

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2021.5.2.005

УДК 621.396.968

Методический подход к снижению локальной радиолокационной заметности объектов при заданных частотно-угловых условиях наблюдения

А. А. Казанцев✉, Б. А. Самородов, А. М. Терентьев

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Россия,
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13.

✉ alexandralexandrkazantsev@gmail.com

Аннотация

Показана целесообразность использования методов спектрального оценивания для оценки локальной радиолокационной заметности (РЛЗ) объектов при заданных частотно-угловых условиях наблюдения. Разработан методический подход к снижению локальной РЛЗ объектов при их заданных габаритных размерах. Сущность разработанного подхода заключается в параметрической оптимизации геометрической формы объектов в локальной области с целью удовлетворения требованиям по локальной РЛЗ и объему полезной нагрузки.

Ключевые слова

радиолокационная заметность, радиолокационный дальностный портрет, эффективная поверхность рассеяния, обработка сигналов, спектральное оценивание

Для цитирования

Казанцев А. А., Самородов Б. А., Терентьев А. М. Методический подход к снижению локальной радиолокационной заметности объектов при заданных частотно-угловых условиях наблюдения. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(2):162–178. DOI: 10.15826/urej.2021.5.2.005.

Methodological approach to reducing the radar cross section of local scatterer under given frequency-angular observation conditions

А. А. Kazantsev✉, B. A. Samorodov, A. M. Terentev

Mozhaisky space military academy, 13 Zhdanovsky Str., St. Petersburg,
197198, Russia

✉ alexandralexandrkazantsev@gmail.com

Abstract

This paper focuses on application of spectral estimation methods for scattering center's radar cross section estimation and reduction under given frequency-angular observation conditions. A methodological approach has been developed to reduce the local center's radar cross

section with given object overall dimensions. The developed methodological approach is based on parametric optimization of object geometry, firstly, to reduce the local scatterer radar cross section and, secondly, to maximize object payload. The problem overview is presented in the introduction. The first section is devoted to mathematical formulation of the problem. The following section includes the comparison analysis of the different types of geometrical shapes. As a result, the object with exponential profile is chosen as the best one due to the ability to manage rear vertex local scatterer amplitude by changing the curvature parameter. In the third section the optimal curvature parameter value of the exponential profile is justified for the given object overall dimensions and frequency-angular observation conditions. It is demonstrated that the main characteristic to analysis is two-dimension functional dependence of the local scatterer mean radar cross section from geometrical parameter and angle of observation. It is proved that this mentioned dependence may be received by the implementation such well-known spectral estimation method as CLEAN to the object sinogram. The recognition range is calculated for two different hypothetical radars to assert the efficiency. It is offered in the conclusion to complicate the developed approach with radio absorption materials implementation as the direction of the future investigations.

Keywords

stealth, range profile, radar signature, radar cross section, signal processing, spectral estimation, CLEAN

For citation

Kazantsev A. A., Samorodov B. A., Terentev A. M. Methodological approach to reducing the radar cross section of local scatterer under given frequency-angular observation conditions. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(2):162–178. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2021.5.2.005.

Введение

В настоящее время при рассмотрении вопросов РЛЗ объектов обычно говорят о так называемой общей (интегральной) заметности объекта [1–4], которая характеризуется таким показателем, как эффективная поверхность (площадь) рассеяния (ЭПР) и выражается в единицах измерения ЭПР – квадратных метрах. Исходя из определения, ЭПР является узкополосной радиолокационной характеристикой (РЛХ) всего объекта в целом для заданных значений частоты, ракурса наблюдения и поляризаций электромагнитного поля на излучение и прием [1–4]. Фиксированное значение частоты зондирующего монохроматического сигнала, для которого определяется значение ЭПР объекта означает, что радиолокатор не обладает возможностью пространственного разрешения объекта и обуславливает интегральный смысл канонического понятия ЭПР. Снижение интегральной ЭПР добиваются двумя путями [5]: за счет применения радиопоглощающих материалов и покрытий и за счет изменения ге-

ометрической формы объекта для заданных частотно-угловых условий наблюдения. При этом изменению геометрической формы подвергаются те элементы конструкции, которые вносят значительный вклад в величину его интегральной ЭПР.

Однако в задачах идентификации, распознавания (классификации), когда радиолокатор обладает высоким пространственным разрешением, позволяющим наблюдать объект как распределенную цель, принципиальную значимость приобретает локальная (дифференциальная) РЛЗ объекта. В этих случаях снижение локальной РЛЗ может позволить исказить пространственную сигнатуру объекта в целях устранения устойчивого информативного демаскирующего признака.

Математическая постановка задачи

Известно, что технической характеристикой радиолокационной станции (РЛС), определяющей ее разрешающую способность по радиальной координате портретной системы координат Δx_{π} , является ширина частотной полосы зондирующего сигнала $F = |f_{\kappa} - f_{\pi}|$:

$$\Delta x_{\pi} = \frac{c}{F}, \quad (1)$$

где c – скорость распространения электромагнитной волны в свободном пространстве.

Пусть РЛС с высоким пространственным разрешением решает задачу распознавания объекта на интервале наблюдения $t \in [t_{\pi}, t_{\kappa}]$ на основе оценки такого признака, как его радиолокационная длина (РЛД) $\hat{L}_x(\psi(t))$, где $\psi(t)$ – ракурс наблюдения объекта, зависящий от времени (рис. 1). При этом предполагается, что благодаря высокому пространственному разрешению истинный видимый радиальный размер объекта L_x на всем участке наблюдения превышает элемент разрешения по радиальной координате $L_x > \Delta x_{\pi}$.

На рис. 1а приведена геометрия радиолокационного наблюдения для двух крайних моментов времени: t_{π} – начального и t_{κ} – конечного. На рис. 1а видно, что РЛД объекта зависит от ракурса наблюдения $\psi(t)$, который, в свою очередь, определяется геометрией взаимного расположения РЛС и объекта, изменяющейся вследствие движения объекта локации. В общем случае значение ракурса наблюдения объекта определяется ориентацией линии визирования «радар – объект», которую принято характеризовать парой сферических углов θ_c и ϕ_c в строительной сферической системе координат объекта. Для упрощения в настоящем исследовании рассматриваются осесимметричные объекты, для которых справедливо допущение: $\psi(\theta_c(t), \phi_c(t)) = \psi(\theta_c(t)) = \psi(t)$.

