

УДК 621.396

А.Ф. Алхадж Хасан, М.Т. Нгуен, Т.Р. Газизов

Моделирование антенн методом моментов: аппроксимация поверхности проводниками

Выполнен обзор моделирования антенн с использованием одного из наиболее распространенных методов моментов (МоМ): с помощью проводной сетки, включая его историю, ограничения и применения. Обсуждено его использование при моделировании и изготовлении линзовых антенн и антенных решёток. Рассмотрены работы, посвященные его использованию не только с МоМ, но и с другими численными методами. Представлен также ряд работ по валидации результатов моделирования с использованием данного подхода. В заключении отражена актуальность исследования подхода и возможные направления его развития.

Ключевые слова: метод моментов, численные методы, антенны, проводная сетка, компьютерное моделирование.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-2-51-71

Полноволновой анализ с использованием численных методов широко применяется для проектирования антенных решеток и элементов. Например, антенны могут быть проанализированы с использованием метода конечных разностей во временной области (FDTD) [1, 2], метода конечных интегралов (FIT) [3, 4] или метода конечных элементов (FEM) [5, 6]. Используя подобные методы и другие, предложено множество подходов для моделирования и дискретизации разнообразных структур [7, 8]. Тем не менее наиболее распространенным методом для моделирования антенн является метод моментов (МоМ) [9–12].

Популярность МоМ, вероятно, связана с его относительно низкими вычислительными затратами, обеспечиваемыми необходимостью дискретизации только поверхностей моделируемого объекта, а не всей области решения.

При моделировании антенн с помощью МоМ проводящие структуры обычно заменяются эквивалентными поверхностными токами, а затем, используя принцип взаимности, решается задача излучения на основе этих токов. Самые важные этапы этого процесса – дискретизация модели антенны и аппроксимация поверхностных токов в пределах каждого дискретного участка. Для этого обычно используют два основных алгоритма: проводную сетку и поверхностную триангуляцию. Они отличаются тем, что в первом используется сетка или решетка из пересекающихся проводов, а во втором – поверхностная плотность тока [13].

Первый алгоритм (проводная сетка) заключается в замене проводящих поверхностей антенны сеткой из тонких проводов, радиус которых намного меньше длины волны возбуждающего сигнала и длины самих проводов [14–16]. Такой подход позволяет использовать скалярную функцию плотности тока вместо векторной, что снижает вычислительные затраты на моделирование.

Однако алгоритм проводной сетки относительно плохо подходит для аппроксимации сложных и высокодетализированных антенных структур и для решения задач ближнего поля [17].

Второй алгоритм заключается в дискретизации проводящих элементов антенны поверхностными патчами (участками), как правило, треугольной формы, а для аппроксимации токов обычно используются векторные базисные функции Рао–Уилтона–Глиссона (RWG) [18–20]. Треугольники, образующие поверхностную триангуляцию, описывают криволинейные поверхности с высокой точностью, что позволяет получить точные результаты анализа антенны. Однако сам процесс триангуляции и использование векторных базисных функций приводят к существенному увеличению вычислительных затрат. Общая математическая основа этих алгоритмов детально описана в нескольких работах, например, в [10, 21, 22].

Ранние исследования ограничены только прямоугольными поверхностными патчами и проводной сеткой, однако они не подходят для структур произвольной формы. Именно поэтому потрачено много усилий на разработку методики моделирования непрямоугольными патчами. Некоторые исследователи предложили представить структуру как соединение многоугольных пластин. Токи в них затем представляются через токи непрямоугольных поверхностных патчей [23].

Другие предпочли рассматривать всю модель задачи сразу как общую криволинейную поверхность. При таком подходе непрямоугольные участки поверхности образуют кусочно-плоскую аппроксимацию плотности поверхностного тока на ее поверхности, что является более универсальным, но несколько более сложным в реализации [24, 25]. Изучив различные подходы и использовав полигональные патчи различной формы (квадрат, треугольник, четырехугольник, восьмиугольник и др.), исследователи пришли к выводу, что среди всех непрямоугольных патчей наиболее универсальными в описании структуры и простыми в реализации являются треугольные. Кроме того, исследователи заметили, что результаты тестирования остаются приемлемыми даже в тех случаях, когда некоторые из четырехугольников вырождаются в треугольники [23, 26]. С учетом этого Глиссон и Рао в своей работе, начатой еще в 1978 г.,

сосредоточили свои усилия на использовании треугольных патчей [27].

Разработаны различные программные коды как на основе проводной сетки, например, в численном электромагнитном коде (NEC) [28], MMANA-GAL [29], CONCEPT-II [30], GEMACS [31], и AN-SOF [32] (рис. 1), так и поверхностных патчей (рис. 2), как в NEC [33], электромагнитном поверхностном патч-коде (ESP) [34] и др. Таким образом, выбор подходящего подхода или программного обеспечения стал важным и неизбежным из-за быстрого развития используемых методов и подходов, а также основанного на них программного обеспечения вследствие бурного роста достижений в области компьютерных систем.

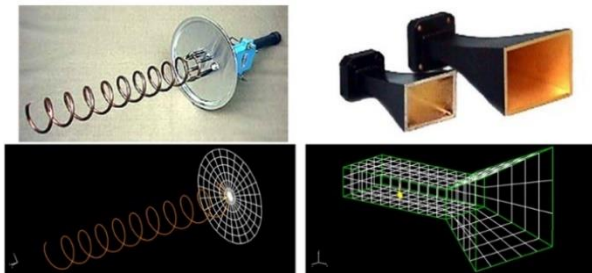


Рис. 1. Антенны, смоделированные с помощью проводов и проводных сеток [32]

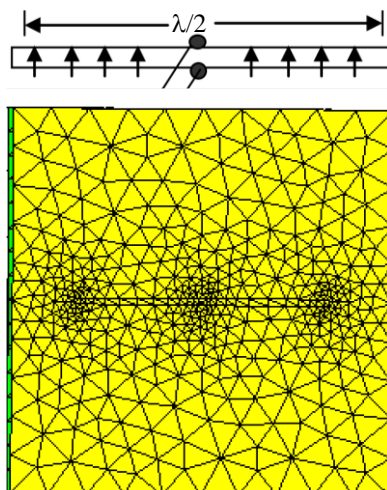


Рис. 2. Дипольная антенна длиной $\lambda/2$, смоделированная с помощью треугольников [18]

Исследователи попытались рассмотреть эффективность каждого подхода и описать их ограничения и применение, а в некоторых работах даже дать рекомендации. Например, в работах [35, 36] представлено аналитическое сравнение моделирования проводной сеткой и поверхностной триангуляцией, в то время как в работах [37–40] обсуждаются численные различия.

Однако исследования в области проводных сеток представляют собой обширное и многогранное поле, охватывающее разнообразные аспекты и применения. В ходе многолетних исследований, начиная с классических работ и до современных подходов, ученые продемонстрировали значительный интерес

к проводным сеткам как инструменту для моделирования и анализа сложных электромагнитных структур. Поэтому цель данной работы – выполнить обзор исследований в области проводных сеток и анализ их возможностей и современного состояния.

Проводная сетка: история

Исследованию свойств проводной сетки посвящено много работ. Наиболее ранними из них являются труды Фраунгофера 1823 г., Герца 1889 г. и Лампе 1898 г. В России можно отметить работы Гошина Г.Г., Кравченко Г.Г., Надененко С.И. С тех пор исследователи рассматривали различные аспекты проводных сеток.

Проводная сетка: общее использование

Много исследований проведено с целью изучения электромагнитных свойств проводной сетки [41–44] (рис. 3). В рамках этих исследований рассмотрено влияние зазора между проводниками на коэффициенты передачи и отражения [45–47]. Для оценки этих коэффициентов разработаны различные способы, включая усредненные граничные условия второго порядка, предложенные Конторовичем для плотной сетки, и импедансные граничные условия высшего порядка для разреженной сетки [48]. Кроме того, предложен способ представления проводной сетки как импеданса, шунтирующего бесконечную линию передачи [49, 50].

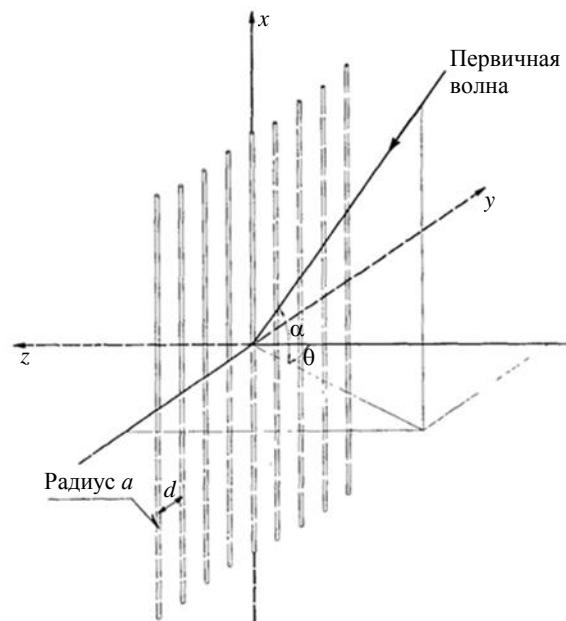


Рис. 3. Плоская решетка при произвольном падении плоской волны [42]

Исследования также включали излучение от проводной сетки [51] и ее использование для повышения эффективности излучения других антенн [52]. Некоторые исследования подтверждают возможность использования ряда металлических проводных сеток для замены металлической пластины. Например, в одном из исследований проводная сетка использовалась для построения многосегментной модели симулятора мощных электромагнитных воз-

действий [53] (рис. 4). В этой работе также исследовано влияние параметров сетки на точность результатов (рис. 5). Исследовались и другие параметры проводной сетки. Например, исследователи в [54] экспериментально доказали, что апертура сеточного отражателя не всегда адекватно отражает работу реального.

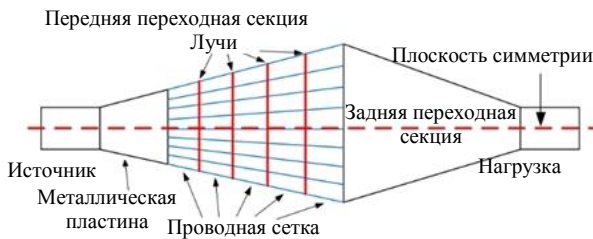


Рис. 4. Эскиз многосегментного симулятора волн из проводной сетки [53]

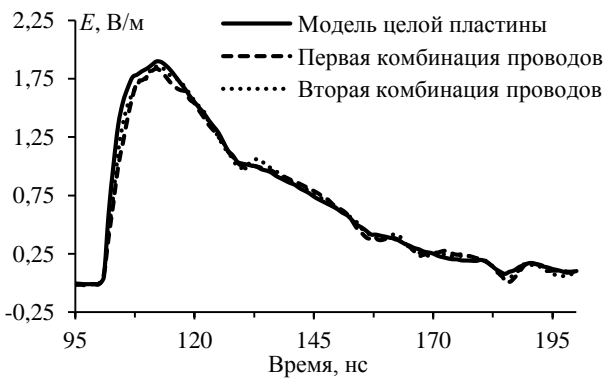


Рис. 5. Напряженности поля внутри симулятора для разных комбинаций проводов сетки [53]

Проводная сетка: особое использование

Исследования в области использования проводной сетки в новых направлениях имеют ряд интересных примеров. Так, проводная сетка может быть использована при проектировании планарной метаповерхностной элементарной ячейки для получения тонкой структуры антенны и упрощения процесса ее изготовления [55] (рис. 6).

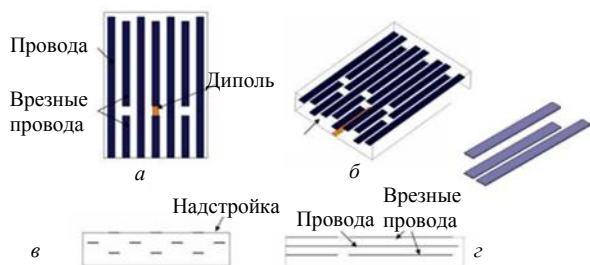
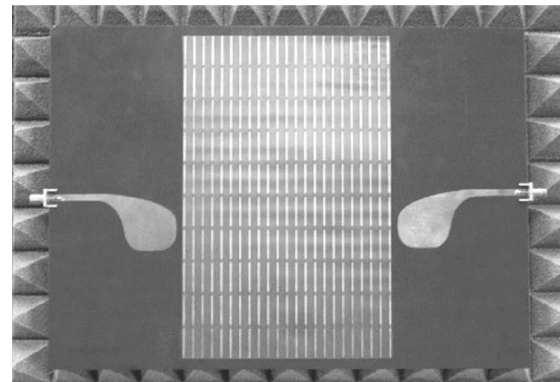


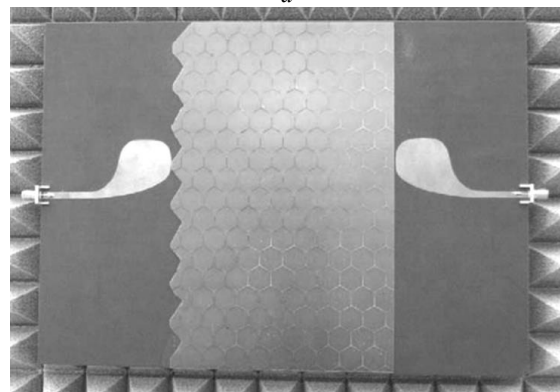
Рис. 6. Конфигурация подложки планарной метаповерхности на основе диполей и проводов: а – вид сверху; б – перспективный вид; в – вид в плоскости H ; г – вид в плоскости E [55]

Другим примером является подход к проектированию сильно связанных металлodieлектрических структур с электромагнитными зазорами. Данный подход основан на использовании сетки из проводов для формирования компактных электромагнитных

материалов с зазорами, которые могут быть использованы в качестве фильтров для распространения как плоских, так и поверхностных волн [56] (рис. 7).



а



б

Рис. 7. Изображение сильно связанных дипольных (а) и трипольных (б) конфигураций с металлodieлектрическими электромагнитными зазорами для измерений поверхностных волн [56]

Исследователи также успешно применяли сетку из реактивно нагруженных проводов при построении электромагнитных кристаллов, которые могут быть использованы в качестве элементов поляризационных антенных отражателей и линз [57, 58] (рис. 8).

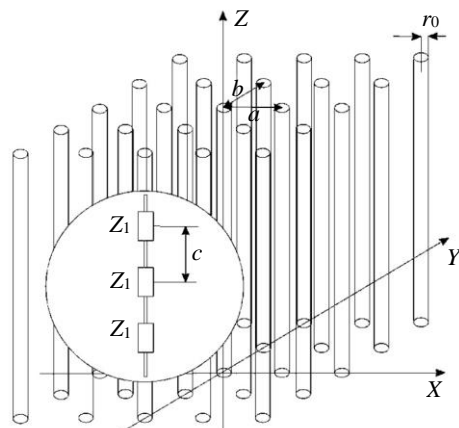


Рис. 8. Внутренняя структура нагруженной проводной среды [57]

Более того, использование проводных сеток привело к разработке сложных искусственных материалов, которые могут быть использованы в качестве

проводящих сред со специфическими характеристиками распространения [59]. Проводная сетка также может применяться для повышения точности методов измерения выходной мощности микроволновых передатчиков на высоких частотах, как продемонстрировано в [60]. Применение такого подхода в проектировании доказало его эффективность, что привело к получению более стабильных и воспроизводимых конфигураций [61]. Добавление нагруженных проводов в конструкцию проводной сетки довольно широко используется, поскольку они позволяют точно контролировать характеристики структуры [62], а в некоторых случаях и улучшать их [63] (рис. 9). Нагруженные провода особенно часто используются в комбинации с частотно-селективными поверхностями (FSS) для разработки, например, поверхностей с настраиваемой характеристикой отражения и передачи [64].

