

УДК 621.396.67

DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-1-93-105

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ ФАЗОВЫХ АБЕРРАЦИЙ ОСЕНЕСИММЕТРИЧНЫХ ДВУХЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН

Б.Н. ЛАСКИН¹, Э.А. БОЛЕЛОВ¹

¹*Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

Обзорные аэродромно-трассовые радиолокационные системы (ОАТ РЛС) гражданской авиации предназначены для обнаружения воздушных объектов и определения их дальности и параметров движения, при этом основным типом используемых антенных систем по-прежнему остаются зеркальные антенны. ОАТ РЛС имеют, как правило, антенны с двухлучевой диаграммой направленности, конструктивно зеркало антенны выполнено в виде ферменной сварной конструкции. Перспективным направлением развития ОАТ РЛС является применение активных фазированных антенных решеток (АФАР). ОАТ РЛС на основе ФАР позволяют существенно улучшить такие критически важные тактические и технические показатели, как точность определения координат, число одновременно сопровождаемых целей. Однако применение ФАР не решает одной из главных проблем – наличия в составе ОАТ РЛС опорно-поворотного устройства. Принципиальная необходимость опорно-поворотного устройства приводит к необходимости применения подвижных соединений фидерных линий, что при большом числе антенных элементов, применяемых в АФАР, существенно снижает потенциальное время наработки на отказ. Представляется перспективным применение в ОАТ РЛС антенных систем на основе нескольких стационарных многолучевых двухзеркальных антенн, выполненных по осесимметричной схеме. В статье предложена методика оценки aberrаций двухзеркальных осесимметричных антенн на основе полиномиального разложения функции эйконала по плоскости апертуры главного зеркала. Получены аналитические выражения для функций отображения и поворота плоскости сканирования двухзеркальной осесимметричной антенны с произвольными параметрами, построенной на основе вырезок из центрально-симметричных поверхностей вращения второго порядка. Показано, что аплантические антенны теряют свои сканирующие свойства при переходе к осесимметричному варианту.

Ключевые слова: обзорная радиолокационная станция, фазовые aberrации, двухзеркальная осесимметричная антенна, апертура, фазовый фронт, эйконал, фокус системы, поверхность сканирования.

ВВЕДЕНИЕ

Качество функционирования радиолокационных станций (РЛС) в большей степени зависит от свойств и параметров применяемых антенн. Использование многолучевых антенн в составе радиолокационных станций позволяет существенно повысить их тактические и технические характеристики.

В то же время используемые в составе радиолокационных комплексов «ЛИРА-Т» и «УТЕС-ТМ» зеркальные антенны построены по однозеркальной двухлучевой схеме и обладают меньшей точностью в угломестной плоскости по сравнению с комплексом «СОПКА-2», использующим многолучевую фазированную антенную решетку (ФАР).

В отличие от ФАР двухзеркальные осесимметричные антенны позволяют добиться формирования набора парциальных диаграмм направленности (ДН) с использованием меньшего количества антенных элементов. Упрощение конструкции антенны позволяет уменьшить расходы на содержание и эксплуатацию антенной части РЛС.

Отклонение парциальных ДН от направления осевого излучения в зеркальных антеннах осуществляется за счет выноса облучателя из фокуса. При этом проявляется деградация парциальных ДН: уменьшается коэффициент усиления (КУ) и увеличивается уровень боковых лепестков (УБЛ). Искажения возникают из-за фазовых aberrаций волнового фронта (отклонения фазового фронта от идеального сферического или плоского), отраженного от поверхности главного зеркала. Aberrации являются основным фактором, ограничивающим сектор обзора зеркальных систем.

Анализ литературы [1–6, 8, 9] показал, что в открытой печати практически отсутствуют аналитические подходы к исследованию aberrаций многолучевых осесимметричных двухзеркальных антенн (ДЗА). Обычно авторы предпочитают синтез антенны на основе приближения геометрической оптики (ГО приближение) и оптимизации численными методами.

Настоящая статья посвящена разработке методики расчета коэффициентов фазовых aberrаций осесимметричных ДЗА. Предлагается использовать полиномиальное разложение функции эйконала по плоскости апертуры главного зеркала. В статье ставится задача получения аналитических выражений, позволяющих осуществлять анализ осесимметричных ДЗА на предмет возникающих в них aberrаций без осуществления ресурсоемкого расчета ДН, что позволяет упростить процедуру анализа и оптимизации осесимметричных ДЗА.

АНАЛИЗ ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ЦЕНТРАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОЙ ДВУХЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ

Под ДЗА будем понимать системы (рис. 1) [7], содержащие две отражающие поверхности, участвующие в построении изображения. Главное зеркало строит изображение в своем фокусе F_1' , а вторичное переносит его во вторичный фокус F_2' . Каждое из зеркал представляет собой поверхность второго порядка и меняет сходимость и aberrации пучка лучей.

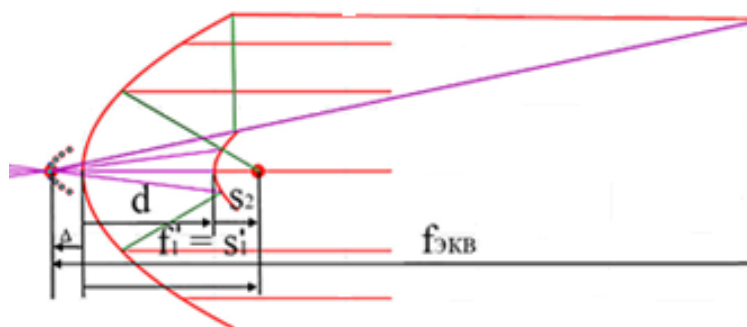


Рис. 1. Основные размеры двухзеркальной системы
Fig. 1. Basic parameters of a dual reflector system

Общее фокусное расстояние ДЗА $f_{экв}$ называется эквивалентным фокусным расстоянием.

