

DOI 10.30898/1684-1719.2020.2.4

УДК 621.396.67.012.12: 621.396.4

ЭЛЕКТРОННАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ЛУЧЕЙ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗРЕЖЕННОЙ СЕТКИ НАЗЕМНЫХ МАЯКОВ

П. В. Романов¹, Ю. И. Чони¹, А. Г. Романов²

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ, 420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, д.15

²АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

Статья поступила в редакцию 6 февраля 2020 г.

Аннотация. В обеспечении энергетического потенциала спутниковой системы связи решающую роль играет крупногабаритная многолучевая гибридная зеркальная антенна (МГЗА), формирующая сотню игольчатых (в доли градуса) лучей, которые покрывают рабочую область в пределах контура соответствующей территории. Даже относительно малые искажения формы рефлектора, например, из-за неравномерного теплового нагрева, приводят к недопустимому нарушению ориентации лучей. Один из способов стабилизации лучей состоит в их фокусировке на наземные маяки, расположенные в центрах соответствующих зон, за счет адаптивного управления весовыми коэффициентами кластеров (ВКК). Предлагается алгоритм коррекции ВКК для поддержания требуемой ориентации лучей по сигналам маяков, смещенных от необходимых направлений вплоть до периферии соответствующей зоны. Демонстрируется эффективность такого способа стабилизации лучей. Обсуждается возможность сокращения числа наземных маяков за счет аппроксимации недостающего ВКК по сигналам окружающих кластеров. При этом, как показывают результаты имитационного моделирования МГЗА типичной геометрии, восстановление ВКК промежуточных кластеров достигается с точностью, при которой ориентация луча поддерживается в пределах 7% от его ширины. Основные результаты работы докладывались на

XIII Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь».

Ключевые слова: спутниковая многолучевая антенна, луч, кластер, компенсация деформаций рефлектора, наземный маяк.

Abstract. Today, multi-beam reflector antennas are widely used to meet the strict requirements on the power budget for satellite telecommunications systems. They form hundreds of needle-like beams that cover the required area. Even relatively small distortions in the shape of the antenna reflector, for example, due to uneven thermal heating, lead to unacceptable disturbance in the orientation of the beams. To maintain the stability of the reflector surface, complex mechanical systems are used. If not alternative, then an additional system of beams stabilization can focus them on ground beacons located in the centers of the corresponding zones. This realizes adaptive adjustment of the cluster weighting coefficients (CWC) based on beacon signals received. A CWC correction algorithm is proposed to maintain the required beam orientation under conditions when the beacon can be offset from the desired direction up to the periphery of the corresponding zone. The effectiveness of this method of stabilization of the beams is demonstrated. The possibility of reducing the number of ground beacons is discussed, the implementation of which requires the approximation of the CWC from the signals of the surrounding clusters. The results of simulation of the multi-beam reflector antenna of typical geometry show that the restoration of the CWC of intermediate clusters is achieved with an accuracy at which the beam orientation is maintained within 7% of its width.

Key words: satellite multi-beam antenna, reflector surface distortions, compensation, cluster, weighting coefficients, a ground beacon.

1. Моделирование крупногабаритной МГЗА

Многолучевые гибридные зеркальные антенны (МГЗА), которые формируют необходимое число игольчатых лучей шириной менее углового градуса и покрывают зону обслуживания в пределах конкурра соответствующей территории (рис.1), играют чрезвычайно важную роль в обеспечении энергетического потенциала спутниковой системы связи.

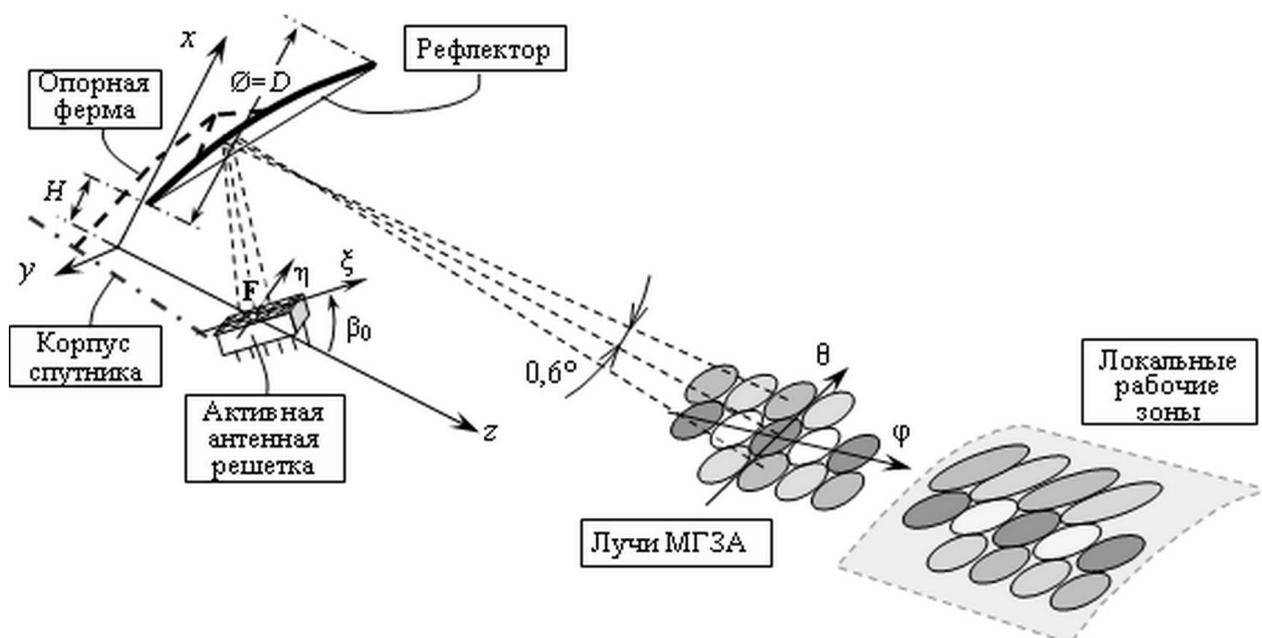


Рис. 1. Структура спутниковой МГЗА.

Рефлектор МГЗА является крупногабаритной конструкцией, как правило, зонтичного типа (рис.2). Его поверхность, претерпевает изменяющиеся во времени искажения из-за неравномерной тепловой нагрузки и действия других эксплуатационных факторов.



Рис. 2. Рефлектор КА «Луч» на испытательном стенде (<https://docplayer.ru/39400343-Oao-informacionnye-sputnikovye-sistemy-imeni-akademika-m-f-reshetnyova.html>).

