



RLNC*2024

16 – 18 апреля 2024 г.

**Сборник трудов
XXX Международной научно-технической конференции
«Радиолокация, навигация, связь»**

Том 3

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ ОБЪЕКТОВ

Е. С. Емельянов¹, А. О. Кирьянов²

¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (ВУНЦ ВВС «ВВА»),
Воронеж, РФ

²Воронежский государственный университет (ВГУ), Воронеж, РФ

Аннотация. Предложен подход создания цифровых двойников объектов для оценки их радиолокационных характеристик. Подход предполагает получение их полных поляризационных матриц рассеяния на сетках дискретных частот и направлений наблюдения. Приведены примеры получения с использованием цифровых двойников радиолокационных изображений и диаграмм эффективной площади рассеяния различных объектов.

Ключевые слова: цифровой двойник, матрица рассеяния, двумерное радиолокационное изображение, эффективная площадь рассеяния, факетная модель.

USING DIGITAL TWINS TO CREATE RADAR IMAGES AND CALCULATE THE RADAR CROSS-SECTION OF OBJECTS

E. S. Emelyanov ¹, A. O. Kiryanov²

¹Military Educational-Recherch Centre of Air Force «Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin» (Air Force Academy), Voronezh, RF

²Voronezh State University (VSU), Voronezh, RF

Abstract. An approach to creating digital twins of objects for the assessment of their radar characteristics was offered. The approach involves obtaining their complete polarization scattering matrices on discrete frequency and direction grids. Examples of obtaining digital twins radar images and diagrams of the effective scattering area of various objects are provided.

Keywords: digital twin, scattering matrix, two-dimensional radar image, radar cross-section, polygonal model.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для решения задач радиолокационного обнаружения и распознавания объектов требуется определение их характеристик, таких как эффективной площади рассеяния (ЭПР), радиолокационных изображений (РЛИ) [1, 2]. Наиболее точно указанные характеристики объектов могут быть получены экспериментально с использованием радиолокационных средств измерений. Однако экспериментальные исследования достаточно сложны и требуют больших временных затрат, обычно имеются ограничения по условиям проведения измерений как по диапазонам частот, так и по ракурсам наблюдения. Кроме того, в отдельных случаях объекты могут быть не доступны для испытаний.

Возможным подходом получения требуемых характеристик объектов является использование цифровых двойников, обеспечивающих получение диаграмм ЭПР и формирование РЛИ объектов для произвольных условий наблюдения.

Целью работы является разработка подхода создания цифровых двойников формирования радиолокационных изображений и расчета эффективной площади рассеяния объектов.

2. Цифровой двойник

В качестве цифровых двойников объектов возможно использование их компьютерных 3D-моделей [3]. Действительно, с их помощью и применением различных методов электродинамики (физическая оптика, геометрическая оптика, физическая теория дифракции, метод интегральных уравнений и др.) [1, 4] можно рассчитать требуемые характеристики объектов. Однако такой подход не является достаточно универсальным, для нахождения каждой характеристики объекта необходимо решать трудоемкую задачу рассеяния электромагнитных волн заново. При этом в зависимости от выбранных методов расчета результаты, полученные с помощью цифровых двойников, будут отличаться.

В качестве цифровых двойников формирования РЛИ и расчета ЭПР объектов предлагается использовать набор матриц рассеяния объектов \mathbf{B}_{nm} [1], определенных на сетке дискретных частот $f_n = 1, 2, \dots, N_f$ и заданных направлениях наблюдения объекта, характеризуемых единичными векторами \mathbf{r}_m , $m = 1, 2, \dots, N_r$, где N_f – количество учитываемых частот, N_r – количество учитываемых направлений. Считается, что направления облучения объекта и приема рассеянной электромагнитной волны совпадают. При этом связь между ортогональными компонентами напряженностей электрических полей падающей E_{nm}^{it} , E_{nm}^{ip} и рассеянной E_{nm}^{st} , E_{nm}^{sp} электромагнитных волн имеет следующий вид [1]

$$\begin{pmatrix} E_{nm}^{st} \\ E_{nm}^{sp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{nm}^{tt} & b_{nm}^{tp} \\ b_{nm}^{pt} & b_{nm}^{pp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{nm}^{it} \\ E_{nm}^{ip} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где b_{nm}^{tt} , b_{nm}^{tp} , b_{nm}^{pt} , b_{nm}^{pp} – элементы матрицы рассеяния \mathbf{B}_{nm} , или в матричном виде

$$\mathbf{E}_{nm}^s = \mathbf{B}_{nm} \mathbf{E}_{nm}^i.$$

Матрица рассеяния объекта связывает ортогональные компоненты падающего электромагнитного поля с ортогональными компонентами рассеянного поля. При этом диагональные элементы матрицы рассеяния связывают поля на совпадающих поляризациях, недиагональные – на кроссовых поляризациях.

