

УДК 621.396.67

Построение облучателей многодиапазонных зеркальных антенн систем спутниковой связи

Д. Д. Габриэльян¹, В. И. Демченко², А. Е. Коровкин³,
Д. Я. Раздоркин⁴, Ю. А. Гвоздяков⁵, Ю. И. Полтавец⁶

¹д. т. н., профессор, ^{2,5,6}к. т. н.
¹⁻⁴ФГУП «Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи»
^{5,6}АО «Российские космические системы»

e-mail: rniirs@rniirs.ru

Аннотация. Цель настоящей статьи — обоснование подхода к оптимизации параметров облучателей МЗА на основе гофрированного рупора для различных сочетаний совмещаемых диапазонов и их практическая реализация.

Рассмотрены вопросы построения облучающих систем на основе гофрированных рупоров для многодиапазонных приемопередающих зеркальных антенн систем спутниковой связи. Проведенный анализ взаимосвязи показателей эффективности системы спутниковой связи с энергетическими характеристиками радиоканала позволил обосновать показатель эффективности многодиапазонной зеркальной антенны наземного пункта приема информации и облучателей, входящих в ее состав. Показатель эффективности МЗА представлен в виде мультипликативной функции, учитывающей в каждом из совмещаемых диапазонов частот шумовую добротность антенны и два сомножителя, определяющих снижение эффективной шумовой добротности из-за эффектов деполяризации принимаемых сигналов и неточности наведения антенны при автосопровождении КА.

Использование гофрированного рупора в качестве облучателей МЗА, обеспечивающего возбуждение основной H_{11} и высшей моды H_{21} , позволяет создавать облучатели многодиапазонных зеркальных антенн с различными функциональными возможностями, в частности с режимами программного наведения и автосопровождения на основе экстремального и моноимпульсного методов. Рассмотрены особенности построения облучателей для систем связи со спутниками на различных типах орбит.

Ключевые слова: многодиапазонная зеркальная антенна, гофрированный рупор, показатели эффективности многодиапазонной зеркальной антенны

Building of Exciters of Multiband Mirror Antennas for Satellite Communication Systems

D. D. Gabriel'yan¹, V. I. Demchenko², A. E. Korovkin³,
D. Ya. Razdorkin⁴, Yu. A. Gvozdyakov⁵, Yu. I. Poltavets⁶

¹doctor of engineering science, professor, ^{2,5,6} candidate of engineering science
¹⁻⁴Federal state unitary enterprise "Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communications"
^{5,6}Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: rniirs@rniirs.ru

Abstract. The objective of the paper is to justify the approach to optimization of the parameters of the corrugated horn based exciters of multiband mirror antennas for different combinations of the overlapping bands and their realization in practice.

The issues of building the feed systems based on the corrugated horns for multiband transceiving mirror antennas of satellite communication systems are studied. The conducted interrelation analysis of performance indicators of the satellite communication system with energy characteristics of the radio channel enabled one to justify the performance indicator of the multiband mirror antenna of the receiving ground station and its exciters. The performance indicator of the multiband mirror antenna is in the form of a multiplicative function taking account of the antenna noise Q-factor in each of the overlapping bands, and two co-factors determining the decrease in the effective noise Q-factor due to depolarization effects of the received signals and inaccuracy in antenna pointing during autotracking of SC.

Employing a corrugated horn as exciters of multiband mirror antennas exciting the main H_{11} mode and the highest H_{21} mode permits one to create exciters for multiband mirror antennas with different functional capabilities, in particular with the modes of programmable guidance and autotracking based on the extreme and monopulse methods. The considerations of designing the exciters for communication systems with satellites in various types of orbits are studied.

