

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-58-72>



УДК 004.94

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Адаптивная система визуализации электромагнитного поля рассеяния летательных аппаратов

З.М. Курбанисмаилов,

А.Т. Тарланов[@],

Е.Д. Матяш,

Е.С. Карбова

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: lev.brave@gmail.com

Космическая отрасль всегда занималась созданием уникального оборудования, в том числе и контрольного. Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) таких систем осуществляется на всех этапах жизненного цикла летательного аппарата (ЛА), начиная от его разработки, включая стендовые испытания и этапы эксплуатации. Цифровая техника обладает потенциально высокой помехоустойчивостью, но любая современная техническая система в совокупности содержит набор датчиков, линий связи, приемных антенн, чувствительных к воздействию внешних мешающих сигналов, распространяющихся как по проводам, так и по эфиру. Отсюда очевидна актуальность обеспечения ЭМС интегрированных технических систем, выполняющих функции измерения, обработки данных и формирования управляющих воздействий, как цифровых, так и аналоговых. Электромагнитная совместимость сложной технической системы воздушного или космического летательного аппарата с другими его системами является обязательным условием их устойчивого функционирования. Авиакосмическая техника, в которой из-за плотной компоновки тесно сопряжены процедуры высокочувствительных измерений и мощные управляющие воздействия, требует решения проблемы ЭМС. В работе показана необходимость эффективной технологии контроля электромагнитного излучения, создаваемого в окружающем пространстве как отдельными подсистемами, так и всем объектом в целом. Решены задачи анимации во времени, отображения количественных величин, пространственной визуализации. Рассматривается методика визуализации 3D электромагнитного поля в пространстве и во времени. Показано, что существующие методы визуализации не позволяют решить поставленные задачи. Предложена система картографирования поля излучения в ограниченной зоне наблюдения по заданной расчетной 3D-сетке и его визуализации.

Ключевые слова: электромагнитное поле, напряженность, визуализация, интерполяция, плоскость, анимация, индукция, магнитное поле, объект исследования

Для цитирования: Курбанисмаилов З.М., Тарланов А.Т., Матяш Е.Д., Карбова Е.С. Адаптивная система визуализации электромагнитного поля рассеяния летательных аппаратов. *Российский технологический журнал*. 2021;9(1):58–72. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-58-72>

RESEARCH ARTICLE

Adaptive system for visualization of the electromagnetic scattering field of aircraft

Zaur M. Kurbanismailov,
Arslan T. Tarlanov[@],
Ekaterina D. Matyash,
Elena S. Karbova

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
[@]Corresponding author, e-mail: lev.brave@gmail.com

The space industry has always set ambitious tasks to create unique equipment, including control equipment. Ensuring electromagnetic compatibility (EMC) of such systems is carried out at all stages of the life cycle of an aircraft (AC), starting from its development, including testing and stages of operation. Digital technology is characterized by high noise immunity. However, any modern technical system in the aggregate contains sensors, communication lines and receiving antennas sensitive to the effects of external interfering signals that propagate both through wires and over the air. Hence, the relevance of ensuring the EMC of integrated technical systems that perform the functions of measurement, data processing and the formation of control actions, both digital and analog, is obvious. The electromagnetic compatibility of a sophisticated aircraft or spaceship technical system with other systems is a prerequisite for their sustainable operation. Aerospace technology, where both highly sensitive measurements and energetic control effects are closely combined in the dense layout of an aircraft, requires a solution to the EMC problem. This paper shows the need for effective technology to control the electromagnetic radiation created in the surrounding space, both by subsystems of aircraft and by the whole object. A method for visualizing 3D electromagnetic field both in space and in time is considered.

Keywords: electromagnetic field, visualization, interpolation, plane, animation, induction, magnetic field, object of study

For citation: Kurbanismailov Z.M., Tarlanov A.T., Matyash E.D., Karbova E.S. Adaptive system for visualization of the electromagnetic scattering field of aircraft. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(1):58–72 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2021-9-1-58-72>

Введение

Электронные устройства на современном этапе развития стали неотъемлемой частью жизни человека и любой технической системы, обладающей интерактивными свойствами и требующей определенных условий для устойчивого функционирования. Одним из таких обязательных условий является электромаг-

нитная совместимость (ЭМС) [1] всей системы и её подсистем друг с другом и с другими системами, не менее сложными и чувствительными.

Цифровая техника обладает потенциально высокой помехоустойчивостью, но любая современная техническая система в совокупности содержит набор датчиков, линий связи, приемных антенн, чувствительных к воздействию внешних мешающих сигнала-

лов, распространяющихся как по проводам, так и по эфиру. Отсюда очевидна актуальность обеспечения ЭМС интегрированных технических систем, выполняющих функции измерения, обработки данных и формирования управляющих воздействий, как цифровых, так и аналоговых.

Одним из примеров, где требуется решение данной проблемы, является авиакосмическая техника, в которой из-за плотной компоновки воздушного или космического летательного аппарата (ЛА) тесно сопряжены процедуры высокочувствительных измерений и мощные управляющие воздействия, которые не могут не влиять друг на друга. Космическая отрасль всегда ставила амбициозные задачи по созданию уникального оборудования, в том числе и контрольного. Обеспечение ЭМС таких систем осуществляется на всех этапах жизненного цикла ЛА, начиная от его разработки, включая стендовые испытания и этапы эксплуатации.

Инструментами обеспечения ЭМС [2] являются экранирование, разнесение воздействий по времени и по частоте, минимизация перекрестного влияния конструктивными и схемотехническими методами с объективной визуализацией контроля результатов таких мероприятий. Для количественной оценки ЭМС объекта необходима эффективная технология контроля электромагнитного излучения, создаваемого в окружающем пространстве как отдельными подсистемами, так и всем объектом в целом. Такая информация, привязанная к координатной системе объекта, позволит анализировать вклады различных подсистем в общее поле рассеяния, локализовать источники такого излучения, а также предлагать шаги по минимизации их влияния. Методика должна позволять оценивать с достаточной точностью как магнитное, так и электрическое поля, создаваемые системами объекта на различном удалении с точной привязкой результата измерения к системе координат объекта. Одним из важных элементов такой технологии является визуализация результатов в наглядном и простом виде, но в то же время с достаточной точностью.

Существующие методы визуализации [3] не позволяют решить задачи выбора плоскости наблюдения в трехмерном пространстве, а также организовать наглядную 3D-визуализацию результатов пространственного распределения поля рассеяния вокруг объекта.

Целью данной работы является формулирование предложений по визуализации пространственного распределения физических полей в различных областях исследования.

В работе предложена система оценки внешнего электромагнитного излучения объекта авиационной или космической техники, построенная на картогра-

фировании поля излучения во внешнем пространстве в ограниченной зоне наблюдения по заданной расчетной 3D-сетке [4], вводе результатов измерения в программный продукт системы и их визуализация как на выбранной плоскости произвольной ориентации и положения в зоне наблюдения, так и в виде трехмерных изображений. Предложен алгоритм количественной визуализации результатов измерения как в виде изменяющейся яркости маркеров в точках измерений, так и в виде заданной априори цветовой шкалы. Решены задачи анимации во времени, отображения количественных величин, пространственной визуализации. Полученное решение позволяет сократить объем измерений путем адаптивной интерполяции результатов с оперативным регулированием шага расчетной сетки. Намечены перспективные области применения.

