

УДК 621.396.96

ЧАСТИЧНАЯ МАСКИРОВКА ОБЪЕКТОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ С ПОМОЩЬЮ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

А.А. Масловский, М.Н. Легенький, А.А. Демченко, Н.Н. Колчигин

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, факультет РБЭКС.

пл. Свободы 4, Харьков, 61077, Украина

e-mail: maslovskiy@karazin.ua, mlegenkiy@karazin.ua, demchenko@karazin.ua, kolchigin@karazin.ua

Поступила в редакцию 17 октября 2017 г.

В данной работе предложен метод частичной маскировки радиолокационных объектов сложной формы. Проведено численное моделирование измерения эффективной площади рассеяния (ЭПР) объекта с помощью декомпозиционного метода. В рамках данного метода объект разделяется на элементы и в ближней зоне объект облучается антенной поэлементно, далее отражение от каждого элемента суммируется. Выявлены наиболее существенно отражающие участки поверхности объекта. Рассмотрена возможность снижения ЭПР таких элементов поверхности объекта, при этом осуществляется маскировка участков поверхности объекта с помощью радиопоглощающих материалов (РПМ). Проанализировано влияние подобных мероприятий на среднюю ЭПР всего объекта, выявлена оптимальная часть поверхности объекта, которую следует таким образом маскировать, и требуемый при этом уровень снижения отраженного сигнала (фактически – качество используемого РПМ).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: маскировка, ЭПР, РПМ, объект сложной формы, декомпозиция.

У даній роботі запропоновано метод часткового маскувння радіолокаційних об'єктів складної форми. Проведено чисельне моделювання вимірювання ефективної площі розсіювання (ЕПР) об'єкту за допомогою декомпозиційного методу. В рамках даного методу об'єкт розділяється на елементи і в ближній зоні об'єкт опромінюється антенною поелементно, далі відбиття від кожного елемента підсумовується. Виявлено найбільш істотно відбиваючі ділянки поверхні об'єкту. Розглянуто можливість зниження ЕПР таких елементів поверхні об'єкта, при цьому здійснюється маскувння ділянок поверхні об'єкта за допомогою радіопоглинаючих матеріалів (РПМ). Проаналізовано вплив подібних заходів на середню ЕПР всього об'єкту, виявлена оптимальна частина поверхні об'єкта, яку слід маскувати таким чином, а також потрібний при цьому рівень зниження відбитого сигналу (фактично - якість використовуваного РПМ).

КЛЮЧОВІ СЛОВА: маскувння, ЕПР, РПМ, об'єкт складної форми, декомпозиція.

In this paper, a method of partial cloaking of complex-shaped radar objects is proposed. A numerical simulation of the measurement of the radar cross section (RCS) of an object using the decomposition method is carried out. Within the framework of this method, the object is divided into elements and in the near field zone the object is irradiated by antenna element-by-element, then the reflection from each element is summed. The most significantly reflecting areas of the object surface are revealed. The possibility of reducing the RCS of such elements of the object surface is considered, while cloaking the surface areas of the object with the help of radio-absorbing materials (RAM) is carried out. The influence of such events on the average RCS of the entire facility was analyzed, the optimum part of the surface of the object, which should thus be masked, and the required level of reduction of the reflected signal (in fact, the quality of the used RAM) were detected.

KEYWORDS: cloaking, RCS, RAM, complex shape object, decomposition.

ВВЕДЕНИЕ

Для современной военной промышленности снижение радиолокационной заметности является важной задачей. Для решения данной задачи используются различные методы и мероприятия по снижению уровня отражения от объекта. Среди таких мероприятий следует упомянуть геометрическое изменение конструкции объекта [1] для перераспределения отраженной от объекта энергии, или использование различных радиопоглощающих материалов (РПМ)[2] для снижения уровня отражения от поверхности объекта. Однако, использование таких материалов может быть сопряжено с рядом трудностей. РПМ могут быть достаточно дорогими, слишком тяжелыми, или мешать нормальному функционированию систем открытого объекта. Следовательно, целесообразной становится разработка такого метода, который позволил бы сократить количество использованного РПМ, не потеряв при этом укрывающего эффекта.