Keywords: multiband mirror antenna, corrugated horn, performance indicators of multiband mirror antenna

Существующие в настоящее время тенденции увеличения объемов передаваемой по спутниковым каналам связи информации обуславливают необходимость использования все более высокочастотных диапазонов в системах спутниковой связи (ССС). Однако и ранее освоенные в системах спутниковой связи диапазоны остаются полностью загруженными. Использование в указанных условиях в наземном сегменте СССР однодиапазонных зеркальных антенн приводит к увеличению количества последних в составе комплексов приема информации и, как следствие, к увеличению стоимости комплексов при вводе и последующей эксплуатации. Наиболее целесообразно в указанных условиях построение многодиапазонных зеркальных антенн (МЗА), обеспечивающих прием в нескольких диапазонах частот сигналов требуемых поляризаций.

Параметры движения космических аппаратов (КА) в составе СССР на геостационарных, высокоэллиптических и низких круговых орбитах известны. В то же время высокая угловая скорость движения КА и возникающие под действием различных факторов отклонения параметров орбиты, в первую очередь для КА на низких круговых орбитах, не позволяют использовать простые методы сопровождения (метод экстремального наведения) для сохранения устойчивости радиолинии, что требует применения в антенных системах режима автосопровождения повышенной точности (моноимпульсного метода). Таким образом, построение МЗА систем спутниковой связи сопряжено с использованием моноимпульсного режима автосопровождения в одном или нескольких диапазонах частот. В таких МЗА облучатель должен обеспечивать формирование суммарной и разностной ДН, позволяющих добиться наибольшего отношения сигнал/шум (ОСШ) на выходе антенны с учетом точности наведения антенны на КА.

Целью настоящей статьи является обоснование подхода к оптимизации параметров облучателей МЗА на основе гофрированного рупора для различных сочетаний совмещаемых диапазонов и их практическая реализация.

В статье решаются следующие задачи:

1. Обоснование критерия эффективности облучателя МЗА СССР.

2. Реализация облучателей МЗА на основе гофрированных рупоров.

3. Выбор оптимальных параметров облучателей МЗА в виде гофрированного рупора при различных сочетаниях совмещаемых диапазонов частот.

Критерий эффективности облучателя МЗА СССР

Рассмотрим зеркальную антенну с диаметром рефлектора D_0 , обеспечивающую прием сигналов заданных поляризаций в J диапазонах частот. Выбор показателя эффективности МЗА напрямую связан с показателем эффективности СССР, в качестве которого для современных СССР с цифровыми сигналами, например с манипуляцией вида M -QAM, M -QPSK, M -APSK (M — число элементов пространства сигналов при цифровой манипуляции), может быть выбрана вероятность битовой ошибки $p_b(Q_{j,i})$, напрямую связанная с отношением сигнал/шум на выходе антенной системы [1].

Для СССР представим показатель эффективности в виде

$$\mathcal{E} = \prod_{j=1}^J \prod_{i=1}^4 p_b(Q_{j,i}), \quad (1)$$

где j — номер частотного диапазона, а i — номер поляризации принимаемого сигнала.

При записи соотношения учтена независимость событий правильного приема сигналов различных поляризаций в J диапазонах частот. С учетом монотонной зависимости $p_b(Q_{j,i})$ перейдем от выражения (1) к мультипликативной функции взвешенных значений ОСШ на выходе антенны для сигналов заданных поляризаций в требуемых диапазонах частот:

$$\mathcal{E} = \prod_{j=1}^J \prod_{i=1}^4 Q_{j,i}^{m_{j,i}}, \quad (2)$$

где $m_{j,i}$ — весовой коэффициент, учитывающий различные значения ОСШ в зависимости от требуемой вероятности битовой ошибки, вида используемой модуляции и энергетические параметры радиоканала j -го диапазона частот.

