

УДК 621.296.67

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СКАНИРОВАНИЯ ДВУХ МНОГОЛУЧЕВЫХ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН, ПОСТРОЕННЫХ ПО СХЕМЕ ДРАГОНЕ

А. Н. Пластиков

**Национальный исследовательский университет Московский энергетический институт,
кафедра "Антенных устройств и распространения радиоволн"**

Получена 21 февраля 2012 г.

Аннотация. В работе представлены результаты численного исследования двух многолучевых зеркальных антенн (МЗА), построенных на основе двух типов "неклассических" офсетных параболических зеркальных антенн с вогнутыми гиперболическими рефлекторами. Обе исследуемые МЗА имеют круглую апертуру диаметром 100 длин волн. С целью определения возможностей сканирования определены диаграммы направленности и величины коэффициента использования поверхности при различных углах отклонения луча в двух плоскостях. Исследованы кроссполяризационные характеристики. Проведено сопоставление возможностей сканирования двух рассмотренных МЗА друг с другом для двух возможных вариантов построения элементов облучающей системы.

Ключевые слова: многолучевая зеркальная антенна, антенна Драгоне, характеристики сканирования, коэффициент использования поверхности, кроссполяризация.

Abstract. The calculation results of two multibeam offset Dragonian reflector antennas with concave hyperboloidal subreflectors analysis are presented. Reflector antennas under investigation have a 100 wavelength circular apertures. The estimation of far fields and antenna efficiency for different angles of beam deflection in two planes is performed. The study of cross-polarization characteristics is carried

out. Results of numerical calculations of scanning capabilities for two possible feed arrangements are shown.

Keywords: multibeam reflector antenna, Dragonian antenna, scanning capabilities, antenna efficiency, cross-polarization.

Введение

Сегодня разработка многолучевых антенн, способных обеспечивать прием/передачу сигнала одновременно по нескольким лучам (направлениям), видится достаточно важным направлением антенной техники, актуальным как для наземных, так и для бортовых систем. Очевидными преимуществами МЗА перед зеркальными антеннами, работающими по одному лучу, является использование одной апертуры (т.е. одного главного зеркала) для формирования нескольких лучей, что позволяет одной подобной антенне "заменить" определенное число "обычных" зеркальных антенн.

Большой объем теоретических исследований по выявлению возможностей снижения aberrаций в многолучевых многозеркальных антеннах принадлежит американскому исследователю итальянского происхождения Коррадо Драгоне. Основные его идеи в этом направлении, содержащиеся в работах первой половины 80-х годов XX века – в статье [1] и патенте [2], представляют собой своеобразную идеологию построения многолучевой многозеркальной антенны с минимизированными aberrациями типа астигматизма и комы, включающую в себя следующие положения:

- антенная система (АС) должна содержать не менее двух зеркал;
- для исключения затенений раскрытов зеркал следует использовать офсетную схему расположения рефлекторов;
- для минимизации астигматизма необходимо обеспечить совпадение эквивалентной оси системы зеркал и продольной оси облучающей системы;
- для минимизации комы необходимо деформировать поверхности двух зеркал в соответствии с условием апланатизма (синусов Аббе).

Отметим, что условие устранения астигматизма и минимизации уровня кроссполяризации за счет выбора угла между осями главного и вспомогательного зеркал в антенне Грегори было также представлено в статье [3], вследствие чего в иностранной литературе оно часто именуется условием Мизугучи-Драгоне (Mizuguchi-Dragone condition).

В качестве примера системы с минимальными aberrациями в статье [1] Драгоне предложил концепт взаимного расположения зеркал в двухзеркальной антенне, отображенный на рис. 1а. По всей видимости, впервые подобный вариант построения двухзеркальной антенны Кассегрена экспериментально был рассмотрен японскими исследователями в [4] (как утверждают сами авторы, независимо от идей Драгоне) и получил название возбуждаемого спереди (front fed design, FFD или front fed offset Cassegrain, FFOC).

Примерно в это же время, в середине 80-х годов XX века, был рассмотрен и другой вариант "неклассической" схемы построения двухзеркальной антенны – возбуждаемой сбоку (side fed design, SFD или side fed offset Cassegrain, SFOC), см. рис. 1б. Впервые соответствующие АС были исследованы, видимо, в работах Йоргенсена и других [5, 6]. При этом в статье [6] отмечается, что схемы построения двухзеркальных АС типа FFOC и SFOC были выделены еще до работ Драгоне в [7].

Заметим, что впервые схема построения двухзеркальной АС, схожая с рассматриваемыми "неклассическими" схемами, была предложена еще в 1963 году в статье [8] и в отечественных источниках именовалась антенной типа "Раковина" [9], см. рис. 1в. Соответствующая АС описывалась как своеобразный гибрид рупорно-параболической и двухзеркальной антенн, позволяющий добиться низких уровней бокового излучения и шумовой температуры.

В отечественной литературе не удалось найти публикаций, связанных с рассмотрением антенн типа FFOC и SFOC, в иностранных источниках число соответствующих исследований также невелико. Имеющиеся же публикации позволяют заключить, что подобные "неклассические" схемы построения

двухзеркальных антенн (в особенности, конфигурация SFOC) способны обеспечить меньшую деградацию луча при смещении облучателя из фокуса, т.е. предоставить тем самым лучшие возможности сканирования по сравнению с сопоставимыми "классическими" двухзеркальными антеннами Кассегрена и Грегори.