Определение визуализации

Под процедурой визуализации будем понимать метод представления информации в визуальном виде, то есть в виде, пригодном для изучения его человеком с помощью зрения [5]. Всем известна визуализация магнитного поля с помощью железных опилок либо визуализация потоков жидкости или газа путем введения в них контрастных веществ – дыма в газ, пузырьков в жидкость, либо визуализация внутренних органов человека с помощью отраженных акустических волн – ультразвуковое исследование (УЗИ). Визуализация электромагнитного поля рассеяния в поставленной задаче подразумевает дискретизацию данного поля путем задания характеризующих значений в точках трехмерной расчетной сетки, имеющей для определенности, кубическую форму. Используя такую сетчатую структуру с численными значениями в точках сетки, наблюдатель получит представление как о пространственном распределении исследуемого поля, так и о его количественных значениях.

Обзор методов визуализации экспериментальных данных

Визуальное представление результатов расчетов или измерений всегда представляло интерес как конечная фаза любого исследования, отвечающая на вопрос о величине и характере измеряемой или рассчитываемой величины. Осциллографы [6] еще в совсем недавнем прошлом являлись средством для визуализации измеряемых величин длительностью до единиц секунд. Для визуализации и регистрации длительных процессов (до единиц часов) были созданы многоканальные шлейфовые осциллографы [7], записывающие процесс на рулоны фоточувствительной бумаги. Также широко применялись самописцы [8],

тоже использовавшие бумагу, но уже с «чернильной» записью. Визуализация быстрых и длительных процессов в широком динамическом диапазоне с одновременной регистрацией информации стала возможна лишь в результате появления компьютеров с развитым программным обеспечением.

Популярные вычислительные пакеты MATLAB и MathCad имеют развитые средства визуализации результатов расчета, как в виде 3D-пространственных построений, так и многоканальных зависимостей от времени. Однако данные пакеты являются офлайн приложениями, и их согласование с системами реального времени вызывает ряд трудностей, непредусмотренных данными вычислительными средствами.

Современные компьютерные программы визуализации [9–11] представлены такими универсальными продуктами, как например, Google Data Studio, Power BI, Tableau, ChartBlocks, Plotly, Infogram, DataDeck и многими другими аналогичными. Данные продукты широко применяются в бизнес-аналитике, логистике и позволяют давать наглядный вид расчетным данным в виде чартов, диаграмм, функциональных графиков и отчетов. Особое внимание здесь уделяется порядку расстановки информации, созданию зрительных образов, как показано на рис. 1, что помогает аналитику или руководителю принимать правильные управленческие решения путем выявления трендов и вычисления статистических оценок по имеющейся информации.

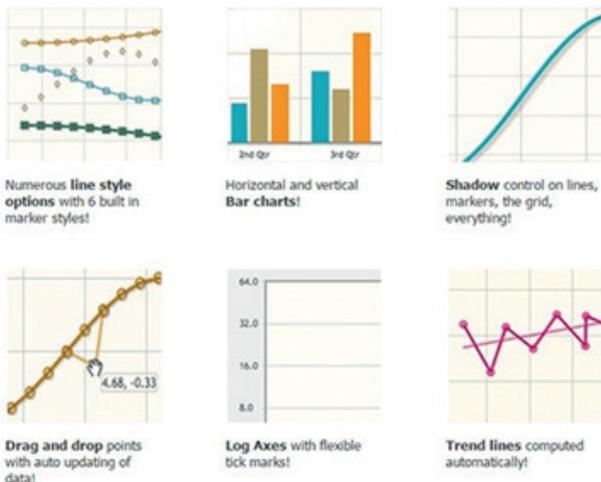


Рис. 1. Некоторые стандартные инструменты визуализации информации в бизнесе.

Однако в научных задачах данные программные продукты имеют ограниченное применение, так как не позволяют осуществлять пространственную 3D-визуализацию, работают в режиме офлайн, не имея связи с внешним интерфейсом, и тем более не отображают 3D-процессы в реальном времени. Кроме того, разработчики перечисленных аналогов не

дают, как правило, SDK (Software Development Kit) к своим продуктам, что ограничивает возможности их применения.

Выявление проблемы

Таким образом, анализ показал, что для исследования и наглядного представления данных о внешних электромагнитных полях, создаваемых бортовыми системами современного ЛА, воздушного либо космического, необходимо создать средство визуализации результатов измерений, соответствующее следующим выявленным требованиям:

1. Представление данных должно производиться в пределах расчетной сетки с априори заданным объемом и шагом по трем координатам;
2. Визуализацию необходимо проводить в реальном времени с установленным периодом смены информационного кадра и сохранением предыдущих кадров;
3. Информация должна представляться на выбранной плоскости произвольной ориентации в выделенной зоне наблюдения либо в виде 3D-конфигурации, отражающей пространственное распределение исследуемого поля;
4. Создаваемый программный продукт должен иметь аппаратно-программный интерфейс с внешней системой аналоговых измерений, привязанной к системе координат исследуемого объекта.

1. Методология создания программного продукта

Определение количества и положения узлов расчетной сетки

Авторами работы предложено использовать равноудаленное положение узлов расчетной сетки в пространстве зоны наблюдения кубической формы, что позволяет приписывать расчетные или измеренные значения индукций и напряженностей контролируемых полей [12–15] конкретным точкам пространства, окружающего исследуемый объект. Координаты расположения узлов контрольной сетки являются параметрами, позволяющими количественно контролировать и привязывать напряженность электромагнитного поля к системе координат объекта. В объем зоны наблюдения вписывается трехмерная сетка из контрольных точек, находящихся в узлах. Количество точек по одной стороне контролируемого объема указывается целочисленным натуральным числом, что позволяет легко изменять на программном уровне размер и детализацию рассматриваемой системы визуализации.

Количество точек РРС, располагающихся на произвольно выбранной плоскости сечения объема наблюдения, как показано на рис. 2, определяется по формуле:

$$PPC = R^2, \tag{1}$$

где R – количество расчетных точек по одной из осей выбранной плоскости.

Итоговое количество точек в указанном объеме можно рассчитать по формуле:

$$PC = R^3. \tag{2}$$

Нумерация расчетных точек начинается с нижнего левого заднего края объема с прямоугольной декартовой системой координат, то есть при $X < 0, Y < 0, Z < 0$ и продолжается сначала по оси X , затем по осям Y и Z с шагом PS [м], вычисляемым по формуле:

$$PS = V/(R-1), \tag{3}$$

где V – длина стороны рассчитываемого куба [м].

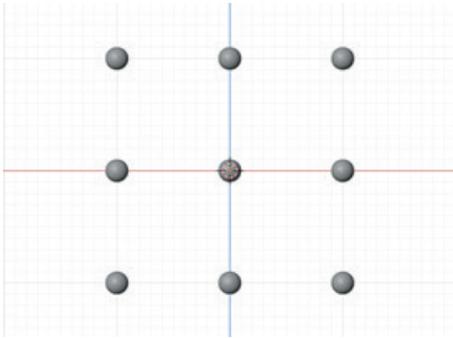


Рис. 2. Расчетные точки на плоскости (вид спереди).

Положение каждой расчетной точки по осям X, Y и Z можно вычислить по формулам:

$$PX = MOD(I, R) \cdot PS - V/2, \tag{4}$$

$$PY = MOD(I/R, R) \cdot PS - V/2, \tag{5}$$

$$PZ = I/PPC \cdot PS - V/2, \tag{6}$$

где MOD – результат деления с остатком первого аргумента на второй; I – индекс (номер) расчетной точки.