Каждый элемент матрицы рассеяния представляет собой комплексную величину, зависящую от свойств объекта, его ориентации относительно направления наблюдения и частоты облучающей волны.

Цифровой двойник объекта удобно представлять в зависимости от углов θ и φ в сферической системе координат. В этом случае элементы матриц рассеяния объекта в (1) для каждого направления могут быть представлены в виде θ -ой и φ -ой компонент полей.

Диапазон частот, в которых проводится построение цифрового двойника, выбирается в соответствии с параметрами средств наблюдения объекта, а шаг дискретизации по частоте – в соответствии с продольными размерами областей построения РЛИ. Шаг дискретизации по углам зависит от размеров объекта и от максимальной частоты облучающей электромагнитной волны. Так, при продольном размере рабочей зоны $\Delta X = 30$ м, шаг дискретизации по частоте δf не должен превышать $c / (2\Delta X) = 5$ МГц, где c – скорость света.

При размере объекта $d=10$ м при максимальной частоте наблюдения $f_{\max}=10$ ГГц шаг дискретизации по углу не должен превышать $180/(\pi df_{\max}) \approx 0,02$ градуса, в этом случае будут описаны все лепестки диаграмм обратного рассеяния объекта.

При построении цифрового двойника в полосе частот 4 ГГц для всей верхней полусферы объекта потребуется рассчитать порядка $3 \cdot 10^{10}$ матриц рассеяния.

Для нахождения матриц рассеяния объектов могут применяться различные методы электродинамики [1, 4]. Для формирования цифрового двойника возможно применение метода физической оптики [1].

Метод физической оптики применим, когда размеры объектов значительно больше длины волны, что обычно выполняется для объектов в радиолокационных задачах. Он обладает относительной простотой вычислений и может быть реализован на стандартных вычислительных ресурсах. Он не требует высокой вычислительной мощности или большого объема оперативной памяти, что делает его доступным для применения. Более того, данный метод отлично подходит для параллельных вычислений, так как расчеты для различных частот или пространственных положений могут быть выполнены независимо друг от друга. Это позволяет эффективно использовать многопоточность или распределенные вычисления для ускорения процесса моделирования и обработки данных. Таким образом, метод физической оптики представляет собой не только эффективный с точки зрения результата, но и вычислительно экономичный инструмент для нахождения рассеянных электромагнитных волн от объектов.

Схематическое расположение объекта и условий наблюдения приведено на рисунке 1.

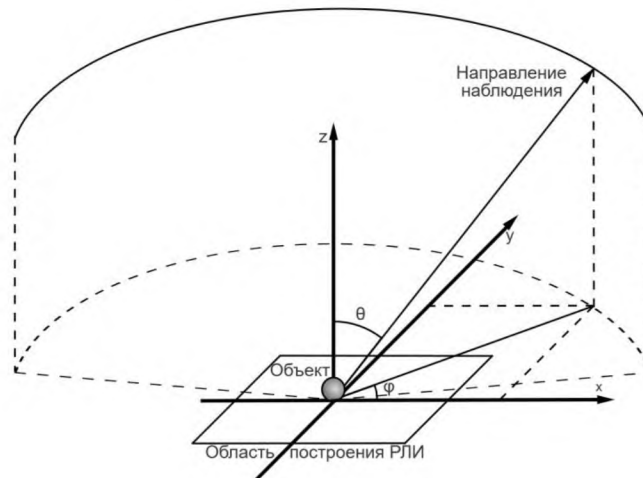


Рис. 1. Схема расположения объекта при нахождении цифрового двойника и формировании РЛИ

Поле рассеяния от идеально проводящего объекта с точностью до постоянного множителя в дальней зоне определяется с помощью следующего выражения [1, 4]

$$\mathbf{E}^s(f_n, \mathbf{r}_m) = -if_n \sqrt{\pi} \int_S [\mathbf{J}_{nm}(\boldsymbol{\rho}) - \mathbf{r}_m (\mathbf{r}_m \mathbf{J}_{nm}(\boldsymbol{\rho}))] \exp \left[i \frac{2\pi f_n}{c} (\boldsymbol{\rho} \mathbf{r}_m) \right] dS, \quad (2)$$