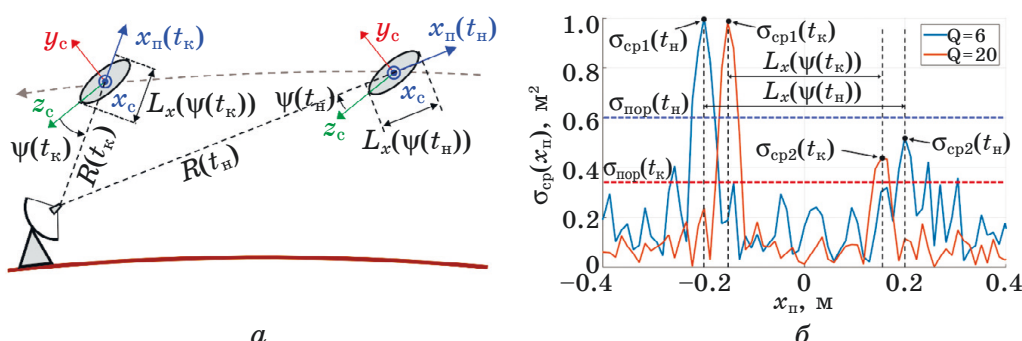


Рис. 1. Особенности решения задачи распознавания по признаку радиолокационной длины:

a – геометрия наблюдения; *б* – радиолокационные дальностные портреты

Fig. 1. Features of the recognition problem solution based on the object's radial length estimation:

a) observation geometry; *b*) radar range profiles

На рис. 1б показаны радиолокационные дальностные портреты (РЛДП) гипотетической двухточечной цели с соотношением амплитуд локальных центров рассеяния (ЛЦР) два к одному для двух указанных моментов времени: $\sigma_{cp}(x_\pi, t_n)$ и $\sigma_{cp}(x_\pi, t_k)$. Для удобства под РЛДП понимается квадрат модуля сглаженной импульсной характеристики $\dot{S}(x_\pi)$ [6], нормированный к ширине полосы зондирующего сигнала, то есть зависимость среднего значения локальной (дифференциальной) ЭПР от радиальной координаты:

$$\sigma_{cp}(x_\pi) = \frac{1}{F} \cdot |\dot{S}(x_\pi)|^2. \quad (2)$$

Локальный характер ЭПР обусловлен тем, что частотная характеристика рассеяния $\dot{S}(f)$, представляющая собой зависимость комплексного коэффициента рассеяния от частоты, и сглаженная импульсная характеристика $\dot{S}(x_\pi)$, представляющая собой радиальную плотность распределения комплексного коэффициента рассеяния [6], связаны преобразованием Фурье:

$$\dot{S}(f) = F_x^1 \{ \dot{S}(x_\pi) \}, \quad \dot{S}(x_\pi) = F_f^{-1} \{ \dot{S}(f) \}, \quad (3)$$

где $F_x^1\{\}$ и $F_x^{-1}\{\}$ – операторы одномерных прямого и обратного преобразований Фурье по аргументам x_π и f . В результате перехода от f к x_π теряется разрешение по f и приобретает разрешение по x_π и наоборот.

На рис. 1б видно, что для начального момента времени t_n , вследствие низкого отношения сигнал/шум, адаптивное значение порога обнаружения не позволяет обнаружить отклик от тыльной части объекта, а значит, невозможно определить его РЛД. Для удобства целесообразно считать, что при достаточно высоком локальном отношении сигнал/шум $Q_2 \geq 13$ дБ, когда на РЛДП обнаруживаются два локальных центра рассеяния (ЛЦР), позво-

ляющие достоверно определить РЛД объекта, задача распознавания решается с вероятностью близкой к единице $P_{\text{расп}}(t) \geq P_{\text{расп}}^{\text{тр}}$. В противном случае, когда $Q_2 < 13$ дБ, будем считать, что признак РЛД не может считаться устойчивым и $P_{\text{расп}}(t) < P_{\text{расп}}^{\text{тр}}$:

$$\begin{cases} P_{\text{расп}} \geq P_{\text{расп}}^{\text{тр}}, & \text{при } Q_2 \geq 13 \text{ дБ} \\ P_{\text{расп}} < P_{\text{расп}}^{\text{тр}}, & \text{при } Q_2 < 13 \text{ дБ} \end{cases}. \quad (4)$$

С учетом вышесказанного, задача снижения локальной РЛЗ для заданных частотно-угловых условий наблюдения должна заключаться в снижении уровня ЭПР наименее интенсивного (второго) ЛЦР, обусловленного рассеянием на тыльной части объекта, и может быть сформулирована следующим образом:

$$\sigma_{\text{ср2}}(\psi) < \sigma_{\text{ср2}}^{\text{тр}}, \quad f \in [f_n, f_k] \quad \psi \in [\psi_n, \psi_k], \quad (5)$$

где $\sigma_{\text{ср2}}(\psi)$ – средняя по полосе частот $f \in [f_n, f_k]$ ЭПР тыльного ЛЦР; $\sigma_{\text{ср2}}^{\text{тр}}$ – требуемая величина среднего значения локальной ЭПР, которая, исходя из уравнения радиолокации, связана с требуемым рубежом распознавания $R_{\text{расп}}$:

$$\sigma_{\text{ср2}}^{\text{тр}}(R_{\text{расп}}) = Q_2^{\text{п}} \cdot \frac{(4\pi)^3 \cdot T_s \cdot k_B \cdot (R_{\text{расп}})^4}{P_t \cdot G^2 \cdot (\lambda_c)^2 \cdot \tau \cdot L}, \quad (6)$$

где $Q_2^{\text{п}}$ – пороговое отношение сигнал/шум для второго (тыльного) ЛЦР; T_s – шумовая температура системы; k_B – постоянная Больцмана; $R_{\text{расп}}$ – требуемая дальность (рубеж) распознавания; P_t – излучаемая РЛС мощность; G – коэффициент усиления антенны РЛС; λ_c – центральная длина волны РЛС; τ – длительность зондирующего сигнала; L – суммарные потери.