Обозначим через q и β отношения: $q = s_2 / f_1'$, $\beta = -s_2' / s_2$, где s_2 , s_2' имеют физический смысл в соответствии с рис. 1, f_1' – фокусное расстояние главного зеркала.

Система соотношений, определяющих габаритные параметры двухзеркальной системы в зависимости от параметров q , β и $f_{экв}$, приведена в работе [7].

Для расчета фазового распределения в плоскости апертуры главного зеркала воспользуемся подходом, описанным в работах [8, 9]. Приводятся расчеты для систем «первого типа» (типа Кассегрена) и «второго типа» (типа Грегори) (рис. 2).

При расположении источника в точке фокуса системы O в апертуре главного зеркала телескопической системы формируется синфазный фронт. Предположим, что только один луч, выходящий из источника под углом α , попадает в заданную точку B главного зеркала, т. е. обеспечивается взаимно-однозначное соответствие между каждой точкой главного зеркала B и углом α выхода луча из источника O , которое описывается функциями отображения:

$$R = \sqrt{(X_B^2 + Y_B^2)} = R(\alpha), \quad \alpha = \alpha(R).$$

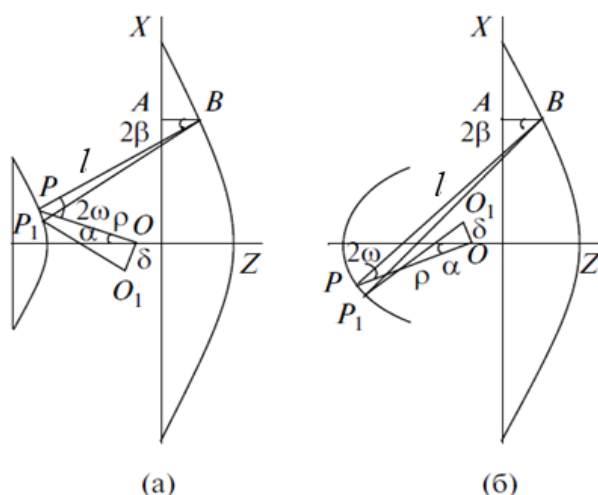


Рис. 2. Продольное (сагиттальное) сечение систем 1-го (а) и 2-го (б) типа в плоскости XZ декартовой системы координат

Fig. 2. The Sagittal section of 1st and 2nd types systems (DRS) in XZ plane

Пусть точка B на главном зеркале имеет декартовы координаты $(R \cos \varphi, R \sin \varphi, F(R))$, где $Z = F(R)$ – уравнение поверхности главного зеркала.

Пусть точка O_1 с координатами $(-\delta_R, 0, -\delta_Z)$ – положение смещенного из фокуса источника. Предположим, что при смещении источника в точку O_1 взаимно-однозначное соответствие точек апертуры и множества выходящих из O_1 лучей сохраняется. При этом всегда существует луч, соединяющий точку O_1 и точку B через точку P_1 . Оптический путь (эйконал) вдоль этого луча равен сумме длин двух отрезков:

$$\Phi(BO_1) = |BP_1| + |PO_1|. \quad (1)$$

В [8, 9] были проведены общие аналитические выкладки, позволяющие рассматривать любые двухзеркальные системы с точностью до поворота системы. Фазовое распределение в плоскости апертуры главного зеркала определяется выражением

$$\begin{aligned} \Phi(R, \varphi) = & \rho + l + \delta_R \sin \alpha \cos \varphi - \delta_Z \cos \alpha + \\ & + \frac{\delta_R^2}{2} \left(\frac{\cos^2 \varphi}{L_1} \cos^2 \alpha + \frac{\sin^2 \varphi}{L_2} \right) + \frac{\delta_R \delta_Z}{2L_1} \cos \varphi \sin 2\alpha + \frac{\delta_Z^2}{2} \sin^2 \alpha, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\frac{1}{L_1} = \rho \left(1 \mp l \frac{d\alpha}{dR} \right)$, $\frac{1}{L_2} = \rho \left(1 \mp l \frac{\sin \alpha}{R} \right)$, знак минус для систем первого типа, знак плюс для систем второго типа.

На рис. 3 приведено сравнение рассчитанных фазовых распределений методом прямой трассировки (рис. 3, а) и по формуле (2) (рис. 3, б).

Погрешность расчета фазы по формуле (2). Для центрально-симметричных телескопических систем точность расчета фазы оказывается порядка $\pi/4$ при диаметре главного зеркала до 2 м. Заметим, что общность рассуждений при выводе выражения (2) верна и для нетелескопических систем.

