

Исследование потенциальных характеристик спутниковой многолучевой гибридно-зеркальной антенны путем моделирования процесса адаптации к случайным деформациям рефлектора

В.В. Мочалов^{1,2}, Ю.И. Чони¹, А.Г. Романов², И.Ю. Данилов²

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ, Карла Маркса 10, Казань, Россия, 420111

²АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнева, Ленина 52, Железногорск, Россия, 662972

Аннотация. Стабилизация положения лучей крупногабаритной гибридной зеркальной антенны (МГЗА), профиль рефлектора которой подвержен искажениям из-за изменяющихся эксплуатационных факторов, в частности, неравномерности теплового нагрева в период эксплуатации на орбите, является сложной технической задачей. Один из вариантов ее решения в интересах поддержания на необходимом уровне энергетики спутниковой системы связи состоит в адаптации амплитудно-фазового распределения кластеров облучающей решетки к случайным деформациям рефлектора. Путем статистического моделирования оценены потенциально достижимые характеристики системы. Моделируются три варианта адаптивного регулирования весовых коэффициентов кластеров, формирующих лучи: а) при фиксированных кластерах, б) при адаптации весовых коэффициентов, в) при адаптации весовых коэффициентов и положения кластеров, г) при адаптации весовых коэффициентов и конфигурации кластеров. Для осуществления многовариантных расчетов используется предложенная нами упрощенная электродинамическая модель крупногабаритной МГЗА, состоятельность которой подтверждена сопоставлением с расчетами в среде *Ticra Grasp*. При малых временных затратах рассчитываются не только диаграммы направленности лучей, но и фокальные пятна на полотне антенной решетки, которые позволяют определять рациональный состав элементов кластеров и вектор их весовых коэффициентов. Вычислены усредненные и наихудшие значения коэффициента усиления в пределах обслуживаемой зоны для серии деформаций рефлектора. Показано, что в типичных условиях снижение усредненного коэффициента покрытия рабочей зоны может быть сведено к 0,1...0,2дБ вместо значения 1,6дБ без адаптации.

1. Введение

В состав современных спутниковых систем связи входит крупногабаритная многолучевая гибридная зеркальная антенна (МГЗА), обеспечивающая высокий энергетический потенциал. Такие антенны формируют большое число лучей шириной в доли углового градуса и покрывают зону обслуживания в пределах требуемого контура на земной поверхности. В процессе эксплуатации на орбите профиль рефлектора МГЗА подвержен деформациям, в основном из-за температурного воздействия Солнца. Даже при малом уровне деформаций это

приводит к смещению лучей, снижению коэффициента усиления и ухудшению электромагнитной совместимости [1-17]. Единственным вариантом стабилизации лучей МГЗА, выполненной по схеме «один облучатель – один луч», служила механическая система компенсации текущих деформаций. В современных МГЗА лучи формируются группами облучателей, называемых кластерами, и становится возможным путем адаптивного регулирования амплитудно-фазового распределения на элементах кластеров осуществлять дофокусировку МГЗА для стабилизации её параметров. Суть дофокусировки состоит в адаптации вектора весовых коэффициентов (ВВК) каждого кластера к текущим деформациям рефлектора [3,4,11,14,18 – 22]. При моделировании адаптации МГЗА к случайным деформациям рефлектора полагалось, что деформации приводят к смещению эквивалентной точки фокуса рефлектора в пределах сферы радиуса 72 мм относительно номинального его положения.