Чтобы поддерживать поверхность рефлектора с необходимо высокой точностью, в его конструкции используются специальные материалы и

применяются активные механические системы, компенсирующие внешние воздействия [1-4].

У современных спутниковых МГЗА лучи формируются кластерами из групп облучателей. Благодаря этому становится возможным стабилизировать положение лучей путем управления амплитудно-фазовыми распределениями (векторами весовых коэффициентов (ВВК)), возбуждающими элементы кластеров в режиме передачи или осуществляющими весовое суммирование принимаемых сигналов. Процесс регулирования ВВК называется дофокусировкой МГЗА. Ее суть состоит в адаптации ВВК к текущему состоянию рефлектора [5-8].

Анализ эффективности тех или иных алгоритмов управления ВВК кластеров сопряжен с необходимостью многовариантных расчетов ДН и фокальных пятен МГЗА. Эти расчеты имеют оценочный характер, поэтому не только допустимо, но и целесообразно использовать не связанную с большими временными затратами программу приближенного электродинамического моделирования МГЗА [8].

2. Программа моделирования крупногабаритной МГЗА

Спутниковая МГЗА является крупногабаритной зеркальной антенной офсетной геометрии (рис. 3). При типичных ее размерах профиль рефлектора образован участком параболоида вращения $z = (x^2 + y^2)/4F$ с фокусным расстоянием $F = 7.4\text{м}$, который высекается параллельным оптической оси Oz цилиндром радиуса $R = 6\text{м}$, ось которого и проходит через точку $(x = 9\text{м}, y = 0)$ на плоскости xOy . Это обеспечивает клиренс $H = 3\text{м}$. Полотно антенной решетки (АР) образовано антенными элементами, расположенными в пределах прямоугольной площадки $1 \times 2\text{м}^2$ в узлах сетки сотовой структуры со стороной шестиугольников $a = 11\text{см}$. Число элементов АР $N = 231$. Их индивидуальные ДН в пределах телесного угла рефлектора соответствуют функции $\cos^{1/2}(\psi)$, где угол ψ отсчитывается от нормали к полотну АР. Плоскость антенного полотна отклонена от оптической оси рефлектора на угол $\beta_0 = 38^\circ$, а его центр совмещен с фокусом F.

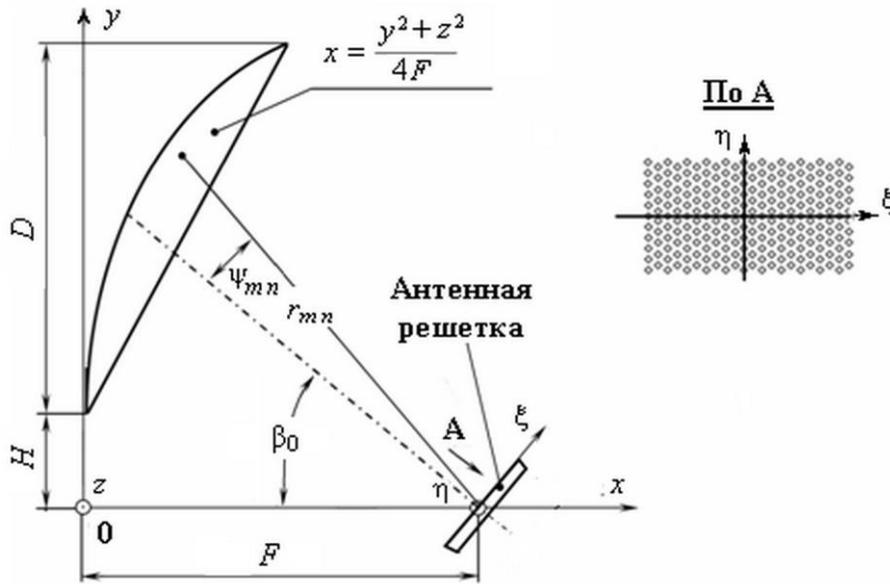


Рис. 3. Геометрия МГЗА офсетной схемы.

Для полотна АР вводится локальная система координат $\xi 0 \eta$, ось 0ξ которой параллельна длинной стороне полотна (рис. 3). Углы θ и φ наблюдения ДН МГЗА ориентированы таким образом, что плоскость $z0x$ является плоскостью азимутального угла φ , а угол θ отсчитывается не от полярной оси $0z$, как обычно, а от плоскости $z0x$, т.е. θ является углом места. Длина волны λ несущей частоты составляет 15см.

Разработанная программа реализует расчет МГЗА в так называемом акустическом приближении [8]. При этом рефлектор заменяется большим числом (порядка десятков тысяч) точек $\{x_m, y_m, z_m\}$ (рис.4). Пусть токи на рефлекторе возбуждаются плоской электромагнитной волной, падающей с направления облучения (θ_0, φ_0) .

$$I_m = \exp\left[jk(z_m \cos \varphi_0 \cos \theta_0 + y_m \sin \varphi_0 \cos \theta_0 + x_m \sin \theta_0) \right]. \quad (1)$$

Сигнал S_n на выходе n -го элемента АР вычисляется как сумма сигналов от сферических волн, излучаемых токами рефлектора $\{I_m\}$. С учетом ДН элемента имеем

$$S_n = \sum_m I_m \cos^{1/2}(\psi_{m,n}) \exp(-jkr_{m,n}) / r_{m,n}, \quad (2)$$

где $r_{m,n}$ – расстояние между точками рефлектора и элементами АР, а $\cos(\psi_{m,n})$, как следует из геометрических построений, вычисляется по формуле $\cos(\psi_{n,m}) = [(\xi_n \sin \beta_0 - x_m) \cos \beta_0 + (F + \xi_n \cos \beta_0 - z_m) \sin \beta_0] / r_{n,m}$.

