

DOI 10.30898/1684-1719.2020.1.10

УДК 621.396.67.012.12

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КЛАСТЕРАМИ МНОГОЛУЧЕВОЙ ГИБРИДНОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ В ИНТЕРЕСАХ СТАБИЛИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

В. В. Мочалов^{1,2}, А. Г. Романов¹, И. Ю. Данилов¹, Ю. И. Чони²

¹ АО «Информационные спутниковые системы им. академика М.Ф. Решетнева»
662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

² Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ, 420111, г. Казань, ул. К.Маркса, 10

Статья поступила в редакцию 17 января 2020 г.

Аннотация. В обеспечении на необходимом уровне энергетического потенциала спутниковой системы связи важную роль играет стабильность положения лучей ее крупногабаритной гибридной зеркальной антенны, профиль рефлектора которой подвержен искажениям из-за изменяющихся эксплуатационных факторов, тепловых нагрузок в частности. Обсуждаются три подхода для достижения этой цели путем адаптивного регулирования весовых коэффициентов кластеров, формирующих лучи: а) при фиксированных кластерах, б) при целесообразном смещении кластеров predetermined конфигурации, в) при полном управлении конфигурацией кластеров. С использованием приближенной электродинамической модели, состоятельность которой подтверждена расчетами в среде Tigr Grasp, вычислены усредненные и наихудшие значения коэффициента усиления для серии деформаций рефлектора. Показано, что в типичных ситуациях снижение усредненного коэффициента покрытия рабочей зоны может быть сведено к значениям в пределах 0,1дБ ÷ 0,2дБ вместо 1,6дБ без адаптации. Основные результаты работы докладывались на XIII Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь».

Ключевые слова: многолучевая гибридная зеркальная антенна, искажение профиля рефлектора, кластер, весовые коэффициенты, фокальное пятно, ориентация луча.

Abstract. In order to ensure the required level of energy potential of a satellite communication system, it is important that the orientation of the beams of a large hybrid reflector antenna is stable, despite the fact that the reflector profile is subject to distortion due to thermal effects in particular. The paper discusses three approaches to achieving this goal by adaptively adjusting the weight coefficients of the clusters that form the beams: a) for fixed hexagonal clusters, b) for reasonably shifting clusters of hexagonal configuration, c) with full control over the position and configuration of the clusters. Using an approximate electrostatics' model, the validity of which is confirmed by calculations in the Tiera Grasp software, the average and worst values of the gain for a series of reflector distortions are calculated and investigated. The results obtained confirm that the initial (in the absence of adaptation) dispersion of the beam gain in the working area by 3.1 dB is reduced to the following values depending on the type of adaptation: 1) 1.1dB when controlling only weighting coefficients of clusters; 2) 0.2dB when moving the hexagonal cluster following the maximum of the focal spot in addition to adaptation of the weighting coefficients; 3) 0.1dB when changing the configuration of clusters in accordance with the relief of focal spots and adjusting the weighting coefficients; by the way, this increases the beams gain by 0.6dB due to enlargement of the cluster areas.

Key words: multi-beam hybrid parabolic antenna, reflector profile distortion, cluster, weight coefficients, focal spot, beam orientation.

Введение

Многолучевые гибридные зеркальные антенны (МГЗА) широко применяются в спутниковых системах связи (рис. 1). МГЗА формируют большое число узких лучей в доли углового градуса, покрывающих зону обслуживания в пределах контура соответствующей территории и тем самым обеспечивают высокую энергетическую эффективность системы. К антенне, находящейся в составе космического аппарата на геостационарной орбите, предъявляются жесткие требования к ориентации диаграмм направленности (ДН) лучей. Поддержание ориентации лучей в условиях, когда профиль

рефлектора испытывает деформации, вызываемые, главным образом, температурным воздействием от Солнца, и механическими воздействиями на этапе выведения, составляет актуальную и технически сложную проблему.

