

УДК 621.396

Угловый отражатель и основные методы моделирования электромагнитного рассеяния: обзор за 10 лет

Данг Т. Ф.

Постановка задачи: За последнее десятилетие методы анализа электромагнитного рассеяния значительно усовершенствовались, что помогло анализу как простых, так и сложных структур. Наряду с этим, типичный пример рассеивателя, угловой отражатель (УО), также модернизирован и получил широкое применение в различных областях. Тем не менее, детальная оценка методов моделирования и процесса разработки УО всё ещё сталкивается с рядом ограничений. В условиях непрерывного развития электромагнитных технологий возникает острая необходимость в анализе и оптимизации УО для удовлетворения требований к производительности современных электромагнитных систем. **Цель работы:** обобщение и оценка достигнутых результатов в проектировании и оптимизации УО, а также развитии и усовершенствовании методов анализа рассеяния за последние 10 лет. **Используемые методы:** Метод моментов, оптические методы и их гибриды. **Новизна:** Обобщение и сравнение различных методов моделирования рассеивателей, а также рассмотрение существующих сложностей при оптимальном выборе между точностью и вычислительной эффективностью. Особое внимание уделяется современным приложениям, особенностям проектирования УО и новым подходам к их оптимизации с целью снижения массы и размеров, повышения прочности и улучшения характеристик рассеяния. **Результат:** Представлены комплексная оценка эволюции метода моментов, оптических методов и их гибридов, а также сравнительный анализ их эффективности и точности. Кроме того, рассмотрены развитие различных типов УО, особенности их формы, размеров, применения и характеристик рассеяния. Перспективные УО могут быть оптимизированы по массе, размерам, долговечности и характеристикам, чтобы лучше соответствовать растущим требованиям в космических, военных и гражданских приложениях. **Практическая значимость:** Результаты полезны для исследователей и инженеров, занимающихся моделированием электромагнитного рассеяния, а также специалистов, разрабатывающих УО.

Ключевые слова: метод моментов, оптические методы, проводная сетка, рассеяние, угловой отражатель.

Введение

С XX века рассеиватели электромагнитных волн привлекли к себе большое внимание. С развитием науки и технологий исследуются более сложные структуры рассеяния, которые находят всё большее применение в различных областях. Одним из часто используемых рассеивателей является угловой отражатель (УО). Хотя разработаны различные УО, их применение расширяется. Однако, насколько известно автору, не проведен полный обзор аспектов анализа, разработки и применения УО.

Библиографическая ссылка на статью:

Данг Т. Ф. Угловый отражатель и основные методы моделирования электромагнитного рассеяния: обзор за 10 лет // Системы управления, связи и безопасности. 2025. № 3. С. 35-120. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-3-035-120

Reference for citation:

Dang T. P. Corner Reflector and Key Electromagnetic Scattering Modelling Techniques: A 10-Year Review. *Systems of Control, Communication and Security*, 2025, no. 3, pp. 35-120 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2025-3-035-120

Развитие новых рассеивателей, отвечающих целому ряду строгих требований, сегодня также имеет большое значение. Это такие требования как низкая стоимость, удовлетворяющие характеристики, простое производство, компактность, легкость в обслуживании, хорошая адаптация к воздействиям среды и т. д. Однако развитие рассеивателей стало невозможным без компьютерных моделей, которые помогают сэкономить необходимое время и финансы, а также оценить правильность предлагаемых технических решений. Некоторые из наиболее используемых методов в таких программах – это метод моментов (МоМ), физическая оптика (Physical optics – PO), метод конечных разностей во временной области, метод конечных элементов и др. Оценка достоинств и недостатков этих методов и их гибридных вариантов представлена во многих работах [1-4]. В области анализа рассеивателей в целом и УО в частности, часто используют МоМ и оптические методы. За последние 10 лет МоМ, оптические методы и их гибридные варианты значительно развились, поэтому полезны рассмотрение и оценка этих методов.

Цель данной обзорной статьи – обобщение и оценка достигнутых результатов в проектировании и оптимизации УО, а также развитии и усовершенствовании методов анализа рассеяния за последние 10 лет. Представлены самые современные подходы, основанные на МоМ и оптических методах, для анализа рассеивающих структур, а также оптимизации УО как важного компонента в современных и будущих системах. Кроме того, рассматривается возможность реализации разреженного УО, с представлением новой аппроксимации оптимальной токовой сеткой.

1. Методы моделирования

При анализе рассеивателей наибольшее внимание уделяется характеристикам эффективной площади рассеяния (ЭПР), включая бистатическую (БЭПР) и моностатическую (МЭПР), а также матрице поляризационного рассеяния [5-7]. Разработано множество методов для анализа рассеяния различных структур. Аналитические подходы часто сталкиваются с математическими трудностями и применимы только к простым структурам, в то время как численные методы являются мощными и гибкими, применимы к различным структурам и становятся все более популярными. Выбор метода анализа зависит от размера объекта относительно длины волны (λ), необходимой точности и требуемых вычислительных ресурсов [8]. Среди методов наиболее часто используются МоМ и оптический метод. МоМ считается стандартом для анализа рассеяния, в то время как оптический метод является оптимальным выбором для анализа структур в высокочастотной области.

1.1. Метод моментов

В работе Харрингтона [9], МоМ был разработан для тонких прямых структур, используя условие тонкопроводной аппроксимации. Путем преобразования интегрального уравнения электрического поля (EFIE) в систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) вида $\mathbf{Z}\mathbf{i}=\mathbf{v}$, где $\mathbf{Z}$ – матрица импеданса, а $\mathbf{v}$ – вектор возбуждения, можно определить вектор распределения тока $\mathbf{i}$ и ха-

рактеристики излучения или рассеяния структуры. При этом, решение электромагнитной задачи с N неизвестными прямым методом (например, методом Гаусса) имеет вычислительную сложность $O(N^3)$ и требует памяти $O(N^2)$ [10].

Следующие усилия, в основном, сосредоточены на разработке МоМ для более сложных проводных структур [11-13]. В то же время использованы различные базисные функции, влияние которых на результаты анализа показано в [14, 15]. Базисные функции можно разделить на два типа: функции подобласти (включая ступенчатые, треугольные, синусоидальные) и функции всей области. Функции подобласти могут использоваться без предварительного знания природы функции, которую они должны представлять. Функции всей области определяются и не равны нулю на всей длине рассматриваемой структуры [15].

Для моделирования 3D-структур по МоМ использовались различные схемы сетки, такие как импульс, крышка [16] или треугольник [17, 18]. Эти виды сеток имеют преимущества в точности анализа распределения тока и ближнего и дальнего поля. Однако программная реализация кода с использованием этих сеток довольно сложна, а его исполнение требует значительных вычислительных затрат. Развитие технологии 3D-печати позволило получать сеточные координатные файлы в формате .stl, что значительно облегчило создание треугольных сеток. Комбинация этой сетки с базисными функциями Рао–Уилтона–Глиссона (Rao–Wilton–Glisson – RWG) сделала МоМ гораздо более гибким и эффективным. В настоящее время анализ рассеяния поверхности с использованием МоМ и RWG-функций широко применяется в современных системах автоматизированного проектирования (САПР), таких как FEKO [19], MATLAB Antennas Designer [20], CST Studio Suite [21] и т.д.

Использование проводной сетки (ПС) для моделирования проводящей поверхности кажется более простым. В ряде недавних работ представлены разнообразные результаты, подтверждающие целесообразность применения ПС при анализе рассеивателей, от простых [22] до сложных [23, 24]. Для моделирования поверхности посредством ПС, можно применять ячейки различной формы, как показано на рис. 1.

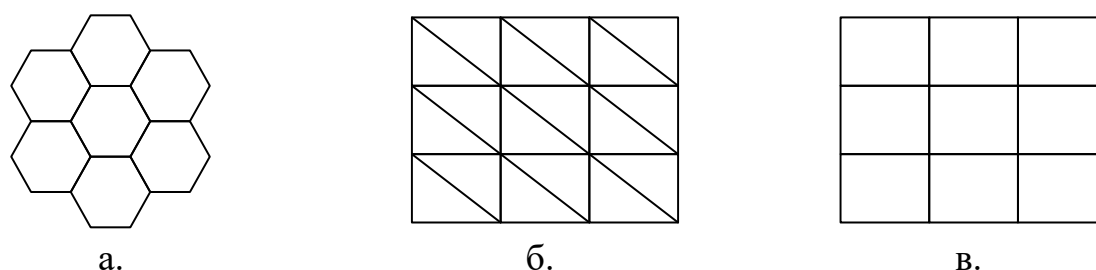


Рис. 1. ПС с шестиугольными (а), треугольными (б) и прямоугольными (в) ячейками

Наиболее часто используются квадратные ячейки. При этом треугольные ячейки также доказали свою пригодность для моделирования некоторых типов сложных антенн [25], таких как рефлекторные, апертурные и др., но они имеют некоторые недостатки по сравнению с прямоугольными ячейками: более слож-

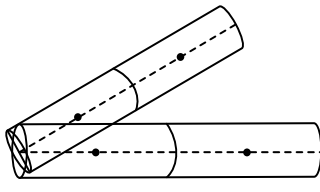
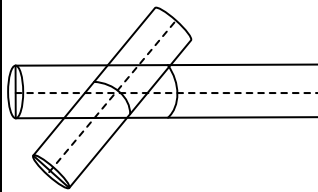
ные, требование большего вычислительного ресурса [25]. Кроме того, в некоторых случаях использование треугольных ячеек не достигает точности по сравнению с прямоугольными [26].

Моделирование поверхности с использованием ПС требует выбора длин (Δ) и радиусов (a) сегментов. В [27] представлены рекомендации по применению ПС для моделирования поверхности, основанные на опыте авторов и требованиях САПР 4NEC2. Недавно в [28, 29] были добавлены дополнительные требования, которые помогают дополнить рекомендации для моделирования структуры с использованием модели ПС. Важные замечания относительно Δ и a представлены в таблице 1, где Δ_1 – это длина длинного, а Δ_2 – короткого сегментов прямоугольной ячейки, в то время как таблица 2 представляет некоторые случаи, возникающие при соединении сегментов.

Таблица 1 – Некоторые примечания о длине и радиусе сегментов

		Условия	Статус	
			Предупреждение	Ошибка
4NEC2	Отдельные сегменты	Длина сегмента	$\lambda/10 < \Delta < \lambda/5$	$\Delta > \lambda/5$
		Радиус	$30 < \lambda/a < 100$	$\lambda/a < 30$
		Отношение длины сегмента к радиусу	$0,5 < \Delta/a < 2$	$\Delta/a < 0,5$
	На точке соединения	Отношение длины сегмента	–	$\Delta_{\text{большой}}/\Delta_{\text{малый}} > 5$
		Отношение радиуса	$5 < a_{\text{большой}}/a_{\text{малый}} < 10$	$a_{\text{большой}}/a_{\text{малый}} > 10$
		Отношение длины сегмента к радиусу	$2 < \Delta/a < 6$	$\Delta/a < 2$
[28]		Длина сегмента для сложной структуры	$\Delta < \lambda/20$	
		Для более длинных проводов	$\Delta > \lambda/5$	
		Длина сегмента при моделировании в диапазоне частот	$\Delta \approx \lambda/10$ (на центральной частоте)	
		Отношение длин сегмента (соединенных друг с другом)	$\Delta_1/\Delta_2 = 10-15$	
		Отношение длины сегмента к радиусу для прямоугольной ячейки	$\Delta_2/a = 2\pi$	
		Параллельные провода	Провода должны иметь одинаковое число сегментов	

Таблица 2 – Некоторые относительные положения проводов

Случай	Иллюстрация	Случай	Иллюстрация
Корректно: середина оси двух пересекающихся сегментов находятся вне их объема		Ошибка точки совпадения: два провода пересекаются, но точка пересечения не находится на конце сегмента	

Случай	Иллюстрация	Случай	Иллюстрация
Ошибка точки совпадения: середина оси двух пересекающихся сегментов находится внутри их объема, когда угол между проводами мал		Несоединенные провода: расстояние между осями проводов на концах сегментов меньше суммы радиусов проводов. То есть, физически провода перекрывают друг друга, но не соединены	
Ошибка точки совпадения: середина оси короткого сегмента находится внутри объема длинного сегмента, несмотря на большой угол между проводами		Ближние провода: провода расположены слишком близко друг к другу. Оси двух проводов, расположенные параллельно, должны быть на расстоянии не менее Δ/4 [30] или хотя бы больше 4a [28]	

В целом, $\lambda/6 > \Delta > \lambda/20$ считается оптимальным по точности и вычислительным ресурсам [22, 31], тогда как a не влияет на вычислительные затраты, но может значительно повлиять на точность результатов. При использовании квадратных ячеек периметр поперечного сечения сегмента должен быть равен длине сегмента (правило равной площади): $a = \Delta/2\pi$. Для сетки произвольной формы a определяется на основе площади поверхности (A_1, A_2) двух смежных ячеек как $a = (A_1 + A_2)/4\pi\Delta$.

В тонкопроводной аппроксимации предположение, что ток, протекающий через провод, можно представить как нить вдоль его оси, справедливо только в случае, когда поперечное сечение провода стремится к нулю. Это предположение связано с важным аспектом, называемым ядром задачи. Вместо использования тонкопроводного ядра, как в (1), в точном ядре, как в (2), предполагается, что ток протекает по поверхности провода. В [30] разработан конформный МоМ (Conformal MoM – CMoM), основанный на точном ядре и изогнутых сегментах, что дает больше возможностей по сравнению с МоМ (таблица 3).

$$K(s,s') \cong \frac{e^{-jkR}}{R},$$

(1)

$$K(s,s') = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{e^{-jkR}}{R} d\phi' d\phi$$

(2)

Таблица 3 – Сравнение МоМ и CMoM

Объект	Традиционный МоМ	CMoM
Изогнутая структура	Изогнутая структура аппроксимируется прямыми сегментами, что приводит к ошибкам моделирования	Сегменты имеют форму изогнутых цилиндров, что позволяет точно анализировать изогнутые провода

Объект	Традиционный МоМ	СМоМ
Параллельные провода	Низкая точность при анализе проводов, расположенных близко друг к другу	Дает точные результаты при анализе проводов, расположенных близко друг к другу
Длина сегмента	Неэффективен на очень низких частотах из-за ограничений Δ и λ	Эффективен как на низких частотах (до 60 МГц), так и на других частотах
Толстый провод	Ток ограничен осью провода, а не его поверхностью, что снижает точность результатов	Используется предположение о том, что ток течет по поверхности провода, что дает более точные результаты
Резкое изменение радиуса провода	Изменение радиуса между смежными сегментами вызывает физически некорректные разрывы	Может моделировать цилиндры с резким изменением радиуса

4NEC2 [32] – одна из известных программ для моделирования проводных структур, использующая МоМ с треугольными базисными функциями, которая продемонстрировала высокую точность в различных исследованиях (рис. 2а). Однако она имеет некоторые ограничения, связанные с максимальным числом сегментов для моделирования: 11000 [33], что ограничивает возможность моделирования сложных структур с большими размерами. Другая версия, NEC4, позволяет моделировать до 32000 сегментов. Недавно [30] разработана программа AN-SOF (рис. 2б) на основе СМоМ. Однако у этих программ есть общие недостатки: они требуют ручного построения (ввода координат и радиусов) каждого сегмента, что затрудняет процесс построения структур.

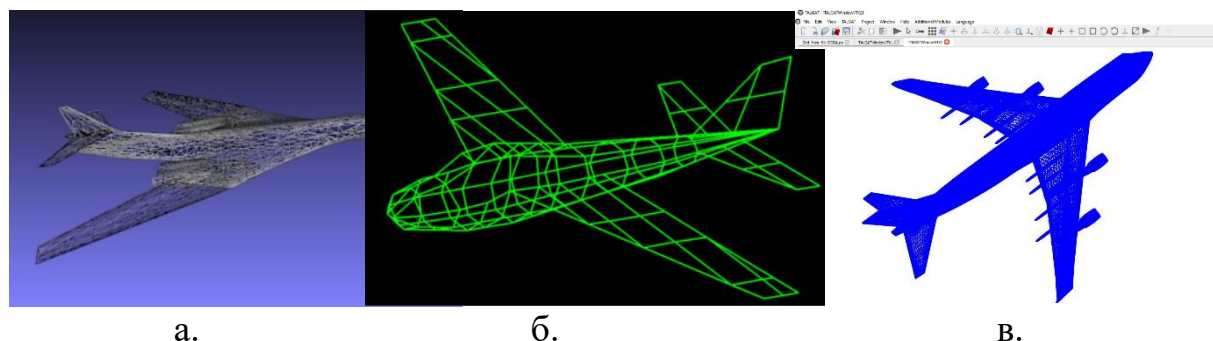


Рис. 2. Программы 4NEC2 [35] (а), AN-SOF [36] (б) и TUSUR.EMC [37] (в) для моделирования самолетов по ПС-модели

В российской программе TUSUR.EMC (рис. 2в) используется МоМ со ступенчатыми базисными функциями и дельта функцией Дирака как тестовой, которые были проверены в многочисленных исследованиях по антеннам [29] и рассеивателям [22-24]. Несмотря на то, что использование МоМ со ступенчатыми базисными функциями ограничивает точность результатов, оно имеет значительные преимущества благодаря независимости отдельных сегментов при формировании матрицы импеданса. Это означает, что при удалении одного сегмента соответствующие строка и столбец в матрице импеданса также удаляются, а другие не меняются. Это преимущество использовано для создания разреженных антенн на основе аппроксимации оптимальной токовой сеткой

(АОТС) [34]. Кроме того, другое преимущество TUSUR.EMC над другими программами заключается в том, что процесс построения структур полностью основан на написании кода. Это сокращает время создания структуры, даже для сложных объектов. С другой стороны, также можно использовать файлы .stl для создания ПС в TUSUR.EMC, что позволяет моделировать поверхности сложных структур [26].

МоМ пригоден для анализа рассеяния не только от хорошо проводящих структур, но и диэлектрических. Для неоднородных диэлектрических структур МоМ использует объемное интегральное уравнение [38], в то время как для тонких пластин или однородных диэлектрических структур – поверхностное [39]. Во многих случаях эти методы также могут быть объединены [40, 41].

1.2. Ускорение МоМ

МоМ является стандартным методом для определения ЭПР, часто применяемым в области низких и средних частот [8] (размер цели не больше 10λ). Однако для больших структур МоМ обычно используется реже, так как он требует огромных вычислительных ресурсов. Чтобы ускорить традиционный МоМ, предложено много методов, включая прямое разреживание матрицы МоМ. Одним из примеров является метод локализации матрицы импеданса, представленный в [42], который позволяет заменить матрицу МоМ на матрицу с локализованными кластерами крупных элементов [10]. Кроме того, как базисные и тестовые функции используются вейвлеты [43], что приводит к созданию разреженной матрицы из плотной матрицы МоМ. Это стало возможным благодаря свойствам исчезающих моментов, ортогональности и многомасштабному анализу в вейвлетах. Использование вейвлетов как базисных функций не снижает вычислительную сложность, но помогает уменьшить время решения [10].

Два популярных метода, используемых для ускорения классического МоМ – это быстрый метод мультиполей (Fast multipole method – FMM) и многоуровневый быстрый метод мультиполей (Multilevel Fast Multipole Method – MLFMM или MLFMA). FMM работает, разделяя область задачи на подобласти и аппроксимируя взаимодействия между ними с помощью разложения мультиполей. Это значительно снижает требуемые затраты по сравнению с традиционным МоМ при анализе больших структур. MLFMM разработан на основе FMM и выполняется путем деления подобластей на еще меньшие подобласти, создавая иерархическую структуру в виде октодеревя [44]. Она дополнительно снижает сложность вычислений взаимодействий и увеличивает эффективность при решении больших задач, сохраняя при этом высокую точность. Более того, MLFMM идеально подходит для параллельных вычислений благодаря своей иерархической структуре, позволяющей эффективно распределять работу на несколько процессоров и сократить время анализа.

FMM и FMLMM – это распространенные методы для ускорения МоМ. Однако их скорость все еще улучшается в различных работах с помощью сочетания с другими методами, например, с адаптивной перекрестной аппроксимацией (ACA), когда ACA-МоМ используется для анализа рассеивателей, состоящих из множества целей [45]. Эти цели делятся на две области: ближнего поля

(где взаимодействия между элементами рассчитываются напрямую с помощью МоМ) и дальнего поля (где используется АСА для ускорения вычисления матрицы импеданса, что позволяет значительно снижать вычислительные затраты).

Однако при использовании АСА-МоМ для анализа движущихся структур, $\mathbf{v}$ и $\mathbf{Z}$ должны быть рассчитаны несколько раз, и СЛАУ нужно решать на каждой точке траектории движения. Это приводит к увеличению времени вычислений, особенно когда цель имеет сложное движение. Для решения этой проблемы в [46] представлен многократный АСА-МоМ (“multiple time” АСА-МоМ – МТ-АСА-МоМ), который использует инвариантность к вращению и сдвигу функции Грина. Независимо от того, как цель вращается или перемещается, $\mathbf{Z}$ остается неизменной. Поэтому необходимо вычислить и сохранить только одну $\mathbf{Z}$ для всей траектории движения, что значительно снижает время вычислений. Одновременно АСА используется для сжатия как $\mathbf{Z}$, так и $\mathbf{v}$. Было доказано, что МТ-АСА-МоМ может ускорить вычисления более чем в 700 раз по сравнению с АСА-МоМ.

При использовании традиционного АСА-МоМ для решения задач рассеяния от нескольких одинаковых целей, они обрабатываются как одна структура, и АСА применяется непосредственно без учета особенностей каждой цели. Это приводит к повторному сохранению одинаковых подматриц, что увеличивает вычислительные затраты. Для решения этой проблемы в [47] традиционный АСА-МоМ применяется для построения матрицы самовзаимодействия импеданса одной цели. Матрицы самовзаимодействия импеданса для других целей будут аналогичны уже установленной подматрице, т.е. вычисляется и сохраняется только одна подматрица, что значительно снижает требуемые затраты. Кроме того, АСА используется для установления матрицы взаимодействия между любыми двумя целями. Для решения аналогичной задачи в [48] предложен новый алгоритм под названием «Dual-АСА-МоМ», который использует преимущества алгоритма из [47], и АСА применяется на двух уровнях: самого мелкого слоя октодеревя и целевых слоев. Это сочетание помогает дополнительно снизить требования к заполнению матрицы и тем самым еще больше сократить вычислительные затраты. Наконец, в [49] использована комбинация многоуровневой адаптивной перекрестной аппроксимации с MLFMM, алгоритмом «butterfly» и АСА для ускорения решения задач, связанных с вихревыми токами.

Задача крупномасштабных электромагнитных вычислений является важной в области электромагнитного моделирования. Она характеризуется сложностью различных структур в общей. При использовании MLFMA для решения этой задачи некоторые области поверхности объекта требуют слишком большого числа ячеек сетки для описания мелких геометрических деталей, что приводит к очень большим матрицам импеданса. Для решения этой проблемы предложено несколько исследований, которые комбинируют MLFMA с низкочастотным быстрым неоднородным плоскотоволновым алгоритм [50] (Low-frequency fast inhomogeneous plane-wave algorithm LF-FIPWA). Хотя комбинация MLFMA-LF-FIPWA достигает высокой точности, эффективность, всё же, не оптимальна [51]. Предложены и другие методы, такие как MLFMA-АСА или

интерполяционное разложение (interpolative decomposition ID-MLFMA). В [52] ID-MLFMA ячейки на наиболее детализированном уровне в MLFMA делятся на более мелкие, подматрицы взаимодействий ближнего поля эффективно аппроксимируются с помощью ID и взаимодействия дальнего поля анализируются по MLFMA [53]. Кроме того, комбинирование MLFMA с некоторыми методами, основанными на быстром преобразовании Фурье (Fast Fourier Transform – FFT), предложено в [51]. Тогда MLFMA выполняет основную часть вычислений на макроуровне, а методы на основе FFT вычисляют на малых областях с детализированной сеткой. Таблица 4 сравнивает эффективность этих комбинированных методов при анализе некоторых крупномасштабных структур. Ясно, что во всех случаях сочетание MLFMA-FFT, значительно снижает требования к вычислительным ресурсам, при этом MLFMA-LF-FIPWA требует наибольшего количества ресурсов, а ID-MLFMA – на среднем уровне.

