# МЕТОД «ИЗОБРАЖЕНИЙ» ДЛЯ РАСЧЁТА 3-Х МЕРНОГО ХОДА ЛУЧЕЙ В АНТЕННЫХ СИСТЕМАХ ПОДЧИНЯЮЩИХСЯ ЗАКОНАМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Ерохин Е.В., Макаренко А.В., Правдивцев А.В.

Федеральное космическое агентство РФ ОАО «НПК «Системы прецизионного приборостроения» E-mail: egens@rambler.ru

### Введение

В связи с развитием современных пеленгационных станций, функционирующих в миллиметровом, терагерцовом, оптическом диапазоне длин волн, и их оснащением многоэлементными приёмниками, становится весьма актуальной задача разработки методов расчёта и анализа 3-х мерного хода лучей в их в антенных системах. Особенностью указанных диапазонов длин волн является применимость законов геометрической оптики.

В случае, когда мы имеем антенную систему, обладающую осевой симметрией, пересчет координат выполняется прямым переходом по формулам геометрической оптики [1]. Наиболее распространенные методы пересчета координат: метод «углов и высот» [2], матричный [3]. Они используются в двумерном случае с ограниченным учётом децентрировок элементов антенного тракта, что значительно сужает область их применимости. В настоящей работе предложен полноценный 3-х мерный подход, свободный от этих недостатков.

## 2. Постановка задачи

В связи с вышеизложенным необходимо разработать метод расчёта 3-х мерного хода лучей в случае, если антенная система имеет излом оптической оси и/или включает в себя сканирующую часть. Причем пересчет должен учитывать погрешности, возникающие при сборке и в процессе функционирования антенного тракта. Метод должен моделировать, в трехмерном случае, ход лучей в антенных системах, состоящих из линз и плоских зеркал.

При синтезе метода принимаются следующие допущения: линзы считаются тонкими; дисторсия в системе отсутствует; фокальная плоскость перпендикулярна оптической оси линзы; диаметр линз не ограничен. Распространение электромагнитной волны рассматривается в приближении геометрической оптики.

# 3. Основная идея метода

Введем следующие обозначения (см. рисунки 1a, 1г):  $B(\mathbf{r}, \mathbf{s}) - луч$ , исходящий из точки с радиус-вектором **r** и имеющий направляющий вектор **s**;  $P(\mathbf{r}, \mathbf{n}) - плоскость, проходящая через точку с радиус-вектором$ **r**, вектор нормали к которой –**n**. Координаты всех векторов заданы в некоторой декартовой системе координат*Oxyz*. Следующая запись

$$\mathbf{r}: \{B(\mathbf{r}_A, \mathbf{s}) \cap P(\mathbf{r}_B, \mathbf{n})\},\tag{1}$$

говорит о том, что некоторая точка с радиус-вектором **r** является точкой пересечения луча B и плоскости P. Зависимость радиус-вектора **r** от параметров плоскости и луча выражается в виде (рассматривается ситуация, когда луч направлен в сторону плоскости) [4]:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_A + \mathbf{s} \cdot \left[ \mathbf{n}^{\mathrm{T}} \cdot (\mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A) \right] \cdot (\mathbf{n}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{s})^{-1}.$$
 (2)

Базовая операция метода следующая. После каждого оптического элемента строится изображение точки, при этом используется соображение о том, что с геометрической точки зрения свет может существовать в пространстве в виде пучков двух типов. Тип A – все лучи пучка сонаправлены с некоторым вектором **s**. Тип B – пучок сходится в некоторой точке с радиус-вектором **r** (в ней он формирует изображение).



Рис.1 (а), (г) – суть введенных обозначений; действие на световой пучок: зеркала на тип A (б) и тип B (в); собирающией линзы на на тип A (д) и на тип B (е)

В принципе, параллельный пучок (тип A) есть частный случай сходящегося (тип B) – точка сходимости лежит в бесконечности. Действие оптических элементов в данном подходе рассматривается отдельно для двух типов пучков. Отметим, что некоторые оптические элементы, а именно – элементы с оптической силой, могут осуществлять преобразование типа пучка, т.е. плоские зеркала не преобразуют тип, а линзы и неплоские зеркала преобразуют.

### 4. Действие оптических элементов на пучок

Зеркало задается своей плоскостью  $P(\mathbf{r}_{M},\mathbf{n}_{M})$ . Оно не меняет тип пучка и преобразует пучок следующим образом:

тип A: 
$$\mathbf{s}_1 \to \mathbf{s}_2, \mathbf{s}_2 = \mathbf{M}(\mathbf{n}_M) \cdot \mathbf{s}_1,$$
 (3a)

тип B: 
$$\mathbf{r}_1 \rightarrow \mathbf{r}_2, \ \mathbf{r}_2 = \mathbf{r}_1 + 2 \cdot \mathbf{n}_M \cdot \mathbf{n}_M^{\mathrm{T}} \cdot (\mathbf{r}_M - \mathbf{r}_1),$$
 (36)

где матрица **M** имеет вид  $\mathbf{M}(\mathbf{n}) = \mathbf{E} - 2 \cdot \mathbf{n} \cdot \mathbf{n}^{\mathrm{T}}$  [1].