2. Моделирование МГЗА

Исследование потенциальных характеристик МГЗА требует вычислений большого объема ввиду следующих причин: размер рефлектора составляет порядка сотни длин волн; для статистической оценки ухудшения параметров МГЗА из-за эксплуатационных деформаций рефлектора необходима серия расчетов; поскольку каждый луч формируется кластерами, то оптимизация состава кластеров требует вариативных расчетов. Применение универсальных средств электродинамического моделирования антенн, таких как CST Microwave, FEKO, HFSS, AWR и т.п., обеспечивает учет краевых эффектов и взаимодействия элементов АР, однако расчет каждого луча длится около часа, что накладывает существенные ограничения на число анализируемых вариантов. В этих условиях естественен интерес к быстрому моделированию характеристик крупногабаритных МГЗА. Ввиду того, что, во-первых, МГЗА строятся по длиннофокусной схеме с вынесенной антенной решеткой (АР), что устраняет эффект затенения и снижает степень деполяризации отраженного поля; во-вторых, нормаль АР ориентируют на центр рефлектора, поэтому векторы облучающего поля практически касательны к поверхности рефлектора; в-третьих, диаграмму направленности (ДН) достаточно рассчитывать в пределах небольшого телесного угла, ограниченного, преимущественно главным лепестком и первыми боковыми, поэтому можно вычислять ДН в «акустическом» приближении, сокращающем длительность вычислений на два порядка:

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

где p и n – индексы точек рефлектора и АР соответственно; $\{W_n\}$ – комплексные амплитуды возбуждения кластера, $\Delta r_p(\theta, \varphi) = \sin\theta(x_p \cos\varphi + y_p \sin\varphi) + z_p \cos\varphi$ – разность хода лучей в точку наблюдения (θ, φ) ; ξ, η, β_0 – оси и угол наклона антенного полотна к оптической оси Oz рефлектора;

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

Индивидуальная ДН облучателей $f_0(\psi)$ принималась как $\cos^{1/2}$ угла ψ между нормалью к полотну и радиусом-вектором в точку рефлектора, то есть

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

На рисунке 1 показаны геометрия офсетной МГЗА с рефлектором с фокусным расстоянием $F = 7,4$ м, диаметром $D = 12$ м и клиренсом $H = 3$ м и используемые системы координат. Несущая частота около 2 ГГц. Антенное полотно имеет габариты 2 м на 1 м и в номинальном варианте образовано облучателями, расположенными в узлах сетки сотовой структуры со стороной шестиугольников $da = 100$ мм. Число излучателей $N = 231$, 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 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 системе координат $\{\xi, \eta\}$ с центром в фокусе F . Для области наблюдения ДН $F(\theta, \varphi)$

используется локальная система координат $\{x', y', z'\}$, оси которой ориентированы относительно зеркала таким образом, что плоскость $x'Oy'$ является плоскостью азимутального угла φ , а угол θ отсчитывается не от полярной оси Oz' , как обычно, а от плоскости $x'Oy'$, являясь углом места.

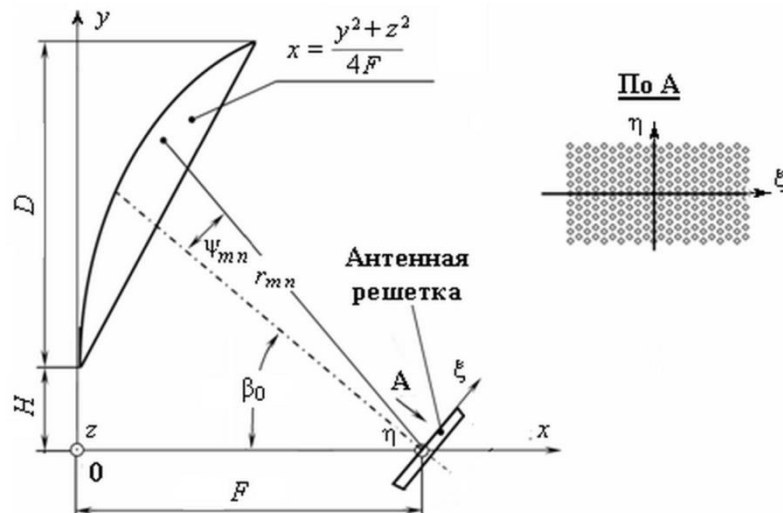


Рисунок 1. Геометрия МГЗА.