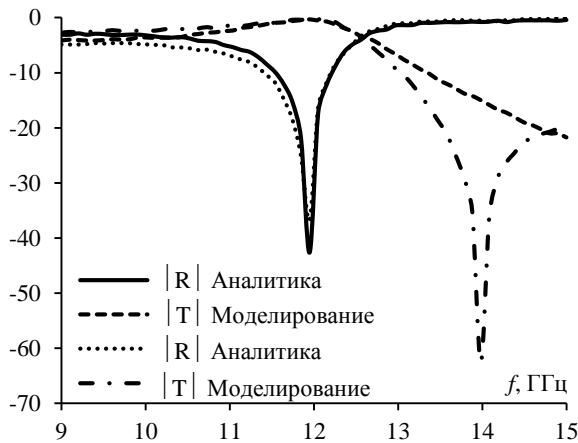


Рис. 9. Рассчитанные аналитически и численно коэффициенты отражения и передачи для двух емкостно нагруженных проводов [63]

Проводная сетка: линзовые антенны

Проводные сетки показали свою эффективность в проектировании линзовых антенн [65] (рис. 10), которые находят широкое применение в высокочастотной связи (рис. 11), что доказано экспериментально [66–68]. Свойства распространения волн высокочастотных проводных сеточных линзовых антенн достаточно хорошо исследованы. Немало работ посвящено улучшению их характеристик путем приема сигнала парой соседних проводов вместо одного [69] или использования гексагональной сетки. В результате исследования этих характеристик с использованием различных типов сеток (квадратных, гексагональных или треугольных) показана оптимальность гексагональной [70].

Другой подход, развившийся из традиционной проводной сетки, применялся при создании рефлекторных антенн, которые нашли широкое применение в спутниках и наземных антенных системах. Этот подход основан на использовании сеточных поверхностей с полосками-апертурами, которые могут иметь различную форму и приводить к изменению конфигурации сетки [71]. Аналогично линзовым и

рефлекторным антеннам исследователи также использовали проводную сетку для анализа антенны импульсного излучения [72].

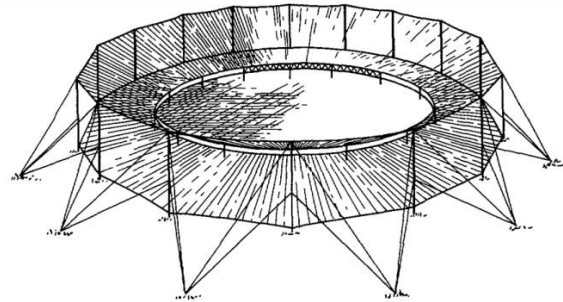


Рис. 10. Линзовая антенна из проводной сетки [65]



Рис. 11. Спутник-ретранслятор «Луч-15»

Проводная сетка: численные методы

Используя численные методы, выявлено еще одно важное преимущество подхода проводной сетки – возможность ее использования не только для проектирования, но и для моделирования. Для решения проблем моделирования проводных сеточных структур использованы разные методы, а также предложено использование этого подхода при моделировании сплошных поверхностей, что значительно снижает вычислительные затраты. Полученные эквивалентные структуры могут быть использованы не только в моделировании, но и при изготовлении. Например, метод сопряженных градиентов (CGM) показал возможность использования итерационных методов при решении электрически больших произвольно ориентированных проводных структур без хранения каких-либо матриц, что обычно происходит в прямых методах [73]. Другой пример – быстрое преобразование Фурье (БПФ), которое использовано для решения таких проблем, как частотно-селективная апертура и патч-периодические поверхности [74] (рис. 12).



Рис. 12. Апертурная и патчевая периодические поверхности [74]

В некоторых работах исследователи объединили два предыдущих подхода (CGM-FFT) и успешно применили их для решения задач электромагнитного рассеяния [75, 76], излучения [77] и характеристики отражения [78] проводной сетки.

Проводная сетка: разные типы антенн

Существует ряд исследований, посвященных проблеме излучения или рассеяния от тел вращения [79]. Решение этой проблемы найдено для проводных структур, прикрепленных к телу [80] или находящихся в его присутствии [81], а также для тел из проводной сетки [82, 83].

Более того, многие исследователи предложили различные численные модели для анализа свойств электромагнитного излучения [84, 85] и рассеяния [86, 87] проводящих проводных структур произвольной формы. В частности, исследованы круглые и квадратные проводные петли, круглые и квадратные пластины, сферические и полусферические проводя-

щие структуры [88–90], а также диэлектрические структуры [91, 92] (рис. 13).

Исследователи также рассматривали другие характеристики проводных сеточных структур, включая их эффективную площадь отражения (RCS) [93, 94], а также распределение тока и полное сопротивление в точке питания (driving-point impedance) антенны с верхней нагрузкой [95].

Численный анализ проводных сеточных структур также позволил исследователям рассмотреть широкий спектр различных типов и форм антенн, включая проводно-сеточные микрополосковые антенные элементы [96, 97] и решетки [98]. Кроме того, исследованы тонкие экраны из периодических сеток, которые могут быть использованы в качестве антенного обтекателя [99], а также низкопрофильные самолетные [100] и вертолетные [101] (рис. 14) антенны и их режимы связи [102].

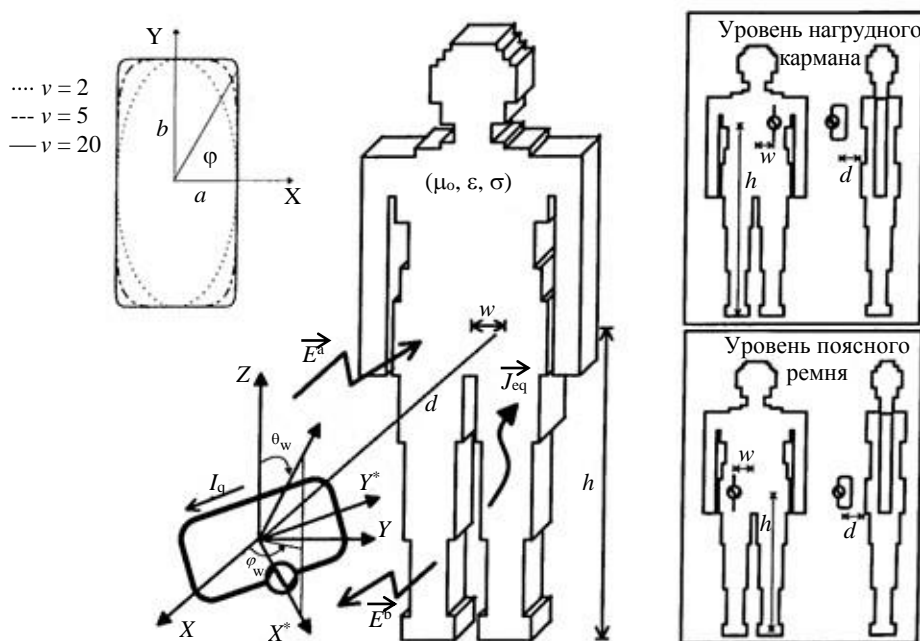


Рис. 13. Электромагнитное взаимодействие между приближенной моделью тела человека и произвольно ориентированной петлевой антенной на уровне нагрудного кармана или поясного ремня [91]

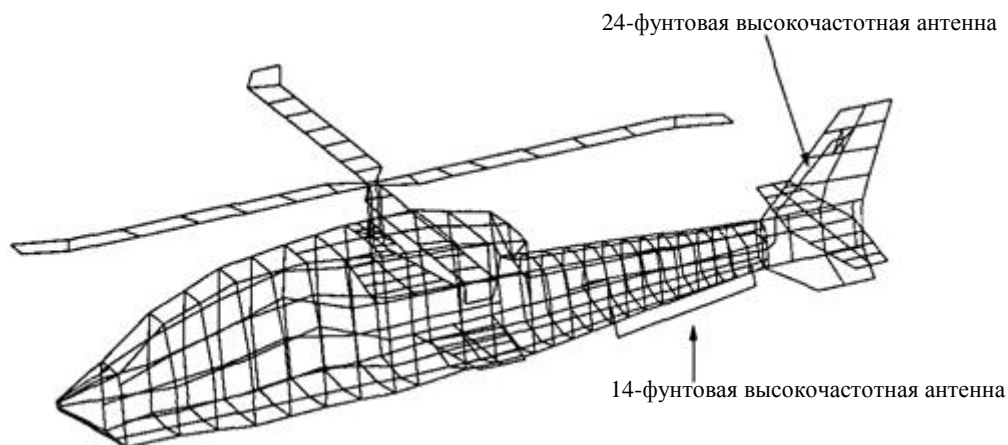


Рис. 14. Модель проводной сетки вертолета, используемая для исследования характеристик его антенн [101]

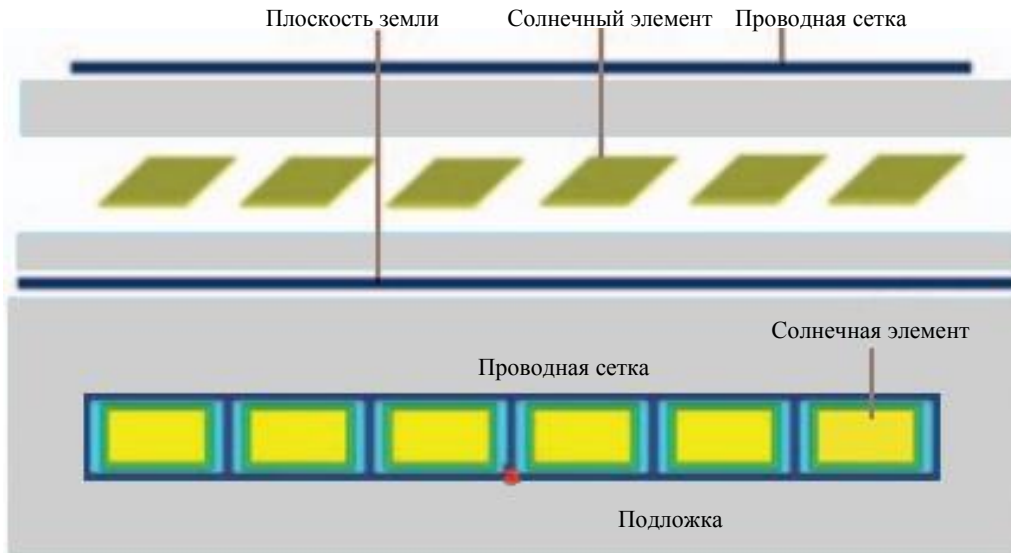


Рис. 15. Интеграция проводной сетки антенны и 6 солнечных элементов (вид сбоку и сверху) [105]

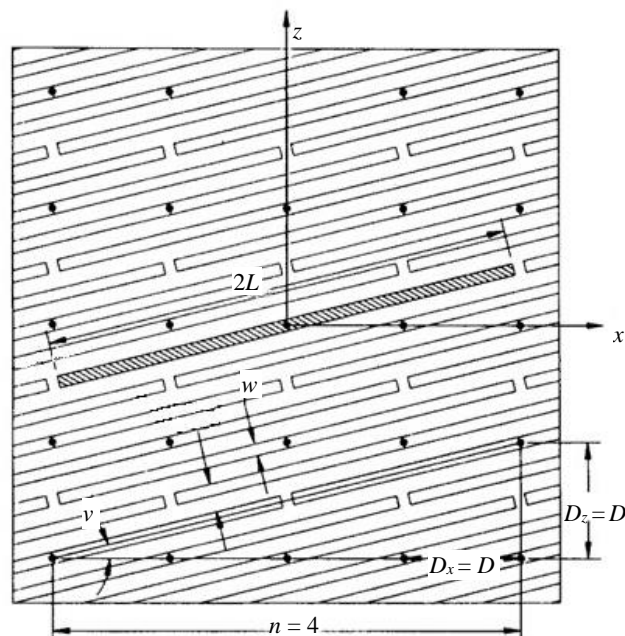


Рис. 16. Сверхплотная решетка диполей [113]

Помимо этого, проводно-сеточный подход нашел применение при моделировании транспортных машин с оконными антеннами скрытого монтажа (невывступающая антенна) [103], рефлекторных антенн космических аппаратов [104] и антенн с солнечными батареями для низкоорбитальных спутниковых приложений [105] (рис. 15). Этот подход экспериментально апробирован на проводно-сеточных моделях антенн судов различной сложности на высоких частотах [106, 107] и даже на моделях антенн самолетов на низких частотах [108].

Проводная сетка: антенные решетки

Исследователи активно изучали проводную сетку как универсальный инструмент моделирования и проектирования различных антенн, среди которых особое внимание уделялось решеткам из проводных сеток [109]. Так, проводная сетка может быть исполь-

зована при проектировании и моделировании микрополосковых решеток, что доказано как численно [110], так и экспериментально [111] даже в присутствии диэлектрика [112]. Также данный подход использовался для исследования дипольных решеток. Например, в [113] исследователи представили так называемую сверхплотную дипольную решетку, которая является разновидностью разреженной проводной сетки (рис. 16), а в работе [114] дипольные решетки использовали совместно с FSS для проектирования реконфигурируемых антенн.

Проводно-сеточные решетки также нашли применение в задачах синтеза, например, при формировании требуемой диаграммы направленности излучения адаптивной антенной решетки для сканирования атмосферы с помощью мелкоэлементных антенн в радарх вертикального зондирования [115]. Также

исследована и доказана возможность использования эквивалентной проводно-сеточной решетки вместо сплошного проводящего объекта [116]. В ходе исследования показано, что при достаточно большом числе проводов диаграммы рассеяния сплошного проводящего цилиндра и проводно-сеточной решетки совпадают. Аналогичные выводы сделаны для плоских, круглых, полукруглых и квадратных решеток.

Проводная сетка: метод моментов

В научных исследованиях по анализу проводных сеток, в основном, использовался МоМ [117]. Простота МоМ позволила исследователям разработать несколько подходов и решений для анализа проводных сеток, где МоМ гибридизирован с геометрической теорией дифракции [118–120], а также использовался итерационный метод для решения системы линейных алгебраических уравнений с ленточной матрицей [121]. Для ускорения заполнения матрицы в вейвлетных МоМ-кодах при решении интегрального уравнения электрического поля в работе [122] исследователи заменили треугольные базисные функции неортогонального кусочно-линейного вейвлета на синусоидальные диполи, для которых взаимные импедансы находятся по замкнутым аналитическим выражениям. Затем они использовали быстрое вейвлет-преобразование для эффективного преобразования результирующего матричного уравнения.

Все эти исследования сформировали основу для значительного количества приложений и исследований МоМ-проводных сеток. Например, проводно-сеточные структуры использованы в качестве двухпозиционного (бистатического) калибровочного эталона в исследованиях, связанных с двухпозиционными поляриметрическими радарными для радарных систем с синтезированной апертурой (SAR) [123]. В области обратного рассеяния также использован подход на основе проводно-сеточного МоМ для расчета радиолокационного сечения (RCS) идеально электропроводящих проводно-сеточных канонических моделей объектов в резонансной области с использованием импульсных базисных функций и метода согласования по точкам [124]. Методы оптимизации также широко использованы с этим подходом для решения различных задач, например, при проектировании микрополосковой патч-антенны [125] и логопериодических антенн с трапециевидными вибраторами [126]. Немало исследований посвящено развитию этого подхода в теории изображений [127], теории характеристических мод [128, 129], теории электромагнитных волн СВЧ-диапазона [130], моделировании диэлектрических тел [131, 132], использовании различных типов сеток [133] и даже исследованию его свойств не только в частотной, но и во временной области [134–137].