Для определения взаимосвязи ОСШ с параметрами облучателя используем уравнение радиосвязи, которое позволяет определить ОСШ при приеме сигнала i -й поляризации j -го диапазона частот следующим образом:

$$Q_{j,i} = B_{j,i} H_{j,i}^{(0)} F_1(\sigma_{j,i}^2) F_2(K_{j,i}), \quad (3)$$

где $B_{j,i}$ — коэффициент, учитывающий мощность передатчика, КУ передающей антенны, параметры трассы распространения для сигналов i -й поляризации в j -м диапазоне частот; $H_{j,i}^{(0)}$ — шумовая добротность МЗА для сигналов i -й поляризации в j -м диапазоне частот; $F_1(\sigma_{j,i}^2)$ — множитель, учитывающий среднее снижение ОСШ из-за неточности наведения антенны; $\sigma_{j,i}^2$ — дисперсия ошибки наведения антенны на КА; $F_2(K_{j,i})$ — множитель, учитывающий снижение ОСШ из-за эффектов деполяризации сигнала на трассе распространения и в тракте МЗА и определяемый коэффициентом поляризационной развязки $K_{j,i}$ (КПР).

Для гофрированного рупора последний сомножитель можно считать равным единице, что позволяет исключить его из рассмотрения показателя эффективности облучателя. Таким образом, показатель эффективности облучателя на основе круглого гофрированного волновода может быть представлен следующим образом:

$$\mathcal{D} = \prod_{j=1}^J \prod_{i=1}^4 \left(H_{j,i}^{(0)} F_1(\sigma_{j,i}^2) \right)^{m_j}. \quad (4)$$

Как следует из соотношения (4), ОСШ на выходе антенны пропорционально шумовой добротности МЗА. В то же время сомножитель $F_1(\sigma_{j,i}^2)$ более сложным образом связан с параметрами облучателя. Так, средняя мощность принимаемого сигнала с учетом неточности наведения антенны можно представить выражением:

$$F_1(\sigma_{j,i}^2) = \left(4k\sigma_{j,i}^2 + 1 \right)^{-0,5} \Phi \left[(18k\sigma_{j,i}^2 + 4,5) \right], \quad (5)$$

где $k = 2 \ln 2$ — коэффициент, используемый для представления суммарной ДН [2]; $\sigma_{j,i}^2 = 2 \left(H_{j,i}^{(0)} \cdot \mu_{j,i} \right)^{-1}$; $\mu_{j,i}$ — крутизна пеленгационной характеристики; $\Phi[\bullet]$ — интеграл вероятностей.

Сигнал на выходе системы автосопровождения при отклонении КА от равноточного направления в одной из плоскостей при формировании парциальных ДН с использованием мод H_{11} и H_{21} многомодового рупора для сигналов соответствующих поляризации и частотного диапазона определяется следующим выражением:

$$\nu = 20 \lg \left(\frac{F_{\Sigma}^{(j,i)} + p_{j,i} \cdot F_{\Delta}^{(j,i)} + n_{\Xi}^{(j,i)} + p_{j,i} \cdot n_{\Delta}^{(j,i)}}{F_{\Sigma}^{(j,i)} - p_{j,i} \cdot F_{\Delta}^{(j,i)} + n_{\Xi}^{(j,i)} + p_{j,i} \cdot n_{\Delta}^{(j,i)}} \right), \quad (6)$$

где $F_{\Sigma}^{(j,i)}$, $F_{\Delta}^{(j,i)}$ — суммарная и разностная ДН, формируемые в соответствующей плоскости для сигналов i -й поляризации в j -м диапазоне частот; $p_{j,i}$ — коэффициент усиления в тракте формирования разностной ДН, определяемый из условия пересечения парциальных ДН по уровню -3 дБ; $n_{\Xi}^{(j,i)}$ и $n_{\Delta}^{(j,i)}$ — шумовая составляющая сигналов в суммарном и разностном каналах соответственно.

Реализация облучателей МЗА на основе гофрированных рупоров

Построение гофрированного рупора обеспечивается использованием вставок с одно-, двух- и трехступенчатыми канавками, показанными на рис. 1 [3].

В статье рассматриваются двух-, трех- и четырехдиапазонный рупоры, применяемые в составе МЗА ССС. В частности, основное внимание уделяется построению многодиапазонных гофрированных рупоров с совмещением различных частотных диапазонов: a — C/Ku -диапазонов, b — X/Ku -диапазонов (с возбуждением моды H_{21}), v — $C/X/Ku$ -диапазонов. Особенностью разработанных облучателей является то, что требуется только небольшое изменение их параметров при установке в МЗА с различным диаметром основного зеркала. При этом необходимо изменить длину рупора, модового трансформатора и параметры вставок с канавками.