Таблица 4 – Сравнение требуемых вычислительных ресурсов некоторых гибридных методов на основе MLFMA

Метод	Структура 1: 2 монополя над малыми кубами над крестообразным кубом		Структура 2: 3 двойных монопольных массива над 3 малыми кубами на поверхности модели ракеты		Структура 3: Пеленгаторная антенная решетка на нижней части модели самолета	
	Память, МБ	Время, с	Память, МБ	Время, с	Память, МБ	Время, с
MLFMA-LF-FIPWA	1047,85	4701,82	–	–	–	–
MLFMA-P-FFT	936,73	755,27	2340,73	2107,56	3041,66	6459,13
MLFMA-FG-FFT	936,86	753,80	2338,93	2101,33	3042,64	6447,96
ID-MLFMA	1029,70	1485,89	2567,40	3211,04	3125,36	7713,95

Методы ускорения MLFMA, которые помогают снизить вычислительные затраты на каждую итерацию, комбинированы со стационарными итерационными методами, что позволяет уменьшить число итераций [54]. Стационарные итерационные методы последовательно фокусируются на различных областях поверхности рассеяния, что даёт точные результаты за меньшее число итераций. В [54] комбинация MLFMA и метода буферизованного блока вперед-назад (buffered block forward-backward – BBFB), как стационарного итерационного метода, была применена для решения задачи рассеяния от трехмерного идеального электрического проводника.

Помимо разработки алгоритмов для ускорения классического МоМ, также используется развитие компьютерных технологий для ускорения МоМ путем рационального распределения вычислительных шагов между центральным (CPU) и графическим процессорами (GPU). Таблица 5 представляет исследования и работы, которые использовали эти технологии для ускорения МоМ, а таблица 6 – вычислительную сложность гибридных алгоритмов на основе МоМ.

Таблица 5 – Сравнение времени вычислений некоторых ускорителей МоМ с использованием GPU и CPU

Ссылка	Метод	Характеристики компьютера			Метод ускорения	Размер матрицы импеданса	Время работы алгоритма, с	Время выполнения на одном процессоре	Коэффициент ускорения
		CPU	Оперативная память, ГБ	GPU					
[55]	FMM-FFT	2×Intel Xeon E5-2687W, 8 ядер	128	4×AMD Radeon R9 280X 6GB	4 GPU+16 ядер	$1,1 \times 10^6$	93	–	329,6
[56]	MLFMA	Intel i7	8	TESLA C2075 с 6 ГБ RAM	Параллелизация с помощью GPU CUDA	19693	24,3	2489,5	102,4
						85373	80,43	7826	97,3
						694142	326,75	36632	112,11
[57]	МоМ	Intel Xeon E5-2698 v3, 16 ядер	256	NVIDIA Tesla K40	FMM/GPU ускоренный BEM	$\sim 1 \times 10^6$	~ 600		–
[58]	МоМ	Intel i7-8700K 6 ядер	–	NVIDIA Titan Xp	CPU/FPGA	7684	–	–	9,53
[59]	МоМ	Intel Xeon E5-2692v2, 12 ядер, 2,2 ГГц	64	NVIDIA Tesla K20c с 4,6 ГБ RAM	GPU-CPU-HDD (Жесткий диск)	67552	–	–	С параллелизацией CPU-HDD: 2,29 с CPU-HDD: 160
[60]	МоМ	11th Gen Intel i7-1165G7, 2,80 ГГц	16	–	CPU-BGMRES	2430	736,71	–	–
					CPU-ID-BGMRES		5,56		
					CPU-SPID-BGMRES- M_{add}		4,96		
					CPU-SPID-BGMRES- M_{mul}		3,22		
[61]	МоМ-ЛУ разложение	2×Intel Xeon CPU E5-2660 v2, 2,2 ГГц	256	8×GeForce GTX 680	8 GPU CUDA ускорение	162140	1740	–	–

Таблица 6 – Сложность некоторых гибридных алгоритмов на основе МоМ

Алгоритм	Сложность	Требуемая память
Традиционный МоМ	$O(N^3)$ [10, 54]	$O(N^2)$ [10]
FMM	$O(N)$ [10]	$O(N^2)$ [10]

Алгоритм	Сложность	Требуемая память
MLFMA	$O(N \log N)$ [54, 49, 10]	—
MoM-AIM	$O(N \log_2 N)$ [54]	—
Итерационные методы	$O(N^2)$ [54]	—
BBFB	$O(N^2)$ [54]	—
MLFMA-BBFB	$O(MN \log_2 N)$ [54]	—
Нестационарные методы	$O(N^2)$ [54]	—
Нестационарные методы-MLFMA	$O(N \log_2 N)$ [54]	—
MoM-CG	$O(N^2)$ [10]	—
Иерархический метод	$O(N \log N)$ [10]	—
Двухуровневый FMM	$O(N^{1.5})$ [10]	$O(N^{1.5})$ [10]
Трехуровневый FMM	$O(N^{4/3})$ [10]	$O(N^{4/3})$ [10]
FMM с лучевым распространением и двухуровневый FMM	$O(N^{4/3})$ [10]	—

1.3. Оптические методы

На практике рассеивающие структуры часто имеют большие электрические размеры ($L \gg \lambda$), например, самолеты, корабли и др. Примеры их представлены на рис. 3 для судна (при $f=10$ ГГц $\lambda=0,03$ м) и для самолета (при $f=300$ МГц $\lambda=1$ м). Как уже упоминалось, использование MoM для их анализа потребует значительных вычислительных ресурсов. Это приводит к поиску альтернативных или дополняющих методов для снижения вычислительных затрат. В данном случае оптические методы известны как методы асимптотического высокочастотного предела для анализа характеристик рассеяния этих структур.

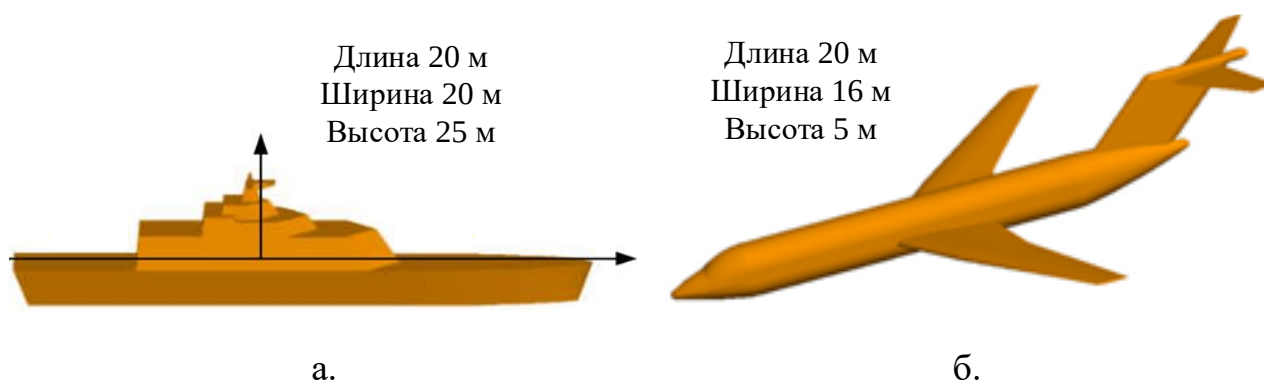


Рис. 3. Примеры крупноразмерных моделей: корабль [62] (а) и самолет [63] (б)

При использовании оптических методов для анализа рассеяния волн существует несколько важных типов волн, которые следует учитывать, включая: волны рассеяния, поверхностные волны, дифракционные волны и передающиеся волны. Вклад в основное рассеянное поле обычно вносят прямое рассеяние и зеркальные отражения (первичный вклад). Между тем эффект дифракции называется вторичным вкладом, и он слабее первичного вклада [64]. Геометриче-

ская оптика (Geometrical optics – GO) является основой этого метода, описывая распространение электромагнитных волн через лучи, предоставляя правила, которые описывают распространение лучей и фронтов волн в реальности. Однако GO упрощает распространение электромагнитных волн и не учитывает многие важные эффекты волн, такие как дифракция и поляризация.

РО является промежуточным методом между GO и полноволновыми методами. Ток (анализируемый с помощью GO) на поверхности или границе между двумя средами, возбуждаемый внешним электромагнитным полем, используется для определения рассеянного поля с помощью поверхностных интегралов. В возбужденных областях, РО применяется к каждому элементу сетки, и предполагается, что в невозбужденных областях ток равен нулю [65]. Это довольно точно для объектов с большими гладкими выпуклыми формами и в случае рассеяния, близкого к отражению. Однако, когда угол падения отклоняется от угла отражения, приближенные вычисления РО считаются менее точными.

Основным ограничением GO или РО является их расчёт эффектов дифракции на краях, поэтому точность этих приближенных методов снижается при применении к объектам с краями или участками резкого изменения формы. Для решения этой проблемы предложены два дополнительных метода: геометрическая теория дифракции (Geometrical Theory of Diffraction – GTD) и физическая теория дифракции (Physical Theory of Diffraction – PTD). GTD является расширением GO через введение эффектов дифракции на краях и углах. Принципиально GTD может предсказывать вклад вторичных (и более высоких) дифракционных эффектов (то есть дифракцию, возникающую от других частей объекта) в рассеяние. PTD предоставляет приближенные расчеты для полей дифракции, исходящих от краев и углов, основанные на токах на границе через поверхностные или линейные интегралы.

1.4. Гибридные оптические методы

Чтобы преодолеть трудности РО/PTD и GO/GTD, предложено объединить их преимущества, устранив их недостатки: сочетание РО/PTD с GO/GTD [65]. Большинство предыдущих работ, использующих РО/PTD-GO/GTD, применяет GO для расчета взаимодействия между поверхностями при многократных отражениях, GTD для моделирования эффектов дифракции на краях, а РО/PTD для вычисления дальнего поля возбуждаемой поверхности после одного или нескольких отражений.

Сочетание GO, РО и PTD просто объясняется в [66]. Плоская возбуждающая волна моделируется как плотная сетка лучей, направленных к цели. Каждый луч отслеживается для определения места выхода. Как место выхода, так и поле луча оцениваются через отслеживание луча, при этом отраженное поле рассчитывается по закону GO. Дальнее рассеянное поле получается путем суммирования векторов различных порядков полей РО с поверхности и полей PTD с краев. Например, для структуры трехгранного УО поле РО создается с использованием сеток на поверхностях, а поле PTD создается от 3 кромок структуры как

$$\vec{E}_{\text{результ}} = \sum_{\text{Несетки}} \vec{E}_{\text{PO}} + \vec{E}_{\text{PTD}}^{\text{кромка1}} + \vec{E}_{\text{PTD}}^{\text{кромка2}} + \vec{E}_{\text{PTD}}^{\text{кромка3}}. \quad (3)$$

На практике GTD можно применять напрямую к поверхностям без необходимости создания сетки [67]. Однако у GTD есть свои ограничения, особенно при работе с непрямими поверхностями. Несмотря на высокую гибкость GTD, при его применении к изогнутым поверхностям, информация об их кривизне полностью теряется. Это приводит к тому, что рассеянное поле не может быть точно определено, когда луч попадает на вогнутую поверхность или поверхность сложной формы. Для решения этой проблемы предложен виртуальный дивергенционный фактор (virtual divergence factor-VDF) в [67]. Когда VDF используется для улучшения гибридного метода GO/PO и PTD, рассеяние от сложных вогнутых объектов или полостей может быть предсказано эффективно и точно.

Метод стреляющих и прыгающих лучей (Shooting and Bouncing Rays – SBR) является высокочастотным приближенным методом, эффективно сочетающим преимущества GO и PO) [68]. SBR выполняет вычисления путем создания множества оптических лучей [69, 70]. Он полностью учитывает отраженные поля, существующие в цели, благодаря чему стал широко используемым в исследованиях рассеяния на объектах сложной формы. Основой SBR является моделирование падающей плоской волны набором плотных лучей с заданной плотностью, затем отслеживаются лучи для моделирования распространения волн в структуре, отраженные поля от поверхностей вычисляются по GO, а дальнейшее рассеянное поле определяется по PO через ток на поверхности. Все рассеянные поля суммируются для получения общего рассеянного поля цели. Оптические методы, такие как PO, SBR и GO, имеют вычислительную сложность $O(N)$ [71].

С высокой эффективностью и гибкостью, SBR широко применен для анализа различных структур [72, 66]. Однако отслеживание оптических лучей и вычисления полей требуют значительного времени для больших и сложных объектов из-за того, что плотность лучевых трубок должна быть больше 10 лучей на λ для обеспечения точной сходимости результатов. Чтобы решить эту проблему, предложена пространственная сегментация с целью снижения затрат на отслеживание лучей. KD-дерево, форма бинарного пространства-разбиения, продемонстрировала более высокую производительность с меньшими затратами на поиск по сравнению с октодеревом. Для ускорения в [63] предложено построение KD-дерева на основе точек (point-based KD-tree construction method – PKCM). Оно изменяет переменную функции эвристики площади поверхности (surface area heuristic – SAH) с числа граней на число точек, что помогает сузить область поиска и оптимизировать производительность, а также поддерживает другие методы, использующие SAH [73].

Моделирование рассеяния объектов с экстремально большими размерами, достигающими тысяч λ , остается сложной задачей для исследователей, даже методами высокочастотного приближения. Для решения этой проблемы SBR–PO в [74] расширена для моделирования рассеяния от сложных объектов в полупространстве, учитывая первичное падение, множественные отражения

внутри объекта, множественные отражения между землей и объектом. Дальние рассеянные поля рассчитываются с использованием функции Грина для полупространства, что позволяет описывать эффекты электромагнитной интерференции для того же тока на поверхности, основанного на теории волн, что невозможно учесть по функции Грина свободного пространства. Результаты показывают, что этот метод не только обеспечивает более высокую точность, но и сохраняет превосходную общую производительность по сравнению с обычным методом SBR-PO.

1.5. Гибридные методы на основе МоМ и оптических методов

Каждый метод наиболее эффективен в тех областях, где он лучше всего подходит. Полноволновые методы (например, МоМ) обеспечивают очень точные расчеты, но не эффективны с точки зрения вычислительных ресурсов для больших электрических структур [75]. Методы высокочастотных приближений выделяются высокой вычислительной эффективностью, но не достигают необходимой точности для малых и сложных структур [76]. На практике современные радиосистемы часто связаны с очень большими поверхностями и имеют сложную структуру с множеством мелких деталей. Поэтому для решения сложных и масштабных электромагнитных задач все большее внимание привлекают гибридные методы [77]. В области моделирования электромагнитного рассеяния, МоМ и оптические методы играют ключевую роль. Таким образом, эффективной стратегией является сочетание преимуществ МоМ и оптических методов для анализа широкого спектра реальных электромагнитных проблем.

Современные гибридные алгоритмы высокочастотных и низкочастотных методов широко используются и могут быть классифицированы как методы на основе оптических лучей (МоМ-GTD/UTD) и методы на основе тока (МоМ-PO) [78]. Первые имеют высокую вычислительную эффективность, но применимы пластинам, цилиндрам и конусам, что ограничивает их универсальность. Вторые считаются более универсальными. Кроме того, PO и МоМ являются методами для высоких и низких частот, соответственно, они основаны на поверхностных токах. Благодаря схожести в дискретизации геометрии моделей, выборе базисных функций и расчетах дальнего поля, гибридизации МоМ и PO быстро продвигается в последние годы.

При использовании МоМ-PO для анализа сложной структуры, вся она делится на области [78, 79], как показано на рис. 4. Основной принцип разделения области основан на поверхностном токе. Области с разрывающимся или резко меняющимся током, такие как края или детали с заметной кривизной поверхности, относятся к МоМ, а плоские области с непрерывным током – к PO. Теоретическая основа гибридизации с использованием матричного уравнения для метода МоМ-PO [80] имеет вид $\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_{\text{МоМ}} + \mathbf{Z}_{\text{PO}}$, где $\mathbf{Z}_{\text{МоМ}}$ – это матрица импеданса для области МоМ, а $\mathbf{Z}_{\text{PO}}$ – вклад области PO, который добавляется к матрице импеданса МоМ.

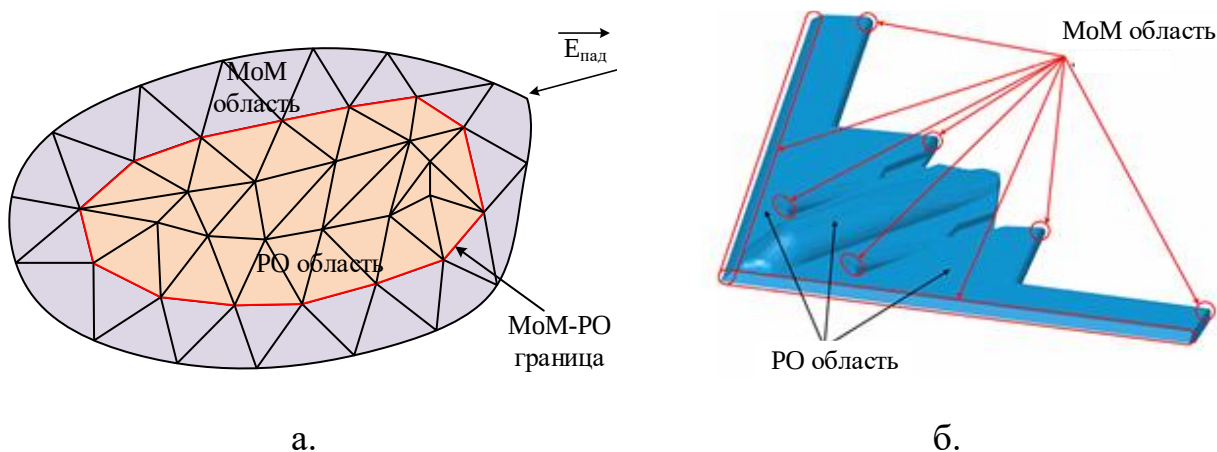


Рис. 4. Принцип деления структуры на области МоМ и РО (а)
и применение к сложным структурам [78] (б)

Методы гибридного МоМ-РО, ранее называемые методами низкими порядком, использовали очень мелкие сетки (размер около $\lambda/10$) для моделирования структуры, что требовало большого числа неизвестных для получения точных результатов. Для решения этой проблемы предложен МоМ-РО высокого порядка [80], способный значительно сократить число неизвестных при анализе различных структур, при этом сохраняя приемлемую точность. Например, в [80] МоМ-РО высокого порядка использует изогнутые треугольники для создания сетки и высокоуровневые иерархические векторные базисные функции для области МоМ, сочетая их с фазово-экстракционными базисными функциями для области РО. В результате число неизвестных значительно уменьшается, а точность и эффективность увеличиваются по сравнению с МоМ-РО низкого порядка.

Ускорение решения МоМ-РО дает адаптивный интегральный метод (adaptive integral method-AIM) [81], за счет оптимизации матрично-векторных умножений, связанных с областями МоМ и РО. Однако, для анализа в широком диапазоне частот, AIM-РО все равно занимает много времени, так как необходимо решать интегральные уравнения для поля на каждой частоте. Для ускорения предложена аппроксимация Чебышева (Chebyshev Approximation Technique – CAT), интегрированная в код AIM-РО [79], где непосредственно с помощью AIM-РО вычисляются только токи на нескольких образцовых частотах, после чего эти токи используются для вычисления коэффициентов разложения в ряд Чебышева, что позволяет точно и эффективно определить неизвестные токи на остальных частотах. По сравнению с традиционным AIM-РО, AIM-РО-CAT может значительно снизить вычислительные затраты, сохраняя при этом приемлемую точность.

Иногда в МоМ-РО вычисление Z_{PO} длительно, поскольку надо отдельно вычислять взаимодействие между любыми двумя базисными функциями в области МоМ через область РО. Для уменьшения времени вычислений и числа неизвестных предложен эффективный итерационный МоМ-РО (Effective Iterative MoM-PO – EI-MoM-PO) [82] для анализа больших объектов, избегая вычисления Z_{PO} за счет итерационного процесса между областями МоМ и РО, по-

ка ошибка тока МоМ больше установленного порога. EI-МоМ-РО позволяет избежать вычисления и хранения матрицы Z_{PO} , что значительно снижает время вычислений и требования к памяти, при этом результаты остаются точными. Кроме того, чтобы поддерживать точность и увеличить эффективность EI-МоМ-РО, в [83] области МоМ и взаимодействия между областями МоМ и РО обрабатываются с помощью MLFMA. Это также позволяет расширить область МоМ для анализа более сложных деталей без роста вычислительных затрат. В [84] EI-МоМ-РО в сочетании с эквивалентным дипольным моментом (equivalent dipole-moment – EDM) помогает заполнить Z_{MoM} и ускоряет оценку связи между областями МоМ и РО. Его преимущество заключается в более легкой реализации, более быстрой и точной работе и применении оптимизированных формул по сравнению с традиционным МоМ-РО. Результаты показывают, что при анализе конуса над параболоидом, EI-МоМ-РО-EDM быстрее МоМ-РО (в FEKO) около 12 раз и EI-МоМ-РО – 3 раз. Кроме того, интеграция граничного условия высокого порядка для импеданса (High-Order Impedance Boundary Condition – HOIBC) в EDM позволяет применять метод для более сложных структур. Например, EI-МоМ-РО-EDM-HOIBC в [85] используется для оценки электромагнитного рассеяния структуры с изотропным или анизотропным покрытием поверхности.

Как уже упоминалось, задача рассеяния структуры с многомасштабной геометрией сложна. МоМ-РО очень подходит для решения таких задач [86], особенно предложенным в [87] гибридом МоМ, РО и алгоритма принципа эквивалентности (equivalence principle algorithm – EPA) (МоМ-РО-EPA), позволяющим решать каждую подзадачу подходящим решателем. С EPA число неизвестных может быть меньше, и решение матричных уравнений становится проще, чем непосредственное решение многомасштабных задач. Средние по размеру части моделируются по МоМ, большие и гладкие – РО, а мелкие части с мелкими деталями – EPA, что улучшает эффективность многомасштабной модели, сохраняя при этом приемлемую точность. Результаты применения МоМ-РО-EPA показывают, что он дает лучшую точность по сравнению с приближением итеративной физической оптики и работает быстрее традиционного МоМ, при моделировании 4 объектов с различными размерами и формами.

В настоящее время повышение вычислительной эффективности гибридных алгоритмов, в основном, сосредоточено на уменьшении размера матриц и ускорении определения освещенности области РО [83-87]. Также предприняты попытки применения MLFMA-РО для вычислений рассеяния на импедансных поверхностях [88]. Однако эти исследования, в основном, фокусируются на объектах с простой формой и малыми размерами, в то время как задачи для крупных, сложных структур с покрытиями из разных материалов остаются нерешенными. С ростом сложности формы и материалов целей, гибридные алгоритмы сталкиваются с большими трудностями при обработке сопряжения двух областей, оценке коэффициента освещенности и вычислении токов на поверхности цели. Исследование [78] сочетает МоМ-РО и граничное условие для импеданса (impedance boundary condition – IBC) для целей с анизотропным покрытием, преобразуя задачу рассеяния в задачу эквивалентного излучения на импе-

дансных поверхностях. Этот метод использует ИВС через векторы импеданса поверхности для описания электромагнитных характеристик среды. Результаты показывают, что МоМ-РО-ИВС снижает число неизвестных в матричных расчетах для области МоМ до 10 раз, улучшая более 2 раз вычислительную эффективность.

Кроме того, для повышения точности и эффективности гибридных алгоритмов РО-МоМ, разработан метод РО_SBR/МоМ [77], в котором возбуждающее поле включает не только падающую волну, но и многократные отраженные поля из области SBR, которые вносят вклад в интегральное уравнение в области МоМ. Для области SBR этот метод также учитывает взаимодействие с областью МоМ, а затем интегрирует РО для вычисления рассеянного поля. Результирующее рассеянное поле – это наложение рассеянных полей как из области SBR, так и из области МоМ. Поскольку эти области находятся близко друг к другу, в [89] SBR/МоМ также определяет вектор возбуждения для области МоМ за счет близкого рассеянного поля от области SBR. Второй метод считается более точным, чем первый. При этом, МоМ-SBR/РО хорошо подходит для решения задач рассеяния сложных объектов, больших по электрическому размеру, таких как спутники и т.д.

Кроме того, для ускорения гибридных методов МоМ-РО применяются GPU, CPU и их комбинации, как указано в [74, 76, 78, 90, 91]. МоМ, оптические методы и их гибриды также используются во многих САПР для электромагнитных задач. Одна САПР может использовать один или несколько методов. Таблица 7 представляет собой статистику по популярным САПР, а также собственным разработкам [92], использующим МоМ, оптические методы и их гибриды.

Таблица 7 – Некоторые популярные САПР, применяющие МоМ, оптические методы и их гибриды

Основа	САПР	Используемые методы
Проводное моделирование	TUSUR.EMC	МоМ_ПС со ступенчатыми базисными функциями
	4NEC2	МоМ_ПС с треугольными базисными функциями
	MMANA-GAL	МоМ_ПС с треугольными базисными функциями
	AN_SOF	МоМ, CМоМ
Проводное и поверхностное моделирование	FEKO	МоМ, MLFMM, РО, LE-РО, RL-РО, UTD, РО_MLFMA, SBR
	CONCEPT-II	МоМ, МоМ_ПС с треугольными базисными функциями
Поверхностное моделирование	POfacets4.5	РО (не включены множественные отражения и дифракции)
	HFSS	МоМ, ACA, MLFMM, РО, SBR+
	CST	МоМ, CMA, SBR, MLFMM
	[92]	МоМ, FMM, РО, SBR, МоМ-РО
	IE3D	МоМ
	Sonnet	МоМ
	SYSCOS [93]	РО_GO_PTD
	GEMACS	МоМ, GTD, МоМ-GTD

1.6. Сравнение точности и эффективности методов

Для решения различных задач важно учитывать баланс между эффективностью и точностью используемых методов. Поэтому необходимо сравнение различных методов для четкого выявления их преимуществ и недостатков. Благодаря бурному развитию компьютерных технологий и возможностям проведения измерений с высокой точностью, сравнение численных методов стало все более важным и привлекающим внимание как в научных исследованиях, так и в практическом применении.