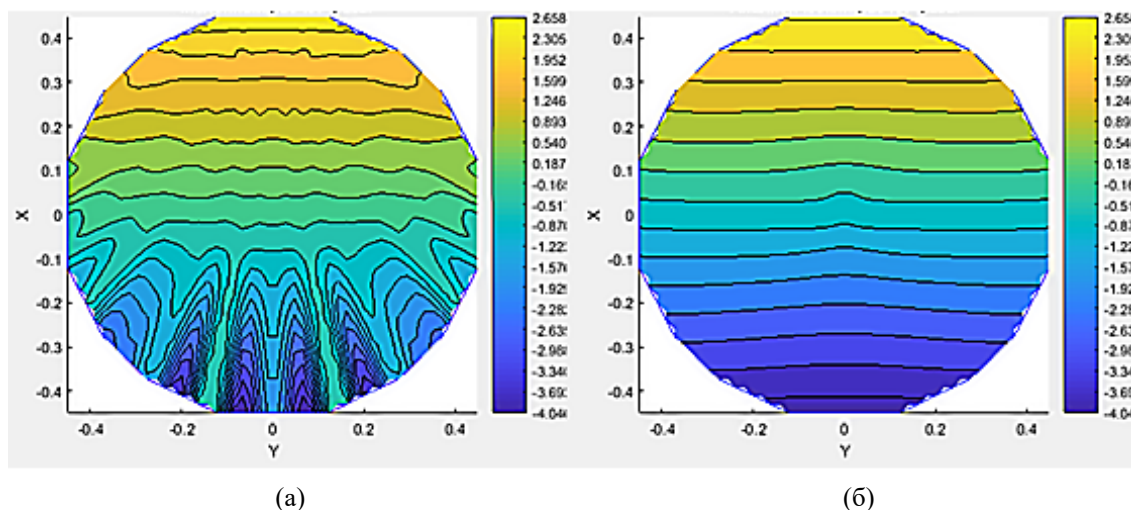


Рис. 3. Фазовое распределение в плоскости апертуры
Fig. 3. The calculated phase distribution in the aperture plane

Для использования соотношения (2) требуется установить некоторые функциональные зависимости. Во-первых, требуется установить закон отображения $R = R(\alpha)$ и обратный ему $\alpha = \alpha(R)$, входящие в выражения для определения $\frac{1}{L_1}$, $\frac{1}{L_2}$. Во-вторых, требуется определить положения парциальных фокусов, соответствующих произвольным направлениям излучения плоского фронта волны.

ФУНКЦИЯ ОТОБРАЖЕНИЯ КООРДИНАТ ДВУХЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ

Закон отображения $\alpha = \alpha(R)$ может быть найден путем решения геометрической задачи (рис. 4). Пусть система отсчета связана с фокусом системы. Обратим внимание, что фокус системы, строго говоря, может не совпадать с фокусом вторичного зеркала.

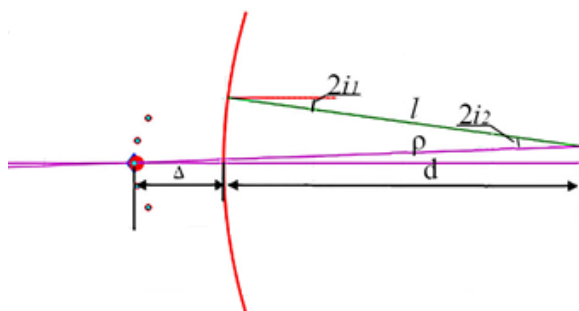


Рис. 4. Геометрия отражения луча в двухзеркальной системе
Fig. 4. The geometry of beam reflection in a dual reflector system

Пусть плоский фронт лучей падает на поверхность зеркала. Плоскость фронта ортогональна оси центральной симметрии образующих системы. Тогда в результате отражения луча от двух поверхностей

$$\alpha = 2i_2 - 2i_1, \quad (3)$$

$$r_2 = r \sin \alpha, \quad (4)$$

$$Z_1 = \rho \cos \alpha - l \cos 2i_1, \quad (5)$$

$$R_1 = \rho \sin \alpha + l \sin 2i_1, \quad (6)$$

где i_1, i_2 – углы падения луча на главное и вторичное зеркала, Z_1, R_1 – координаты точки пересечения луча со вторичным зеркалом.

Система соотношений (3)–(6) не может быть решена без внесения уточнений. С целью введения взаимной однозначности отображения α и R отметим, что функция поверхности второго порядка может быть описана общим уравнением $y(x)^2 = 2px - (1 - e^2)x^2$, ($p > 0$).

Введем систему преобразований, описывающих поверхность зеркал в исходной системе:

$$z_2 = d - \Delta + z_{22}, \quad (7)$$

$$z_{22} = \text{sign}(p_2) \sqrt{2|p_2|r_{22} - (1 - e_2^2)r_{22}^2}, \quad (8)$$

$$Z_1 = Z_{12} - \Delta, \quad (9)$$

$$Z_{12} = \sqrt{2P_1R_{12} - (1 - e_1^2)R_{12}^2}, \quad (10)$$

где $r_{22} = r_2$, p_2, P_1 – определяют фокальный параметр образующей вторичного и главного зеркал.

Величина Δ будет положительной, если фокус системы находится перед главным зеркалом, и отрицательной в противном случае.

Взаимосвязь величин α и r_2 определяется из решения уравнений (4)–(10):

$$\text{tg} \alpha(r_2) = \frac{r_2}{d - \Delta + \text{sign}(p_2) \sqrt{2|p_2|r_2 - (1 - e_2^2)r_2^2}}. \quad (11)$$

Для удобства преобразований введем функцию $Q(r_2) = \sqrt{2|p_2|r_2 - (1 - e_2^2)r_2^2}$. Тогда выражение (11) перепишем в виде

$$\text{tg} \alpha(r_2) = \frac{r_2}{d - \Delta + \text{sign}(p_2)Q(r_2)}. \quad (12)$$

Взаимосвязь величин ρ и r_2 :

$$\rho(r_2) = \sqrt{r_2^2 + [d - \Delta + \text{sign}(p_2)Q(r_2)]^2}. \quad (13)$$

В силу того, что поверхности зеркал заданы аналитически, для них могут быть рассчитаны углы касательных к поверхностям зеркал. Выполняются соотношения:

- для главного зеркала:

$$\text{tg}(k_1) = \text{ctg}(i_1) = \frac{dZ_{12}}{dR} = \frac{P_1 - (1 - e_1^2)R}{\sqrt{2P_1R - (1 - e_1^2)R^2}}, \quad (14)$$

- для вторичного зеркала:

$$\operatorname{tg}(k_2) = \pm \operatorname{ctg}(\alpha - i_2) = \pm \operatorname{sign}(p_2) \frac{|p_2| - (1 - e_2^2)r_2}{Q(r_2)}, \quad (15)$$

где k_1, k_2 – углы между осью OZ и касательными к поверхностям главного и вторичного зеркала, знак минус для систем первого типа, знак плюс для систем второго типа.