Проводная сетка: валидация результатов

Вопрос о валидации результатов использования проводно-сеточной модели структуры заложен еще в работах Конторовича [138–141] и Кастильо [142], в которых использовались проводно-сеточные коды. С

тех пор исследователи представили множество работ, посвященных валидации таких кодов. Например, результаты NEC-кода [143], основанного на МоМ, сравнивались с полученными с помощью других методов, таких как FDTD [144]. Кроме того, результаты других моделей проводных сеток также сравнивались с полученными с помощью других программ, таких как коды MESHES, FNDRAD и CHECK [145, 146], а также с другими методами, такими как метод согласования по точкам [147]. Сам NEC был использован для моделирования и решения электромагнитных задач [148] в различных приложениях и доказал свои возможности [149, 150]. Поэтому он по-прежнему используется для проектирования и изготовления антенн с проводной сеткой [151]. Некоторые исследователи также провели разработку собственных проводно-сеточных кодов, которые обладают аналогичными возможностями и применениями [152–155].

Проводная сетка является перспективным подходом, несмотря на ограничения, о которых упоминается в некоторых работах. Например, в одном из исследований проводилось сравнение результатов моделирования проводящей замкнутой поверхности, рассматривались результаты проводной сетки, а также прямого, формального и схемного подходов [156]. Показано, что результаты моделирования проводной сеткой отличаются от других. Однако исследователи подтвердили, что модель проводной сетки способна давать приемлемые данные, несмотря на отсутствие уникального способа количественной оценки разницы в собственных емкостях проводной сетки и соответствующей замкнутой структуры, так как это зависит от геометрии задачи и других факторов.

В работе [157] рассмотрена чувствительность результатов моделирования проводной сетки к диаметру провода, на примере канонической проблемы рассеяния (или излучения) от бесконечного кругового цилиндра. Исследование показало, что наилучшая точность достигается, когда провода удовлетворяют правилу «одинаковой площади поверхности».

В этой работе также обсуждено влияние других факторов, таких как расстояние между проводами. Результаты сравнения решения для проводной сетки с точными решениями истинной задачи показали, что пять ячеек на длину волны обычно дают точные результаты, хотя большее количество уменьшает чувствительность ошибки к размеру ячейки. Эти результаты подтверждены позже в [158] для той же проблемы. Исследователи подробно описали полученные факты. Так, правило одинаковой площади поверхности является оптимальным для дальнего поля, внутреннего поля и ближнего поля в непосредственной близости от проводной сетки. Наибольшие ошибки при использовании модели равномерного поверхностного тока Людвига возникают именно между проводами, а при облучении плоской волной наибольшие ошибки возникали где-то внутри цилиндра, следовательно, не следует связывать ошибки ближнего поля с нахождением слишком близко к

сетке. Исследователи подтвердили, что соответствие граничных значений между проводами не является хорошей проверкой на ошибки для равномерного тока и падения плоской волны по разным причинам. Так, для равномерного тока точность поля между проводами не гарантирует точного поля в другом месте, даже если цилиндр с проводной сеткой и истинный цилиндр имеют равные радиусы, а для падения плоской волны поле внутри цилиндра наиболее чувствительно к радиусу провода, поэтому это является лучшим индикатором ошибки. Более того, обнаружено, что при падении плоской волны радиус провода, который дает лучшее внутреннее поле, также дает лучшее внешнее поле, а поле внутри цилиндра наиболее чувствительно к радиусу провода, поэтому оно является лучшим индикатором ошибки.

Вопрос корректности правила «одинаковой площади поверхности», известного как «правило равной площади» (EAR), а в некоторых случаях как «удвоенная площадь», рассмотрен в [159]. Авторы численно и экспериментально показали, что при использовании сложных полигонов (например, треугольников) EAR оказывается менее точным в вычислении электромагнитного поля, рассеянного металлическими объектами, чем простая прямоугольная ячейка. Они также предоставили общую формулу для расчета параметров произвольной сетки и экспериментально доказали ее эффективность.

Позже в работе [160] авторы дали физическую интерпретацию EAR и предложили новое EAR для расчета радиусов произвольно аппроксимированной сеткой поверхности. Результаты исследования позволили предсказать меньшее электрическое поле внутри закрытой металлической поверхности, которое, как известно, равно нулю, в рассматриваемом диапазоне частот. Преимуществом нового EAR является то, что оно более точно воспроизводит геометрические детали, однако сложнее в применении, поскольку зависит от угла поляризации источника. Его применение может не соответствовать правилам руководства NEC по построению общей геометрии, поскольку радиус должен быть индивидуально рассчитан для групп сегментов как функция нескольких параметров, включая угол поляризации.

Как стандартное EAR, так и новое экспериментально проверены в [161] на примере распределения электрического поля внутри ТЕМ-камеры. Результаты показали приемлемую согласованность для моделей с прямоугольными ячейками сетки. Ошибки при использовании обоих методов возникали вблизи моделируемых поверхностей, что является следствием того, что проводная сетка является упрощенным представлением сплошного реального объекта. Все это подтверждает, что для получения более точных результатов необходимо использовать более плотную сетку при моделировании с помощью методов проводной сетки и EAR. Однако это может привести к увеличению вычислительных затрат.

Не так давно представлен новый подход к моделированию проводной сеткой, не чувствительный к выбору радиуса провода или к EAR [162]. В этом

исследовании сформирована теоретическая основа для разделения поверхности на тонкие полосы, которые затем могут быть заменены проводами, радиус которых рассчитывается по известным формулам для плоских диполей. Исследователи на примере куба, цилиндра и сферической замкнутой поверхности доказали, что проводная сетка, полученная этим методом, эквивалентна исходной проводящей поверхности (имеет одинаковый электромагнитный отклик). Авторы также заявили, что их эквивалентная схема моделирования благодаря своей общности может быть распространена на поверхности, которые не находятся в свободном пространстве, как в случае планарных антенн на диэлектрических подложках.

Исследователи в [163] решили обобщить рекомендации по проектированию проводно-сеточных моделей сложных поверхностей, таких как эллипсоид, сфера, полосы, кубы, пластины и самолеты. В своей работе они продемонстрировали, что проводные сетки таких объектов могут быть нерегулярными по длине сегментов, размеру ячеек и площади сетки, что делает использование «квадратных» ячеек невозможным во всех областях. Чтобы достичь «элегантных переходов» в таких регионах, исследователи предложили использовать треугольные ячейки. Эти рекомендации помогли определить ограничения проводной сетки: наличие длинных сегментов и больших ячеек, ошибки в точках пересечения, а также в расстояниях между элементами сетки, проблемы с пересекающимися проводами и т.д.

В работе [36] обобщены правила и рекомендации по моделированию с использованием кодов метода моментов NEC и ESP. На их основе разработан интерфейс компьютерной программы GEOM, предназначенной для уменьшения человеческих усилий и ошибок моделирования за счет использования этих правил и возможности дискретизации сложных структур. Также продемонстрировано, что две схемы сегментации в NEC – по длине и разрешению заземленных сеток – могут значительно изменить прогнозируемые характеристики, такие как входной импеданс антенн. Показано, что сегментация вблизи источника в NEC существенно влияет на численные результаты. Исследователи доказали, что из-за особенностей кода NEC более точная сегментация не всегда дает лучшие результаты. Когда длина сегментов становится очень маленькой, численные ошибки, наоборот, могут стать значительными. С другой стороны, они подтвердили, что код ESP может обойти некоторые проблемы NEC, однако он имеет свои ограничения, например, он не может работать с симметричными структурами и непланарными поверхностями.

Авторы [164] проанализировали связь между случайными ошибками позиционирования на сетке параллельных бесконечно длинных идеально проводящих тонких проводов с импедансом и характеристиками отражения и передачи сетки. Они обнаружили, что увеличение этих ошибок приводит к увеличению импеданса проводной сетки и передачи

через нее, а также уменьшает отражение от нее. Тем не менее, если провода не анализируются с помощью теории тонких проводов, возникает проблема распределения окружающего тока в близко расположенных электрически тонких проводах, которая может повлиять на определение эффективности антенны. Для решения этой проблемы в работе [165] предложена модификация формулировки кусочно-синусоидальной реакции для тонкопроводных структур. В этой работе показано, что с этой проблемой можно столкнуться даже тогда, когда расстояние между проводами превышает несколько диаметров провода. Однако если используется теория тонких проводов, то окружающим изменением плотности поверхностного тока пренебрегают в силу сути теории.

Среди всех ограничений, обсуждаемых в каждой работе о проводной сетке, общим всегда является решение электрически больших задач [166]. Исследователи всегда пытались разработать новые методы решения таких задач с тысячами [167, 168], несколькими тысячами [169] и миллионами [170] неизвестных. Однако МоМ делает подход проводной сетки более легким для адаптации с другими методами. В качестве примера можно упомянуть использование итерационных методов решения с ленточной матрицей, как в работе [171], где результаты сравнивались с гауссовым исключением. Другой подход заключается в использовании LU-разложения и разреженного итерационного метода, который обеспечивает более быстрое решение матричных уравнений МоМ, чем LU-разложение с прямой и обратной подстановкой [172], а также чем разложение Якоби и CGM [173].

Одним из других решений для улучшения производительности является распараллеливание. Например, в работе [174] предложено распараллеливание LU-разложения, в частности, класса локальной памяти множественных инструкций и множественных данных. Результаты, полученные в данной работе, сравнены и верифицированы с помощью распараллеленного CGM.

Другой пример – распараллеливание в NEC на основе двумерного блочно-циклического разложения матриц на прямоугольной сетке процессоров, обеспечивающее теоретически оптимальный баланс нагрузки между процессорами [175]. В данной работе результаты проверены экспериментально, а также путем сравнения с результатами других численных методов, таких как FDTD. Еще одна попытка распараллеливания NEC представлена в [176]. Исследователи значительно модифицировали программу NEC, чтобы оптимизировать ее работу на четырехпроцессорном компьютере Cray X-MP. В результате благодаря разумному использованию векторизации и альтернативных методов распараллеливания, они добились сокращения времени выполнения примерно в пять и более раз. Кроме того, они переписали программу MININEC на язык программирования Оссам, чтобы ее можно было выполнять непосредственно в системе транспьютера. Результатом очередной попытки стала разработка Super-NEC, которая пред-

ставляет собой объектно-ориентированную версию NEC, модифицированную для выполнения на сети процессоров с распределенной памятью [177]. В этой версии процедуры заполнения матрицы, решения и вычисления могли выполняться параллельно. Исследователи использовали LU-разложение матрицы и итерационную схему решения для тестирования реализации кода и проверили полученные результаты экспериментально. Кроме того, одним из наиболее перспективных подходов в ускорении моделирования проводной сетки на основе МоМ является использование графического процессора (GPU) с поддержкой CUDA. Благодаря использованию GPU исследователи добились значительного ускорения (примерно в 6 раз) общей МоМ-процедуры по сравнению с результатами CPU [178].

Заключение

Использование метода моментов (МоМ) в сочетании с проводными сетками позволило исследователям разрабатывать эффективные подходы к моделированию разнообразных антенн и электромагнитных структур. Результаты исследований подтверждают, что проводные сетки находят применение в различных задачах, включая анализ диаграмм направленности, рассеяния и излучения антенн, а также синтез и оптимизацию структур.

Однако наряду с преимуществами существуют и ограничения подходов проводных сеток. Вопросы валидации результатов, выбора оптимальных параметров сеток, а также эффективного управления вычислительными ресурсами остаются актуальными вызовами. Все более сложные структуры и требования к точности анализа повышают важность разработки новых методов решения и усовершенствования существующих.

Исследователи предложили несколько подходов для улучшения производительности и эффективности методов проводных сеток, таких как параллелизация вычислений и использование графических процессоров. Эти усовершенствования позволяют обращаться к более сложным задачам с большим количеством неизвестных и сокращают время расчетов.

В целом проводные сетки продолжают играть важную роль в анализе электромагнитных явлений, предоставляя ученым мощный инструмент для моделирования разнообразных структур и антенных систем. С развитием вычислительных технологий и методов этот подход продолжает развиваться и находит новые области применения, способствуя развитию современной радиотехники и электродинамики.

С учетом стремительного развития вычислительных технологий и продвижения в области электродинамики использование проводных сеток для моделирования и изготовления антенн остается актуальным и перспективным направлением исследований. В будущем ученые и инженеры могут сфокусироваться на следующих аспектах: с развитием методов численного моделирования и увеличением вычислительных мощностей исследователи могут стремиться к созданию более точных и детализиро-

ванных моделей проводных сеток, которые способны учитывать сложные геометрические детали и физические явления; будущие исследования могут включать в себя интеграцию методов проводных сеток с другими вычислительными и аналитическими методами для более полного и точного анализа электромагнитных структур. Это может включать в себя сочетание методов МоМ с методами конечных элементов, Монте-Карло и т.д.; будущие исследования могут стать более актуальными, когда методы проводных сеток будут развиваться в направлении моделирования нелинейных и динамических эффектов в антенных системах. Это может быть связано с анализом эффективности антенн при больших мощностях или при работе в сложной электромагнитной обстановке.

Сегодня, в условиях быстрого развития беспроводных коммуникаций, интернета вещей и разнообразных радиотехнических устройств, моделирование и оптимизация антенных систем остаются важными задачами. Использование проводных сеток в этой области предоставляет ученым и инженерам мощный инструмент для проектирования и анализа антенн на различных частотах, в разных условиях распространения сигнала и в разных геометрических конфигурациях.

Актуальные задачи могут включать в себя исследование эффективности антенн в условиях ограниченного пространства, разработку более компактных и высокоэффективных антенных систем, а также анализ воздействия различных факторов, таких как электромагнитные помехи и неоднородные среды, на работу антенн.

С учетом растущей потребности в беспроводных коммуникациях и передаче данных исследования с использованием проводных сеток для антенн будут продолжать оставаться актуальными и вносить вклад в развитие современных радиоэлектронных устройств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2022-0001 в ТУСУРе.

Литература

1. Yee K.S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 1966. – Vol. 14, No. 3. – P. 302–307. DOI: 10.1109/TAP.1966.1138693.
2. Taflove A. Application of the finite-difference time-domain method to sinusoidal steady state electromagnetic penetration problems // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 1980. – Vol. EMC-22, No. 3. – P. 191–202. DOI: 10.1109/TEMC.1980.303879.
3. Weiland T. A discretization model for the solution of Maxwell's equations for six-component fields // Electronics and communications AEUE. – 1977. – Vol. 31. – P. 116–120.
4. Van Rielen U. Numerical methods in computational electrodynamics. Linear systems in practical. – Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2001. – 375 p.
5. Courant R. Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations // Bulletin of american mathematical society. – 1943. – Vol. 49. – P. 1–23.