В [94] рассматривалась МЭПР макета судна как сложной цели большого размера с точки зрения электромагнитных характеристик. Соотношение между размерами макета (L , W , H) и λ на различных частотах приведено в таблице 8. Форма судна в различных плоскостях и совпадение полученных результатов по РО и МоМ, оцененное с помощью коэффициента корреляции Пирсона, представлены на рис. 5.

Таблица 8 – Отношение размеров макета к длине волны при изменении частоты

f , ГГц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L/λ	1,95	3,91	5,87	7,83	9,79	11,75	13,71	15,67	17,63	19,59
W/λ	0,27	0,55	0,82	1,1	1,37	1,65	1,92	2,2	2,47	2,75
H/λ	0,2	0,41	0,62	0,83	1,04	1,25	1,46	1,67	1,88	2,09

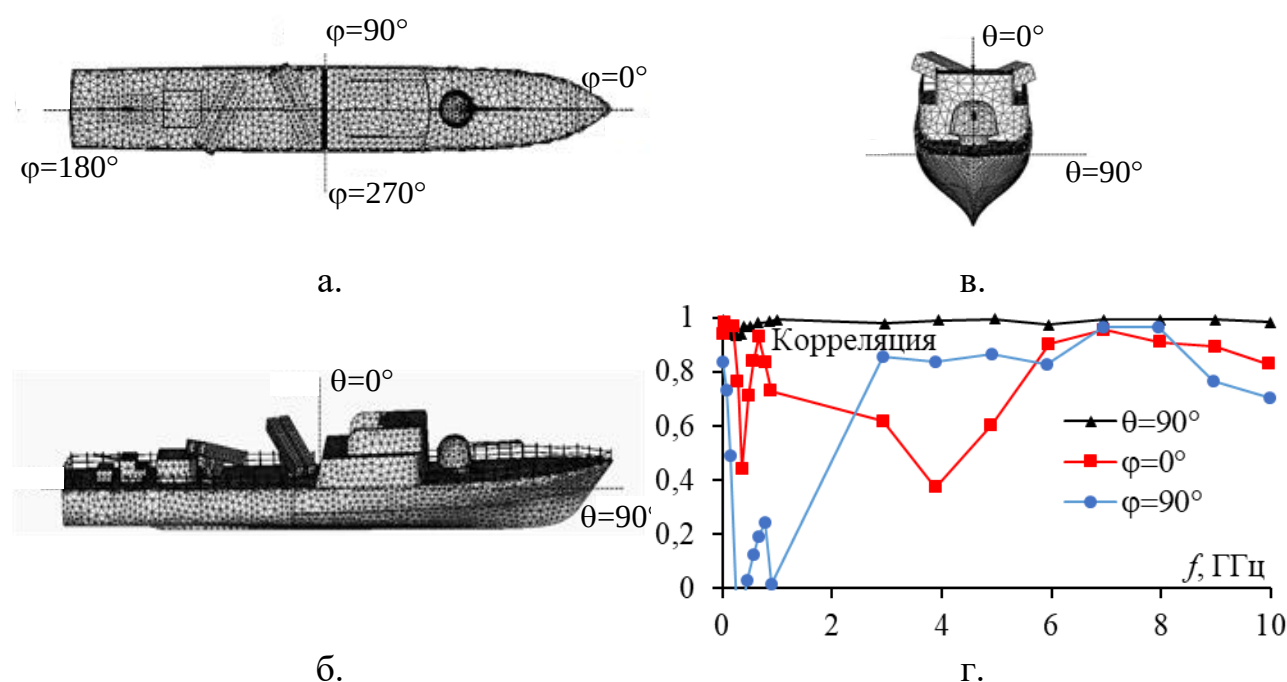


Рис. 5. Сеточная форма судна сверху (а), спереди (б), сбоку (в) и частотные зависимости коэффициента корреляции между МоМ и РО (г)

В [94] отмечается, что на низких частотах ($f < 4$ ГГц) полученная МЭПР с использованием РО значительно отличается от полученной по МоМ, особенно в передней и задней частях судна. Это связано с тем, что размеры этих сторон судна меньше λ (W/λ и H/λ меньше 1). Напротив, на высоких частотах разница

между двумя методами незначительна, так как приближение РО становится корректным. В [94] также отмечается, что на разных частотах МЭПР, полученная по РО в плоскости $\theta=90^\circ$, хорошо совпадает с МЭПР по МоМ для направлений возбуждения с обеих сторон судна ($\varphi=90^\circ$ и $\varphi=270^\circ$), так как эти боковые поверхности гладкие и имеют большие электрические размеры. Эти замечания подтверждаются графиками зависимости коэффициента корреляции от частоты (рис. 5б). В плоскостях $\varphi=90^\circ$ и $\varphi=0^\circ$, МЭПР, полученные по РО и МоМ, хорошо совпадают друг с другом на высоких частотах (L/λ в диапазоне частот от 5 до 10 ГГц около или выше 10). Однако в [94] также подчеркивается, что МоМ всегда дает результаты, которые хорошо совпадают с измеренными на всем частотном диапазоне. Например, МЭПР по МоМ и РО и их отклонения с измерением приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Сравнение результатов МЭПР по МоМ и РО с измеренными

Метод	Среднее значение МЭПР (дБм ²)	Среднее отклонение с измерением (дБм ²)	Стандартное отклонение с измерением (дБм ²)
МоМ	-11,13	-11,99	-8,79
РО	-11,13	-12,66	-12,38

МоМ-ПС (TUSUR.EMC), МоМ с RWG-базисной функцией (в FEKO) и РО также были сравнены для пластины при $f=10$ ГГц. Несмотря на то, что рассматриваемая пластина имеет плоскую поверхность и довольно большие электрические размеры ($L=0,3$ м= 10λ), результаты, полученные с использованием РО, все равно не точные, как МоМ (в FEKO) или МоМ-ПС, особенно в боковых лепестках поля. Это видно на рис. 6 в обоих случаях, когда падающие волны имеют вертикальную и горизонтальную поляризацию, особенно, когда падающая волна имеет вертикальную поляризацию, где совпадение результатов МоМ (FEKO), МоМ-ПС и измерений очень хорошее.

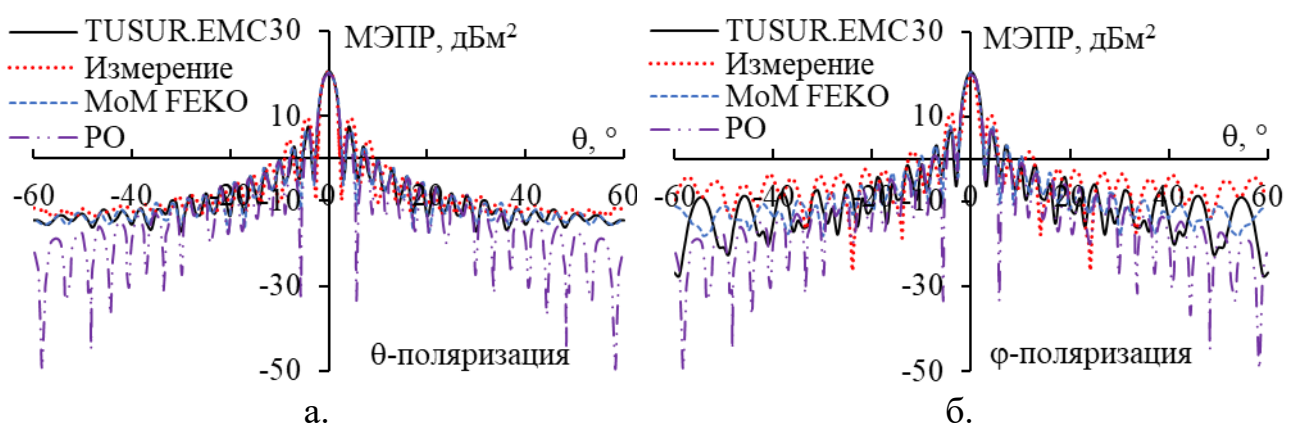


Рис. 6. МЭПР пластины при возбуждении плоской волной с вертикальной (а) и горизонтальной (б) поляризацией [95]

В [96, 8] сравнены результаты MLFMM и SBR с измеренными МЭПР для макета самолета при падении волны с вертикальной поляризацией. Таблица 10 показывает число ячеек сетки и время вычислений для этих методов.

Таблица 10 – Сравнение времени моделирования самолета по MLFMM и SBR

f , ГГц	λ , мм	W/λ	L/λ	H/λ	MLFMM		SBR	
					Число треугольников	Время моделирования, ч	Число треугольников	Время моделирования, ч
4	75	15,8	24,8	7,87	278892	9	161052	0,57
8	37,5	31,6	49,6	15,73	391398	14	162634	0,58
12	25	47,4	74,4	23,6	763132	18	161136	0,83
16	18,75	63,2	99,2	31,47	868346	22	162706	0,8

Макет самолета и диаграмма средней МЭПР в плоскости азимута по моделированию и измерениям на различных частотах показаны на рис. 7. Видно, что на 4 ГГц разница между SBR и MLFMM по сравнению с экспериментальными результатами находится в пределах 3 дБ и еще меньше на 8 и 12 ГГц, в то время как максимальна на 16 ГГц. На этой частоте λ уже мала, чтобы выделять мелкие детали структуры, и поэтому отклонение, возникающее в процессе изготовления и измерений, становится больше, чем на низких частотах, что влияет на сравнение с результатами моделирования. Кроме того, небольшое отклонение между результатами моделирования и реальными данными на всех частотах может быть связано с особенностями материала при изготовлении модели и возможными неидеальными условиями в безэховой камере. В целом, SBR дает результаты, довольно точно совпадающие с MLFMM, при этом вычислительный процесс значительно быстрее [8]. Это не умаляет роли MLFMM как метода с высокой точностью, необходимой для точного анализа сложных структур.

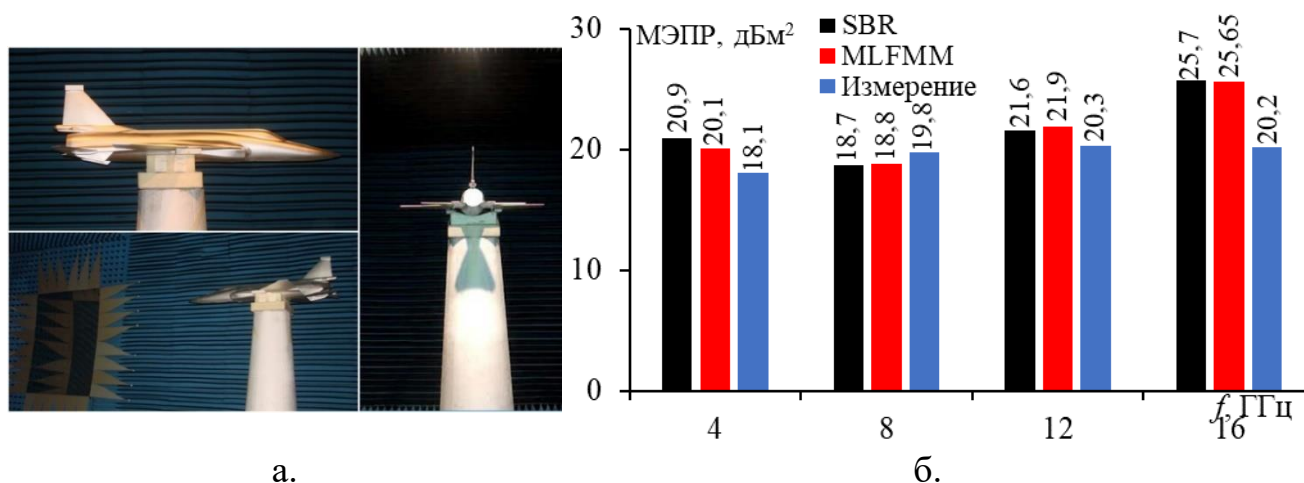


Рис. 7. Макет самолета (а) и частотные зависимости среднего значения МЭПР по различным методам (б)

Аналогичные замечания могут быть сделаны при сравнении результатов MLFMM (в FEKO и CST), PO (в FEKO) и PO-SBR (в SigmaHat), с измеренными для модели Боинг 707 в [97, 98]. Точность оптических методов повышается с ростом частоты. В диапазоне частот 10-17 ГГц значения МЭПР (>-5 дБм²), полученные по оптическому методу, кажутся немного ближе к измерениям, чем

MLFMM. Результаты PO_SBR с малыми МЭПР ближе к измеренным, чем РО, на частоте 17 ГГц. В области более низких МЭПР точность MLFMM значительно превосходит оптические методы. MLFMM является самым точным методом как на 10, так и на 17 ГГц, а PO-SBR – наиболее эффективным по вычислительным ресурсам.

Сравнение МЭПР ракеты ($990,6 \times 635 \times 279,4$ мм) при $f=12$ ГГц, вычисленных GO/PO-PTD-VDF и РКСМ в [67] и [63], показано на рис. 8. Видно, что результаты гибридных алгоритмов значительно улучшаются при использовании коэффициента VDF для криволинейных поверхностей и ускорении с помощью К-дерева, что дает результаты, близкие к MLFMM. В частности, результаты с использованием К-дерева не только достигают высокой точности, но и требуют значительно меньшего времени вычислений, чем GO/PO-PTD-VDF.

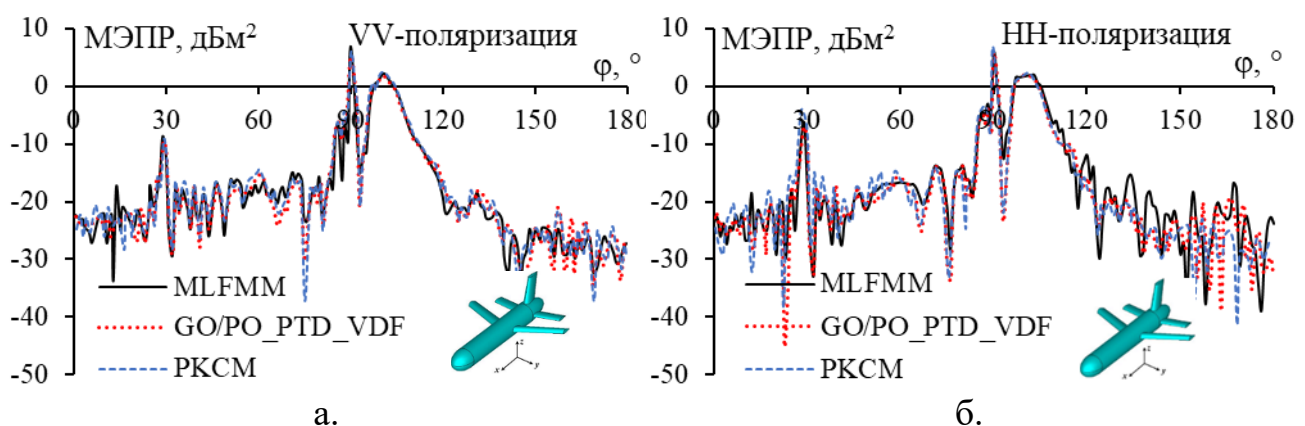


Рис. 8. МЭПР ракеты при возбуждении плоской волной

с вертикальной (а) и горизонтальной (б) поляризацией

Таблица 11 – Сравнение времени моделирования ракеты методами РКСМ и GO/PO-PTD-VDF

Длина граней треугольной сетки, мм		18,75	9,38	6,25	4,69	3,75	3,13
Время, с	РКСМ	14,863	18,416	20,991	24,167	28,204	29,878
	GO/PO-PTD-VDF	35,7	61,6	143,9	346,8	920,3	1515,8

В другом примере, параболоид диаметром 12λ возбуждается плоской волной с Х-поляризацией, перпендикулярной открытой поверхности структуры. Структура разделена на область МоМ на крае параболы и область РО в её центральной части [83]. Модель параболоида и БЭПР, полученные по различным методам, изображены на рис. 9. Видно, что метод итеративной гибридизации с МоМ достигает довольно хорошего согласия с MLFMA, в то время как результаты EI-MLFMA-РО отличаются от MLFMA при анализе рассеяния в боковой области параболоида.

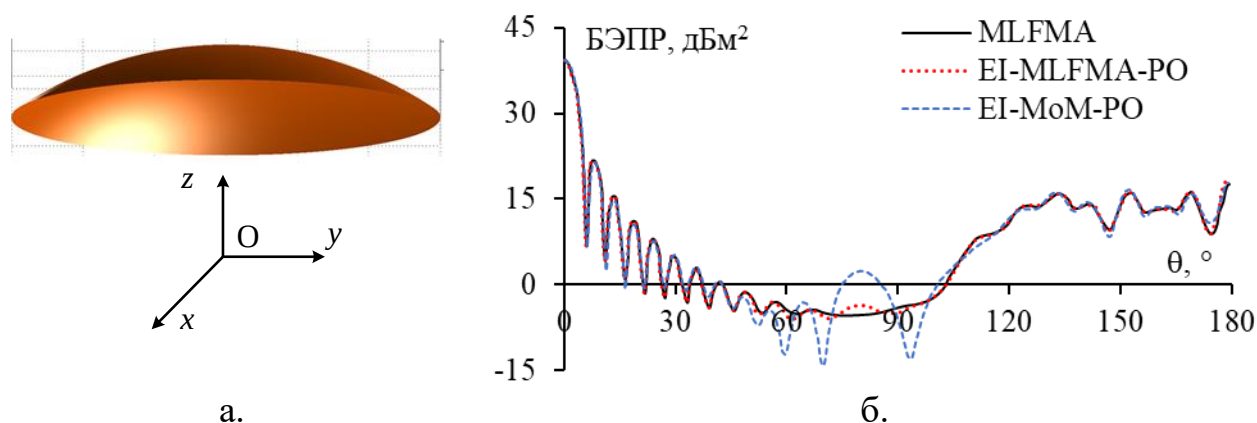


Рис. 9. Модель параболического отражателя (а) и его БЭПР при возбуждении плоской волной вдоль оси Oz (б) [83]

В целом, можно отметить, что МоМ всегда дает более точные результаты по сравнению с оптическими методами. Однако по вычислительной эффективности оптические методы более предпочтительны. Гибридные методы, сочетающие МоМ и оптические методы, были исследованы с целью устранения недостатков исходных методов. Тем не менее, с точки зрения точности, гибридные методы пока не достигают точности МоМ. Выбор подходящего метода полностью зависит от условий и специфических требований задачи. МоМ, благодаря своей способности точно вычислять токи на поверхности структуры, всегда лучше для задач, требующих высокой точности, особенно при анализе мелких и детализированных структур. Оптические методы превосходят МоМ по вычислительной эффективности и подходят для задач, требующих низких вычислительных затрат. Гибридные методы представляют разумный выбор между ними, который может эффективно решать задачи крупного масштаба без значительной потери точности.

2. Распространенные рассеиватели

Пассивные рассеивающие структуры служат эффективными элементами, используемыми для повышения возможностей обнаружения. Типичными их примерами являются линзы Люнеберга, решётка Ван Атта и УО. Каждая из них структур имеет свои особенности и применяется в различных областях.

2.1. Линза Люнеберга

Линза Люнеберга представляет собой диэлектрический шар, показатель преломления которого уменьшается от высокого значения в центре до показателя преломления окружающей среды на поверхности. Также она может быть изготовлена из диэлектрических материалов с несколькими слоями, каждый из которых имеет разные значения показателя преломления. Она позволяет плоской волне, поступающей на линзу, сходиться в точке на противоположной поверхности, а рассеянные лучи будут обладать высокой направленностью. Линза Люнеберга обеспечивает возможность сканирования широких областей и имеет сверхширокую полосу частот, поэтому она широко применяется в самолетах, кораблях, ракетах, системах позиционирования в помещениях [99], а также для

увеличения МЭПР беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [100]. Однако линза Люнеберга имеет и некоторые недостатки, особенно в процессе производства, на миллиметровых и субмиллиметровых волнах [101], сложность используемых материалов и процессов обслуживания и ремонта. Кроме того, диэлектрические материалы, используемые в этой структуре, могут вызвать определенные потери.

2.2. Решётка Ван Атта

Еще одной примечательной рассеивающей структурой является решётка Ван Атта, которая состоит из решетки антенн (не менее 4), расположенных симметрично относительно центральной точки геометрической оси массива и соединенных между собой проводниками с определенной длиной [102]. Когда плоская волна возбуждает антенны, волна проходит через проводники между антеннами, а затем излучается обратно, создавая плоскую волну, направленную в противоположную сторону от падающей волны [103]. Благодаря особой структуре этих соединений решётка Ван Атта обладает способностью рассеивать волну с очень широким углом. Эта структура может быть изготовлена с использованием печатных плат, что помогает уменьшить ее размер и массу. Однако сложность производства достаточно высока. Более того, длина проводников связана с частотой падающей волны, поэтому решётка может эффективно рассеивать волну только в узком диапазоне частот. Эта особенность используется для создания компактных меток радиочастотной идентификации (Radio Frequency Identification-RFID) [102] для применения в беспроводных терагерцовых соединениях в помещениях [104], а также в беспроводных сенсорных технологиях [105]. Кроме того, решётка Ван Атта может использоваться в технологии скрытности, основанной на принципе фазовой компенсации двух сигналов одинаковой амплитуды [106]. Добавление сдвига фазы 180° в одну половину проводящих путей решётки Ван Атта может создать мощный эффект фазовой компенсации, что поможет улучшить скрытность структуры [107].

2.3. Угловые отражатели

Среди распространенных рассеивателей, УО высоко оцениваются благодаря своей способности создавать большое обратное рассеяние в широкой полосе частот (аналогично линзе Люнеберга), простоте структуры, легкости в производстве, быстрой установке, низким затратам и легкости обслуживания. Однако одним из недостатков УО является более узкая ширина рассеяния по сравнению с другими рассеивателями. Это свойство можно явно наблюдать на рис. 10, где МЭПР решётки Ван Атта, треугольного трехгранного УО (ТТУО) и линзы Люнеберга сравниваются между собой. В таблице 12 перечислены особенности производства и характеристик популярных рассеивателей.