Для создания эффективной методики маскировки объекта сложной формы предлагается использовать декомпозиционный метод [3,4]. В рамках данного метода поверхность объекта разделяется на участки и поочередно определяется вклад каждого такого участка. При этом определяется эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) соответствующего участка. Подобный метод позволяет легко выявить наиболее заметные участки поверхности объекта: участки с максимальной ЭПР.

В данной работе проведено численное моделирование измерения ЭПР радиолокационного объекта сложной формы декомпозиционным методом. При этом необходимым оказывается метод расчета, позволяющий эффективно определять ЭПР сложных объектов. Отметим, что в этом случае аналитические методы расчета ЭПР не эффективны, что приводит к необходимости использовать различные численные методики [5,6]. Среди таких методов стоит отметить метод Physical Optics – Shouting and Bouncing Ray (PO-SBR) [7,8]. Данный метод дает возможность эффективно получить информацию о радиолокационных характеристиках объекта с помощью посильного, для современных компьютеров, моделирования. Также он широко известен и имеет множество доработок, улучшений и модификаций, используемых для расчета дифракции электромагнитного поля на объектах различной формы и с различными электродинамическими свойствами [9-14]. Ввиду вышеупомянутых преимуществ этот метод был выбран для расчета ЭПР в данной работе.

Представленная работа имеет следующую структуру. В качестве объекта исследования выбрана модель грузовика КРАЗ, представленная на рис. 1. Сначала рассмотрен декомпозиционный метод и его использование для оценки ЭПР исследуемой модели. После этого проведена оптимизация использования РПМ для маскировки данного объекта: определяются наиболее заметные участки (участки с максимальной ЭПР) и исследуется влияние снижения ЭПР этих участков на среднюю ЭПР всего объекта. На основании полученных данных сделаны выводы относительно оптимального использования РПМ и зависимости ЭПР замаскированного объекта от замаскированной площади объекта и качества использованного РПМ.

ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЙ МЕТОД

Для проведения расчетов декомпозиционным методом выбрана модель КРАЗ, имеющая размеры: высота – 4,3 метра, длина – 10,9 метров, ширина – 4,5 метра. В рамках предлагаемого метода модель разбивается на небольшие участки, площадь участков составляет порядка нескольких длин волн и отвечает площади, освещаемой на поверхности объекта диаграммой направленности антенны радара, ограниченной по уровню половинной мощности. Декомпозиционный метод подобен методу, предложенному в [1514] для оценки средней ЭПР объектов, состоящих из нескольких цилиндрических объектов. Также известен численный расчетный метод, предложенный в работе [5], в рамках которого поверхность объекта представляется в виде совокупности маленьких плоских треугольников. Суммарное рассеянное поле вычисляется путём когерентного суммирования вклада каждого из этих треугольников. В рамках декомпозиционного метода элементы, на которые разделяется поверхность объекта, имеют значительно более сложную форму. Также, ввиду сложности измерения фазы сигнала, отраженного от различных элементов объекта, вклад каждого из элементов суммируется некогерентно, то есть без учета фазы.

Отметим, что исследуемая модель состоит из трех материалов: железо, резина и стекло. Для моделирования рассеяния электромагнитных волн на данном объекте, каждый материал рассматривается либо как идеальный металл (железо), либо как импедансная поверхность с характерным для этого материала поверхностным импедансом (для стекла – 174 Ом, для резины – 142,5 Ом). После этого проводится моделирование рассеяния электромагнитных волн на объекте с использованием ранее упомянутого метода PO-SBR. Расчеты проводятся для следующего случая: длина волны – 3см, поляризация – горизонтальная, направление распространения падающей электромагнитной волны перпендикулярно к боковому борту КРАЗа.