6. Desai C.S. Introduction to the finite element method: a numerical approach for engineering analysis / C.S. Desai, J.F. Abel. – New York: Van Nostrand Reinhold, 1972. – 477 p.
7. Gordon W.J. Construction of curvilinear co-ordinate systems and applications to mesh generation / W.J. Gordon, C.A. Hall // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 1973. – Vol. 7. – P. 461–477. DOI: 10.1002/nme.1620070405.
8. Simple and Accurate Analytical Model of Planar Grids and High-Impedance Surfaces Comprising Metal Strips or Patches / O. Luukkonen, C. Simovski, G. Granet, G. Goussetis, D. Lioubtchenko, A.V. Raisanen, S.A. Tretyakov // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2008. – Vol. 56, No. 6. – P. 1624–1632. DOI: 10.1109/TAP.2008.923327.
9. Harrington R.F. Matrix methods for field problems // Proceedings of the IEEE. – 1967. – Vol. 55, No. 2. – P. 136–149. DOI: 10.1109/PROC.1967.5433.
10. Davidson D.B. Computational electromagnetics for RF and microwave engineering. – Cambridge: University Press, 2011. – 505 p.
11. Gibson W.C. The method of moments in electromagnetics. – Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2008. – 272 p.
12. Makarov S.N. Antenna and EM modeling with MATLAB. – New York: John Wiley & Sons, 2002. – 288 p.
13. Newman E. A surface patch model for polygonal plate / E. Newman, P. Tulyathan // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1982. – Vol. 30, No. 4. – P. 588–593. DOI: 10.1109/TAP.1982.1142841.
14. Levin B.M. The theory of thin antennas and its use in antenna engineering. – Bentham Science Publishers, 2013. – 318 p.
15. Balanis C.A. Advanced engineering electromagnetics, 2nd ed. – New York: John Wiley & Sons, 2012. – 1040 p.
16. King R.W.P. Antennas in matter: Fundamentals, theory, and applications, 2nd ed. – London: Cambridge, 1981. – 824 p.
17. Werner D.H. Some computational aspects of Pocklington electric field integral equation for thin wires / D.H. Werner, P.L. Werne, J.K. Breakall // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1994. – Vol. 42, No. 4. – P. 561–563. DOI: 10.1109/8.286230.
18. Mostafizur Rahaman A.S.M. Selection of Antenna Elements of AAS Based on Simulation of RWG Edge Elements / A.S.M. Mostafizur Rahaman, Md. Imdadul Islam // Jahangirnagar University Journal of Science JUJS. – 2017. – Vol. 40, No. 2. – P. 15–30.
19. Leat C.J. Triangular-patch model of bowtie antennas: Validation against Brown and Woodward / C.J. Leat, N.V. Shuley, G.F. Stickley // IEEE Proceedings – Microwaves, Antennas and Propagation. – 1998. – Vol. 145, No. 6. – P. 465–470. DOI: 10.1049/ip-map:19981881.
20. Yla-Oijala P. Taskinen, M. Calculation of CFIE impedance matrix elements with RWG and $n \times$ RWG functions / P. Yla-Oijala, M. Taskinen // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2003. – Vol. 51, No. 8. – P. 1837–1846. DOI: 10.1109/TAP.2003.814745.
21. Garg R. Analytical and computational methods in electromagnetic. – Artech house, 2008.
22. Mosig J.R. Integral equation technique. Numerical Techniques for Microwave and Millimeter-Wave Passive Structures / J.R. Mosig, J. Itoh // IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter. – 1989. – Vol. 31, No. 5. – P. 31–32. DOI: 10.1109/MAP.1989.6102064.
23. Singh J. A nonrectangular patch model for scattering from surfaces / J. Singh, A. Adams // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1979. – Vol. 27, No. 4. – P. 531–535. DOI: 10.1109/TAP.1979.1142128.

24. Albertsen N. Computation of radiation from wire antennas on conducting bodies / N. Albertsen, J. Hansen, N. Jensen // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1974. – Vol. 22, No. 2. – P. 200–206. DOI: 10.1109/TAP.1974.1140783.
25. Newman E. Electromagnetic modeling of composite wire and surface geometries / E. Newman, D. Pozar // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1978. – Vol. 26, No. 6. – P. 784–789. DOI: 10.1109/TAP.1978.1141937.
26. Tulyathan P. Moment method solutions for radiation and scattering from arbitrarily shaped surfaces. – The Ohio State University, 1981.
27. Glisson J. On the development of numerical techniques for treating arbitrarily-shaped surfaces / J. Glisson, A. Wilburn. – The University of Mississippi, 1978.
28. NEC based antenna modeler and optimizer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.qsl.net/4nec2/> (дата обращения: 15.01.2023).
29. MMANA-CAL basic [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gal-ana.de/basicmm/en/> (дата обращения: 15.01.2023).
30. CONCEPT-II – Institut für Theoretische Elektrotechnik [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tet.tuhh.de/en/concept-2/> (дата обращения: 15.01.2023).
31. Kadlec D.L. General Electromagnetic Model for the Analysis of Complex Systems (GEMACS) Computer Code Documentation (Version 3) / D.L. Kadlec, E.L. Coffey // Final Technical Report. – 1983.
32. AN-SOF Overview Antenna Simulation Software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://antennasimulator.com/index.php/knowledge-base/an-sof-overview/> (дата обращения: 15.01.2023).
33. Richie J.E. EFIE-MFIE hybrid simulation using NEC: VSWR for the WISP experiment / J.E. Richie, H.R. Gangl // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 1995. – Vol. 37, No. 2. – P. 293–296. DOI: 10.1109/15.385897.
34. Newman E.H. A User's Manual for: Electromagnetic Surface Patch Code (ESP). – Ohio state university columbus electroscience lab, 1981.
35. Newman E. Considerations for efficient wire/surface modeling / E. Newman, D. Pozar // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1980. – Vol. 28, No. 1. – P. 121–125. DOI: 10.1109/TAP.1980.1142270.
36. Peng J. NEC and ESP codes: guidelines, limitations, and EMC applications / J. Peng, C.A. Balanis, G.C. Barber // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 1993. – Vol. 35, No. 2. – P. 124–133. DOI: 10.1109/15.229428.
37. Analoui M. On the surface-patch and wire-grid modeling for planar antenna mounted on metal housing / M. Analoui, Y. Kagawa // IEICE transactions on communications. – 1993. – Vol. 76. – P. 1450–1455.
38. Kashyap S. Wire grid and surface patch modelling for EMP interaction // International Symposium on Antennas and Propagation Society, Merging Technologies for the 90's. – 1990. – Vol. 4. – P. 1388–1391. DOI: 10.1109/APS.1990.115372.
39. Ida I. Surface-patch modelling of a Wheeler cap for radiation efficiency simulation of a small loop antenna with NEC2 / I. Ida, J. Takada, K. Ito // Electronics Letters. – 1994. – Vol. 30, No. 4. – P. 278–280. DOI: 10.1049/el:19940245.
40. Raschkowan L.R. Near and far field comparison using wire-grid and patch models. – Concordia University, 2003.
41. Larsen T. A Survey of the Theory of Wire Grids // IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1962. – Vol. 10, No. 3. – P. 191–201. DOI: 10.1109/TMTT.1962.1125490.
42. Wait J. Electromagnetic scattering from a wire grid parallel to a planar stratified medium // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1972. – Vol. 20, No. 5. – P. 672–675. DOI: 10.1109/TAP.1972.1140276.
43. Wait J.R. Electromagnetic scattering by two perpendicular wire grids over a conducting half-space / J.R. Wait, D.A. Hill // Radio Science. – 1976. – Vol. 11, No. 8–9. – P. 725–730. DOI: 10.1029/RS011i008p00725.
44. Wang Z. B. A quasi-optical method of measuring polarised wire grids at short millimetre wavelenghts / Z. Wang, B. Zhou // International Conference on Millimeter Wave and Far-Infrared Technology: ICMWFT '90. – 1989. – P. 542–544. DOI: 10.1109/ICMWFT.1989.763902.
45. Wait J.R. Reflection from a wire grid parallel to a conducting plane // Canadian Journal of Physics. – 1954. – Vol. 32, No. 9. – P. 571–579.
46. Wait J.R. The Impedance of a Wire Grid Parallel to a Dielectric Interface // IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1957. – Vol. 5, No. 2. – P. 99–102. DOI: 10.1109/TMTT.1957.1125106.
47. Young J.L. Note on the impedance of a wire grid parallel to homogeneous interface / J.L. Young, J.R. Wait // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1989. – Vol. 37, No. 7. – P. 1136–1138. DOI: 10.1109/22.24560.
48. Yatsenko V.V. Higher order impedance boundary conditions for sparse wire grids / V.V. Yatsenko, S.A. Tretyakov, S.I. Maslovski, A.A. Sochava // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2000. – Vol. 48, No. 5. – P. 720–727. DOI: 10.1109/8.855490.
49. Macfarlane G.G. Surface impedance of an infinite parallel-wire grid at oblique angles of incidence // Journal of the Institution of Electrical Engineers. – Part IIIA: Radiolocation. – 1946. – Vol. 93, No. 10. – P. 1523–1527. DOI: 10.1049/ji-3a-1.1946.0256.
50. Wait J.R. Effective impedance of a wire grid parallel to the earth's surface // IRE Transactions on Antennas and Propagation. – 1962. – Vol. 10, No. 5. – P. 538–542. DOI: 10.1109/TAP.1962.1137914.
51. Richmond J.H. Radiation and scattering by thin-wire structures in the complex frequency domain. – NASA Technical Reports Server (NTRS), 1974.
52. Wait J.R. On the radiation from a vertical dipole with an inductive wire-grid ground system / J.R. Wait, K. Spies // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1970. – Vol. 18, No. 4. – P. 558–560. DOI: 10.1109/TAP.1970.1139730.
53. Analysis of Waveform Parameters for Multi-segments of Wire Grids of Bounded Wave Simulator / K. Zheng, M. Yang, X. Tu, S. Qin, K. An // 2019 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC). – 2019. – P. 1–3. DOI: 10.1109/CSQRWC.2019.8799326.
54. Nagy A.W. An Experimental Study of Parasitic Wire Reflectors on 2.5 Meters // Proceedings of the Institute of Radio Engineers. – 1936. – Vol. 24, No. 2. – P. 233–254. DOI: 10.1109/JRPROC.1936.226415.
55. Saenz E. Design of a planar meta-surface based on dipoles and wires for antenna applications / E. Saenz, R. Gonzalo, I. Ederra. – Proceed. EuCAP, 2006.
56. Closely coupled metallodielectric electromagnetic band-gap structures formed by double-layer dipole and tripole arrays / A.P. Feresidis, G. Apostolopoulos, N. Serfas, J.C. Vardaxoglou // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2004. – Vol. 52, No. 5. – P. 1149–1158. DOI: 10.1109/TAP.2004.827530.

57. Belov P.A. Two-dimensional electromagnetic crystals formed by reactively loaded wires / P.A. Belov, C.R. Simovski, S.A. Tretyakov // *Physical Review E*. – 2002. – Vol. 66, No. 3. – P. 036610. DOI: 10.1103/PhysRevE.66.036610.
58. Belov P.A. Dispersion and Reflection Properties of Artificial Media Formed By Regular Lattices of Ideally Conducting Wires / P.A. Belov, S.A. Tretyakov, A.J. Viitanen // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. – 2002. – Vol. 16, No. 8. – P. 1153–1170. DOI: 10.1163/156939302X00688.
59. Moses C.A. Electromagnetic wave propagation in the wire medium: a complex medium with long thin inclusions / C.A. Moses, N. Engheta // *Wave Motion*. – 2001. – Vol. 34, No. 3. – P. 301–317. DOI: 10.1016/S0165-2125(01)00095-6.
60. Taub J.J. A New Technique for Multimode Power Measurement / J.J. Taub, J. Goldberg // *PGMTT National Symposium Digest*. – 1962. – P. 64–69. DOI: 10.1109/PGMTT.1962.1122388.
61. Schiffman B.M. Wire-Grid Waveguide Bolometers for Multimode Power Measurement / B.M. Schiffman, L. Young, R.B. Larrick // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 1965. – Vol. 13, No. 4. – P. 427–431. DOI: 10.1109/TMTT.1965.1126023.
62. Wait J.R. On the theory of scattering from a periodically loaded wire grid // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1977. – Vol. 25, No. 3. – P. 409–413. DOI: 10.1109/TAP.1977.1141598.
63. Modeling and Analysis of Composite Antenna Superstrates Consisting on Grids of Loaded Wires / P.M.T. Ikonen, E. Saenz, R. Gonzalo, S.A. Tretyakov // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2007. – Vol. 55, No. 10. – P. 2692–2700. DOI: 10.1109/TAP.2007.905926.
64. Malyuskin O. Modelling of impedance-loaded wire frequency-selective surfaces with tunable reflection and transmission characteristics / O. Malyuskin, V.F. Fusco, A. Schuchinsky // *International Journal of Numerical Modelling*. – 2008. – Vol. 21. – P. 439–453. DOI: 10.1002/jnm.681.
65. Sharp E. Electromagnetic theory of wire-grid lens HF antennas // *Antennas and Propagation Society International Symposium*. – 1964. – P. 7–12. DOI: 10.1109/APS.1964.1150167.
66. Tanner R. A wire-grid lens antenna of wide application part I: The wire-grid lens-Concept and experimental confirmation / R. Tanner, M. Andreasen // *IRE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1962. – Vol. 10, No. 4. – P. 408–415. DOI: 10.1109/TAP.1962.1137888.
67. Jones E. Measured angle-diversity performance of the wire-grid lens antenna // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1967. – Vol. 15, No. 3. – P. 484–486. DOI: 10.1109/TAP.1967.1138923.
68. Jones E. Measured performance of the wire-grid lens HF antenna (Luneburg lens) // *1966 Antennas and Propagation Society International Symposium*. – 1966. – P. 131–137. DOI: 10.1109/APS.1966.1150377.
69. Performance of the wire-grid lens HF antenna / E. Jones, R. Tanner, E. Sharp, M. Andreasen, F. Harris // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1967. – Vol. 15, No. 6. – P. 744–749. DOI: 10.1109/TAP.1967.1139041.
70. Andreasen M. A wire-grid lens antenna of wide application part II: Wave-propagating properties of a pair of wire grids with square, hexagonal or triangular mesh / M. Andreasen, R. Tanner // *IRE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1962. – Vol. 10, No. 4. – P. 416–429. DOI: 10.1109/TAP.1962.1137889.
71. Rahmat-Samii Y. Vector diffraction analysis of reflector antennas with mesh surfaces / Y. Rahmat-Samii, S.W. Lee // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1985. – Vol. 33, No. 1. – P. 76–90. DOI: 10.1109/TAP.1985.1143477.
72. Farr E.G. Analysis of the impulse radiating antenna // *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1992 Digest*. – 1992. – Vol. 3. – P. 1232–1235. DOI: 10.1109/APS.1992.221667.
73. Sarkar T. The application of the conjugate gradient method for the solution of electromagnetic scattering from arbitrarily oriented wire antennas / T. Sarkar, S. Rao // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1984. – Vol. 32, No. 4. – P. 398–403. DOI: 10.1109/TAP.1984.1143331.
74. Cwik T. Spectral domain solution of scattering from periodic surfaces using the FFT / T. Cwik, R. Mittra // *1984 Antennas and Propagation Society International Symposium*. – 1984. – P. 913–916. DOI: 10.1109/APS.1984.1149217.
75. Christodoulou C.G. On the electromagnetic scattering from infinite rectangular grids with finite conductivity / C.G. Christodoulou, J. Kauffman // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1986. – Vol. 34, No. 2. – P. 144–154. DOI: 10.1109/TAP.1986.1143803.
76. Christodoulou C.G. Electromagnetic scattering from skew-symmetric metallic grids // *Microwave and Optical Technology Letters*. – 1993. – Vol. 6, No. 13. – P. 777–782. DOI: 10.1002/mop.4650061316.
77. Sarkar T. Application of FFT and the conjugate gradient method for the solution of electromagnetic radiation from electrically large and small conducting bodies / T. Sarkar, E. Arvas, S. Rao // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1986. – Vol. 34, No. 5. – P. 635–640. DOI: 10.1109/TAP.1986.1143871.
78. Christodoulou C.G. Effects of the Schottky impedance of wire contact points on the reflection properties of a mesh / C.G. Christodoulou, S. Yin, J.F. Kauffman // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1988. – Vol. 36, No. 12. – P. 1714–1721. DOI: 10.1109/8.14393.
79. Andreasen M. Scattering from bodies of revolution // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1965. – Vol. 13, No. 2. – P. 303–310. DOI: 10.1109/TAP.1965.1138406.
80. Shaeffer J. EM scattering from bodies of revolution with attached wires // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1982. – Vol. 30, No. 3. – P. 426–431. DOI: 10.1109/TAP.1982.1142815.
81. Glisson A. Analysis of a wire antenna in the presence of a body of revolution / A. Glisson, C. Butler // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1980. – Vol. 28, No. 5. – P. 604–609. DOI: 10.1109/TAP.1980.1142389.
82. Nagy L. Analysis of Bodies of Revolution Antennas with Circular Ground Plane // *1991 21st European Microwave Conference*. – 1991. – P. 769–773. DOI: 10.1109/EUMA.1991.336395.
83. Kawakami H. Broad-band characteristics of rotationally symmetric antennas and thin wire constructs / H. Kawakami, G. Sato // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1987. – Vol. 35, No. 1. – P. 26–32. DOI: 10.1109/TAP.1987.1143967.
84. Li R. Numerical analysis of arbitrarily shaped probe-excited single-arm printed wire antennas / R. Li, H. Nakano // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1998. – Vol. 46, No. 9. – P. 1307–1317. DOI: 10.1109/8.719974.
85. Knepp D. Numerical analysis of electromagnetic radiation properties of smooth conducting bodies of arbitrary shape / D. Knepp, J. Goldhirsh // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1972. – Vol. 20, No. 3. – P. 383–388. DOI: 10.1109/TAP.1972.1140210.
86. Wang J.J.H. Numerical analysis of three-dimensional arbitrarily-shaped conducting scatterers by trilateral surface cell modelling // *Radio Science*. – 1978. – Vol. 13, No. 6. – P. 947–952. DOI: 10.1029/RS013i006p00947.
87. Waterman P.C. Matrix formulation of electromagnetic scattering // *Proceedings of the IEEE*. – 1965. – Vol. 53, No. 8. – P. 805–812. DOI: 10.1109/PROC.1965.4058.