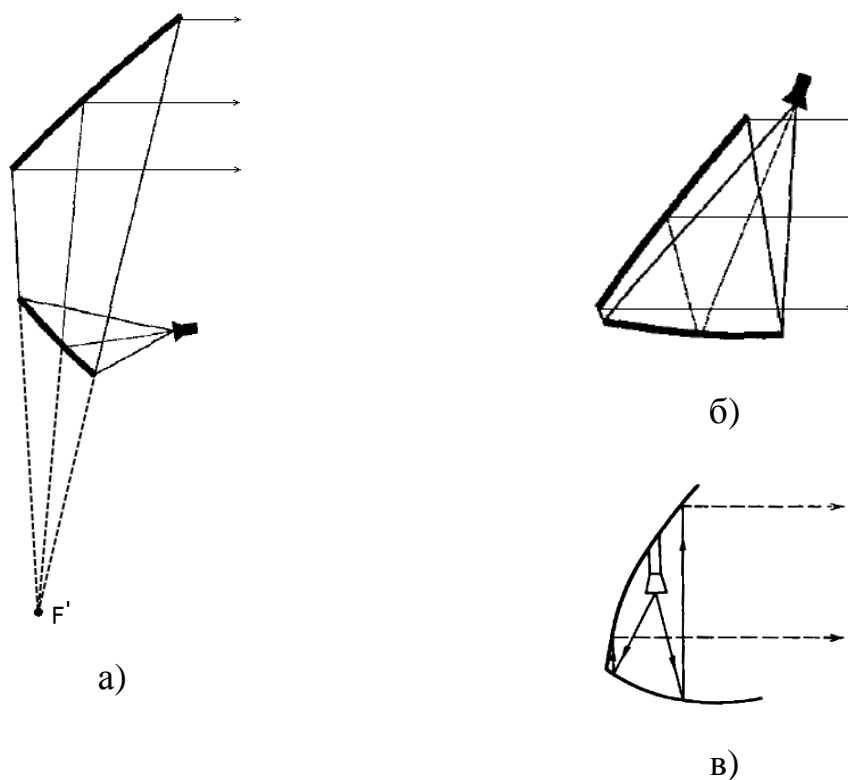


Рис. 1. "Неклассические" схемы построения двухзеркальной антенны Кассегрена: предложенная Драгоне (а), Side fed offset Cassegrain (б) и антенна типа "Раковина" (в).

Вследствие этого представляется интересным и достаточно актуальным более подробно исследовать возможность использования таких антенн в качестве МЗА. Заметим, что в нескольких англоязычных литературных источниках подобные АС с параболическим главным зеркалом называются антеннами Драгоне (*Dragonian antennas*). Несмотря на то, что сам Драгоне, как было отмечено выше, рассматривал двухзеркальные АС прежде всего с профилированными рефлекторами, будем придерживаться подобного названия

и в данной работе. Характерной особенностью антенн Драгоне по сравнению с классическими двухзеркальными антеннам Кассегрена является то, что контррефлектор представляет собой вырезку из вогнутого гиперboloида.

В работе представлены результаты численного исследования возможностей сканирования обоих типов таких "неклассических" офсетных параболических зеркальных антенн Кассегрена – схем FFOC и SFOC.

Геометрия антенн Драгоне

При построении/выборе геометрии системы зеркал антенн Драгоне можно руководствоваться материалами статей [10, 11]. Для того чтобы полностью охарактеризовать соответствующую систему зеркал, по аналогии с привычными офсетными АС Кассегрена и Грегори, достаточно задаться пятью параметрами. Параметры геометрии двух рассматриваемых в работе зеркальных антенн сведены в таблицу 1 и показаны на рис 2.

Таблица 1. Параметры геометрии рассматриваемых АС

Параметр	Описание	Значение для каждого из двух типов антенн	
		SFOC	FFOC
D	диаметр раскрыва	100λ	100λ
θ_0	угол отклонения центра параболоида от оси	50°	80°
l	расстояние между контррефлектором и главным зеркалом	100λ	100λ
θ_e	угол облучения края контррефлектора	15°	15°
θ_c	угол между осями параболоида и облучателя	-90°	-170°

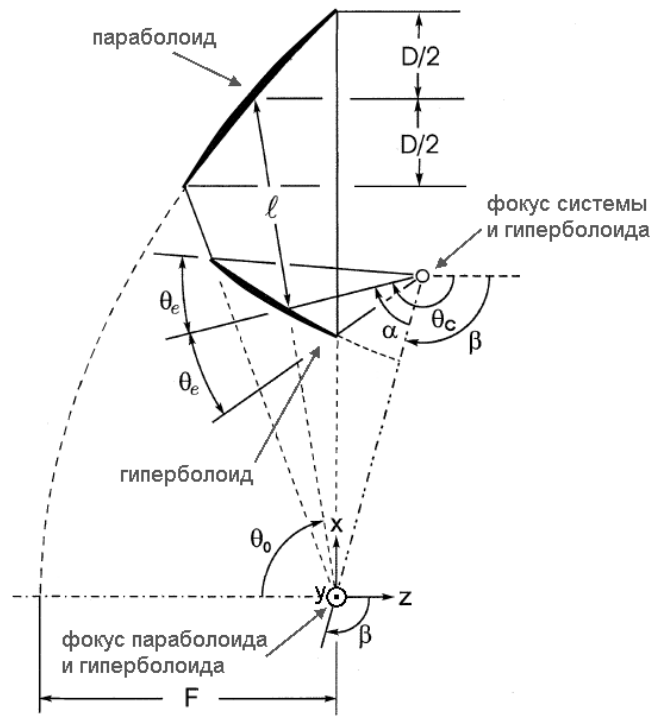


Рис. 2. Геометрия рассматриваемого класса антенн.

Обе исследуемые МЗА имеют круглую апертуру диаметром 100 длин волн. Отметим, что схемы FFOC и SFOC характеризуются обычно углами θ_c между осями параболаоида и облучателя (см. рис. 2), близкими к -180° и -90° соответственно. При этом для схемы SFOC характерны относительно небольшие величины углов облучения краев контррефлектора θ_e , а следовательно, они требуют наличия облучателей с относительно большими коэффициентами усиления. Антенны Драгоне типа FFOC могут быть реализованы с большими углами θ_e . В нашем случае угол θ_e задается одинаковым для обоих вариантов АС для того, чтобы обеспечить равные величины эквивалентного фокусного расстояния F_{eq} , которое может быть определено по формуле [11]

$$F_{eq} = \frac{D}{4 \tan(\theta_e/2)} \quad (1)$$

и для рассматриваемых АС составляет около 190λ , где λ – длина волны. Отметим, что для антенн Драгоне (в особенности, АС типа SFOC) характерным является тот факт, что фокусное расстояние F параболического главного

зеркала превышает F_{eq} . Так, для рассматриваемых АС типа SFOC и FFOC фокусные расстояния F составляют около 356λ и 205λ соответственно.

В принятых на рис. 2 обозначениях условие Мизугучи-Драгоне, которому должны удовлетворять антенны Драгоне, имеет следующий вид:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{e-1}{e+1} \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}, \quad (2)$$

где α – угол между осями гиперboloида и облучателя, β – угол между осями параболоида и гиперboloида, а e – эксцентриситет гиперboloида. До соответствующих работ Мизугучи и Драгоне (в т.ч. в [7]) условие (2) рассматривалось исключительно как условие минимизации кроссполяризации (в геометрооптическом приближении).

Отличительной особенностью антенн Драгоне (по крайней мере, антенн типа SFOC) является наличие большого контррефлектора, сопоставимого по габаритам с размерами главного зеркала. Важно также отметить, что сам контррефлектор представляет собой вырезку из другой по сравнению с обычной антенной Кассегрена ветви гиперboloида.