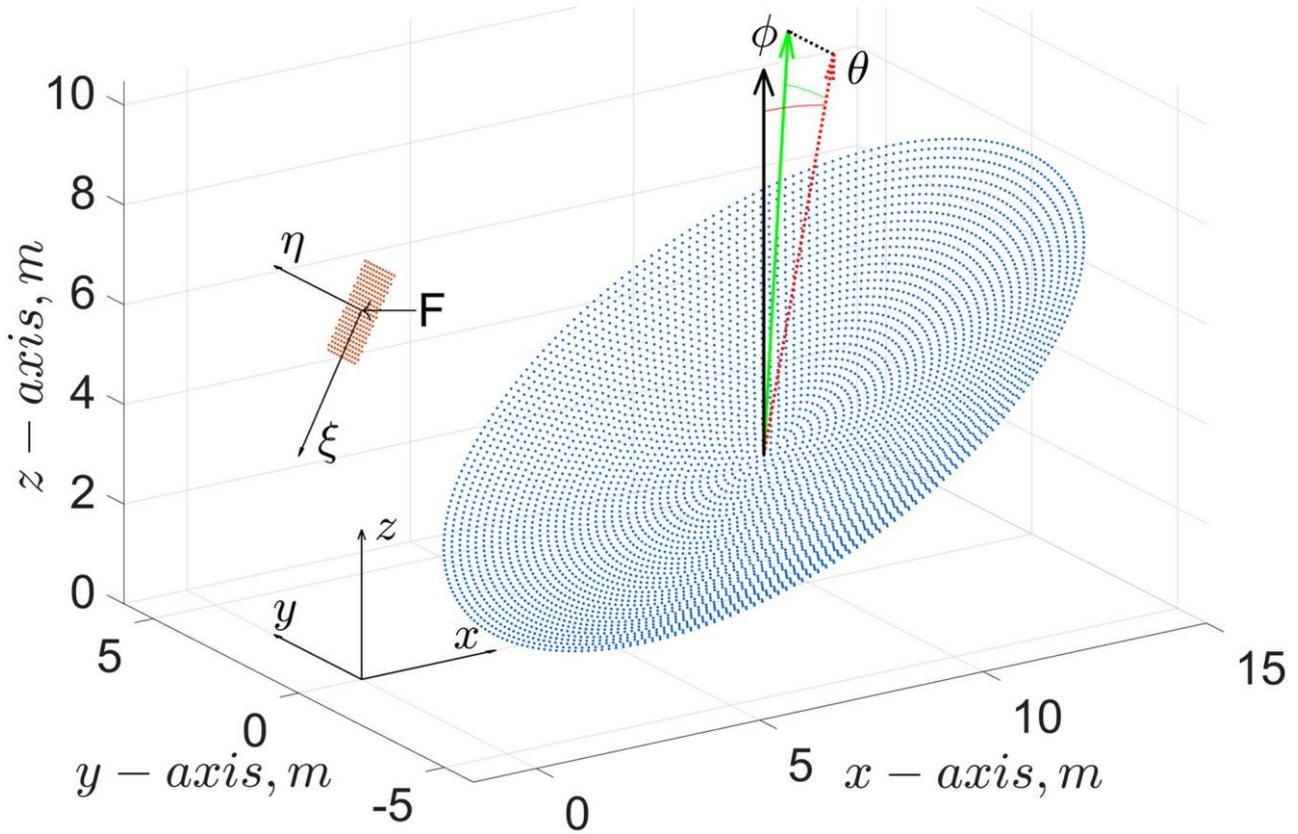


Рис. 4. Геометрия МГЗА в среде моделирования.

Обратный переход от ВВК $\{W_n\}$ кластера к токам рефлектора осуществляется аналогично

$$I_n = \sum_n W_n \cos^{1/2}(\psi_{m,n}) \exp(-jkr_{m,n}) / r_{m,n}. \quad (3)$$

По токам (3) вычисляется ДН МГЗА

$$F(\theta, \varphi) = \sum_m I_m \exp[jk(z_m \cos \varphi \cos \theta + y_m \sin \varphi \cos \theta + x_m \sin \theta)]. \quad (4)$$

Моделируемая МГЗА покрывает лучами шириной 0.8° пятьдесят семь зон, расположенных в узлах гексагональной сетки со стороной в 0.6° , как показано на рис. 5.

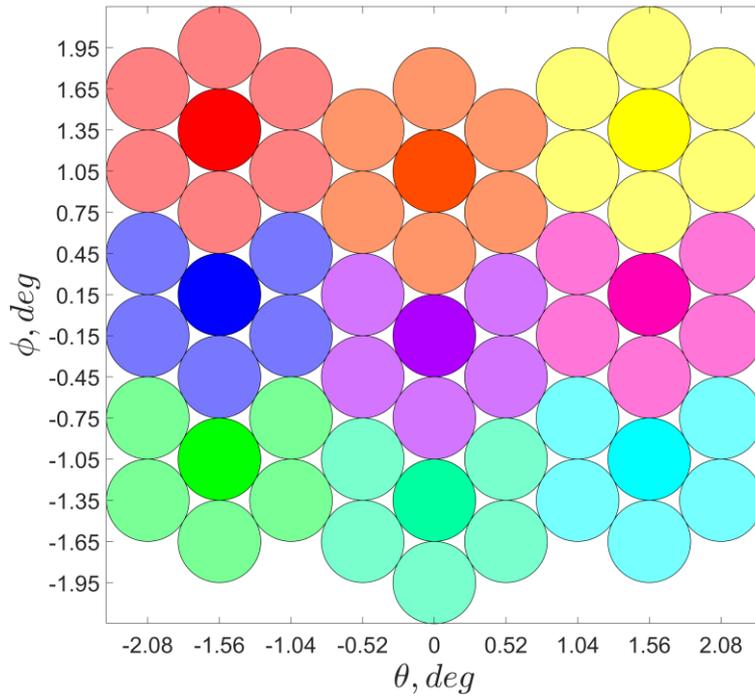


Рис. 5. Территориальный план области обслуживания.

При моделировании МГЗА важно рассчитывать фокальные пятна, соответствующие облучению рефлектора с направления (θ, φ) . Под фокальным пятном понимается функция, отражающая зависимость комплексной амплитуды сигнала на выходе элемента АР от координат (ξ, η) точки его расположения. Дело в том, что из физических соображений, подкрепляемых принципом взаимности в электродинамике, ясно, что элементы кластера p -го луча (θ_p, φ_p) целесообразно располагать в области наибольших значений фокального пятна $S^{(p)}(\xi, \eta)$. Более того, для ориентации луча в требуемом направлении ВВК следует устанавливать пропорционально комплексно сопряженным значениям пятна на элементах кластера $\{W_n^{(p)} = S_n^{(p)}(\xi_n, \eta_n)^*\}$.

Пример рассчитанного по формулам (1) – (4) фокального пятна и ДН, сформированной в соответствии с изложенными выше рекомендациями, представлен на рис. 6.

