УДК 621.396.67

А.А. Былов, Ю.П. Саломатов

Диаграммообразующая схема однозеркальной антенны Ку-диапазона на основе планарной фазированной антенной решетки отражательного типа

Разработана конструкция диаграммообразующей схемы в виде отражательной антенной решетки печатного исполнения. Кратко описаны этапы конструктивного синтеза отражательной антенной решетки, образующей плоский рефлектор. Рассмотрена возможность конкуренции спроектированного плоского зеркала с параболическим рефлектором, приведены рассчитанные характеристики однозеркальной антенны Ку-диапазона с плоским рефлектором, проведенные посредством электродинамического моделирования в САПР CST MWS.

Ключевые слова: диаграммообразующая схема, апертура, диаграмма направленности, антенная решетка, облучатель, рефлектор.

doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-3-11-15

Современная фазированная антенная решетка (ФАР) представляет собой довольно гибкую систему, обеспечивающую быстрое и безынерционное управление направленными свойствами антенны. Применение ФАР в антенной технике позволяет осуществлять электронное сканирование, получать высокие значения коэффициента усиления (КУ), изменять форму амплитудной диаграммы направленности (ДН) и тем самым адаптироваться к внешним условиям за кратчайшие промежутки времени, сопоставимые с временем задержки сигнала в тракте.

Неотъемлемой составной частью конструкции ФАР является система распределения и управления электромагнитной энергией, отвечающая за создание амплитудно-фазового распределения в апертуре антенны. Такая система называется диаграммообразующей схемой (ДОС) и состоит из множества элементов: фазовращателей, делителей, усилителей и т.д. Многоэлементные ДОС с принудительным питанием на линиях передачи вносят основной вклад в высокую стоимость современных ФАР, а исполнение всех высокочастотных элементов в едином блоке требует сложной технологии производства.

Компромиссом в сложившейся ситуации могут служить ФАР на основе ДОС с квазиоптическим питанием проходного и отражательного типа. Данные системы привлекают внимание разработчиков простотой конструкции, малым уровнем потерь энергии из-за отсутствия фидерного тракта питания, низкой стоимостью.

Особый интерес вызывают ФАР на базе ДОС отражательного типа (отражательные антенные решетки) в печатном исполнении, которые удобны тем, что имеют малый вес и могут быть конформными, что позволяет располагать их конструкцию, например, в обшивке либо на наружной поверхности космических, летательных аппаратов, не нарушая их аэродинамических свойств. Как правило, ДОС отражательного типа в печатном исполнении представляет собой плоский рефлектор в виде совокупности резонаторов (отражателей), дискретно расположенных на диэлектрической подложке. В отдельных случаях такие плоские рефлекторы с оп-

тическим возбуждением способны заменить параболические рефлекторы, которые сложны и дороги в изготовлении.

Структура однозеркальной антенны с ДОС отражательного типа

В зависимости от расположения облучателя относительно рефлектора однозеркальные антенны подразделяются на осесимметричные и неосесимметричные.

Неосесимметричные однозеркальные антенны (НОА) по сравнению с осесимметричными позволяют за счет вынесенного облучателя минимизировать затенение апертуры рефлектора облучателем, тем самым понизить уровень излучения по боковым направлениям и значительно улучшить согласование в рабочем диапазоне частот.

Схематическое изображение НОА с плоским рефлектором на основе ДОС отражательного типа приведено на рис. 1.

Рис. 1. Структурная схема НОА: 1 – металлизация; 2 – диэлектрическая подложка; 3 – ДОС отражательного типа (плоский рефлектор в виде отражательной антенной решетки); 4 – сферический фазовый фронт; 5 – плоский фазовый фронт; 6 – облучатель

Принцип действия такой структуры аналогичен работе параболической зеркальной антенны (ПЗА): плоский рефлектор должен при отражении сферической волны от облучателя обеспечивать выравнивание ее фазового фронта. Достигается это введением дополнительной фазовой задержки в элементах отражательной антенной решетки (ОАР).

Каждый отражающий элемент ОАР должен обеспечить компенсацию фазового набега электро-

магнитной волны, возникающего из-за разности хода лучей от облучателя до каждого из отражателей, за счет чего сферический фронт падающей электромагнитной волны преобразуется в плоский фронт, и тем самым достигается максимальный КУ.

Облучатель НОА Ку-диапазона

Основные требования, предъявляемые к облучателям НОА с плоским рефлектором, схожи с требованиями в случае использования параболического рефлектора [1]:

1. ДН облучателя должна быть однонаправленной, иметь осевую симметрию и минимальный уровень побочных лепестков. Для обеспечения высокого коэффициента использования поверхности (КИП) уровень облучения краев зеркала должен составлять примерно минус 10 дБ относительно максимального усиления.

