

**" Исследование влияния обтекателя на уровень дальнего бокового излучения антенной системы", (совместно с Важинским С.Э) Сборник трудов ХВУ, Вып 21, 1999 г.**

УДК 821.398.87

Доктор физико-математических наук Сухаревский И.В.  
Важинский С.Э.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБТЕКАТЕЛЯ НА УРОВЕНЬ ДАЛЬНОГО БОКОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ**

Исследованы с помощью асимптотической методики вклады в боковое излучение антенной системы, порожденные отражениями от внутренней поверхности обтекателя.

Установлено существование в системе переотраженных лучей каустик (оггибающих) и точек стационарной фазы, соответствующих заданным направлениям в боковых лепестках диаграммы излучения антенны.

Оценены относительные вклады, обусловленные наличием точки стационарной фазы. Приведены результаты численных расчетов и практические рекомендации по снижению уровня бокового излучения.

### **1. Теоретические основы проведенных исследований.**

В ходе исследований за основу было принято интегральное представление комплексной диаграммы направленности антенной системы (АС) с апертурной антенной и диэлектрическим обтекателем [1], которое в частном случае двумерной задачи при E- поляризации, имеет вид:

$$U(\vec{R}^0) = \int_{-1}^1 U(x_1 | \vec{R}^0) \cdot e^{jk_0[\Phi_0(x_1, h) + (\vec{p} \cdot \vec{x})]} \cdot dx_1, \quad (1)$$

где  $U(x_1 | \vec{R}^0) = - \left( \cos \psi + \frac{\partial \Phi_0}{\partial x_3} \right) \cdot A_1 A \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}}$ ,  $U(\vec{R}^0) = \vec{e}_2 \cdot \vec{E}(\vec{R}^0)$ ,

A- амплитуда поля приходящего из дальней зоны,  $A_1$  – амплитуда стороннего поля в апертуре.

Интеграл (1) допускает оценку методом стационарной фазы, изложенным в работе [3]. Используя в расчетах асимптотический, двухпараметрический метод расчета прохождения электромагнитной волны через слоистую структуру можно найти значения амплитуды поля в точках на поверхности обтекателя и в апертуре. Этот метод подробно описан в работе [2]. В реальной системе, как показали исследования, переотраженные от внутренней поверхности обтекателя S лучи образуют «оггибающую» (каустическую) семейства отраженных лучей, описываемую уравнением:

$t = \frac{\cos \alpha(s)}{2\kappa(s)}$ , где t- расстояние от точки отражения до точки касания от-

раженного луча к каустике,  $\kappa=\kappa(s)$  – кривизна  $S$  в точке отражения,  $s$ - дуговая координата на  $S$ ,  $\alpha$ - угол прихода луча относительно нормали к точке отражения. Пройдя касание к каустике, поле отраженной от  $S$  волны скачком меняет фазу на  $\pi/2$ . Например, при  $g(\xi) = \frac{\xi^2}{2}$ , угле падения луча  $\vartheta = \frac{\pi}{2}$  имеем параметрическое уравнением каустики  $x = \frac{\xi}{2}(3 - \xi^2)$ ;  $z = \frac{3}{2}\xi^2$  (см. Рис.1).