Мерой различия сопоставляемых ВВК или фокальных пятен служит величина σ среднеквадратичного отклонения (СКО). Поскольку ВВК, отличающиеся на постоянный множитель, эквивалентны в том смысле, что

формируемые ими ДН одинаковы, то СКО сопоставляемых векторов, обозначим их абстрактно как \mathbf{A} и \mathbf{B} , вычисляется следующим образом

$$\sigma = \sqrt{1 - \frac{|(\mathbf{A}, \mathbf{B})|^2}{|\mathbf{A}|^2 |\mathbf{B}|^2}}. \quad (5)$$

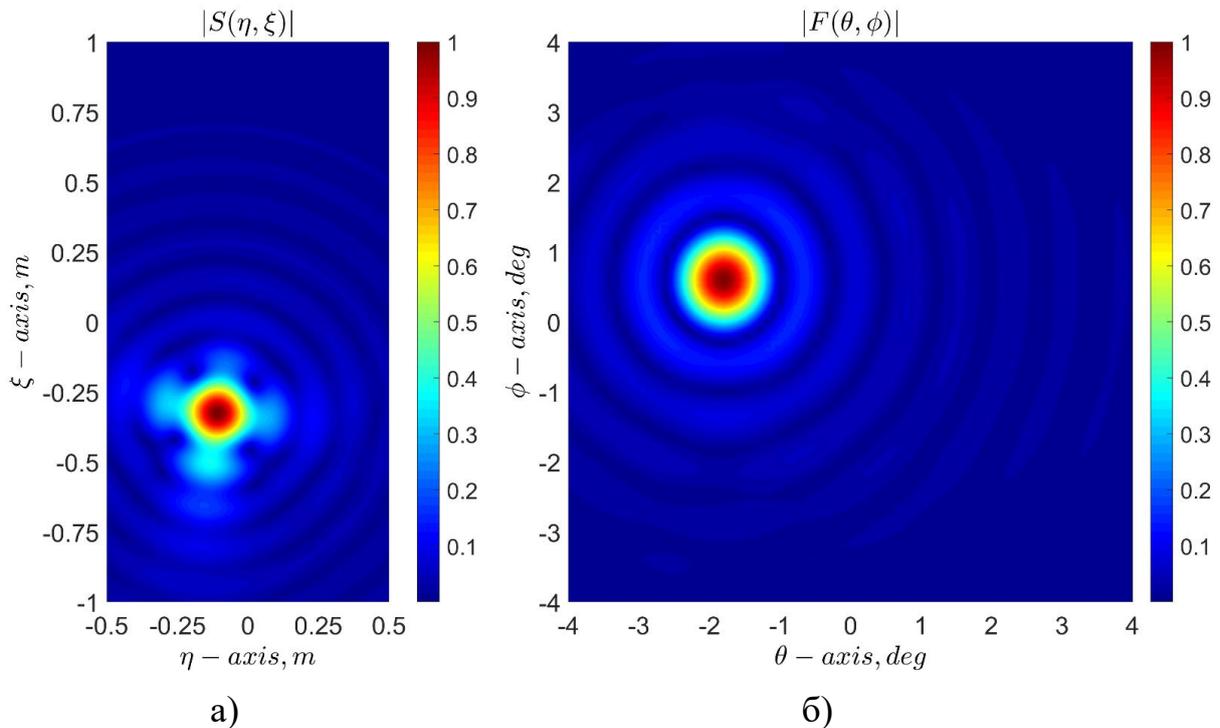


Рис. 6. Рельеф фокального пятна (а) и ДН соответствующего кластера (б).

Естественно, в случае комплекснозначных векторов скалярное произведение определяется как $(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = \sum_n A_n B_n^*$. Величина (5) имеет ясный смысл: это значение синуса угла между векторами (угла, обобщенного на случай многомерных комплекснозначных векторов). Она служит мерой сонаправленности векторов, которая не зависит от масштабных сомножителей.

Понятие СКО в виде (5) распространяется и на случай, когда \mathbf{A} и \mathbf{B} являются элементами гильбертова пространства, т.е. функциями, например, ДН $A(\theta, \varphi)$ и $B(\theta, \varphi)$, с введенными для них скалярным произведением $(A(\theta, \varphi), B(\theta, \varphi)) = \int_S A(\theta, \varphi) B^*(\theta, \varphi) dS$ и нормами $\|A(\theta, \varphi)\| = (A(\theta, \varphi), A(\theta, \varphi))^{1/2}$. При этом значение СКО (5) имеет смысл «СКО по форме» сопоставляемых функций [9], которое не чувствительно к масштабным коэффициентам, а

зависит только рельефа этих функций. Это и отражено в названии. Естественно, выражение (5) сохраняет смысл и меры отличия сопоставляемых фокальных пятен $A(\xi, \eta)$ и $B(\xi, \eta)$.

3. Оценка стабильности формы фокальных пятен МГЗА

Возможность экстраполяции того, каким будет фокальное пятно при смещении направления облучения на доли ширины луча, равно как и возможность аппроксимации фокального пятна по окружающим его пятнам, порождается одним и тем же обстоятельством. Если направление облучения изменяется в ограниченных пределах у оптической оси параболоида, то максимум фокального пятна прогнозируемым образом перемещается по антенному полотну, и его форма в границах кластера, скорее всего, изменяется не резко. Поскольку именно это обстоятельство обуславливает возможность сокращения числа маяков, то важно оценить динамику изменения формы пятна.

Процедура сравнения фокальных пятен $S^{(1)}(\xi, \eta)$ и $S^{(2)}(\xi, \eta)$, соответствующих направлениям облучения рефлектора (θ_1, φ_1) и $(\theta_2 = \theta_1 + \Delta\theta, \varphi_2 = \varphi_1 + \Delta\varphi)$, включает расчет пятен по формулам (1) и (2), выделение квадратных областей со стороной $3a$ вокруг их максимумов (участок для кластера) и вычисление СКО (5) сопоставляемых пятен в пределах выделенной области. Расчеты проводились для смещений $\Delta\theta$ и $\Delta\varphi$ в пределах $\pm 1^\circ$ с шагом 0.05° по обеим координатам. На рис. 7 представлена зависимость СКО $\sigma(\Delta\theta, \Delta\varphi)$, характеризующая изменение формы фокального пятна. Причем, это значения, усредненные по всем пятидесяти семи (рис. 5) зонам (θ_1, φ_1) , т.е. по фокальным пятнам, как в центре антенного полотна, так и на его периферии. Малая белая окружность на рис. 6 выделяет область смещений $(\Delta\theta, \Delta\varphi)$ радиуса 0.3° (граница луча), а внешняя – область смещений радиуса 0.6° (центры соседних лучей).

Представленные результаты подтверждают то, что изменение направления облучения рефлектора МГЗА по обоим углам приводят, главным образом, к смещению фокального пятна в плоскости АР, и почти не сказывается на его форме ($\sigma < 0.15$) вплоть до отклонений на 0.6° . Было обнаружено, что смещения

фокального пятна моделируемой МГЗА соответствуют пропорциям: $\Delta\xi = 0.178[\text{м/град}] \Delta\theta$; $\Delta\eta = -0.178[\text{м/град}] \Delta\phi$. Можно ожидать, что при малых деформациях рефлектора отмеченные закономерности сохраняются.