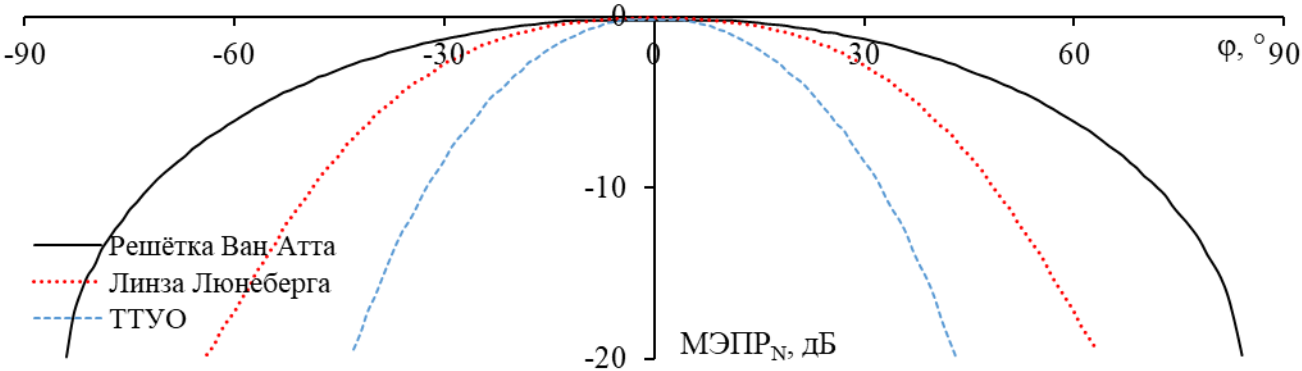


Рис. 10. Нормированные МЭПР различных структур

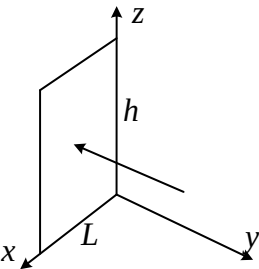
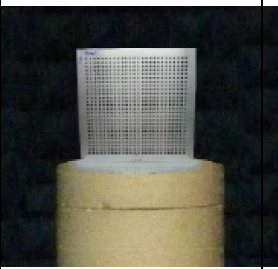
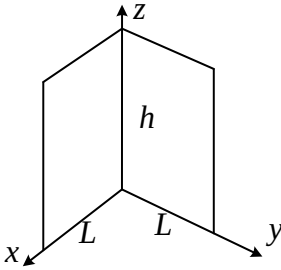
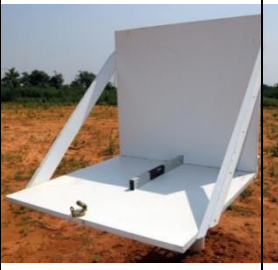
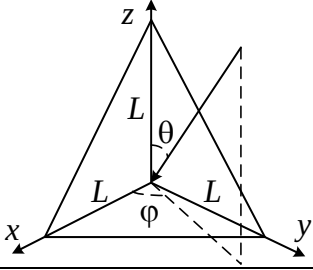
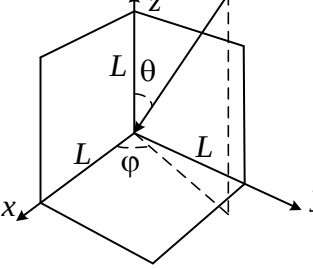
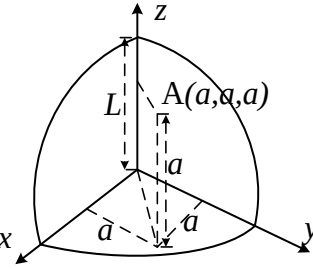
Таблица 12 – Обобщение особенностей некоторых рассеивателей

Структура	Материал	Размер	Ширина МЭПР	Уровень МЭПР	Поляризация	Диапазон частот	Особенность производства	Примечания к применению
Линза Люнеберга	Многослойный диэлектрик	Средний	Средняя	Средний	Все типы	Широкий	Сложная: изготовлена как диэлектрическая линза с переменным показателем преломления	Широкое применение
Решётка Van Atta	Печатная плата	Наименьший	Наибольшая	Наименьший	Зависит от используемой антенны	Узкий	Сложная: требует сложной схемы соединений между отдельными антеннами решётки	Структуры в электронных схемах, выбор частоты и т.д.
УО	Проводящий металл	Наибольший	Наименьшая	Наибольший	Все типы	Широкий	Простая: конструкция в виде двух или трех ортогональных платин	Широкое применение

2.3.1. Структура УО

УО создаются из отражающих пластин различных форм. С геометрической точки зрения, когда падающая волна возбуждает открытые поверхности структуры, она рассеивается обратно в соответствии с механизмом одно-, двух- или трехкратного отражения от граней. Структура и характеристики рассеяния таких отражающих поверхностей, а также распространенных типов УО, представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Характеристики рассеивающих пластин и УО

Ссылка	Структура	Модель	Максимальный уровень МЭПР по РО	Ширина МЭПР в θ -плоскости и [108]	Реальная структура
[109]	Плоская пластина		$\frac{4\pi L^2 h^2}{\lambda^2}$	6°	
[110]	Двухгранный УО (ДУО)		$\frac{8\pi L^2 h^2}{\lambda^2}$	6°	
[109]	Треугольный трехгранный УО (ТТУО)		$\frac{4\pi L^4}{3\lambda^2}$	37°	
[111]	Прямоугольный трехгранный УО (ПТУО)		$\frac{12\pi L^4}{\lambda^2}$	28°	
[112, 108]	Круглый трехгранный УО (КТУО)		$\frac{0,507\pi^3 L^4}{\lambda^2}$	32°	

При анализе ТУО оптическими методами механизм трехкратного отражения от всех граней ТУО был определен как основной фактор, способствующий росту ширины МЭПР. Однако на вершинах ТТУО происходит только двухкратное отражение. Эта область занимает примерно 1/3 общей площади ТТУО и может оказывать негативное влияние на рассеянное поле, особенно когда двухкратные отражения взаимодействуют с землей. В то же время, ПТУО

не сталкивается с этой проблемой. По этой причине в работах [113, 114] исключили эти негативные области. Удаление их не только улучшает эффективность рассеяния, но и значительно снижает массу и площадь поверхности ТТУО по сравнению с исходной структурой. На рис. 11 представлена реальная структура ТТУО и некоторые ее варианты срезов. Видно, что каждый метод разрезания и размер оставшейся площади раскрыва ТТУО влияют на результаты поля рассеяния. Интересно отметить, что разрезание ТТУО перпендикулярно ортогональной оси между гранями (ТТУО 3, ТТУО 4) приведет к большей деформации МЭПР, чем резка кромок и ортогональных линий равномерно (ТТУО 2).

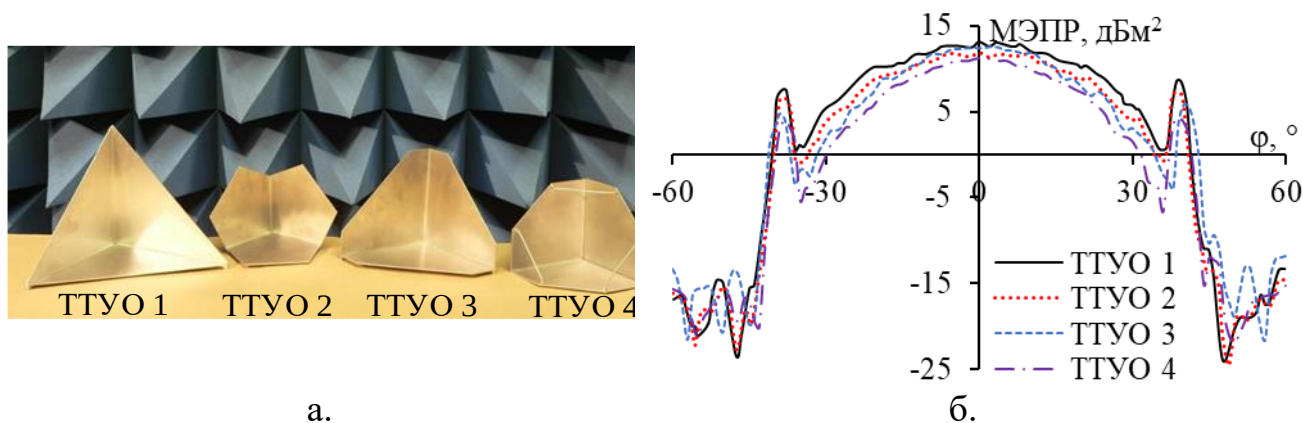


Рис. 11. Формы урезанных ТТУО с различными размерами краев [113] (а) и их МЭПР [114] (б)

2.3.2. Усовершенствование УО

Традиционные ТУО способны создавать широкую МЭПР только на их открытой поверхности. В то же время, идеальный радиолокационный отражатель должен обладать двумя важными характеристиками: способностью отражать волну с большой мощностью и равномерно из всех направлений. Для достижения покрытия всех угловых диапазонов и азимутальных углов необходимо использовать более сложные ТУО [108]. На рис. 12а представлены различные формы усовершенствованных ТУО, в то время как рис. 12б, в и г показывают МЭПР этих структур на частоте 9 ГГц и с вертикальной поляризацией. Видно, что эти усовершенствованные структуры не только расширяют область рассеяния, но и увеличивают уровень МЭПР: ширина МЭПР увеличена в 4 раза, особенно в области $\theta=30-90^\circ$, и уровень МЭПР увеличен в некоторых точках падающей волны, возбуждающей края отдельных ТУО [108], благодаря росту площади поверхности усовершенствованного УО.

Кроме того, существует множество способов рациональной компоновки отдельных структур УО для увеличения покрытия области обратного рассеяния ТУО [108]. Некоторые из таких структур представлены в таблице 14.

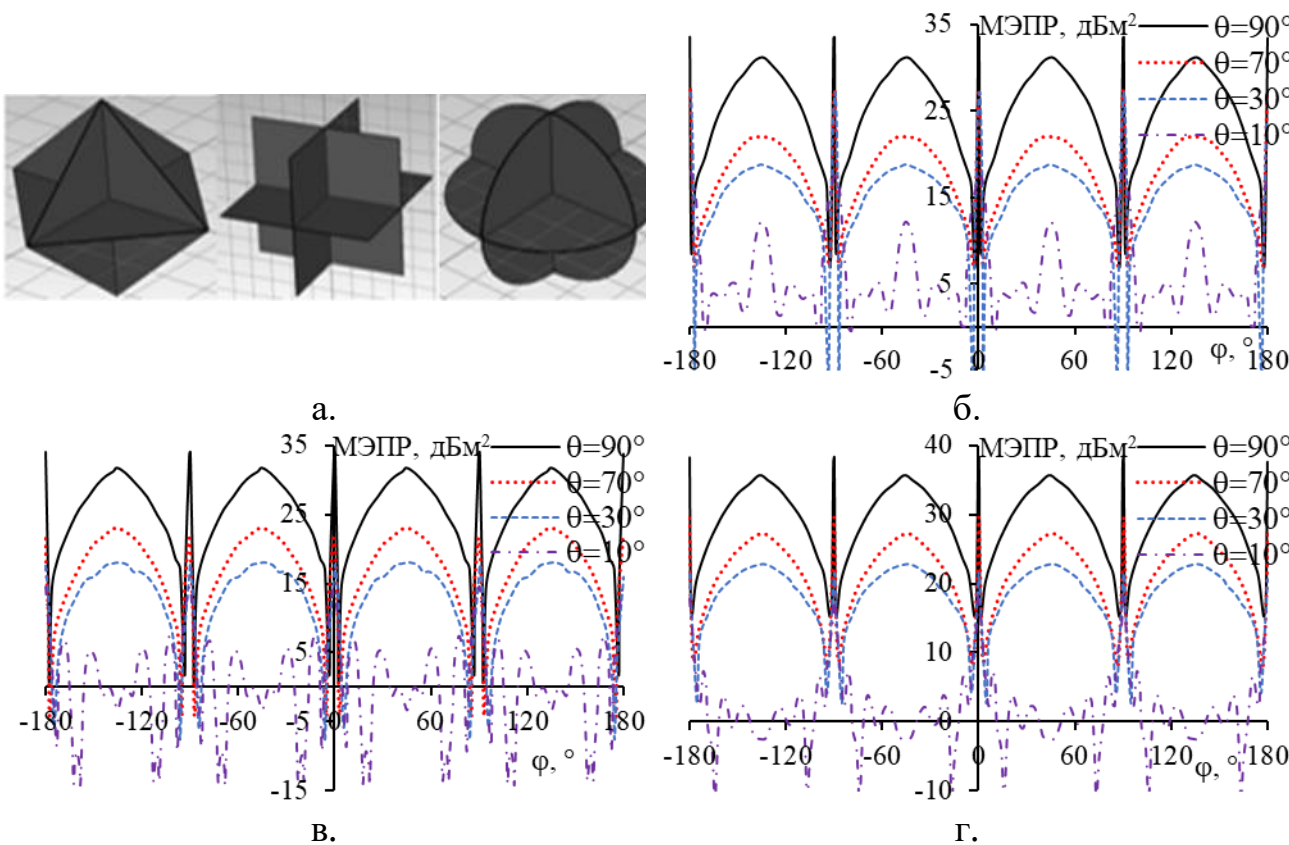
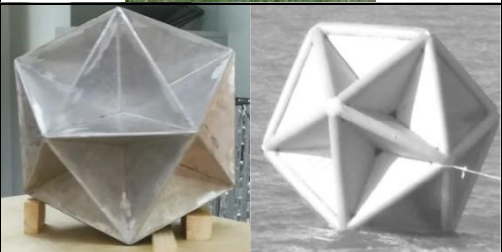
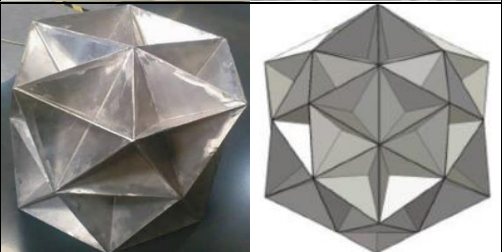
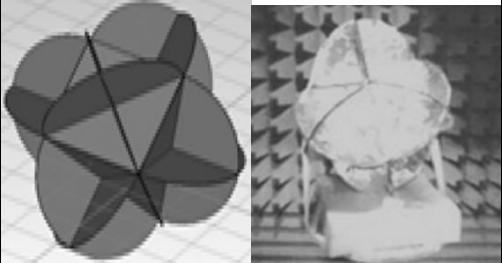


Рис. 12. Октаэдрические ТУО (а) и МЭПР для
треугольных (б), квадратных (в) и круглых (г) октаэдрических ТУО

Таблица 14 – Некоторые усовершенствованные конструкции на базе УО

Ссылка	Название	Структура	Приложение
[115]	Четырехугольник ТУО		Радарные системы с синтезированной апертурой (InSAR)
[116, 117]	Октаэдрический ТТУО		Морские приложения, InSAR
[118]	УО с шаровым отражателем Lombo		Целевое моделирование

Ссылка	Название	Структура	Приложение
[115]	Урезанный ТТУО		Калибровка SAR
[119, 120]	Икосаэдрическая ТТУО		Морские приложения, ложная цель
[119, 121]	30-элементная модель УО		Морские и военные приложения
[115]	Октаэдрическая КТУО		Морские приложения, выявление опасностей на реке и море
[108]	Икосаэдрические УО		Морские приложения

2.3.3. Приложения УО

В контексте современной войны на море управляемые противокорабельные ракеты стали основным оружием [122], и разработано множество методов постановки помех для радиолокационных систем (РЛС). Эти методы, в основном, используют активные помехи, однако создающие пассивные помехи УО также широко применяются благодаря их дешевизне. УО используются в качестве мишеней, имитирующих, например, радиолокационные управляемые ракеты, радары слежения и др.) в системах радиоэлектронного противодействия за пределами судна [123] (рис. 13). Когда радиолокационная волна отражается от УО, сигнал возвращается и вызывает помехи в каналах слежения радар, что мешает ему отличить корабль от УО из-за неотличающихся отражений от них по времени, частоте и пространству [124]. В результате радар переключает слежение на УО и игнорирует корабль [125].

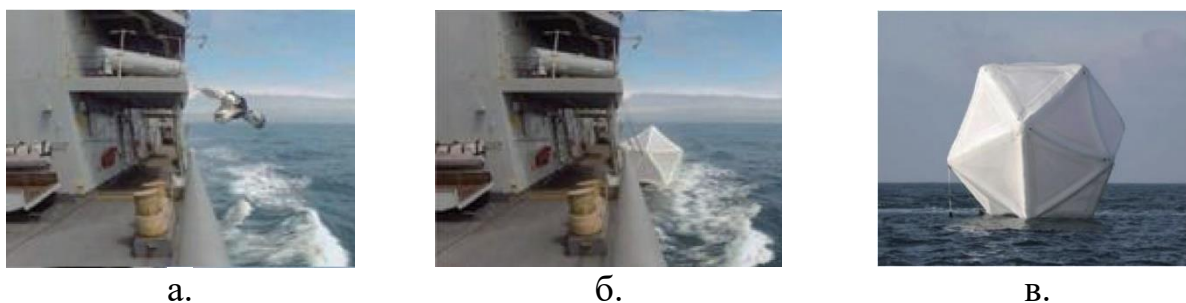


Рис. 13. Надувной УО, используемый для военного корабля [126]

С увеличением применения УО для создания помех радарам, разработано несколько различителей между кораблем и УО, основанных на их уникальных характеристиках рассеяния [127]. Одним из типичных методов является классификация через анализ доплеровских параметров движения корабля и УО [128], с использованием алгоритма квадратичного распределения коэффициента изменения частоты. Помимо таких факторов, как амплитуда, фаза и доплеровское смещение, характеристики поляризации рассеянного поля также играют важную роль в различении корабля и УО [129]. Рассеянное поле, полученное от корабля и УО, будет проанализировано через поляризационную матрицу рассеяния [129]. После анализа будет использован метод опорных векторов для определения корабля и УО на основе различий в их поляризационных характеристиках [129, 124]. В результате рассеянное поле УО будет отфильтровано, что позволит точно выделить отдельные цели. Однако данный метод подвержен влиянию точности измерений поляризации, что может снизить надежность результатов [130]. Другим методом является использование алгоритмов машинного обучения, основанных на различиях профиля дальности радара с высоким разрешением [131]. Результаты применения машинного обучения показывают, что точность распознавания составляет более 91%, при среднем времени обучения всего около 0,2 с. Однако этот метод все еще ограничен количеством доступных УО [130].

Параллельно с методами подавления помех от УО, также разработаны методы оптимизации и гибридизации УО, направленные на создание более сложных и эффективных помех. В [132] предложен метод создания помех с комбинированным использованием дипольных заграждений и УО для противокорабельных ракет. Однако эти структуры, по-прежнему, сталкиваются с ограничениями в возможности модуляции входящих волн. В последние годы исследования стали сочетать УО с метаматериалами для создания структур с сильным рассеянием и улучшенной модуляцией [133]. Одним из таких решений является использование экрана Солсбери для изменения поляризационных характеристик [134]. В другом исследовании [135] представлен поглощающий слой с резистивной пленкой, установленный на ТГУО (рис. 14а), который помогает поддерживать ширину и уровень МЭПР (колебания около 1 дБм²), при этом не снижая чувствительности поляризации, что маскирует в широком диапазоне частот (8-40 ГГц). Кроме того, в [122] представлен способ, создающий сложные угловые помехи для импульсных радаров в автоматическом режиме слежения

(рис. 14б). Он основан на УО с электронной настройкой, использующей миниатюрные волнопроникающие частотно-избирательные поверхности (frequency-selective surface-FSS).

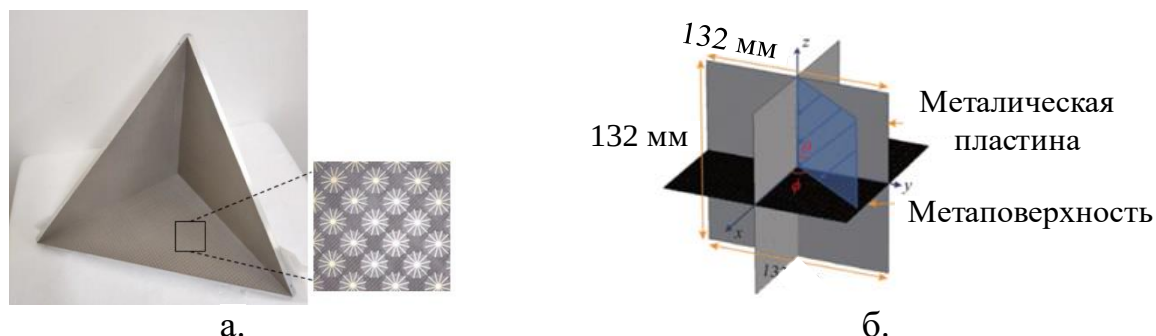


Рис. 14. ТТУО с нижней пластиной, покрытой абсорбирующим слоем с резистивной пленкой, [135] (а) и УО для создания эффекта обманного угла [122] (б)

Кроме того, воздушные УО (ВУО) запускаются в воздух для эффективного отражения сигналов, играя роль мишени. ВУО состоят из УО, обычно подвешенных с помощью парашюта или воздушного шара, что позволяет им оставаться в воздухе дольше [136]. Некоторые выдающиеся версии ВУО включают WIZARD, разработанный компанией Rafael, ОУО – Rheinmetall, SEALE – Lacroix Defense, и TORERO – IHI Aerospace и Chemring Group [136]. ВУО могут быть запущены с авианосца с помощью ракет или минометов, что позволяет быстро разворачивать и продлить их пребывание в воздухе, тем самым повышая эффективность боевых действий.

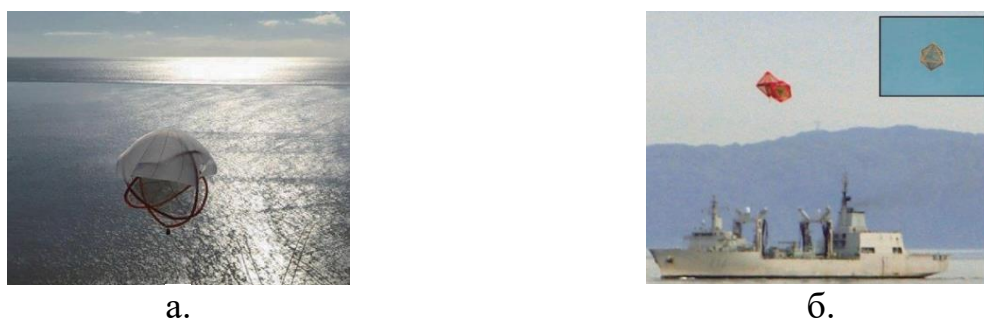


Рис. 15. Воздушный УО (а) при запуске в воздух с военного судна (б) [126]

Исследования по УО применяются для создания скрытных структур. Исследования показали, что ДУО и ТУО часто непреднамеренно образуются в механических конструкциях кораблей, судов, самолетов и военной техники в местах, где поверхности ортогональны друг другу. Эти места могут сильно рассеивать электромагнитные волны, увеличивая вероятность обнаружения. Поэтому обработка этих углов поможет уменьшить рассеяние цели. Одним из решений является использование поглощающих материалов на поверхности целей для снижения рассеяния. Однако такие материалы имеют очень высокую стоимость, требуют регулярного обслуживания и сложны в поддержании, даже они могут не эффективно работать в суровых условиях, например, в зонах с силь-

ными дождями [137]. Другим методом является изменение формы при проектировании кораблей и транспортных средств, особенно где поверхности перпендикулярны [138]. Однако этот метод требует изменений в изначальном проектировании цели и трудно модернизируем.

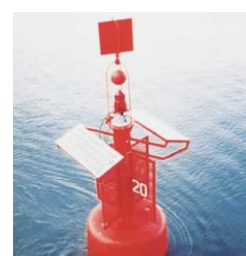
Кроме роли мишени для отвлечения внимания в военных целях, ВУО также широко используются в ситуациях, когда требуется точное измерение скорости ветра в районах моря, которые ещё не были изучены, где дистанционные измерения недостаточно точны или невозможны при непосредственном перемещении авианосца с оборудованием для измерения ветра. После запуска ВУО в желаемую точку на море он может стабильно двигаться в направлении ветра [139]. Тогда скорость ВУО измеряется радаром на основе принципа Доплера. Кроме того, в традиционных морских приложениях УО также помогают обеспечивать безопасные условия для транспортировки на реках и морских акваториях. Они часто устанавливаются с помощью стационарных креплений на бакен [140, 141].



а.



б.



в.

Рис. 16. ВУО, используемый для измерения скорости ветра [136] (а), и УО, устанавливаемые на бакен [140, 141] (б, в) в морских приложениях

УО широко применяются для интерферометрического радара с синтезированной апертурой (Interferometric synthetic aperture radar-InSAR) в дистанционном зондировании. В этой области УО предпочтительны благодаря их мощному полю рассеяния, которое может подавлять все остальные отражённые сигналы в ближайшем окружении. Установка УО в целевой точке превращает эти места на Земле в постоянные рассеивательные точки, что позволяет проводить измерения с высокой точностью, как показано в предыдущих исследованиях [142]. Используя ТУО, технология InSAR может предоставлять точные измерения до миллиметров [142]. Например, в [143] УО использованы для целей дистанционного зондирования со спутниками, как Sentinel-6 MF, Sentinel-3B и CryoSat-2, и получены результаты измерения с Sentinel-6 MF с отличной точностью. Кроме того, УО также использовался в сочетании с другими спутниками для целей дистанционного зондирования, такими как Radarsat-1, Radarsat-2, Terra SAR X và Cosmo-Skymed [144].

УО особенно предпочтительны в дистанционном зондировании в тех районах, где использование природных поверхностей затруднено или невозможно. Ярким примером является таяние льда на ледниках, что вызывает быстрые изменения в отражательной способности ландшафта. Многие области, связанные с движением больших айсбергов, которые влияют на высоту ледяных

гор, могут быть источником потери установленной характеристики рассеяния [145]. Таким образом, использование технологии InSAR, основанной на отражении с природных поверхностей в таких районах, может столкнуться с определёнными ограничениями. В этом случае разумное применение УО рассматривается как полезное решение. В [145] было развернуто 10 УО на леднике Аржантьер, а также на его склонах для оценки возможности отслеживания перемещений местности по изображениям спутника Sentinel-1. Исследована возможность идентификации этих УО и выявлено, что можно измерить перемещение ледника с достаточной точностью.

При применении SAR с УО необходимо учитывать, что размещение УО в лесных условиях может вызвать различные потери сигнала в зависимости от типа поляризации. Например, при использовании поляризации вертикально-вертикально VV рассеиваемая волна будет ослабляться сильнее, чем при поляризации горизонтально-горизонтально HH [146]. В частности, при установке УО в лесу для измерения сигнала Р-диапазона, ослабление волны при VV-поляризации (уменьшение на 2,28 дБ) значительно больше, чем при HH-поляризации (уменьшение на 0,6 дБ) из-за вертикальной структуры деревьев. Кроме того, УО можно интегрировать с солнечными панелями на их поверхности [147], превращая их в солнечные УО. Эти УО не только служат фиксированными точками рассеяния для SAR, но и выполняют функции генератора и аккумулятора энергии для необходимых элементов, установленных на них.