Данная методика одинаково хорошо работает как в правосторонней, так и в левосторонней системе координат [16], однако в данной работе будем использовать традиционную левостороннюю систему. Используя формулы (1)–(6), можно сгенерировать трехмерный куб расчетных точек, как показано на рис. 3, который и позволит привязать результаты измерений к конкретной системе координат объекта наблюдения.

Нумерация точек кубической расчетной сетки с разрешением 3 точки на сторону показана на рис. 4. Чтобы увидеть разницу влияния разрешения на конечное визуальное представление, покажем сетку,

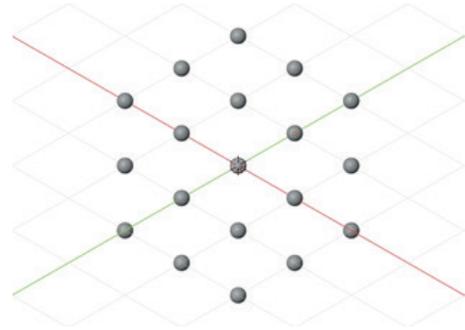


Рис. 3. Куб расчетной сетки, вписанный в зону наблюдения полей рассеяния, в данном случае – с разрешением 3 точки на сторону куба.

содержащую по 7 точек на каждую сторону (рис. 5). Измерения в узлах расчетной сетки с описанными выше координатами позволяют сформировать массив данных, отражающих поле рассеяния объекта в момент наблюдения. Размер массива вычисляется по формуле (2), а разрешение и длину стороны кубической зоны наблюдения легко контролировать, меняя параметр R или V , соответственно.

Приведенные выше формулы позволяют подбирать длину стороны и разрешение зоны наблюдения, необходимые для решения задач в зависимости от габаритов объекта наблюдения. При этом каждому узлу расчетной сетки приписывается значение моду-

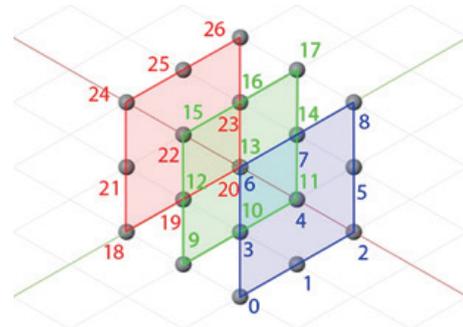


Рис. 4. Индексация (нумерация) расчетных точек зоны наблюдения.

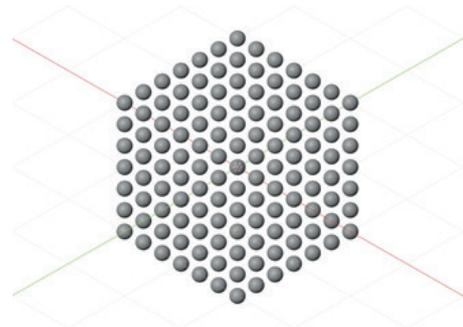


Рис. 5. Кубическая расчетная сетка с разрешением 7 точек на сторону.

ля вектора напряженности измеряемого поля рассеяния и его направление в этой точке, поступающие от измерительной системы.

Пример реализации качественной картины поля с помощью черно-белой шкалы напряженности наблюдаемого поля показан на рис. 6. Здесь темным точкам соответствует слабая напряженность поля, белым – сильная, то есть шкала напряженности пропорциональна яркости маркера и распространяется от черного цвета к белому. Визуализация такой черно-белой карты дает возможность получить качественное представление о напряженности электрического или магнитного полей [13] в зоне наблюдения, что может быть весьма полезным на первых оценочных этапах исследования.

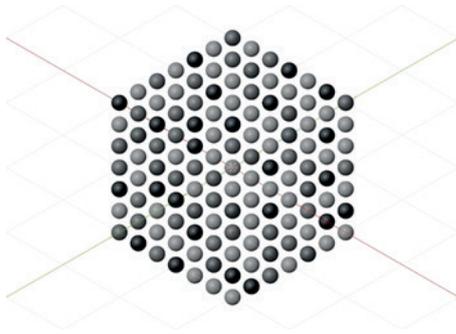


Рис. 6. Точечное представление напряженности поля с пропорциональным регулированием яркости маркеров в узлах сетки.

Дальнейшая обработка представленных результатов позволяет, в том числе, интерполировать значения напряженности в узлах сетки на произвольные промежуточные точки в пространстве между узлами. При этом интерполяцию можно проводить на поверхности условной плоскости, произвольно расположенной по отношению к детерминированным осям системы координат, что позволяет осуществлять детальную визуализацию в выбираемых направлениях.

Определение точек, включающих в себя расчетный пиксель

Для описания геометрической плоскости необходимы как минимум три формирующих ее точки. Такая плоскость используется в компьютерной графике для представления мешей. Меш – это набор точек в пространстве и их связей друг с другом, формирующих некоторое количество плоскостей, иногда со смежными ребрами. Меш относится к категории векторной графики, что делает необходимой его растеризацию перед выводом на дисплей. Растеризация [17] – это процесс конвертации данных из объемного представления в двумерное изображение на выбранной плоскости, состоящее из отдель-

ных пикселей. Координаты каждого пикселя плоскости рассчитываются из координат ближайших узлов фиксированной расчетной сетки, описанной выше. Такой пиксель будем называть расчетным пикселем. Расчетный пиксель хранит информацию о своем цвете (величине индукции) и позиции в трехмерном пространстве расчетной сетки. Эта информация используется для определения соседних индексов смещения расчетных точек, между которыми оказался данный пиксель. Для вычисления меньшего индекса смещения используется формула:

$$RL = FLOOR((PP + V/2)/PS), \quad (7)$$

где $FLOOR$ – функция округления вниз до ближайшего целого; PP – позиция по конкретной оси расчетного пикселя в пространстве.

В качестве параметра PP необходимо подставлять позицию пикселя по каждой из осей, определяя индекс смещения по этой оси, относительно которого расчетный пиксель находится правее, выше или глубже, в зависимости от подставленной оси. Индекс, полученный из (7), может выйти за границу рассчитываемого объема. Поэтому, чтобы этого не произошло, ограничим значения индексов смещения максимальным порогом (границей куба):

$$IRL = MIN(RL, R - 1), \quad (8)$$

$$IRH = MIN(RL + 1, R - 1), \quad (9)$$

где MIN – функция нахождения минимума между двумя параметрами; RL – меньший индекс смещения без учета выхода за границы.

Формулы (7)–(9) определяют индексы смещения расчетных точек по горизонтали (ось X), вертикали (ось Y) и глубине (ось Z), внутри или на поверхности которых находится расчетный пиксель. Это необходимо для билинейной интерполяции значения расчетного пикселя между окружающими его расчетными точками в пространстве зоны наблюдения.

Интерполяция пикселя в пределах элемента сетки

На следующем этапе необходимо рассчитать позицию пикселя относительно окружающих его восьми расчетных точек ближайших узлов сетки. Для этого сначала вычисляем позицию пикселя относительно координат любой первой из окружающих расчетных точек узлов. В данной методике для этого выбрана левая нижняя задняя расчетная точка ($I1$) из восьми окружающих, как показано на рис. 7. На рисунке условный расчетный пиксель (красная точка) находится в геометрическом центре расчетных точек и координаты его отсчитываются (черная



Рис. 7. Относительная позиция расчетного пикселя:
а – перспектива и б – вид сбоку.

стрелка) от начальной расчетной точки узла $I1$. Для вычисления нормализованной позиции координаты пикселя делятся на расстояние между точками – шаг сетки.