Как было отмечено во введении, существует два общеизвестных пути снижения РЛЗ, в рамках разработанного методического подхода, о котором речь пойдет далее, рассматривается так называемая глубокая stealth-технология, заключающаяся в управлении геометрической формой объекта, которая по необходимости может быть дополнена элементами обычной stealth-технологии [5].

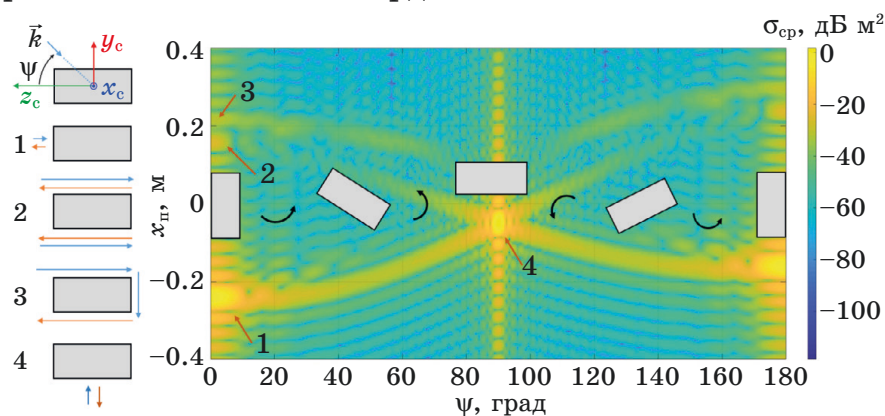
Сравнительный анализ вариантов геометрической формы

Для определенности будем считать, что на интервале наблюдения $t \in [t_n, t_k]$ ракурс изменится не более чем на $|\psi(t)| \leq \psi_{\text{макс}} = 60^\circ$ относительно нулевого (носового) ракурса визирования, а ширина полосы зондирующего сигнала составляет $F = 4$ ГГц. Очевидно, что одним из путей снижения РЛЗ объекта является минимизация его габаритных размеров, в особенности поперечного размера L_y , однако уменьшение габаритов естественным образом влечет за собой снижение объема полезной нагрузки объекта. Для объекта с осевой симметрией и с заданными габаритными разме-

рами максимальным объемом полезной нагрузки обладает тело цилиндрической формы. Для того чтобы выполнялось вышеупомянутое условие $L_x > \Delta x_{\text{п}}$, рассмотрим объект цилиндрической формы со следующими габаритными (геометрическими) параметрами: длина $L_z = 0,4$ м, диаметр $L_y = 0,1$ м. Объем полезной нагрузки такого тела равен: $V_{\text{цил}} = L_z \pi (L_y/2)^2 \approx 3 \cdot 10^{-3}$ м³. Легко показать, что РЛД такого объекта будет превышать элемент разрешения по радиальной координате $L_x > \Delta x_{\text{п}}$ для любого возможного ракурса наблюдения $|\psi(t)| \leq 60^\circ$:

$$\Delta x_{\text{п}} = \frac{c}{F} = 3,75 \text{ см} < L_x(\psi(t)) = L_z \cdot \cos(\psi(t)) = 20 \text{ см}, \quad \psi = \psi_{\text{макс}} \cdot (7)$$

Выражение (7) также означает, что для объекта с выбранными геометрическими параметрами фронтальный и тыльный ЛЦР разрешаются на всем интервале локации для любого ракурса наблюдения ($0 \pm 60^\circ$). Фронтальная и задняя части объекта являются наиболее интенсивными источниками обратного рассеяния, на которых существенным образом нарушаются граничные условия при падении на них зондирующей электромагнитной волны, излучаемой РЛС. На рис. 2 справа приведена синограмма цилиндрического объекта, рассчитанная методом моментов и иллюстрирующая характерные механизмы рассеяния. Условия расчета синограммы: диапазон частот $f \in [7 \dots 11]$ ГГц, диапазон ракурсов $\psi \in [0 \dots 180]$ град., поляризация линейная вертикальная (плоскость вращения объекта перпендикулярна плоскости поляризации зондирующей волны). На рис. 2 слева показаны 4 механизма рассеяния, а также ориентация объекта в строительной системе координат.



- 1 – зеркальное рассеяние фронтальным основанием цилиндра (диском);
- 2 – дифракция на кромке тыльного основания (кромкой диска);
- 3 – двойная дифракция на задней кромке тыльного основания;
- 4 – зеркальное рассеяние на образующей цилиндра

Рис. 2. Синограмма и механизмы рассеяния объекта цилиндрической формы

Fig. 2. Sinogram and scattering mechanisms of the cylindrical object

На рис. 2 видно, что уровень наименее интенсивного тыльного ЛЦР, проявляющегося в заданном угловом секторе $\psi \in [0 \dots 60]$ град и обусловленного вторым или третьим механизмами рассеяния, составляет порядка $\sigma_{\text{ср2}} = -30$ дБ м². Для снижения вероятности определения РЛД необходимо максимально минимизировать проявление второго и третьего механизмов рассеяния.

Для снижения уровня интенсивности тыльного ЛЦР $\sigma_{\text{ср2}} \downarrow$ были рассмотрены несколько геометрических профилей, однозначным образом определяющие геометрическую форму осесимметричного объекта (рис. 3), с учетом заданной пары габаритных параметров L_z, L_y .