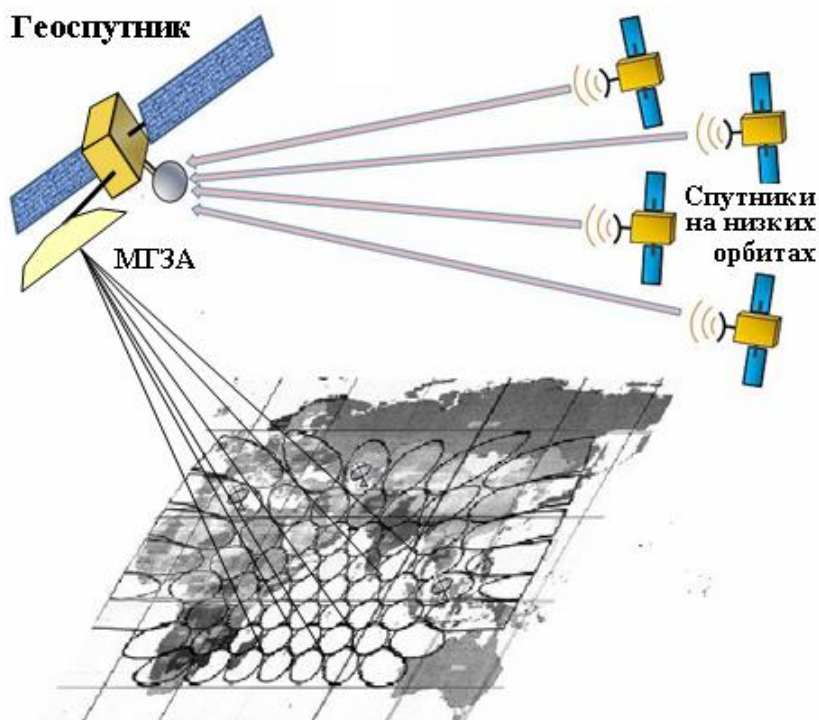


Рис. 1. Структура системы связи через геостационарный спутник.

Первые МГЗА строилась на базе параболического рефлектора, облучаемого антенной решеткой (АР), каждый отдельный элемент которой формировал соответствующий луч. В таком варианте единственным способом поддержания характеристик МГЗА при эксплуатационных нагрузках являлось механическое воздействие на рефлектор для поддержания стабильности его профиля и относительного положения АР. Это обеспечивалось совершенствованием опорной конструкции антенны [1-5], снижением теплового расширения используемых материалов, а в случае двухзеркальной антенны, появлялись дополнительные возможности, связанные с компенсирующими воздействиями на контррефлектор или адаптивным управлением его формой [6, 7].

В современных спутниковых МГЗА лучи формируются группами облучателей, называемыми кластерами. Тем самым открываются возможности

путем регулирования амплитудно-фазового распределения на элементах кластеров осуществлять так называемую дофокусировку МГЗА в интересах стабилизации её параметры. Суть этого процесса состоит в адаптации вектора весовых коэффициентов (ВВК) каждого кластера к текущему состоянию рефлектора [8 – 16]. Электронная система дофокусировки едва ли исключает необходимость конструктивных решений, снижающих чувствительность профиля рефлектора к воздействию эксплуатационных нагрузок. Но при этом, как минимум, требования к стабильности профиля существенно ослабляются.

Моделирование крупногабаритной МГЗА

На рис. 2 показаны геометрия МГЗА и используемые системы координат. При типичных габаритах МГЗА лучи формируются рефлектором офсетной геометрии с фокусным расстоянием $F = 7,4\text{м}$, диаметром¹ $D = 12\text{м}$ и клиренсом (зазором между нижним краем рефлектора и оптической осью) $H = 3\text{м}$.