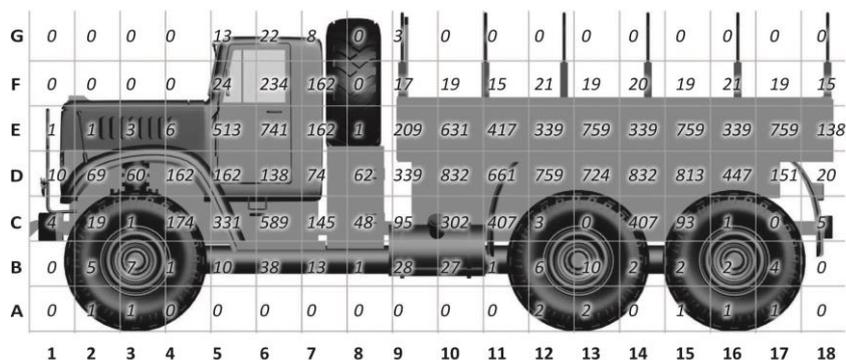


Рис. 1. Общий вид исследуемой модели и значения ЭПР для каждого элемента.

В работе рассмотрена декомпозиция видимой проекции объекта на участки с площадью $0,5\text{ м} \times 0,5\text{ м}$, как показано на рис. 1. При этом исследуемая модель разделяется на 18 элементов в горизонтальном направлении и на 7 в вертикальном – всего исследуются 126 элементов. Для каждого элемента отдельно рассчитывается значение ЭПР $\bar{\sigma}_i$. Полученные значения ЭПР в м^2 представлены на рис. 1 на соответствующих элементах поверхности объекта. Отметим, что моностатическое значение ЭПР для металлической пластины с площадью равной площади элемента при нормальном падении волны равно $\sigma = 4\pi S^2 / \lambda^2 = 873 \text{ м}^2$ [15]. Как видно из рис. 1, для элемента D10 ЭПР приближается к этому значению – здесь форма поверхности объекта близка к плоской металлической пластине.

Дальше оцениваем среднюю ЭПР для полного объекта по формуле [15]:

$$\bar{\sigma} = \sum_i \bar{\sigma}_i. \quad (1)$$

В данном случае она оказывается равной $\bar{\sigma} = 15875 \text{ м}^2$.

Получим также значение ЭПР для всего исследуемого объекта для того же направления падения электромагнитной волны для горизонтальной поляризации оно составляет 158489 м^2 (для металлической пластины такой-же площади значение ЭПР составляет $\sigma = 4\pi S^2 / \lambda^2 = 3,7 \times 10^7 \text{ м}^2$).

ЭПР, полученная с помощью декомпозиционного метода, существенно отличается от точного значения ЭПР, рассчитанного для полной модели для данного ракурса. Такое отличие связано с тем, что данный метод не учитывает соотношения между фазой поля, отраженного от каждого элемента. В данном случае из-за того, что многие участки включают в себя элементы одной и той же плоскости, при расчете точного значения ЭПР отраженное от них поле суммируется синфазно, что приводит к существенному увеличению ЭПР (для данного ракурса мы видим «яркую» точку). Однако, если усреднить значения ЭПР по азимутальному углу в диапазоне от -10° до 10° по углу места (направление ноль градусов соответствует исследуемому ракурсу), то мы получаем среднее значение ЭПР $\bar{\sigma} = 16509 \text{ м}^2$, которое всего лишь на 3,8 % отличается от полученного декомпозиционным методом значения ЭПР.

Отметим, что схожая ситуация будет наблюдаться в случае, если с помощью данного метода будут исследоваться угловые структуры, где существенную роль играет переотраженное между различными элементами поле. В случае, когда исследуемый элемент для декомпозиционного метода представляет собой лишь на одну грань такого углового отражателя (главный лепесток диаграммы направленности антенны «освещает» только такую часть поверхности объекта), то декомпозиционный метод даст значение ЭПР, которое существенно отличается от точного значения. И лишь в случае, когда элемент частично содержит обе грани отражателя, метод даст близкое к точному значение ЭПР.