Исходя из условной равноудаленности расчетного пикселя от узлов сетки, его нормализованными координатами в данном случае будут $[0.5, 0.5, 0.5]$, которые вычислены по следующей формуле:

$$NP = (WP - I1) / PS, \quad (10)$$

где WP – вектор, представляющий позицию расчетного пикселя в пространстве.

Полученные таким образом нормализованные координаты рассматриваемого пикселя отражают его близость к узлам расчетной сетки. Чем меньше значение нормализованной координаты по выбранной оси координат, тем ближе расчетный пиксель к расчетной точке $I1$, чем больше – тем ближе к соседней точке по этой же оси.

Преобразование индексов смещений в индекс расчетных точек

Для преобразования нормализованных, как показано выше, индексов смещений пикселя в пределах элемента сетки в реальные координаты расчетной сетки предложено использовать следующую формулу:

$$I(HI, VI, DI, R) = HI + VI \cdot R + R^2 \cdot DI, \quad (11)$$

где HI – индекс смещения по горизонтали; VI – индекс смещения по вертикали; DI – индекс смещения по глубине.

Данную формулу необходимо применить столько раз, сколько узлов окружают рассматриваемый пиксель, а именно $n = 8$, каждый раз подставляя в нее координаты соответствующего узла:

$$\begin{aligned} I1 &= I(HL, VL, DL, R); I2 = I(HL, VH, DL, R); \\ I3 &= I(HH, VH, DL, R); I4 = I(HH, VL, DL, R); \\ I5 &= I(HL, VL, DH, R); I6 = I(HL, VH, DH, R); \\ I7 &= I(HH, VH, DH, R); I8 = I(HH, VL, DH, R); \end{aligned}$$

где HL и HH – меньшее и большее значение индекса по горизонтали, VL и VH – меньшее и большее значение индекса смещения по вертикали, DL и DH – меньшее и большее значение индекса смещения по глубине.

Билинейная интерполяция между расчетными точками

Имея нормализованные координаты пикселя в пределах элемента расчетной сетки, как показано выше, выполним интерполяцию координат [18] между узлами сетки, расположенными напротив друг друга, а затем – между полученными результатами. Такой способ интерполяции принято называть билинейным. При этом мы помним, что каждому пикселю приписан поступающий от измерительной системы вектор напряженности электрического поля либо вектор индукции магнитного поля, в зависимости от вида измерений, по которым в данный момент времени ведется визуализация. При этом подразумевается, что измерительная система выполняет векторные измерения исследуемых электромагнитных полей.

Каждый вектор описывается величиной модуля, не зависящего от ориентации, и направлением, задаваемым, как правило, соотношением ортогональных компонент вектора. Сначала необходимо интерполировать значения модулей рассматриваемых векторов по значениям нормализованных координат, вычисленных в соответствии с (11). Формула интерполяции между двумя значениями выглядит следующим образом:

$$LI(F, T, P) = F + (T - F) \cdot P, \quad (12)$$

где F – начальное значение, T – конечное значение, P – относительное смещение от F к T .

Данная формула работает и в отношении ортогональных компонент векторов путем применения ее к отдельным их сопоставленным компонентам:

$$LIV = (LI(V1X, V2X, P), LI(V1Y, V2Y, P), LI(V1Z, V2Z, P)), \quad (13)$$

где $V1X$, $V1Y$ и $V1Z$ – значения компонент первого вектора; $V2X$, $V2Y$ и $V2Z$ – значения компонент второго вектора; P – относительное смещение от первого вектора ко второму.

Длина вектора вычисляется по формуле:

$$L = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}, \quad (14)$$

где X , Y и Z – компоненты измеренного вектора по осям координат.

Так как имеется 8 узлов окружающего элемента расчетной сетки, то сначала выполним интерполяцию по вертикальной оси между $I1$ и $I2$, используя значение нормализованной координаты Y расчетного пикселя как показатель интерполяции. Затем повторяем тот же прием между $I4$ и $I3$, а результаты интерполируем между собой по значению нормализованной координаты X пикселя, как показано на рис. 8.

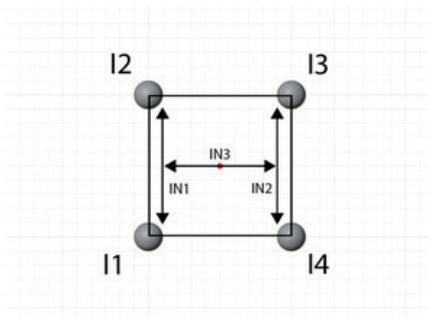


Рис. 8. Билинейная интерполяция между расчетными точками.

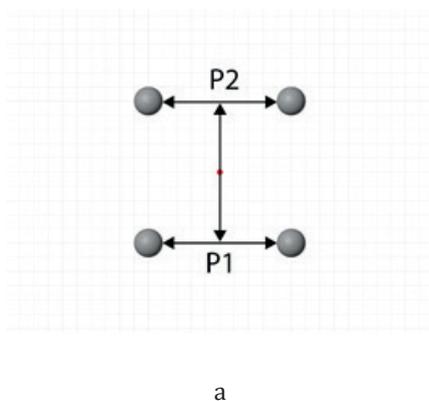


Рис. 9. Интерполяция промежуточных расчетных точек, лежащих на плоскостях ($P1$ и $P2$): а – вид сверху, б – перспектива.

Результатом данной операции окажется вектор напряженности электрического или индукции магнитного поля в точке, расположенной прямо на плоскости, формируемой расчетными точками $I1$, $I2$, $I3$ и $I4$. Такую же билинейную интерполяцию необходимо проделать с точками $I5$, $I6$, $I7$ и $I8$. Полученные результаты для обеих плоскостей интерполируем между собой по значению нормализованной координаты оси Z -пикселя, как показано на рис. 9.

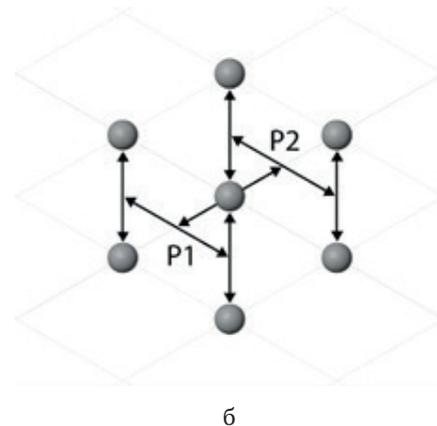
Таким образом, вычисляется итоговый вектор напряженности электрического или индукции магнитного поля [12–15] в координатах пикселя. По вычисленным значениям можно задать яркость отображаемого пикселя в диапазоне от черного до белого на выбранной плоскости, произвольно пересекающей заданный объем зоны наблюдения, как показано на рис. 10.

Видно, что яркость пикселей отражает измеряемые модульные значения [12, 13], а смежные области также билинейно интерполируются для наглядности переходов.

Созданный программный продукт позволяет выбирать произвольное положение контрольной плоскости, на которой проводится визуализация результатов измерений полученных в ходе расчетов ЭМС, как показано на рис. 11.

Из рисунка видно, что контрольная плоскость визуализации образуется интерполяцией соседних плоскостей узлов. Высокая градиентность фона на плоскости визуализации обусловлена малым числом узлов сетки на выбранном интервале зоны наблюдения. Увеличение данного числа даже до $n = 10$ позволяет получить более плавное распределение измеряемого и интерполируемого изображения поля, как показано на рис. 12.