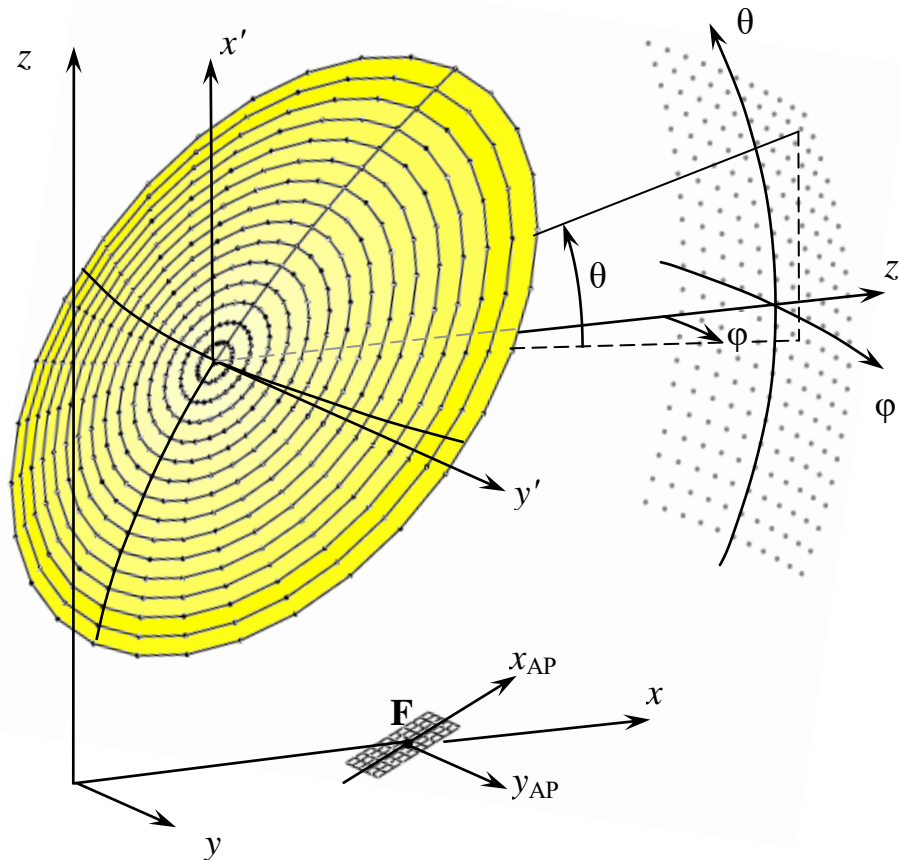


Рис. 2. Геометрия МГЗА.

¹ В настоящее время для систем спутниковой связи разрабатываются МГЗА диаметром 36м.

Несущая частота близка к 2ГГц. Антенное полотно имеет габариты 2м на 1м и в номинальном варианте образовано облучателями, расположенными в узлах сетки сотовой структуры со стороны шестиугольников $da = 100\text{мм}$.

Число излучателей антенной решетки $N = 231$, их индивидуальные ДН в пределах телесного угла, занимаемого рефлектором, соответствует функции $\cos^{1/2}\psi$, где ψ – угол, отсчитываемый от нормали к антенному полотну. Центр полотна, естественно, совмещен с фокусом рефлектора F , а его плоскость отклонена от оптической оси рефлектора на угол $\beta_0 = 62^\circ$.

Поверхность зеркала записывается в глобальной системе координат $\{x, y, z\}$; антенное полотно – в локальной системе координат $\{\xi, \eta\}$ с центром в фокусе F . Для области наблюдения ДН $F(\theta, \varphi)$ используется система координат $\{x', y', z'\}$, оси которой ориентированы относительно зеркала, как показано на рис. 2. Плоскость $y'Oz'$ является плоскостью азимутального угла φ , а угол θ отсчитывается не от полярной оси Oz' , как обычно, а от плоскости $y'Oz'$ и является углом места. В пределах рабочей области ($|\theta| \leq \pm 3.6^\circ$, $|\varphi| \leq \pm 1.8^\circ$) угловые координаты (θ, φ) образуют почти прямоугольную координатную сетку, что удобно при анализе и графическом представлении результатов.

Вариант реальной конструкции иллюстрируется фотографией на рис. 3.



Рис. 3. Рефлектор зонтичной конструкции (<https://www.iss-reshetnev.ru>).

Для исследования потенциально достижимых характеристик процесса дофокусировки необходимы многовариантные расчеты характеристик МГЗА для серии лучей и серии искажений профиля рефлектора. Использование сред достаточно строгого электродинамического моделирования, таких как CST и HFSS, например, для расчета крупных зеркал сопряжено со слишком большими временными затратами. С учетом того, что интересующие нас характеристики МГЗА связаны с анализом ДН лучей в узких пределах у оптической оси зеркала и с расчетами фокальных пятен на малых площадках (порядка $1.5\lambda \times 1.5\lambda$) кластеров, нами в среде Delphi7 была разработана программа, реализующая высокопроизводительный алгоритм приближенного электродинамического моделирования [16]. На рис. 4 представлен многозакладочный интерфейс этой программы, позволяющий судить о широких ее возможностях и составе варьируемых исходных данных.

