effective method for calculating MHRA in the acoustic approximation, which serves as the base for the beam stabilization algorithm. Besides, mathematical models of typical MHRA deformations are presented.

REFERENCES

1. Wang C.S., Yuan S., Liu X. et al. Temperature distribution and influence mechanism on large reflector antennas under solar radiation: solar thermal effect on reflector antenna. *Radio Science*. 2017. Vol. 52. № 10. Pp. 1253-1260.
2. Sajapin S.N. Analiz i sintez raskryvaemyh na orbite precizionnyh krupnogabaritnyh mekhanizmov i konstrukcij kosmicheskikh radioteleskopov lep-estkovogo tipa. Diss. dokt. tehn. nauk [Analysis and synthesis of high-precision large-sized mechanisms and structures of space radio telescopes of lobe type deployed in orbit. Dr. tehn. sci. diss.]. Moscow, 2003. 457 p. (In Russ.).
3. Palacin B. et al. Multibeam antennas for very high throughput satellites in Europe: Technologies and trends. *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*. Paris, 2017. Pp. 2413-2417. 1. doi: 10.23919/EuCAP.2017.7928493.
4. Ushakov A.V. Sledjashhij optoelektronnyj monitoring deformacij v zadache dinamicheskoi justirovki ustrojstv prostranstvennogo nabljudenija. Pod red. A.V. Ushakova [Tracking optoelectronic monitoring of deformations in the problem of dynamic adjustment of spatial observation devices. Under ed. A.V. Ushakov]. St. Petersburg: ITMO University, 2008. 216 p. (In Russ.).
5. Subrahmanyam R. Photogrammetric measurement of the gravity deformation in a Cassegrain antenna. *IEEE Trans. Anten. Propag.* 2005. Vol. 53. № 8. Pp. 2590–2596.
6. Kalabegashvili G.I., Bikeev E.V., Matylenko M.G. Selection of the device for orbital alignment of a large transformable antenna reflector. *Reshetnev Readings*. 2018. Pp. 121–122.
7. Scheid R.E. Precision pointing compensation for DSN antennas with optical distance measuring sensors. *TDA Progress Report*. 1989. Pp. 127–140.
8. Bikeev E.V., Jakimov E.N., Matylenko M.G., Titov G.P. Sposob kompensacii deformacij konstrukcii krupnogabaritnoj anteny kosmicheskogo apparata [The method of compensation of construction deformation for large spacecraft antenna]. *Vestnik Sibirskogo Gosudarstvennogo Ajerokosmicheskogo Universiteta im. akademika M.F. Reshetneva* [Vestnik of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology]. 2016. Vol. 17. No 3. P. 673-683. (In Russ.).
9. Grjanik M.V., Loman V.I. *Razvertivaemye zerkal'nye anteny zontichnogo tipa* [Deployable umbrella reflector antennas]. Moscow, Radio i svjaz', 1987. 72 p. (In Russ.).
10. Wang C., Li H., Ying K. et al. Active surface compensation for large radio telescope antennas. *HLI Ant. and Propag.* 2018. Vol. 1. Pp. 1-17. DOI: 10.1155/2018/3903412.
11. Rahmat-Samii Y. Array feeds for reflector surface distortion compensation: concepts and implementation. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 1990. Vol. 32, no. 4. Pp. 20-26. doi: 10.1109/74.80554.
12. Acosta R.J. Compensation of reflector surface distortions using conjugate field matching. *IEEE A/P-S Internat. Symposium and National Radio Science-Meeting*. Philadelphia. Pennsylvania. June 1986. Pp. 1-6.
13. Roberto J., Zaman A. Adaptive feed array compensation system for reflector antenna surface distortion. *IEEE AP-5 Internat. Symposium and URSI Radio Science Meeting*. San Jose. California. June 1989. Pp 1-7.
14. Romanov P.V., Choni Ju.I., Romanov A.G. Jelektronnaja stabilizacija luchej sputnikovoj sistemy svjazi pri ispol'zovanii razrezhennoj setki nazemnyh majakov [Electronic stabilization of the beams of a satellite communications system using a sparse network of ground beacons]. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics]. 2020. No 2. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/feb20/4/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.2.4 (In Russ.).
15. Romanov P. Multibeam Antenna Reflector Distortions Reconstruction via Processing Antenna Array Signals. *2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC)*. 2020. Pp. 155-158. doi: 10.1109/RMC50626.2020.9312357.
16. Romanov P. and Choni Y. Stabilization of Beams of a Satellite Hybrid Reflector Antenna via Processing Signals from the Ground Beacon. *2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. 2021. Pp. 1-5. doi: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438853.
17. Ismatullah and T. F. Eibert. Modeling and Design of Offset Parabolic Reflector Antennas using Physical Optics and Multilevel Fast Multipole Method Accelerated Method of Moments. *2006 IEEE International Multitopic Conference*. Islamabad. 2006. Pp. 377-382, doi: 10.1109/INMIC.2006.358196.
18. Mochalov V.V. Attestacija algoritma akusticheskogo priblizhenija [Validation of the acoustic approximation algorithm]. *Uspehi sovremennoj radioelektroniki* [Achievements of Modern Radioelectronics]. 2019. No 12. P. 124-128. (In Russ.).
19. Wenhe Ye, Dajun Yue, Fengqi You. Trust-region methods. Northwestern University Open Text Book on Process Optimization. URL: https://optimization.mccormick.northwestern.edu/index.php/Trust-region_methods (reference date: 03.03.2022).

The article was submitted 15.02.2022; approved after reviewing 02.03.2022;
accepted for publication 10.03.2022

For citation: Romanov P. V. Stabilization of Beams of a Satellite Multibeam Hybrid Reflector Antenna Based on Antenna Array Signals in the Presence of Noise. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems*. 2022. No 1 (53). Pp. 6–20. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.1.6>

Information about the author

Pavel V. Romanov – fourth year PhD student at Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI. Research interests – antennas, microwave devices, optimization methods, numerical methods, neural networks. The author of 13 scientific publications including a patent RF.

Author read and approved the final manuscript.