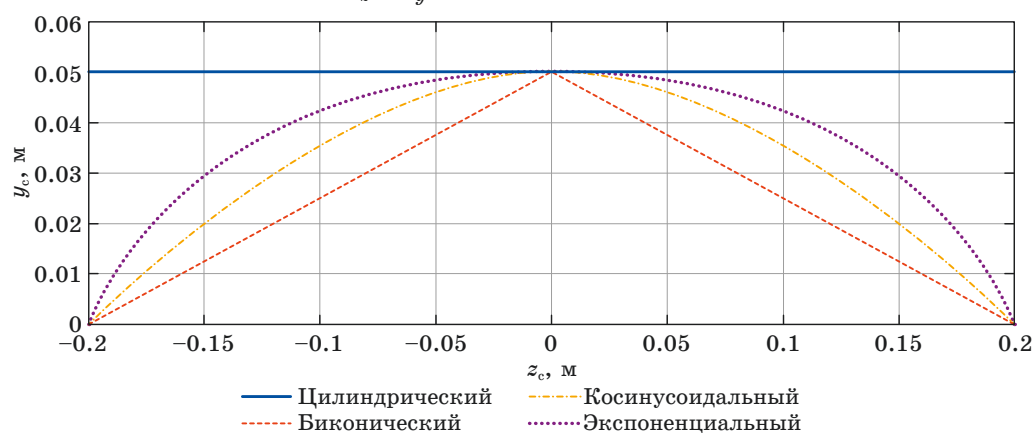


Рис. 3. Варианты геометрического профиля объекта

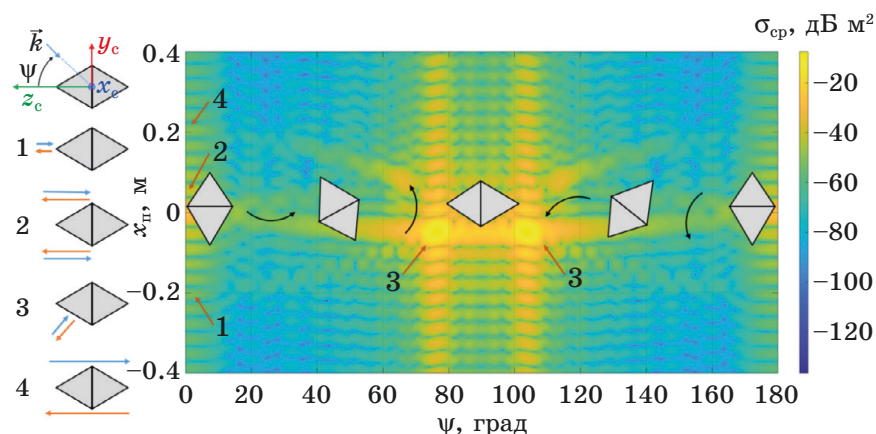
Fig. 3. Different types of object geometric profile

Как видно на рис. 3, минимальным объемом обладает объект с биконическим профилем $V_{\text{бик}} \approx 1 \cdot 10^{-3}$ м³, описывающийся выражением:

$$y_c(z_c) = \frac{L_y}{2} \left(1 - \frac{2|z_c|}{L_z} \right), \quad z_c \in \left[-\frac{L_z}{2}; \frac{L_z}{2} \right]. \quad (8)$$

На рис. 4 представлены механизмы рассеяния и РЛХ объекта биконической формы. Условия расчета аналогичны условиям расчета цилиндрического тела. На рис. 4 слева показаны механизмы рассеяния и ориентация объекта.

У объекта данного профиля имеются два существенных недостатка: отсутствие возможности гибкого варьирования объемом при заданных габаритных размерах, а также наличие дополнительного высокоинтенсивного ($\sigma_{\text{ср2}} = -30$ дБ м²) демаскирующего ЛЦР, обусловленного стыком двух конических поверхностей, проявляющегося при заданных ракурсах наблюдения. На основании вышесказанного дальнейшее рассмотрение объекта биконической формы не представляется целесообразным.



- 1 – дифракция на фронтальной вершине биконуса;
- 2 – дифракция на кромке биконуса;
- 3 – зеркальное рассеяние на образующих конических поверхностях;
- 4 – дифракция на задней вершине биконуса

Рис. 4. Синограмма и механизмы рассеяния объекта биконической формы

Fig. 4. Sinogram and scattering mechanisms of the biconical object

Более перспективными вариантами геометрической формы при решении задачи снижения РЛЗ тыльной части объекта выглядят варианты построения тела вращения без резких изломов профиля поверхности.

Косинусоидальный профиль аналитически описывается выражением (9):

$$y_c(z_c) = \frac{L_y}{2} \cos\left(\frac{\pi}{L_z} z_c\right), \quad z_c \in \left[-\frac{L_z}{2}; \frac{L_z}{2}\right]. \quad (9)$$

На рис. 5 представлены механизмы рассеяния и РЛХ объекта с косинусоидальным профилем. Объем полезной нагрузки объекта составляет $V_{\text{кос}} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Условия расчета синограммы тела с косинусоидальным профилем аналогичны условиям расчета цилиндра и биконического тела. На рис. 5 слева проиллюстрированы механизмы рассеяния, а также ориентация объекта в строительной системе координат.

На рис. 5 видно, что объект с косинусоидальным профилем при заданных габаритных размерах позволяет снизить уровень интенсивности тыльного ЛЦР до $\sigma_{\text{ср}2} = -40 \text{ дБ м}^2$, а также получить РЛДП в заданном угловом секторе наблюдения без дополнительного демаскирующего ЛЦР. Однако данный вариант геометрического профиля имеет схожий недостаток с рассмотренными ранее – невозможностью гибкого изменения объема полезной нагрузки при заданных габаритных размерах объекта.

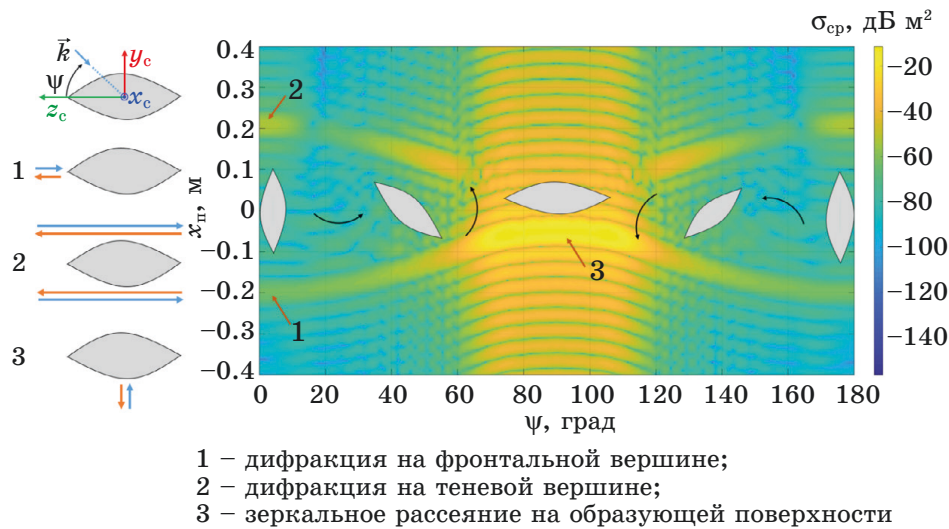


Рис. 5. Синограмма и механизмы рассеяния объекта косинусоидальной формы

Fig. 5. Sinogram and scattering mechanisms of the cosinusoidal object

Для заданных ограничений по габаритам объект с экспоненциальным профилем будет описываться следующим выражением:

$$y_c(z_c) = \frac{L_y}{2} \cdot \frac{\exp(-kx^2) - \exp(-k(L_z/2)^2)}{1 - \exp(k(L_z/2)^2)}, \quad z_c \in \left[-\frac{L_z}{2}; \frac{L_z}{2}\right], \quad (10)$$

где k – параметр, характеризующий крутизну экспоненциального профиля объекта.

Вопрос РЛЗ объекта с экспоненциальным профилем требует более детального рассмотрения по причине возможности управления уровнем локальной ЭПР тыльного ЛЦР за счет изменения параметра k .

Обоснование оптимального значения параметра кривизны экспоненциального профиля

Для определения оптимального значения параметра кривизны экспоненциального профиля была разработана параметризованная электродинамическая модель, для которой параметр кривизны профиля k принимал дискретные значения в диапазоне $-50 \dots 50$ с шагом $dk = 10$. Анализ параметризованной электродинамической модели показал, что для k , принимающего значения больше 50, численный расчет РЛХ с использованием метода моментов не представляется возможным вследствие возникновения проблем с разбиением тела на элементы поверхностной сетки из-за резкого скачка производной в области тыльной (фронтальной) вершины. Для k , принимающего значения меньше -50 , расчет РЛХ является не целесообразным вследствие приближе-

ния профиля к цилиндрическому. На рис. 6 представлены экспоненциальные профили и электродинамические САЕ-модели для двух крайних значений параметров кривизны $k = 50$ и $k = -50$.

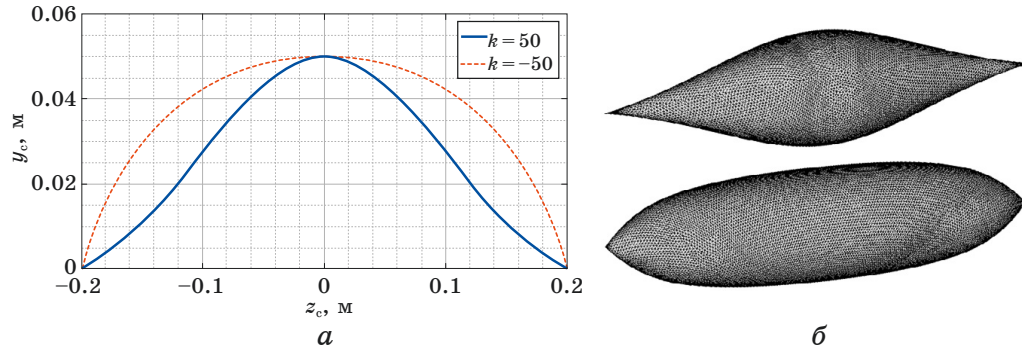


Рис. 6. Параметрическая модель объекта с экспоненциальным профилем для двух крайних значений параметра кривизны:
а – функции профиля; б – САЕ-модели

Fig. 6. Parametric model of an object with an exponential profile for two extreme values of the curvature parameter:
a) profile functions; b) CAE-models

Необходимо отметить, что при $k = 0$ выражение (10) стремится к неопределенности вида $y_c(z_c) = [0/0]$, очевидно, что данное значение кривизны экспоненциального профиля должно соответствовать вполне определенной геометрической форме, что также показывает рис. 6. Для разрешения указанной неопределенности и нахождения аналитического выражения, характеризующего форму объекта при $k = 0$, целесообразно переписать выражение (10), используя следующую замену переменной: $(L_z/2)^2 = L_z'$.

$$y_c(z_c) = \frac{L_y}{2} \cdot \lim_{k \rightarrow 0} \left[\frac{\exp(-kz_c^2) - \exp(-kL_z')}{1 - \exp(-kL_z')} \right]. \quad (11)$$

Для упрощения данного выражения в числителе целесообразно вынести за скобки общий множитель $\exp(-kL_z')$. Выражение примет вид:

$$y_c(z_c) = \frac{L_y}{2} \cdot \lim_{k \rightarrow 0} \left[\frac{\exp(-kL_z') \cdot \left(\exp(-kL_z')^{\frac{z_c^2}{L_z'} - 1} - 1 \right)}{-(\exp(-kL_z') - 1)} \right]. \quad (12)$$

Тогда, используя эквивалентность вида $\exp(x) - 1 \sim x$, выражение (6) может быть преобразовано следующим образом:

$$y_c(z_c) = \frac{L_y}{2} \cdot \lim_{k \rightarrow 0} \left[\frac{\exp(-kL_z') \cdot \left(-kL_z' \left(\frac{z_c^2}{L_z'} - 1 \right) \right)}{kL_z'} \right]. \quad (13)$$

Очевидно, что при $k \rightarrow 0$ экспоненциальный множитель за скобками стремится к единичному значению $\exp(-kL_z') \rightarrow 1$, тогда (13) примет вид:

$$y_c(z_c) = \frac{L_y}{2} \cdot \lim_{k \rightarrow 0} \left[\frac{-kL_z' \left(\frac{z_c^2}{L_z'} - 1 \right)}{kL_z'} \right] = -\frac{L_y}{2} \cdot \frac{z_c^2}{L_z'} + \frac{L_y}{2}. \quad (14)$$

Сделав обратную замену $L_z' = (L_z/2)^2$, выражение (14) примет окончательный вид:

$$y_c(z_c) = \frac{2L_y}{L_z^2} z_c^2 + \frac{L_y}{2}. \quad (15)$$

Выражения (15) показывает, что экспоненциальный профиль (10) при $k \rightarrow 0$ приобретает параболическую форму с параметром крутизны квадратичной функции $2L_y/L_z^2$ и параметром сдвига $L_y/2$. Тогда для определения оптимального значения параметра кривизны экспоненциального профиля методом параметрического итерационного поиска при $k = 0$ экспоненциальная САЕ-модель объекта должна быть заменена параболической с указанными геометрическими параметрами.