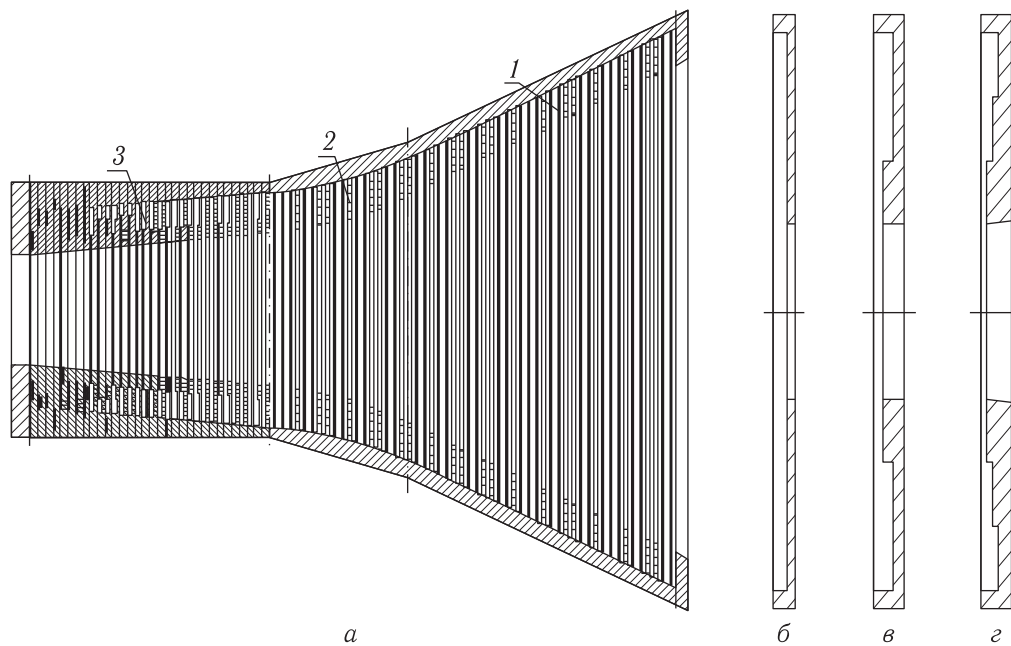


Рис. 1. Гофрированный рупор: а) общая структура рупора; б, в, г) вставки с одно-, двух- и трехступенчатыми канавками соответственно

Оптимизация параметров облучателей МЗА в виде гофрированного рупора при различных сочетаниях совмещаемых диапазонов частот

В случае пренебрежимо малого уровня шумов и малого уровня высших мод по отношению к моде H_{21} соответствующего диапазона на выходе облучателя выбор требуемого значения коэффициента $p_{j,i}$ может быть проведен при любом соотношении максимумов $F_{\Sigma}^{(j,i)}$ и $F_{\Delta}^{(j,i)}$. Однако в случае конечного значения ОСШ в каналах формирования суммарной и разностной ДН возбуждение моды H_{21} малой амплитуды связано с увеличением амплитуды $p_{j,i}$ и соответственно с увеличением шумовой составляющей в парциальных ДН. Таким образом, выбор параметров гофрированного рупора определяется из условия достижения максимума показателя \mathcal{E} при заданном диаметре зеркала, уровне облучения края рефлектора (контррефлектора), соотношении амплитуд мод H_{11} и H_{21} в каждом из диапазонов частот для сигналов требуемых поляризаций.

Выбор параметров рупора в первом случае (рупоры а, в и г) направлен на обеспечение максимальной амплитуды моды H_{11} . Во втором случае (рупор на рис. 1, б) выбор параметров обеспечивает максимально возможные уровни двух мод H_{11} , H_{21} и соотношение между ними для пересечения парциальных ДН по уровню, близком к -3 дБ.