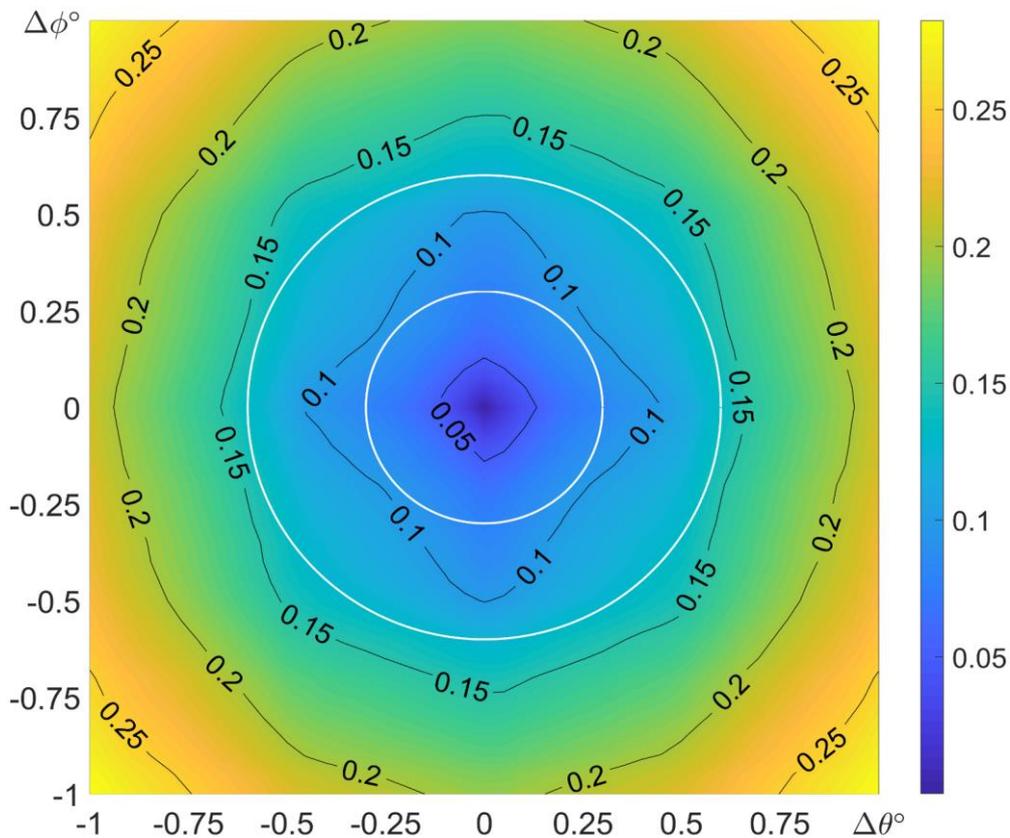


Рис. 7. Зависимость СКО несмещенного фокального пятна и фокального пятна, соответствующего смещению $(\Delta\theta, \Delta\phi)$ направления облучения.

4. Дофокусировка МГЗА по сигналам наземного маяка, смещенного из центра области обслуживания

Простой и надежный метод дофокусировки сводится к когерентному эпизодическому приему сигналов от наземных маяков [5] и выработке ВВК кластера по этим сигналам, несущим в себе «отпечаток» текущего состояния рефлектора. Действительно, вектор принятых сигналов $\{S_n^{(p)}\}$ пропорционален значениям индивидуальных ДН элементов в направлении маяка. В соответствии с хорошо известным принципом формирования максимума в желаемом направлении, ВВК $\{W_n^{(p)}\}$ должен быть пропорционален комплексно-сопряженным значениям индивидуальных ДН: $\{W_n^{(p)} = S_n^{(p)*}\}$.

Может оказаться невозможным или затруднительным поместить маяк в необходимое место, поэтому представляет интерес формирование луча по сигналам $\{\tilde{S}_n^{(p)}\}$ от маяка, смещенного на $(\Delta\theta, \Delta\varphi)$ с необходимого направления. Предложенный нами способ коррекции вектора $\{\tilde{S}_n^{(p)}\}$ от смещенного маяка в вектор $\{S_n^{(p)}\}$, который соответствует облучению из центра p -ой зоны, состоит в следующем. По сигналам p -го кластера $\{\tilde{S}_n^{(p)}\}$ аппроксимируется фокальное пятно $\tilde{S}^{(p)}(\xi, \eta)$ как непрерывная функция, затем требуемое несмещенное пятно находится смещением в обратном направлении

$$S^{(p)}(\xi, \eta) = \tilde{S}^{(p)}(\xi + \Delta\xi, \eta + \Delta\eta), \quad (5)$$

где $\Delta\xi = \xi(\theta_p, \varphi_p) - \xi(\theta_p - \Delta\theta_p, \varphi_p - \Delta\varphi_p)$, $\Delta\eta = \eta(\theta_p, \varphi_p) - \eta(\theta_p - \Delta\theta_p, \varphi_p - \Delta\varphi_p)$, а функции $\xi(\theta, \varphi)$ и $\eta(\theta, \varphi)$ есть зависимости координат максимума фокального пятна от направления облучения рефлектора. Наконец, выборка $S^{(p)}(\xi_n, \eta_n)$ отсчетов функции (5) дает искомый скорректированный вектор $\{S_n^{(p)}\}$.

Восстановление непрерывной функции $\tilde{S}^{(p)}(\xi, \eta)$ по ее семи отсчетам $\{\tilde{S}_n^{(p)}\}$, как обычно, сводится к решению СЛАУ вида

$$\tilde{S}_n^{(p)} = \sum_{q=1}^7 a_q g_q(\xi_n, \eta_n) \quad (6)$$

где $\{g_q(\xi, \eta)\}$ есть некоторый базис из семи (или меньшего числа) функций. Выбор этих функций – дело не формальное. От этого в значительной степени зависит соответствие функции (6) имеющему место реальному пятну. На наш взгляд, следует исходить из физики процесса формирования фокального пятна. Поскольку оно порождается интерференцией волн, приходящих с направлений телесного угла рефлектора, то за базисные функции целесообразно принять сферические от семи точек, равномерно распределенных по рефлектору, или плоские волны в соответствующих этим точкам направлениях. В данной работе используется базис из семи плоских волн, одна из которых падает на АР с

направления нормали, а остальным шести соответствует зенитный угол в 27° и азимуты от 30° до 330° с шагом 60° . После решения СЛАУ относительно искоемых коэффициентов $\{a_q\}$ фокальное пятно предстает в виде

$$\tilde{S}^{(p)}(\xi, \eta) = \sum_{q=1}^7 a_q g_q(\xi, \eta). \quad (7)$$

Рисунок 8 иллюстрирует хорошую точность аппроксимации фокального пятна при использовании описанного выше базиса. Маяк расположен в направлении $(\theta = 1^\circ, \varphi = 1^\circ)$. Изображены амплитудные рельефы в окрестности максимума: а) истинное фокальное пятно; б) аппроксимация семью плоскими волнами при решении СЛАУ (6) для мелкой сетки точек ($n = 1..961$); в) аппроксимация семью плоскими волнами по сигналам кластера ($n = 1..7$). Черными звездочками изображены позиции элементов кластера.