Для упрощения записи введем ряд обозначений: $C(R) = \operatorname{tg}(i_1) = \frac{\sqrt{2P_1R - (1 - e_1^2)R^2}}{P_1 - (1 - e_1^2)R}$,

$$A(r_2) = (\operatorname{ctg}(\alpha - i_2))^{-1} = \operatorname{tg}(\alpha - i_2) = \pm \operatorname{sign}(p_2) \frac{Q(r_2)}{|p_2| - (1 - e_2^2)r_2}.$$

Перепишем соотношение (15) относительно $\operatorname{tg}(i_2)$:

$$\operatorname{tg}(i_2) = \frac{\operatorname{tg}\alpha - A(r_2)}{1 + \operatorname{tg}\alpha A(r_2)}. \quad (16)$$

Подставим соотношение (3) в (15):

$$A(r_2) = \operatorname{tg}(\alpha - i_2) = \operatorname{tg}(i_2 - 2i_1) = \frac{\operatorname{tg}(i_2) - \operatorname{tg}(2i_1)}{1 + \operatorname{tg}(i_2)\operatorname{tg}(2i_1)}. \quad (17)$$

Подстановкой соотношений (12) и (16) получим выражения для параметрического задания переменной $R(r_2)$

$$\left\{ \begin{array}{l} R = \frac{P_1(1 + C^2(1 - e_1^2) + \sqrt{C^2(1 - e_1^2) + 1})}{(1 - e_1^2)(C^2(1 - e_1^2) + 1)}, e_1^2 \neq 1 \\ R = \frac{P_1 C^2}{2}, e_1^2 = 1 \end{array} \right. \quad (18)$$

где $C = \frac{A \operatorname{tg}(i_2) \pm (1 + \sqrt{(A^2 + 1)(\operatorname{tg}^2(i_2) + 1)})}{A - \operatorname{tg}(i_2)}.$

Система выражений (6), (12)–(18) позволяет однозначно задать соотношение всех искоемых величин через параметр r_2 . Полученные соотношения являются общими и не накладывают ограничений на параметры системы.

ФУНКЦИЯ ПОВОРОТА ПАРАКСИАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

Для отклонения луча от направления осевого излучения используется вынос облучателя из фокуса. Совокупность точек вблизи фокуса системы, характеризующихся минимальными фазовыми aberrациями при отклонении угла прихода фазового фронта от направления осевого излучения, называется поверхностью сканирования.

В нецентрированных оптических системах, где оптические оси системы могут быть наклонены относительно друг друга, поверхность сканирования имеет поворот как в сагиттальной, так и в меридиональной плоскостях. Несмотря на то, что рассматриваемые осесиммет-

ричные системы обладают центральной симметрией образующих зеркал, а их оптические оси совмещены, наблюдается поворот поверхности сканирования.

Поверхности основного и вспомогательного зеркал рассматриваются как элементы нецентрированной оптической системы. Если изменение фокального параметра по поверхности апертуры зеркала относительно невелико, ДЗА может быть представлена как совокупность наклонных сферических зеркал с фокусными расстояниями F_1' , F_2' , соответствующие радиусы кривизны зеркал в точках отражения луча, падающего в центр главного зеркала, $R_1' = 2F_1'$, $R_2' = 2F_2'$.

Для любой поверхности второго порядка параксиальное фокусное расстояние может быть получено по формуле [7]

$$f_x' = f_0 + X^2 \cdot \frac{(1+e^2)}{8f_0}. \quad (19)$$

Параксиальные радиусы кривизны поверхностей главного и вторичного зеркал могут быть определены путем подстановки закона отображения (18) в выражение (19).

Рассмотрим структуру хода лучей при преломлении на одиночном наклонном зеркале.

С учетом того, что ДЗА обладает симметрией в меридиональной плоскости, достаточно рассмотреть задачу наклона изображения в сагиттальной плоскости.

Для произвольного луча, претерпевающего преломление на одиночной сферической поверхности, выполняется сагиттальный инвариант Гульстарда – Юнга [10]:

$$n' \left(\frac{1}{s'} - \frac{\cos \varepsilon'}{r} \right) = n \left(\frac{1}{s} - \frac{\cos \varepsilon}{r} \right), \quad (20)$$

где n , n' – абсолютные показатели преломления сред, r – радиус кривизны поверхности, s , s' – оптические длины пути от предмета до зеркала и от зеркала до изображения.