Моделирование. Исследование возможностей сканирования

Расчет АС проводился совмещенным методом физической оптики и физической теории дифракции в программном комплексе Tigr GRASP. В качестве облучателя задавался точечный источник поля с осесимметричной амплитудной диаграммой направленности в форме гауссова пучка, обеспечивающего для центрального луча уровень облучения края контррефлектора -12 дБ относительно максимума диаграммы направленности (ДН), см. рис. 3. Облучатель имеет идеальную линейную поляризацию в соответствии с так называемым третьим определением Людвига [12]. Поляризация поля облучателя – вертикальная.

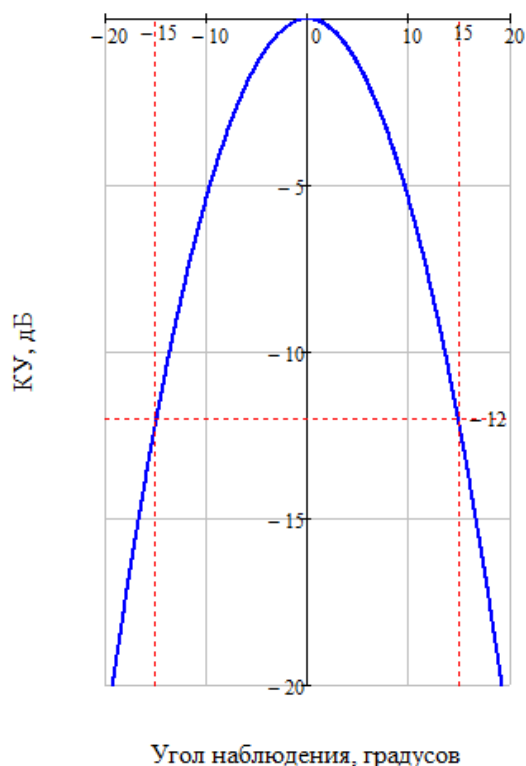


Рис. 3. ДН облучателя.

С целью определения возможностей сканирования рассчитаны диаграммы направленности и величины коэффициента использования поверхности (КИП) при различных углах отклонения луча в двух плоскостях (горизонтальной и вертикальной) для обеих АС. При этом сопоставлены результаты, полученные для двух вариантов расположения облучателей: а) облучатели расположены в одной плоскости с параллельными друг другу направлениями излучения (что может иметь место в реальной облучающей решетке рупоров, изготовленных на едином металлическом основании); б) положение и наклон облучателей оптимизированы с целью получения максимального усиления для каждого из рассмотренных лучей. При этом каждому лучу соответствует свой точечный облучатель.

На рис. 4 и 5 изображены геометрии зеркальных систем и картины хода геометрооптических лучей, исходящих из точки расположения облучателя, для центральных лучей обеих рассматриваемых антенн Драгоне. КНД центрального луча для обеих АС составляет 48,81 дБ, ширина ДН (по уровню половинной мощности) в горизонтальной и вертикальной плоскостях равна около $0,69^\circ$.

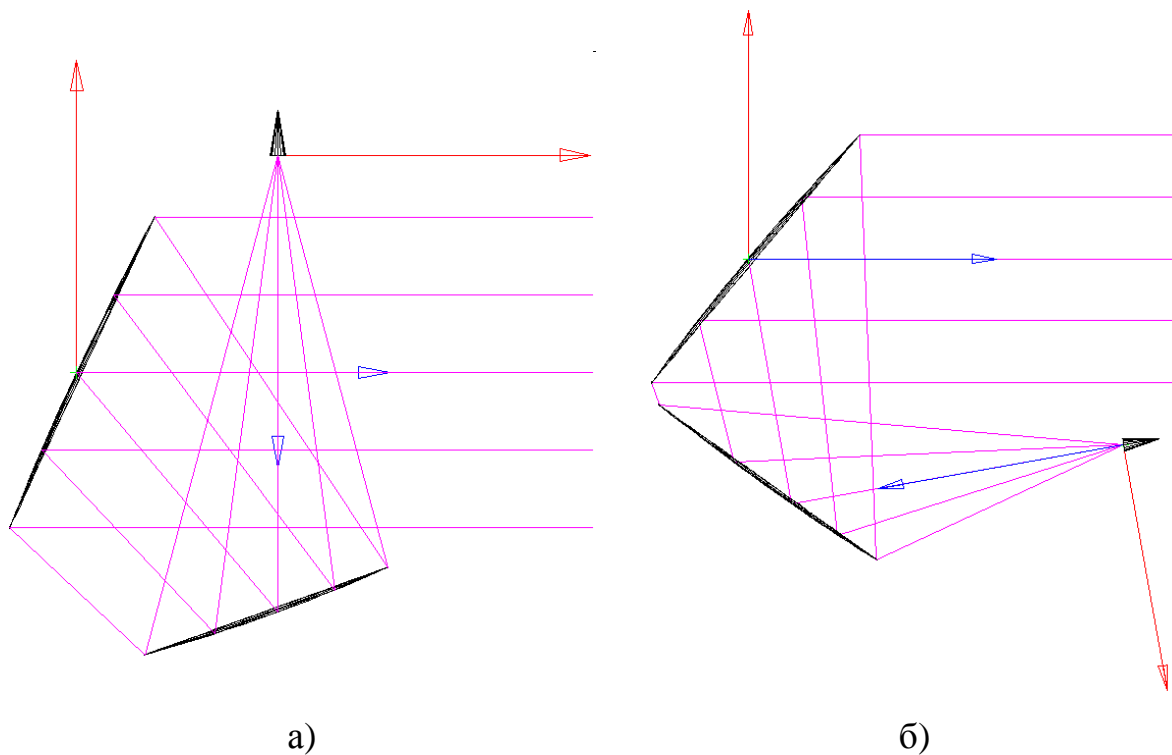


Рис. 4. Геометрия рассматриваемых АС и ход геометрооптических лучей в плоскости симметрии: SFOC (а) и FFOC (б).

