

ОБ ОСНОВНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ОБЪЕКТОВ ON THE MAIN RADAR CHARACTERISTICS OF OBJECTS

Колычев С.А., кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник
ФГКВБОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия.

Kolychev S.A., PhD in Physics and Mathematics, Leading Researcher
FSOMEI HE Military Educational and Scientific Centre of the Air Force
«N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia.

Аннотация. В случае движения объекта исследования или передающей антенны радиолокационного сигнала формируемое вторичное излучение будет зависеть от параметров и характеристик этих движений, а радиосигнал, по которому необходимо оценивать отражательные свойства объекта, от характеристик движения приёмной антенны. В данной статье приводятся оценочные соотношения для напряженности электрической составляющей эхосигнала от сложного объекта исследования с учетом множества центров рассеяния. В результате полученные характеристики позволяют выявить характерные особенности радиолокационного рассеяния исследуемого объекта для задачи идентификации вкладов в эти характеристики отдельных его центров рассеяния.

Ключевые слова: распознавание объектов исследования, рассеяние радиоволн, уравнения электродинамики, площадь рассеяния.

Abstract. In the case of movement of the object of study or the transmitting antenna of the radar signal, the generated secondary radiation will depend on the parameters and characteristics of these movements, and the radio signal, by which it is necessary to evaluate the reflective properties of the object, on the characteristics of the movement of the receiving antenna. This article provides estimates for the strength of the electrical component of the echo signal from a complex object of study, taking into account the multitude of scattering centers. As a result, the characteristics obtained make it possible to reveal the characteristic features of the radar scattering of the object under study for the problem of identifying the contributions to these characteristics of its individual scattering centers.

Keywords: recognition of research objects, scattering of radio waves, equations of electrodynamics, scattering area.

Исследования процессов распространения электромагнитных волн не теряет своей актуальности. В настоящий момент основным способом анализа результатов является моделирование различных механизмов преобразования излучения при взаимодействии с различными объектами (см., например, [1-5]). Проблемы преобразования напряженности электрического поля монохроматических компонент Фурье представления сигнала при рассеянии на различных объектах неизменно возникают, например, в космических

программах и в наземных условиях при решении задач обнаружения и распознавания целей исследования. Современные системы радиолокационного наблюдения позволяют проводить диагностику объектов исследования на очень высоком уровне.

При описании процесса радиолокационного наблюдения объектов обычно выделяют этапы:

- формирования зондирующего радиосигнала, излучаемого в направлении объекта;
- преобразования зондирующего радиосигнала при распространении от передающей антенны к объекту исследования;
- преобразования объектом исследования зондирующего радиосигнала (первичного излучения) в рассеянный радиосигнал (вторичное излучение);
- преобразования рассеянного радиосигнала при распространении от объекта до приёмной антенны;
- восстановление по принимаемому радиосигналу характеристик рассеяния объекта.

В общем случае результат преобразования зондирующего сигнала в эхосигнал зависит не только от свойств объекта исследований. Если объект или передающая антенна радиолокационного сигнала (РЛС) движутся, то формируемое вторичное излучение будет зависеть от параметров и характеристик этих движений, а радиосигнал, по которому необходимо оценивать отражательные свойства объекта, будет зависеть также и от характеристик движения приёмной антенны. В принципе такого рода динамические радиолокационные характеристики (РЛХ) могут быть оценены по характеристикам относительного движения антенн и объекта исследований (образца ВВСТ) и его статическим РЛХ, полученным при фиксированных положениях антенн и объекта. Для сложных целей с несколькими центрами рассеяния и непредсказуемым характером движения по данным статических измерений могут строиться статистические описания динамических РЛХ.

Цель данной работы – определить характеристики, позволяющие выявить особенности радиолокационного рассеяния исследуемого объекта рассеяния и идентифицировать вклад в них отдельных центров рассеяния (механизмов формирования объектом его РЛХ).