Наклон изображения может быть найден исходя из решения геометрической задачи, представленной на рис. 5:

$$-\frac{1}{s^2 \cos \varepsilon} \frac{(p-s) \operatorname{tg} \psi_s + p \operatorname{tg} \varepsilon}{1 - \frac{p}{r \cos \varepsilon}} + \frac{\operatorname{tg} \varepsilon}{r} = \frac{1}{s'^2 \cos \varepsilon'} \frac{(p'-s') \operatorname{tg} \psi_{s'}' + p' \operatorname{tg} \varepsilon'}{1 - \frac{p'}{r \cos \varepsilon'}} + \frac{\operatorname{tg} \varepsilon'}{r}.$$

В частном случае, когда оба луча пересекаются в точке преломления, отрезки $p = p' = 0$, тогда инвариант наклонов сагиттального изображения упрощается:

$$\frac{\operatorname{tg} \psi_{s'}'}{s' \cos \varepsilon'} + \frac{\operatorname{tg} \varepsilon'}{r} = \frac{\operatorname{tg} \psi_s}{s \cos \varepsilon} + \frac{\operatorname{tg} \varepsilon}{r}. \quad (21)$$

Пусть плоскость элемента предмета перпендикулярна центральному лучу ($\psi_s = 0$), учитывая равенство углов при отражении $\varepsilon' = -\varepsilon$: $\operatorname{tg} \psi_{s_1}' = \frac{2 \operatorname{tg} \varepsilon_1}{r} s_1' \cos \varepsilon_1$. Для бесконечно удаленного предмета при $s = \infty$ отрезок s' переходит в фокальный отрезок s_{F1}' , тогда выражение (20) преобразовывается к виду $s_{F1}' \cos \varepsilon_1 = \frac{r}{2}$.

Наклон сагиттального изображения после отражения от одиночного сферического зеркала равен $\operatorname{tg} \psi_{s_1}' = \operatorname{tg} \varepsilon_1$.

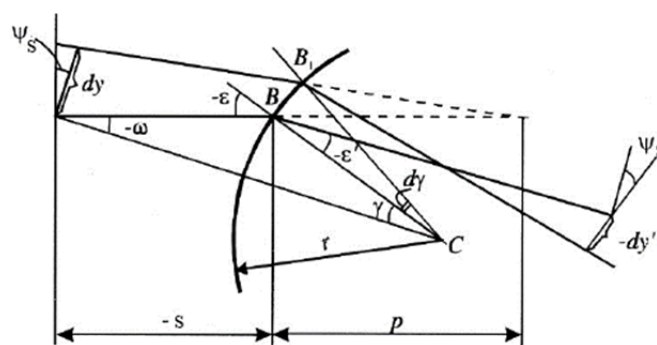


Fig. 5. Image tilt in the sagittal plane

Исходя из вышеуказанного, перепишем условие (8) для поворота плоскости изображения при отражении от второй поверхности:

$$\frac{tg\Psi_{s_2}'}{s_2' \cdot \cos \varepsilon_2} - \frac{tg\varepsilon_2}{r^2} = \frac{tg\varepsilon_1}{(s_{F1}' - \tilde{d}) \cdot \cos \varepsilon_2} + \frac{tg\varepsilon_2}{r^2}. \quad (22)$$

Перепишем уравнение (9) относительно $tg\psi_{s_2}'$:

$$tg\psi_{s_2}' = \frac{2tg\varepsilon_2 \cdot s_2' \cdot \cos \varepsilon_2}{r_2} + \frac{tg\varepsilon_1 \cdot s_2'}{s_{r1}' - \tilde{d}}. \quad (23)$$

Из сагиттального инварианта Гульстарда – Юнга (20) с учетом отражения для второй поверхности получаем

$$\frac{1}{s_2'} + \frac{1}{s_{E1}' - \tilde{d}} = \frac{2\cos\varepsilon_2}{r2}. \quad (24)$$

Выразим s_2' из (24) и подставим в (23), тогда получим

$$tg\psi_{s_2}' = \frac{1}{\cos \varepsilon_2 (r_1 - 2 \cos \varepsilon_1 \tilde{d}) + r_2 \cdot \cos \varepsilon_1} \times (\sin \varepsilon_2 (r_1 - 2 \tilde{d} \cos \varepsilon_1) + \sin \varepsilon_1 \cdot r_2). \quad (25)$$

Наклон изображения (наклон фокальной плоскости) после отражения от вторичного зеркала может быть найден как величина отклонения $tg\psi_{fn}$ относительно центрального луча. С учетом того, что центральный луч отклонен относительно оси OZ на величину $\alpha_{гл}$, итоговый угол будет равен

$$\left\{ \begin{array}{l} \vartheta = \mp \alpha_{\Gamma\Gamma} + \arctg(\operatorname{tg} \psi_{\phi n}), \\ \operatorname{tg} \psi_{\phi n} = \frac{1}{\left(R_{1\Gamma\Gamma}' \cdot \cos i_{2\Gamma\Gamma} - 2l_{\Gamma\Gamma} \cos i_{1\Gamma\Gamma} \cos i_{2\Gamma\Gamma} \right) - R_{2\Gamma\Gamma}' \cdot \cos i_{1\Gamma\Gamma}} \times \\ \times \left(\sin i_{2\Gamma\Gamma} \left(R_{1\Gamma\Gamma}' - 2l_{\Gamma\Gamma} \cos i_{1\Gamma\Gamma} \right) + \sin i_{1\Gamma\Gamma} \cdot R_{2\Gamma\Gamma}' \right), \end{array} \right. \quad (26)$$

где $R_{1\Gamma\Gamma}'$, $R_{2\Gamma\Gamma}'$ – радиусы кривизны зеркал в точках отражения главного луча (луч, падающий в центр апертуры главного зеркала) от главного и вторичного зеркал, рассчитываемые по формуле (19) и соотношениям $R_1' = 2F_1'$, $R_2' = 2F_2'$, угол $i_{1\Gamma\Gamma}$ отражения от главного зеркала, угол $i_{2\Gamma\Gamma}$ отражения от вторичного зеркала, угол $\alpha_{\Gamma\Gamma}$ (рис. 4) отклонения луча после отражения от вторичного зеркала от оси OZ, расстояние $l_{\Gamma\Gamma}$ между точками отражения луча от главного и вторичного зеркал.

