

В. З. Голдовский<sup>1</sup>, А. С. Голубкин<sup>2</sup>, А. Н. Коровкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГУП ГНЦ «ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова», Россия, 196158, Санкт-Петербург,  
Московское шоссе 44, e-mail: [krylov@krylov.spb.ru](mailto:krylov@krylov.spb.ru)

<sup>2</sup>1-й ЦНИИ МО РФ, Санкт-Петербург

## Статистический подход к определению влияния обтекателя на характеристики антенн ГАС

Получена 12.04.2005, опубликована 16.06.2005

Методами статистической акустики и статистической теории антенн определено влияние обтекателя, с учетом его неоднородности, на коэффициент концентрации антенн. Установлено, что обтекатель вызывает падение коэффициента концентрации и помехоустойчивости антенн и, как следствие этого, уменьшение дальности действия ГАС. Показано, что влияние неоднородных свойств обтекателей аналогично влиянию случайных ошибок возбуждения антенн ГАС.

### ВВЕДЕНИЕ

Объективная необходимость размещения антенн ГАС в обтекателях приводит к появлению искажений акустических параметров антенн ГАС, обусловленных влиянием звукопрозрачной обшивки обтекателя.

При расчете дальности действия ГАС наличие обтекателя обычно учитывается введением в левую часть уравнения дальности сомножителя, равного  $B$  (модуль коэффициента прохождения звука через обтекатель) для режима шумопеленгования и равного  $B^2$  для режима эхопеленгования. Вторая степень учитывает двукратное прохождение звука через обтекатель: от антенны ГАС во внешнюю среду и эхо-сигнала от цели по внешней среде к антенне ГАС. При этом оказывается, что дальность действия ГАС как в режиме шумопеленгования, так и в режиме эхопеленгования пропорциональна коэффициенту прохождения звука через обтекатель, т. е. звукопрозрачности обтекателя. Вместе с тем, наличие обтекателя приводит не только к прямым потерям звуковой энергии в направлении главного максимума характеристики направленности антенны, но и к перераспределению энергии в пространстве за счет внутренних отражений в обтекателе.

Применявшиеся ранее методы, основанные на точных решениях для моделей канонической формы (цилиндр, шар) или коротковолновой асимптотике аналитических решений, не позволяют в полной мере учесть влияние реальной геометрии конструкции и ее акустических свойств на величину звукового поля в широкой пространственно-частотной области. Успешно применяющийся при решении различных прикладных

задач метод конечных элементов (МКЭ) при решении акустических задач в настоящее время ограничивается двумерными моделями, не учитывающими возможные случайные отклонения физико-механических свойств обтекателя от их среднего значения.

В связи с этим проведем оценку влияния обтекателя на характеристики антенн ГАС, в частности коэффициент концентрации и дальность действия, методами статистических теорий.

## 1. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОДНОРОДНОГО ОБТЕКАТЕЛЯ

Первоначально проведем оценку звукового поля внутри однородного по физико-механическим свойствам обтекателя, имеющего постоянную осредненную по реальным значениям толщину оболочки, с использованием статистической теории формирования звукового поля в помещении [1].

Найдем величину прямого  $w_i$  и «диффузно-перемешанного звука»  $w_d$ , претерпевшего некоторое число отражений от внутренних стенок обтекателя:  $w = w_i + w_d$ , где  $w$  — плотность общей энергии. Отношение  $R = w_d / w_i$ , характеризующее степень диффузности звукового поля в данной точке, принято называть акустическим отношением.

Плотность прямой звуковой энергии может быть определена (в предположении ненаправленного источника, излучающего сферическую волну) по формуле

$$w_i = \frac{I}{c_0} = \frac{P_a}{c_0 4\pi r^2} = \frac{P_0^2}{\rho c_0^2},$$

где  $I = P_a / 4\pi r^2$  — сила звука, создаваемая источником в неограниченном пространстве;  $P_a$  — акустическая мощность ненаправленного источника;  $r$  — расстояние от источника до точки наблюдения;  $P_0$  — звуковое давление в точке наблюдения;  $c_0$  — скорость звука в среде.

Плотность же диффузно-перемешанной энергии для ненаправленного источника можно определить по формуле [1]:

$$w_d = \frac{4 P_a}{c_0 S} \frac{1 - \alpha}{\alpha},$$

где  $S$  — площадь поверхности обтекателя,  $\alpha$  — коэффициент звуопоглощения на поверхности  $S$ .