где $\mathbf{J}_{nm}(\rho) = 2[\mathbf{n}(\rho)\mathbf{H}_{nm}^i(\rho)]$ – поверхностный электрический ток на частоте f_n при облучении объекта плоской волной с направления \mathbf{r}_m ; $\mathbf{n}(\rho)$ – внешняя нормаль к поверхности объекта; $\mathbf{H}_{nm}^i(\rho)$ – вектор магнитного поля с единичной амплитудой падающей на объект плоской электромагнитной волны на частоте f_n с направления \mathbf{r}_m ; ρ – радиус-вектор точки интегрирования на поверхности объекта S ; i – мнимая единица. Зависимость от времени принята в виде $\exp(i2\pi ft)$.

При этом интегрирование в (2) для каждого направления наблюдения проводится только по участкам поверхности объекта, видимым с направления облучения \mathbf{r}_m .

Для описания геометрии объекта используется фацетное представление поверхности [3, 5]. Математически это выражается в кусочно-линейной аппроксимации поверхности объекта, при этом элементарным участком является треугольник. Такой подход является универсальным и гибким как с точки зрения описания поверхности объекта, так и с точки зрения построения вычислительных алгоритмов. Вычисление интегралов в выражении (2) от треугольных фацетов выполняется аналитически методом Филона [5]. Фацетное представление объекта формируется с использованием систем автоматизированного проектирования.

Для повышения точности расчетов рассеянных полей к выражению (2) добавляется поле краевой волны, создаваемое неравномерной частью тока и имеющее с учетом нормировки вид однократного интеграла от элементарных краевых волн по ребрам фацетов объекта L [6]:

$$\mathbf{E}_{EW}^s = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_L \mathbf{E}(\xi) \exp[i \frac{4\pi f_n}{c} (\rho \mathbf{r}_m)] d\xi, \quad (3)$$

где $\mathbf{E}(\xi)$ – функция, определяемая с использованием асимптотических выражений для элементарной краевой волны [6]; $d\xi$ – элемент ребер фацетов.

Для определения видимых и затененных полигонов строится двумерный рендер 3D-модели [3]. При этом для определения положения камеры используются текущие координаты РЛС, а плоскость экрана выбирается перпендикулярной к линии, соединяющей центр координат и точку нахождения РЛС. Вершины модели переходят в систему координат камеры, а затем проецируются на экран и нормируются. Таким образом, определяется расстояние от каждой точки объекта до камеры. Значения точек, принадлежащих граням, вычисляются с дискретным шагом при помощи барицентрических уравнений.

В процессе построения двумерного рендера используется технология Z-буфера, благодаря которой пиксели, принадлежащие видимым (расположенным наиболее близко к камере) полигонам, перезаписывают затененные. В итоге, вычисляется отношение нарисованных точек к их общему числу для каждого полигона, и в расчете рассеянных полей учитываются только треугольники с более чем 50% видимой площадью.

С помощью выражений (2) и (3) проводится вычисление рассеянных полей $\mathbf{E}_{nm}^s = \mathbf{E}^s(f_n, \mathbf{r}_m)$ на частотах f_n при всех направлениях \mathbf{r}_m для двух поляризаций электрического поля облучающей электромагнитной волны. Рассеянное электрическое поле представляется в виде компонент с совпадающей и крестовой поляризаций. С учетом выбранных нормировок в (2) и (3) найденные компоненты полей и являются элементами матриц рассеяния объекта $b_{nm}^{\theta\theta}$, $b_{nm}^{\theta\phi}$, $b_{nm}^{\phi\theta}$, $b_{nm}^{\phi\phi}$.

Компоненты эффективной площади рассеяния объекта для совпадающих и кроссовых поляризаций с учетом используемой нормировки матриц рассеяния определяются следующим образом [1]:

$$\sigma_{nm}^{\theta\theta} = |b_{nm}^{\theta\theta}|^2, \sigma_{nm}^{\theta\varphi} = |b_{nm}^{\theta\varphi}|^2, \sigma_{nm}^{\varphi\theta} = |b_{nm}^{\varphi\theta}|^2, \sigma_{nm}^{\varphi\varphi} = |b_{nm}^{\varphi\varphi}|^2. \quad (4)$$

При необходимости с использованием методов интерполяции значения ЭПР объекта с помощью цифрового двойника можно найти при произвольных значениях частот и направлениях наблюдения.