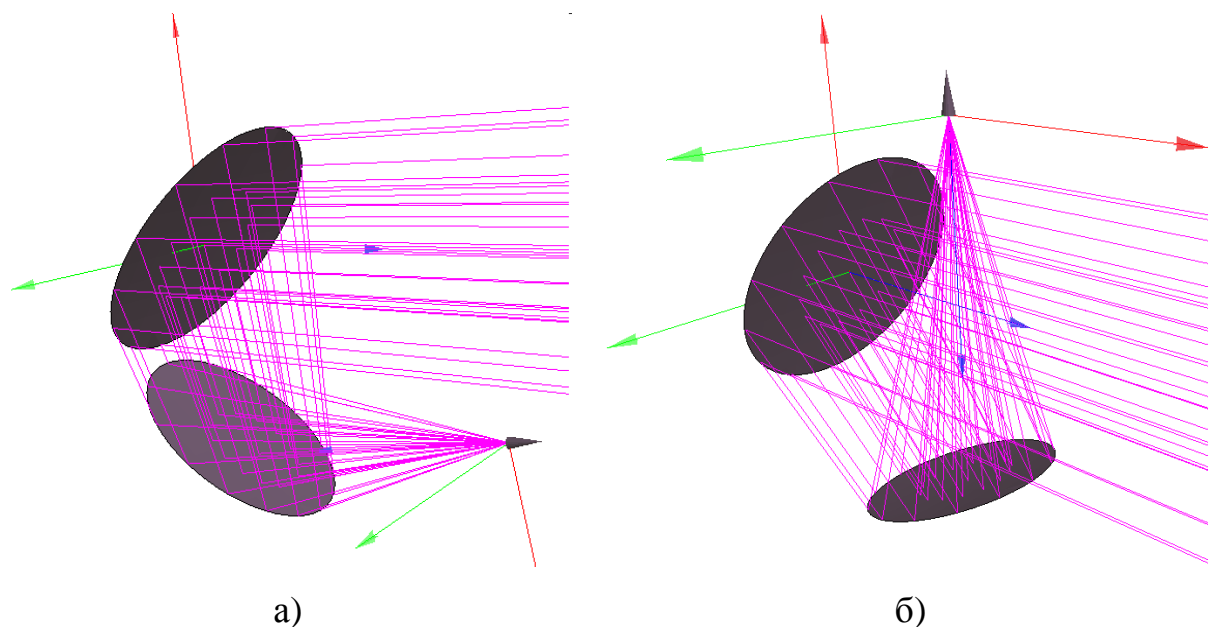


Рис. 5. Пространственная геометрия рассматриваемых АС и ход геометрооптических лучей при расположении облучателя в фокусе: SFOC (а) и FFOC (б).

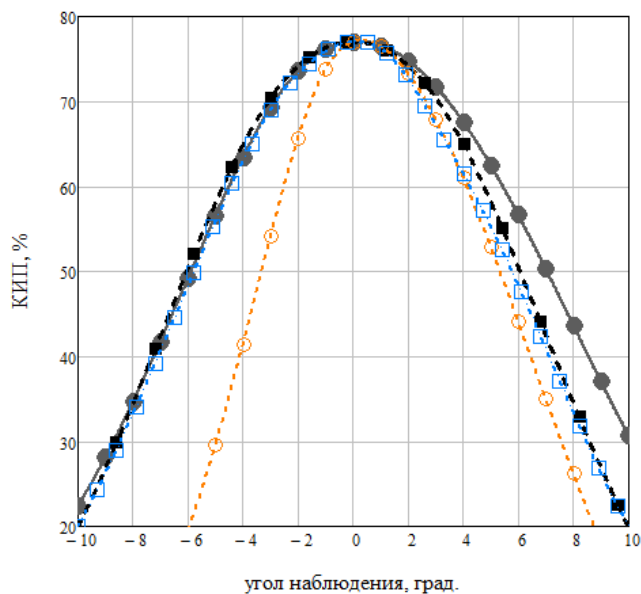
Рассчитанные зависимости КИП от углов отклонения луча в горизонтальной и вертикальной плоскостях для обеих антенн Драгоне отображены на рис. 6. Заметим, что при проводимых расчетах не учитывалось возможное затенение контррефлектором вторичного поля излучения параболоида, а также затенение поля облучателя главным зеркалом. При этом сама величина КИП определялась в соответствии с выражением

$$\text{КИП} = \frac{\text{КНД}_{\text{АС}}}{\text{КНД}_{\text{ид}}} = \frac{\text{КНД}_{\text{АС}}}{4\pi \cdot S / \lambda^2}, \quad (3)$$

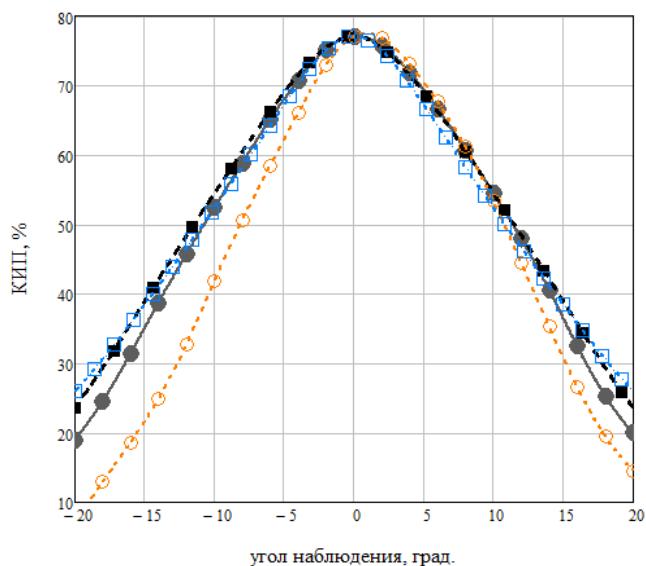
где $\text{КНД}_{\text{АС}}$ – рассчитанный КНД антенной системы, $\text{КНД}_{\text{ид}}$ – КНД идеального (с равномерным амплитудно-фазовым распределением) раскрыва, ортогонального плоскому фронту центрального луча, площадью S . В нашем случае для круглого раскрыва имеем $S = \pi \cdot D^2 / 4$.

ДН лучей АС типа SFOC при сканировании в двух плоскостях для оптимизированного положения облучателей приведены на рис. 7. По мере отклонения луча ДН от центрального направления помимо снижения усиления можно отметить рост уровня бокового излучения, появление четко выраженной асимметрии первых боковых лепестков вследствие появления несимметричных aberrаций типа комы, расширение самого лепестка в плоскости сканирования.

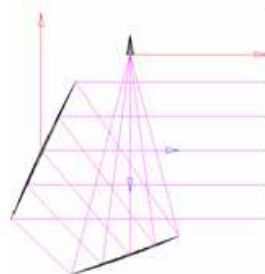
Зададимся допустимым уровнем КИП 40%, т.е. падением усиления около - 3дБ относительно центрального луча. Полученные величины секторов обзора, выраженные в градусах и ширинах ДН, сведены в таблицу 2. Обращают на себя внимание два момента. Во-первых, при оптимальном положении облучателей удается обеспечить примерно вдвое больший сектор обзора в обеих плоскостях для обеих АС. Во-вторых, ширина диапазона отклонения луча по заданному уровню КИП примерно одинакова для обеих антенн Драгоне за исключением результата для FFOC в вертикальной плоскости в области отрицательных углов θ , где получены более скромные возможности сканирования. Последнее согласуется с результатами, представленными в [6]. Заметим, что АС типа SFOC обеспечивает сектор обзора более 40 ширин ДН в обеих плоскостях.