Таким образом, несинфазное сложение значений ЭПР для небольших элементов в рамках декомпозиционного метода дает возможность оценить среднюю ЭПР объекта, если пренебречь некоторыми физическими механизмами рассеивания волн, такими как переотражение волн на угловых структурах и синфазное суммирование отраженного поля от отдельных элементов больших плоских участков объекта.

АНАЛИЗ ЧАСТИЧНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РПМ ДЛЯ МАСКИРОВКИ ОБЪЕКТА

Как известно [2], одним из эффективных методов радиолокационной маскировки объекта (уменьшения его ЭПР) является использование радиопоглощающих материалов РПМ. Однако, для маскировки всей поверхности объекта требуется большое количество такого материала и подобные мероприятия могут негативно отразиться на функционировании различных систем укрытого объекта. Также следует отметить, что большинство маскирующих сетей применимы только в условиях стоянки.

Описанный выше декомпозиционный метод позволяет выявить элементы объекта, которые вносят наибольший вклад в рассеянное поле («блестящие точки») и маскировать именно их. Для наглядности предложенной идеи на рис. 2 приведены изображения исследуемого объекта. На рис. 2 а объект укрыт маскирующей сетью из РПМ коврового типа (для наглядности на рисунке данный материал изображен существенно прозрачным), на рис. 2 б на объекте прикрыты только «яркие» элементы (выделенные участки поверхности борта и кабины).

Оценим результат таких мероприятий, при этом допустим, что для некоторых элементов значения ЭПР уменьшены в 10 раз – предполагаем, что такие элементы накрыты радиопоглощающим материалом с $R = -10$ дБ. Значения ЭПР для различных элементов объекта в этом случае приведены на рис. 3. Здесь предполагается, что в случае, когда значение ЭПР элемента больше чем 600 м^2 , оно уменьшается в 10 раз. Таким образом, «замаскированными» РПМ оказываются элементы E6, E10, E13, E15, E17, D10, D11, D12, D13, D14, D15.

Теперь рассчитаем среднюю ЭПР для полного объекта для описанного выше случая с помощью формулы (1), она оказывается равной $\bar{\sigma}_c = 8434 \text{ м}^2$. Таким образом, уменьшение ЭПР для наиболее отражающих элементов (ярких точек) приводит к уменьшению средней ЭПР объекта на 47 %. То есть,

уменьшение ЭПР для наиболее отражающих элементов объекта (укрытие их радиопоглощающим материалом) приводит к существенному уменьшению среднего значения ЭПР всего объекта.

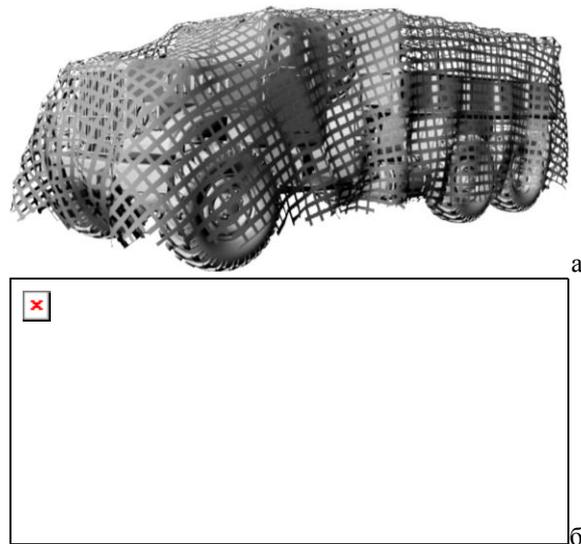


Рис. 2. Способы снижения заметности исследуемого объекта

Тут целесообразно сказать несколько слов о расчете ЭПР модели, элементы которой прикрываются РПМ.