При определении статических РЛХ объектов исследования система, состоящая из передающего и приёмного каналов РЛС и объекта, как источника информативного радиоизлучения, с высокой точностью может считаться линейной. Поэтому результат рассеяния объектом зондирующего сигнала любой формы может быть восстановлен по результатам рассеяния монохроматических компонент его Фурье представления (гармоник сигнала в частотной области). Для представляющих практический интерес типовых ситуаций радиолокационного наблюдения цель находится в дальней зоне излучения передающей антенны. Пусть центр системы координат находится в области, занимаемой объектом (совпадает, например, с его центром масс). Тогда поле гармоник зондирующего сигнала может быть представлено в виде сферической (квазиплоской на объекте) волны

$$\vec{E}_T = \frac{\vec{E}_0}{k|\vec{r}_t - \vec{r}|} \exp(-ik|\vec{r}_t - \vec{r}|) \approx \vec{E}_0 \frac{\exp(-ikr_t)}{kr_t} \left\{ \frac{r_t}{r_t - (\vec{n}_t \vec{r})} \exp(ik(\vec{n}_t \vec{r}) - ik \frac{r^2}{2r_t} (1 - (\vec{n}_t \vec{n})^2)) \right\} \equiv \frac{\exp(-ikr_t)}{kr_t} \vec{E}_{nd}, \quad (1)$$

где $\vec{r}_t(r_t)$ – радиус-вектор (его модуль) фазового центра источника этой сферической (квази плоской в месте расположения объекта) волны; $\vec{r}(r)$ – радиус вектор (его модуль) точки наблюдения в окрестности объекта; \vec{n}_t – единичный вектор (орт) в направлении на источник; $\vec{n} = \vec{r}/r$ – единичный вектор (орт) в направлении точки наблюдения; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число излучения (λ – длина волны); \vec{E}_0 – комплексная амплитуда, характеризующая интенсивность рассматриваемой гармоники зондирующего излучения.

В той же системе координат в том же приближении вторичное поле в месте его наблюдения в дальней зоне объекта можно представить наложением сферических волн типа (1) от нескольких локальных центров рассеяния объекта

$$\vec{E}_R \approx \frac{\exp(-ikr_r)}{kr_r} \vec{E}_{pc} \equiv \frac{\exp(-ikr_r)}{kr_r} \sum_{m=1}^M \vec{E}_m \frac{r_r}{r_r - (\vec{n}_r \vec{r}_m)} \exp(ik(\vec{n}_r \vec{r}_m) - ik \frac{r_m^2}{2r_r} (1 - (\vec{n}_r \vec{n}_m)^2)), \quad (2)$$

где r_r – модуль радиуса вектора места приёма эхосигнала; M – общее число центров рассеяния объекта исследований, формирующих поле рассеяния в точке наблюдения; $\vec{r}_m(r_m)$ – радиус вектор (его модуль) m -го центра рассеяния; \vec{n}_r – единичный вектор (орт) в направлении на точку наблюдения; \vec{n}_m – единичный вектор (орт) в направлении на m -ый центр рассеяния; \vec{E}_m – комплексная амплитуда, характеризующая вклад m -го центра рассеяния в гармонику поля дальней зоны эхосигнала. Безразмерные множители $\exp(-ikr_{t(r)})/(kr_{t(r)})$ представляют собой передаточные функции, описывающие трансформацию гармоник сигнала при распространении от передатчика до центра системы координат (и от этого центра до места приёма) в свободном пространстве. В плане математического моделирования процесса рассеяния объект исследования описывается оператором, преобразующим \vec{E}_{nd} в \vec{E}_{pc}

$$\vec{E}_{pc} = \hat{S}(\vec{E}_{nd}). \quad (3)$$

В общем случае это линейный интегро-дифференциальный оператор, отображающий вектор функцию пространственных координат – произведение постоянного вектора \vec{E}_0 на скалярную функцию от \vec{r} (фигурные скобки выражения (1)) в вектор, описываемый суммой в выражении (2). Упомянутая скалярная функция и выражение под знаком суммы зависят от направления на источник зондирующего сигнала \vec{n}_t , направления на приёмник эхосигнала \vec{n}_r и удалений объекта от этих источника и приёмника.