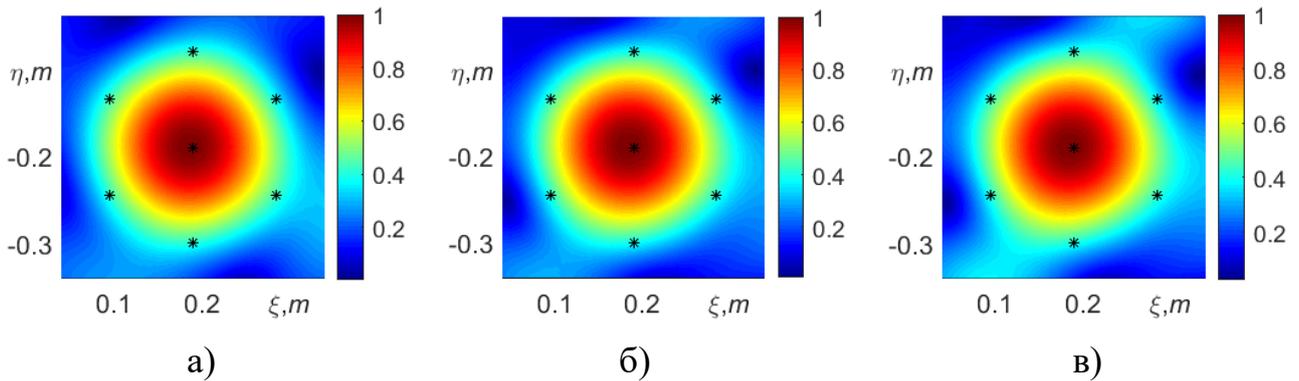


Рис. 8. Фокальное пятно (а); его аппроксимация: по 961-ой (б) и по 7-ми точкам.

Для оценки точности аппроксимации фокального пятна в окрестности его максимума (в квадрате со стороной $3a$) были выполнены детальные расчеты, результаты которых сводятся к следующему.

1. Потенциальная (по мелкой сетке точек) точность аппроксимация характеризуется значением СКО $\sigma < 0.15$ в полном интервале углов облучения.
2. СКО аппроксимации по 7-ми сигналам кластера в сравнении с потенциально возможным значением ухудшается не более чем на 0.05.
3. При смещении максимума пятна относительно центрального элемента кластера снижение точности аппроксимации не велико (рис 9).

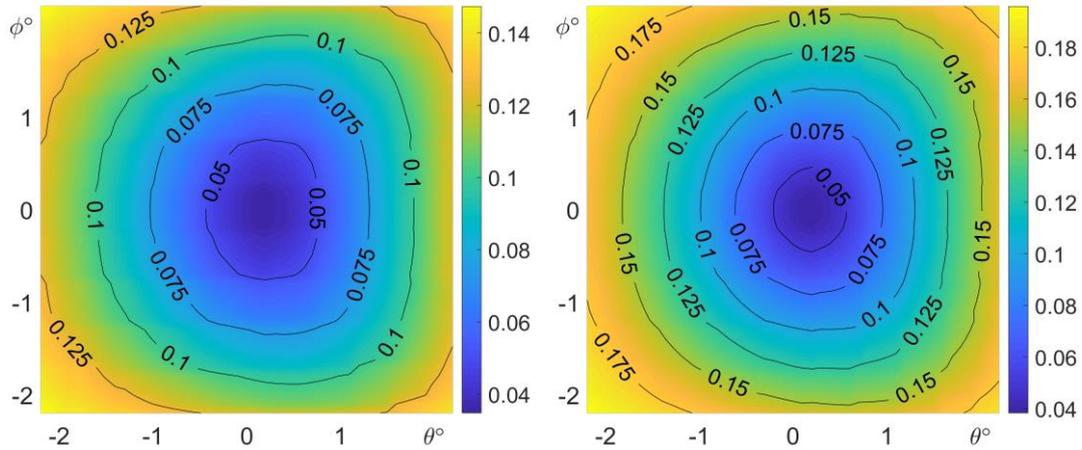


Рис. 9. SKO σ аппроксимации (по мелкой сетке слева и по сигналам кластера справа) фокального пятна плоскими волнами в зависимости от направления облучения рефлектора.

На рис. 10 представлено усредненное по всем областям увеличение SKO σ в зависимости от смещения маяка с направления центра области обслуживания.

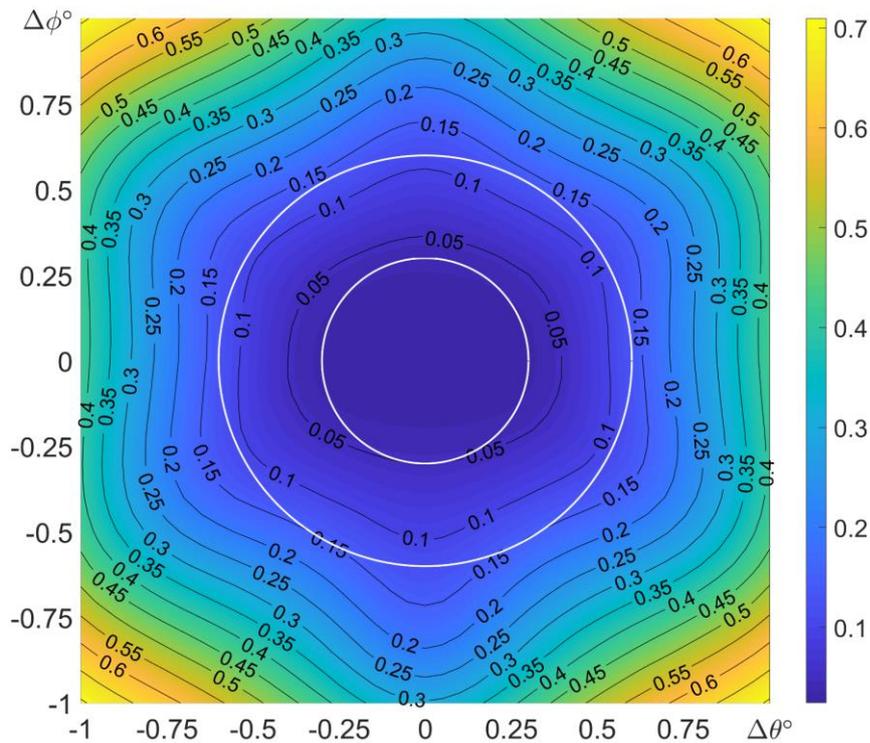


Рис. 10. Увеличение SKO пятна фактического и аппроксимированного по сигналам кластера в зависимости от смещения маяка.