Средняя ЭПР объекта определяется как (1) (при этом i – множество всех элементов объекта). После применения РПМ формулу (1) можно переписать в виде

$$\bar{\sigma} = \sum_i \bar{\sigma}_i = \sum_{i \neq n} \bar{\sigma}_i + \sum_{i=n} \bar{\sigma}'_i, \quad (2)$$

тут n – множество прикрытых РПМ элементов объекта.

Из формулы (2) получаем, что ЭПР для всех замаскированных объектов определяется следующим образом:

$$\sum_{i \neq n} \bar{\sigma}_i = \bar{\sigma} - \sum_{i=n} \bar{\sigma}'_i. \quad (3)$$

Предположим, что при маскировке элемента с помощью РПМ его ЭПР уменьшается в заданное число раз:

$$\bar{\sigma}'_n = R \bar{\sigma}_n, \quad R < 1. \quad (4)$$

Здесь R – коэффициент отражения РПМ. Будем считать, что формула (4) справедлива для всех маскируемых элементов.

Таким образом, ЭПР для объекта с замаскированными элементами определяется по формуле:

$$\sigma = \sum_i \bar{\sigma}_i = \sum_{i \neq n} \bar{\sigma}_i + R \sum_{i=n} \bar{\sigma}_i = \bar{\sigma} - (1-R) \sum_{i=n} \bar{\sigma}_i, \quad (5)$$

где $\bar{\sigma}$ берется из (1). Из формулы (5) понятно, что маскировка отдельных элементов объекта приводит к уменьшению ЭПР всего объекта на величину $(1-R) \sum_{i=n} \bar{\sigma}_i$.

Теперь можно получить зависимость уменьшения ЭПР от участка площади объекта, накрытой радиопоглощающим материалом (фактически от количества элементов, для которых уменьшается значение ЭПР). Эта зависимость представлена на рис.4. На этом рисунке видно, что укрытие приблизительно 10 % объекта с помощью РПМ с коэффициентом отражения $R = -10$ дБ приводит к уменьшению ЭПР в 2 раза, а укрытие 20 % площади объекта – к уменьшению ЭПР в 5 раз. Таким образом, можно сделать вывод, что наибольший вклад в ЭПР объекта дает небольшое количество элементов с наибольшим уровнем отражения и для наиболее существенного уменьшения ЭПР всего объекта имеет смысл маскировать с помощью РПМ именно эти элементы.

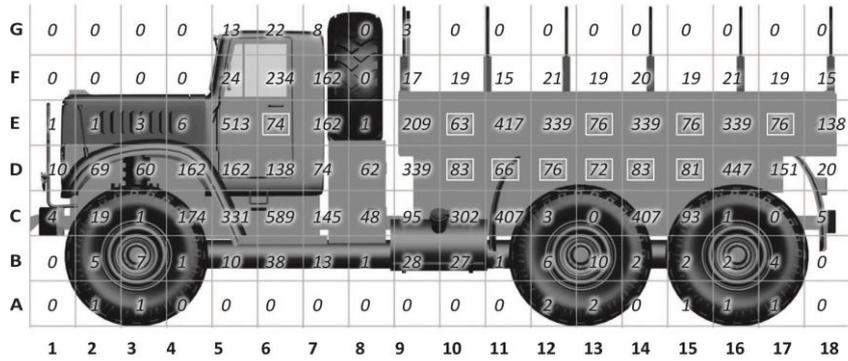


Рис. 3. Значения ЭПР для каждого элемента, в случае, когда ЭПР для некоторых элементов уменьшена в 10 раз (эти элементы выделены).