а)



б)



- SFOC, вертикальная плоскость
- SFOC, горизонтальная плоскость
- FFOC, вертикальная плоскость
- FFOC, горизонтальная плоскость

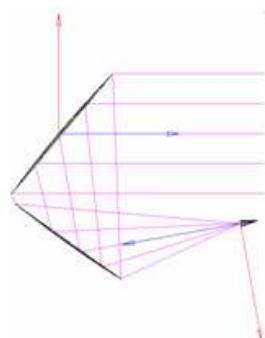


Рис. 6. Зависимости КИП от угла отклонения луча для случая плоской решетки облучателей (а) и оптимизированного положения облучателей для каждого луча (б).

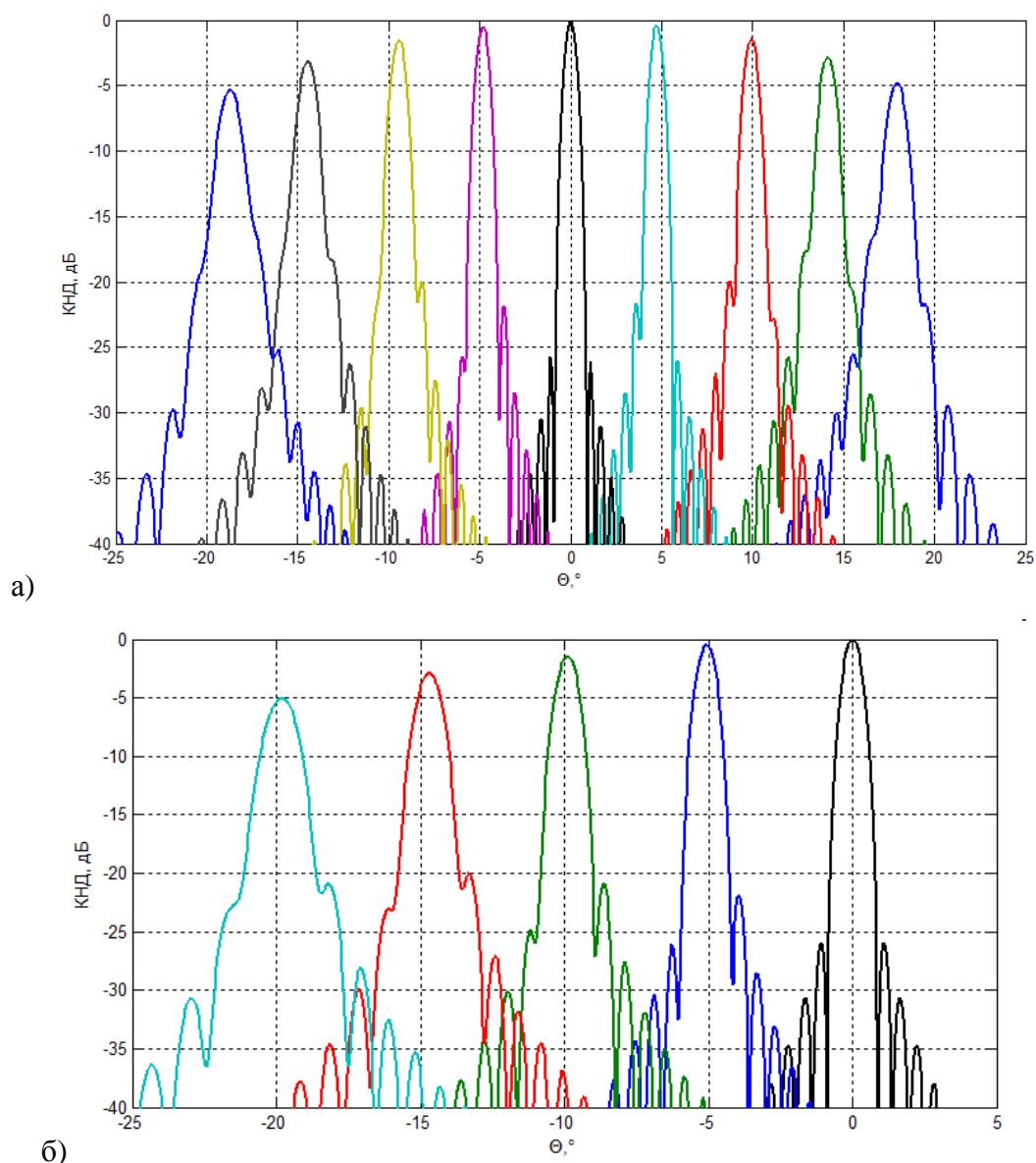


Рис. 7. Копляризационные ДН АС типа SFOC при сканировании в вертикальной (а) и горизонтальной плоскостях, нормированные на величину КНД центрального луча.

Таблица 2. Ширина диапазона отклонения луча по уровню КИП 40%, градусов (ширин ДН)

Положение облучателей	Горизонтальная плоскость		Вертикальная плоскость	
	SFOC	FFOC	SFOC	FFOC
Плоская решетка	14,5° (21)	14,5° (21)	16° (23)	10,5° (15)
Оптимальное положение	29° (42)	29° (42)	28° (40,5)	23,5° (34)

Среди известных автору публикаций, в которых в качестве МЗА рассматриваются "классические" офсетные двухзеркальные антенны Кассегрена и Грегори, как непрофилированные, так и удовлетворяющие условию синусов Аббе, получаемые сектора сканирования сопоставимых по апертуре антенн существенно ниже приведенных в нижней строке таблицы 2. Так, например, в работах В.А. Калошина и Е.В. Фроловой [13-15] представлены результаты исследования возможностей сканирования офсетных апланатических двухзеркальных АС диаметром раскрыва 100 длин волн, построенных на основе схем Кассегрена и Грегори. Для нескольких рассмотренных вариантов геометрии АС получено, что ширина сектора сканирования по уровню КИП 40% в каждой из двух плоскостей сканирования составляет не более 15°. При этом исследованные апланатические АС имеют значительно меньшие контррефлекторы, чем у рассматриваемых антенн Драгоне.

Далее мы будем говорить об исследуемых антеннах Драгоне только в контексте результатов, полученных при оптимальном положении облучателей.

Составляющие полного КИП

Немного подробнее рассмотрим составляющие полученных величин КИП при отклонении луча в вертикальной плоскости для обеих АС. Представим суммарный КИП η_{Σ} следующим образом:

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{\theta} \cdot \eta_{spil} \cdot \eta_{ap}, \quad (4)$$

где η_{θ} характеризует снижение усиления вследствие уменьшения площади апертуры в перпендикулярной плоскому фронту плоскости при отклонении луча, η_{spil} описывает долю мощности, достигающую главного зеркала (т.е. характеризует переливание за края контррефлектора и параболоида), а η_{ap} – апертурный КИП, характеризующий амплитудно-фазовое распределение и кроссполаризацию на поверхности главного зеркала (в его раскрыве).