88. Baghdasarian A. Scattering from conducting loops and solution of circular loop antennas by numerical methods / A. Baghdasarian, D.J. Angelakos // *Proceedings of the IEEE*. – 1965. – Vol. 53, No. 8. – P. 818–822. DOI: 10.1109/PROC.1965.4060.
89. Kamardin K. Stationary Phase Analysis of a Printed Circular Wire Loop Antenna with Dielectric Superstrate Cover Based on an Efficient Moment Method / K. Kamardin, S. Khamas // *2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*. – 2007. – P. 710–713. DOI: 10.1109/MAPE.2007.4393722.
90. Richmond J. A wire-grid model for scattering by conducting bodies // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1966. – Vol. 14, No. 6. – P. 782–786. DOI: 10.1109/TAP.1966.1138783.
91. Chen W. Numerical computation of human interaction with arbitrarily oriented superquadric loop antennas in personal communications / W. Chen, H. Chuang // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1998. – Vol. 46, No. 6. – P. 821–828. DOI: 10.1109/8.686768.
92. Richmond J.H. Digital computer solutions of the rigorous equations for scattering problems // *Proceedings of the IEEE*. – 1965. – Vol. 53, No. 8. – P. 796–804. DOI: 10.1109/PROC.1965.4057.
93. Lin J. Radar cross section of a rectangular conducting plate by wire mesh modeling / J. Lin, W. Curtis, M. Vincent // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1974. – Vol. 22, No. 5. – P. 718–720. DOI: 10.1109/TAP.1974.1140885.
94. Lin J. Radar cross section of a conducting plate by wire mesh modeling / J. Lin, W. Curtis, M. Vincent // *1973 Antennas and Propagation Society International Symposium*. – 1973. – P. 422–425. DOI: 10.1109/APS.1973.1147172.
95. Simpson T. The theory of top-loaded antennas: Integral equations for the currents // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1971. – Vol. 19, No. 2. – P. 186–190. DOI: 10.1109/TAP.1971.1139900.
96. Agrawal P.; Bailey, M. An analysis technique for microstrip antennas / P. Agrawal // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1977. – Vol. 25, No. 6. – P. 756–759. DOI: 10.1109/TAP.1977.1141706.
97. The wire grid microstrip antenna / R. Conti, J. Toth, T. Dowling, J. Weiss // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1981. – Vol. 29, No. 1. – P. 157–166. DOI: 10.1109/TAP.1981.1142541.
98. Hildebrand L.T. The analysis of microstrip wire-grid antenna arrays. – University of Pretoria, 2010.
99. Lee S. Simple formulas for transmission through periodic metal grids or plates / S. Lee, G. Zarrillo, C. Law // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1982. – Vol. 30, No. 5. – P. 904–909. DOI: 10.1109/TAP.1982.1142923.
100. Wang J. Application of wire-grid modelling to the design of low-profile aircraft antenna / J. Wang, C. Ryan // *1977 Antennas and Propagation Society International Symposium*. – 1977. – P. 222–225. DOI: 10.1109/APS.1977.1147721.
101. Polycarpou A.C. Rotor modulation of helicopter antenna characteristics / A.C. Polycarpou, C.A. Balanis // *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Transmitting Waves of Progress to the Next Millennium. 2000 Digest. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting*. – 2000. – Vol. 3. – P. 1322–1325. DOI: 10.1109/APS.2000.874448.
102. Study of HF antenna coupling modes on the EC-130 aircraft / Q.C. Luu, S.J. Kubina, C.W. Trueman, D. De Carlo // *1992 Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics*. – 1992. – P. 223–232. DOI: 10.1109/ANTEM.1992.7854268.
103. Austin B.A. Wire-grid modelling of vehicles with flush-mounted window antennas / B.A. Austin, R.K. Najm // *1991 Seventh International Conference on Antennas and Propagation, ICAP 91 (IEE)*. – 1991. – Vol. 2. – P. 950–953.
104. Imbriale W.A. On the reflectivity of complex mesh surfaces (spacecraft reflector antennas) / W.A. Imbriale, V. Galindo-Israel, Y. Rahmat-Samii // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1991. – Vol. 39, No. 9. – P. 1352–1365. DOI: 10.1109/8.99044.
105. Ghaderi P. Integration of one dimensional wire grid antennas with solar cells for LEO satellite application / P. Ghaderi, H. Aliakbarian, R. Sadeghzadeh // *2015 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC)*. – 2015. – P. 1–4. DOI: 10.1109/LAPC.2015.7366120.
106. Sarolic A. Measurement validation of ship wiregrid models of different complexity / A. Sarolic, B. Modlic, D. Poljak // *2001 IEEE EMC International Symposium. Symposium Record. International Symposium on Electromagnetic Compatibility (Cat. No.01CH37161)*. – 2001. – Vol. 1. – P. 147–150. DOI: 10.1109/ISEMC.2001.950573.
107. Electromagnetic modelling of a warship at high frequency / J. McLachlan, Y.M.M. Antar, S.J. Kubina, S. Kashyap // *1992 Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics*. – 1992. – P. 662–667. DOI: 10.1109/ANTEM.1992.7854217.
108. Lin Y. EM modeling of aircraft at low frequencies / Y. Lin, J. Richmond // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1975. – Vol. 23, No. 1. – P. 53–56. DOI: 10.1109/TAP.1975.1140994.
109. Palmer K.D. Synthesis of the microstrip wire grid array / K.D. Palmer, J.H. Cloete // *Tenth International Conference on Antennas and Propagation (Conf. Publ. No. 436)*. – 1997. – Vol. 1. – P. 114–118. DOI: 10.1049/cp:19970220.
110. McCormick S.A. Microstrip grid array fed against an EBG / S.A. McCormick, W.O. Coburn // *2016 IEEE/ACES International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS) and Applied Computational Electromagnetics (ACES)*. – 2016. – P. 1–2. DOI: 10.1109/ROPACES.2016.7465425.
111. Hildebrand L.T. Experimental verification of an integral equation analysis of etched wire-grid antenna arrays / L.T. Hildebrand, D.A. McNamara // *Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. – 1993. – Vol. 3. – P. 1494–1497. DOI: 10.1109/APS.1993.385478.
112. Gallagher J.G. Electromagnetic Scattering by an Infinite Array of Periodic Broken Wires Buried in a Dielectric Sheet / J.G. Gallagher, D.J. Brammer // *1983 13th European Microwave Conference*. – 1983. – P. 778–782. DOI: 10.1109/EUMA.1983.333193.
113. Schneider S.W. The scattering properties of «Super Dense» arrays of dipoles / S.W. Schneider, B.A. Munk // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1994. – Vol. 42, No. 4. – P. 463–472. DOI: 10.1109/8.286213.
114. Coupled dipole arrays as reconfigurable frequency selective surfaces / D. Lockyer, C. Moore, R. Seager, R. Simpkin, J.C. Vardaxoglou // *Electronics Letters*. – 1994. – Vol. 30, No. 16. – P. 1258–1259. DOI: 10.1049/el:19940906.
115. Synthesis of Directivity Pattern for Various Antenna Arrays Configurations of Vertical Atmospheric Sensing Radar Station / D.D. Dmitriev, V.N. Ratushnyak, A.B. Gladyshev, M.E. Buravleva, A.I. Chernovolenko // *2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. – 2021. – P. 1–5. DOI: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438940.
116. Richmond J.H. Scattering by an Arbitrary Array of Parallel Wires // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 1965. – Vol. 13, No. 4. – P. 408–412. DOI: 10.1109/TMTT.1965.1126020.

117. Harrington R.F. The method of moments in electromagnetics // *Journal of Electromagnetic waves and Applications*. – 1987. – Vol. 1. – P.181–200. DOI: 10.1163/156939387X00018.
118. Thiele G. A hybrid technique for combining moment methods with the geometrical theory of diffraction / G. Thiele, T. Newhouse // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1975. – Vol. 23, No. 1. – P. 62–69. DOI: 10.1109/TAP.1975.1141004.
119. Fan D. A new approach to diffraction analysis of conductor grids. I: Parallel-polarized incident plane waves // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1989. – Vol. 37, No. 1. – P. 84–88. DOI: 10.1109/8.192168.
120. Fan D. A new approach to diffraction analysis of conductor grids. II. Perpendicular-polarized incident plane waves // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1989. – Vol. 37, No. 1. – P. 89–93. DOI: 10.1109/8.192169.
121. Ferguson T.R. Efficient solution of large moments problems: wire grid modeling criteria and conversion to surface currents // *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*. – 2022. – Vol. 3, No. 1. – P. 55–81.
122. A fast wavelet-based moment method for solving thin-wire EFIE / A. Geranmayeh, R. Moini, S.H.H. Sadeghi, A. Deihimi // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2006. – Vol. 42, No. 4. – P. 575–578. DOI: 10.1109/TMAG.2006.872020.
123. Lewis G. Bistatic radar scattering experiments of parallel wire grids / G. Lewis, J. Fortuny-Guasch, A. Sieber // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. – 2002. – Vol. 1. – P. 444–446. DOI: 10.1109/IGARSS.2002.1025067.
124. Kolev N.Z. An application of the method of moments for computation of RCS of PEC wire-grid models of complicated objects // *MMET Conference Proceedings. 1998 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. MMET 98 (Cat. No.98EX114)*. – 1998. – Vol. 2. – P. 499–501. DOI: 10.1109/MMET.1998.709795.
125. A Wire-Grid Adaptive-Meshing Program for Microstrip-Patch Antenna Designs Using a Genetic Algorithm [EM Programmer's Notebook] / R.A. Abd-Alhameed, D. Zhou, C.H. See, P.S. Excell // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. – 2009. – Vol. 51, No. 1. – P. 147–151. DOI: 10.1109/MAP.2009.4939045.
126. Gurel L. Design and Simulation of Circular Arrays of Trapezoidal-Tooth Log-Periodic Antennas via Genetic Optimization // *Progress in Electromagnetics Research*. – 2008. – Vol. 85. – P. 243–260. DOI: 10.2528/PIER08081809.
127. Lindell I.V. Image Theory for Dipole Excitation of Fields above and below a Wire Grid with Square Cells / I.V. Lindell, V.P. Akimov, E. Alanen // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. – 1986. – Vol. 28, No. 2. – P. 107–110. DOI: 10.1109/TEMC.1986.4307257.
128. Harrington R. Theory of characteristic modes for conducting bodies / R. Harrington, J. Mautz // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1971. – Vol. 19, No. 5. – P. 622–628. DOI: 10.1109/TAP.1971.1139999.
129. Mayhan J.T. Characteristic modes and wire grid modeling // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1990. – Vol. 38, No. 4. – P. 457–469. DOI: 10.1109/8.52263.
130. Chung A.M. Tray-shape effect in a computational model of microwave heating / A.M. Chung, K.G. Balmain // *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*. – 1995. – Vol. 20, No. 4. – P. 173–178. DOI: 10.1109/CJECE.1995.7102073.
131. Tsunekawa K., Ando A. Advanced wire grid method for solving the scattered field of a lossy dielectric object // *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. – 1992. – Vol. 2. – P. 797–800.
132. Goňa S. Homogenization of composite consisting from dielectric slab and wire grid assuming negative and non-negative permittivity, a comparison / S. Goňa, J. Jilková // *15th Conference on Microwave Techniques COMITE 2010*. – 2010. – P. 209–212. DOI: 10.1109/COMITE.2010.5481269.
133. Yung E.K.N. Scattering of electromagnetic waves by a wire grid of hexagonal meshes / E.K.N. Yung, C.C. Cheng // *Digest on Antennas and Propagation Society International Symposium*. – 1989. – Vol. 2. – P. 730–733. DOI: 10.1109/APS.1989.134793.
134. Time-domain MoM for the analysis of thin-wire structures above half-space media using complex-time Green's functions and band-limited quadratic B-spline temporal basis functions / M. Ghaffari-Miab, Z.H. Firouzeh, R. Faraji-Dana, R. Moini, S.H.H. Sadeghi, G.A.E. Vandenbosch // *Engineering analysis with boundary elements*. – 2012. – Vol. 36. – P. 1116–1124. DOI: 10.1016/j.enganabound.2012.02.004.
135. Štumpf M. Time-Domain Analysis of Thin-Wire Structures Based on the Cagniard-DeHoop Method of Moments / M. Štumpf, I.E. Lager, G. Antonini // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2022. – Vol. 70, No. 6. – P. 4655–4662. DOI: 10.1109/TAP.2022.3140782.
136. Kedzia J.C. Frequency and Time Domain Analysis of Microstrip Antennas / J.C. Kedzia, B. Jecko // *1985 15th European Microwave Conference*. – 1985. – P. 1045–1051. DOI: 10.1109/EUMA.1985.333601.
137. Rao S. A Simple and Efficient Method of Moments Solution Procedure for Solving Time-Domain Integral Equation—Application to Wire-Grid Model of Perfect Conducting Objects // *IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques*. – 2019. – Vol. 4. – P. 57–63. DOI: 10.1109/JMMCT.2019.2900702.
138. The coefficient of reflection of a plane electromagnetic wave from a plane wire mesh / M.I. Kontorovich, V.P. Yu., N.A. Petrun'kin, M.I. Yesevkina // *Radio Engineering and Electronic Physics*. – 1962. – Vol. 7. – P. 222–231 (in Russ.).
139. Reflection factor of a plane electromagnetic wave reflecting from a plane wire grid / M.I. Kontorovich, V.Y. Petrun'kin, N.A. Yesevkina, M.I. Astrakhan // *Radio Engineering and Electronic Physics*. – 1962. – Vol. 7. – P. 222–231 (in Russ.).
140. Конторович М.И. Усредненные граничные условия на поверхности сетки с квадратными ячейками // *Радиотехника и электроника*. – 1963. – Т. 8. – С. 1506–1515.
141. Конторович М.И. Электродинамика сетчатых структур / М.И. Конторович, М.И. Астрахан, В.П. Акимов, Г.А. Ферсман. – М.: Радио и связь, 1987. – 134 с.
142. Castillo J.P. Calculation of currents induced on a disk by a wire grid code / J.P. Castillo, K.C. Chen, B.K. Singaraju // *Interaction Note*. – 1975. – Vol. 230. – P. 14.
143. Numerical Electromagnetic Code (NEC) / G.J. Burke, A.J. Poggio, J.C. Logan, J.W. Rockway // *1979 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. – 1979. – P. 1–3. DOI: 10.1109/ISEMC.1979.7568787.
144. Çakir G. Radar cross-section (RCS) analysis of high frequency surface wave radar targets / G. Çakir, L. Sevgi // *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. – 2010. – Vol. 18. – P. 457–468. DOI: 10.3906/elk-0912-7.
145. Trueman C.W. Wire-Grid Model Construction and Verification Using Programs MESHES, FNDRAD and CHECK // *Dept. of Electrical and Computer Engineering: Concordia University*. – 1990.
146. Trueman C.W. Verifying wire-grid model integrity with program 'Check' / C.W. Trueman, S.J. Kubina // *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*. – 1990. – Vol. 5, No. 2. – P. 17–42.
147. Yang X.H. A comparison study on wire-grid model and point matching technique with subdomain basis functions /