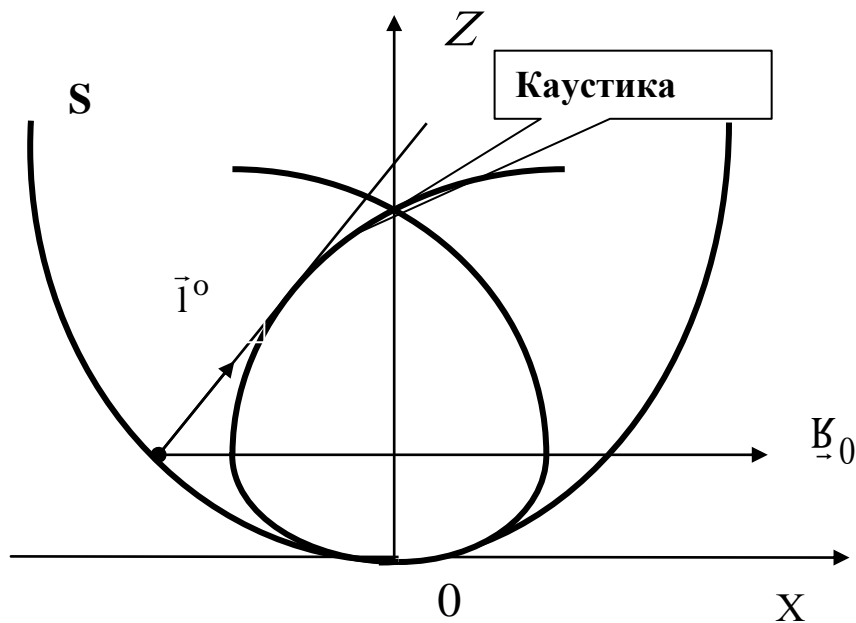


Рис.1

При рассмотрении переотраженного поля используется формульная зависимость, позволяющая определить связь координат точек отражения  $(\xi, \zeta)$  на поверхности  $S$  и соответствующих им точкам на апертуре  $(x, h)$ ;

$$x = \xi + (h - g(\xi)) \frac{l_x^0}{l_z^0}, \quad (2)$$

где  $l_x^0, l_z^0$  - координаты орта отраженного луча,  $\xi$  - координата точки отражения по оси  $OZ$ ,  $h$  - расстояние до апертуры по оси  $OZ$ ,  $\zeta$  - координата точки отражения по оси  $OX$ .

## 2. Методика нахождения вклада точки стационарной фазы в боковое излучение антенной системы с обтекателем.

Методика расчетов ниже изложена, в основном, на двумерной модели антенной системы с оживальным обтекателем 9М38. Результаты расчетов же приведены для изделий 9М38 и С200.

1. Все расчеты проведены в безразмерной постановке. В частности, при этом безразмерное уравнение внутренней стенки S обтекателя изделия 9М38 принимает

вид  $\zeta = g(\xi)$ , где  $g(\xi) = \frac{\xi^2}{2}$ , вместо уравнения S в размерных величинах

$z = 20 \cdot x^2$  (z, x – в сантиметрах, 20 – размерный коэффициент размерностью 1/см).

2. Вся апертура разбивается на n - интервалов  $\Delta 1, \Delta 2, \dots, \Delta n$  и определяются координаты точек  $(x_i, h)$ , являющиеся границами этих интервалов.

По имеющимся координатам точек  $x_i$  на апертуре вычисляются соответствующие им точки  $\xi_i$  на внутренней стенке обтекателя путем решения уравнения (2) относительно переменной  $\xi$ .

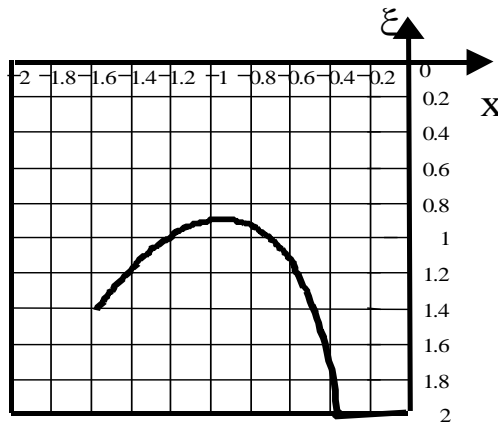


Рис.2

При этом оказывается, как показано на рис.2, что точке x на апертуре соответствуют две точки  $\xi$  на поверхности обтекателя находящиеся левее и правее точки стационарной фазы. Таким образом получаем участок на внутренней поверхности обтекателя, все отражаемые лучи от которого попадают на апертуру АС. В развернутом виде используемое здесь уравнение связи имеет вид:

$$x = \xi + (h - g(\xi)) \cdot \frac{g'(\xi)^2 - 1 + 2 \cdot g'(\xi) \cdot \text{ctg} \theta}{(g'(\xi)^2 - 1) \cdot \text{ctg} \theta - 2 \cdot g'(\xi)} \quad (3)$$

По формулам  $\xi_0 = -\text{ctg} \frac{\theta - \psi}{2}$  и  $\zeta_0 = g(\xi_0)$  [4] определяются координаты точки стационарной фазы на поверхности S, а из (3) соответствующая ей координата x на апертуре.