Помимо использования в качестве цели в приложениях дистанционного зондирования, УО также могут быть использованы для калибровки этих устройств. Одним из ярких примеров является использование УО для калибровки поляризационных спутников [148], что помогает устранить искажения в данных SAR с поляризацией C-SAR/02 с помощью метода активной калибровки радара. Кроме того, УО также применяются для калибровки альтиметра Roseidon-4 на спутнике Sentinel-6A [149]. Для систем радара обнаружения с частотной модуляцией непрерывной волны в аэропортах [150], ТУО, основанные на материале с электромагнитной запрещенной зоной, обладают низкой стоимостью, широким диапазоном частот и простотой в производстве и помогают вращать поляризацию линейных волн, чтобы калибровать поляризационные радары [151].

Бесчиповые RFID-метки, использующие УО, в настоящее время исследуются для поддержки навигации автономных транспортных средств, таких как беспилотный автомобиль и БПЛА, даже в условиях плохой видимости, например, в тумане или ночью [152]. Ярким примером является система навигации MilliSign [153] на основе миллиметровых волн, использующая RFID-метки, которая помогает поддерживать навигацию БПЛА в любых погодных условиях и достигает способности локализации с использованием однократного считывания. MilliSign использует RFID-метки на основе УО с использованием радара миллиметровых волн, который может локализовать БПЛА на расстоянии более 10 м.

При комбинировании с кодированием информации, УО могут быть использованы для самостоятельной навигации автономных транспортных средств

[154]. Однако широкая МЭПР УО может ограничивать требования по выбору угла при навигации транспортных средств. Для решения этой проблемы в [152] предложен метод устранения отражения в нежелательных направлениях, сохраняя уровни МЭПР в нужных направлениях. Предложены технологии резки апертуры УО, когда необходимо отражать волны в определённом направлении. Конкретно, 6 УО были обрезаны (рис. 17а) и затем объединены в массив, который может генерировать три различных идентификационных кода по трём направлениям $\varphi=0, 120, 240^\circ$. Этот массив затем использовался для навигации автономных транспортных средств. Принцип его работы объясняется на рис. 17б. Например, когда возбуждающий сигнал направлен на $\varphi=0^\circ$ (направление снизу вверх), все ТУО в первой строке будут сильно отражать сигнал обратно в направлении $\varphi=0^\circ$, все ТУО во второй строке не будут отражать сигнал обратно. Та же логика применяется к остальным строкам, и полученный код, когда возбуждающий сигнал на $\varphi=0^\circ$, будет “1011”. Автономные транспортные средства затем могут анализировать этот код, чтобы определить необходимое направление движения.

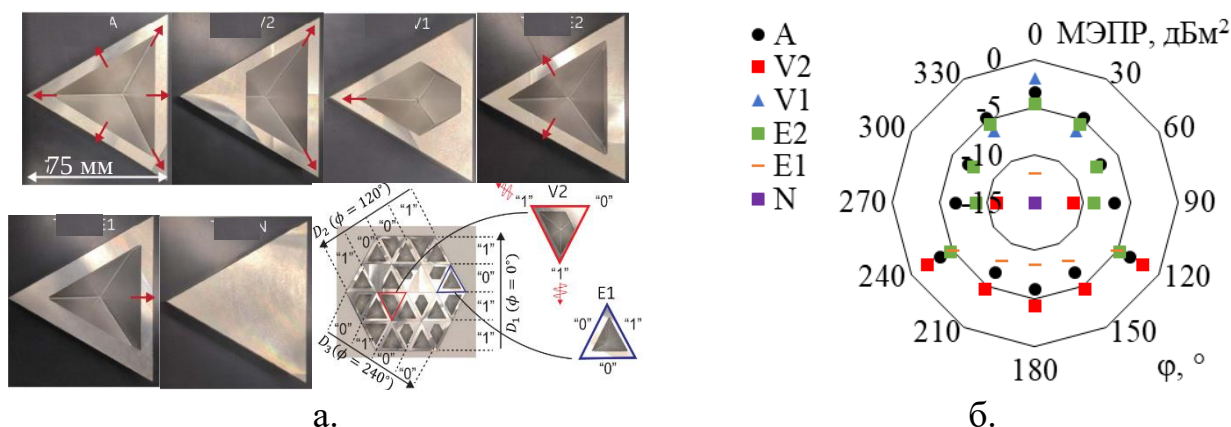


Рис. 17. Урезанные и решетка УО (а) и МЭПР отдельных урезанных УО (б)

Сегодня основными факторами, ограничивающими распространение систем навигации внутри помещений, являются точность и надежность позиционирования, а также доступность компактных считывателей с низкой стоимостью и низким энергопотреблением [155]. Недавно, в [155], высокая МЭПР ТУО была объединена с FSS Rogers RT/Duroid 5880, что позволило различать обратно рассеянное поле с помощью считывателя в диапазоне W (75-110 ГГц). Работа в высокочастотном диапазоне позволяет достичь высокой разрешающей способности и требовать небольших размеров УО ($3 \times 3 \times 3$ см). Эта конфигурация обладает низкой сложностью, при этом дистанция отслеживания достигает 4 м, а отклонение позиционирования составляет менее 1 мм, что демонстрирует потенциал использования УО для решения этой задачи. Другие исследования также используют форму УО для решения аналогичных проблем. В [156] представлено решение для проектирования двухслойного FSS с широкой полосой пропускания, собранного в форме УО. В [157] предложен метод проектирования RFID-меток с ТУО, оснащённых резонаторами, которые могут работать с

угловыми отклонениями по наклону и крену до $\pm 40^\circ$ и $\pm 180^\circ$ (то есть независимы от ориентации).

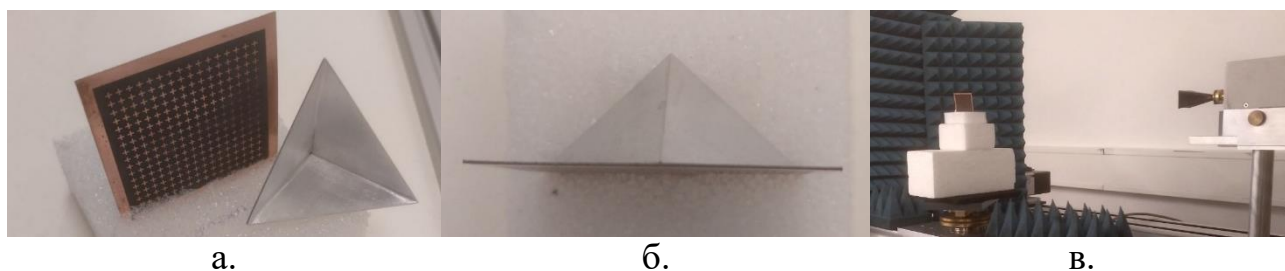


Рис. 18. Изготовленные FSS, ТТУО (а) и вид сверху метки, где ТТУО расположен за FSS (б) и установка для измерений ее МЭПР (в) [155]

Кроме того, УО также используется для моделирования МЭПР от сложных целей. В [158] отмечено, что изменение ЭПР УО путем поворота его граней может смоделировать объекты, значительно большие, чем сами УО, то время как [159] использует диэлектрические УО для моделирования сложных аэродинамических моделей, таких как тактические самолеты. Эта работа также указывает, что результаты, полученные от воздушных мишеней с УО, могут служить основой для моделирования рассеяния множества различных сложных аэродинамических объектов. В [118] предложена интеллектуальная технология моделирования сложных аэродинамических объектов на основе ЭПР УО. Эта технология может моделировать типичные характеристики МЭПР самолетов, регулируя структуру ТТУО 60° и комбинируя его с линзой Люнеберга.

Благодаря эффективному электромагнитному рассеянию, использование УО в проектировании и оптимизации современных антенн приносит значительные преимущества: улучшение усиления [160], снижение коэффициента отражения (S_{11}) и расширение рабочей полосы антенны. Это особенно важно для приложений, требующих высокого усиления, таких как спутниковая связь, радиолокация [161] и др.

Практические применения УО в антеннах весьма разнообразны и эффективны. Например, антенная решетка с 8 прорезями в К-диапазоне, расположенная в ДУО, не только улучшает усиление (до 21,6 дБи), но и снижает уровень боковых лепестков (до 14,2 дБ) [162]. УО также применяются в системах радиолокации миллиметровых волн, где помогают одновременно откалибровать расстояние и фазу каналов в решетке ММО [163]. Размещение ДУО 45° за компактной трехмерной антенной со сферической диэлектрической линзой [161] способствует росту усиления на частоте 9 ГГц. Кроме того, предлагаются конструкции антенн с двойным диапазоном, интегрированные с УО [160] (рис. 19а), которые обеспечивают значительные преимущества в приложениях LTE, с высоким усилением и стабильной рабочей полосой на двух рабочих диапазонах: 1,61–1,86 ГГц и 2,25–2,45 ГГц (рис. 19б). Основные характеристики этой антенны включают стабильную диаграмму направленности, компактные размеры, экономичное производство и высокое усиление на обоих рабочих диапазонах.

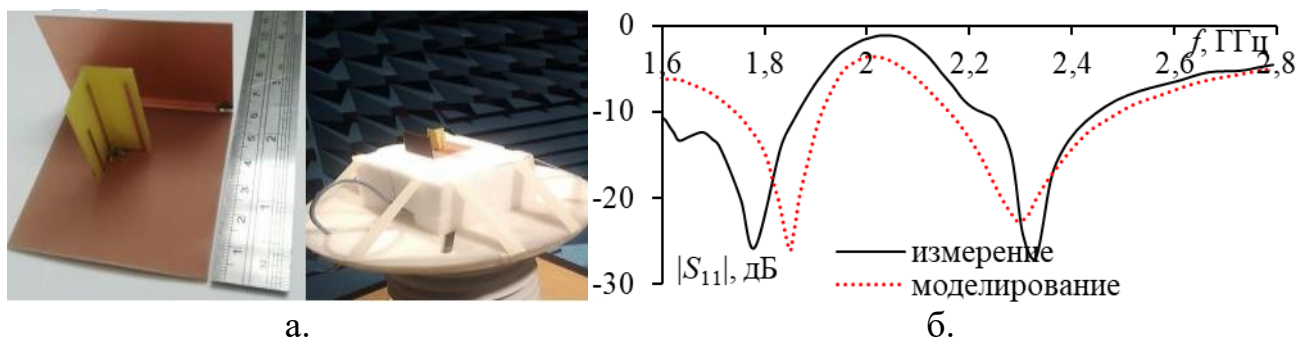


Рис. 19. Двухдиапазонная антенна в сочетании с УО (а)
и ее частотная зависимость $|S_{11}|$ (б)

Недавние исследования показали, что интеграция УО с метаматериалами может привести к антеннам с превосходными характеристиками при малых размерах и массе, соответствующими современным техническим требованиям. Например, размещение УО Брэгга из диэлектрика в ближней зоне антенны увеличило усиление антенны до 12,96 дБ и эффективность апертуры до 40,96% [164]. Кроме того, комбинирование УО с электромагнитной запрещенной зоной может улучшить усиление антенны до 14,04 дБи, при этом максимально уменьшая рассеяние до 16,2 дБм² в диапазоне 2-18 ГГц, что способствует росту скрытности антенн [165].

Существуют проблемы отклонения узкого луча антенны в дальнедействующих беспроводных системах с соединениями точка-точка. При этом одним из решений является использование антенн с возможностью управления лучом, компенсирующим электронным отклонением физическое выравнивание антенны, особенно на больших расстояниях [166]. В [167] представлена новая конструкция УОА, обладающая возможностью управления лучом и усилением. Она использует диполь в качестве источника и три слоя активной FSS (AFSS) в виде УО, расположенных на одной стороне диполя (рис. 20). Слои AFSS могут регулировать характеристики передачи/отражения посредством включения/выключения диодов, что позволяет контролировать направление и усиление луча. Аналогично, в [166] предложены две конструкции УОА, способные электронно изменять направление луча с небольшим шагом по углу. Управление рпн-диодами, подключенными к нескольким проводникам, помогает регулировать характеристики отражения структуры. Результаты этих разработок показывают возможность смещения луча менее, чем на 5°, при минимальном усилении 9,3 дБи, что подходит для дальнедействующих WiFi-соединений на частоте 2,4 ГГц, обеспечивая стабильность и эффективность в беспроводных соединениях точка-точка.

В [168] рост эффективности антенны на 3 и 5,5 ГГц достигнут с использованием УО на основе FSS (рис. 21 а). Этот FSS-отражатель дает рост рабочей полосы с 20% до 44%, а усиления антенны – на 8-10 дБи для 4,5-6,5 ГГц. Это не только улучшает усиление в этом диапазоне частот, но и сохраняет широкий диапазон излучения на частотах около 3 ГГц.

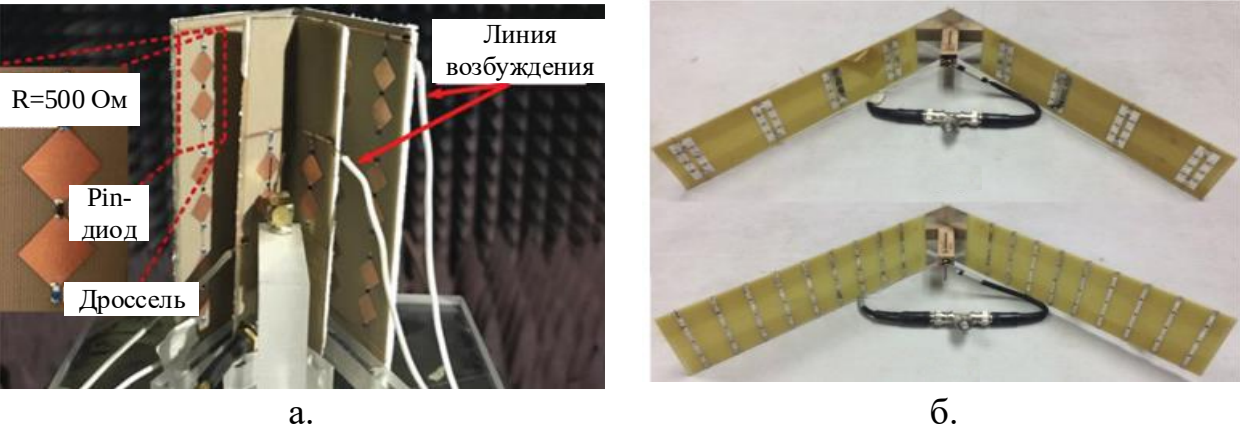


Рис. 20. УОА с возможностью управления лучом с помощью AFSS [167] (а) и pin-диода [166] (б)

Для дальнейшей оптимизации в [169] антенна усовершенствована с помощью выпуклой FSS (рис. 21б) для достижения разнообразных углов излучения в многочастотных антеннах. Эта антенная система имеет углы излучения 190° и 58°, а максимальное усиление – 6,8 и 8,3 дБи на частотах 3,5 и 5,8 ГГц соответственно. Затем два FSS-отражателя (плоской и УО-форм, рис. 21с) применены для получения узконаправленного луча, а также широкого луча с различными уровнями усиления в диапазоне от 8 до 14 дБи [170]. Это не только повышает гибкость антенны, но и уменьшает её размеры, создавая более компактную и эффективную антенну по сравнению с предыдущими конструкциями. Излучение на 3 ГГц может быть использовано в приложениях, требующих широкого покрытия, в то время как на частоте 5,5 ГГц эта антенна будет подходить для приложений, требующих меньшей ширины луча, что расширяет область её применения.

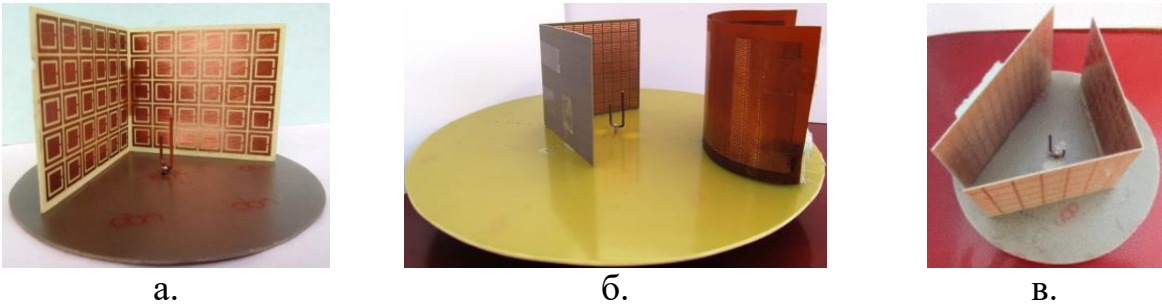


Рис. 21. Двухдиапазонный УОА (а) с выпуклой изогнутой (б) или плоской (в) FSS

В таблице 15 обобщены некоторые недавние приложения и связанные с ними работы, выполненные с использованием УО.

15 – Исследования, связанные с применением УО

Работа	Приложение
[122, 123, 135, 171]	Уменьшение ЭПР, скрытность, маскировка, помехи
[115, 116, 142, 143, 146, 147, 172]	SAR, InSAR
[128, 149, 150, 151, 173, 174, 193]	Калибровка
[166, 175, 176]	Электрически перестраиваемое управление

Работа	Приложение
[136, 139]	Измерение скорости ветра
[126, 132]	Ракетная ловушка
[122]	Противорадар
[152-155, 157, 177]	RFID, навигация, автономное позиционирование транспортного средства
[108, 115, 119, 120, 140, 177]	Морские и спасательные применения
[155, 156]	Локализация в помещении
[155, 178-180]	Частотно-селективные рефлекторы
[118, 159]	Моделирование цели
[135, 181-185, 193]	Оптимизация УО
[128, 130]	Идентификация и классификация цели и УО
[161-165]	Изготовление и оптимизация антенн
[166-170]	В сочетании с FSS для оптимизации антенн

2.3.4. Сравнение свойств некоторых конструкций УО

Сравнению характеристик различных УО для определения их конкретных применений уделено внимание в [186, 11]. Рис. 22 показывает результаты МЭПР, полученные с использованием МоМ-ПС в TUSUR.EMC для УО и отражающих пластин с размером ребра 5λ в плоскостях $\varphi=45^\circ$ и $\theta=90^\circ$.

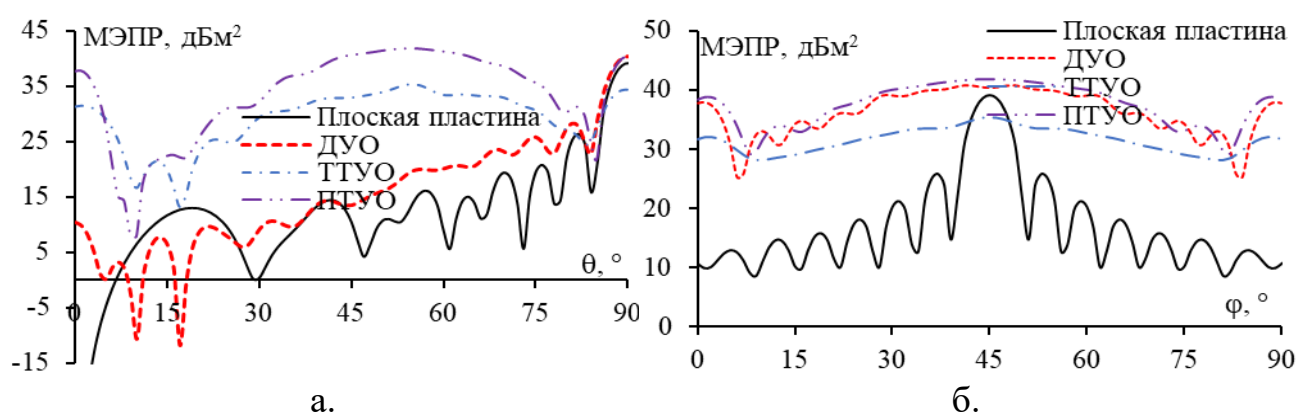


Рис. 22. МЭПР различных УО в плоскостях $\varphi=45^\circ$ (а) и $\theta=90^\circ$ (б)

Из рис. 22 видно, что, при падении волны перпендикулярно к открытой поверхности структуры, ПТУО имеет наибольший уровень МЭПР (42 дБм²), за ним следуют ДУО с 40 дБм², плоская пластина с 39 дБм² и ТТУО – 35 дБм² [11]. Хотя ТТУО имеет наименьшее рассеяние, он наиболее часто используется на практике. Это связано с тем, что ТТУО имеет прочную структуру и менее подвержен воздействию окружающей среды, что обеспечивает ему более высокую прочность и долговечность по сравнению с ПТУО. Структура КТУО обеспечивает баланс между характеристиками рассеяния и прочностью, но процесс производства требует более сложных технологий резки. Более того, ТТУО требует меньше материала при производстве по сравнению с другими структурами, что делает его более экономичным.

Кроме того, наблюдается, что ширина МЭПР в плоскости θ составляет 28° для ПТУО, 37° для ТТУО, 6° для ДУО и плоской пластины. Очевидно, что

пластина и ДУО имеют очень узкую ширину рассеяния, что означает, что при установке требуется высокая точность выравнивания (менее 1° от направления максимума МЭПР). Исследования также показывают, что ДУО полезен для калибровки поляриметрических радаров, но необходимая точность выравнивания делает их менее полезными в других приложениях. Между тем ТТУО и ПТУО имеют более широкое поле рассеяния, что означает, что они более устойчивы к угловым отклонениям падающих плоских волн. Для ТТУО относительно высокая стабильность и ширина поля рассеяния (около 40°), не зависящая от λ и размера пластины [187], способствует самой широкой ширине основного лепестка, и ошибки при выравнивании будут минимальны. Кроме того, из рис. 22 видно, что ТУО достигают максимальной МЭПР при $\theta=55^\circ$. Это приводит к тому, что ТУО часто направляются в небо под определённым углом для оптимизации их способности обнаруживаться системами дистанционного зондирования.

2.3.5. Размеры и материалы УО

Для высоких радарных частот, таких как X-диапазон, ТТУО является подходящим выбором благодаря своей жесткой конструкции и компактным размерам [188]. Однако на низких частотах (L-диапазон и ниже), размеры ТТУО становятся слишком большими, и они могут деформироваться под собственным весом, что значительно снижает МЭПР. Например, лаборатория реактивного движения НАСА разработала ТТУО размером до 4,8 м для калибровки радаров в Р и L-диапазонах [189], но практика показала, что его основание будет прогибаться на 12 мм и иметь угловое отклонение около $0,005^\circ$ из-за веса конструкции (238 кг) [189]. Другие структуры, такие как ПТУО, лучше ТТУО [109], так как имеют большие поля рассеяния и меньшие размеры на этих частотах [188]. Кроме того, перфорированные конструкции УО представляют собой практическое решение для снижения массы и уменьшения ветрового сопротивления, особенно при использовании на низких частотах [189].

Для определения подходящих размеров ТТУО для различных диапазонов частот, сначала вычисляют зависимость максимальной МЭПР от длины ребра ТТУО для каждого диапазона. Рис. 23 показывает это для X, C, L-диапазонов. В [187] определено, что для измерения деформаций земной поверхности необходимо предусмотреть УО, обеспечивающие уровни МЭПР до 38-46 дБм² для X и 47-54 дБм² для C-диапазонов. Исходя из этого, размеры ТТУО, соответствующие МЭПР в этих диапазонах, оцениваются как примерно 1,1–1,7 м для X и 2,5–3,7 м для C-диапазона. Из рис. 23 видно, что эти области размеров не перекрываются, что означает, что один ТТУО не может удовлетворить требованиям обоих диапазонов (X и C) при развертывании в упомянутых условиях, обеспечивающих МЭПР. Однако на практике при развертывании УО часто выбирают места с низким уровнем помех (требуемые уровни МЭПР не велики), что дает возможность использовать одну структуру ТТУО, которая может эффективно работать в обоих диапазонах. При этом один ТТУО может удовлетворить требованиям работы в обоих (X и C) диапазонах.