Здесь темные участки соответствуют меньшим значениям модуля измеряемого вектора, светлые – большим. Произвольное перемещение, вращение и масштабирование плоскости визуализации в пределах объема наблюдения не сказывается на точности интерполяции и представления измеряемых значений, поступающих от измерительной системы.



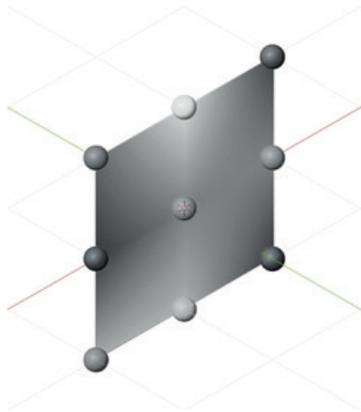


Рис. 10. Выбранная плоскость отображения модульных значений измеряемых величин по результатам интерполяции.

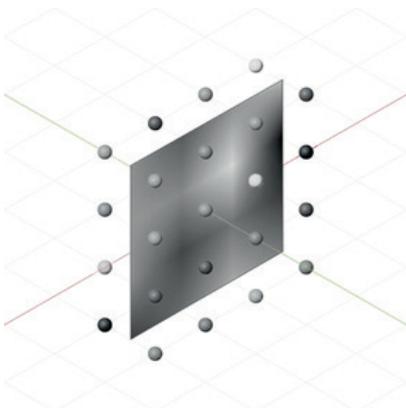


Рис. 11. Плоскость визуализации, расположенная между двумя плоскостями узлов расчетной сетки.

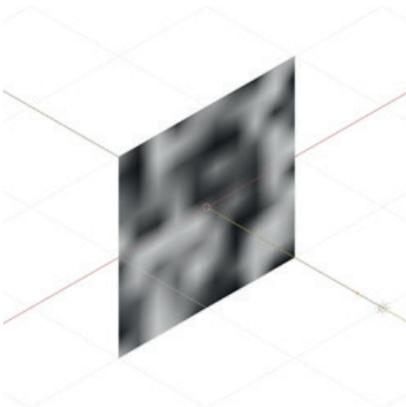


Рис. 12. Визуализируемая алгоритмом плоскость при более высоком разрешении (узлы сетки скрыты для наглядности).

Анимация визуализации во времени

Для анимации работы визуализации результатов модульных и векторных измерений во времени предусмотрена возможность периодической замены массива данных, поступающего от измерительной системы, что осуществляется через задаваемый интервал времени. Так как исследования ЭМС объекта в основном осуществляются в стационарном режиме, то интервалы времени замены массивов устанавливаются

ливаются в диапазоне единиц секунд, что позволяет проводить исследования долговременной стабильности наблюдаемого излучения объекта. Однако, созданный программный продукт не имеет теоретических ограничений для сокращения, при необходимости, интервала времени наблюдения до малых долей секунды.

Объемная визуализация результатов измерений полей рассеяния

Для объемной 3D-визуализации предложено создавать серию разных плоскостей формирующих кубы разных объемов, центры которых расположены в геометрическом центре рассчитываемой трехмерной сцены. Размеры кубов имеют положительное фиксированное приращение, такое, что объем максимального по размеру куба совпадает с объемом рассчитываемой трехмерной сцены. К примеру, в случае если количество кубов $N = 10$, а длина стороны сцены $SV = 50$ [м], приращение размера будет рассчитываться по формуле $INC = SV/N$.

Плоскости формирующие кубы должны иметь прозрачность, рассчитываемую по формуле $PT = 100 - 100/N$, это позволит наблюдать расчетные значения вглубь сцены, как показано на рис. 13.

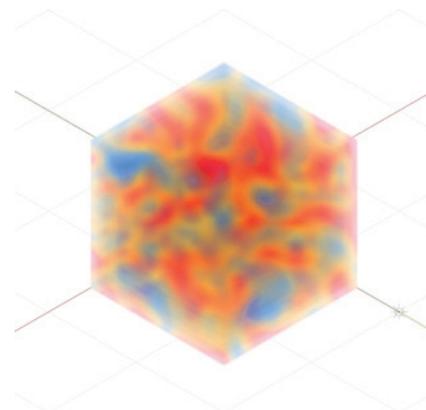


Рис. 13. Визуализация измеряемых значений в объеме зоны наблюдения.

Предложенный механизм позволяет также понять, как выглядит распределение электромагнитных полей внутри трехмерной сцены при изменении координат внешней точки наблюдения.

Цветовая карта визуализации

Созданный программный продукт позволяет отображать масштаб величины измеряемой напряженности или индукции не только яркостью маркера, но и его цветом. Для этого предложена цветовая маркировка результата интерполяции по формуле (14) в соответствии со шкалой, показанной на рис. 14.



Рис. 14. Карта соответствия цветов и измеряемых значений.

Карта подстраивается (обладает адаптивностью) под результирующие значения, где минимальному измеряемому значению соответствует ее крайний левый пиксель, а максимальному – крайний правый пиксель.

Границы шкалы измеряемых величин устанавливаются в начальном диалоге совместно с объемом зоны наблюдения и шагом расчетной сетки. По заданным граничным значениям предложено следующее выражение для вычисления относительной координаты CPX пикселя на приведенной выше шкале – карте соответствия цветов:

$$CPX = (L - MIV) / (MAV - MIV), \quad (15)$$

где L – длина вектора напряженности в расчетном пикселе; MIV – минимальное значение среди всех расчетных точек; MAV – максимальное значение среди всех расчетных точек.

Для непосредственного извлечения цвета предложено использовать следующее выражение:

$$TEX = FLOOR(ABS(MOD(CPX, 1)) \cdot W), \quad (16)$$

где $FLOOR$ – функция округления вниз до ближайшего целого; ABS – функция, извлекающая абсолютное значение; MOD – функция деления с остатком первого аргумента на второй; W – ширина текстуры в пикселях.

Данная функция извлекает цвет пикселя из указанной выше карты цветов, который и является выходным параметром алгоритма цветовой визуализации, результаты которого показаны на рис. 15. Из рисунка видно, что малым значениям измеренных величин (темные сферы) соответствуют более холодные цвета на выбранной плоскости визуализации, большим значениям (светлые сферы) – более теплые.

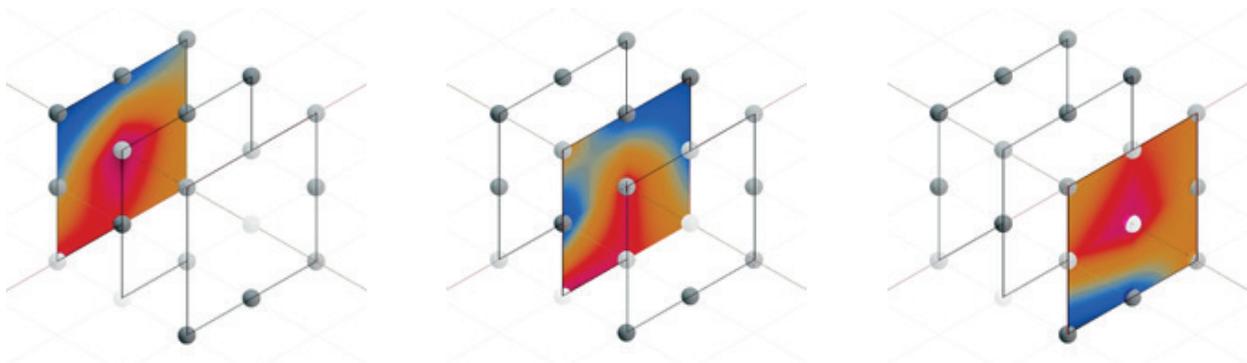


Рис. 15. Цветовая визуализация модульных измерений.