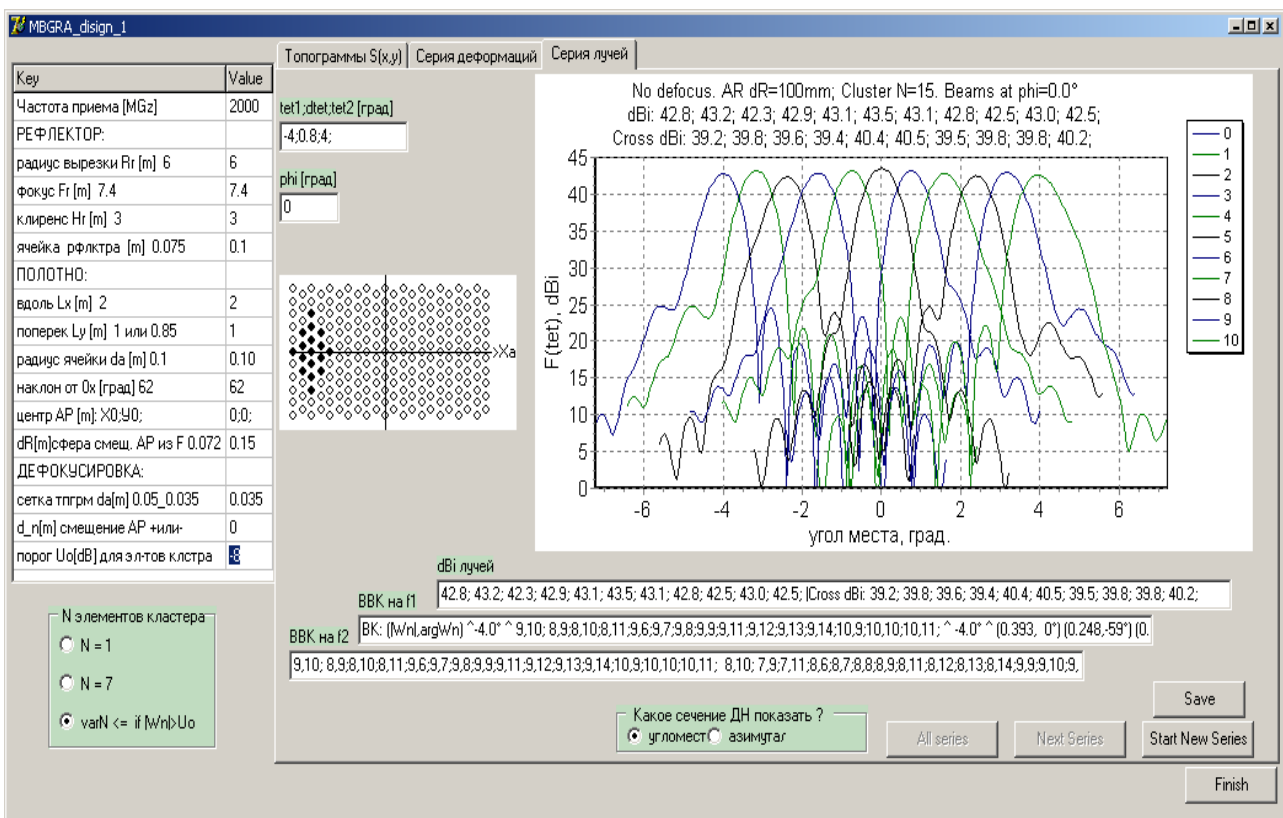


Рис. 4. Программа моделирования МГЗА крупных габаритов.

Суть алгоритма в «акустическом» приближении, отражаемом формулой

$$F(\theta, \varphi) = \sum_p \exp(k\Delta r_p(\theta, \varphi)) \sum_n W_n f_0(\psi_{n,p}) \exp(k\rho_{n,p}) / \rho_{n,p}, \quad (1)$$

где p и n – индексы точек рефлектора и АР соответственно; $\Delta r_p(\theta, \varphi) = \sin\theta(x_p \cos\varphi + y_p \sin\varphi) + z_p \cos\theta$ – разность хода лучей в точку наблюдения (θ, φ) ; $\{W_n\}$ – комплексные амплитуды возбуждения кластера. Расстояние $\rho_{n,p}$ между точкой p рефлектора и точкой n АР, где расположен соответствующий облучатель, с учетом принятых обозначений и длины фокуса F вычисляется как

$$\rho_{n,p} = \sqrt{(\xi_n \sin\beta_0 - x_p)^2 + (\eta_n - y_p)^2 + (F + \xi_n \cos\beta_0 - z_p)^2}. \quad (2)$$

Здесь ξ, η – координатные оси антенного полотна. Индивидуальная амплитудная ДН элементов кластера $f_0(\psi) = \cos^{1/2}\psi$ вычисляется по формуле

$$f_0(\psi_{n,m}) = \sqrt{[(\xi_n \sin\beta_0 - x_m) \cos\beta_0 + (F + \xi_n \cos\beta_0 - z_m) \sin\beta_0] / \rho_{n,m}}, \quad (3)$$

которая вытекает из геометрических соотношений.

Применимость приближения (1) обусловлена двумя факторами, свойственными длиннофокусному зеркалу большого волнового размера: пренебрежимо малым влиянием как краевого эффекта, так и деполяризации поля при отражении от рефлектора. В работе [17] сравнительными расчетами в среде Tіcra Grasp была подтверждена правомерность используемого подхода.