Для формирования с помощью цифрового двойника РЛИ объекта применительно к конкретной РЛС и условиям наблюдения задаются диапазоны частот и траектории перемещения РЛС. В соответствии с требуемыми параметрами выбираются данные из цифрового двойника, проводится их интерполяция (при необходимости), и формируется РЛИ объекта.

Радиолокационное изображение объекта $S(x, y, z)$ может быть получено с помощью интеграла свертки данных цифрового двойника с опорной функцией [7].

При выполнении для объекта условий дальней зоны с учетом матричного вида полей рассеяния РЛИ объекта определяется с помощью следующего выражения

$$S^{\theta\theta}(x, y, z) = \sum_{n=1}^{N_{f1}} \sum_{m=1}^{N_{r1}} b_{nm}^{\theta\theta} \exp \left[-i \frac{4\pi f_n}{c} (x r_m^x + y r_m^y + z r_m^z) \right], \quad (5)$$

где x, y, z – декартовы координаты области построения РЛИ; N_{f1}, N_{r1} – количества учитываемых частот и направлений наблюдений в соответствии с параметрами РЛС. В соответствии с (5) РЛИ формируется для совпадающей θ -ой поляризации электрического поля облучающей электромагнитной волны. Аналогично можно сформировать РЛИ для других поляризаций, включая кроссовые поляризации.

Обычно РЛИ формируются на земной поверхности, поэтому в (5) полагается, что $z=0$.

Повышение скорости выполнения расчетов с помощью (2) и получения двумерного РЛИ возможно за счет применения двумерного быстрого преобразования Фурье. Для этого в соответствии с [7] осуществляется переход к «пространственным» частотам $P_x = \frac{2f}{c} r^x$ и $P_y = \frac{2f}{c} r^y$. Значения матриц рассеяния на соответствующей сетке дискретных «пространственным» частот выполняется путем интерполяции данных цифрового двойника [7].

Реализация нахождения цифрового двойника выполнена в виде приложения на языке программирования Java с использованием библиотек Oracle OpenJDK v. 20, JavaFX и среды разработки IntelliJ Idea. Для хранения 3d модели и выполнения математических вычислений используются собственные записи (тип Record) векторов, обеспечивающие высокое быстродействие и оптимальное использование памяти. Вектора объединяются в коллекции (Guava collections): списки и множества, благодаря которым обеспечивается параллельное выполнение операций с использованием множества потоков (Stream API).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И РАСЧЕТА ДИАГРАММ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ ОБЪЕКТОВ

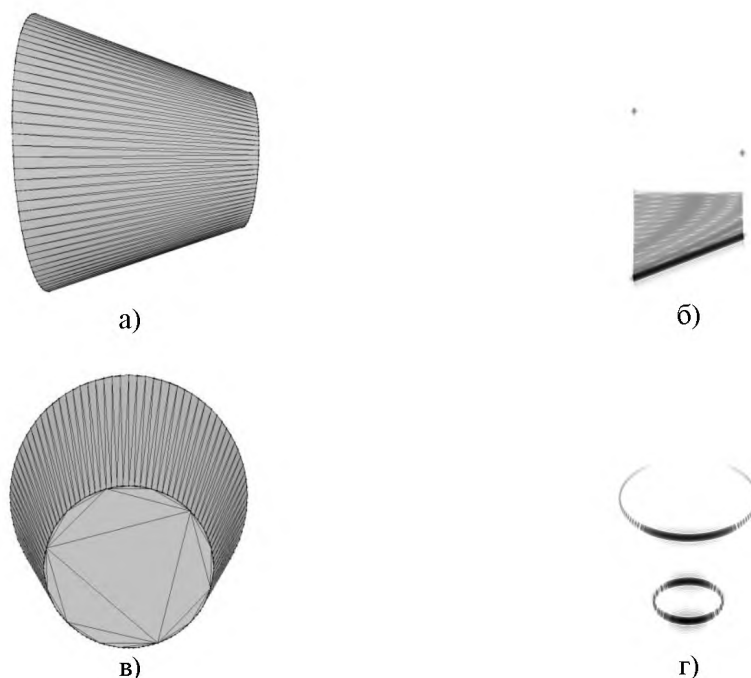
С использованием предложенного подхода проведено нахождение цифровых двойников, формирование РЛИ и расчет моностатических диаграмм ЭПР ряда объектов: усеченного конуса, усеченной пирамиды, автомобиля. Цифровые двойники объектов

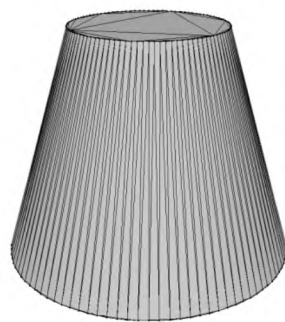
построены в диапазоне частот 8...12 ГГц с шагом 5 МГц в верхней полусфере, при этом интервалы дискретизации по углам составляли 0,02 град.