Для всего множества дискретных значений k были рассчитаны РЛХ с использованием метода моментов. Синограмма для заданного значения k имеет вид, аналогичный представленному на рис. 5. На рис. 7 представлен набор РЛДП объекта с экспоненциальным профилем для $k \in [-50 \dots 50]$ с шагом $dk = 10$, при ракурсе наблюдения $\psi = 0$ градусов.

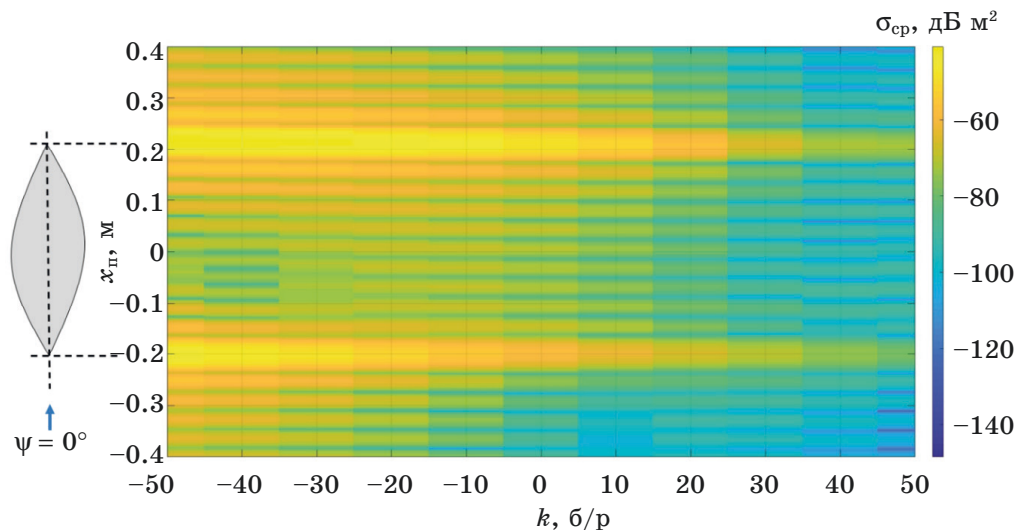


Рис. 7. Набор РЛДП объекта с экспоненциальным профилем для различных значений параметра кривизны k

Fig. 7. Set of radar range profiles of the object with the exponential profile for different values of the curvature parameter k

Для оценки интенсивности рассеяния на задней вершине объекта с экспоненциальным профилем использовался модифицированный алгоритм CLEAN [7; 8]. Сущность алгоритма CLEAN заключается в последовательном поиске и экстракции откликов точечных отражателей из анализируемого РЛДП в предположении частотной независимости их характеристик рассеяния. При этом анализируемой характеристикой являлось множество РЛДП, зависящих от ракурса наблюдения ψ и параметра кривизны k экспоненциального профиля $\sigma_{\text{ср}}(x_{\text{п}}, \psi, k)$. Таким образом, извлеченные с помощью модифицированного алгоритма CLEAN значения позволили построить двумерную зависимость среднего значения ЭПР тыльной вершины объекта с экспоненциальным профилем от указанных аргументов $\sigma_{\text{ср}2}(\psi, k)$. Полученная зависимость представлена на рис. 8.

Необходимо отметить, что справедливым является подход, подразумевающий интегрирование представленной зависимости $\sigma_{\text{ср}2}(\psi, k)$ по ракурсу наблюдения ψ с последующей нормировкой к диапазону ее изменения $\Psi = \psi_{\text{к}} - \psi_{\text{н}}$, направленный на получение среднего в полосе частот F и угловой апертуре значения ЭПР ЛЦР:

$$\sigma_{\text{ср}2}(k) = \frac{1}{\Psi} \int_{\psi_{\text{н}}}^{\psi_{\text{к}}} \sigma_{\text{ср}2}(\psi, k) d\psi. \quad (16)$$

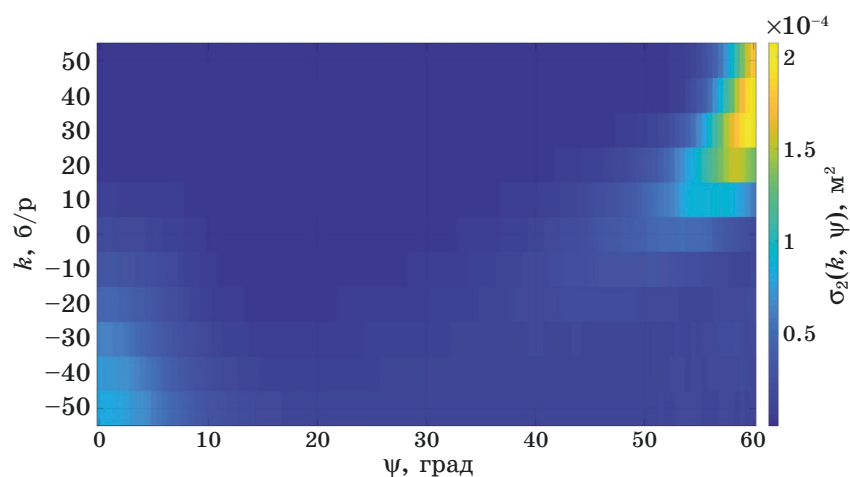


Рис. 8. Зависимость средней ЭПР тыльной вершины объекта с экспоненциальным профилем от параметра кривизны и ракурса наблюдения

Fig. 8. Dependence of the rear vertex average radar cross section of the object with exponential profile on the curvature parameter and the observation angle