Варианты дофокусировки и их эффективность

Простой в алгоритмическом отношении и надежный способ дофокусировки состоит в когерентном приеме сигналов от наземных маяков [11] и выработке ВВК кластера по этим сигналам, которые несут в себе «отпечаток» текущего состояния рефлектора. Пусть ДН n -го облучателя после отражения от рефлектора есть $f_n(\theta, \varphi)$. Формируемый кластером луч есть взвешенная сумма этих ДН: $F(\theta, \varphi) = \sum_m W_n f_n(\theta, \varphi)$. Имея в виду заинтересованность в максимальном КУ луча в соответствующем направлении (θ_0, φ_0) , естественно определить ВВК $\{W_n\}$ кластера, как результат синтеза δ -функции в требуемом направлении: $\delta(\theta - \theta_0, \varphi - \varphi_0)$. В [18] показано, что сопряженный оператор V дает энергетически оптимальное решение задачи синтеза, которое для δ -функции есть $W_n = f_n^*(\theta_0, \varphi_0)$ и соответствует широко используемому принципу

формирования максимума ДН. При облучении рефлектора с направления m -го луча (θ_m, φ_m) сигнал S_n на n -том элементе АР пропорционален значению соответствующей ДН: $S_n \sim f_n(\theta_m, \varphi_m)$. Фактически, сигналы $\{S_n\}$ кластера пропорциональны значениям поля $E(\xi, \eta)$ на элементах кластера (ξ_n, η_n) при облучении рефлектора с направления (θ_m, φ_m) . Таким образом, компоненты желаемого ВВК пропорциональны комплексно сопряженным амплитудам сигналов $\mathbf{W}_{m \text{ opt}} \sim \{S_n^*(\theta_m, \varphi_m)\}$ от наземного маяка, расположенного в центре зоны m -го луча. Амплитудный рельеф $|E(\xi, \eta)|$ поля, соответствующим направлению облучения (θ_m, φ_m) , имеет ярко выраженный максимум и называется фокальным пятном. На рис. 5 представлена структура фокальных пятен для серии направлений (θ_m, φ_m) . Белые линии образуют координатную сетку антенного полотна с шагом λ .

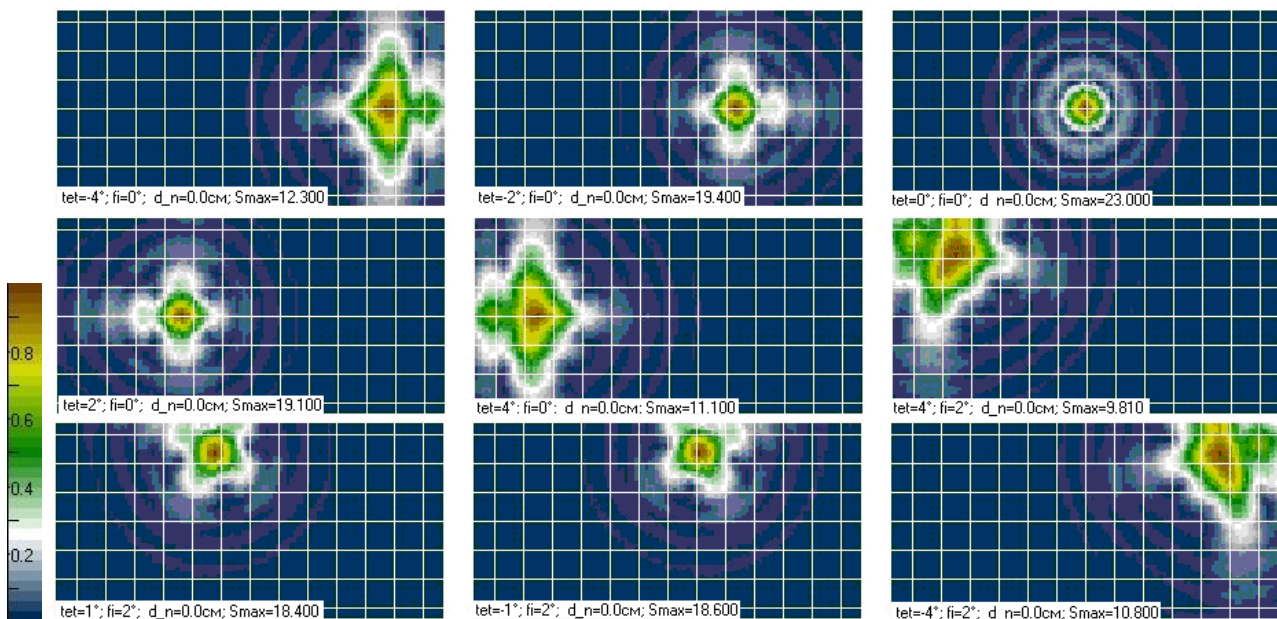


Рис. 5. Рельефы фокальных пятен для пяти направление в середине рабочей зоны ($\varphi_m = 0^\circ$) и четырех направлений на периферии ($\varphi_m = 2^\circ$).