Для исследования потенциальных характеристик МГЗА и выбора ее конфигурации была разработана программа в среде Delphi7, реализующая описанный выше подход. Для аттестации разработанной программы моделирования МГЗА были проведены и сопоставлены расчеты в программах CST Microwave Studio [4] и Ticsra Grasp [23]. Расчеты подтвердили высокую точность моделирования крупногабаритной МГЗА в рамках принятой модели (1) – (3).

3. Результаты моделирования характеристик МГЗА, обусловленных деформациями рефлектора

При эксплуатации на орбите к деформациям рефлектора, в основном, приводят температурные воздействия, которые являются плавными и имеют малый уровень. Поэтому проявление деформаций можно учесть введением эффективной параболической поверхности, положение фокуса которой случайно меняется в пределах какой-то ограниченной области вокруг номинального положения фокуса параболоида. В данном случае величина смещения положения фокуса параболоида была принята в пределах сферы радиуса $\delta R = 72\text{мм}$ относительно номинального положения фокуса.

Для того, чтобы выяснить степень влияния деформаций рефлектора на характеристики МГЗА на коэффициент усиления (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 графиках соответствуют номинальному состоянию рефлектора ($d\xi=0$, $d\eta=0$, $dn=0$), тонкие – смещениям фокуса на $\pm\delta R$ по каждой из осей. Моделировались и сравнивались характеристики МГЗА без дофокусировки и при трех вариантах ее осуществления:

- адаптивное регулирование только ВБК $\{W_n = S_n^*(\theta_m, \varphi_m)\}$ гексагональных кластеров из семи элементов ($N = 7$) при их фиксированном расположении;
- за центральный элемент гексагонального семиэлементного ($N = 7$) кластера принимается тот элемент, на выходе которого наблюдается максимальный сигнал, т.е. где при текущем состоянии рефлектора имеет место максимум фокального пятна, и устанавливается ВБК $\{W_n = S_n^*(\theta_m, \varphi_m)\}$;
- в состав кластера включаются те элементы, сигналы которых превышают некий уровень (-13дБ , например) по отношению к максимальному сигналу и для сформированного кластера устанавливается ВБК $\{W_n = S_n^*(\theta_m, \varphi_m)\}$.

В качестве примера на рисунке 2 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).