- X.H. Yang, L. Shafai, A. Sebak // 1992 Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics. – 1992. – P. 656–661. DOI: 10.1109/ANTEM.1992.7854316.
148. Elliniadis P. An investigation of near fields for ship-board antennas using the numerical electromagnetics code (NEC) / P. Elliniadis, J.K. Breakall // Digest on Antennas and Propagation Society International Symposium. – 1989. – Vol. 1. – P. 236–239. DOI: 10.1109/APS.1989.134659.
149. Burke G.J. Recent advances to NEC: Applications and validation // AGARD Lecture Series. – 1989. – P. 165.
150. McKaughan M.E. Coast Guard applications of NEC // IEEE Antennas and Propagation Society Symposium, 2004. – 2004. – Vol. 3. – P. 2879–2882. DOI: 10.1109/APS.2004.1331978.
151. Colgan M.A. Design and Fabrication of 3D Wire Grid Antenna An Integrated Method for Optimization in Constrained Volumes / M.A. Colgan, M.S. Mirotznik // 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting. – 2020. – P. 1553–1554. DOI: 10.1109/IEEECONF35879.2020.9329555.
152. Chao H.H. Computer programs for radiation and scattering by arbitrary configurations of bent wires / H.H. Chao, B.S. Strait // Syracuse univ. NY dept. of electrical engineering. – 1970. – P. 0101.
153. Richmond J.H. Computer program for thin-wire structures in a homogeneous conducting medium. – NASA Technical Reports Server (NTRS), 1974.
154. Coffey E. Wire grid modeling with interactive graphics / E. Coffey, D. Thomas // 1985 Antennas and Propagation Society International Symposium. – 1985. – P. 269–271. DOI: 10.1109/APS.1985.1149504.
155. Tam D.W.S. A computer-aided design technique for EMC analysis / D.W.S. Tam, C. Azu // Proceedings of International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – 1995. – P. 234–235. DOI: 10.1109/IEMC.1995.523553.
156. Lee K.S.H. Limitations of Wire-Grid Modeling of a Closed Surface / K.S.H. Lee, L. Marin, J.P. Castillo // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 1976. – Vol. EMC-18, No. 3. – P. 123–129. DOI: 10.1109/TEMC.1976.303482.
157. Ludwig A. Wire grid modeling of surfaces // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1987. – Vol. 35, No. 9. – P. 1045–1048. DOI: 10.1109/TAP.1987.1144220.
158. Paknys R.J. The near field of a wire grid model // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1991. – Vol. 39, No. 7. – P. 994–999. DOI: 10.1109/8.86920.
159. Rubinstein A. On wire-grid representation of solid metallic surfaces / A. Rubinstein, F. Rachidi, M. Rubinstein // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2005. – Vol. 47, No. 1. – P. 192–195. DOI: 10.1109/TEMC.2004.838230.
160. Rubinstein A. A physical interpretation of the equal area rule / A. Rubinstein, M. Rubinstein, F. Rachidi // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2006. – Vol. 48, No. 2. – P. 258–263. DOI: 10.1109/TEMC.2006.873861.
161. On the use of the equal area rule for the wire-grid representation of metallic surfaces / A. Rubinstein, C. Rostamzadeh, M. Rubinstein, F. Rachidi // 2006 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. – 2006. – P. 212–215. DOI: 10.1109/EMCZUR.2006.214907.
162. Golden T. Equivalent Wire-Grids for the Electromagnetic Modeling of Conducting Surfaces. – 2022.
163. Trueman C.W. Fields of complex surfaces using wire grid modelling / C.W. Trueman, S.J. Kubina // IEEE Transactions on Magnetics. – 1991. – Vol. 27, No. 5. – P. 4262–4267. DOI: 10.1109/20.105043.
164. Awan Z.A. Effects of Random Positioning Errors Upon Electromagnetic Characteristics of a Wire Grid / Z.A. Awan, A.A. Rizvi // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2011. – Vol. 25, No. 2. – P. 351–364. DOI: 10.1163/156939311794362768.
165. Tulyathan P. The circumferential variation of the axial component of current in closely spaced thin-wire antennas / P. Tulyathan, E. Newman // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1979. – Vol. 27, No. 1. – P. 46–50. DOI: 10.1109/TAP.1979.1142035.
166. Sarkar T. Survey of numerical methods for solution of large systems of linear equations for electromagnetic field problems / T. Sarkar, K. Siarkiewicz, R. Stratton // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1981. – Vol. 29, No. 6. – P. 847–856. DOI: 10.1109/TAP.1981.1142695.
167. Ferguson T.R. Solution of Large Wire Grid Moments Problems / T.R. Ferguson, R.J. Balestri // IEEE 1976 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – 1976. – P. 1–5. DOI: 10.1109/IEMC.1976.7568690.
168. Yung E.K.N. Scattering of EM waves by a wire grid of linear and non-linear wire segments / E.K.N. Yung, C.L. Law // Antennas and Propagation Society Symposium 1991 Digest. – 1991. – Vol. 2. – P. 806–809. DOI: 10.1109/APS.1991.174967.
169. Burton M. Using software to push back the limits of the moment method / M. Burton, S. Kashyap // Antennas and Propagation Society Symposium 1991 Digest. – 1991. – Vol. 3. – P. 1504–1507. DOI: 10.1109/APS.1991.175137.
170. Shaeffer J. Million plus unknown MOM LU factorization on a PC // 2015 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). – 2015. – P. 62–65. DOI: 10.1109/ICEAA.2015.7297075.
171. Ferguson T. Efficient solution of large moments problems: Theory and small problem results / T. Ferguson, T. Lehman, R. Balestri // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1976. – Vol. 24, No. 2. – P. 230–235. DOI: 10.1109/TAP.1976.1141314.
172. Fourie A.P.C. A fast sparse iterative method (SIM) for method of moments / A.P.C. Fourie, D.C. Nitch // Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium and URSI National Radio Science Meeting. – 1994. – Vol. 2. – P. 1146–1149. DOI: 10.1109/APS.1994.407888.
173. Fourie A.P.C. Comparing the sparse iterative method (SIM) with the banded Jacobi and conjugate gradient techniques / A.P.C. Fourie, D.C. Nitch // Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium and URSI National Radio Science Meeting. – 1994. – Vol. 2. – P. 1181–1184. DOI: 10.1109/APS.1994.407879.
174. Davidson D.B. Parallel algorithms for electromagnetic moment method formulations. – Diss. Stellenbosch: Stellenbosch University, 1991.
175. Parallel implementation of NEC for the analysis of large structures / A. Rubinstein, F. Rachidi, M. Rubinstein, B. Reusser // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2003. – Vol. 45, No. 2. – P. 177–188. DOI: 10.1109/TEMC.2003.810806.
176. Re-working of two standard moment-method codes for execution on parallel processors / P.S. Excell, G.J. Porter, Y.K. Tang, K.W. Yip // International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields. – 1995. – Vol. 8. – P. 243–248. DOI: 10.1002/jnm.1660080309.
177. Reeve J. Running SuperNEC on the 22 processor ibm-sp2 at southampton university / The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES). – 2022. – Vol. 13. – P. 99–106.
178. Topa T. Using GPU With CUDA to Accelerate MoM-Based Electromagnetic Simulation of Wire-Grid Models / T. Topa, A. Karwowski, A. Noga // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2011. – Vol. 10. – P. 342–345. DOI: 10.1109/LAWP.2011.2144557.

Алхадж Хасан Аднан Фаезович

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ)
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-7403-7023
Тел.: +7-996-957-97-63
Эл. почта: alhaj.hasan.adnan@tu.tusur.ru

Нгуен Мань Туан

Аспирант каф. ТУ ТУСУРА
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-5050-3752
Тел.: +7-931-605-67-89
Эл. почта: nguyent.t.2213-2022@e.tusur.ru

Газизов Тальгат Рашитович

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. ТУ ТУСУРА
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-1192-4853
Тел.: +7-913-826-07-24
Эл. почта: talgat@tu.tusur.ru

Alhaj Hasan A.F., Nguyen M.T., Gazizov T.R.

Antenna modeling using the method of moments: surface approximation by wires

This paper is devoted to antenna modeling using one of the most common approaches based on the method of moments (MoM): wire grid. An overview of this approach is given, including its history, limitations and applications. Its use in modeling and manufacturing of lens antennas and antenna arrays is discussed. Works devoted to its use not only with MoM but also with other numerical methods are reviewed. A number of works on the validation of modeling results using this approach are also presented. The conclusion reflects the relevance of the study of the approach and possible directions of its development.

Keywords: method of moments, numerical methods, antennas, wire grid, computer modeling.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-2-51-71

References

1. Yee K.S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1966, vol. 14, no. 3, pp. 302–307. DOI: 10.1109/TAP.1966.1138693.
2. Taflov A. Application of the finite-difference time-domain method to sinusoidal steady state electromagnetic penetration problems. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1980, vol. EMC-22, no. 3, pp. 191–202. DOI: 10.1109/TEMC.1980.303879.
3. Weiland T. A discretization model for the solution of Maxwell's equations for sixcomponent fields. *Electronics and Communications AEUE*, 1977, vol. 31, pp. 116–120.
4. Van Rienen U. *Numerical methods in computational electrodynamics. Linear systems in practical*. Heidelberg, Springer Science & Business Media, 2001, 375 p.
5. Courant R. Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations. *Bulletin of American Mathematical Society*, 1943, vol. 49, no. 1, pp. 1–23.
6. Desai C.S., Abel J.F. *Introduction to the finite element method: a numerical approach for engineering analysis*. Van Nostrand Reinhold: New York, 1972, 477 p.
7. Gordon W.J., Hall C.A. Construction of curvilinear co-ordinate systems and applications to mesh generation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1973, vol. 7, pp. 461–477.
8. Luukkonen O., Simovski C., Granet G., Goussetis G., Lioubtchenko D., Raisanen A.V., Tretyakov S.A. Simple and Accurate Analytical Model of Planar Grids and High-Impedance Surfaces Comprising Metal Strips or Patches. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, vol. 56, no. 6, pp. 1624–1632. DOI: 10.1109/TAP.2008.923327.
9. Harrington R.F. Matrix methods for field problems. *Proceedings of the IEEE*, 1967, vol. 55, no. 2, pp. 136–149. DOI: 10.1109/PROC.1967.5433.
10. Davidson D.B. *Computational Electromagnetics for RF and Microwave Engineering*. Cambridge: University Press, 2011, 505 p.
11. Gibson W.C. *The Method of Moments in Electromagnetics*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2008, 272 p.
12. Makarov S.N. *Antenna and EM Modeling with MATLAB*. John Wiley & Sons: New York NY, USA, 2002, 288 p.
13. Newman E., Tulyathan P. A surface patch model for polygonal plate. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1982, vol. 30, no. 4, pp. 588–593. DOI: 10.1109/TAP.1982.1142841.
14. Newman E., Tulyathan P. A surface patch model for polygonal plate. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1982, vol. 30, no. 4, pp. 588–593. DOI: 10.1109/TAP.1982.1142841.
15. Balanis C.A. *Advanced Engineering Electromagnetics, 2nd ed.* John Wiley & Sons: New York NY, USA, 2012, 1040 p.
16. King R.W.P. *Antennas in Matter: Fundamentals, Theory, and Applications, 2nd ed.* Cambridge: London, 1981, 824 p.
17. Werner D.H., Werne P.L., Breakall J.K. Some computational aspects of Pocklington electric field integral equation for thin wires. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1994, vol. 42, no. 4, pp. 561–563. DOI: 10.1109/8.286230.
18. Vipiana F., Vecchi G., Wilton D.R. A Multi-Resolution Moment Method for Wire-Surface Objects. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, vol. 58, no. 5, pp. 1807–1813. DOI: 10.1109/TAP.2010.2044322.
19. Leat C.J., Shuley N.V., Stickley G.F. Triangular-patch model of bowtie antennas: Validation against Brown and Woodward. *IEEE Proceedings – Microwaves, Antennas and Propagation*, 1998, vol. 145, no. 6, pp. 465–470. DOI: 10.1049/ip-map:19981881.
20. Yla-Oijala P., Taskinen M. Calculation of CFIE impedance matrix elements with RWG and n×RWG functions. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, vol. 51, no. 8, pp. 1837–1846. DOI: 10.1109/TAP.2003.814745.
21. Garg R. *Analytical and Computational Methods in Electromagnetic*. Artech house, 2008.
22. Mosig J.R., Itoh J. Integral equation technique. Numerical Techniques for Microwave and Millimeter-Wave Passive Structures. *IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter*, 1989, vol. 31, no. 5, pp. 31–32. DOI: 10.1109/MAP.1989.6102064.
23. Singh J., Adams A. A nonrectangular patch model for scattering from surfaces. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1979, vol. 27, no. 4, pp. 531–535. DOI: 10.1109/TAP.1979.1142128.
24. Albersen N., Hansen J., Jensen N. Computation of radiation from wire antennas on conducting bodies. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1974, vol. 22, no. 2, pp. 200–206. DOI: 10.1109/TAP.1974.1140783.
25. Newman E., Pozar D. Electromagnetic modeling of composite wire and surface geometries. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1978, vol. 26, no. 6, pp. 784–789. DOI: 10.1109/TAP.1978.1141937.
26. Tulyathan P. *Moment method solutions for radiation and scattering from arbitrarily shaped surfaces*. The Ohio State University, 1981.