При формировании РЛИ считалось, что облучение объектов проводилось со стороны отрицательного направления оси u , приемо-передающая антенна РЛС имела вертикальную поляризацию электрического поля. При расчетах применялись весовые окна Блэкмана [8].

На рисунке 2 приведены фацетные представления усеченного конуса и его РЛИ для трех его положений в соответствии с фацетными представлениями. Диаметр большого основания конуса составлял 4 м, диаметр меньшего основания – 2 м, высота – 3 м, количество фацетов в модели – 396. При получении данных и последующих РЛИ сектор углов наблюдения по азимуту составлял $\varphi = 240^\circ \dots 300^\circ$, угол места – 30° ($\theta = 60^\circ$). Полученные РЛИ имеют разрешение по поперечной координате $\delta_x = 2,6$ см, по дальности $\delta_y = 3,8$ см. Радиолокационные изображения приводятся в логарифмическом масштабе, динамический диапазон всех РЛИ составляет 80 дБ. На полученных РЛИ четко видны локальные источники рассеяния, соответствующие краям усеченного конуса. На РЛИ рисунка 2б фактически видна только образующая конуса, на РЛИ рисунка 2г – контур переднего основания и облученная часть контура заднего основания, на РЛИ рисунка 2е – контур верхнего основания и облученная часть контура нижнего основания.

На рисунке 4 приведены фацетные представления грузового автомобиля и его РЛИ для двух положений: ориентированного кабиной вдоль отрицательного направления оси x и ориентированного кабиной вдоль отрицательного направления оси y . Количество фацетов в модели составляло 76598. Полученные РЛИ соответствуют электродинамическим свойствам объекта.





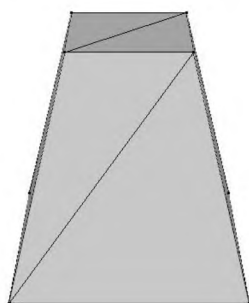
д)



е)

Рис. 2. Фацетные представления усеченного конуса и его РЛИ

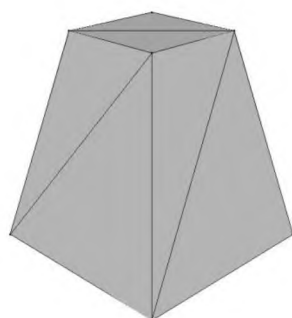
На рисунке 3 приведены фацетные представления усеченной пирамиды и ее РЛИ для двух ее положений: ориентирована гранью на РЛС и повернута относительно вертикальной оси на 45° . Размер ребра нижнего квадратного основания пирамиды составлял 1 м, ребра верхнего квадратного основания – 0,5 м, количество фацетов в модели – 12. На РЛИ пирамиды рисунка 3б видны верхнее переднее ребро, нижнее переднее ребро, с меньшей интенсивностью верхнее заднее ребро, а также вершины нижнего основания, на РЛИ рисунка 3г – верхняя и нижняя вершины переднего и двух боковых вертикальных ребер, а также верхняя вершина заднего вертикального ребра пирамиды.



а)



б)



в)

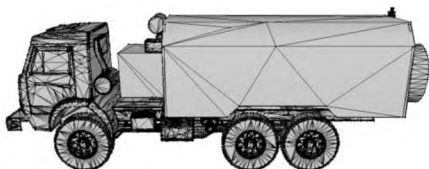


г)

Рис. 3. Фацетные представления усеченной пирамиды и ее РЛИ

На рисунке 5 приведены рассчитанные с использованием цифрового двойника моностатические диаграммы обратного рассеяния автомобиля в относительных

единицах в зависимости от азимутального угла и фиксированном угле места 30° при его наблюдении спереди (рис. 5а) и сбоку (рис. 5б).