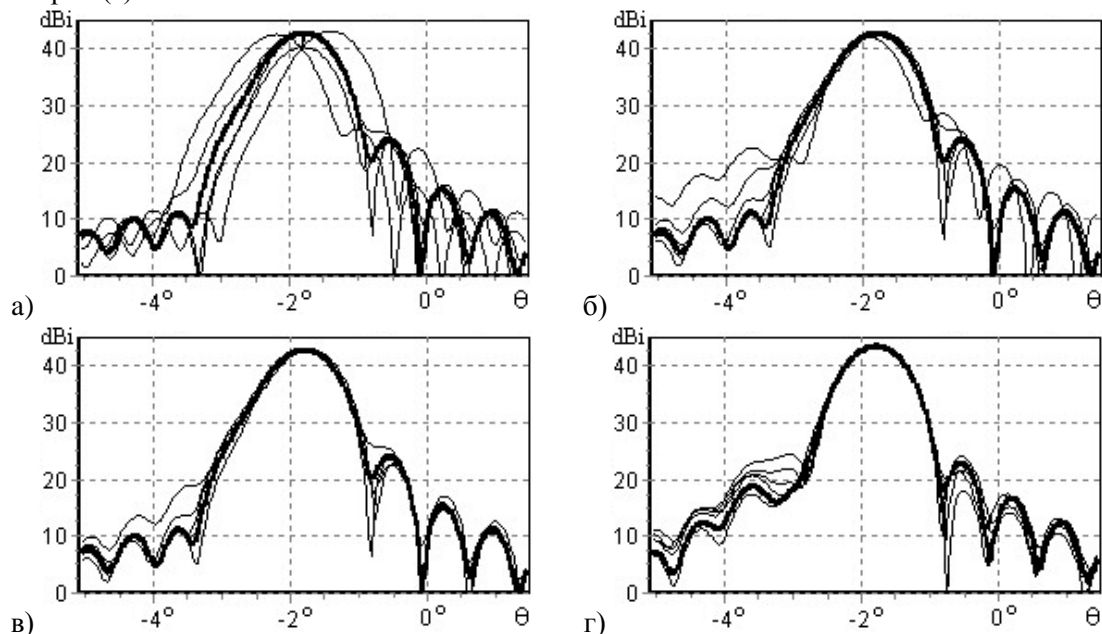


Рисунок 2. ДН луча ($\theta_0 = -1,8^\circ, \varphi_0 = 0^\circ$) при смещениях фокуса в пределах $\delta R = 72$ мм.

Как следует из приведенных данных на рисунке 2, адаптация ВВК кластера к деформированному состоянию рефлектора в значительной мере стабилизирует формируемую ДН. Эффективность дофокусировки заметно улучшается при дополнительном управлении положением кластера, которое сводится к перемещению кластера вслед за максимумом фокального пятна. На рисунке 3 показано антенное полотно (231 элемент). Зачерненные элементы на рисунке 3(а) соответствуют фиксированному семиэлементному гексагональному кластеру, формирующему луч ($\theta_0 = -1,8^\circ, \varphi_0 = 0^\circ$). На рисунке 3(б) выделены те элементы АР, которые задействованы при смещениях гексагонального кластера, благодаря чему достигаются результаты, представленные на рисунке 2(в). На рисунке 3(в) выделены задействованные при оптимизации конфигурации кластера элементы АР. При этом в конкретной ситуации кластер образуется теми элементами, сигналы которых превышают установленный уровень. Благодаря этому достигаются результаты, представленные на рисунке 2 (г).

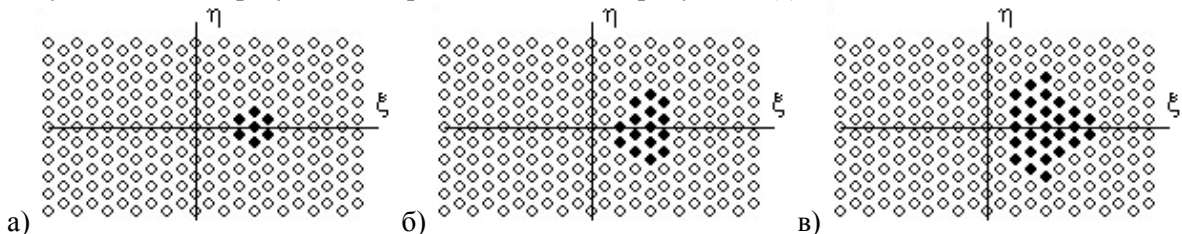


Рисунок 3. Антенное полотно при формировании луча ($\theta_0 = -1,8^\circ, \varphi_0 = 0^\circ$): номинальный кластер (а); область кластеров, формирующих луч с адаптацией их положения (б) и адаптацией их состава (г).

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.

Таблица 1. Сравнительные характеристики моделирования.

Варианты адаптации	Номинальный КУ, dBi	Усредненный КУ, dBi	Минимальный КУ, dBi
Номинальный ВВК	42,9	41,3	39,8
Адаптация только ВВК	42,9	42,5	41,8
Смещение кластера и ВВК	42,9	42,8	42,7
Состав кластера и ВВК	43,5	43,5	43,4

При сохранении номинального ВВК снижение усредненного значения КУ луча составляет 1,6 дБ при смещениях точки фокуса в пределах сферы радиуса $\delta R = 72$ 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 улучшению КУ луча. При этом усредненное значение КУ снижается на 0,4 дБ, а в случае одновременной адаптации ВВК и положения кластера 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.

4. Заключение

Результаты моделирования процессов адаптации МГЗА к деформациям рефлектора показывают следующее.