3. Для построения фазовой функции  $\Phi(x, \xi)$  переотраженного поля в апертуре используется математическая модель, в основе которой лежит электрическое ска-

нирование, характеризуемое углом сканирования  $\psi$  и, таким образом выводится выражение:  $\Phi(x, \xi) = -x \cdot \sin \psi - h \cdot \cos \psi + \sqrt{(x - \xi)^2 + (h - g)^2} - \vec{R}^0 \cdot \vec{\xi}$

4. С использованием лучевых представлений падающей и переотраженной волн, основанных на двухпараметрической асимптотической методике [2], рассчитывается прохождение падающей волны через обтекатель и отражение от поверхности S. Определяются координаты  $(x_1, z_1)$  точек входа лучей в поверхность обтекателя (согласно [ ]), соответствующих точкам отражения  $x_1 = -\xi - 2ctg\vartheta$ , находятся  $B_1$ - значения амплитуды поля в точке отражения.
5. Величина переотраженного поля в апертуре определяется по асимптотической формуле

$$U = e^{j \cdot k \cdot \Phi} \cdot B \cdot \sqrt{\frac{\cos \alpha}{\cos \alpha - 2 \cdot \kappa \cdot T}},$$

где кривизна поверхности в точке отражения  $\kappa = \frac{|g''|}{(1 + g'^2)^{3/2}}$ ,

$T = \sqrt{(x - \xi)^2 + (h - g)^2}$  - расстояние от точки отражения вдоль отраженного луча апертуры.

Определяется, происходит ли касание отраженного луча к каустике. Условие касания  $T > T_K$  (при выполнении этого неравенства фазовая функция увеличивается на  $\pi/2$ ), где  $T_K = \left| \frac{\cos \alpha}{2 \cdot \kappa} \right|$  - расстояние, пройденное отраженным лучом до каустики.

6. Вторая производная фазовой функции в точке стационарной фазы, как показано в [3], определяется выражением:  $\frac{d^2 \Phi}{dx^2} = -2 \cdot g'' \cdot \sin^2 \frac{\theta}{2} \cdot \frac{1}{\left( \frac{dx}{d\xi} \right)_{st}}$ , а вклад ее

окрестности в интеграл  $I_{st} = e^{j \cdot k \cdot \Phi} \sqrt{\frac{2 \cdot \pi}{k \cdot |\Phi''|}} \cdot U_{st} \cdot \chi$ , где  $\chi = e^{-\frac{\pi \cdot j}{2}}$

7. Вычисление поля, излучаемого апертурой, производится в работе по специальной квадратурной формуле, основанной на кусочно-линейных аппроксимациях амплитудной и фазовой функций на каждом из частичных интервалов  $\Delta 1, \Delta 2, \dots, \Delta n$  (не содержащих точки стационарной фазы) и имеющей вид:

$$I_i = \delta \cdot e^{jk\Phi_{i-1}} \left( \frac{e^{j \cdot k \cdot \delta\Phi_i} - 1}{j \cdot k \cdot \delta\Phi_i} u_{i-1} - \delta u_i \frac{e^{j \cdot k \cdot \delta\Phi_i} - 1 - j \cdot k \cdot \delta\Phi_i}{(j \cdot k \cdot \delta\Phi_i)^2} \right) \cdot \chi_i,$$

где  $u_i$  - амплитуда поля в точке на апертуре  $\delta u_i = u_{i+1} - u_i$ ,  $\delta\Phi_i = \Phi_{i+1} - \Phi_i$ .

8. Вычисляется суммарная величина переотраженного поля на интервалах левее и правее области точки стационарной фазы, результаты суммируются.

$$I_{\text{суммарная}} = \sum_{i=1}^{n+1} I_i.$$

9. На последнем этапе вычисляется относительный вклад точки стационарной фазы в переотраженное поле

$$V_{kl} = \frac{1}{1 + \frac{|I_{\text{суммарная}}|}{|I_{st}|}}.$$

### 3. Анализ влияния отражений от стенки обтекателя на помехозащищенность.

1. Расчетами на идеализированной модели близкой к системе 9м38 было показано, что по крайней мере в диапазоне углов  $60-85^{\circ}$  (как при электрической, так и при механической системе сканирования) переотраженное от внутренней стенки обтекателя поле может составить заметный вклад в боковое излучение антенной системы. На графике (рис.3),