Для определения выражения для составляющей η_θ рассмотрим главное зеркало в плоскости сканирования (рис. 8). Координаты крайних точек А и В сечения рефлектора плоскостью XZ составляют [10]:

$$A = \left(h - \frac{D}{2}; 0; \frac{(2h - D)^2}{16F} - F \right), \quad (5)$$

$$B = \left(h + \frac{D}{2}; 0; \frac{(2h + D)^2}{16F} - F \right), \quad (6)$$

где

$$h = 2F \cdot \operatorname{tg}(\theta_0/2) \quad (7)$$

определяет смещение параболоида относительно оси OZ и равно расстоянию от центра сечения рефлектора плоскостью XZ до оси OZ.

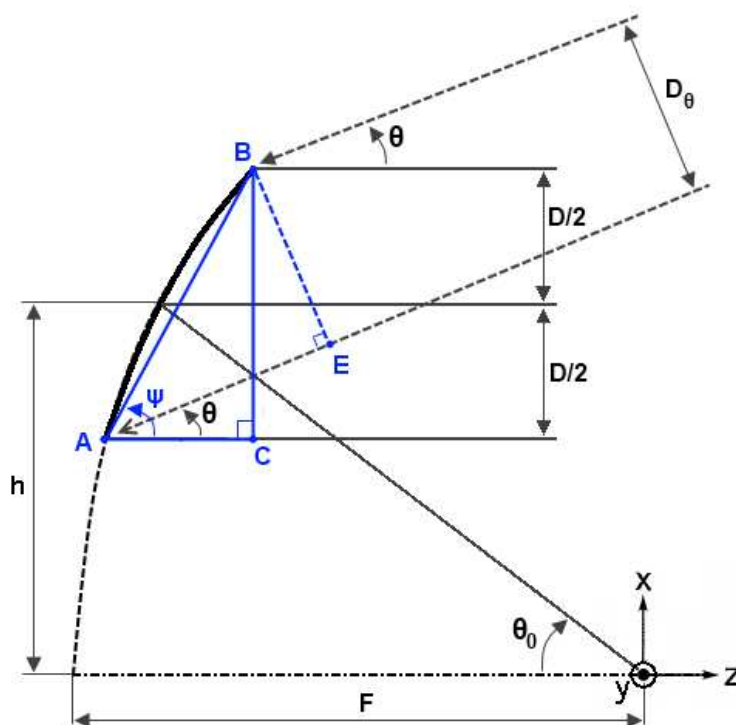


Рис. 8. К определению габарита раскрыва в плоскости симметрии.

Обозначим за D_m расстояние между точками А и В, которое характеризует максимально возможный размер апертуры в плоскости XZ при сканировании. Отметим, что здесь и далее при выводе искомого выражения для составляющей

η_θ , говоря об апертуре отклоненного луча, мы будем иметь ввиду проекцию главного зеркала на плоскость, ортогональную соответствующему плоскому фронту волны. Тогда из (5), (6), (7) и с учетом геометрии треугольника ABC имеет

$$D_m = D \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{h}{2F}\right)^2} \quad (8)$$

и

$$\psi = \arcsin \frac{D}{D_m} = \arcsin \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{h}{2F}\right)^2}} \quad (9)$$

где ψ – угол между апертурой AB и осью OZ. Размер апертуры зеркала BE в плоскости XZ при отклонении плоского падающего фронта на угол θ обозначим как D_θ . Из геометрии треугольников ABC и ABE

$$D_\theta = D \cdot \frac{\sin(\psi - \theta)}{\sin \psi} \quad (10)$$

для $180^\circ - \psi \leq \theta \leq \psi$. Отсюда, считая двухмерные апертуры эллипсами и учитывая, что при сканировании в вертикальной плоскости габарит апертуры в плоскости YZ постоянен, можно показать, что

$$\eta_\theta = \frac{D_\theta}{D} = \frac{\sin(\psi - \theta)}{\sin \psi}. \quad (11)$$

Данное соотношение справедливо для широкого класса антенн, а не только для антенн Драгоне.

На рис. 9 представлены составляющие КИП в логарифмическом масштабе, рассчитанные для обеих анализируемых АС. Здесь по оси абсцисс отложены углы отклонения лучей, выраженные в ширинах ДН. Данные зависимости позволяют заключить, что в области отрицательных углов θ антенна Драгоне типа FFOC характеризуется более быстрым снижением как η_{spil} , так и η_{ap} по сравнению с конфигурацией SFOC. Положительные уровни составляющих η_θ в области отрицательных углов наблюдения связаны с тем, что в самом определении суммарной величины КИП (3) мы для всех лучей использовали

нормировку на величину $\text{КНД}_{\text{ид}}$ апертуры центрального луча, а при $\theta < 0^\circ$ справедливо неравенство $D_\theta > D$.