2. Фазовый центр облучателя должен быть «точечным» и положение его не должно зависеть от направления.

3. Облучатель должен быть достаточно диапозонным и выдерживать заданную мощность электромагнитных волн без пробоя.

Волноводно-рупорные облучатели отвечают таким требованиям наиболее полно.

Облучение плоского рефлектора на основе ДОС отражательного типа производится коническим гофрированным рупором с уровнем облучения –12 дБ по краям относительно максимума. По сравнению с классическим оптимальным коническим рупором гофрированный рупор имеет меньшую длину и обеспечивает более осесимметричную ДН.

Модель облучателя Ку-диапазона и его габаритные размеры приведены на рис. 2, 3.

Рис. 2. Общий вид облучателя

Рис. 3. Геометрические размеры облучателя

Максимальный коэффициент усиления (КУ) данного облучателя в диапазоне частот от 13 до 15 ГГц составляет не менее 15 дБ, поляризация – линейная. Направленные свойства облучателя на частоте 13 ГГц приведены на рис. 4.

Рис. 4. ДН облучателя

Характеристика коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) облучателя приведена на рис. 5.

Рис. 5. КСВН облучателя

Конструктивный синтез плоского рефлектора НОА

Важным шагом в построении плоского рефлектора является выбор конфигурации отражательного элемента. Можно выделить следующие главные критерии, которые влияют на выбор данного элемента: коэффициент отражения, фаза отраженной электромагнитной волны, рабочая полоса частот, ширина ДН.

Конструктивный синтез отражателя проводится в три этапа:

1. Выбирается конфигурация отражателя, рассчитывается зависимость фазы отраженной электромагнитной волны от размеров отражателя и угла падения электромагнитной волны от облучателя. Распространенным методом расчета является использование модели бесконечной эквивалентной волноводной ячейки [2], имитирующей бесконечную периодическую структуру, состоящую из одинаковых элементарных ячеек. Для расчета фазовых характеристик элементов могут быть применены САПР, такие как CST Microwave Studio с использованием граничных условий Unit Cell либо прочие САПР электродинамического расчета при использовании магнитной и электрической стенок для создания ячейки Флоке. Зависимость фазы отраженной электромагнитной волны от геометрических размеров отражательного элемента должна быть определена максимально точно. Интервал между отражателями выбирается из условия отсутствия дифракционных лепестков в диаграмме направленности [3]:

$$d \leq \frac{\lambda}{1 + \sin \theta}, \quad (1)$$

где d – шаг между отражателями; λ – длина электромагнитной волны в свободном пространстве; θ – угол поворота облучателя относительно нормали плоского рефлектора.

2. Рассчитывается фазовый набег падающей электромагнитной волны от облучателя в точках расположения отражателей на плоском рефлекторе. Фазовый набег падающей электромагнитной волны определяется из геометрикооптических вычислений по следующей формуле:

$$\phi_i = \left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \right) \cdot R_i, \quad (2)$$

где ϕ_i – фазовый набег электромагнитной волны на i -м излучателе (градусы); λ – длина электромагнитной волны в свободном пространстве (м); R_i – расстояние от облучателя до i -го отражателя (м); i – номер отражателя на плоском рефлекторе.

3. На основании расчетов в первых двух этапах определяется размер каждого элемента отражательной антенной решетки плоского рефлектора, при котором фаза коэффициента отражения электромагнитной волны скомпенсирует фазовый набег падающей волны для каждого из отражателей (обеспечит выравнивание сферического фазового фронта облучателя).

Вид отражателя, используемого в построении плоского рефлектора НОА Ку-диапазона, изображен на рис. 6.

Отражатель представляет собой квадратную рамку с окружностью в центре и выполнен на квадратной площадке диэлектрика (материал Rogers 4003) толщиной $t_1=0,8$ мм и стороной $w=16$ мм. Диэлектрик экранирован с противоположной сторо-

ны, расстояние между экраном и диэлектриком составляет $t_2=3$ мм. Внутренняя сторона (s) квадратной рамки отражателя, а также диаметр окружности (d) связаны между собой через размер внешней стороны l с помощью коэффициентов $k_1=0,3$, $k_2=0,8$ ($s=l \cdot k_2$, $d=l \cdot k_1$).

Рис. 6. Элементарный отражатель: а – топология; б – изометрический вид

Зависимости фазы ψ коэффициента отражения электромагнитной волны от параметра l и различных углов падения θ электромагнитной волны на плоскость отражателя приведены на рис. 7, 8.

Рис. 7. Фазовая характеристика для θ в диапазоне 0–15,3 град

Рис. 8. Фазовая характеристика для θ в диапазоне 21,2–30,5 град

Конструкция разработанной НОА с плоским рефлектором в печатном исполнении изображена на рис. 9.