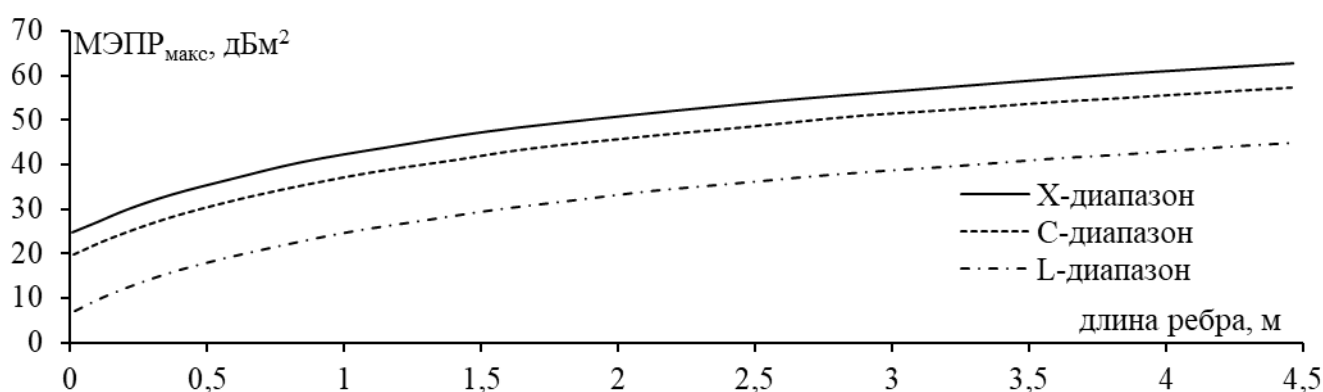


Рис. 23. Зависимость максимальных уровней МЭПР от длины ребра ТТУО на разных частотных диапазонах

В [188] представлены основные требования для проектирования УО с целью использования в SAR: высокая и широкая МЭПР, низкое влияние окружающей среды на УО, стабильность МЭПР, а также малые размеры УО. Для механической стабильности в различных условиях перемещения важно ограничение размеров и массы УО. Для этого используют легкие материалы, сохраняющие прочность и эффективность отражения волн. В этом случае предпочтение отдается металлизированным покрытиям, особенно алюминию, благодаря его отличным характеристикам радиолокационного отражения. Несмотря на то, что алюминий стоит немного дороже других материалов, таких как сталь [189], он имеет много преимуществ. Алюминий имеет низкую плотность (около 2,6-2,9 г/см³), в то время как сталь значительно тяжелее (7,75-8,05 г/см³). Это означает, что при одинаковых размерах УО из алюминия значительно легче, чем из стали. Например, ТТУО из алюминия с размерами 0,5×0,5×0,75 см и толщиной 0,002 м, будет весить около 5,6 кг (при плотности алюминия 2,8 г/см³). Однако если этот УО из стали весит около 16 кг (при плотности стали 8 г/см³), это приведет к значительному росту массы. Кроме того, тонкое покрытие из термопластичной порошковой краски может быть использовано для защиты УО от процесса окисления в окружающей среде, что поможет продлить срок службы УО. Однако покрытие краски может привести к потерям МЭПР [190], снижая эффективность отражения УО в некоторых условиях.

2.3.6. Факторы, влияющие на МЭПР УО

В [191] подробно анализировались искажения МЭПР из-за отклонений граней УО от ортогонального положения. На рис. 24 показаны МЭПР для крупных УО, таких как КТУО и ТТУО, при изменении УО. Когда углы отклонения граней ТУО превышают 0,5° от ортогональности, МЭПР значительно искажается. Это значит, что МЭПР больших УО чувствителен к небольшим отклонениям углов, в то время как МЭПР меньших УО (размер в λ) менее подвержены этим отклонениям. Другими словами, с ростом частоты и электрических размеров УО, даже малые отклонения будут сильно влиять на МЭПР.

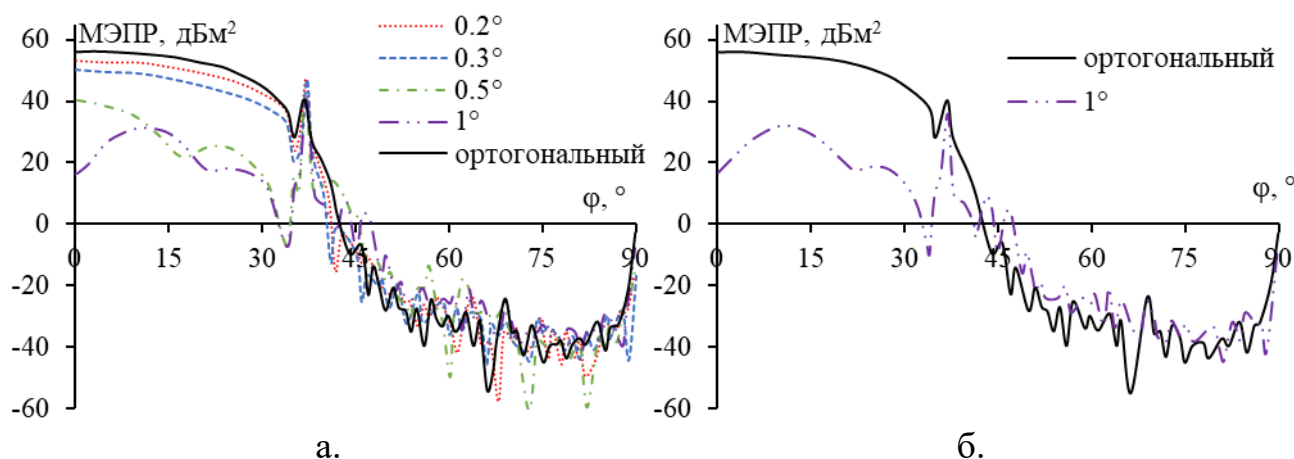


Рис. 24. МЭПР для КТУО ($L=4$ м) (а) и ТТУО ($L=3,5$ м) (б) на 9 ГГц

Для исследования влияния отклонений от ортогонального состояния на характеристики МЭПР структуры в диапазонах частот, в [191] рассмотрены зависимости максимальной МЭПР от частоты для КТУО и ТТУО. Результаты показали, что МЭПР для ортогональных структур растет с ростом частоты, а неортогональных – снижается, как это явно видно из рис. 25.

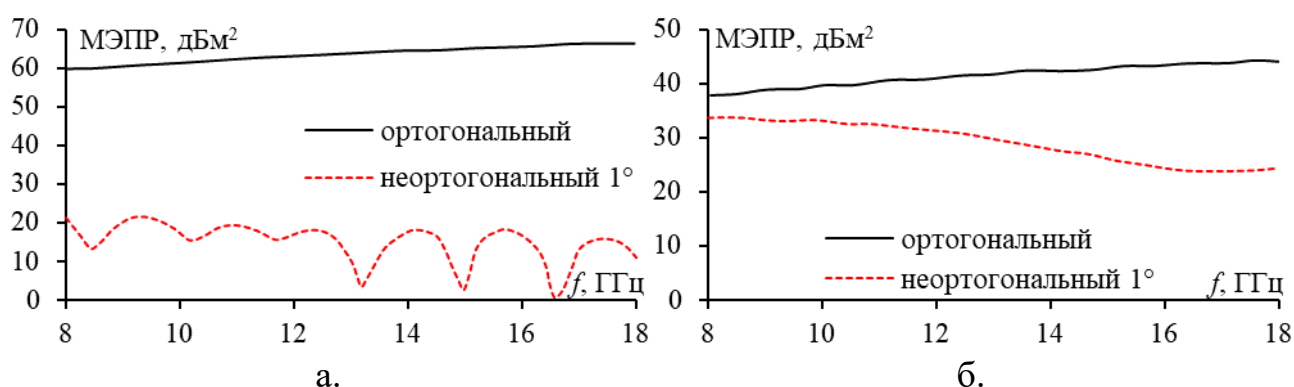


Рис. 25. Частотные зависимости максимального уровня МЭПР КТУО с $L=4$ м (а) и ТТУО с $L=1,21$ м (б)

Факторы, влияющие на рассеяние УО, рассмотрены в [109] и включают отклонение линии визирования, ортогональность поверхностей, кривизну поверхности и неровности на поверхности пластин. Отклонение линии визирования УО требует, чтобы структура была установлена так, что направление максимального уровня МЭПР ориентировано в сторону источника излучения, чтобы оптимизировать рассеяние поля, принимаемого приемником. Ортогональность между плоскостями, как упомянуто ранее, сильно влияет на эффективность рассеяния. Кривизна пластин (деформация пластин от плоского состояния) также влияет на МЭПР, в зависимости от λ и размера УО. Например, в [109] показано, что ТТУО с длиной стороны 1 м и кривизной поверхности 5 мм может уменьшить МЭПР более чем на 10 дБ по сравнению с ТТУО без кривизны. Наконец, выпуклости на поверхности пластин, такие как появление винтов или заклепок в процессе производства, также снижают МЭПР. Степень этого зависит от λ , но не зависит от размера УО [109].

В [192] указано, что при проектировании и развертывании УО соблюдение строгих требований имеет решающее значение для обеспечения оптимальных характеристик рассеяния. В частности, угол отклонения между пластинами не должен превышать $0,2^\circ$, кривизна поверхности не должна превышать 0,75 мм, а вогнутость – 0,5 мм. Если эти требования соблюдаются, то отклонение МЭПР не более 1 дБм² от теоретического значения, что обеспечивает стабильность и эффективность системы. Однако достижение этих требований на практике, по-прежнему, вызывает большие трудности, особенно на этапе установки и обслуживания. Для решения этих проблем в [109] предложено несколько практических решений. Одним из них является использование плоских алюминиевых пластин толщиной 6 мм (или 4 мм для перфорированной конструкции) в качестве поверхностей конструкции, что повышает жесткость и снижает влияние изгиба поверхности. Также используются металлические L-образные профили для укрепления жесткости поверхностей или для соединения панелей с целью поддержания ортогональности. Аккуратная установка шпилек или винтов помогает обеспечить плоскостность поверхности. Кроме того, в [193] исследовано и проанализировано влияние температуры на МЭПР УО. Чтобы обеспечить точность калибровки миллиметровых волн SAR, в [193] разработана конструкция УО с высокой точностью, которая может удовлетворить строгим требованиям, обеспечивая оптимальные характеристики в приложениях радара миллиметровых волн.

2.3.7. Перфорированные УО

Одна из проблем, которую необходимо учитывать при использовании УО в системах SAR или других приложениях, заключается в том, что УО часто устанавливается направленным вверх, что подвергает его затоплению в случае сильного дождя [190]. Это может привести к потере МЭПР. Например, в [190] описано, что накопившаяся пыль заблокировала единственное сливное отверстие УО, что привело к затоплению УО после сильного дождя. В результате уровень МЭПР был значительно снижен. Для решения этой проблемы изучены различные методы защиты. Один из них – это установка пластикового покрытия на ТТУО для защиты от дождевой воды (рис. 26). Однако этот метод имеет свои ограничения. Во-первых, если структура УО имеет большие размеры, то и пластиковое покрытие должно быть большим, что увеличивает общий вес системы. Во-вторых, пластиковая защита от осадков может отрицательно повлиять на эффективность рассеяния.

Рассматривалось использование перфорированных структур для стока воды с ТТУО. Даже без них, создание нескольких отверстий в пластинах ТТУО, через которые может уходить вода, также является разумным выбором [190]. Перфорированная структура не только способствует быстрому оттоку воды, но и имеет другие преимущества, такие как снижение воздействия ветра, ускорение процесса самоочистки от пыли и снижение массы конструкции [109]. Перфорированная структура была исследована и протестирована в С и Х диапазонах частот. Она изготовлена из алюминиевых пластин толщиной 4 мм, имеет длину ребра 1,5 м, перфорирована отверстиями диаметром 5 мм и расстоянием

между отверстиями 12 мм, обеспечивая открытую площадь 15,7% [109]. Также была исследована сплошная структура аналогичного размера, покрытая порошковой краской для повышения долговечности УО при эксплуатации в экстремальных климатических условиях [109].

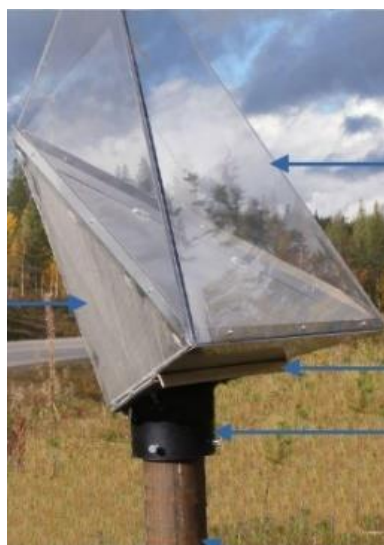


Рис. 26. ТУО с пластиковой защитой от осадков [194]

Зависимости МЭПР этих конструкций от угла падения волны показаны на рис. 27. Видно, что различия в МЭПР между структурами незначительны в обоих частотных диапазонах при $\varphi = -40^\circ$ – 40° .

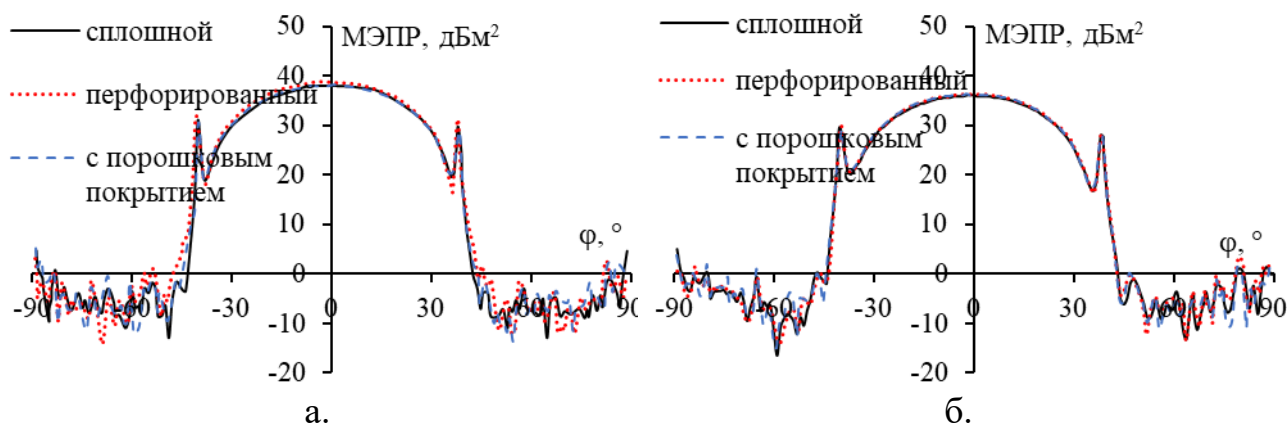


Рис. 27. МЭПР для ТТУО в Х ($f=9,65$ ГГц) (а) и С ($f=5,4$ ГГц) (б) диапазонах [109]

Чтобы проанализировать влияние размеров отверстий на рассеяние УО, в [188] анализировались ПТУО с размерами $0,5 \times 0,5$ м на частоте 10 ГГц. Отверстия на поверхности ПТУО имели размеры $\lambda/10$, $\lambda/6$, $\lambda/4$ и $\lambda/3$, соответствуя 3, 5, 7,5 и 10 мм. Расстояние между отверстиями составляло 10, 12 и 15 мм. Характеристики этих конструкций (таблица 16) сравнены с таким же ПТУО без отверстий с максимальной теоретической МЭПР 34,18 дБм². На рис. 28 изображены МЭПР перфорированных УО с различными размерами и расстояниями между отверстиями.

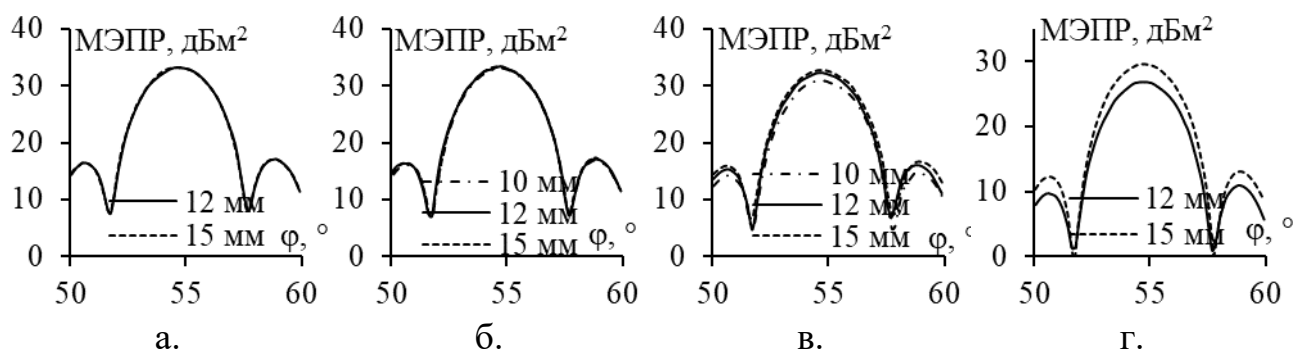


Рис. 28. МЭПР для перфорированных УО с диаметрами отверстий 3 (а), 5 (б), 7,5 (в) и 10 мм (г) с расстояниями между ними 10, 12 и 15 мм

Таблица 16 – Максимальное значение МЭПР (дБм²) перфорированных УО в зависимости от размера отверстий и расстояния между ними

Диаметр отверстий	Расстояние между центрами отверстий		
	$\lambda/3$ (10 мм)	$\lambda/2,5$ (12 мм)	$\lambda/2$ (15 мм)
$\lambda/10$ (3 мм)	–	33,3	33,3
$\lambda/6$ (5 мм)	33,09	33,18	33,23
$\lambda/4$ (7,5 мм)	30,7	32,2	32,7
$\lambda/3$ (10 мм)	–	26,8	29,5

Рис. 28а показывает максимальную МЭПР 33,3 дБм² для перфорированных УО, когда расстояние между отверстиями составляет 12 и 15 мм. Это снижение МЭПР менее 1 дБм² можно считать малым. Рис. 28б указывает, что МЭПР перфорированных УО немного отклоняется от МЭПР сплошного УО, с разницей около 1 дБм². МЭПР, как правило, растет с ростом расстояния между отверстиями, однако этот рост очень мал, всего около 0,05 дБм². Рис. 28в и г показывает, что МЭПР значительно (примерно на 2 и 7 дБм² соответственно) снижается при отверстиях большого размера, что оказывает наибольшее негативное влияние на максимальную МЭПР.

Очевидно, что чем меньше расстояние между отверстиями, тем сильнее снижается МЭПР. Однако уменьшение расстояния между отверстиями также снижает вес и воздействие ветра. Два оптимальных размера отверстий – это $\lambda/10$ и $\lambda/6$, поскольку снижение максимальной МЭПР для них очень мало. В то же время, отражающие поверхности с отверстиями $\lambda/4$ и $\lambda/3$ не очень годны, поскольку сильно снижают МЭПР. Чтобы показать эффективность отверстий на УО в условиях пыльной бури и сильных ветров (например, в Саудовской Аравии), в [109] использовались УО с отверстиями размером $\lambda/6$ и расстоянием между ними 12 мм для диапазона Х. Следует учитывать, что пробивание отверстий на металлической пластине может вызвать неровности на поверхности, что требует тщательного рассмотрения [190].

Несмотря на то, что конструкция перфорированных УО имеет много преимуществ, при снижении частоты размер УО надо увеличивать, как уже упоминалось. При этом отражающие панели с отверстиями могут легко деформироваться, когда их размеры становятся слишком большими (рис. 29) [109].

В настоящее время не существует исследований, которые полностью решают эту проблему. Однако теоретически можно использовать металлические уголки (L-образные элементы), чтобы усилить жесткость пластин, что поможет им поддерживать прямолинейность и стабильность с ростом размеров УО.

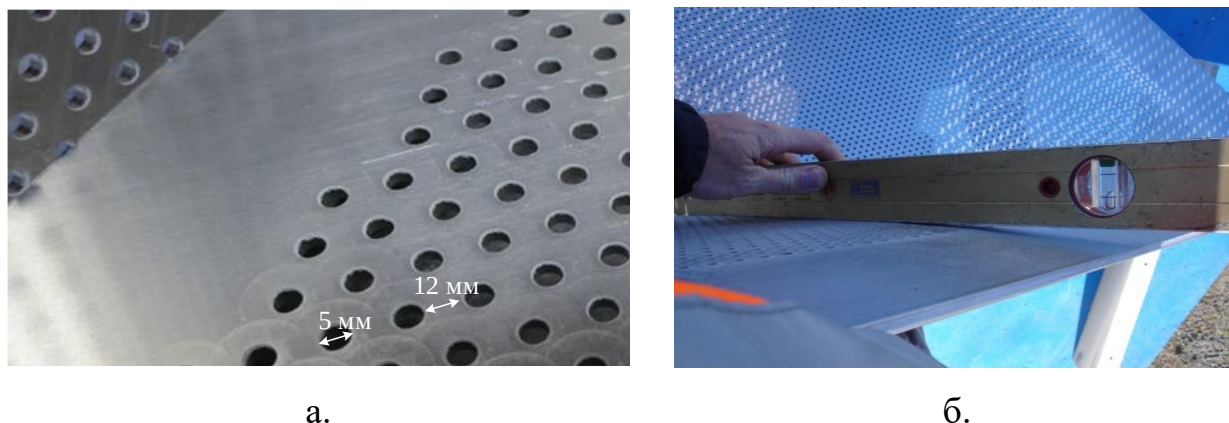


Рис. 29. Перфорированная поверхность (а) и деформация перфорированной поверхности ТТУО с $L=1,5$ м [109] (б)

Согласно [145], с ростом размеров УО, сопротивление ветру становится сильнее, что требует более надежного закрепления конструкции, что, в свою очередь, увеличивает затраты, особенно в горных районах, где ветер может быть очень сильным. Поэтому необходимо найти баланс между размерами УО, чтобы влияние окружающего ландшафта на качество рассеяния УО было минимальным при сохранении низких затрат на установку. Кроме того, качество МЭПР перфорированных УО обычно проверяется в обычных условиях, однако необходимо учитывать влияние более жестких факторов окружающей среды, таких как горный рельеф и ледники. Например, несколько УО использованы в таких условиях для оценки их индентификации спутником Sentinel-1 [145]. В таблице 17 приведены их свойства и характеристики рассеивания.

Таблица 17 – Расчетная ($MЭПР_{рас}$) и измеренная ($MЭПР_{изм}$) максимальные МЭПР ($дБм^2$) различных УО в С и Х диапазонах [145]

Структура	Вид УО	Длина ребра, м	С-диапазон		Х-диапазон	
			$MЭПР_{рас}$	$MЭПР_{изм}$	$MЭПР_{рас}$	$MЭПР_{изм}$
УО1	ТТУО	0,995	30,46	26,76	35,59	30,77
УО2	Перфорированный ТТУО	0,995	30	26,44	35	30,60
УО3	Перфорированный ПТУО	0,5	26,46	24,02	33,89	26,46

Следует отметить, что МЭПР УО с отверстиями диаметром 1 см и без отверстий практически не имеет различий, с максимальным отклонением всего около 0,6 дБ. Это свидетельствует о том, что перфорированные УО не оказывают значительного воздействия на МЭПР в С или Х диапазонах.

Когда радар отклоняется на $\Delta\theta=5, 7, 10^\circ$ от оптимального угла, МЭПР УО1 незначительно изменяется по сравнению с его значением при оптимальном угле $\theta=55^\circ$ (рис. 30а). Тот же вывод можно применить и к УО2 (рис. 30б).

Для УОЗ, при оптимальном угле подъема θ , полезный диапазон УОЗ аналогичен УО1 и УО2. Однако, при изменении угла подъема, например, с $\Delta\theta=10^\circ$, потеря МЭПР составляет около 4 дБм², а при $\Delta\theta=20^\circ$ может достичь 10 дБм² (рис. 30в). Это свидетельствует о высокой чувствительности УОЗ к настройке в плоскости θ , что соответствует характеристике рассеяния от ПТУО.

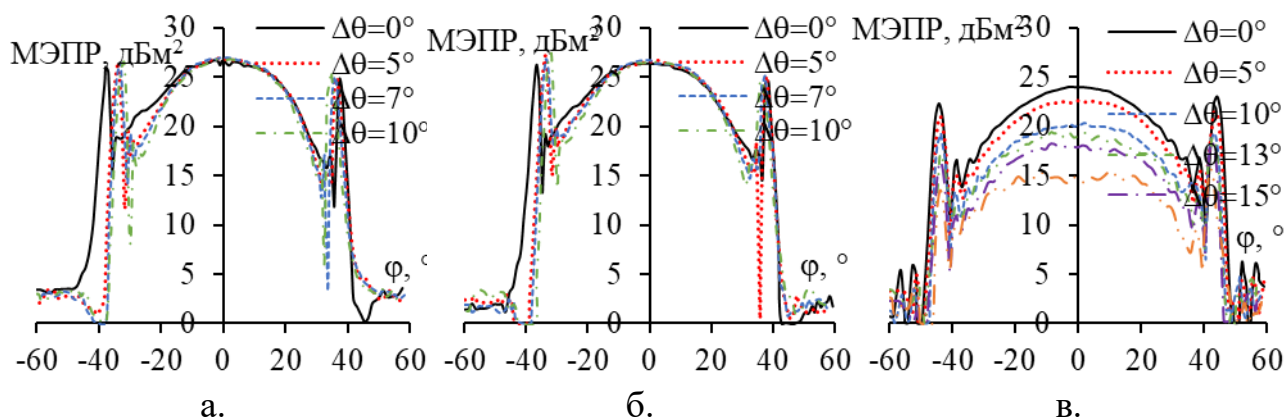


Рис. 30. Измерение МЭПР УО1(а), УО2(б) и УОЗ(в) в ϕ -плоскостях

Одна из важных проблем, которую необходимо учитывать при развертывании УО в регионах с умеренным климатом зимой, заключается в возможности покрытия их снегом, что может значительно ухудшать характеристики УО. Снег, оседающий на поверхности УО, может полностью изменить их характеристики, что приведет к снижению эффективности рассеяния. Это особенно важно в сложных местах, как гора или ледники, где регулярное обслуживание и техническое обслуживание крайне затруднены и иногда вообще невозможны [146]. Рис. 31 иллюстрирует несколько конструкций УО, покрытых снегом, что подчеркивает влияние этой проблемы на работу УО в реальных погодных условиях.