Результаты исследований характеристик созданных рупоров приведены на рис. 2. На указанных рисунках показаны частотные зависимости КСВН в каждом из совмещаемых диапазонов:

а — сплошной и штриховой линиями для С- и Ки-диапазонов соответственно;

б — сплошной и штриховой линиями для моды H_{11} , Х- и Ки-диапазонов соответственно;

в — штрихпунктирной и точечной линиями для моды H_{21} , Х- и Ки-диапазонов соответственно;

г — сплошной, штриховой, штрихпунктирной и точечной линиями для С-, Х-, Ки- и Ка-диапазонов соответственно.

Приведенные зависимости показывают, что варьирование параметров облучателя, в частности угла раскрытия и длины рупора, числа вставок и параметров канавок во вставках, обеспечивает как эффективное возбуждение только моды H_{11}

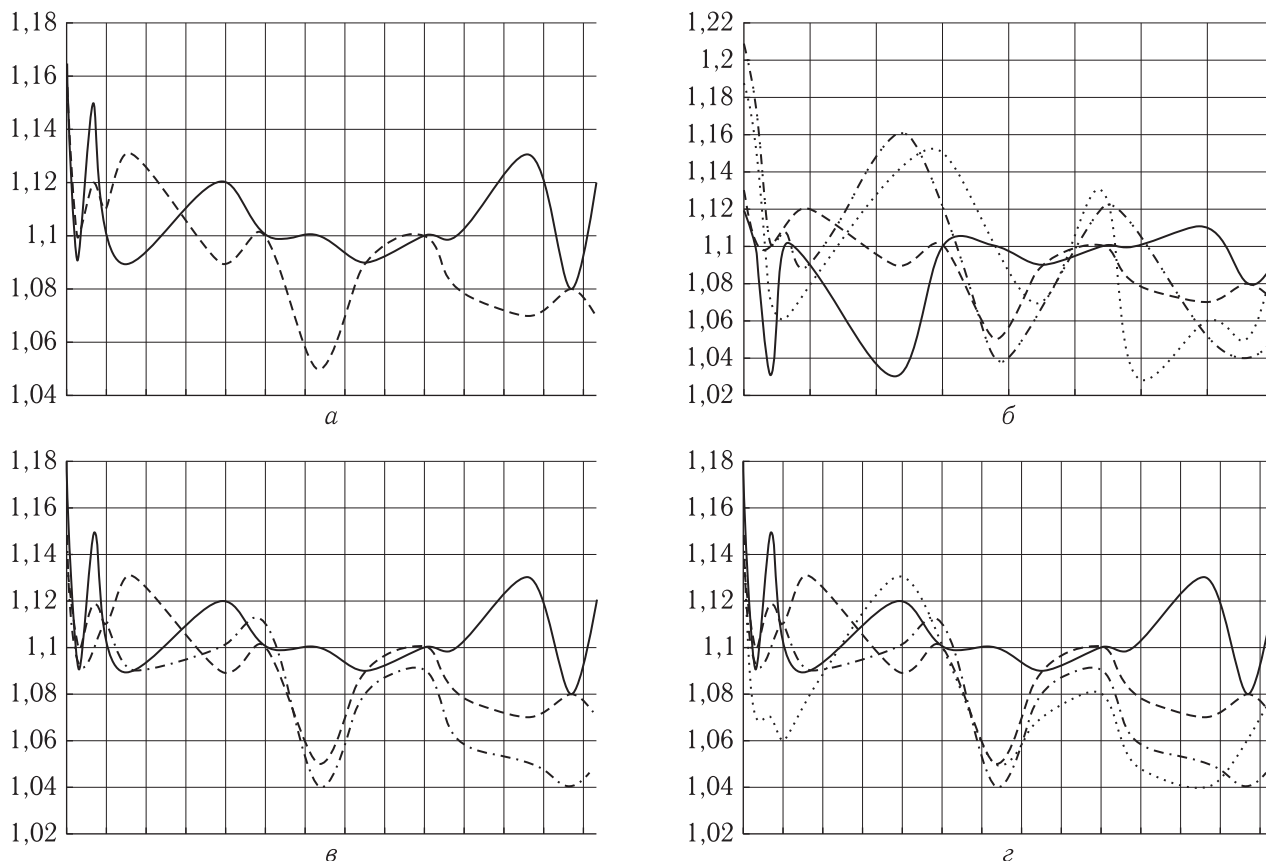


Рис. 2. Частотные зависимости КСВН многодиапазонных гофрированных рупоров с совмещением различных частотных диапазонов: а — C/Ku -диапазонов, б — X/Ku -диапазонов (с возбуждением моды H_{21}), в — $C/X/Ku$ -диапазонов, г — $C/X/Ku/Ka$ -диапазонов

для облучателей МЗА без автосопровождения КА, так и возбуждение мод H_{11} и H_{21} для облучателей МЗА с автосопровождением. Возможность управления данными параметрами определяет возможность достижения высокой эффективности МЗА.

Выводы

1. Проведенный анализ взаимосвязи показателей эффективности системы спутниковой связи с энергетическими характеристиками радиоканала позволил обосновать показатель эффективности многодиапазонной зеркальной антенны наземного пункта приема информации и облучателей, входящих в ее состав. Показатель эффективности МЗА представлен в виде мультипликативной функции, учитывающей в каждом из совмещаемых диапазонов частот шумовую добротность антенны и два

сомножителя, определяющих снижение эффективной шумовой добротности из-за эффектов деполяризации принимаемых сигналов и неточности наведения антенны при автосопровождении КА.