При выводе системы соотношений (26) следует использовать принятую в оптике систему знаков:

- радиусы кривизны поверхности считаются положительными, если центр кривизны находится правее, относительно поверхности, на которую падает луч;
- углы между лучами и нормалью к поверхности в точке падения луча считаются положительными, если для совмещения нормали с лучом ее нужно вращать по часовой, и отрицательными в противном случае.

Пример расчета поворота поверхности сканирования приведен на рис. 6. На рисунке знаком «+» отмечена плоскость, соответствующая повороту фокальной плоскости на угол $\alpha_{\Gamma\Gamma}$, знаком «o» отмечена рассчитанная по формуле (26) плоскость, заштрихованными маркерами отмечены положения фазовых центров парциальных облучателей, рассчитанных методом обратной трассировки.

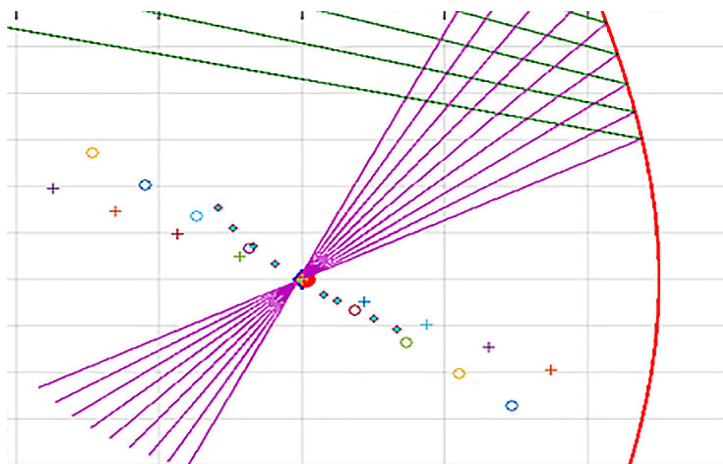


Рис. 6. Поворот плоскости сканирования
Fig. 6. Focal plane rotation

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ ФАЗОВЫХ АБЕРРАЦИЙ ОСЕНЕСИММЕТРИЧНЫХ ДВУХЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН

Пусть некоторому положению смещенного из фокуса облучателя на фокальной плоскости, угол поворота которой определяется из системы соотношений (26), соответствует фазовое распределение, рассчитываемое по формуле (2) и системе соотношений (6), (12)–(18) (рис. 3).

В то же время фазовый фронт в апертуре зеркала в сагиттальном или меридиональном сечении выражается через полиномиальное разложение как

$$\Phi(\rho) = C + \beta_1 \rho^1 + \beta_2 \rho^2 + \beta_3 \rho^3 + \beta_4 \rho^4 + \dots, \quad (27)$$

где ρ – координата точки на апертуре главного зеркала относительно центра зеркала в выбранной плоскости анализа (сагиттальной или меридиональной), C – свободный член разложения, β_i – полиномиальный коэффициент при i -й степени разложения по ρ . Для определения коэффициентов разложения в ряд (27) возможно воспользоваться методом наименьших квадратов.

Для остронаправленных антенн обычно ограничиваются рассмотрением первых трех-четырех слагаемых. Принято считать, что коэффициент β_1 характеризует линейные искажения и дисторсию, β_2 – астигматизм и кривизну поля (погрешность фокусировки), β_3 – кому, а β_4 – сферическую аберрацию.

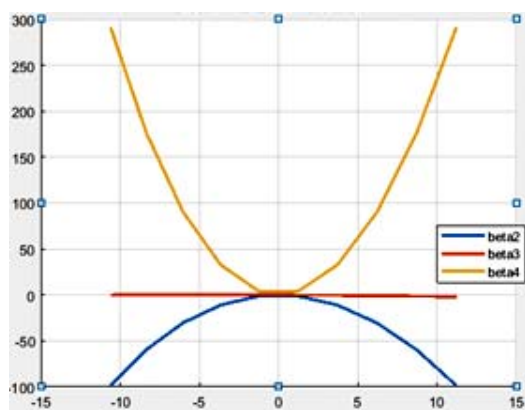


Рис. 7. Зависимости коэффициентов β_i от величины угла ω в сагиттальном сечении
Fig. 7. β_i coefficients dependence of the ω angle value in the sagittal section

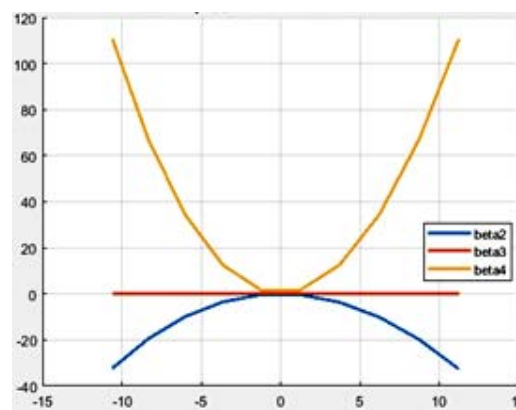


Рис. 8. Зависимости коэффициентов β_i от величины угла ω в меридиональном сечении
Fig. 8. β_i coefficients dependence of the ω angle value in the meridional section

Алгоритм расчета коэффициентов фазовых аберраций осесимметричных двухзеркальных антенн заключается в следующем. Для набора смещений парциальных облучателей в сагиттальном и меридиональном сечении поверхности сканирования производится расчет коэффициентов полиномиального разложения фазового фронта в плоскости апертуры главного зеркала. Коэффициент β_1 характеризует собой поворот плоского фронта излучения $\theta_{ГЛ}$ ($\beta_1 = \tan \theta_{ГЛ}$). Каждый из коэффициентов β_i может обладать постоянной составляющей, линейно зависимой от $\theta_{ГЛ}$ и квадратично зависимой от $\theta_{ГЛ}$ составляющей.