27. Glisson Jr., Wilburn A. *On the development of numerical techniques for treating arbitrarily-shaped surfaces*. The University of Mississippi, 1978.
28. NEC based antenna modeler and optimizer. Available at: <https://www.qsl.net/4nec2/> (Accessed: January 15, 2023)
29. MMANA-CAL basic. Available at: <http://galana.de/basicmm/en/> (Accessed: January 15, 2023)
30. CONCEPT-II – Institut für Theoretische Elektrotechnik. Available at: <https://www.tet.tuhh.de/en/concept-2/> (Accessed: January 15, 2023)
31. Kadlec D.L., Coffey E.L. General Electromagnetic Model for the Analysis of Complex Systems (GEMACS) Computer Code Documentation (Version 3). *Final Technical Report*, 1983.
32. AN-SOF Overview Antenna Simulation Software. Available at: <https://antennasimulator.com/index.php/knowledge-base/an-sof-overview/> (Accessed: January 15, 2023)
33. Richie J.E., Gangl H.R. EFIE-MFIE hybrid simulation using NEC:VSWR for the WISP experiment. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1995, vol. 37, no. 2, pp. 293–296. DOI: 10.1109/15.385897.
34. Newman, E.H. *A User's Manual for: Electromagnetic Surface Patch Code (ESP)*. Ohio State University Columbus Electroscience Lab, 1981.
35. Newman E., Pozar D. Considerations for efficient wire/surface modeling. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1980, vol. 28, no. 1, pp. 121–125. DOI: 10.1109/TAP.1980.1142270.
36. Peng J., Balanis C.A., Barber G.C. NEC and ESP codes: guidelines, limitations, and EMC applications. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1993, vol. 35, no. 2, pp. 124–133. DOI: 10.1109/15.229428.
37. Analoui M., Kagawa Y. On the surface-patch and wire-grid modeling for planar antenna mounted on metal housing. *IEICE Transactions on Communications*, 1993, vol. E76-B, no. 11, pp. 1450–1455.
38. Kashyap S. Wire grid and surface patch modelling for EMP interaction. *International Symposium on Antennas and Propagation Society, Merging Technologies for the 90's*, 1990, vol. 4, pp. 1388–1391. DOI: 10.1109/APS.1990.115372.
39. Ida I., Takada J., Ito K. Surface-patch modelling of a Wheeler cap for radiation efficiency simulation of a small loop antenna with NEC2. *Electronics Letters*, 1994, vol. 30, no. 4, pp. 278–280. DOI: 10.1049/el:19940245.
40. Raschkowan L.R. *Near and far field comparison using wire-grid and patch models*. Concordia University, 2003.
41. Larsen T.A Survey of the Theory of Wire Grids. *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1962, vol. 10, no. 3, pp. 191–201. DOI: 10.1109/TMTT.1962.1125490.
42. Wait J. Electromagnetic scattering from a wire grid parallel to a planar stratified medium. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1972, vol. 20, no. 5, pp. 672–675. DOI: 10.1109/TAP.1972.1140276.
43. Wait J.R., Hill D.A. Electromagnetic scattering by two perpendicular wire grids over a conducting half-space. *Radio Science*, 1976, vol. 11, no. 8–9, pp. 725–730. DOI: 10.1029/RS011i008p00725.
44. Wang Z., Zhou B. A quasi-optical method of measuring polarized wire grids at short millimeter wavelengths. [*Conference Digest*] *International Conference on Millimeter Wave and Far-Infrared Technology: ICMWFT '90*, 1989, pp. 542–544. DOI: 10.1109/ICMWF.1989.763902.
45. Wait J.R. Reflection from a wire grid parallel to a conducting plane. *Canadian Journal of Physics*, 1954, vol. 32, no. 9, pp. 571–579.
46. Wait J.R. The Impedance of a Wire Grid Parallel to a Dielectric Interface. *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1957, vol. 5, no. 2, pp. 99–102. DOI: 10.1109/TMTT.1957.1125106.
47. Young J.L., Wait J.R. Note on the impedance of a wire grid parallel to homogeneous interface. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1989, vol. 37, no. 7, pp. 1136–1138. DOI: 10.1109/22.24560.
48. Yatsenko V.V., Tretyakov S.A., Maslovski S.I., Sochava A.A. Higher order impedance boundary conditions for sparse wire grids. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2000, vol. 48, no. 5, pp. 720–727. DOI: 10.1109/8.855490.
49. Macfarlane G.G. Surface impedance of an infinite parallel-wire grid at oblique angles of incidence. *Journal of the Institution of Electrical Engineers. Part IIIA: Radiolocation*, 1946, vol. 93, no. 10, pp. 1523–1527. DOI: 10.1049/ji-3a-1.1946.0256.
50. Wait J.R. Effective impedance of a wire grid parallel to the earth's surface. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, 1962, vol. 10, no. 5, pp. 538–542. DOI: 10.1109/TAP.1962.1137914.
51. Richmond J.H. *Radiation and scattering by thin-wire structures in the complex frequency domain*. NASA Technical Reports Server (NTRS), 1974.
52. Wait J.R., Spies K. On the radiation from a vertical dipole with an inductive wire-grid ground system. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1970, vol. 18, no. 4, pp. 558–560. DOI: 10.1109/TAP.1970.1139730.
53. Zheng K., Yang M., Tu X., Qin S., An K. Analysis of Waveform Parameters for Multi-segments of Wire Grids of Bounded Wave Simulator. *2019 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC)*, 2019, pp. 1–3. DOI: 10.1109/CSQRWC.2019.8799326.
54. Nagy A.W. An Experimental Study of Parasitic Wire Reflectors on 2.5 Meters. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 1936, vol. 24, no. 2, pp. 233–254. DOI: 10.1109/JRPROC.1936.226415.
55. Saenz E., Gonzalo R., Ederra I. Design of a planar meta-surface based on dipoles and wires for antenna applications. *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, 2006.
56. Feresidis A.P., Apostolopoulos G., Serfas N., Vardaxoglou J.C. Closely coupled metallodielectric electromagnetic band-gap structures formed by double-layer dipole and tripole arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2004, vol. 52, no. 5, pp. 1149–1158. DOI: 10.1109/TAP.2004.827530.
57. Belov P.A., Simovski C.R., Tretyakov S.A. Two-dimensional electromagnetic crystals formed by reactively loaded wires. *Physical Review E*, 2002.
58. Belov P.A., Tretyako S.A., Viitanen A.J. Dispersion and Reflection Properties of Artificial Media Formed By Regular Lattices of Ideally Conducting Wires. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2002, vol. 16, no. 8, pp. 1153–1170. DOI: 10.1163/156939302X00688.
59. Moses C.A., Engheta N. Electromagnetic wave propagation in the wire medium: a complex medium with long thin inclusions. *Wave Motion*, 2001, vol. 34, no. 3, pp. 301–317. DOI: 10.1016/S0165-2125(01)00095-6.
60. Taub J.J., Goldberg J. A New Technique for Multimode Power Measurement. PGMNT National Symposium Digest, 1962, pp. 64–69. DOI: 10.1109/PGMTT.1962.1122388.
61. Schiffman B.M., Young L., Larrick R.B. Wire-Grid Waveguide Bolometers for Multimode Power Measurement. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1965, vol. 13, no. 4, pp. 427–431. DOI: 10.1109/TMTT.1965.1126023.

62. Wait J.R. On the theory of scattering from a periodically loaded wire grid. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1977, vol. 25, no. 3, pp. 409–413. DOI: 10.1109/TAP.1977.1141598.
63. Ikonen P.M.T., Saenz E., Gonzalo R., Tretyakov S.A. Modeling and Analysis of Composite Antenna Superstrates Consisting on Grids of Loaded Wires. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, vol. 55, no. 10, pp. 2692–2700. DOI: 10.1109/TAP.2007.905926.
64. Malyuskin O., Fusco V.F., Schuchinsky A. Modeling of impedance-loaded wire frequency-selective surfaces with tunable reflection and transmission characteristics. *International Journal of Numerical Modelling*, 2008, vol. 21, pp. 439–453. DOI: 10.1002/jnm.681.
65. Sharp E. Electromagnetic theory of wire-grid lens HF antennas. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1964, pp. 7–12. DOI: 10.1109/APS.1964.1150167.
66. Tanner R., Andreasen M. A wire-grid lens antenna of wide application part I: The wire-grid lens-Concept and experimental confirmation. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, 1962, vol. 10, no. 4, pp. 408–415. DOI: 10.1109/TAP.1962.1137888.
67. Jones E. Measured angle-diversity performance of the wire-grid lens antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1967, vol. 15, no. 3, pp. 484–486. DOI: 10.1109/TAP.1967.1138923.
68. Jones E. Measured performance of the wire-grid lens HF antenna (Luneburg lens). *1966 Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1966, pp. 131–137. DOI: 10.1109/APS.1966.1150377.
69. Jones E., Tanner R., Sharp E., Andreasen M., Harris F. Performance of the wire-grid lens HF antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1967, vol. 15, no. 6, pp. 744–749. DOI: 10.1109/TAP.1967.1139041.
70. Andreasen M., Tanner R. A wire-grid lens antenna of wide application part II: Wave-propagating properties of a pair of wire grids with square, hexagonal or triangular mesh. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, 1962, vol. 10, no. 4, pp. 416–429. DOI: 10.1109/TAP.1962.1137889.
71. Rahmat-Samii Y., Lee S. Vector diffraction analysis of reflector antennas with mesh surfaces. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1985, vol. 33, no. 1, pp. 76–90. DOI: 10.1109/TAP.1985.1143477.
72. Farr E.G. Analysis of the impulse radiating antenna. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1992 Digest*, 1992, vol. 3, pp. 1232–1235. DOI: 10.1109/APS.1992.221667.
73. Sarkar T., Rao S. The application of the conjugate gradient method for the solution of electromagnetic scattering from arbitrarily oriented wire antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1984, vol. 32, no. 4, pp. 398–403. DOI: 10.1109/TAP.1984.1143331.
74. Cwik T., Mittra R. Spectral domain solution of scattering from periodic surfaces using the FFT. *1984 Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1984, pp. 913–916. DOI: 10.1109/APS.1984.1149217.
75. Christodoulou C.G., Kauffman J. On the electromagnetic scattering from infinite rectangular grids with finite conductivity. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, vol. 34, no. 2, pp. 144–154. DOI: 10.1109/TAP.1986.1143803.
76. Christodoulou C.G. Electromagnetic scattering from skew-symmetric metallic grids. *Microwave and Optical Technology Letters*, 1993, vol. 6, no. 13, pp. 777–782. DOI: 10.1002/mop.4650061316.
77. Sarkar T., Arvas E., Rao S. Application of FFT and the conjugate gradient method for the solution of electromagnetic radiation from electrically large and small conducting bodies. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, vol. 34, no. 5, pp. 635–640. DOI: 10.1109/TAP.1986.1143871.
78. Christodoulou C.G., Yin S., Kauffman J.F. Effects of the Schottky impedance of wire contact points on the reflection properties of a mesh. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1988, vol. 36, no. 12, pp. 1714–1721. DOI: 10.1109/8.14393.
79. Andreasen M. Scattering from bodies of revolution. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1965, vol. 13, no. 2, pp. 303–310. DOI: 10.1109/TAP.1965.1138406.
80. Shaeffer J. EM scattering from bodies of revolution with attached wires. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1982, vol. 30, no. 3, pp. 426–431. DOI: 10.1109/TAP.1982.1142815.
81. Glisson A., Butler C. Analysis of a wire antenna in the presence of a body of revolution. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1980, vol. 28, no. 5, pp. 604–609. DOI: 10.1109/TAP.1980.1142389.
82. Nagy L. Analysis of Bodies of Revolution Antennas with Circular Ground Plane. *1991 21st European Microwave Conference*, 1991, pp. 769–773. DOI: 10.1109/EUMA.1991.336395.
83. Kawakami H., Sato G. Broad-band characteristics of rotationally symmetric antennas and thin wire constructs. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1987, vol. 35, no. 1, pp. 26–32. DOI: 10.1109/TAP.1987.1143967.
84. Li R., Nakano H. Numerical analysis of arbitrarily shaped probe-excited single-arm printed wire antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1998, vol. 46, no. 9, pp. 1307–1317. DOI: 10.1109/8.719974.
85. Knepp D., Goldhirsh J. Numerical analysis of electromagnetic radiation properties of smooth conducting bodies of arbitrary shape. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1972, vol. 20, no. 3, pp. 383–388. DOI: 10.1109/TAP.1972.1140210.
86. Wang J.J.H. Numerical analysis of three-dimensional arbitrarily-shaped conducting scatterers by trilateral surface cell modelling. *Radio Science*, 1978, vol. 13, no. 6, pp. 947–952. DOI: 10.1029/RS013i006p00947.
87. Waterman P.C. Matrix formulation of electromagnetic scattering. *Proceedings of the IEEE*, 1965, vol. 53, no. 8, pp. 805–812. DOI: 10.1109/PROC.1965.4058.
88. Baghdasarian A., Angelakos D.J. Scattering from conducting loops and solution of circular loop antennas by numerical methods. *Proceedings of the IEEE*, 1965, vol. 53, no. 8, pp. 818–822. DOI: 10.1109/PROC.1965.4060.
89. Kamardin K., Khamas S. Stationary Phase Analysis of a Printed Circular Wire Loop Antenna with Dielectric Superstrate Cover Based on an Efficient Moment Method. *2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, 2007, pp. 710–713. DOI: 10.1109/MAPE.2007.4393722.
90. Richmond J. A wire-grid model for scattering by conducting bodies. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1966, vol. 14, no. 6, pp. 782–786. DOI: 10.1109/TAP.1966.1138783.
91. Chen W., Chuang H. Numerical computation of human interaction with arbitrarily oriented superquadric loop antennas in personal communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1998, vol. 46, no. 6, pp. 821–828. DOI: 10.1109/8.686768.
92. Richmond J.H. Digital computer solutions of the rigorous equations for scattering problems. *Proceedings of the IEEE*, 1965, vol. 53, no. 8, pp. 796–804. DOI: 10.1109/PROC.1965.4057.
93. Lin J., Curtis W., Vincent M. Radar cross section of a rectangular conducting plate by wire mesh modeling. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1974, vol. 22, no. 5, pp. 718–720. DOI: 10.1109/TAP.1974.1140885.