Эксплуатационные искажения поверхности рефлектора спутниковой МГЗА обусловлены, прежде всего, тепловыми воздействиями, имеют малый уровень и соответствуют плавным функциям. Поэтому их можно учесть, вводя эффективную параболическую поверхность, положение фокуса которой случайно в пределах какой-то ограниченной области вокруг номинальной точки

F фокуса рефлектора. В данной работе было принято, что область перемещения фокуса есть сфера радиуса $\delta R = 72\text{мм}$. При оценке влияния деформаций рефлектора на характеристики МГЗА рассчитывались лучи для серии направлений (θ_m, φ_m) как в плоскостях симметрии, так и по периферии рабочей зоны.

Для получения минимаксных оценок снижения КУ луча, ориентированного в заданном направлении (θ_0, φ_0) , моделировались семь ситуаций смещения фокуса по трем осям относительно антенного полотна: $d\xi$, $d\eta$ и нормали dn . Жирные кривые на ниже приведенных графиках соответствуют номинальному состоянию рефлектора ($d\xi=0, d\eta=0, dn=0$), тонкие – смещениям фокуса на $\pm\delta R$ по каждой из осей.

Сравнивались характеристики МГЗА без дофокусировки и при трех вариантах ее осуществления:

1) адаптивное регулирование только ВВК $\{W_n = S_n^*(\theta_m, \varphi_m)\}$ гексагональных кластеров из семи элементов ($N = 7$) при их фиксированном расположении;

2) адаптивное регулирование ВВК гексагонального семиэлементного ($N = 7$) кластера, в качестве центральный элемента которого принимается тот элемент антенного полотна, на выходе которого наблюдается максимальный сигнал, и, как прежде, устанавливается ВВК $\{W_n = S_n^*(\theta_m, \varphi_m)\}$, т.е. положение кластера подстраивается под текущее состояние рефлектора;

3) в состав кластера включаются те элементы, сигналы которых превышают некий уровень (-13дБ , например) по отношению к максимальному сигналу и ВВК сформированного кластера устанавливается $\{W_n = S_n^*(\theta_m, \varphi_m)\}$, т.е. регулируется не только положение, но и состав/конфигурация кластера.

В качестве примера на рис. 6 приведены ДН в угломестной плоскости при формировании луча $(\theta_0 = 1,8^\circ, \varphi_0 = 0^\circ)$ в условиях упомянутых выше смещениях фокуса деформированного рефлектора при отсутствии (а) и при трех вариантах дофокусировки: регулирование только ВВК (б), регулирование ВВК при смещении (в) и адаптации состава кластеров (г).