Для иллюстрации алгоритма приведем расчет и анализ апланата-анастигмата с $q = 0,1$, $\beta = 2,2$. Эквивалентное фокусное расстояние ДЗА $f_{экс} = 1$ м, диаметр главного зеркала $D = 1$ м.

Разложение фазового распределения в сагиттальной (рис. 7) и меридиональной (рис. 8) плоскостях апертуры дает зависимости величины коэффициентов $\beta_2, \beta_3, \beta_4$ от величины угла ω – угла поворота плоского фронта излучения.

Как видно из графических данных, благодаря одинаковому виду распределения коэффициентов $\beta_2, \beta_3, \beta_4$ удастся достичь устранения астигматизма. Отношение кривизны поля в сагиттальной и меридиональной плоскостях составляет 1:3. Полученные распределения могут быть разложены в свою очередь в полиномиальный ряд по степеням угла ω .

Также был произведен расчет коэффициентов фазовых aberrаций для различных смещений центра вырезки из образующих зеркал атлантической антенны (рис. 9). Графические данные хорошо иллюстрируют, что несмотря на апланатизм образующей осесимметричной антенны, итоговые aberrации в осесимметричной ДЗА будут сильно зависеть от положения центра вырезки. Например, ДЗА с положением центра вырезки $C = 0,6$ м обладает постоянной (коэффициент a_0) положительной комой и сферической aberrацией, что существенно ухудшает характеристики сканирования антенны.

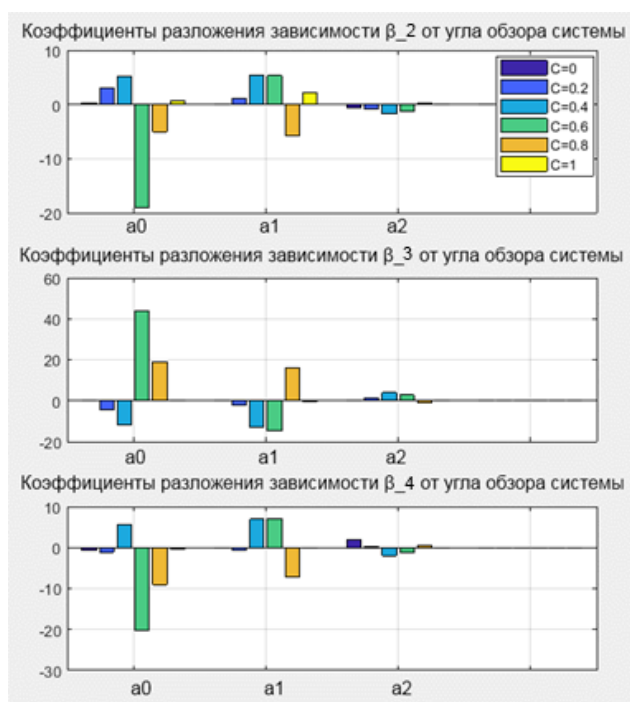


Рис. 9. Коэффициенты разложения $\beta_2, \beta_3, \beta_4$ по степеням угла ω

Fig. 9. $\beta_2, \beta_3, \beta_4$ coefficients of the expansion in ratios of ω -angle

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены расчетные соотношения, позволяющие существенно расширить возможности анализа осесимметричных ДЗА. Разработанная методика оценки aberrаций дает возможность осуществлять не только количественный, но и качественный анализ видов фазовых aberrаций, возникающих в различных схемах построения осесимметричных ДЗА.

Аналитический характер выкладок делает возможным применение описанной методики для задач синтеза и оптимизации осесимметричных двухзеркальных многолучевых антенн с двухкоординатным сканированием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боровиков В.А., Кинбер Б.Е. Геометрическая теория дифракции. М.: Связь, 1978. 248 с.

2. Ермолаев С.В. Синтез двухзеркальных антенн с вынесенным облучателем и эллиптической апертурой // Антенны. 2015. № 3(214). С. 10–15.
3. Гостев В.И., Гряник М.В., Худолий Д.А. Многофункциональные зеркальные антенны. Киев: Радиоаматор, 1999. 317 с.
4. Калошин В.А., Фролова Е.В. Анализ и минимизация aberrаций в широкоугольных планарных зеркальных системах [Электронный ресурс] // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan14/16/text.html> (дата обращения: 05.06.2018).
5. Шишлов А.В. Теория и проектирование зеркальных антенн для радиосистем с контурными зонами обслуживания // Радиотехника. 2007. № 4. С. 39–49.
6. Галимов Г.К. Апланаты. Т. 3. Апланатические телескопы и антенны. М.: Адвансед Солюшенз, 2011. 436 с.
7. Михельсон Н.Н. Оптические телескопы. Теория и конструкция. М.: Наука, 1976. 511 с.
8. Венецкий А.С., Калошин В.А. О распределении эйконала в апертуре двухзеркальной телескопической системы // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57, № 9. С. 1016–1023.
9. Венецкий А.С., Калошин В.А. Об aberrациях эйконала в осесимметричных двухзеркальных телескопических системах // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 4. С. 385–394.
10. Русинов М.М. Композиция нецентрированных оптических систем. 2-е изд., доп. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. 250 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ласкин Борис Николаевич, соискатель кафедры технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ ГА, varislaskin@list.ru.