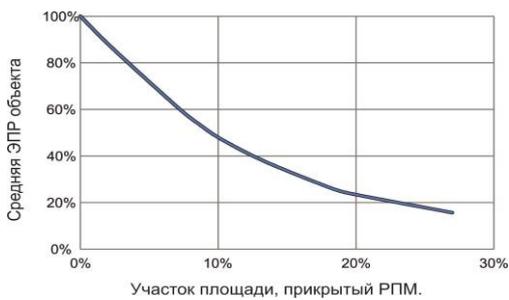


Рис. 4. Зависимость уменьшения средней ЭПР объекта от участка площади, которая укрывается РПМ с $R = -10$ дБ.

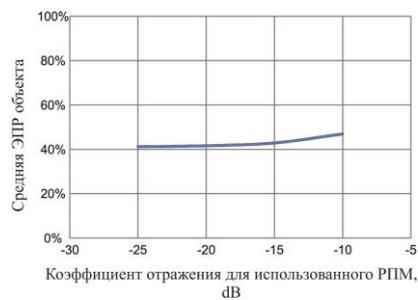


Рис. 5. Зависимость величины уменьшения средней ЭПР объекта от коэффициента отражения использованного РПМ в случае, если им прикрито 10 % площади объекта.

Также можно получить зависимость уменьшения средней ЭПР объекта от величины, на которую уменьшается ЭПР каждого элемента (фактически от качества радиопоглощающего материала) – эта зависимость представлена на рис. 5. По этому рисунку видно, что качество РПМ не оказывает существенного влияния на уменьшение ЭПР. Это может объясняться тем, что после уменьшения ЭПР для некоторого количества наиболее ярких элементов, основной вклад в среднюю ЭПР дает отражение от остальных элементов.

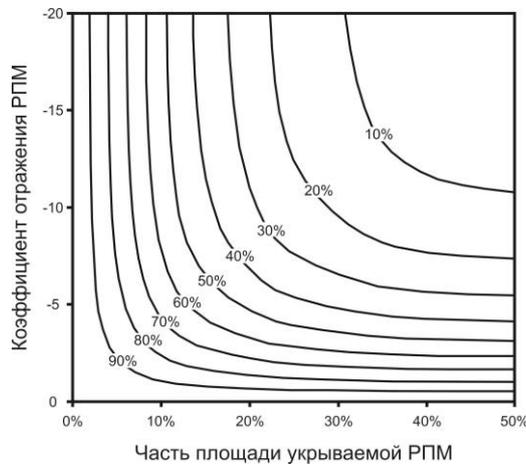


Рис. 6. График зависимости снижения средней ЭПР (в дБ) от коэффициента отражения используемого РПМ (в дБ) и процента поверхности объекта, которая прикрывается РПМ.

На рис. 6 представлен график снижения средней ЭПР исследуемого объекта от коэффициента отражения используемого РПМ (в дБ) и площади поверхности объекта, которая прикрывается РПМ. Стоит отметить, что в данном случае прикрываемые участки объекта выбирались не в случайном порядке, а в порядке убывания их уровня отражения (от наиболее отражающего элемента к наименее отражающему). Исходя из данного графика, можно сделать вывод, что маскировка примерно 20% наиболее отражающих элементов даёт возможность добиться заметного снижения средней ЭПР объекта (остаётся около 40% от

начальной ЭПР), даже при использовании поглощающего покрытия с небольшим коэффициентом отражения (в данном случае -10 дБ).

Отметим, что в данном случае модель исследуется с ракурса, являющегося перпендикулярным к борту автомобиля, поэтому для данного случая отражение от многих элементов будет иметь большое значение. Для других ракурсов визирования элементов с большим уровнем отражения станет меньше и использование данного метода маскировки объекта приведет к еще лучшим результатам.