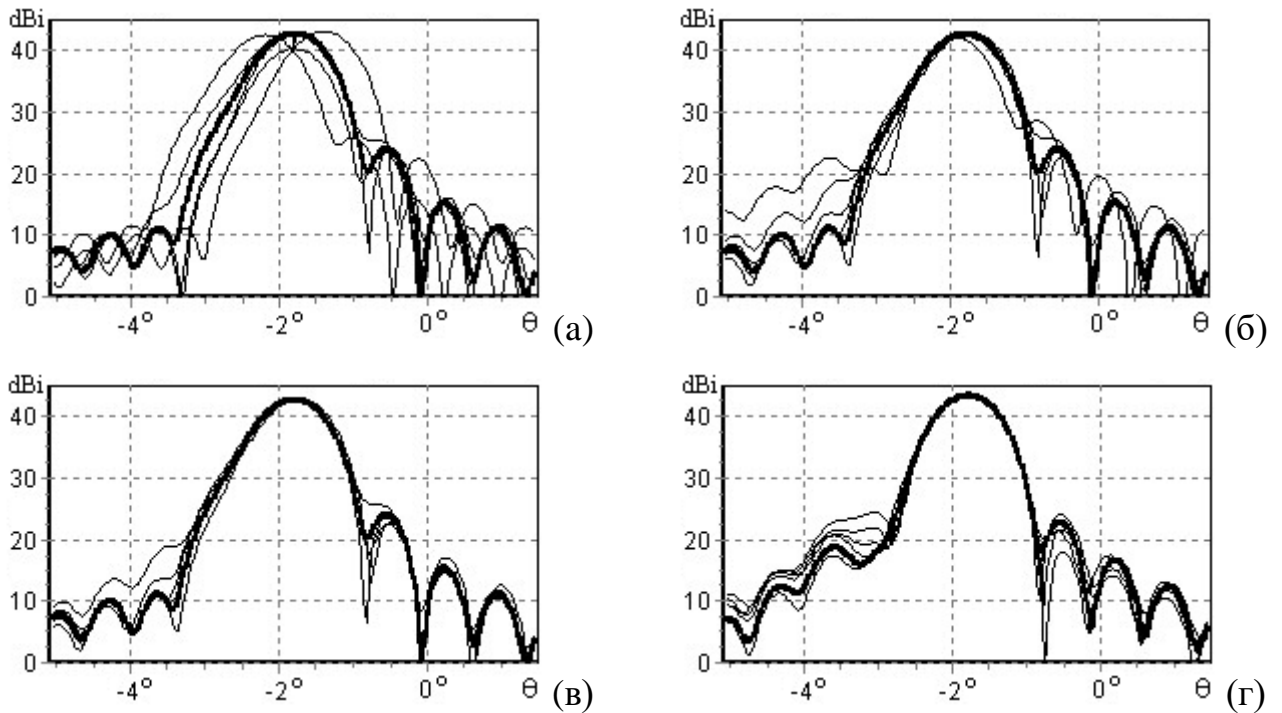


Рис. 6. ДН луча ($\theta_0 = -1,8^\circ$, $\varphi_0 = 0^\circ$): жирная линия – при номинальном состоянии рефлектора; тонкие линии – при пяти смещениях фокуса в пределах $\delta R = 72$ мм.

Как следует из приведенных на рис. 6 данных, регулирование ВВК кластера в значительной мере стабилизирует формируемую ДН. Эффективность дофокусировки заметно улучшается при дополнительном управлении положением кластера, которое сводится к перемещению кластера вслед за максимумом фокальным пятном. На рис. 7 показано антенное полотно (231 элемент) сотовой структуры. Зачерненные элементы на рис. 7(а) соответствуют фиксированному семиэлементному гексагональному кластеру, формирующему луч ($\theta_0 = -1,8^\circ$, $\varphi_0 = 0^\circ$). На рис. 7(б) выделены те элементы АР, которые задействованы при смещениях гексагонального кластера, благодаря чему достигаются результаты, представленные на рис. 6(в). На рис. 7(в) выделены те элементы АР, которые задействованы при оптимизации конфигурации кластера. При этом число элементов кластера зависит от конкретной ситуации. Благодаря этому достигаются результаты, представленные на рис. 6(г).

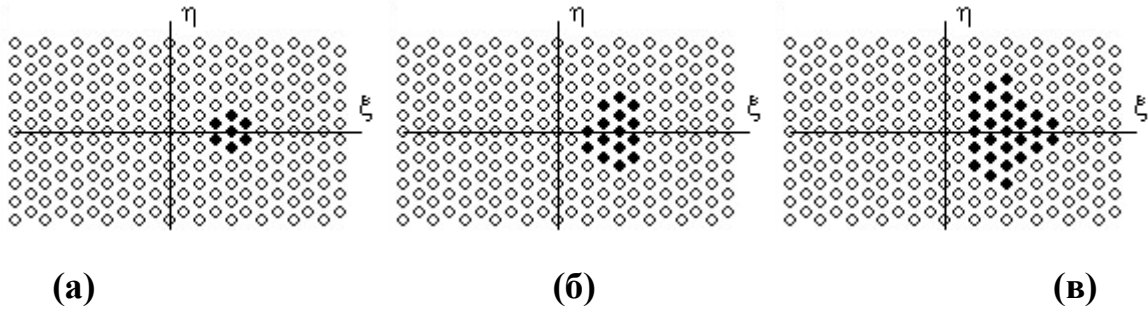


Рис. 7. Антенное полотно при формировании луча ($\theta_0 = -1,8^\circ$, $\varphi_0 = 0^\circ$): номинальный кластер (а); область кластеров, формирующих луч с адаптацией их положения (б) и адаптацией их состава (г).

Деформации рефлектора, проявляющиеся в смещении его фокуса относительно полотна АР, в первую очередь вызывают смещение луча, тем большее, чем дальше отклоняется фокус от его номинального положения. Естественно, нормальные к полотну смещения приводят к расширению луча и слабее проявляются в снижении КУ антенны в номинальном направлении. В таблице приведены значения, усредненные по семи ситуациям: номинальное состояние рефлектора (фокус в точке **F**) и предельным (на $\pm 72\text{мм}$) смещениям фокуса по трем осям относительно антенного полотна: $d\xi$, $d\eta$ и нормали dn .