1. Адаптация весовых коэффициентов кластеров обеспечивает улучшение КУ антенны. Эффективность адаптации возрастает при совмещении центра гексагонального семиэлементного кластера вслед за максимумом фокального пятна в дополнение к адаптации ВВК.

2. Дополнительный эффект можно получить при нефиксированной структуре кластеров путем увеличения числа его элементов и адаптации конфигурации под рельеф соответствующего фокального пятна.

Так, при деформациях рефлектора, соизмеримых с половиной длины волны ($\delta R = 72$ мм), адаптивное регулирование состава кластеров служит эффективным средством поддержания энергетики МГЗА на должном уровне.

5. Литература

- [1] Choni, Yu.I. On the efficiency of defocusing a large satellite multi-beam hybrid parabolic antenna / Yu.I. Choni, A.G. Romanov, I.Yu. Danilov, V.V. Mochalov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 450(2). DOI: 10.1088/1757-899X/450/2/022020.
- [2] Романов, А.Г. Способствует ли дофокусировка многолучевой гибридно-зеркальной антенны сокращению числа облучателей? / А.Г. Романов, Н.А. Тестоедов, В.В. Мочалов, И.Ю. Данилов, Ю.И. Чони // Научные технологии. – 2018. – № 12. – С. 11-15. DOI 10.18127/j19998465-201812-03.
- [3] Пономарев, Л.И. Бортовые цифровые многолучевые антенные решетки для систем спутниковой связи / Л.И. Пономарев, В.А. Вечтомов, А.С. Милосердов – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. – 197 с.
- [4] Чони, Ю.И. Дофокусировка многолучевой гибридно-зеркальной антенны в условиях эксплуатационных нагрузок / Ю.И. Чони, А.Г. Романов, И.Ю. Данилов, В.В. Мочалов // Научные технологии. – 2017. – № 12. – С. 85-90.
- [5] Huber, S. A reflector antenna concept robust against feed failures for satellite communications / S. Huber, M. Younis, G. Krieger, A. Moreira, W. Wiesbeck // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2015. – Vol. 63(4). – P. 1218-1224.
- [6] Lian, P. Feed adjustment method of reflector antenna based on far field / P. Lian, W. Wang, N. Hu // IET Microwaves, Antennas & Propagation. – 2014. – Vol. 8(10). – P. 701-708.