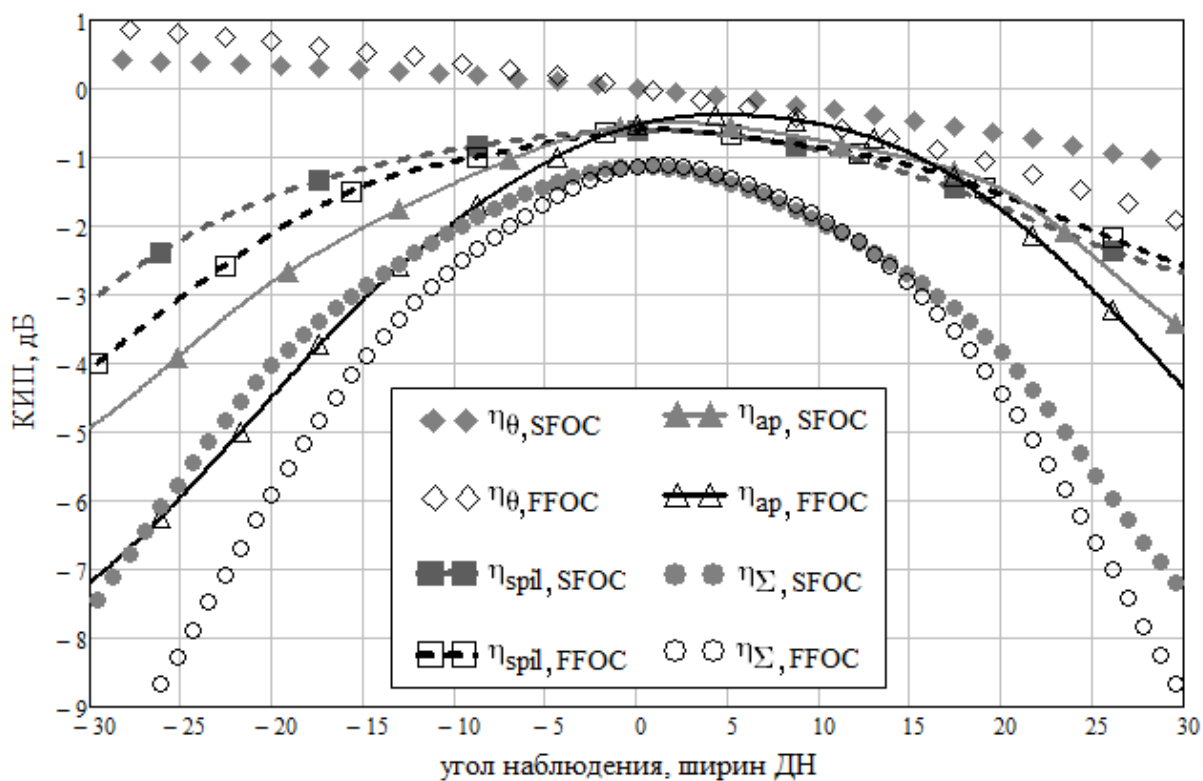


Рис. 9. Составляющие КИП при сканировании в вертикальной плоскости.

Кроссполяризационные характеристики

Приведем результаты расчета кроссполяризационных характеристик исследуемых антенн Драгоне. На рис. 10 представлены нормированные ко- и кроссполяризационные ДН в плоскости $\varphi=45^\circ$ (D-плоскости) для обоих типов АС. Обращают на себя внимание низкие уровни паразитной составляющей поляризации (около -60 дБ и -56 дБ для АС конфигураций SFOC и FFOC соответственно), что также является характерной особенностью таких антенн и связано не только с большими габаритами контррефлектора и удовлетворением условию (2), но и с малой кривизной обоих зеркал, являющейся следствием большой величины фокусного расстояния F .

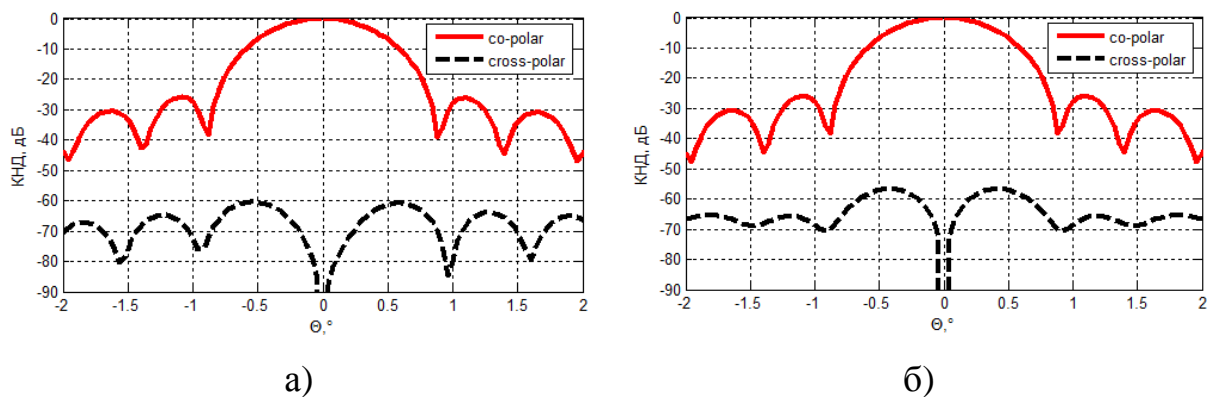


Рис. 10. Ко- и кроссполяризационные ДН центрального луча в D-плоскости для АС типа SFOC (а) и FFOC (б).

На рис. 11 отображено семейство ко- и кроссполяризационных ДН в логарифмическом масштабе для трех лучей антенны Драгоне типа SFOC, построенной в UV-координатах.

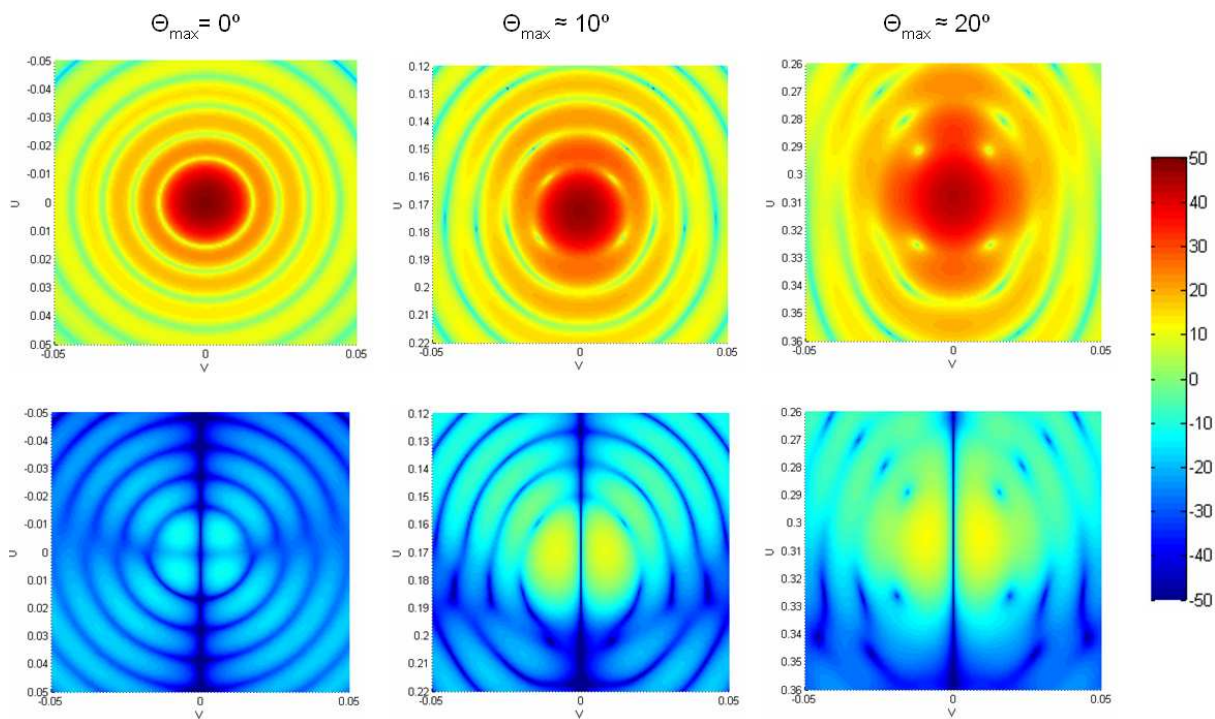


Рис. 11. Ко- и кроссполяризационные ДН в логарифмическом масштабе для центрального и двух отклоненных лучей при сканировании в вертикальной плоскости для АС типа SFOC.