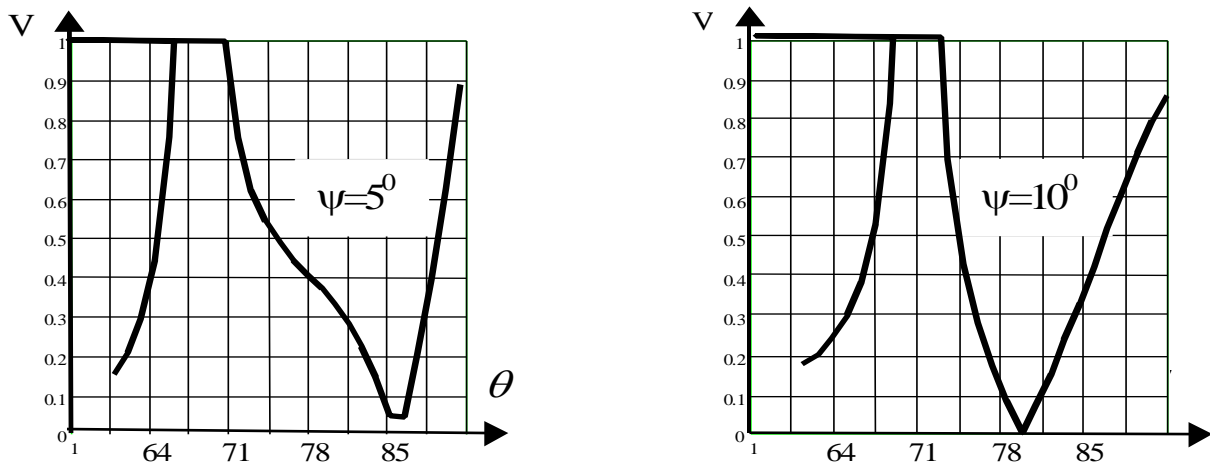


Рис.3

где  $\theta$  - угол прихода луча из дальней зоны,  $V$  - отношение величин переотраженного и прямого полей, показана зависимость величины относительного вклада переотраженного поля в суммарное поле на апертуре при различных углах прихода волны. В первом случае (левый график), угол сканирования  $\psi=5^{\circ}$ , при  $\theta=65-73^{\circ}$  переотраженное поле на апертуре составляет более 50% от величины суммарного поля волны приходящей с бокового направления. При увеличении угла сканиро-

вания (правый график)  $\psi=10^{\circ}$ , происходит увеличение вклада переотраженного поля в диапазоне углов  $\theta=68-75^{\circ}$  и при  $\theta>85^{\circ}$ .

2. Существенная роль точек стационарной фазы в поле переотраженных лучей и на апертуре антенны видна из проведенных компьютерных исследований оживально-го обтекателя изделия 9М38. По результатам вычислений построены графики (рис.4) оценки относительных вкладов окрестности точки стационарной фазы в уровень переотраженного поля. Из графиков видно, что при  $\psi=0$  в диапазоне углов  $\theta=70-85^{\circ}$  относительный вклад точки стационарной фазы в переотраженное поле составляет 58-70% , а при  $\psi=5^{\circ}$  -52-70%.

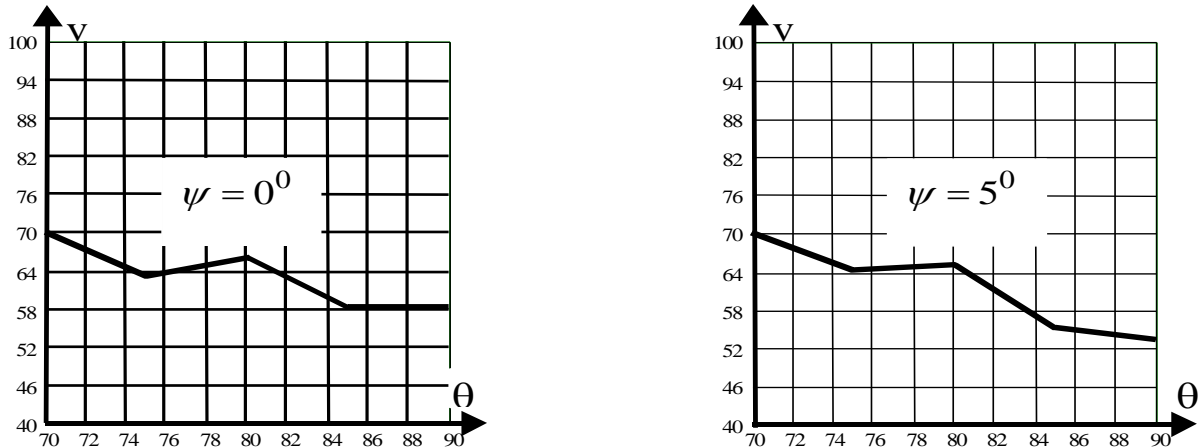


Рис.4

Количественные значения относительных вкладов при различных углах сканирования  $\psi$  указаны в таблице 1.