Для выявления собственно способности объекта формировать эхосигнал зависимости РЛХ от расстояний между объектом и источником и объектом и местом наблюдения стремятся исключить, ограничиваясь зависимостью оператора (3) от направления прихода зондирующего сигнала и направления излучения сформированного объектом эхосигнала. Это достигается предельным переходом $r_t \rightarrow \infty$ в выражении для \vec{E}_{nd} (в фигурных скобках

выражения (1)) и предельным переходом $r_r \rightarrow \infty$ в выражении для \vec{E}_{pc} (в членах суммы в выражении (2)). Физически результат соответствует облучению объекта плоской волной, падающей с направления на передающую антенну РЛС,

$$\vec{E}_{n\theta} = \vec{E}_0 \exp(ik(\vec{n}_t \vec{r})) \quad (4)$$

и описанию характеристики направленности рассеянного эхосигнала вдоль \vec{n}_r плоской волной с амплитудой

$$\vec{E}_{pc} = \sum_{m=1}^M \vec{E}_m \exp(ik(\vec{n}_r \vec{r}_m)). \quad (5)$$

При измерениях наиболее распространено представление поляризации волны в линейном базисе, при котором вектор \vec{E} волны описывается суммой $\vec{E} = E_1 \vec{l}_1 + E_2 \vec{l}_2$, в которой перпендикулярные направлению распространения волны единичные вектора \vec{l}_n ортогональны друг другу и неизменны во времени. Оператор преобразование (3) для случая (4)-(5) можно представить в виде матрицы

$$\begin{bmatrix} E_{pc;1} \\ E_{pc;2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}; S_{12} \\ S_{21}; S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{0;1} \\ E_{0;2} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Эта поляризационная матрица рассеяния описывает трансформацию (ослабление и фазовый сдвиг) комплексной амплитуды напряжённости электрического поля плоской волны, падающей на объект исследования с направления \vec{n}_t ($\vec{l}_1 = \vec{l}_{g_t}, \vec{l}_2 = \vec{l}_{\varphi_t}$), в комплексную амплитуду плоской волны, характеризующей интенсивность эхосигнала, рассеянного в направлении \vec{n}_r ($\vec{l}_1 = \vec{l}_{g_r}, \vec{l}_2 = \vec{l}_{\varphi_r}$). Элементы матрицы соответствуют случаям приёма на поляризации, описываемой первым индексом, и передаче на поляризации, описываемой вторым индексом (диагональные элементы передача и приём на совпадающих поляризациях, недиагональные – кросс поляризационная приёмопередача).

На практике для оценки отражательной способности объекта исследований широко используется его эффективная площадь рассеяния (ЭПР), определяемая через квадратичные по полю (энергетические) характеристики. С учётом поляризационных эффектов она определяется как

$$\sigma_{xy} = \lim_{r_r \rightarrow \infty} 4\pi r_r^2 \frac{|E_{pc;x}|^2}{|E_{n\theta;y}|^2}, \quad (7)$$

где $E_{n\theta;y}$ – амплитуда падающей плоской волны, поляризованной по y ; $E_{pc;x}$ – амплитуда, характеризующая интенсивность принимаемого на поляризации x эхосигнала. Используя определение (7), можно представить преобразование (6) в виде

$$\begin{bmatrix} E_{pc;1} \\ E_{pc;2} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{\pi}}{\lambda} \begin{bmatrix} \sqrt{\sigma_{11}} \exp(-i\psi_{11}); \sqrt{\sigma_{12}} \exp(-i\psi_{12}) \\ \sqrt{\sigma_{21}} \exp(-i\psi_{21}); \sqrt{\sigma_{22}} \exp(-i\psi_{22}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{0;1} \\ E_{0;2} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где ψ_{xy} – фазовый сдвиг при преобразовании падающего радиоизлучения в рассеянное при поляризации падающего излучения y и поляризации приёма x . Значения матрицы рассеяния, полученные в некотором частотном диапазоне, позволяют описать трансформацию зондирующих сигналов этого диапазона при его рассеянии для данных направлений зондирования и приёма во временной области. В этом отношении частотные и угловые зависимости бистатической поляризационной матрицы рассеяния дают полное описание отражательной способности объектов исследования. Через измерения трансформации зондирующего сигнала в рассеянный во временной области можно в свою очередь получить значения поляризационной матрицы рассеяния для частот в полосе этого зондирующего сигнала.

В комплексном исследовании наряду с поляризационными матрицами рассеяния в качестве самостоятельных рассматриваются другие производные от неё РЛХ. Основными из этих характеристик являются дальномерные радиолокационные портреты и радиоизображения на основе обратного синтеза апертуры излучающей системы (ISAR – радиоизображения). Эти РЛХ позволяют выделить «тонкую» структуру эхосигнала, на основе разрешения отдельных центров рассеяния и характеристик их вклада в эхосигнал.