На рис. 12 построены графики отношения максимальной величины кроссполяризационной составляющей к максимуму кополяризационной при сканировании для антенны Драгоне типа SFOC. Соответствующий уровень кроссполяризации (КП) растет быстрее при сканировании в горизонтальной плоскости, однако при отклонении луча от оси АС на 10 ширин ДН (7°) он не превышает -35 дБ и составляет не более -29 дБ при отклонении на вдвое больший угол. АС типа FFOC характеризуется схожими зависимостями с немного более высокими уровнями КП.

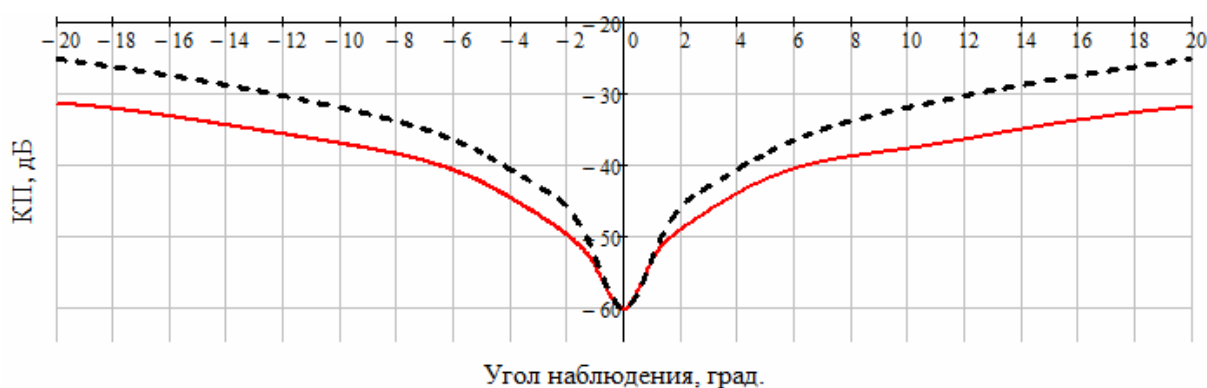


Рис. 12. Кроссполяризация при сканировании в вертикальной (сплошная кривая) и горизонтальной (пунктирная кривая) плоскостях для АС типа SFOC.

Заключение

Параболические двухзеркальные несимметричные антенны, построенные на базе так называемой схемы Драгоне, при работе в качестве МЗА позволяют обеспечить достаточно широкие сектора обзора при малой деградации луча и низких уровнях КП. Для таких АС (в особенности, для антенн конфигурации SFOC) характерно наличие крупного контррефлектора и облучателей с относительно высокими коэффициентами усиления.

Для рассмотренных в работе антенн Драгоне с апертурой диаметром 100 длин волн при оптимизации положения и наклона облучателей удалось получить ширину сектора сканирования по уровню КИП=40% вплоть до около 29° (42 ширин ДН) в горизонтальной и вертикальной плоскостях. При этом АС типа FFOC обладает более скромными возможностями сканирования в

вертикальной плоскости, чем антенна Драгоне типа SFOC. Возможности сканирования для облучающей системы типа плоской решетки примерно в 2 раза скромнее, чем для облучателей с оптимальным положением.

АС на базе антенн Драгоне видятся перспективным вариантом построения многолучевых зеркальных антенн для решения определенного круга задач, по крайней мере, там, где необходимо обеспечить двухмерное (двухкоординатное) сканирование.

Автор выражает благодарность д.т.н. Б.Л. Когану, д.ф-м.н. В.А. Калошину и к.т.н. А.В. Шишлову за ценные советы и замечания, касающиеся материала статьи.

Литература

1. Dragone C. First-order correction of aberrations in Cassegrainian and Gregorian antennas // IEEE Trans. on AP. 1983. V. AP-31. No. 5. P. 764-775.
2. Dragone C. Multibeam antenna arrangement with minimal astigmatism and coma. US Patent № 4503435. 1985.
3. Mizuguchi, Y., Akagawa, M., Yokoi, H. Offset Gregorian Antenna. – 1978. Electrical. Communications in Japan 61-B 3, 58.
4. Makino S., Kobayashi Y., Katagi T. Front fed offset Cassegrain type multibeam antenna // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium Digest. 1985. V. 23. P. 341 – 344.
5. Jorgensen R, Nielsen P. Development of dual reflector multibeam spacecraft antenna analysis and synthesis software // Intelsat contract Intel-304, Ticsra, Copenhagen, Denmark, Final Rep. S-17541, 1984.
6. Jorgensen R., Balling P., English W. Dual offset reflector multibeam antenna for international communication satellite applications // IEEE Trans. on Antennas Propag., vol. AP-33, no. 12, pp. 1304–1312, Dec. 1985.
7. Tanaka H., Mizusawa M. Elimination of cross-polarization in offset dual-reflector antennas // Electron. Commun. Japan, vol. 58-B, no. 12, pp. 71-78, 1975.

8. Jones S.R., Kelleher K.S. A new low noise, high gain antenna // IRE Internat. Convent. Rec. 1963. V.11. P. 11-17.
9. Современные проблемы антенно-волноводной техники. Под ред. Пистолькорса А.А. – М.: Наука, 1967.
10. Granet. C. Designing classical Dragonian offset dual-reflector antennas from combinations of prescribed geometric parameters // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2001. V. 42. I. 6. P. 100-107.
11. Chang S., Prata, A. The design of classical offset Dragonian reflector antennas with circular apertures // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2004. V. 52. No. 1. P. 12 - 19.
12. Ludwig A.C. The Definition of Cross Polarization // IEEE Transaction on Antennas and Propagation. 1973. V. 21. P. 116-119.
13. Калошин В.А., Фролова Е.В. Моделирование офсетной двухзеркальной апланатической антенны типа Грегори // Журнал радиоэлектроники. 2007. №6.
14. Калошин В.А., Фролова Е.В. Моделирование офсетной двухзеркальной апланатической антенны типа Кассегрена. - Журнал радиоэлектроники, 2007, №7.
15. Калошин В.А., Фролова Е.В. Характеристики офсетных двухзеркальных апланатических антенн // Антенны, 2008. №10. С. 9-13.