а)



б)

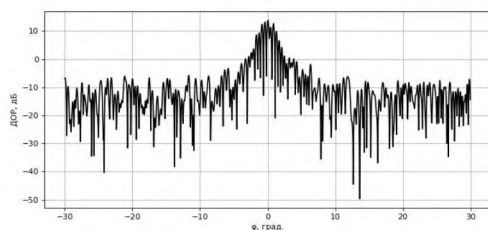


в)

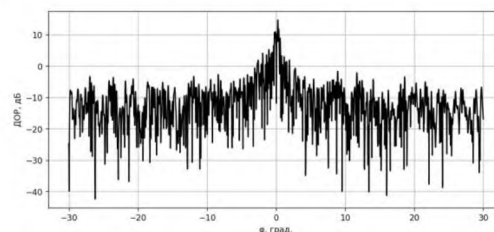


г)

Рис. 4. Фацетные представления автомобиля и его РЛИ



а)



б)

Рис. 5. Моностатические диаграммы ЭПР автомобиля

Демонстрационные вычисления выполнены на персональном компьютере с процессором Intel Core i5-10600K с тактовой частотой 4500 МГц, 6 ядрами (12 потоками) и 16МВ оперативной памяти. Время расчета цифрового двойника модели автомобиля, состоящей из 39021 вершин и 76598 треугольников, включающего $3 \cdot 10^{10}$ матриц рассеяния, составляло порядка 120 часов. При этом время формирования РЛИ с разрешением 500×500 для произвольных условий наблюдения с использованием (5)

составляло 3...5 секунд, а с применением двумерного быстрого преобразования Фурье выполнялось фактически в реальном масштабе времени.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен подход создания цифровых двойников формирования радиолокационных изображений и расчета эффективной площади рассеяния объектов. В качестве цифрового двойника предложено использовать набор матриц рассеяния объекта, полученных на сетке дискретных частот для различных направлений наблюдения. С использованием цифрового двойника возможно получение моностатических диаграмм ЭПР и формирование РЛИ объектов для произвольных условий его наблюдения фактически в реальном масштабе времени. Цифровые двойники могут найти применение расчета средних значений ЭПР объектов в требуемых пространственных секторах наблюдения, а также для формирования полного набора РЛИ объектов в интересах решения задачи их распознавания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели. М.: Сов. радио, 1975. – 248 с.
2. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли / под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
3. Ярошевич В.А. Компьютерная графика. М.: МИЭТ, 2015. – 71 с.
4. Захаров Е.В., Пименов Ю.В. Численный анализ дифракции радиоволн. М.: Радио и связь. 1982. – 184 с.
5. Замятин В.И., Ключников А.С., Швец В.И. Антенные обтекатели. Минск: Изд-во БГУ, 1980. – 192 с.
6. Буторин Д.И., Мартынов Н.А., Уфимцев П.Я. Асимптотические выражения для элементарной краевой волны. – Радиотехника и электроника, 1987, т. 32, № 9, с. 1818 – 1828.
7. Методы исследования радиолокационных характеристик объектов. Монография / Под ред. С.В. Ягольников. М.: Радиотехника, 2012. – 296 с.
8. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов / Пер. с англ. М.: Техносфера, 2006. – 1048 с.

REFERENCES

1. Kobak, V.O. Radar reflectors. Soviet Radio, 1975. - 248 p.
2. Kondratenkov, G.S., Frolov, A.Y. Radiovision. M.: Radar systems of remote sensing of the Earth / edited by G.S. Kondratenkova. M.: Radio equipment, 2005. - 368 p.
3. Yaroshevich V.A. Computer graphics. M.: MIET, 2015. - 71 p.
4. Zakharov, E.V., Pimenov Y.V. Numerical analysis of radio wave diffraction. M.: Radio and communication. 1982. - 184 p.
5. Zamyatin, V.I., Klyuchnikov A.S., Shvets V.I. Antenna fairings. Minsk: publishing BSU, 1980. - 192 p.
6. Butorin D.I., Martynov N.A., Ufimtsev P.Y. Asymptotic expressions for elementary edge wave. - Radio and Electronics, 1987, t. 32, №9, p. 1818 - 1828.
7. Methods of investigation of radar characteristics of objects. Monograph / edited by S.V. Yagolnikov. M.: Radio Engineering, 2012. - 296 p.
8. Oppenheim A., Shafer R. Digital signal processing / translate from Eng. M.: Technosphere, 2006. - 1048 p.