Малая белая окружность соответствует радиусу зоны обслуживания, а внешняя – угловому расстоянию между центрами соседних областей. Как видно, смещение маяка в произвольную точку области обслуживания приводит

к несущественному росту отклонения по форме между фактическим пятном и его аппроксимацией.

5. Эффективность реконструкции ВВК промежуточных кластеров

Для оценки эффективности алгоритма восстановления ВВК промежуточных кластеров с использованием правила (5) анализируются три состояния рефлектора: 1) номинальное (без искажений формы), 2) поворот рефлектора относительно его центра на 0.3° в плоскости xOz , что приводит к смещению точки фокуса F на 4 см; 3) искажение формы рефлектора типа «козырек».

Под «козырьковым» искажением понимается следующее. Каждая точка рефлектора (x_m, y_m, z_m) смещается вдоль нормали к рефлектору на расстояние $\Delta s = h \rho(r) g(\alpha)$. Здесь r и α – полярные координаты точки $(x_m, y_m, 0)$ с центральной точкой $(x = 9\text{ м}, y = 0)$ и полярной осью Ox . Радиальная зависимость $\rho(r)$ деформации описывается функцией $\sin^2(\pi r/D)$, а угловая – функцией $g(\alpha) = \exp(-\alpha^2/(2\pi^2/36))\cos(\alpha/2)$. Таким образом, спицы рефлектора $\alpha = \text{const}$ изгибаются пропорционально синусу в квадрате (без излома в центре и с нарастанием отклонения к краю рефлектора $r = D/2$). Сомножитель $\cos(\alpha/2)$ угловой зависимости соответствует тому, что спица $\alpha = 0^\circ$ изгибается больше других с отклонением h на конце, а спица $\alpha = 180^\circ$ вовсе не деформируется, что и отражается в названии деформации «козырек». Гауссов сомножитель $\exp(-\alpha^2/(2\pi^2/36))$ дополнительно сужает угловую зависимость $\cos(\alpha/2)$. Приведенные ниже результаты расчетов соответствуют максимальному отклонению $h = 3\text{ см}$.

Сопоставляются три варианта регулирования ВВК кластеров.

1. Сохраняются ВВК, соответствующие идеальной форме рефлектора;
2. ВВК адаптируются к текущему состоянию рефлектора по сигналам наземных маяков, присутствующих в каждой локальной зоне;
3. ВВК адаптируются к текущему состоянию рефлектора при прореженной сетке наземных маяков, образованной девятью маяками расположенными в центрах зон, выделенных на рис. 2 ярким цветом. По ВВК от этих маяков

восстанавливались вышеизложенным способом фокальные пятна, которые далее смещались в центры окружающих зон, выделенных тем же цветом меньшей яркости. Тем самым общее количество маяков сокращено более чем в 6 раз.

В таблице приведены результаты расчетов, позволяющие судить о качестве восстановления ВВК и о стабилизации ориентации лучей. Рассчитывались оптимальные ВВК для всех лучей при текущем состоянии рефлектора. Вычислялись значения СКО по форме номинальных ВВК от оптимальных, а также восстановленных от оптимальных. В соответствующих столбцах таблицы приведены средние значения $M[\sigma]$ и максимальные значения $\max[\sigma]$.

При оценке ориентации лучей рассчитывались их ДН при текущем состоянии рефлектора и трех вариантах регулирования ВВК. Угловые координаты их максимумов сравнивались с номинальными/требуемыми положениями соответствующих лучей и вычислялись смещения δ , нормированные к ширине луча. Эти результаты приведены в колонке «Смещение луча от номинального направления».

Таблица. Точность восстановления ВВК и стабилизации ориентации лучей

	Отклонение σ ВВК по форме				Смещение δ луча от номинального направления				Смещение δ луча от расчетного направления			
	Поворот		Козырек		Поворот		Козырек		Поворот		Козырек	
	$M[\sigma]$	$\max[\sigma]$	$M[\sigma]$	$\max[\sigma]$	$M[\delta]$	$\max[\delta]$	$M[\delta]$	$\max[\delta]$	$M[\delta]$	$\max[\delta]$	$M[\delta]$	$\max[\delta]$
Нет адаптации ВВК	0,46	0,48	0,28	0,31	31.9%	33.8%	18.6%	20%	29.6%	31.3%	16.9%	18.8%
Адаптация ВВК, полная сетка маяков	0	0	0	0	2.4%	5.2%	2.0%	3.6%	0%	0%	0%	0%
Адаптация ВВК, разреженная сетка маяков	0,09	0,11	0,08	0,11	2.6%	4.5%	2.2%	4.5%	1.4%	4.0%	1.4%	4.0%

Понятно, что в отсутствии адаптации ВВК к текущему состоянию рефлектора лучи значительно отклоняются от их номинальных направлений, а за счет соответствующего регулирования ситуация заметно улучшается. На первый взгляд неожиданно, что азбучный принцип формирования максимума ДН в заданном направлении (в нашем случае $\{W_n^{(p)} = S_n^{(p)*}\}$) не приводит к точной ориентации лучей. Дело в том, что шесть периферийных элементов кластера, облучая рефлектор, формируют узкие лучи, которые образуют коническое окружение луча от центрального элемента кластера. Резкое изменение амплитуд лучей в направлении их синфазного сложения может оказаться (и оказывается, как показывают расчеты) фактором более сильным, чем фазировка полей, и в результате максимум ДН отклоняется от ожидаемого направления. В принципе формирования максимума ДН по умолчанию (к сожалению, не упоминаемому в учебниках) предполагается изотропность индивидуальных амплитудных ДН.

Обращает на себя внимание близость результатов, приведенных в таблице, для ситуаций полной или разреженной сетки маяков.

Правая колонка результатов отличается от предыдущей тем, что вычисляется отклонение не от номинального направления, а от того расчетного направления максимума луча, которое имеет место при ВВК, соответствующих правилу фокусирования $\{W_n^{(p)} = S_n^{(p)*}\}$. Это позволяет оценить эффективность алгоритма адаптации ВВК по сравнению с адаптацией при полной сетке маяков маяки.