Как и в предыдущих случаях, плоскость визуализации может находиться произвольно между узлами расчетной сетки, что не влияет на корректное отображение цвета маркера в соответствии с выбранной шкалой. Более детализированная картина распределения модулей измеренных значений показана на рис. 16, что достигнуто путем уменьшения шага расчетной сетки.

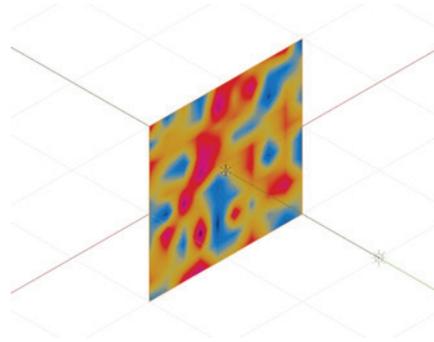


Рис. 16. Детализированная визуализация модульных измерений.

К предложенному методу цветовой визуализации также применимы все описанные выше алгоритмы анимации во времени, объемного представления либо интерполяции при произвольном положении выбранной плоскости визуализации.

2. Полученные результаты

Описание полученного продукта

Система визуализации входит в состав системы картографирования электромагнитного излучения исследуемого объекта, структурная схема которой показана на рис. 17.

В качестве позиционера выступает линейный манипулятор, который предназначен для установки измерительного датчика в точку пространства зоны наблюдения с координатами, заданными в расчетной сетке путем начального диалога с программным

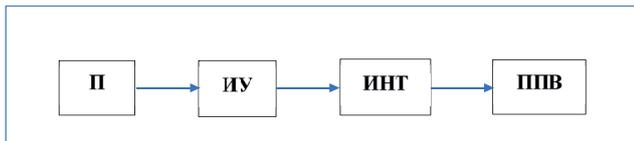


Рис. 17. Структурная схема системы картографирования полей рассеяния летательного аппарата:

П – позиционер линейный, ИУ – измерительное устройство, ИНТ – интерфейс между измерительным устройством и программным продуктом, ППВ – описанное в данной работе программное приложение «Визуализация».

продуктом визуализации. Конкретно на начальном этапе измерительный датчик можно передвигать на заданные расстояния по неким линейным направляющим элементам – рейкам, сориентированным вдоль осей заданной системы координат объекта исследования. Измерительное устройство – векторный магнитометр для измерения магнитного поля рассеяния [19] или измерительный конденсатор для измерения напряженности электрического поля [20]. Интерфейс построен на базе устройства PC1716 [21], осуществляющего мультиплицирование (многократное дублирование) измерительных каналов, аналого-цифровое преобразование и перенос информации в программную среду на языке C++.

Сравнительный анализ полученных методик визуализации

В рамках выполненной работы предложено несколько способов визуализации поля, отличающихся производительностью и информативностью.

Точечная визуализация. На рис. 18 показан пример точечной визуализации электромагнитного поля, как самой простой реализации данной методики. Она более производительна, однако менее информативна. Исследователь не видит значения, находящиеся между двумя вычисленными точками. Такую визуализацию еще сложнее понять, когда она накладывается на изображение исследуемого электронного устройства.

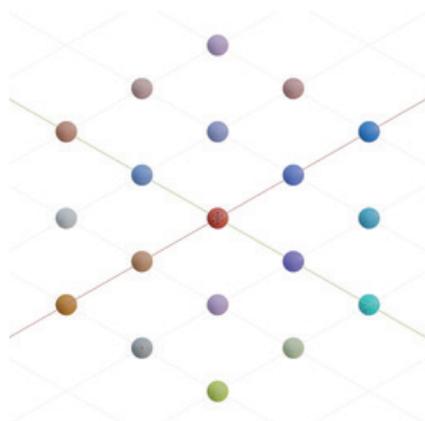


Рис. 18. Точечная визуализация.

Кубическая визуализация. Кубическая визуализация электромагнитного поля показана на рис. 19. В этом случае вместо точек используются кубы, стороны которых равны расстоянию между рассчитанными точками. Поверхность куба имеет прозрачность, зависящую от величины измеренной индукции поля. При таком подходе исследователь видит резкие переходы между двумя вычисленными значениями, а под некоторыми углами обзора могут наблюдаться артефакты. При большом разрешении (числе точек) рассчитываемого объема может заметно снизиться количество обрабатываемых кадров в секунду, что в некоторых случаях может оказаться критическим. Изменение положения кубов в пространстве приводит к некорректной визуализации. Данная методика менее производительна, чем точечная.

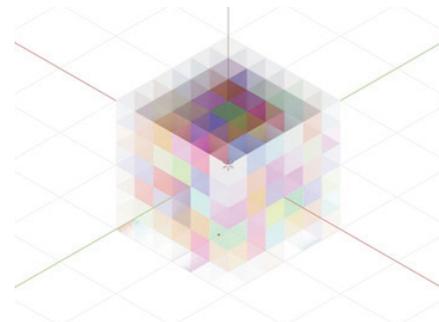


Рис. 19. Кубическая визуализация.

Сферическая визуализация. Методика, иллюстрируемая рис. 20, является продолжением кубической, однако вместо кубов предполагается использование сфер.

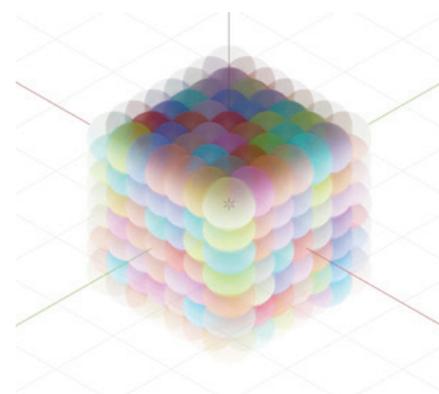


Рис. 20. Сферическая визуализация.

Размеры сфер задаются в несколько раз больше расстояния между рассчитанными точками. Это необходимо для того, чтобы сферы перекрывались друг другом. Поверхность сфер также имеет прозрачность, зависящую от напряженности поля в точке внутри сферы. Такая прозрачность позволяет цветам

сфер смешиваться, формируя более корректные значения на смежных переходах, чем в случае с кубами. Методика сферической визуализации является менее производительной, чем кубическая, но лишена некоторых его недостатков.

Плоскостная визуализация. В отличие от предыдущих способов, данная методика не связывает геометрическую форму с каждой точкой измерений. Вместо этого предлагается использовать плоскость, на поверхности которой происходит измерение напряженности электромагнитного поля, как показано на рис. 21.

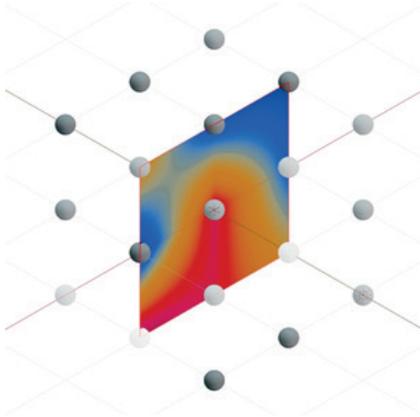


Рис. 21. Плоскостная визуализация.