Болелов Эдуард Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ ГА, e.bolelov@mstuca.aero.

THE METHOD OF CALCULATION OF COEFFICIENTS OF THE PHASE ABERRATIONS OF AXIALLY ASYMMETRIC DUAL REFLECTOR ANTENNAS

Boris N. Laskin¹, Eduard A. Bolelov¹

¹*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

ABSTRACT

Aerodrome-enroute surveillance radar systems (ARSR) of civil aviation are designed for detection of aerial objects and determination of their range and movement parameters. Meanwhile, the reflector-type antennas are still the main type of antenna systems. Radars (ARSR) have, as a rule, antennas with a bidirectional beam, structurally reflector-type antenna is made in the form of a truss welded structure. The use of active phased antenna arrays (APAR) is a promising direction of radars (ARSR) development. Radars (ARSR) based on the phased antenna arrays can significantly improve such critical tactical and technical criteria as: the accuracy of the coordinates determination, the number of simultaneously followed targets. However, the use of APAR does not solve one of the main problems – the presence of a support-rotary device in the radar (ARSR). The principal necessity of a support-rotary device leads to the need of the use of movable joints of feeder lines, which, with a significant number of antenna elements used in the PAR, significantly reduces the potential time before failure. It seems promising to use in the radar antenna systems based on several stationary multi-beam dual-reflector antennas made by axially asymmetric scheme. Methodology of estimation of aberrations of a dual-reflector sensimetrics antenna based on a polynomial expansion of the eikonal function in the

plane of the aperture of the main reflector is proposed in the article. Analytical expressions of the functions of display and rotation of the scanning plane of a dual-reflector axially asymmetric antenna with arbitrary parameters, designed based on clippings from centrally symmetric surfaces of rotation of the second order, are obtained. It is shown that the aplanatic antennas lose their scanning features during the transition to the axially asymmetric variant.

Key words: surveillance radar, phase aberration, axially asymmetric dual reflector antenna, aperture, phase front, eikonal, focus system, scanning surface.

REFERENCES

1. **Borovikov, V.A. and Kinber, B.E.** (1978). *Geometricheskaya teoriya difraktsii* [Geometric diffraction theory]. Moscow: Svyaz, 248 p. (in Russian)
2. **Ermolaev, S.V.** (2015). *Sintez dvukhzernal'nykh anten s vynesennym obluchatelem i ellipticheskoy aperturoy* [Synthesis of dual-reflector antenna with elliptical aperture and offset feeder]. *Antennas*, no. 3(214), pp. 10–15. (in Russian)
3. **Gostev, V.I., Granik, M.V. and Khudolii, D.A.** (1999). *Mnogofunktsionalnyye zerkal'nyye anteny* [Multifunctional reflector antennas]. Kiev: Radioamator, 317 p. (in Russian)
4. **Kaloshin, V.A. and Frolova, E.V.** (2014). *Analiz i minimizatsiya aberratsiy v shirokougol'nykh planarnykh zerkal'nykh sistemakh* [Analysis and minimization of aberrations in wide-angle planar reflector systems] [Electronic resource]. *Journal of Radioelectronics*. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan14/16/text.html> (accessed 05.06.2018). (in Russian)
5. **Shishlov, A.V.** (2007). *Teoriya i proektirovaniye zerkal'nykh anten dlya radiosistem s konturnymi zonami obsluzhivaniya* [Theory and design of reflector antennas for radio systems with contoured servicing area]. *Radiotekhnika* [Radioengineering], no. 4, pp. 39–49. (in Russian)
6. **Galimov, G.K.** (2011). *Aplanaty. T. 3. Aplanaticheskiye teleskopy i anteny* [Aplanats. Vol. 3. Aplanatic telescopes and antennas]. Moscow: Advanced solutions, 436 p. (in Russian)
7. **Mihelson, N.N.** (1976). *Opticheskiye teleskopy. Teoriya i konstruktsiya* [Optical telescopes. Theory and construction]. Moscow: Nauka, 511 p. (in Russian)
8. **Venetskiy, A.S. and Kaloshin, V.A.** (2012). *O raspredelenii eykonala v aperture dvukhzernal'noy teleskopicheskoy sistemy* [About eikonal distribution in the aperture of a dual-reflector telescopic system]. *Journal of Radioengineering and Electronics*, vol. 57, no. 9, pp. 1016–1023. (in Russian)
9. **Venetskiy, A.S. and Kaloshin, V.A.** (2016). *Ob aberratsiyakh eykonala v osesimmetrichnykh dvukhzernal'nykh teleskopicheskikh sistemakh* [About eikonal aberrations in axially symmetric double-reflector telescopic systems]. *Journal of Radioengineering and Electronics*, vol. 61, no. 4, pp. 385–394. (in Russian)
10. **Rusinov, M.M.** (2004). *Kompozitsiya netsentrirovannykh opticheskikh sistem* [Composition of non-centered optical systems]. 2nd ed. St. Petersburg: SPbGU IFMO, 250 p. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boris N. Laskin, Applicant of Technical Maintenance of Aircraft Radio-electronic Equipment Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, varislaskin@list.ru.

Eduard A. Bolelov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Air Transport Radio-Electronic Equipment Maintenance Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, edbolelov@mail.ru.

Поступила в редакцию
Принята в печать

12.06.2018
17.01.2019

Received
Accepted for publication

12.06.2018
17.01.2019