Рис. 9. НОА Ку-диапазона:

а – изометрический вид; *б* – вид в плоскости рефлектора

Рассчитанный плоский рефлектор на основе ДОС отражательного типа представляет собой квадратную апертуру площадью 24×24 см и включает в себя 217 отражательных элементов.

Результаты

На рис. 10–13 представлены направленные свойства и электрические характеристики разработанной однозеркальной антенны Ку-диапазона с плоским рефлектором в печатном исполнении, полученные посредством электродинамического моделирования в САПР CST MWS в полосе частот от 13 до 15 ГГц.

Заключение

Анализируя полученные результаты электродинамического моделирования однозеркальной антенны Ку-диапазона в полосе частот от 13 до 15 ГГц, можно заметить следующее:

– уровень боковых лепестков составляет не более –15 дБ;

– угол максимального излучения согласно рис. 10 составляет примерно 160 градусов, что можно объяснить привязкой электродинамической модели антенны к системе координат, направленной противоположно максимальному излучению. Таким образом, главный лепесток отклонен на 20° относительно нормали к плоскому рефлектору;

– максимальный КУ согласно рис. 12 составляет не менее 23 дБ;

– КСВН не хуже –17 дБ;

– ширина главного лепестка по уровню –3 дБ почти неизменна.

Для сравнения рассчитаем КУ для параболической зеркальной антенны (ПЗА) с рефлектором, имеющим площадь апертуры, эквивалентную апертуре плоского рефлектора спроектированной антенны, по следующей формуле [4]:

$$G = 10 \cdot \log \left[\frac{(4 \cdot \pi^2 \cdot R^2)}{\lambda^2} \cdot 0,6 \right], \quad (3)$$

где G – КУ ПЗА (дБ); R – радиус зеркала ПЗА (м); λ – длина электромагнитной волны в свободном пространстве (м).

В данном случае $R = 0,112$ м, и КУ ПЗА на частоте 14 ГГц согласно расчету по вышеприведенной формуле составляет 28 дБ. Сравнивая полученный результат с максимальным КУ антенны с плоским рефлектором, приведенным на рис. 12, можно сделать вывод, что КУ ПЗА на 2,4 дБ выше.

Рис. 10. ДН в Е-плоскости

Рис. 11. ДН главного лепестка в Е-плоскости

Рис. 12. Максимальный КУ

Рис. 13. Коэффициент отражения

Данное расхождение можно объяснить дискретным расположением элементарных отражателей на плоском рефлекторе, вследствие чего КИП меньше, чем КИП параболического рефлектора с эквивалентной апертурой.

Таким образом, разработанная антенна Ku-диапазона может конкурировать с ПЗА не только благодаря применению в производстве более простой технологии изготовления, но и по электрическим характеристикам.

Литература

1. Драбкин А.Л. Антенно-фидерные устройства / А.Л. Драбкин, В.Л. Зузенко, А.Г. Кислов. – Изд. 2-е. – М.: Сов. радио, 1974. – 536 с.
2. Feng-Chi E.Tsai. Designing a 161-element ku-Band microstrip reflectarray of variable size patches using an equivalent unit cell waveguide approach / E.Tsai Feng-Chi, M.E. Bialkowski // IEEE transactions on antennas and propagation. – 2003. – Vol. 51, No. 10. – P. 2953–2962.
3. Huang J. Reflectarray antennas / J.Huang, A. Encinar. – New Jersey: A John Wiley & Sons, 2008. – 216 p.
4. Фролов О.П. Антенны и фидерные тракты для радиорелейных линий связи. – М.: Радио и связь, 2001. – 416 с.

Былов Алексей Андреевич

Инженер АО «Информационные спутниковые системы» им. ак. М.Ф. Решетнева», г. Железногорск, аспирант каф. радиотехники Сибирского федерального университета (СФУ)
Тел.: +7-950-970-96-80
Эл. почта: AlexeyBylov1986@ya.ru

Саломатов Юрий Петрович

Канд. техн. наук, профессор, зав. каф. радиотехники СФУ
Тел.: 8 (391-2) 91-22-78
Эл. почта: YSalomatov@sfu-kras.ru

Bylov A.A., Salomatov Y.P.

Beamforming scheme of single-reflector Ku-band antenna based on the reflection type planar phased array antenna

The object of this article is beamforming scheme based on printed phased Ku-band reflectarray. The structure of this reflectarray and the topology of simple resonator are described. The ability of competition with parabolic reflector antennas despite the lower values of the coefficient of surface utilization was shown. It was found that the developed Ku-band reflectarray meets modern requirements for antenna systems. The resultant radio characteristics of designed reflectarray are given in the conclusion of the article.

Keywords: aperture, beamforming scheme, directivity pattern, array, antenna feed, reflector.