94. Lin J., Curtis W., Vincent M. Radar cross section of a conducting plate by wire mesh modeling. *1973 Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1973, pp. 422–425. DOI: 10.1109/APS.1973.1147172.
95. Simpson T. The theory of top-loaded antennas: *Integral equations for the currents*. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1971, vol. 19, no. 2, pp. 186–190. DOI: 10.1109/TAP.1971.1139900.
96. Agrawal P., Bailey M. An analysis technique for microstrip antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1977, vol. 25, no. 6, pp. 756–759. DOI: 10.1109/TAP.1977.1141706.
97. Conti R., Toth J., Dowling T., Weiss J. The wire grid microstrip antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1981, vol. 29, no. 1, pp. 157–166. DOI: 10.1109/TAP.1981.1142541.
98. Hildebrand L.T. *The analysis of microstrip wire-grid antenna arrays*. University of Pretoria, 2010.
99. Lee S., Zarrillo G., Law C. Simple formulas for transmission through periodic metal grids or plates. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1982, vol. 30, no. 5, pp. 904–909. DOI: 10.1109/TAP.1982.1142923.
100. Wang J., Ryan C. Application of wire-grid modeling to the design of low-profile aircraft antenna. *1977 Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1977, pp. 222–225. DOI: 10.1109/APS.1977.1147721.
101. Owen J. Wire grid modelling of helicopter HF aerials. *1980 Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1980, pp. 722–725. DOI: 10.1109/APS.1980.1148259.
102. Luu Q.C., Kubina S.J., Trueman C.W., De Carlo D. Study of HF antenna coupling modes on the EC-130 aircraft. *1992 Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics*, 1992, pp. 223–232. DOI: 10.1109/ANTEM.1992.7854268.
103. Austin B.A., Najm R.K. Wire-grid modelling of vehicles with flush-mounted window antennas. *1991 Seventh International Conference on Antennas and Propagation, ICAP 91 (IEE)*, 1991, vol. 2, pp. 950–953.
104. Imbriale W.A., Galindo-Israel V., Rahmat-Samii Y. On the reflectivity of complex mesh surfaces (spacecraft reflector antennas). *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1991, vol. 39, no. 9, p. 1352–1365. DOI: 10.1109/8.99044.
105. Ghaderi P., Aliakbarian H., Sadeghzadeh R. Integration of one dimensional wire grid antennas with solar cells for LEO satellite application. *2015 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC)*, 2015, pp. 1–4. DOI: 10.1109/LAPC.2015.7366120.
106. Sarolic A., Modlic B., Poljak D. Measurement validation of ship wiregrid models of different complexity. *2001 IEEE EMC International Symposium. Symposium Record. International Symposium on Electromagnetic Compatibility (Cat. No.01CH37161)*, 2001, vol. 1, pp. 147–150. DOI: 10.1109/IEMC.2001.950573.
107. McLachlan J., Antar Y.M.M., Kubina S.J., Kashyap S. Electromagnetic modelling of a warship at high frequency. *1992 Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics*, 1992, pp. 662–667. DOI: 10.1109/ANTEM.1992.7854217.
108. Lin Y., Richmond J. EM modeling of aircraft at low frequencies. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1975, vol. 23, no. 1, pp. 53–56. DOI: 10.1109/TAP.1975.1140994.
109. Palmer K.D., Cloete J.H. Synthesis of the microstrip wire grid array. *Tenth International Conference on Antennas and Propagation (Conf. Publ. No. 436)*, 1997, vol. 1, pp. 114–118. DOI: 10.1049/cp:19970220.
110. McCormick S.A., Coburn W.O. Microstrip grid array fed against an EBG. *2016 IEEE/ACES International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS) and Applied Computational Electromagnetics (ACES)*, 2016, pp. 1–2. DOI: 10.1109/ROPACES.2016.7465425.
111. Hildebrand L.T., McNamara D.A. Experimental verification of an integral equation analysis of etched wire-grid antenna arrays. *Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1993, vol. 3, pp. 1494–1497. DOI: 10.1109/APS.1993.385478.
112. Gallagher J.G., Brammer D.J. Electromagnetic Scattering by an Infinite Array of Periodic Broken Wires Buried in a Dielectric Sheet. *1983 13th European Microwave Conference*, 1983, pp. 778–782. DOI: 10.1109/EUMA.1983.333193.
113. Schneider S.W., Munk B.A. The scattering properties of «Super Dense» arrays of dipoles. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1994, vol. 42, no. 4, pp. 463–472. DOI: 10.1109/8.286213.
114. Lockyer D., Moore C., Seager R., Simpkin R., Vardaxoglou J.C. Coupled dipole arrays as reconfigurable frequency selective surfaces. *Electronics Letters*, 1994, vol. 30, no. 16, pp. 1258–1259. DOI: 10.1049/el:19940906.
115. Dmitriev D.D., Ratushnyak V.N., Gladyshev A.B., Buravleva M.E., Chernovolenko A.I. Synthesis of Directivity Pattern for Various Antenna Arrays Configurations of Vertical Atmospheric Sensing Radar Station. *2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2021, pp. 1–5. DOI: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438940.
116. Richmond J.H. Scattering by an Arbitrary Array of Parallel Wires. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1965, vol. 13, no. 4, pp. 408–412. DOI: 10.1109/TMTT.1965.1126020.
117. Harrington R.F. The method of moments in electromagnetics. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 1987, vol. 1, pp. 181–200. DOI: 10.1163/1569 39387X 00018.
118. Thiele G., Newhouse T. A hybrid technique for combining moment methods with the geometrical theory of diffraction. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1975, vol. 23, no. 1, pp. 62–69. DOI: 10.1109/TAP.1975.1141004.
119. Fan D. A new approach to diffraction analysis of conductor grids. I. Parallel-polarized incident plane waves. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1989, vol. 37, no. 1, pp. 84–88. DOI: 10.1109/8.192168.
120. Fan D. A new approach to diffraction analysis of conductor grids. II. Perpendicular-polarized incident plane waves. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1989, vol. 37, no. 1, pp. 89–93. DOI: 10.1109/8.192169.
121. Ferguson T.R. Efficient solution of large moments problems: wire grid modeling criteria and conversion to surface currents. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, 2022, Vol. 3, no. 1, pp. 55–81.
122. Geranmayeh A., Moini R., Sadeghi S.H.H., Deihimi A. A fast wavelet-based moment method for solving thin-wire EFIE. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, vol. 42, no. 4, pp. 575–578. DOI: 10.1109/TMAG.2006.872020.
123. Lewis G., Fortuny-Guasch J., Sieber A. Bistatic radar scattering experiments of parallel wire grids. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2002, vol. 1, pp. 444–446. DOI: 10.1109/IGARSS.2002.1025067.
124. Kolev N.Z. An application of the method of moments for computation of RCS of PEC wire-grid models of complicated objects. *MMET Conference Proceedings. 1998 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. MMET 98 (Cat. No.98EX114)*, 1998, vol. 2, pp. 499–501. DOI: 10.1109/MMET.1998.709795.
125. Abd-Alhameed R.A., Zhou D., See C.H., Excell P.S. A Wire-Grid Adaptive-Meshing Program for Microstrip-Patch Antenna Designs Using a Genetic Algorithm [EM Programmer's Notebook]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*,

- 2009, vol. 51, no. 1, pp. 147–151. DOI: 10.1109/MAP.2009.4939045.
126. Gurel L. Design and Simulation of Circular Arrays of Trapezoidal-Tooth Log-Periodic Antennas via Genetic Optimization. *Progress In Electromagnetics Research*, 2008, vol. 85, pp. 243–260. DOI: 10.2528/PIER08081809.
127. Lindell I.V., Akimov V.P., Alanen E. Image Theory for Dipole Excitation of Fields above and below a Wire Grid with Square Cells. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1986, vol. 28, no. 2, pp. 107–110. DOI: 10.1109/TEMC.1986.4307257.
128. Harrington R., Mautz J. Theory of characteristic modes for conducting bodies. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1971, vol. 19, no. 5, pp. 622–628. DOI: 10.1109/TAP.1971.1139999.
129. Mayhan J.T. Characteristic modes and wire grid modeling. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1990, Vol. 38, no. 4, pp. 457–469. DOI: 10.1109/8.52263.
130. Chung A.M., Balmain K.G. Tray-shape effect in a computational model of microwave heating. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 1995, vol. 20, no. 4, pp. 173–178. DOI: 10.1109/CJECE.1995.7102073.
131. Tsunekawa K., Ando A. Advanced wire grid method for solving the scattered field of a lossy dielectric object. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1992, vol. 2, pp. 797–800. DOI: 10.1109/APS.1992.221688.
132. Goňa S., Jilková J. Homogenization of composite consisting from dielectric slab and wire grid assuming negative and non-negative permittivity, a comparison. *15th Conference on Microwave Techniques COMITE 2010*, 2010, pp. 209–212. DOI: 10.1109/COMITE.2010.5481269.
133. Yung E.K.N., Cheng C.C. Scattering of electromagnetic waves by a wire grid of hexagonal meshes. *Digest on Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1989, vol. 2, pp. 730–733. DOI: 10.1109/APS.1989.134793.
134. Ghaffari-Miab M., Firouzeh Z.H., Faraji-Dana R., Moini R., Sadeghi S.H.H., Vandenbosch G.A.E. Time-domain MoM for the analysis of thin-wire structures above half-space media using complex-time Green's functions and band-limited quadratic B-spline temporal basis functions. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2012, vol. 36, pp. 1116–1124. DOI: 10.1016/jenganabound.2012.02.004.
135. Štumpf M., Lager I.E., Antonini G. Time-Domain Analysis of Thin-Wire Structures Based on the Cagniard-De-Hoop Method of Moments. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, vol. 70, no. 6, pp. 4655–4662. DOI: 10.1109/TAP.2022.3140782.
136. Kedzia J.C., Jecko B. Frequency and Time Domain Analysis of Microstrip Antennas. *1985 15th European Microwave Conference*, 1985, pp. 1045–1051. DOI: 10.1109/EUMA.1985.333601.
137. Rao S. A Simple and Efficient Method of Moments Solution Procedure for Solving Time-Domain Integral Equation—Application to Wire-Grid Model of Perfect Conducting Objects. *IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques*, 2019, vol. 4, pp. 57–63. DOI: 10.1109/JMMCT.2019.2900702.
138. Kontorovich M.I., Yu V.P., Petrun'kin N.A., Yespikina M.I. [The coefficient of reflection of a plane electromagnetic wave from a plane wire mesh]. *Radio Engineering and Electronic Physics*, 1962, vol. 7, pp. 222–231 (in Russ.).
139. Kontorovich M.I., Petrun'kin V.Y., Yespikina N.A., Astrakhan M.I. [Reflection factor of a plane electromagnetic wave reflecting from a plane wire grid]. *Radio Engineering and Electronic Physics*, 1962, vol. 7, pp. 222–231 (in Russ.).
140. Kontorovich M.I. [Averaged boundary conditions at the surface of a grating with square mesh]. *Radio Engineering and Electronic Physics*, 1963, vol. 8, pp. 1446–1454 (in Russ.).
141. Kontorovich M.I., Astrakhan M.I., Akimov V.P., Fersman G.A. *Electrodynamics of Grid Structures*. Radio i Svyaz: Moscow, 1987 (in Russ.).
142. Castillo J.P., Chen K.C., Singaraju B.K. Calculation of currents induced on a disk by a wire grid code. *Interaction Note*, 1975, vol. 230, pp. 14.
143. Burke G.J., Poggio A.J., Logan J.C., Rockway J.W. Numerical Electromagnetic Code (NEC). *1979 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 1979, pp. 1–3. DOI: 10.1109/ISEMC.1979.7568787.
144. Çakir G., Sevgi L. Radar cross-section (RCS) analysis of high frequency surface wave radar targets. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2010, vol. 18, pp. 457–468. DOI: 10.3906/elk-0912-7.
145. Trueman C.W. *Wire-Grid Model Construction and Verification Using Programs MESHERS, FNDRAD and CHECK*. Dept. of Electrical and Computer Engineering: Concordia University, 1990.
146. Trueman C.W., Kubina S.J. Verifying wire-grid model integrity with program 'Check'. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, 1990, vol. 5, no. 2, pp. 17–42.
147. Yang X.H., Shafai L., Sebak A. A comparison study on wire-grid model and point matching technique with subdomain basis functions. *1992 Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics*, 1992, pp. 656–661. DOI: 10.1109/ANTEM.1992.7854316.
148. Elliniadis P., Breakall J.K. An investigation of near fields for shipboard antennas using the numerical electromagnetics code (NEC). *Digest on Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1989, vol. 1, pp. 236–239. DOI: 10.1109/APS.1989.134659.
149. Burke G.J. Recent advances to NEC: Applications and validation. *AGARD Lecture Series*, 1989, pp. 165.
150. McKaughan M.E. Coast Guard applications of NEC. *IEEE Antennas and Propagation Society Symposium*, 2004, vol. 3, pp. 2879–2882. DOI: 10.1109/APS.2004.1331978.
151. Colgan M.A., Mirotznik M.S. Design and Fabrication of 3D Wire Grid Antenna an Integrated Method for Optimization in Constrained Volumes. *2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting*, 2020, pp. 1553–1554. DOI: 10.1109/IEEECONF35879.2020.9329555.
152. Chao H.H., Strait B.S. *Computer programs for radiation and scattering by arbitrary configurations of bent wires*. Syracuse University, New York, Department of Electrical Engineering, 1970.
153. Richmond J.H. *Computer program for thin-wire structures in a homogeneous conducting medium*. NASA Technical Reports Server (NTRS), 1974.
154. Coffey E., Thomas D. Wire grid modeling with interactive graphics. *1985 Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1985, pp. 269–271. DOI: 10.1109/APS.1985.1149504.
155. Tam D.W.S., Azu C. A computer-aided design technique for EMC analysis. *Proceedings of International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 1995, pp. 234–235. DOI: 10.1109/ISEMC.1995.523553.
156. Lee K.S.H., Marin L., Castillo J.P. Limitations of Wire-Grid Modeling of a Closed Surface. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1976, vol. EMC-18, no. 3, pp. 123–129. DOI: 10.1109/TEMC.1976.303482.
157. Ludwig A. Wire grid modeling of surfaces. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1987, vol. 35, no. 9, pp. 1045–1048. DOI: 10.1109/TAP.1987.1144220.
158. Paknys R.J. The near field of a wire grid model. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1991, vol. 39, no. 7, pp. 994–999. DOI: 10.1109/8.86920.

159. Rubinstein A., Rachidi F., Rubinstein M. On wire-grid representation of solid metallic surfaces. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2005, vol. 47, no. 1, pp. 192–195. DOI: 10.1109/TEMC.2004.838230.
160. Rubinstein A., Rubinstein M., Rachidi F. A physical interpretation of the equal area rule. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2006, vol. 48, no. 2, pp. 258–263. DOI: 10.1109/TEMC.2006.873861.
161. Rubinstein A., Rostamzadeh C., Rubinstein M., Rachidi F. On the use of the equal area rule for the wire-grid representation of metallic surfaces. *2006 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2006, pp. 212–215. DOI: 10.1109/EMCZUR.2006.214907.
162. Golden T. *Equivalent Wire-Grids for the Electromagnetic Modeling of Conducting Surfaces*. 2022.
163. Trueman C.W., Kubina S.J. Fields of complex surfaces using wire grid modelling. *IEEE Transactions on Magnetism*, 1991, vol. 27, no. 5, pp. 4262–4267. DOI: 10.1109/20.105043.
164. Awan Z.A., Rizvi A.A. Effects of Random Positioning Errors Upon Electromagnetic Characteristics of a Wire Grid. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2011, vol. 25, no. 2, pp. 351–364. DOI: 10.1163/156939311794362768.
165. Tulyathan P., Newman E. The circumferential variation of the axial component of current in closely spaced thin-wire antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1979, vol. 27, no. 1, pp. 46–50. DOI: 10.1109/TAP.1979.1142035.
166. Sarkar T., Siarkiewicz K., Stratton R. Survey of numerical methods for solution of large systems of linear equations for electromagnetic field problems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1981, vol. 29, no. 6, pp. 847–856. DOI: 10.1109/TAP.1981.1142695.
167. Ferguson T.R., Balestri R.J. Solution of Large Wire Grid Moments Problems. *IEEE 1976 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 1976, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ISEMC.1976.7568690.
168. Yung E.K.N., Law C.L. Scattering of EM waves by a wire grid of linear and non-linear wire segments. *Antennas and Propagation Society Symposium 1991 Digest*, 1991, vol. 2, pp. 806–809. DOI: 10.1109/APS.1991.174967.
169. Burton M., Kashyap S. Using software to push back the limits of the moment method. *Antennas and Propagation Society Symposium 1991 Digest*, 1991, vol. 3, pp. 1504–1507. DOI: 10.1109/APS.1991.175137.
170. Shaeffer J. Million plus unknown MOM LU factorization on a PC. *2015 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, 2015, pp. 62–65. DOI: 10.1109/ICEAA.2015.7297075.
171. Ferguson T., Lehman T., Balestri R. Efficient solution of large moments problems: Theory and small problem results. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1976, vol. 24, no. 2, pp. 230–235. DOI: 10.1109/TAP.1976.1141314.
172. Fourie A.P.C., Nitch D.C. A fast sparse iterative method (SIM) for method of moments. *Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium and URSI National Radio Science Meeting*, 1994, vol. 2, pp. 1146–1149. DOI: 10.1109/APS.1994.407888.
173. Fourie A.P.C., Nitch D.C. Comparing the sparse iterative method (SIM) with the banded Jacobi and conjugate gradient techniques. *Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium and URSI National Radio Science Meeting*, 1994, vol. 2, pp. 1181–1184. DOI: 10.1109/APS.1994.407879.
174. Davidson D.B. *Parallel algorithms for electro-magnetic moment method formulations*. Diss. Stellenbosch: Stellenbosch University, 1991.
175. Rubinstein A., Rachidi F., Rubinstein M., Reusser B. A parallel implementation of NEC for the analysis of large structures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2003, vol. 45, no. 2, pp. 177–188. DOI: 10.1109/TEMC.2003.810806.
176. Excell P.S., Porter G.J., Tang Y.K., Yip K.W. Re-working of two standard moment-method codes for execution on parallel processors. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 1995, vol. 8, pp. 243–248. DOI: 10.1002/jnm.1660080309.
177. Reeve J. Running SuperNEC on the 22 processor ibm-sp2 at Southampton University. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, 2022, vol. 13, pp. 99–106.
178. Topa T., Karwowski A., Noga A. Using GPU With CUDA to Accelerate MoM-Based Electromagnetic Simulation of Wire-Grid Models. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, vol. 10, pp. 342–345. DOI: 10.1109/LAWP.2011.2144557.

Adnan Alhaj Hasan

Postgraduate student, Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-7403-7023
Phone: +7-996-957-97-63
Email: alhaj.hasan.adnan@tu.tusur.ru

Manh Tuan Nguyen

Postgraduate student,
Department of Television and Control, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-5050-3752
Phone: +7-931-605-67-89
Email: nguyen.t.2213-2022@e.tusur.ru

Talgat R. Gazizov

Doctor of Science in Engineering, Professor,
Head of the Department of Television and Control, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-1192-4853
Phone: +7-913-826-07-24
Email: talgat@tu.tusur.ru