а.



б.

Рис. 31. ДУО (а) и ТТУО (б), засыпанные снегом зимой [195]

Использование перфорированных УО в местах, подверженных воздействию ветра и снега, может помочь сохранить видимость УО в реальных условиях. Однако, если снегопад интенсивный, а слой снега толстый и содержит мокрый снег, даже перфорированные УО будут подвергаться значительному воздействию, что приведет к снижению их МЭПР [146]. Это особенно плохо для УО с большой поверхностью. Толстый слой снега, покрывающий УО, не

только снижает МЭПР, но также может деформировать и повредить конструкцию [146]. Минимизация воздействия толстых слоев снега на характеристики МЭПР является сложной задачей, и в настоящее время нет удовлетворительного метода решения этой проблемы, даже если конструкция перфорирована. Одним из предложенных решений в [146] является покрытие УО пластиковым слоем для ограничения накопления снега, что позволяет уменьшить негативное воздействие на эффективность рассеяния УО.

2.3.8. Способы уменьшения объема и площади УО

Как уже упоминалось, УО в низкочастотном диапазоне часто имеют большие размеры, и поскольку они обычно изготавливаются из металла, их масса также очень велика (рис. 32). Поэтому установка, развертывание и техническое обслуживание УО в реальных условиях обычно длительны и трудны. Например, для сборки и развертывания УО, как показано на рис. 32а, необходимо, чтобы 9 человек работали непрерывно в течение 4 ч [189]. Кроме того, ВУО должны иметь легкий вес, чтобы они могли подниматься на большую высоту и иметь длительное время полета в пространстве. Поэтому важны снижение массы, размеров и проектирование конструкций УО, которые легко развертываются.

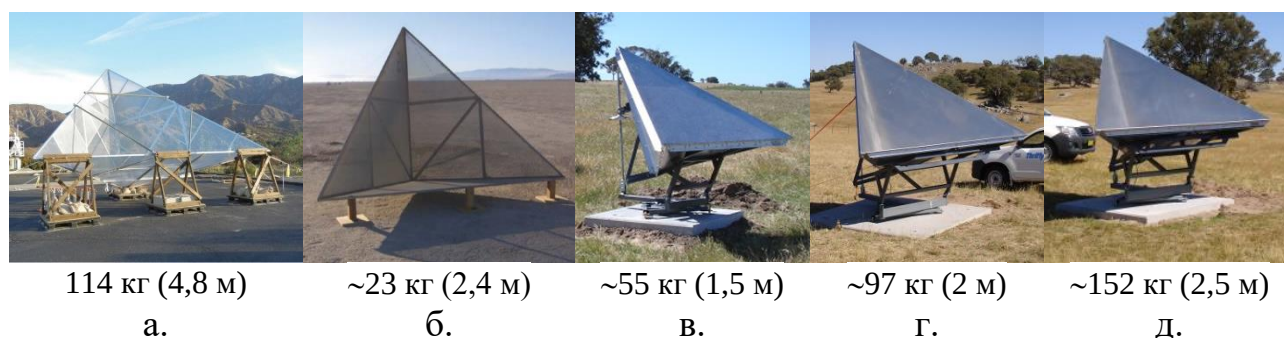


Рис. 32. Массы и размеры ТТУО из [189] (а), [189] (б), [109] (в), [109] (г), [109] (д)

Чтобы уменьшить размеры большого ТТУО в приложениях SAR, в [172] рассматривался вариант замены его массивом из 4 малых урезанных ТТУО (рис. 33). Результаты показали, что необходимо очень внимательно располагать УО в пределах одной ячейки разрешения InSAR. Такая конструкция позволяет каждому варианту горизонтальной или вертикальной ориентации обеспечить требуемую амплитуду и стабильность фазы. Несмотря на то, что этот метод оказался эффективным, использование нескольких малых УО может увеличивать массу конструкции и повышать сложность её установки и развертывания в реальных условиях [172].

Конструкция перфорированных УО помогла снизить массу по сравнению с первоначальной конструкцией, однако степень снижения остается незначительной (например, как показано на рис. 32а, конструкция всё ещё весит 114 кг). Некоторые исследования были проведены с целью изучения возможно-

стей уменьшения массы и площади УО [108, 196]. Ниже они рассмотрены подробнее.

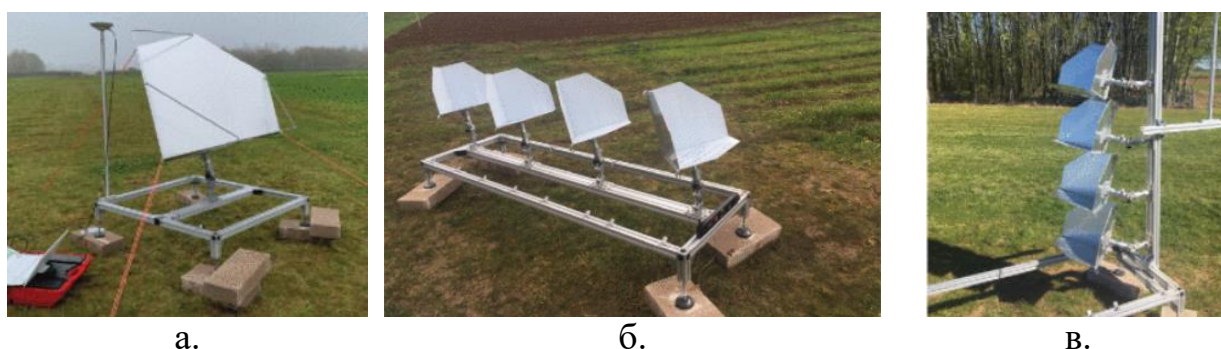


Рис. 33. Урезанные УО (а) и размещение 4 урезанных УО по горизонтали (б) и вертикали (в) для замены больших УО на практике

2.3.8.1. Использование новых материалов

Первое исследование по созданию ложных целей для имитации кораблей (с использованием ТУО и их разновидностей) с целью уменьшения массы и получения подходящих конфигураций представлено в [108]. Для достижения этой цели, УО необходимо иметь большую и широкую МЭПР, превышающую МЭПР кораблей в диапазоне X – одном из популярных радиочастотных диапазонов в морских приложениях. В то же время конструкция должна быть спроектирована так, чтобы её можно было плотно сжать, когда она не используется, и легко развернуть при необходимости. Для этого надо учитывать [108] вес, способность плавать на поверхности моря, устойчивость к воздействию ветра и волн, а также способность к легкому разворачиванию в любых условиях.

Из приведённых вопросов следует, что при проектировании УО необходимо использовать легкие материалы с высокой проводимостью и гибкостью, чтобы заменить алюминий. С учетом недавних достижений в области материаловедения, можно применить некоторые новые материалы, такие как серебряные ткани, которые обладают высокой проводимостью. Однако эти материалы ограничены в использовании из-за высокой стоимости массового производства. В [108] рассматривалось использование слоя углеродного волокна (CF) с низкой стоимостью. CF является обычным материалом с ограниченной проводимостью ($\sigma=6,2 \times 10^3$) и легким весом. Плотность CF составляет примерно $1,75-2$ г/см³, что меньше, чем у алюминия ($2,7$ г/см³) и помогает уменьшить массу структуры примерно в $1,35-1,54$ раза по сравнению с конструкциями одинакового размера из алюминия. Результаты измерений нормированной МЭПР пластины из алюминия и CF ткани (32×32 см) на частоте 9 ГГц показаны на рис. 34. Видно, что формы МЭПР пластины из алюминия и CF ткани достаточно схожи, но уровень МЭПР на самом деле чуть больше для алюминия по сравнению с CF. Кроме того, в [108] также отмечается, что уровни МЭПР для алюминия и серебряной ткани аналогичны.

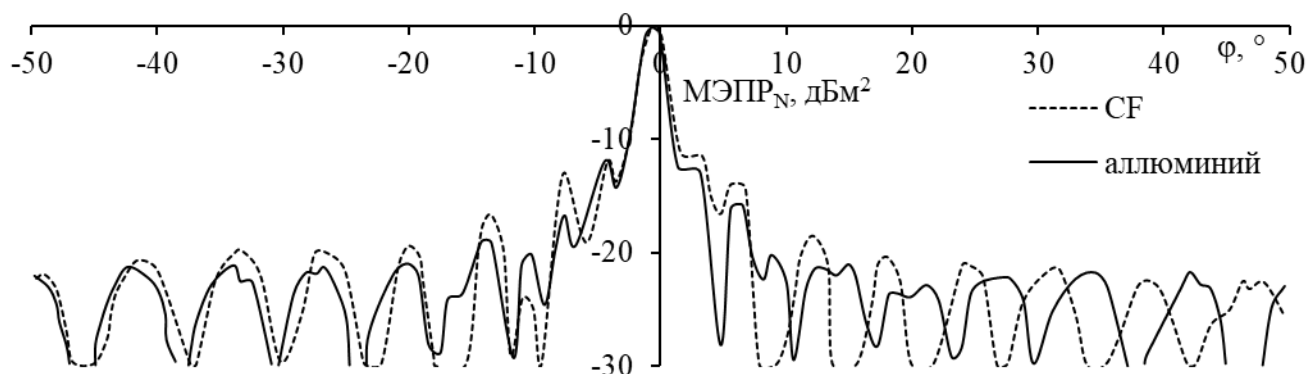


Рис. 34. Нормализованная МЭПР для рассеивающей пластины из алюминия и CF

Ручная модель октаэдрического КТУО с диаметром 40 см, использующая CF, и её МЭПР на 9 ГГц при использовании разных материалов представлены на рис. 35. Фактические результаты показывают, что МЭПР УО из CF значительно снижены в диапазоне 0-90°, в то время как при 90-180° хорошо совпадает с результатами моделирования. Это отклонение можно объяснить несовершенствами структуры, возникшими в процессе производства. Этот метод также может быть расширен для применения на других частотных диапазонах.

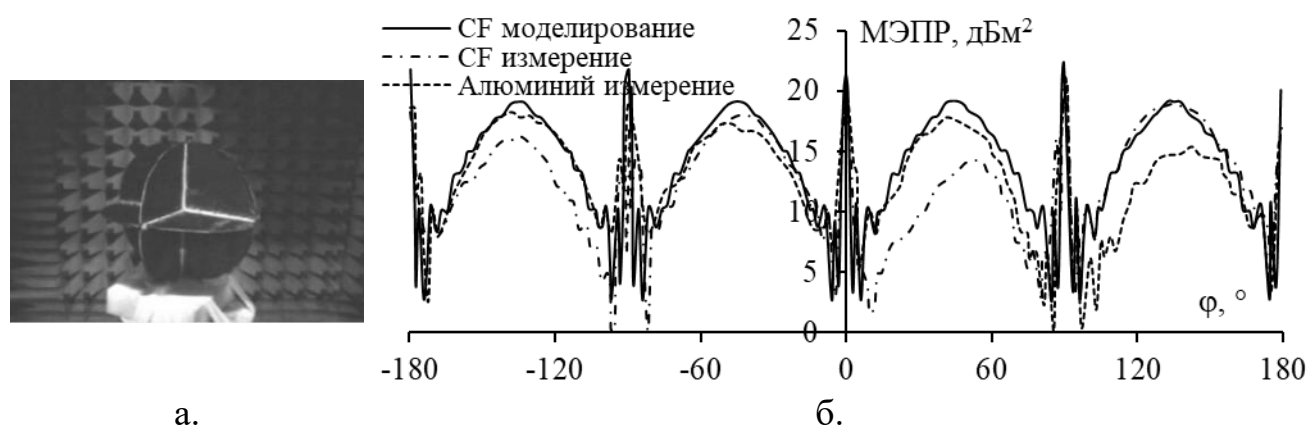


Рис. 35. Октаэдрический КТУО с использованием CF (а) и МЭПР октаэдрических КТУО с использованием различных материалов (б)

Однако этот метод также имеет несколько недостатков. Использование CF в качестве основного материала приведет к снижению МЭПР по сравнению с использованием алюминия. Эту проблему можно решить с помощью серебряного покрытия, но оно требует высоких затрат и в настоящее время не подходит для массового производства. Кроме того, при создании сплошной структуры возникают проблемы, уже упомянутые в предыдущей части. Если на поверхности структуры будут сделаны отверстия, ее прочность может снизиться, и она будет подвержена повреждениям или разрыву, особенно в условиях экстремального климата.

2.3.8.2. Вырезание и сверление отверстий

Уменьшение массы УО путем вырезания и сверления отверстий перспективно [196]. Как уже упоминалось, отверстия диаметром около $\lambda/6$ не приводят к значительному снижению МЭПР по сравнению со сплошными УО. Однако если размер отверстий меньше, снижение массы мало. Кроме того, рассматривались различные формы отверстий, такие как круглая, квадратная и треугольная. Из них круглое отверстие лучше, поскольку эффективно снижает массу, не уменьшая слишком сильно характеристики рассеяния. Два этапа создания перфорированных УО включают: изменение диаметра отверстий в диапазоне от $\lambda/8$ до $\lambda/6$ и расчет уменьшенной площади и МЭПР перфорированных УО. После сравнения МЭПР перфорированных УО с МЭПР сплошных УО в моделировании и измерениях, учитывая перфорированный УО, наилучшими являются те, у которых площадь сокращена больше всего, а МЭПР рассеяния наиболее близок к оригинальному образцу. Например, в [196] ПТУО размером 0,3 м на $f=10$ GHz ($\lambda=0,03$ м) уменьшен по массе и площади на 35% при отверстиях диаметром 4 мм. МЭПР перфорированного УО при этом был близок к МЭПР сплошных УО. Однако эффективность снижения массы еще не была оптимальной. Отверстия диаметром 4,5 мм уменьшили массу на 44,2%, а МЭПР перфорированной структуры оставался как у сплошной (рис. 36).

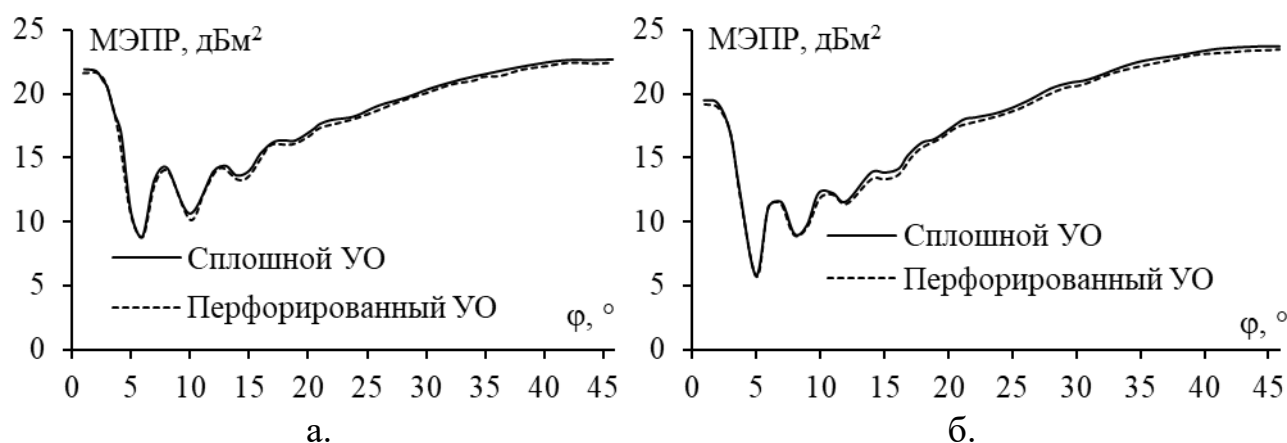


Рис. 36. МЭПР УО в $\theta=45$ (а), 60 (б) ° плоскостях (диаметр отверстия 4,5 мм)

Вырезание для снижения массы УО испытано на структурах ДУО размером 0,3 м [196]. Эта структура имеет верхнюю, нижнюю, левую и правую кромки толщиной 0,015 м, а канавки (вырезы) имеют ширину 0,003 м и длину 0,27 м (рис. 37а). В общей сложности на каждой панели структуры было создано 45 канавок. Это помогает уменьшить площадь ДУО примерно на 41%, что соответствует снижению массы на 41%. При сравнении МЭПР ДУО с канавками и МЭПР сплошных ДУО в плоскости $\theta=90^\circ$ среднее снижение МЭПР составило около 4,9 дБ (рис. 37б). Это доказывает, что вырезание канавок существенно влияет на МЭПР структуры. Поэтому необходимо осторожно подходить к использованию этого метода [196]. Кроме того, вырезание эффективно только для структур, работающих с волнами возбуждения с линейной поляризацией, как в случае с поляризацией ϕ , и не может быть применено для волн с

другими типами поляризации, такими как θ -поляризация (рис. 37а). Это снижает гибкость метода и ограничивает возможности использования структуры в различных ситуациях.

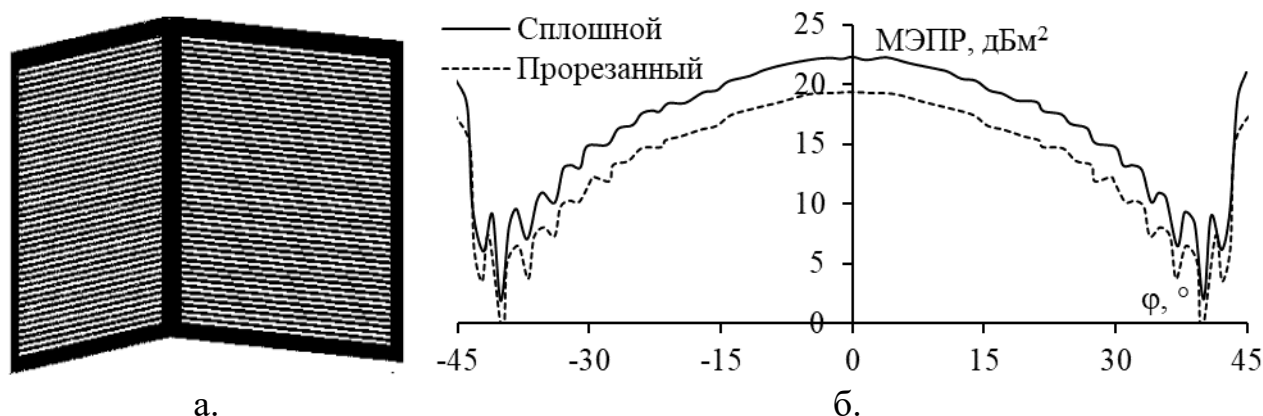


Рис. 37. ДУО с прорезями (а) и МЭПР для него и сплошного ДУО (б)

2.3.8.3. Создание разреженного УО

Структуры рассеивателей из ПС достигли хорошего снижения массы по сравнению со сплошной структурой. Между тем его может быть недостаточно. Рассмотрим новый подход к уменьшению массы структур из ПС путем создания разреженных рассеивателей на основе АОТС. Суть её – исключение проводов с малым током, когда падающая волна возбуждает структуру. Основные её шаги следующие: определение тока в проводах структуры при возбуждении плоской волной с направлением $\theta_{\text{пад}}$, $\varphi_{\text{пад}}$. Удаление проводов с малым током и получение разреженной структуры в этом направлении возбуждения. Аналогично, изменяя направление возбуждения, получают разреженные структуры для каждого соответствующего направления. В конечном итоге, все разреженные структуры в каждом направлении возбуждения объединяются на основе порога выбора результирующей разреженной структуры (T), определяемого числом присутствий каждого проводника во всех структурах. Оставление проводов с большим током помогает не только совпасть характеристикам разреженной и исходной структур, но и эффективно уменьшить массу. Например, создание разреженного ДУО, когда направление падающей волны неопределенно ($\varphi=0-360^\circ$ и $\theta=0-360^\circ$) и определено ($\theta=84-96^\circ$, $\varphi=-40-40^\circ$), показано на рис. 38. Видно уменьшение массы и площади поверхности разреженной ПС более двух раз, чем у исходной ПС, при этом характеристики рассеивателя хорошо совпадают с характеристиками исходной ПС.

Кроме преимуществ уменьшения массы и площади, форма разреженных ДУО, как любых разреженных структур, напоминает травяные заросли, что не нарушает эстетический вид городской среды и также помогает маскировать структуру [197]. Однако этот алгоритм имеет ряд слабых мест, которые следует улучшить в будущем: соединение свободных проводов и способ создания разреженных рассеивателей, когда падающая волна имеет различные поляризации.

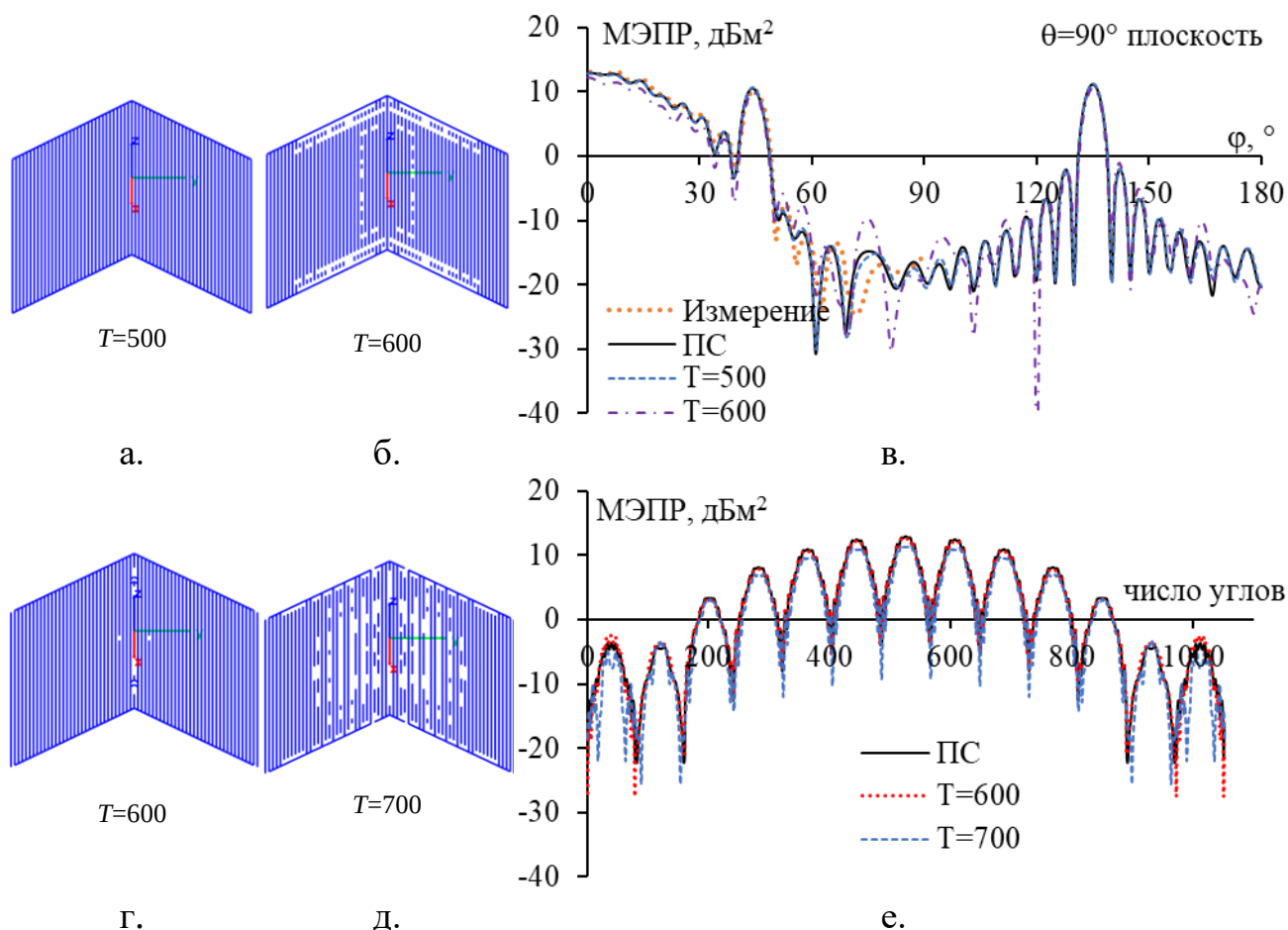


Рис. 1. Разреженные модели УО
при $\theta_{\text{пад}}=0-360^\circ$, $\varphi_{\text{пад}}=0-360^\circ$ (а, б) и их МЭПР в $\theta=90^\circ$ плоскости (в);
при $\theta_{\text{пад}}=84-96^\circ$, $\varphi_{\text{пад}}=-40-40^\circ$ (г, д) и их МЭПР в этой области (е)

Выводы

Статья сосредоточена на значительном развитии МоМ и оптических методов, а также их комбинаций для анализа электромагнитных рассеивателей. Эти методы продемонстрировали свою способность решать сложные задачи, включая анализ крупных структур с множеством сложных мелких деталей, крупномасштабных структур и структур из сложных материалов. Однако, несмотря на значительный прогресс в развитии МоМ, оптических методов и их гибридов, остаются проблемы баланса точности и вычислительной эффективности. Это особенно важно для задач, требующих высокой точности и низких вычислительных ресурсов при решении.