Для определения координат местоположения отдельных центров рассеяния в направлении линии визирования при вторичной обработке результатов измерений имитируется селекция по дальности во временной области – выделение отражённых от отдельных центров рассеяния коротких радиоимпульсов. Для этого достаточно «пропустить» гармоники модельного зондирующего радиосигнала через «передаточную функцию» «падающее поле – рассеянное поле», представленную матрицей (6) – (8), и провести обратное преобразование Фурье. При этом частотный спектр модельного импульса играет роль весовой функции в соответствующем интеграле Фурье от «передаточной функции». Рациональный выбор весовой функции позволяет уменьшить побочные импульсные отклики (артефакты метода), не связанные с центрами рассеяния. Оптимальной принято считать весовую функцию Дольфа-Чебышева [6,7]. Для сложных объектов с большим числом центров рассеяния сложение побочных импульсных откликов может приводить к искажениям результатов измерений. Чтобы избежать таких искажений используются весовые функции, дающие несколько увеличенный («расширенный») основной (информативный) импульсный отклик при сильном уменьшении суммарного «поля» побочных импульсных откликов. Наиболее широко используются весовые функции Тейлора и Кайзера-Бесселя [6-8]. По результатам обратного преобразования Фурье восстанавливается дальномерный портрет объекта при «зондировании» модельным импульсом.

Информация о расположении центров рассеяния в направлении, поперечном направлению облучения, содержится в интерференционной картине диаграммы рассеяния объекта при смене угла визирования. Для определения поперечной «координаты» центра рассеяния используется метод обратного синтеза апертуры. В основе метода лежит принцип работы радара с синтезируемой апертурой. Угловое смещение цели исследования

относительно синтезированной апертуры воспроизводится путём вращения объекта исследований вокруг оси, перпендикулярной направлению визирования. При совмещённых приёме и передаче выражение (4) для плоской волны, характеризующей гармонику зондирующего излучения, и выражение (5) для плоской волны, характеризующей гармонику эхосигнала, принимают вид:

$$\vec{E}_{nd} = \vec{E}_0 \exp(ik(\vec{n}\vec{r})) \quad (9)$$

и

$$\vec{E}_{pc} = \sum_{m=1}^M \vec{E}_m \exp(ik(\vec{n}\vec{r}_m)) = \sum_{m=1}^M \vec{E}_m \exp(ikr_m \sin(\vartheta_m) \cos(\varphi_m)), \quad (10)$$

где \vec{n} – единичный вектор (орт) в направлении, с которого падает волна (в котором ведётся наблюдение); \vec{E}_0 – её комплексная амплитуда, фаза которой равна фазе волны в начале системы координат; $r_m, \vartheta_m, \varphi_m$ – координаты местоположения m -го центра рассеяния в сферической системе координат с полярной осью, совпадающей с осью вращения объекта, и осью отсчёта угла вращения, направленной на радар (в направлении \vec{n}). Вектор \vec{E}_m описывает вклад m -го центра в диаграмму обратного рассеяния объекта исследований (направление полярной оси на наблюдателя). Величина $\rho_m = r_m \sin(\vartheta_m)$ представляет собой расстояния от местоположения m -го центра рассеяния до поворотной оси, величина $x_m = \rho_m \cos(\varphi_m)$ – координату центра рассеяния вдоль направления на радар (обратное рассеяние), величина $y_m = \rho_m \sin(\varphi_m)$ – координату в поперечном линии визирования направлении.

Вектор \vec{E}_m является результатом преобразования падающего излучения в рассеянное за счёт некоторого формирующего этот центр механизма, который для многих типов центров рассеяния может описываться соответствующей (парциальной) матрицей рассеяния

$$\begin{bmatrix} E_{m;1} \\ E_{m;2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}^{(m)}; S_{12}^{(m)} \\ S_{21}^{(m)}; S_{22}^{(m)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{nd;1}(\vec{r}_m) \\ E_{nd;2}(\vec{r}_m) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

В рассматриваемой схеме измерений индекс 1 может соответствовать поляризации вдоль оси Z (вертикальная поляризация), а индекс 2 – поляризации вдоль оси Y (горизонтальная поляризация).