- [7] Borja, G. A new physical optics based approach to subreflector shaping for reflector antenna distortion compensation / G. Borja, A. Jose, R. Carey, G. Antonio // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2013. – Vol. 61(1).
- [8] Голдобин, Н.Н. Методика оценки формы поверхности крупногабаритного трансформируемого рефлектора космического аппарата // Вестник Сибирского гос. аэрокосмич. ун-та им. академика М.Ф. Решетнева. – 2013. – № 1(47). – С. 106-111.
- [9] Amend, C. A Novel Approach for a Low-Cost Deployable Antenna / C. Amend, M. Nurnberger, P. Oppenheimer, S. Koss, B. Purdy // Proceedings of the 40th Aerospace Mechanisms Symposium, NASA Kennedy Space Center. NASA/CP-2010 -216272, 2010. – P. 1-42.
- [10] Choni, Yu.I. Adjoint operator method and its aspects in regard to antenna synthesis // IX International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT) – Odessa, Ukraine, 2013. – P. 86-91. DOI: org/10.1109/ICATT.2013.6650690.
- [11] 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, 1986.
- [12] Churette, A.R. Compensation of reflector antenna surface distortion using an array feed / A.R. Churette, R.J. Acosta, P.T. Lam, S.W. Lee // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1989. – Vol. 37(8). – P. 966-978.
- [13] Волгаткин, К.М. Патент RU 2524839 Бортовая гибридная зеркальная антенна / К.М. Волгаткин, А.М.Сомов // МПК H01Q5/00 Оpubл. 10.08.2014, Бюл. № 22.
- [14] Ласкин, Б.Н. Патент RU 578 289 Способ формирования кластерных зон облучающей решеткой многолучевой гибридной зеркальной антенны / Б.Н. Ласкин, А.М.Сомов // МПК H01Q 25/00. Оpubл. 28.03.2016, Бюл. № 9.
- [15] Верба, В.С. Патент RU 2392703 Сканирующая гибридная зеркальная антенна / В.С. Верба, М. А. Егоров, Л.Б. Неронский, И.Г. Осипов // МПК H01Q1/00 . Оpubл. 20.06.2010.
- [16] Gillard, C.W. Patent US 5,200,758 System for controlling the radiation pattern of an antenna // H01Q I/120; H01Q 1/220; H01Q 3/300. Date of Patent: Apr. 6, 1993.
- [17] Saitto, A. Patent US 4,586,051 Reflector distortion compensation system for multiple-beam wave satellite antennas / A. Saitto, G. Mica // H01Q 19/10. Date of Patent: Apr. 29, 1986.
- [18] Roberto, J. Adaptive feed array compensation system for reflector antenna surface distortion / J. Roberto, A. Zaman // NASA-TM-101458. IEEE AP-S International Symposium and URSI Radio Science Meeting – San Jose, California, 1989.
- [19] Alan, R. Compensation of reflector antenna surface distortion using an array feed / R. Alan, J. Roberto, T. Peter, Sh.-W. Lee // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1989. – Vol. 37(8).
- [20] Saitto, A. US 4,586,051 Reflector distortion compensation system for multiple-beam wave satellite antennas / A. Saitto, G.Mica // H01Q 19/10 Assignee: Agence Spatiale Europeenne, Paris. Publ. Apr. 29, 1986.
- [21] Smith, W.T. A pattern synthesis technique for array feeds to improve radiation performance of large distorted reflector antennas / W.T. Smith, W.L. Stutzman // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1992. – Vol. 40(1). – P. 57-62.
- [22] Чони, Ю.И. Возбуждение кластера облучателей гибридной зеркальной антенны в условиях деформации рефлектора / Ю.И. Чони, А.А. Шумина // Всероссийская научно-практическая конференция АКТО. – 2016. – Т. 2. – С. 753-759.
- [23] Мочалов, В.В. Аттестация алгоритма акустического приближения // Успехи современной радиоэлектроники. – 2019. – Т. 73, № 12. – С. 122-126.

Investigation of the potential characteristics of a satellite multi-beam hybrid-mirror antenna by modeling the process of adaptation to random deformations of the reflector

V.V. Mochalov^{1,2}, Yu.I. Choni¹, A.G. Romanov², I.Yu. Danilov²

¹Kazan National Research Technical University-KAI, K. Marksa street 10, Kazan, Russia, 420011

²JSC Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems, Lenina street 52, Zheleznogorsk, Russia, 662972

Abstract. The stabilization of the beams of large-sized multi-beam hybrid mirror antenna (MBHMA), the reflector profile of which is subject to distortion due to changing operational factors, is a complex technical task. One of the solutions to maintain the energy of the satellite communications system is to adapt the amplitude-phase distribution of the clusters of the irradiating array to random deformations of the reflector. By statistical modeling, the potentially achievable characteristics of the system are evaluated. Three variants of adaptation of cluster excitation were modeled: a) for fixed clusters, b) for adaptation of excitation, c) for adaptation of weights and position of clusters, d) for adaptation of weights and cluster configurations. For multivariate calculations, we use the simplified model of MBHMA that we have proposed. Comparison with calculations in Tiera Grasp environment confirmed the correctness of the model. Not only radiation patterns, but also focal spots on the antenna array we calculated to determine the rational composition of cluster elements and the vector of their excitation coefficients. Beams gain within the service area for reflector deformations were the subject of analysis. The studies showed that gain decrease can be reduced to 0.1 ... 0.2 dB instead of 1.6 dB without adaptation.