В предположении направленного источника плотность прямой звуковой энергии равна

$$w_i = \frac{I}{c_0} = \frac{P_0^2}{\rho_0 c_0^2} \Phi^2(\theta),$$

где  $\Phi(\theta)$  — характеристика направленности.

Интегрируя силу прямого звука  $I$  по замкнутой сфере, окружающей источник, имеем для его акустической мощности выражение

$$P_a = \frac{P_0^2}{\rho_0 c_0} 2\pi r^2 \int_0^\pi \Phi^2(\theta) \sin \theta d\theta = \frac{4\pi r^2 P_0^2}{K \rho_0 c_0},$$

где  $K = \frac{2}{\int_0^\pi \Phi^2(\theta) \sin \theta d\theta}$ .

Тогда  $w_i = \frac{K P_a}{4\pi r^2 c_0} \Phi^2(\theta)$

Подставляя выражения для  $P_a$  в формулу для  $w_d$ , получим плотность диффузной энергии для направленного источника

$$w_d = \frac{16\pi r^2 P_0^2 (1-\alpha)}{\rho_0 c_0^2 S K \alpha}.$$

Так как коэффициент  $\alpha$  представляет среднее значение относительного уменьшения энергии при каждом отдельном акте звукопоглощения, то его значение будет пропорционально величине  $B^2$  — квадрату коэффициента звукопрозрачности обтекателя. В свою очередь величина  $1-\alpha$  будет пропорциональна величине  $A^2$  — квадрату коэффициента отражения от обтекателя.

Тогда акустическое отношение обтекателя может быть записано в виде

$$R = \frac{16\pi r^2 A^2}{S K B^2 \Phi^2(\theta)}.$$

Далее будем полагать, что акустическое отношение обтекателя для направленного источника и приемника при  $\theta = 0^\circ$  характеризует увеличение бокового поля антенны, обусловленное внутренними отражениями в обтекателе, то есть

$$G = \frac{P_d}{P_0} = \sqrt{R} = \frac{4\sqrt{\pi} r A}{\sqrt{S} \sqrt{K} B \Phi(\theta)}.$$

На практике обычно выполняется соотношение:

$$\frac{4\sqrt{\pi} \cdot r}{\sqrt{S} \Phi(0^\circ)} \approx 1,0.$$

Тогда

$$G = \frac{A}{B \sqrt{K}}.$$

Рассмотрим теперь влияние обтекателя на величину коэффициента концентрации антенны, являющегося основным параметром антенны в режимах излучения и приема. В режиме «приема» коэффициент концентрации характеризует помехоустойчивость антенны в условиях изотропного поля помех.

Для определения коэффициента концентрации находят отношение интенсивностей, развиваемых антенной в направлении максимума характеристики направленности и ненаправленным излучателем в дальнем поле на одном и том же расстоянии от него при условии излучения антенной и ненаправленным излучателем одинаковых активных мощностей. При таком определении коэффициент концентрации называют осевым коэффициентом концентрации. Вычисление коэффициента концентрации антенны при ее расположении в обтекателе может быть существенно упрощено, если аппроксимировать характеристику направленности или ее квадрат специальным образом подобранной функцией.

Представим характеристику направленности в виде суммы двух слагаемых:

$$\Phi^2 = \Phi_T^2 + G^2.$$

Величина  $G$  характеризует искажение исходной (будем называть ее теоретической) характеристики направленности из-за влияния обтекателя. По своей сути это та же величина  $G$ , которая использовалась при оценках звукового давления внутри обтекателя, обусловленного диффузной энергией. Коэффициент концентрации антенны, обладающей характеристикой направленности  $\Phi$ , определится следующим образом:

$$K = \frac{4\pi}{\int_{\Omega} (\Phi_T^2 + G^2) d\Omega} = \frac{K_T}{1 + K_T G^2},$$

где:  $K_T = \frac{4\pi}{\int_{\Omega} \Phi_T^2 d\Omega}$  — коэффициент концентрации рассматриваемой антенны в

отсутствии искажений ее характеристики направленности.