Последующая декомпозиция указанного показателя эффективности показала, что в качестве показателя эффективности облучателя МЗА необходимо использовать только уровень сигналов, формируемых в основном канале для антенн с автосопровождением на основе экстремального метода и в суммарном и разностном каналах для антенн с автосопровождением на основе моноимпульсного метода. В частности, для облучателя в виде многомодового гофрированного рупора показатель эффективности определяется как амплитуда возбуждения моды H_{11} для антенны с автосопровождением на основе экстремального метода или амплитуд мод H_{11} и H_{21} для антенны с автосопровождением на основе моноимпульсного метода.

При этом критерием эффективности в первом случае является обеспечение максимума амплитуды моды H_{11} , во втором случае — достижение максимума амплитуды моды H_{11} при условии соотношения амплитуд мод H_{11} и H_{21} , обеспечивающих формирование парциальных ДН, пересекающихся на уровне -3 дБ.

2. Использование гофрированного рупора в качестве облучателей МЗА, обеспечивающего возбуждение основной H_{11} и высшей H_{21} мод позволяет создавать облучатели многодиапазонных зеркальных антенн с различными функциональными возможностями, в частности с режимами программного наведения и автосопровождения на основе экстремального и моноимпульсного методов.

3. Наличие большого числа варьируемых параметров облучателя, в частности угла раскрыва и длины рупора, числа вставок и параметров канавок во вставках позволяет обеспечить низкий уровень КСВН в требуемых полосах частот при различных сочетаниях совмещаемых диапазонов, что дает возможность максимизировать шумовую добротность МЗА в каждом диапазоне частот.

При этом облучатель обеспечивает как высокую точность автосопровождения КА, так и высокий уровень поляризационной развязки, при которых практически не происходит снижение шумовой добротности МЗА. В совокупности выбор значений параметров гофрированного рупора позволяет максимизировать показатель эффективности МЗА.

Список литературы

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: ИД «Вильямс», 2007.
2. Balanis C.A. Antenna Theory: Analysis and Design. 3rd ed. Hoboken, New Jersey: John Willey & Sons, 2005. 1136 p.
3. Коровкин А.Е., Раздоркин Д.Я., Шипулин А.В. Многодиапазонные облучатели зеркальных антенн на основе конических гофрированных рупоров // Антенны, 2012, вып. 9(184). С. 19–23.
4. Фельдштейн А.Л., Ярвич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. М.: Сов. радио, 1967.