Для нахождения характеристик поля между узлами сетки используется более точный способ – билинейная интерполяция. Такая методика лишена артефактов. Количество обрабатываемых в секунду кадров не зависит от разрешения рассчитываемого объема. Любая геометрическая трехмерная форма, состоящая из плоскостей, также легко может использоваться в данной методике. Помимо этого, методика поддерживает визуализацию нескольких плоскостей одновременно, что позволяет формировать визуализируемый объем, то есть объемную визуализацию.

Преимущества и перспективы применения предложенного решения

Новизна предложенного решения по сравнению с описанными выше аналогами состоит в следующем:

- предложение обеспечивает наглядность визуализации путем использования яркости и цвета маркеров;
- программный продукт предлагает пользователю выбор: визуализация на плоскости либо в 3D-пространстве;
- предложенная методика позволяет восстанавливать зависимость по минимальному числу точек, что сокращает число измерений.

Возможные применения предложенной системы картографирования могут состоять в различных подходах к анализу внешних полей, создаваемых объектом исследования авиакосмического назначения. Причем, исследуемые поля могут быть не только

электромагнитными, но и температурными, полями гравитации, расхода жидкости, скорости жидкости и другими.

Одно из перспективных применений – картографирование электромагнитного поля [22–24] в кабине пилота современного боевого самолета. На рис. 22 показана сетка картографирования кабины самолета, применяемая в зарубежных технологиях управления огнем истребителя.

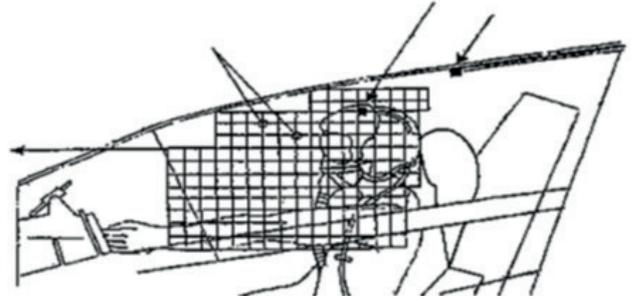


Рис. 22. Разделение рабочей зоны на дискретные ячейки.

Из рисунка видно, что кабина самолета разделена на кубические элементы со стороной в несколько сантиметров, что определяет требуемую точность позиционирования измерительного устройства и точность визуализации соответственно.

Заключение

В работе реализован алгоритм плоскостной и 3D-визуализации в пространстве и времени напряженности и/или индукции электромагнитного поля рассеяния, создаваемого ЛА в окружающем пространстве заданного объема. Получены формулы и правила для определения положения результатов измерений и их порядка представления в общем массиве.

Предложена формула определения индексов смещений координат точки измерения в пределах заданного элемента расчетной сетки. Рассмотрены варианты визуализации, реализован алгоритм билинейной интерполяции на примере вычисления вектора напряженности электрического поля рассеяния объекта исследования.

Для достижения необходимой наглядности объемной визуализации предложено сопоставление цветовой карты со значениями величин модулей или компонент векторов измеряемых векторов электромагнитного поля.

В рамках выполненной работы решены следующие конкретные задачи:

- реализована анимация результатов измерений во времени с задаваемым периодом обновления данных;
- выполнена интерполяция результатов измерений, которая позволяет по минимальному числу то-

чек наблюдения восстанавливать характер линейного или пространственного распределения поля в зоне наблюдения по заданным направлениям;

– предложен метод объемного отображения измеряемой информации;

– реализован алгоритм начального задания количества и положения точек в объеме зоны наблюдения, в которых необходимо получить информацию о полях рассеяния либо прямым считыванием из массива измеренной информации, либо интерполяцией;

– предложена цветовая карта – шкала измеряемых величин.

Перспективы применения полученного решения, на взгляд авторов, состоят в следующем:

– верификация математических моделей внешних электромагнитных 3D-полей, создаваемых подсистемами ЛА, путем сравнения результатов моделирования с измерениями при минимальном объеме измерений;

– стендовые испытания авиационной и космической техники;

– использование системы картографирования полей рассеяния силовых систем в ходе выполнения НИОКР по развитию авиационно-космической техники и технологий.

Авторы будут развивать полученные результаты в направлении дальнейшей автоматизации процес-

сов измерения, расширения начального диалога с программным продуктом и создания постоянно действующего прототипа системы для его демонстрации и совершенствования. В следующей работе авторы планируют описать результаты математического и физического моделирования предложенной технологии, для чего ведется выбор объекта и подготовка оборудования.

Финансовая поддержка

Научно-исследовательская работа, результаты которой изложены в статье, выполнена за счет средств Централизованного фонда по теме «Система расчета электромагнитной совместимости бортовой кабельной сети на техническом объекте» на основании протокола заседания экспертной комиссии конкурса по подведению итогов Всероссийского конкурса «Инновации в реализации приоритетных направлений развития науки и технологий» от 29 мая 2020 г., шифр: НИЧ ИЦМР 19/2020.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work.

The authors declare no conflicts of interest.

Литература

1. https://portal.tpu.ru/SHARED/u/ULTRATONE/uchebnaya_rabota/Tab/Lecture.pdf
2. Тимиргазин Р.Ф. Электромагнитная совместимость: учебное пособие. Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет; 2017. 48 с. URL: <http://venec.ulstu.ru/lib/disk/2017/102.pdf>
3. Biuk-Aghai R.P., Pang P.C-I., Pang B. Map-like visualisations vs. treemaps: an experimental comparison. In: VINCI '17: Proceedings of the 10th International Symposium on Visual Information Communication and Interaction. 2017. P. 113–120. <https://doi.org/10.1145/3105971.3105976>
4. https://studme.org/179273/matematika_himiya_fizik/elementy_metoda_setok_primery_raznostnyh_shem
5. <https://wiki.org/Визуализация>
6. <https://skomplekt.com/harakteristiki-ostcillograf/>
7. Шнирман Г.Н. Аппаратурные наблюдения. Избранные труды. М.: Изд-во ОИФЗ РАН; 2003. 304 с. ISBN 5-201-11982-4.
8. <https://rusautomation.ru/bumazhnie-registratori-samopisci>
9. 7 сервисов для визуализации данных: не привлекая дизайнеров и программистов. URL: <https://netology.ru/blog/7-services-data-visualization>
10. 20 лучших инструментов для визуализации данных. URL: <https://freelance.today/poleznoe/20-luchshih-instrumentov-dlya-vizualizacii-dannyh.html>

References

1. https://portal.tpu.ru/SHARED/u/ULTRATONE/uchebnaya_rabota/Tab/Lecture.pdf
2. Timirgazin R.F. *Elektromagnitnaya sovvestimost': uchebnoe posobie* (Electromagnetic compatibility). Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University Publishing House; 2017. 48 p. (in Russ.). URL: <http://venec.ulstu.ru/lib/disk/2017/102.pdf>
3. Biuk-Aghai R.P., Pang P.C-I., Pang B. Map-like visualisations vs. treemaps: an experimental comparison. In: VINCI'17: Proceedings of the 10th International Symposium on Visual Information Communication and Interaction. 2017. P. 113–120. <https://doi.org/10.1145/3105971.3105976>
4. https://studme.org/179273/matematika_himiya_fizik/elementy_metoda_setok_primery_raznostnyh_shem
5. <https://wiki.org/Visualization>
6. <https://skomplekt.com/harakteristiki-ostcillograf/>
7. Shnirman G.N. *Apparaturnye nablyudeniya. Izbrannyye Trudy* (Hardware observations. Selected Works). Moscow: Joint Institute of Earth Physics RAS Publishing House; 2003. 304 p. (in Russ.).
8. <https://rusautomation.ru/bumazhnie-registratori-samopisci>
9. 7 servisov dlya vizualizatsii dannykh: ne privilekaya dizainerov i programmistov (7 services for data visualization: without involving designers and programmers) URL: <https://netology.ru/blog/7-services-data-visualization>