ВЫВОДЫ

В данной работе предложен метод частичной маскировки поверхности объекта сложной формы. При этом вначале представлено численное моделирование процесса измерения ЭПР объекта сложной формы с применением метода декомпозиции. На примере модели автомобиля КРАЗ поэтапно был показан процесс расчета ЭПР этим методом. В рамках данного метода объект представляется в виде набора элементов, размер которых определяется шириной диаграммы направленности антенны на заданном расстоянии. Для оценки средней ЭПР объекта, ЭПР для этих элементов измеряется в ближней зоне и суммируется. Показано, что средняя ЭПР объекта, полученная таким методом, близка к ЭПР полного объекта, усредненному вблизи ракурса наблюдения.

Из анализа полученных результатов выявлены «яркие точки» объекта, промоделировано использование РПМ для маскировки соответствующих участков поверхности объекта. В работе продемонстрировано что, при маскировке элементов с наибольшей ЭПР, площадь которых составляет всего около 20-25 % процентов общей площади объекта, достигается снижение ЭПР всего объекта на 60% . Также показано, что при маскировке наиболее ярких элементов целесообразно использовать РПМ, дающий небольшое снижение отраженного сигнала. Это объясняется тем, что при укрытии достаточного количества таких элементов, основной вклад в ЭПР начинают давать остальные элементы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maslovskiy A., Legenkiy M. Analysis of geometrical techniques for reducing radar detectability of on-ground targets //Applied Physics (YSF), 2015 International Young Scientists Forum on. – IEEE, 2015. – С. 1-4.
2. Taravati S., Abdolali A. A new three-dimensional conical ground-plane cloak with homogeneous materials //Progress In Electromagnetics Research M. – 2011. – Т. 19. – С. 91-104. А. Масловский, М. Легенький, и Н. Колчигин, “Decomposition method for complex target RCS measuring”, Proceedings of conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kyiv, 2017.
3. Колчигин Н.Н., Васильченко И.И. Декомпозиционный способ экспериментального определения эффективной площади рассеяния объектов сложной формы// Вестник ХНУ, серия «Радиофизика и электроника», № 405, – 1998 – С. 87-90.
4. Ufimtsev P. Y. Fundamentals of the physical theory of diffraction. – John Wiley & Sons, 2014.
5. Sukharevsky O.I. Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects CRC Press, Taylor&Francis Group, 288 p., 2015.
6. Jeng S. K. Near-field scattering by physical theory of diffraction and shooting and bouncing rays //IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1998. – Т. 46. – №. 4. – С. 551-558.
7. Ling H., Chou R. C., Lee S. W. Shooting and bouncing rays: Calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity //IEEE Transactions on Antennas and propagation. – 1989. – Т. 37. – №. 2. – С. 194-205.
8. Boag A., Michielssen E. A fast physical optics (FPO) algorithm for double-bounce scattering //IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2004. – Т. 52. – №. 1. – С. 205-212.
9. Bhalla R. et al. 3D scattering center representation of complex targets using the shooting and bouncing ray technique: A review //IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 1998. – Т. 40. – №. 5. – С. 30-39.
10. Tao Y. B., Lin H., Bao H. J. KD-tree based fast ray tracing for RCS prediction //Progress In Electromagnetics Research. – 2008. – Т. 81. – С. 329-341.
11. Chen S. H., Jeng S. K. SBR image approach for radio wave propagation in tunnels with and without traffic //IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 1996. – Т. 45. – №. 3. – С. 570-578.
12. Bhalla R., Moore J., Ling H. A global scattering center representation of complex targets using the shooting and bouncing ray technique //IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1997. – Т. 45. – №. 12. – С. 1850-1856.
13. Gao P. C. et al. Mapping the SBR and TW-ILDCs to heterogeneous CPU-GPU architecture for fast computation of electromagnetic scattering //Progress In Electromagnetics Research. – 2012. – Т. 122. – С. 137-154.
14. Штрагер Е.А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы // М.: Радио и связь, 1986 г. – 184 с.
15. Кобак В.О., Радиолокационные отражатели. М.: «Советское радио», 1975 г. – 248 с.