Линза задается своей плоскостью  $P(\mathbf{r}_L, \mathbf{n}_L)$  и задним фокусным расстоянием f'. Она преобразует пучки следующим образом:

тип A: 
$$\mathbf{s}_1 \to \mathbf{r}, \ \mathbf{r} : \{B(\mathbf{r}_L, \mathbf{s}) \cap P(\mathbf{r}_L + \overline{CF'}, \mathbf{n}_L)\},$$
 (4a)

тип В: 
$$\mathbf{r}_1 \to \mathbf{s}, \, \mathbf{s} = \frac{\mathbf{r}_L - \mathbf{r}_1}{|\mathbf{r}_L - \mathbf{r}_1|} \cdot \operatorname{sign}(f'), \, \operatorname{если} |(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_L)^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{n}_L| = |f'|,$$
(46)

тип В: 
$$\mathbf{r}_1 \rightarrow \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_2 = \mathbf{r}_1 + (\mathbf{r}_L - \mathbf{r}_1) \cdot \frac{(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_L)^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{n}_L}{\left| (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_L)^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{n}_L \right| - f'},$$
если  $\left| (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_L)^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{n}_L \right| \neq |f'|,$  (4в)

где вектор  $\overline{CF'}$  имеет вид

$$\overline{CF'} = f' \cdot \frac{\left(\mathbf{s}_{1}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{n}_{L}\right) \cdot \mathbf{n}_{L}}{\left|\left(\mathbf{s}_{1}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{n}_{L}\right) \cdot \mathbf{n}_{L}\right|}.$$
(5)

#### 5. Введение децентрировок элементов тракта

Децентрировки элементов антенного тракта в разработанном методе задаются как погрешности ориентации и положения базисных векторов элементов тракта. Линейные погрешности вводятся аддитивным образом в вектора задающие положения элементов:

$$\mathbf{r} = \left[ x + \varepsilon_x, \ y + \varepsilon_y, \ z + \varepsilon_z \right]^T.$$
(6)

Угловые погрешности вводятся в **n** – вектора нормалей к плоскостям элементов. При этом сами вектора выражаются через направляющие углы, на которые накладываются возмущения:

$$\mathbf{n} = \left[\cos(\beta + \varepsilon_{\beta})\cos(\alpha + \varepsilon_{\alpha}), \sin(\beta + \varepsilon_{\beta}), \cos(\beta + \varepsilon_{\beta})\sin(\alpha + \varepsilon_{\alpha})\right]^{T}.$$
(7)

#### Выводы

В настоящей работе представлен оригинальный подход к расчёту и анализу 3-х мерного хода лучей в антенных системах, подчиняющихся законам геометрической оптики. Разработанный метод «изображений» позволяет синтезировать двунаправленное преобразование координат в антенных трактах состоящих из плоских зеркал и линз. На основе этого метода возможно также получить формулы расчета хода лучей для других элементов, как-то: зеркал с оптической силой (в том числе с асферическими поверхностями), призм, и др.

Достоинство предложенного подхода в том, что не требуется дополнительной проверки расфокусировки в плоскости формирования изображения. В процессе синтеза преобразований на этой плоскости формируется точечное изображение и сразу возможно выявить расфокусировку антенной системы. Метод позволяет вводить реальные децентрировки элементов тракта, и проводить анализ их влияния на качество функционирования антенной системы. Недостатком данного подхода является то, что процедура пересчета координат содержит условные операторы, так как луч света в данном методе может существовать в виде двух типов пучков: параллельного и сходящегося. А влияние оптических элементов на оба типа пучков различно, при этом возможно изменение типа пучка. Ещё одним недостатком описываемого метода является неочевидность и сложность нахождения точки пересечения лучей с произвольно заданной плоскостью, что бывает необходимо при определении рабочих габаритов элементов антенной системы.

Работоспособность и применимость предложенного метода пересчета координат была проверена на реальной оптико-электронной системе сканирующего типа, имеющей излом оптической оси. Также с использованием данного метода был проведен детальный анализ параметров смаза изображения, возникающего в тепловой пеленгационной станции сканирующего типа. Её оптический тракт имеет излом оптической оси и объектив состоит из двух частей: неподвижной и вращающейся, а сами части разделены вращающимся зеркалом.

## Литература

- 1. Панов В.А., Кругер М.Я., Справочник конструктора оптико-механических приборов, под общ. ред. В.А.Панова. 3-е изд. перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1980. 742 с.
- 2. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.Н. Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992. 448 с.
- 3. Джеррард А., Бёрч Дж.М., Введение в матричную оптику, под ред. Коробкина В.В.– М.: Мир, 1978.– 341 с.
- 4. Г.Корн, Т.Корн, Справочник по математике. М., 1974., 832 с.

# «IMAGE» METHOD TO 3D RAY TRACE IN ANTENNA SYSTEMS OBEYING TO LAWS GEOMETRIC OPTICS

Erokhin E.V., Makarenko A.V., Pravdivtsev A.V.

Russian Federal Space Agency Open Joint-stock Company «RPC «Precision System and Instruments» E-mail: egens@rambler.ru

**Abstract.** The article shows a method to count and analysis 3D ray trace in antenna systems obeying to laws of geometric optics. The "image" method allows creating bidirectional coordinate conversion in antenna systems with optical axis fold. The antenna train can be created from flat mirrors, curved mirrors (including asferical), lenses, prisms and other elements. The method also allows detailed analysis of blurred pictures in systems with scanning components.