Здесь необходимо разделить фазовый сдвиг при собственно трансформации возбуждающего сигнала (плоской волны (1)) в излучение m -го центра рассеяния и фазовый сдвиг, обусловленный изменением его пространственного положения при повороте объекта исследования. Подставляя в (11) выражение для $\vec{E}_{nd}(\vec{r}_m)$, можно представить \vec{E}_m в виде $\vec{E}_m = \vec{E}_m^{(0)} \exp(ik(\vec{n}\vec{r}_m))$, а выражение для характеристики эхосигнала (10) в виде

$$\vec{E}_{pc} = \sum_{m=1}^M \vec{E}_m^{(0)} \exp(2ik(\vec{n}\vec{r}_m)) = \sum_{m=1}^M \vec{E}_m^{(0)} \exp(2ikr_m \sin(\vartheta_m) \cos(\varphi_m)), \quad (12)$$

$$\text{где } \begin{bmatrix} E_{m;z}^{(0)} \\ E_{m;y}^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{zz}^{(m)}; S_{zy}^{(m)} \\ S_{yz}^{(m)}; S_{yy}^{(m)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{0;z} \\ E_{0;y} \end{bmatrix}.$$

В общем случае величины координат ρ_m , x_m , y_m и вектор $\vec{E}_m^{(0)}$ зависят от направления оси вращения и угла поворота объекта ψ . При этом положение центра рассеяния на объекте при изменении ракурса рассеяния может изменяться. Так зеркальный центр рассеяния при повороте может скользить по рассеивающей поверхности, центр рассеяния на ребре (тонком цилиндре и т.д.) может перемещаться вдоль него. Могут быть центры рассеяния, жёстко связанные с элементами конструкции объекта исследования, например, вершины конусов, пирамид и т.д.). Как правило, зависимости $\vec{E}_m^{(0)}(\psi)$, описывающая собственно трансформацию падающего излучения в излучение отдельного центра рассеяния, медленно меняется с изменением ψ так, что на небольшом интервале $\psi_0 - \Delta_\psi / 2 \leq \psi \leq \psi_0 + \Delta_\psi / 2$ вблизи $\psi = \psi_0$ эта вектор функция может характеризоваться своими средними значениями амплитуды и фазы (равными или близкими по значению к амплитуде и фазе $\vec{E}_m^{(0)}(\psi_0)$). Для центров рассеяния, «жёстко» связанных с элементами конструкции исследуемого объекта, r_m и ϑ_m можно считать не зависящими от ψ . В этом случае зависимость азимутального угла центра рассеяния от угла поворота имеет на указанном интервале вид

$$\varphi_m = \varphi_m(\psi_0) + \delta_\psi, \quad (13)$$

где $\delta_\psi = \psi - \psi_0$ ($-\Delta_\psi / 2 \leq \delta_\psi \leq \Delta_\psi / 2$).

Умножение результатов измерений на $\exp(2iku\delta_\psi)$ и усреднение этого произведения по δ_ψ на рассматриваемом интервале при вторичной обработке приводит с учётом (12) и (13) к вектор функции от y

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^M \vec{E}_m^{(0)} \exp(2ik\rho_m \cos(\varphi_m(\psi_0))) \frac{1}{\Delta_\psi} \int_{-\frac{\Delta_\psi}{2}}^{\frac{\Delta_\psi}{2}} \exp(2ik(y - \rho_m \sin(\varphi_m(\psi_0)))\delta_\psi) d\delta_\psi = \\ \sum_{m=1}^M \vec{E}_m^{(0)} \exp(2ik\rho_m \cos(\varphi_m(\psi_0))) \frac{\sin(k(y - \rho_m \sin(\varphi_m(\psi_0)))\Delta_\psi)}{k(y - \rho_m \sin(\varphi_m(\psi_0)))\Delta_\psi}, \end{aligned} \quad (14)$$

которая имеет локальные «максимумы» в точках, соответствующих значениям координат центров рассеяния, поперечных направлениям визирования и поворотной оси ($y_m(\psi_0)$). Неопределённость значения искомой поперечной направлениям визирования и оси поворота объекта координаты объекта по уровню 0.7 составляет $0.45 \lambda / \Delta_\psi$. Общепринятое значение точности определения этой координаты рассматриваемым способом $\Delta y = \lambda / (2\Delta_\psi)$, что соответствует оценке (14) по уровню 0.65.