Для относительного падения коэффициента концентрации будем иметь

$$\frac{K}{K_T} = \frac{1}{1 + K_T G^2} = \frac{1}{1 + \frac{A^2}{B^2}} = B^2.$$

Как видно, относительное падение коэффициента концентрации пропорционально квадрату коэффициента звукопрозрачности оболочки обтекателя.

## 2. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОГО ОБТЕКАТЕЛЯ

Реальная оболочка обтекателя имеет случайный разброс акустических параметров, обусловленный случайным изменением физико-механических свойств оболочки в пределах ее поверхности. Влияние такого разброса на характеристики антенн аналогично влиянию так называемых ошибок возбуждения антенн, обусловленных неточностью изготовления, неоднородностью материала, ошибками установки и ориентации преобразователей и т. д. В связи с этим, реальные значения коэффициента прохождения звука сквозь обтекатель в пределах апертуры пространственного канала антенны изменяются случайным образом, что аналогично воздействию на антенну

звуковых волн от фиктивных источников фронта звуковой волны со случайными флуктуациями амплитуды и фазы. Эти флуктуации, в свою очередь, также как и ошибки возбуждения антенн, налагают ограничения на важнейшие характеристики антенн — помехозащищенность, коэффициент концентрации, дальность действия, точность определения координат.

Исследование зависимости этих характеристик от статистических параметров амплитудно-фазового распределения воздействующих на антенну источников составляет содержание статистической теории антенн [2].

Необходимая для дальнейших оценок по этой теории статистика амплитудно-фазового распределения звуковых источников определена путем расчета коэффициента прохождения звука (амплитуды и фазы) сквозь оболочку, окружающую антенну. Необходимая для расчетов выборка значений толщины оболочки найдена путем замеров на реальной стеклопластиковой оболочке с помощью ультразвукового измерительного прибора.

На рис. 1 приведена гистограмма измерений толщины оболочки в 80 точках, равномерно размещенных по обтекателю. Как видно из рисунка, результаты измерений в основном соответствуют двум различным диапазонам измерений толщины оболочки. Диапазон с меньшими значениями относится к тем точкам на обтекателе, которые находятся в зоне основной средней части апертуры антенны. Диапазон с большими значениями относится к точкам на обтекателе, расположенным в переходных и стыковочных с корпусом частях обтекателя по краям апертуры антенны.