Однако в силу детерминированного характера рассеяния наиболее рациональным представляется функциональный анализ зависимости $\sigma_{\text{ср}2}(\psi, k)$. Так, на представленной на рис. 8

зависимости выделяются две ярко выраженные области интенсивного рассеяния. Первая область имеет локальный экстремум при $k = -50$, $\psi = 0^\circ$ и имеет размер области определения: $k \in [-50 \dots 0]$ и $\psi \in [0^\circ \dots 10^\circ]$, вторая имеет локальный экстремум при $k = 40$, $\psi = 60^\circ$ и размер области определения: $k \in [0 \dots 50]$ и $\psi \in [50^\circ \dots 60^\circ]$. Данное поведение зависимости связано с двумя эффектами. Во-первых, при увеличении параметра кривизны $\uparrow k$ интенсивность дифракции на тыльной вершине снижается пропорционально степени ее заостренности, а во-вторых, увеличение параметра $\uparrow k$ приводит к возникновению влияния зеркального механизма рассеяния (см. рис. 5), так как форма объекта стремится к кнопочной. В то же самое время на полученной зависимости наблюдается зона минимальной интенсивности рассеяния: $k \in [20 \dots 50]$ и $\psi \in [0^\circ \dots 40^\circ]$.

Исходя из результатов анализа полученной зависимости, для решения задачи снижения локальной РЛЗ $\downarrow \sigma_{\text{ср}2}$, целесообразным представляется выбор параметра кривизны экспоненциального профиля в пределах $k \in [30 \dots 50]$, а также стабилизация положения объекта относительно наблюдающей его РЛС в пределах углового сектора $|\psi| \leq 50^\circ$. Однако повышение параметра кривизны профиля $\uparrow k$ неизбежно приводит к снижению объема полезной нагрузки объекта $\downarrow V_{\text{экс}}(k)$. Поэтому в общем случае выбор определенного значения параметра кривизны может быть сделан по итогам решения оптимизационной задачи.

Для определения оптимального значения коэффициента кривизны экспоненциального профиля $k_{\text{опт}}$ необходимо рассчитать две зависимости: объема $V_{\text{экс}}(k)$ и отношения сигнал/шум $Q_2(k)$. При этом для получения $Q_2(k)$ необходимо использовать выражение (6) и интегральный показатель, рассчитываемый с использованием выражения (16) и характеризующий локальную заметность тыльного ЛЦР в заданных полосе частот $f \in [f_{\text{н}}, f_{\text{к}}]$ и диапазоне (секторе) углов наблюдения $\psi \in [\psi_{\text{н}}, \psi_{\text{к}}]$. Пример графического решения оптимизационной задачи, в котором для получения зависимости $Q_2(k)$ использовались технические характеристики одной (№ 1) из двух гипотетических РЛС (табл. 1), представлен на рис. 9.

Таблица 1. Технические характеристики РЛС

Table 1. Technical characteristics of the radars

№ п/п	$Q_2^{\text{п}}, \text{б/п}$	$P_t, \text{Вт}$	$G, \text{б/п}$	$\lambda_c, \text{м}$	$T_s, \text{К}$	$\tau, \text{с}$	$L, \text{б/п}$
1	20	10^6	$2 \cdot 10^6$	0,03	450	10^{-4}	0,2
2	20	$0,25 \cdot 10^6$	10^5	0,03	450	10^{-4}	0,2

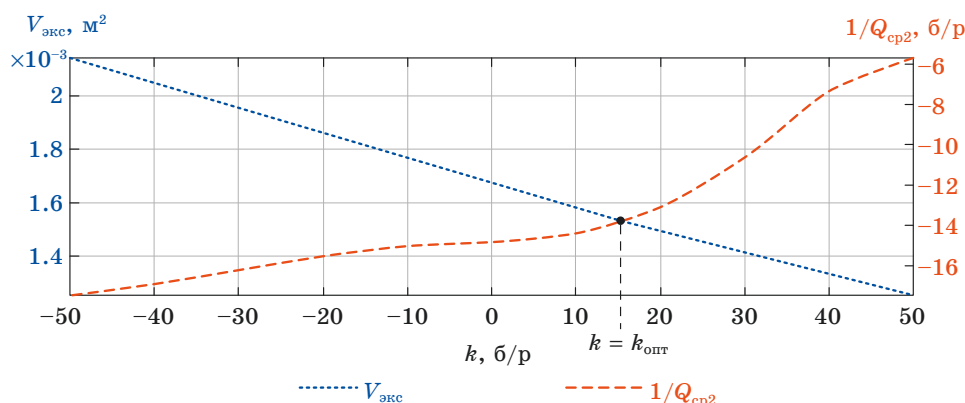


Рис. 9. Пример графического решения задачи по нахождению оптимального значения параметра кривизны экспоненциального профиля

Fig. 9. Graphical solution example for the exponential profile's curvature parameter optimum value search task

Как видно на рис. 9, результатом решения оптимизационной задачи является значение параметра кривизны экспоненциального профиля, равное $k_{\text{опт}} = 15$. Полученное значение соответствует объему тела с экспоненциальным профилем $V_{\text{экс}} = 1,55 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ при заданных габаритных параметрах $L_z = 0,4 \text{ м}$, $L_y = 0,1 \text{ м}$.

В табл. 2 в качестве показателей локальной РЛЗ представлены результаты расчета рубежей распознавания $R_{\text{расп}}$, полученные на основе выражения (6), для двух гипотетических РЛС (см. табл. 1) и различных видов геометрического профиля объекта локации.