В том случае, когда центр рассеяния не связан жёстко с конструкцией объекта исследования и его положение меняется, вектор функция (14) будет иметь вид

$$\sum_{m=1}^M \bar{E}_m^{(0)} \exp(2ikx_m(\psi_0)) \frac{\sin(k(y + dx_m / d\psi|_{\psi=\psi_0}))\Delta\psi}{k(y + dx_m / d\psi|_{\psi=\psi_0})\Delta\psi}. \quad (15)$$

Для снижения погрешностей оценки поперечных оси вращения координат центра рассеяния также, как и в случае определения их координат в направлении визирования, могут использоваться весовые функции. Для того, чтобы получить координаты центров рассеяния объекта исследований в другом направлении, нужно переустановить объект так, чтобы это направление оказалось перпендикулярным оси вращения поворотного стола и повторить цикл измерений.

В заключение следует заметить, что идентификация отдельных центров рассеяния и оценка их РЛХ по результатам описанных измерений, не является математически строго определённой. Некоторые центры рассеяния, обусловленные, например, переотражениями между разными «светящими» элементами конструкции, могут иметь локализация вне области пространства, занятой объектом исследования. Возможны случаи, когда центры рассеяния различаются по дальности, а по поперечной направлению визирования координате различить их не удаётся (например центр рассеяния на шаре, связанные с вкладом огибающих волн). Хотя рассмотренные выше характеристики позволяют выявить характерные особенности (демаскирующие признаки) радиолокационного рассеяния исследуемого объекта, для идентификации вкладов в эти характеристики отдельных его центров рассеяния (механизмов формирования объектом его РЛХ) необходимы дополнительные сведения о его конструктивных особенностях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панюшкин, А.Н. Эффективная толщина плоской гомогенной ограниченной защиты / А.Н. Панюшкин, Н.Н. Панюшкин // Релаксационные явления в твердых телах : материалы 24 Международной научной конференции, Воронеж, 24-27 сентября 2019 г. / Воронежский государственный технический университет. – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2019. – С. 208-209.
2. Панюшкин, А.Н. Расчет локальной дозовой нагрузки внутри сплошной защиты в форме прямоугольного параллелепипеда / А.Н. Панюшкин, Н.Н. Панюшкин, В.К. Зольников // Релаксационные явления в твердых телах : Материалы 24 Международной научной конференции, Воронеж, 24-27 сентября 2019 г. / Воронежский государственный технический университет. – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2019. – С. 209-210.
3. Панюшкин, А.Н. Моделирование дозовой нагрузки внутри сплошной защиты в форме прямоугольного параллелепипеда лучевым методом / А.Н. Панюшкин, Н.Н. Панюшкин, И.П. Бирюкова // Воронежский научно-технический вестник. – 2019. – Т. 3, № 3 (29). – С. 53-62.
4. Колычев, С.А. О принципах масштабного электродинамического моделирования / С.А. Колычев, Н.С. Камалова // Воронежский научно-технический Вестник. – 2020. – Т. 3, № 3 (33). – С. 31-35.

5. Колычев, С.А. Об одной форме рекуррентных соотношений для оценки коэффициентов отражения и проницаемости многослойных экранов электромагнитных волн / С.А. Колычев, Н.С. Камалова // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции. В 6-ти томах. – 2020. – С. 91-97.

6. Балабуха, Н.П. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов / Н.П. Балабуха, А.С. Зубов, В.С. Солосин – Москва: Наука, 2007. – 266 с.

7. Taylor, T. Design of Line-Source Antennas for Narrow Beamwidth and Low Side Lobes / T. Taylor // Transactions of the IRE Professional Group on Antennas and Propagation. – 1955. – No 3. – P. 16-28.

8. Оппенгейм, Ф.В. Цифровая обработка сигналов / Ф.В. Оппенгейм, Р.В. Шафер. – Москва: Связь, 1979. – 416 с.

9. Knott, E.F. Radar Cross Section (Radar, Sonar and Navigation) 2nd Edition / E.F. Knott, J.F. Schaeffer, M.T. Tully. – Boston: Artech House, 1993. – 546 p.