11. Системы визуализации данных.
URL: <https://soware.ru/categories/data-visualization-systems>
12. Детлаф А.А., Яворский Б.М., Милковская Л.Б. Курс физики: в 3-х т. Т. 2. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа; 1977. 375 с. ISBN 981-023917-3.
13. Калантаров П.Л., Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники. М.: Госэнергоиздат; 1951. 464 с.
14. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики: в 3-х т. Т. 2. Электрические и электромагнитные явления. М.: Лань; 2009. 528 с. ISBN 978-5-8114-0664-7.
15. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике: для научных работников и инженеров. М.: Наука; 1973. 832 с.
16. Трехмерная графика с нуля. Часть 2: растеризация.
URL: <https://habr.com/ru/post/342708/>
17. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М.: Наука; 1989. 429 с. ISBN 5-02-013996-3.
18. Гусев Н.А., Ветошко П.М., Кузьмичев А.Н., Чепрунова Д.А., Самойлова Е.В., Звездин А.К., Корогаева А.А. Сверхчувствительный векторный магнитометр для картографических измерений в кардиографии. *Медицинская техника*. 2017;3(303):5–8.
19. Шелагин А.В. Измерение электрических и магнитных полей: Лаб. практикум. М.: МИФИ.
URL: https://mipt.ru/education/chair/physics/S_III/lab_el/Shelagin.pdf
20. https://www.advantech.ru/products/1-2mlkc9/pci-1716/mod_86ec4c4d-f497-45c5-81da-b8600c0eb36f
21. Raab F.H. Remote object position locator: pat. 4054881 US. Appl. № US05/680,471; Prior. 26.04.1976. Publ. 18.10.1977.
22. Raab F.H. Remote object position and orientation locator: pat. 4314251 US. Appl. № US06/062,140; Prior. 30.07.1979. Publ. 02.02.1982.
23. Egli W.H. et al. Helmetmounted sighting system: pat. 4287809 US. 1981.
24. Zimmer P., Cordonnier A. Method and apparatus for determining an orientation associated with a mobile system, especially a line of sight inside a helmet visor. pat. 5457641 US. Appl. № US08/311,435. Prior. 29.06.1990. Publ. 10.10.1995.
10. 20 *luchshikh instrumentov dlya vizualizatsii dannykh* (20 best tools for data visualization.).
URL: <https://freelance.today/poleznoe/20-luchshih-instrumentov-dlya-vizualizatsii-dannyh.html>,
11. *Sistemy vizualizatsii dannykh* (Data visualization systems).
URL: <https://soware.ru/categories/data-visualization-systems>
12. Detlaf A.A., Yavorskii B.M., Milkovskaya L.B. *Kurs fiziki: v 3 t. T. 2. Elektrichestvo i magnetizm* (Physics course: in 3 v. V. 2. Electricity and magnetism). Moscow: Vysshaya shkola; 1977. 375 p. (in Russ.). ISBN 981-023917-3.
13. Kalantarov P.L., Neiman L.R. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* (Theoretical foundations of electrical engineering). Moscow: Gosenergoizdat; 1951. 464 p. (in Russ.).
14. Frish S.E., Timoreva A.V. *Kurs obshchei fiziki: v 3 t. T. 2. Elektricheskie i elektromagnitnye yavleniya* (General physics course: in 3 v. V. 2. Electrical and electromagnetic phenomena). Moscow: Lan'; 2009. 528 p. (in Russ.). ISBN 978-5-8114-0664-7.
15. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike: dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* (Mathematical handbook: for scientists and engineers). Moscow: Nauka; 1973. 832 p. (in Russ.).
16. Trekhmernaya grafika s nulya. Chast' 2: rasterizatsiya (3D graphics from scratch. Part 2: rasterization).
URL: <https://habr.com/ru/post/342708/>
17. Samarskii A.A., Gulin A.V. *Chislennyye metody* (Numerical methods). Moscow: Nauka; 1989. 429 p. (in Russ.). ISBN 5-02-013996-3.
18. Gusev N.A., Vetoshko P.M., Kuz'michev A.N., Cheprunova D.A., Samoilova E.V., Zvezdin A.K., Korotaeva A.A. Ultra-sensitive vector magnetometer for magnetocardiographic. *Biomedical Engineering*. 2017;51(3):157–161.
<https://doi.org/10.1007/s10527-017-9705-8>
19. Shelagin A.V. *Izmerenie elektricheskikh i magnitnykh polei: Laboratornyi praktikum* (Measurement of electric and magnetic fields). Moscow: MIFI. (in Russ.).
URL: https://mipt.ru/education/chair/physics/S_III/lab_el/Shelagin.pdf
20. https://www.advantech.ru/products/1-2mlkc9/pci-1716/mod_86ec4c4d-f497-45c5-81da-b8600c0eb36f
21. Raab F.H. Remote object position locator: pat. 4054881 US. Appl. № US05/680,471; Prior. 26.04.1976. Publ. 18.10.1977.
22. Raab F.H. Remote object position and orientation locator: pat. 4314251 US. Appl. № US06/062,140; Prior. 30.07.1979. Publ. 02.02.1982.
23. Egli W.H. et al. Helmet-mounted sighting system: pat. 4287809 US. 1981.
24. Zimmer P., Cordonnier A. Method and apparatus for determining an orientation associated with a mobile system, especially a line of sight inside a helmet visor. pat. 5457641 US. Appl. № US08/311,435. Prior. 29.06.1990. Publ. 10.10.1995.

Об авторах:

Курбанисмаилов Заур Магомедович, преподаватель кафедры КБ-4 «Интеллектуальные системы информационной безопасности» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). <http://orcid.org/0000-0002-5388-049X>

Тарланов Арслан Тарланович, преподаватель кафедры КБ-4 «Интеллектуальные системы информационной безопасности» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: lev.brave@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-7508-9682>

Матяш Екатерина Дмитриевна, преподаватель кафедры «Информатика» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). <http://orcid.org/0000-0002-4305-8742>

Карбова Елена Сергеевна, ассистент кафедры КБ-4 «Интеллектуальные системы информационной безопасности» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). <https://orcid.org/0000-0003-2933-9641>

About the authors:

Kurbanismailov Zaur Magomedovich, Lecturer, Department of Intelligent Information Security Systems of the Institute for Integrated Security and Special Instrument Engineering MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). <http://orcid.org/0000-0002-5388-049X>

Tarlanov Arslan Tarlanovich, Lecturer, Department of Intelligent Information Security Systems of the Institute for Integrated Security and Special Instrument Engineering MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). E-mail: lev.brave@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-7508-9682>

Matyash Ekaterina Dmitrievna, Lecturer, Department of Computer science of the Institute for Integrated Security and Special Instrument Engineering MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). <http://orcid.org/0000-0002-4305-8742>

Karbova Elena Sergeevna, Assistant, Department of Intelligent Information Security Systems of the Institute for Integrated Security and Special Instrument Engineering MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). <https://orcid.org/0000-0003-2933-9641>

Поступила: 23.10.2020; получена после рецензирования: 23.11.2020; принята к опубликованию: 30.11.2020.