На рис. 11 в качестве примера представлены амплитудные ДН луча для номинального направления ($\theta_0 = -1.0392^\circ$, $\varphi_0 = 0.45^\circ$) для двух типов деформаций рефлектора и трех алгоритмов регулирования ВВК. Белыми крестиками обозначено положение максимума номинальной ДН, бирюзовыми звездами обозначено положение максимума текущей ДН, зелеными кольцами (только в 3 столбце) обозначено положение максимума оптимальной ДН, т.е. бирюзовых звезд второго столбца. Кроме того, нанесены линии уровней с дискретом 0,35. Оси углов θ и φ оцифрованы в градусах.

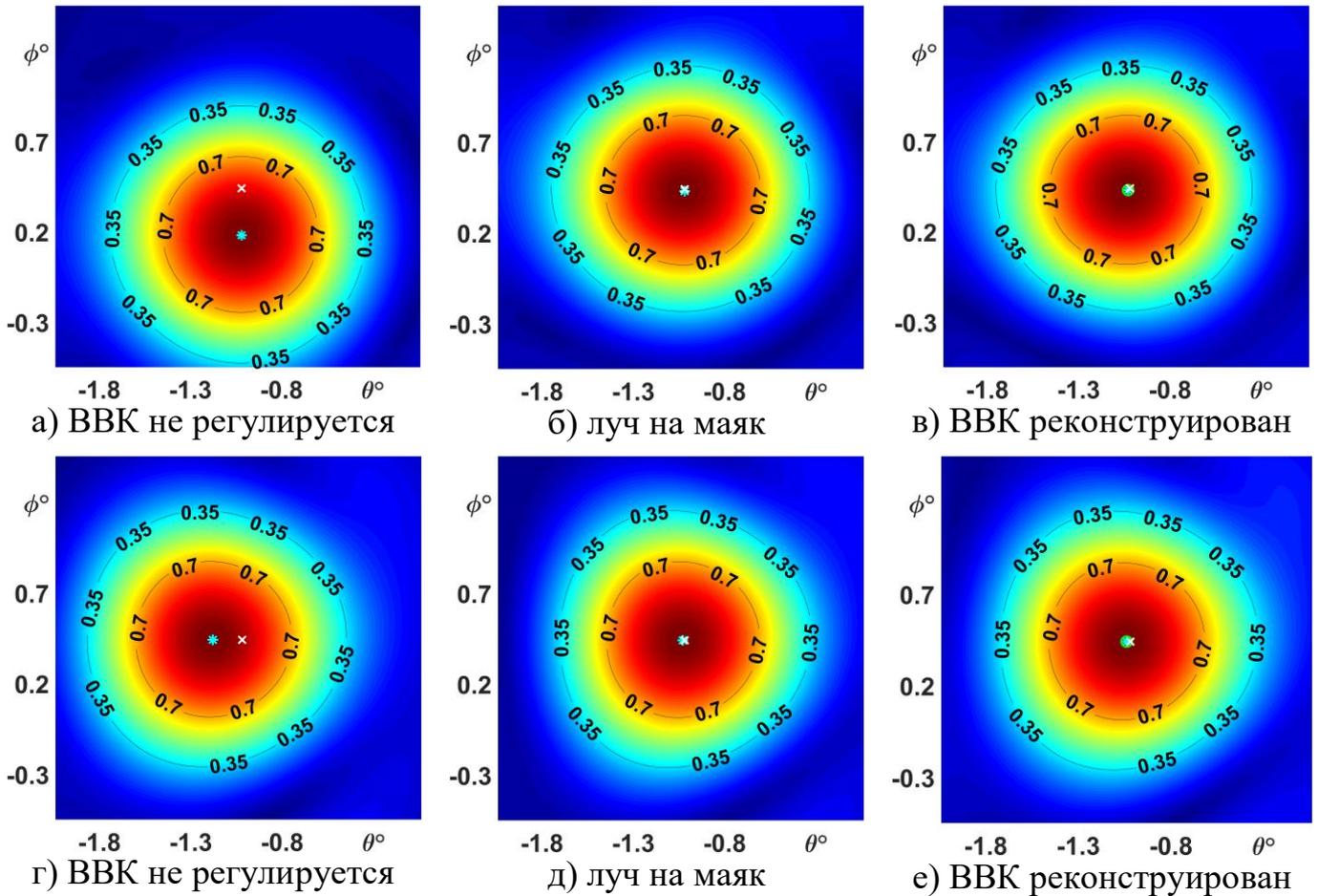


Рис. 11. Результаты стабилизации луча при двух типах деформаций: поворот рефлектора (а, б, в) и «козырек» (г, д, е).

6. Заключение

Заметим в заключение, что дополнительным средством повышения стабильности лучей при искажениях профиля рефлектора может стать адаптация положения кластера путем совмещения его центра с тем элементом антенного полотна, который принимает максимальный сигнал от маяка.

Литература

1. Гряник М.В., Ломан В.И. Развертываемые зеркальные антенны зонтичного типа. М.: Радио и связь. 1987. 72 с.
2. Шипилов С.Э., Ефремов А.А., Якубов В.П. Восстановление формы искривлений зеркальных комбинированных антенн // Известия ВУЗов. Физика. 2008. Т. 51. № 9/2. С. 103–105.

3. Шендалев Д.О. Проектирование формообразующей структуры зонтичного рефлектора // Вестник СибГАУ. 2013. № 6(52). С. 164–173.
4. Alan R., Roberto J., Peter T., Lee Shung-Wu. Compensation of reflector antenna surface distortion using an array feed // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1989, vol. 37, no. 8, 1989.
5. US 4,586,051 - H01Q 19/10 Reflector distortion compensation system for multiple-beam wave satellite antennas / Saitto A., Mica G. Assignee: Agence Spatiale Europeenne, Paris. Publ. Apr. 29, 1986.
6. Чони Ю.И., Шумина А.А. Возбуждение кластера облучателей гибридной зеркальной антенны в условиях деформации рефлектора // Всероссийская научно-практическая конференция АКТО-2016. Т. 2. С. 753–759.
7. Пономарев Л.И., Вечтомов В.А., Милосердов А.С. Бортовые цифровые многолучевые антенные решетки для систем спутниковой связи / Под ред. Л.И. Пономарева. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. 197 с.
8. Романов А.Г., Данилов И.Ю., Чони Ю.И., Мочалов В.В. Дофокусировка многолучевой гибридно-зеркальной антенны в условиях эксплуатационных нагрузок. // Научные технологии, №12, 2017г, С. 85-90.
9. Чони Ю.И. Синтез антенн: оптимизация решения с учетом конечной точности его реализации. // Радиотехника, № 10(15), 2019, с. 18-24.

Для цитирования:

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. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb20/4/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.2.4