Таблица 2. Результаты расчета рубежей распознавания

Table 2. Recognition range calculation results

№ п/п	Вид профиля	$V, \text{ м}^3$	$\sigma_{\text{ср2}}, \text{ м}^2$	$R_{\text{расп}}$ для РЛС № 1, км	$R_{\text{расп}}$ для РЛС № 2, км
1	Цилиндрический	$3 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	70	436
2	Биконический	$1 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$	52	330
3	Косинусоидальный	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$8,6 \cdot 10^{-6}$	34	217
4	Экспоненциальный, $k = -50$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	41	258
5	Экспоненциальный, $k = 0$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$9,6 \cdot 10^{-6}$	35	223
6	Экспоненциальный, $k = 15$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$8,5 \cdot 10^{-6}$	34	217
7	Экспоненциальный, $k = 50$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	20	130

Данные, представленные в табл. 2, показывают существование прямой связи между средней ЭПР ЛЦР $\sigma_{\text{ср}2}$ и объемом полезной нагрузки V , которая согласуется с теоремой «О среднем значении ЭПР» [4], однако, в данном случае объясняется иначе, так как речь идет о локальной характеристике рассеяния объекта. В частности, при увеличении параметра кривизны $\uparrow k$ интенсивность дифракции на тыльной вершине снижается пропорционально степени ее заостренности, то есть прямо пропорционально величине скачка производной от функции поверхности объекта в окрестности тыльной вершины объекта.

Заключение

В результате проведенных исследований показана целесообразность использования методов спектрального оценивания для оценки локальной РЛЗ объекта при заданных частотно-угловых условиях наблюдения.

Разработан методический подход по снижению локальной РЛЗ объекта с заданными габаритными размерами. Сущность разработанного подхода заключается в параметрической оптимизации геометрической формы объекта в локальной области с целью удовлетворения требованиям по локальной РЛЗ и объему полезной нагрузки. Показано, что для снижения локальной РЛЗ при заданных частотно-угловых условиях наблюдения необходимо проводить функциональный анализ двумерной параметрической характеристики рассеяния ЛЦР (см. рис. 8), которая представляет собой зависимость среднего по частоте значения ЭПР заданного ЛЦР от ракурса наблюдения и параметра геометрической формы объекта локации. Дальнейшие исследования в данной области могут быть посвящены дополнению разработанного методического подхода, основанного на глубокой stealth-технологии, элементами обычной stealth-технологии, то есть применением радиопоглощающих материалов и покрытий [9–11].

Список литературы

1. Skolnik M. *Radar Handbook*. 3rd ed. McGraw-Hill Education; 2008. 1328. p.
2. Ruck G. *Radar Cross Section Handbook*. Peninsula Pub; 1989. 496 p.
3. Knott E., Shaeffer J., Tuley M. *Radar Cross Section*. 2nd ed. SciTech Publishing; 2004. 637 p.
4. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели. М.: Советское радио; 1975. 248 с.

5. Штагер Е.А. Физические основы стелс-технологии. СПб.: ООО «Издательство ВВМ»; 2013. 276 с.
6. Астанин Л.Ю., Костылев А.А. Основы сверхширокополосных измерений. М.: Радио и связь; 1989. 192 с.
7. Stoica P., Moses R. *Spectral Analysis of Signals*. Prentice Hall; 2004. 427 p.
8. Ozdemir C. *Inverse Synthetic Radar Imaging with MATLAB Algorithms*. Wiley; 2012. 383 p.
9. Zeng H., Zhao X., Su Q., Zhang Y., Li H. Fast coating analysis and modeling for RCS reduction of aircraft. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2019;32(6):1481–1487. DOI: 10.1016/j.cja.2018.11.001
10. Andrade L., Santos L., Gama A. Analysis of radar cross section reduction of fighter aircraft by means of computer simulation. *Journal of Aerospace Technology and Management*. 2014;6(2):177–182. DOI: 10.5028/jatm.v6i2.259
11. Liu S., Guo L., Pan W., Chen W., Xiao Y. PO calculation for reduction in radar cross section of hypersonic targets using RAM. *Physics of Plasmas*. 2018;25(6):062105. DOI: 10.1063/1.5030194

References

1. Skolnik M. *Radar Handbook*. 3rd ed. McGraw-Hill Education; 2008. 1328. p.
2. Ruck G. *Radar Cross Section Handbook*. Peninsula Pub; 1989. 496 p.
3. Knott E., Shaeffer J., Tuley M. *Radar Cross Section*. 2nd ed. SciTech Publishing; 2004. 637 p.
4. Kobak V.O. *Radar Scatterers*. Moscow: Sovetskoe radio; 1975. 248 p. (In Russ.)
5. Shtager E.A. *Physical Foundations of Stealth Technology*. St. Petersburg: VVM; 2013. 276 p. (In Russ.)
6. Astanin L.Yu., Kostylev A.A. *Basis of ultrawideband radar measurements*. Moscow: Radio i svyaz; 1989. 192 p. (In Russ.)
7. Stoica P., Moses R. *Spectral Analysis of Signals*. Prentice Hall; 2004. 427 p.
8. Ozdemir C. *Inverse Synthetic Radar Imaging with MATLAB Algorithms*. Wiley; 2012. 383 p.
9. Zeng H., Zhao X., Su Q., Zhang Y., Li H. Fast coating analysis and modeling for RCS reduction of aircraft. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2019;32(6):1481–1487. DOI: 10.1016/j.cja.2018.11.001
10. Andrade L., Santos L., Gama A. Analysis of radar cross section reduction of fighter aircraft by means of computer simulation. *Journal of Aerospace Technology and Management*. 2014;6(2):177–182. DOI: 10.5028/jatm.v6i2.259
11. Liu S., Guo L., Pan W., Chen W., Xiao Y. PO calculation for reduction in radar cross section of hypersonic targets using RAM. *Physics of Plasmas*. 2018;25(6):062105. DOI: 10.1063/1.5030194

Информация об авторах

Казанцев Александр Александрович, кандидат технических наук, начальник отдела Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия.

Самородов Борис Аркадьевич, старший научный сотрудник лаборатории Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия.

Терентьев Алексей Михайлович, начальник лаборатории Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия.

Information about the authors

Alexandr A. Kazantsev, Candidate of Technical Sciences, Head of Department, Mozhaysky Space-Military Academy, St. Petersburg, Russia

Boris A. Samorodov, Senior Researcher of Laboratory, Mozhaysky Space-Military Academy, St. Petersburg, Russia

Alexey M. Terentev, Head of Laboratory, Mozhaysky Space-Military Academy, St. Petersburg, Russia

Поступила / Received: 12.07.2021

Принята в печать / Accepted: 20.07.2021