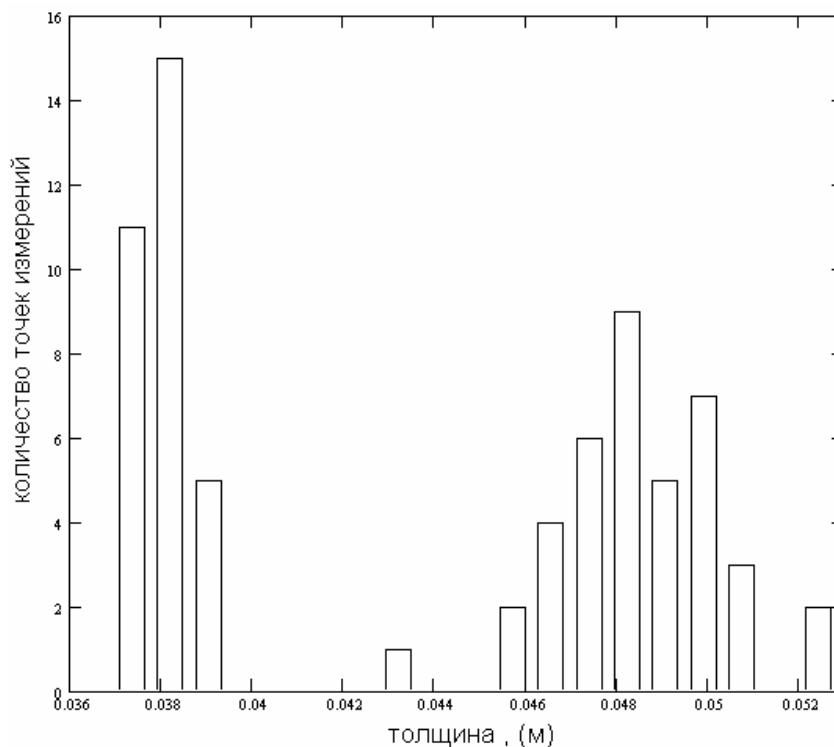


Рис. 1. Гистограмма измерений толщины оболочки

При анализе статистического поля антенны необходимо иметь данные по дисперсии и радиусам корреляции амплитудно-фазового распределения источников, воздействующих на антенну. Дисперсию таких источников определим, выполнив расчеты коэффициента прохождения звука сквозь оболочку  $B = |B|e^{i\varphi}$ , с использованием модели плоской пластины различной толщины. Результаты таких расчетов зависят от длины волны звука. Определив средние значения модуля и фазы коэффициента прохождения звука  $|B|$  и  $\bar{\varphi}$ , найдем значение дисперсии модуля и фазы источников  $\Delta_B$  и  $\Delta_\varphi$ . Например, для длины волны звука значительно меньше размеров антенны будем иметь:

$$\begin{aligned} |B| &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |B|_i = 0,88; & \bar{\varphi} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varphi_i = -0,28 \quad (-16,0^\circ); \\ \Delta_B &= \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (|B|_i - |B|)^2 = 0,0015; & \Delta_\varphi &= \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\varphi_i - \bar{\varphi})^2 = 0,003. \end{aligned}$$

Будем полагать, что радиус корреляции неоднородности обтекателя меньше длины волны звука и значительно меньше размеров апертуры антенны.

Подробный анализ влияния статистических параметров амплитудно-фазового распределения — дисперсии и радиусов корреляции ошибок на коэффициент концентрации, ширину главного максимума, уровень боковых лепестков и других параметров антенн выполнен в работе [2].

Наличие ошибок проявляется в виде некоторого «фона» квадратично складывающегося с характеристикой направленности в отсутствии ошибок, что приводит к сглаживанию диаграммы — заполнению нулей и уменьшению поля в направлении главного максимума и, в результате, к изменениям коэффициента концентрации антенны. При наличии флуктуаций в амплитудно-фазовом распределении коэффициент концентрации является случайной величиной. Среднее значение коэффициента концентрации обозначим через  $\bar{K}$ . Если относительное изменение амплитуды и изменение фазы на расстоянии, равном длине волны вдоль поверхности интегрирования мало, то полная средняя мощность, излучаемая антенной равна мощности, излучаемой в отсутствии ошибок. При равенстве излучаемых мощностей относительное значение прогнозируемого коэффициента концентрации в направлении главного максимума равно:

$$\frac{\bar{K}}{K_T} = e^{-\Delta_\varphi}.$$

Последнее равенство справедливо в случае малых амплитудных и фазовых ошибок.

Используя значение дисперсии ошибок для нашего случая, имеем  $\bar{K}/K_T = 0,99$ . Из результатов расчетов следует, что относительное изменение коэффициента концентрации антенны в обтекателе, из-за неоднородности обтекателя, для рассматриваемого случая стеклопластикового безреберного обтекателя значительно меньше относительного изменения коэффициента концентрации, вызванного диффузным переотражением звуковых волн внутри обтекателя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уменьшение коэффициента концентрации антенны в однородном обтекателе с постоянной осредненной толщиной оболочки и, следовательно, с постоянным коэффициентом звукопрозрачности в пределах апертуры антенны пропорционально квадрату коэффициента звукопрозрачности обтекателя —  $B^2$ . Учет этого фактора в правой части уравнения дальности приводит к тому, что в режиме шумопеленгования дальность действия оказывается пропорциональна квадрату звукопрозрачности ( $r \sim B^2$ ), а в режиме эхолокации — звукопрозрачности в степени  $3/2$  ( $r \sim B\sqrt{B}$ ), вместо принимаемой до настоящего времени при оценочных расчетах зависимости  $r \sim B$ , не учитывающей влияния внутренних переотражений в обтекателе. Изменением коэффициента концентрации антенны, обусловленным неоднородностью обтекателя включая случайный разброс толщины оболочки в пределах апертуры антенны, для реальных обтекателей можно пренебречь.

Таким образом, результаты работы позволяют уточнить влияние обтекателя на характеристики антенн ГАС, что необходимо для прогнозирования ТТХ ГАС в реальных условиях их эксплуатации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Фурдуев В. В. Электроакустика, М.-Л., Гостехиздат, 1948.
2. Шифрин Я. С. Вопросы статистической теории антенн, М., «Советское радио», 1970.