Таблица 1

ВКЛАД (V) при	УГОЛ θ				
	70	75	80	85	90
$\psi = 0$	70	63	66	58	58
$\psi = 5$	70	64	65	55	53
$\psi = 10$	-	64	66	53	47

Относительные вклады точек стационарной фазы в отраженное поле при варьировании углов  $\theta$  и  $\psi$ , полученные при расчетах по методике приведенной в п. 2 для антенной системы изделия С-200 приведены в таблице2 и на рис.5. Из графиков видно, что при угле  $\psi=5^{\circ}$  в диапазоне углов  $\theta=70-85^{\circ}$  вклады «стационарной области» составляют от 52 до 75%. С увеличением углов сканирования  $\psi$  значения вкладов точки стационарной фазы составляют 56-70%

3. Из вышесказанного следует, что:

1. существует принципиальная возможность значительного снижения влияния переотражений путем локальных компенсаций малых окрестностей точек стационарной фазы.

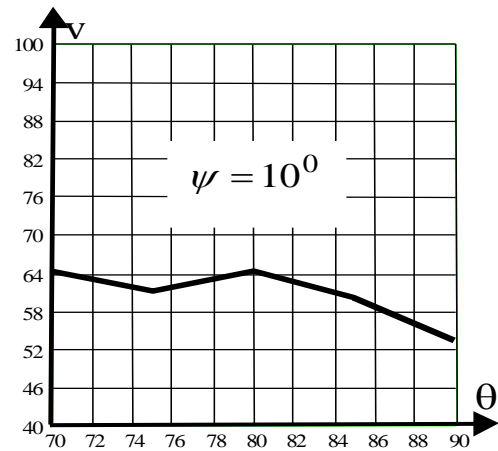
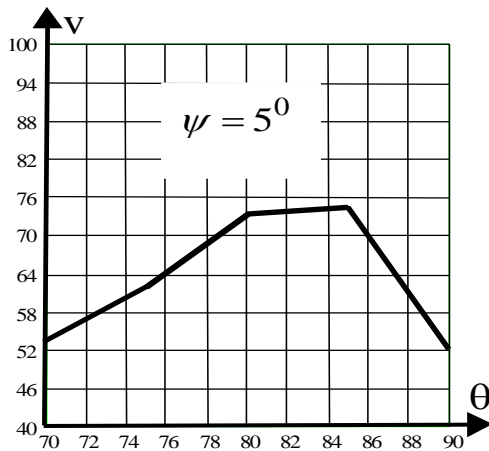


Рис. 5

Таблица 2

ВКЛАД (V) при	УГОЛ $\theta$				
	70	75	80	85	90
$\psi = 5$	53	62	73	74	-
$\psi = 10$	64	61	64	60	-
$\psi = 20$	65	73	68	56	-

2. наличие каустик, и точек стационарной фазы, точное определение их местоположения, делает возможным, компенсацию переотражений путем установки поглощающих элементов в рассчитываемых малых областях апертуры или на обтекателе АС .
3. для антенных систем с фазированной антенной решеткой возможна компенсация переотражений путем составления специальных алгоритмов управления излучением, при котором в апертуре будут «отключаться» при обработке области точки стационарной фазы.
4. в АС с обтекателем имеется область в которую не попадают переотраженные лучи.

#### Литература.

- [1] Сухаревский И.В. Сухаревский О.И., Расчет поля, возбуждаемого излучающей апертурой в присутствии произвольной системы рассеивателей. Радиотехника и электроника, 1986, Вып.1, с.8-13.
- [2] Сухаревский И. В. Асимптотические методы решения некоторых классов задач дифракции волн. «Радиотехника» (Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник ), вып.100, 1996. С.19-41.
- [3] Сухаревский О.И., Метод стационарной фазы. Дополнительные разделы высшей математики. Асимптотические формулы и разложения.1996, Вып.1, с.24-29.
- [4] I.V. Sukharevsky, S. E. Vashinsky, About the stationary phase points and caustic influence on lateral radiation of antenna systems with radomes. ММЕТ-98, с.537 –539.