Таблица. Сравнительные характеристики вариантов дофокусировки.

Варианты дофокусировки	Центральный луч: КУ, dBi	Среднее КУ в рабочей зоне, dBi	Минимальное КУ в рабочей зоне, dBi
Номинальный ВВК	42,9	41,3	39,8
Регулирование только ВВК	42,9	42,5	41,8
Смещение кластер и ВВК	42,9	42,8	42,7
Состав кластера и ВВК	43,5	43,5	43,4

Так, при сохранении номинального ВВК снижение усредненного значения КУ в центре зоны обслуживания луча доходит до 1,6 dB при смещениях точки фокуса в пределах сферы радиуса $\delta R = 72\text{мм}$. Под средним значением КУ понимается результат усреднения значений КУ в дБ по семи

выше упомянутым смещениям фокуса $\{d\xi, d\eta, dn\}$. Дофокусировка луча за счет адаптации ВВК к текущему состоянию рефлектора приводит к заметному улучшению КУ луча. При этом усредненное значение КУ снижается на 0,4 дБ. В случае же адаптации и положения кластера, и ВВК усредненное значение КУ уменьшается всего на 0,1 дБ. Адаптация конфигурации кластера не только стабилизирует, но и повышает значение КУ. Это проявляется особенно ярко на периферии рабочей зоны.

Заключение

Моделирование процессов дофокусировки МГЗА подтверждает, что предел снижения КУ лучей в рабочей зоны, составляющий 3.1дБ в отсутствие адаптации, сокращается в зависимости от варианта адаптации до следующих значений:

- 1.1дБ при регулировании только ВВК кластеров;
- 0.2дБ при перемещении центра гексагонального кластера вслед за максимумом фокального пятна в дополнение к адаптации ВВК.
- 0.1дБ при изменении конфигурации кластеров в соответствии с рельефам фокальных пятен; причем КУ лучей увеличивается на 0.6дБ за счет увеличения площади кластеров.

Литература

1. Гряник М.В., Ломан В.И. Развертываемые зеркальные антенны зонтичного типа. М.: Радио и связь. 1987. 72 с.
2. Adelman H.M., Padula S.L. “Integrated thermal structural electromagnetic design optimization of large space antenna reflectors” // NASA-TM-87713. NASA Langley Research Center. Hampton. VA. USA. June 1986.
URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19860019512.pdf>
3. 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.

4. Шендалев Д.О. Проектирование формообразующей структуры зонтичного рефлектора // Вестник СибГАУ. 2013. № 6(52). С. 164–173.
5. Голдобин Н.Н. Методика оценки формы радиоотражающей поверхности крупногабаритного трансформируемого рефлектора космического аппарата // Вестник СибГАУ. 2013. № 1(47). С. 106–111.
6. Shenheng X., Rahmat-Samii Y., William A. Non iterative subreflector shaping for reflector antenna distortion compensation // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2009. Vol. 57. No. 2. P. 364–372.
7. Gonzalez-Valdes B., Martínez-Lorenzo J.A., Rappaport C., Pino A.G. “A new physical optics based approach to subreflector shaping for reflector antenna distortion compensation” // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2013. Vol. 61. No. 1. pp. 467–472.
8. Acosta R.J. Compensation of Reflector Surface Distortions Using Conjugate Field Matching // International IEEE A/P-S Symposium and National Radio Science Meeting. Philadelphia. Pennsylvania. June 1986. P. 1 – 6.
URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19860006991.pdf>.
9. Roberto J., Zaman A. Adaptive feed array compensation system for reflector antenna surface distortion // NASA-TM-101458. 1989. IEEE AP-S International Symposium and URSI Radio Science Meeting. San Jose. California. June 26–30. 1989. P. 1 –7.
10. 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. P. 966 – 978.
11. 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.
12. Smith W.T., Stutzman W.L. A pattern synthesis technique for array feeds to improve radiation performance of large distorted reflector antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1992. Vol. 40. No. 1. P. 57–62.

13. 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.
14. Патент RU 2578289, H01Q 25/00. Способ формирования кластерных зон облучающей решеткой многолучевой гибридной зеркальной антенны / Ласкин Б.Н., Сомов А.М.; заявл. 29.12.2014; опубл. 28.03.2016.
15. 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.
16. 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.

Для цитирования:

Мочалов В.В., Романов А.Г., Данилов И.Ю., Чони Ю.И. Адаптивное управление кластерами многолучевой гибридной зеркальной антенны в интересах стабилизации энергетического потенциала спутниковой системы связи. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. № 1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan20/10/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.1.10