Обзор также рассматривает развитие УО за последние годы. Современные УО могут быть спроектированы и оптимизированы для соответствия всё более строгим техническим стандартам и требованиям. УО стали важной частью различных электромагнитных систем благодаря своей способности создавать сильное, широкое поле рассеяния, низким производственным затратам и разнообразным областям применения, таким как морские приложения, InSAR, оптимизация антенн и др.

Кроме того, оптимизация УО будет становиться всё более важной в будущем, поскольку требования к производительности и надежности электромагнитных систем становятся всё более жесткими. Недавние исследования показали, что УО могут быть улучшены как с точки зрения конструкции, так и материалов, особенно в снижении массы, площади поверхности и улучшении устойчивости к экстремальным погодным условиям. В будущем оптимизация УО будет иметь ещё большее значение, особенно в контексте более строгих требований в космической, военной и гражданской областях, где важны не только характеристики рассеяния, но и компактность и прочность УО.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту (FEWM-2024-0005) в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники.

Литература

1. David B. D. A review of important recent developments in full-wave CEM for RF and microwave engineering // Proceedings. ICCEA 2004. 2004 3rd International Conference on Computational Electromagnetics and Its Applications. – Beijing (China). 2004. P. PS/1–PS/4. doi: 10.1109/iccea.2004.1459268.
2. Niziolek M. Review of methods used for computational electromagnetics // 2009 2nd International Students Conference on Electrodynamics and Mechatronics. – Opole (Poland). 2009. P. 15–16. doi: 10.1109/ISCON.2009.5156093.
3. Chen Z., Wang C. F., Hoefer W. J. R. A unified view of computational electromagnetics // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2022. Vol. 70. No. 2. P. 955–969. doi: 10.1109/TMTT.2021.3138911.
4. Peterson A., Mittra R. Iterative-based computational methods for electromagnetic scattering from individual or periodic structures // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1987. Vol. 12. No. 2. P. 458–465. doi: 10.1109/JOE.1987.1145270.
5. Guo J., Man L., Yin H., Li X., Li M. Controllability analysis of polarization characteristics of scattering elements for reproduction application // 2021 International Applied Computational Electromagnetics Society. – Symposium, Chengdu (China). 2021. P. 1–2. doi: 10.23919/ACES-China52398.2021.9581545.
6. Yan Y., Wu G., Dong Y. Polarization scattering matrix analysis for weak target detection in sea clutter // 2021 CIE International Conference on Radar (Radar). – Haikou, Hainan (China). 2021. P. 1169–1172. doi: 10.1109/Radar53847.2021.10028319.
7. Parinov E. G., Kopylov A. A., Zimin I. V. The use of a model of calculation of polarization scattering matrices for the study of informativeness of polarization attributes for classification of objects of observation // 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – Divnomorskoe (Russia). 2019. P. 236–239. doi: 10.1109/RSEMW.2019.8792745.
8. Bilal A., Hamza S. M., Taj Z., Salamat S. Comparison of SBR and MLFMM techniques for the computation of RCS of a fighter aircraft // IET Radar, Sonar

& Navigation. 2019. Vol. 13. No. 10. P. 1805–1810. doi: 10.1049/iet-rsn.2019.0070.

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. Song J., Cai-Cheng L., Weng C. C. Multilevel fast multipole algorithm for electromagnetic scattering by large complex objects // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1997. Vol. 45. No. 10. P. 1488–1493. doi: 10.1109/8.633855.

11. Dang T. P., Alhaj Hasan A. F., Gazizov T. R. MoM-based performance analysis of different corner reflector scatterers using wire grid // 2024 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). – Saratov (Russian Federation). 2024. P. 113–116. doi: 10.1109/APEDE59883.2024.10715940.

12. Rashid A. K., Zhang Q. An efficient method of moments for thick-wire antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2022. Vol. 70. No. 12. P. 12399–12404. doi: 10.1109/TAP.2022.3209277.

13. Yuan K., Grassi F., Spadacini G., Pignari S. A. Accounting for wire coating in the modeling of field coupling to twisted-wire pairs // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2018. Vol. 60. No. 1. P. 284–287. doi: 10.1109/TEMPC.2017.2707666.

14. Du Plessis J. T., Dommissie W. R., Botha M. M., Rylander T. Scattering analysis of thick wires with the MoM using macro basis functions // 2022 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). – Cape Town (South Africa). 2022. P. 340–342. doi: 10.1109/ICEAA49419.2022.9899911.

15. Balanis C. A. Balanis' Advanced Engineering Electromagnetics, 3rd Edition. John Wiley & Sons, 2024.

16. Mahadevan K., Auda H. A., Glisson A. W. Scattering from a thin perfectly-conducting square plate // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 1992. Vol. 34. No. 1. P. 26–32. doi: 10.1109/74.125886.

17. Bao S., Wang D., Mo Y., Hu S., Gu J., Tang W. Fully analytical evaluation of singular integrals with RWG and rooftop basis functions // IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques. 2020. Vol. 5. P. 217–226. doi: 10.1109/JMMCT.2020.3029064.

18. Huang S., Xiao G., Hu Y., Liu R., Mao J. Multibranch Rao–Wilton–Glisson basis functions for electromagnetic scattering problems // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2021. Vol. 69. No. 10. P. 6624–6634. doi: 10.1109/TAP.2021.3070058.

19. Basis Function. Altair Feko [Электронный ресурс]. URL: https://help.altair.com/2021/feko/topics/feko/user_guide/solver_solution_methods/basis_functions_feko_c.htm (дата обращения: 15.02.2025).

20. RCS. MATLAB Help Center [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/help/antenna/ref/cavity.rcs.html> (дата обращения: 15.01.2024).

21. Electromagnetic Simulation Solvers. Dassault Systèmes [Электронный ресурс]. URL: <https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite/electromagnetic-simulation-solvers> (дата обращения: 10.10.2024).
22. Alhaj Hasan A. F., Dang T. P., Gazizov T. R. Scattering from a perfectly conducting plate using wire-grid and MoM with pulse basis functions // 2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). – Vyborg (Russian Federation). 2024. P. 1–6. doi: 10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617518.
23. Dang T. P., Alhaj Hasan A. F., Gazizov T. R. MoM scattering analysis of dihedral corner reflector: TALGAT verification // 2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). – Vyborg (Russian Federation). 2024. P. 1–5. doi: 10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617635.
24. Dang T. P., Alhaj Hasan A. F., Gazizov T. R. Triangular trihedral corner reflector analysis using wire-grid and MoM with pulse basis functions // 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – Magnitogorsk (Russian Federation). 2024. P. 108–113. doi: 10.1109/UralCon62137.2024.10718914.
25. Alhaj Hasan A. On modeling antennas using MoM-based algorithms: wire-grid versus surface triangulation // Algorithms. 2023. Vol. 16. No. 4. P. 200. doi: 10.3390/a16040200.
26. Dang T. P., Alhaj Hasan A. F., Gazizov T. R. Comparative analysis of wire grid scatterers with different cells using MoM and pulse basis functions // 2024 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH). – Vienna (Austria). 2024. P. 1–6. doi: 10.1109/EMCTECH63049.2024.10741792.
27. Trueman C. W., Kubina S. J. Fields of complex surfaces using wire grid modelling // IEEE Transactions on Magnetic. 1991. Vol. 27. No. 5. P. 4262–4267. doi: 10.1109/20.105043.
28. Алхадж Хасан А. Ф. Модель и методики для оценки уровня электромагнитного излучения печатных плат с модальным резервированием и антенн с аппроксимацией проводной сеткой. Дис. канд. техн. наук. – Томск: ТУСУР, 2023. – 214 с.
29. Alhaj Hasan A., Klyukin D. V., Kvasnikov A. A., Komnatnov M. E., Kuksenko S. P. On wire-grid representation for modeling symmetrical antenna elements // Symmetry. 2022. Vol. 14. P. 1354. doi: 10.3390/sym14071354.
30. The Conformal Method of Moments. Golden Engineering Empowering Your Antenna Innovations [Электронный ресурс]. URL: <https://antennasimulator.com/index.php/knowledge-base/conformal-moment-method/> (дата обращения: 15.05.2024).
31. Inclán-Sánchez L. Performance evaluation of a low-cost semitransparent 3D-printed mesh patch antenna for urban communication applications // Electronics. 2024. Vol. 13. No. 1. P. 153. doi: 10.3390/electronics13010153.
32. 4NEC2 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.qsl.net/4nec2/> (дата обращения: 15.01.2025).

33. Some 4Nec2 features [Электронный ресурс]. URL: <https://www.qsl.net/4nec2/features.htm> (дата обращения: 10.01.2025).
34. Alhaj Hasan A., Nguyen T. M., Kuksenko S. P., Gazizov T. R. Wire-Grid and sparse MoM antennas: past evolution, present implementation, and future possibilities // *Symmetry*. 2023. Vol. 15. No. 2. P. 378. doi: 10.3390/sym15020378.
35. Scattering - RCS calculation with NEC2 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.aeronetworks.ca/2017/09/scattering-rcs-calculation-with-nec2.html> (дата обращения: 10.02.2025).
36. Quick Start Guide. Golden Engineering Empowering Your Antenna Innovations [Электронный ресурс]. URL: <https://antennasimulator.com/?s=scatterer> (дата обращения: 05.01.2025).
37. Система TUSUR.EMC [Электронный ресурс]. URL: <https://emc.tusur.ru/talgat-software/> (дата обращения: 10.12.2024).
38. Cai Q. M., Zhao Y. W., Zheng Y. T., Jia M. M., Zhao Z., Nie Z. P. Volume integral equation with higher order hierarchical basis functions for analysis of dielectric electromagnetic scattering // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2015. Vol. 63. No. 11. P. 4964–4975. doi: 10.1109/TAP.2015.2481925.
39. Abbas H. T., Aljihmani L. N., Nevels R. D., Qaraqe K. A. Electromagnetic scattering of two- dimensional electronic systems // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 106521–106526. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2932506.
40. Gholami R., Zheng S., Okhmatovski V. I. Surface-volume-surface EFIE for electromagnetic analysis of 3-D composite dielectric objects in multilayered media // *IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques*. 2019. Vol. 4. P. 383–394. doi: 10.1109/JMMCT.2020.2966366.
41. Gholami R., Zheng S., Okhmatovski V. Overview of surface-volume-surface electric field integral equation formulations for 3-D composite metal-dielectric objects // 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – Copenhagen (Denmark). 2020. P. 1–4. doi: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135784.
42. Oğuzer T., Kutluay D. A novel impedance matrix localization for the fast modeling of 2D electromagnetic scattering using the localized Green's function // 2019 19th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF). – Nancy (France). 2019. P. 1–2. doi: 10.1109/ISEF45929.2019.9097022.
43. Bayjja M., Moubadir M., Boussouis M., Amar Touhami N. Analysis of dipole antennas using moment methods and haar wavelet // 2015 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM). – Marrakech (Morocco). 2015. P. 1–6. doi: 10.1109/WINCOM.2015.7381315.
44. Ahmad M. H., Kasilingam D. P. Spectral domain fast multipole method for solving integral equations of electromagnetic wave scattering // *Prog. Electromagn. Res.*, 2019. Vol. 80. P. 121–131. doi: 10.2528/PIERM18081602.
45. Meng L. H., Chai S. R., Dai P. K. Analysis of bistatic RCS of multiple simple targets based on MoM-ACA algorithm // 2024 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China). – Xi'an (China). 2024. P. 1–3. doi: 10.1109/ACES-China62474.2024.10699860.

46. Chai S. R., Meng L. H., Zou Y. F., Dai P. K. Fast computation of EM scattering from moving PEC target based on MT-ACA-MoM algorithm // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2024. Vol. 23. No. 12. P. 4628–4632. doi: 10.1109/LAWP.2024.3462446.
47. Chai S. R., Meng L. H., Guo L. X. Efficient analysis of EM scattering from multiple identical targets using a tailored ACA-MoM // 2024 14th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). – Hefei (China). 2024. P. 1–4. doi: 10.1109/ISAPE62431.2024.10840962.
48. Chai S. R., Meng L. H., Guo L. X., Dai P. K. A Dual-ACA-MoM algorithm for EM scattering from multiple identical rigid targets // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2025. Vol. 73. No. 2. P. 878–889. doi: 10.1109/TMTT.2024.3432635.
49. Bao Y., Song J., Liu Z. MoM based MLACA to accelerate solving eddy current problems // 2019 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - China (ACES). – Nanjing (China). 2019. P. 1–2. doi: 10.23919/ACES48530.2019.9060790.
50. Wulf D., Bungler R. An efficient implementation of the combined wideband MLFMA/LF-FIPWA // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2009. Vol. 57. No. 2. P. 467–474. doi: 10.1109/TAP.2008.2011176.
51. Kong W. B., Zhou H. X., Zheng K. L., Hong W. Analysis of multiscale problems using the MLFMA with the assistance of the FFT-based method // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2015. Vol. 63. No. 9. P. 4184–4188. doi: 10.1109/TAP.2015.2444442.
52. Liu Y. N., Pan X. M., Sheng X. Q. A fast algorithm for volume integral equation using interpolative decomposition and multilevel fast multipole algorithm // 2016 11th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). – Guilin (China). 2016. P. 519–522. doi: 10.1109/ISAPE.2016.7834003.
53. Pan X., Wei J., Peng Z., Sheng X. A fast algorithm for multiscale electromagnetic problems using interpolative decomposition and multilevel fast multipole algorithm // Radio Science. 2012. Vol. 47. No. 01. P. 1–11. doi: 10.1029/2011RS004891.
54. Pham Xuan V., Condon M., Brennan C. Modified multilevel fast multipole algorithm for stationary iterative solvers // IEEE Access. 2015. Vol. 3. P. 774–786. doi: 10.1109/ACCESS.2015.2437876.
55. Miranda M. J., Ozdemir T., Burkholder R. J. Hardware acceleration of an FMM-FFT solver using consumer-grade GPUs // 2016 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM). – Boulder, CO (USA). 2016. P. 1–2. doi: 10.1109/USNC-URSI-NRSM.2016.7436241.
56. Gar'cia E., Delgado C., Lozano L., Catedra F. Efficient strategy for parallelisation of multi level fast multipole algorithm using CUDA // IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2019. Vol. 13. No. 10. P. 1554–1563. doi: 10.1049/iet-map.2018.5568.
57. Adelman R., Gumerov N. A., Duraiswami R. FMM/GPU accelerated boundary element method for computational magnetics and electrostatics // IEEE

Transactions on Magnetism. 2017. Vol. 53. No. 12. P. 1–11. doi: 10.1109/TMAG.2017.2725951.

58. Topa T., Noga A., Stefański T. P. FPGA acceleration of matrix-assembly phase of RWG-based MoM // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2022. Vol. 21. No. 9. P. 1847–1851. doi: 10.1109/LAWP.2022.3183168.

59. Chen Y., Lin Z., Zhang Y., Jiang S., Zhao X. Parallel out-of-core higher-order method of moments accelerated by graphics processing units // 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. – Vancouver, BC (Canada). 2015. P. 1674–1675. doi: 10.1109/APS.2015.7305226.

60. Carpentieri B., Tavelli M., Sun D. L., Huang T. Z., Jing Y. F. Fast iterative solution of multiple right-hand sides MoM linear systems on CPUs and GPUs computers // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2024. Vol. 72. No. 8. P. 4431–4444. doi: 10.1109/TMTT.2023.3345478.

61. Mrdakovic B. L., Kostic M. M., Olcan D. I., Kolundzija B. M. Acceleration of in-core LU-decomposition of dense MoM matrix by parallel usage of multiple GPUs // 2017 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems (COMCAS). – Tel-Aviv (Israel). 2017. P. 1–4. doi: 10.1109/COMCAS.2017.8244769.

62. Li J., Zhang M., Jiang W., Wei P. Improved FBAM and GO/PO method for EM scattering analyses of ship targets in a marine environment // Sensors. 2020. Vol. 20. No. 17. P. 4735. doi: 10.3390/s20174735.

63. Huang Y., Zhao Z., Qi C., Nie Z., Liu Q. H. Fast point-based KD-tree construction method for hybrid high frequency method in electromagnetic scattering // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 38348–38355. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2853659.

64. Sevgi L., Rafiq Z., Majid I. Radar cross section (RCS) measurements [Testing ourselves] // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2013. Vol. 55. No. 6. P. 277–291. doi: 10.1109/MAP.2013.6781745.

65. Algar M. J., Lozano L., Moreno J., González I., Cátedra F. An efficient hybrid technique in RCS predictions of complex targets at high frequencies // Journal of Computational Physics. 2017. Vol. 345. P. 345–357. doi: 10.1016/j.jcp.2017.05.035.

66. Fan T. Q., Guo L. X., Liu Z. Y. SBR-PO/PTD method for backward scattering of airplane model and application to ISAR image // 2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). – Nanjing (China). 2015. P. 1–3. doi: 10.1109/APMC.2015.7413517.

67. Huang W. F., Zhao Z., Zhao R., Wang J. Y., Nie Z., Liu Q. H. GO/PO and PTD with virtual divergence factor for fast analysis of scattering from concave complex targets // IEEE Trans. Antennas Propag. 2015. Vol. 63. No. 5. P. 2170–2179. doi: 10.1109/TAP.2015.2405086.

68. Zan G., Guo L., Liu S., Liu W., Zuo Y., Yang R. Scattering characteristics of the multi-corner reflector based on SBR method // 2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). – Hangzhou (China). 2018. P. 1–4. doi: 10.1109/ISAPE.2018.8634124.

69. Taygur M. M., Sukharevsky I. O., Eibert T. F. Investigation of massive MIMO scenarios involving rooftop propagation by bidirectional ray-tracing // Progress In Electromagnetics Research C. 2019. Vol. 91. P. 129–142. doi: 10.2528/pierc18122703.
70. Xu W., Guo L., Chai S. Improved SBR method for backward scattering of ship target under shallow sea background // 2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). – Hangzhou (China). 2018. P. 1–4. doi: 10.1109/ISAPE.2018.8634251.
71. Qian X., Huang Y., Zhu X., Xing L., Duxbury P., Noonan J. A hybrid FEM-GO approach to simulate the NSA in an anechoic chamber // The Applied Computational Electromagnetics Society Journal. 2024. Vol. 32. No. 11. P. 1035–1041.
72. Yun Z., Iskander M. F. Ray tracing for radio propagation modeling: principles and applications // IEEE Access. 2015. Vol. 3. P. 1089–1100. doi: 10.1109/ACCESS.2015.2453991.
73. Breglia A., Capozzoli A., Curcio C., Liseno A. GPU implementation of hybrid GO/PO BVH-based algorithm for RCS predictions // 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. – Vancouver, BC (Canada). 2015. P. 1500–1501. doi: 10.1109/APS.2015.7305139.
74. Yang W., Kee C. Y., Wang C. F. Novel extension of SBR-PO method for solving electrically large and complex electromagnetic scattering problems should be a space in half-space // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2017. Vol. 55. P. 3931–3940. doi: 10.1109/TGRS.2017.2684241.
75. Kee C. Y., Liu Z. L., Wang C. F., Yeo T. S. Implementing PTD efficiently for electrically large objects // 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS). – Shanghai (China). 2016. P. 2638–2638. doi: 10.1109/PIERS.2016.7735079.
76. Kee C. Y., Ang L. K., Liu Z. L., Wang C. F. GPU accelerated EM modeling tool for electrically large objects // 2020 IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS). – Singapore (Singapore). 2020. P. 416–416. doi: 10.1109/ICOPS37625.2020.9717953.
77. Mei X., Zhang Y., Lin H. A new efficient hybrid SBR/MoM technique for scattering analysis of complex large structures // 2015 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics. – Hong Kong (China). 2015. P. 306–308. doi: 10.1109/COMPEM.2015.7052643.
78. Hua M., He S. Efficient EM scattering modeling from metal targets coated with anisotropic thin layers // Electronics. 2024. Vol. 13. P. 536. doi: 10.3390/electronics13030536.
79. Wang X., Zhang S., Xue H., Gong S. X., Liu Z. L. A Chebyshev approximation technique based on AIM-PO for wideband analysis // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2016. Vol. 15. P. 93–97. doi: 10.1109/LAWP.2015.2431313.
80. Zhang C. An efficient higher order MoM-PO method for EM scattering from electrically large objects // 2021 IEEE International Symposium on Antennas

and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI). – Singapore (Singapore). 2021. P. 1331–1332. doi: 10.1109/APS/URSI47566.2021.9703809.

81. Wang X., Gong S. X., Ma J., Wang C. F. Efficient analysis of antennas mounted on large-scale complex platforms using hybrid AIM-PO technique // IEEE Trans. Antennas Propag. 2014. Vol. 62. No. 3. P. 1517–1523. doi: 10.1109/TAP.2013.2296326.

82. Liu Z. L., Wang C. F. Efficient iterative method of moments – Physical optics hybrid technique for electrically large objects // IEEE Trans. Antennas Propag. 2012. Vol. 60. P. 3520–3525. doi: 10.1109/TAP.2012.2196963.

83. Akbas M., Alatan L., Ergul O. Accuracy and efficiency improvements in iterative hybridization of the method of moments (MoM) and physical optics (PO) // 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – Davos (Switzerland). 2016. P. 1–5. doi: 10.1109/EuCAP.2016.7481926.

84. Xiao L., Wang X. H., Wang B. Z., Zheng G., Chen P. An efficient hybrid method of iterative MoM-PO and equivalent dipole-moment for scattering from electrically large objects // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2017. Vol. 16. P. 1723–1726. doi: 10.1109/lawp.2017.2669910.

85. Zhou H., Wang X. H., Xiao L., Wang B. Z. Efficient EDM-PO method for the scattering from electrically large objects with the high-order impedance boundary condition // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2022. Vol. 70. No. 9. P. 8242–8249. doi: 10.1109/TAP.2022.3177560.

86. Xue Z. Y., Mao Wu Y., Jin Y. Q. An efficient iterative MoM-PO hybrid method for calculating scattered fields of the multiscale and multiphysics scatterers // 2020 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO). – Hangzhou (China). 2020. P. 1–3. doi: 10.1109/NEMO49486.2020.9343657.

87. Guo L., Li M., Xu S., Yang F., Li J. Modeling of multiscale wave interactions based on an iterative scheme of MoM-PO-EPA algorithm // Electronics. 2022. Vol. 11. P. 990. doi: 10.3390/electronics11070990.

88. Yla-Oijala P., Koivumäki P., Jarvenpää S. Hybrid multilevel fast multipole algorithm – physical optics for impedance surfaces // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2016. Vol. 64. No. 12. P. 5475–5478. doi: 10.1109/tap.2016.2606570.

89. Mei X., Lin H. Enhancing the accuracy of hybrid SBR/MoM method based on new interaction // 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. – Vancouver, BC (Canada). 2015. P. 1678–1679. doi: 10.1109/APS.2015.7305228.

90. He Y., He H., Hu C., Yin J., Yang J. Polarization analysis of trihedral corner reflector with high-frequency approximation // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2022. Vol. 70. No. 10. P. 9607–9620. doi: 10.1109/TAP.2022.3177536.

91. Gao P., Wang X., Liang Z., Gao W. Efficient GPU implementation of SBR for fast computation of composite scattering from electrically large target over a randomly rough surface // Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. USNC/URSI

Nat. Radio Sci. Meeting. – Vancouver, BC (Canada). 2015. P. 1666–1667. doi: 10.1109/APS.2015.7305222.

92. Jianzhou L., Haixuan Z., Shuhui C. Development of an integrative electromagnetic simulation software // 2022 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China). – Xuzhou (China). 2022. P. 1–3. doi: 10.1109/ACES-China56081.2022.10065232.

93. Kim K., Kim J. H., Choi T. M., Cho D. S. Development of radar cross section analysis system of naval ships // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2012. Vol. 4. No. 1. P. 20–32. doi: 10.2478/ijnaoe-2013-0075.

94. Amin B. G. Physical optics analysis for RCS computation of a relatively small complex structure // Applied Computational Electromagnetics Society Journal. 2014. Vol. 29. No. 7. P. 530–540.

95. Dang T. P., Alhaj Hasan A. F., Gazizov T. R. Wire grid scatterer modeling: TALGAT verification // 2024 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Sochi (Russian Federation). 2024. P. 443–448. doi: 10.1109/RusAutoCon61949.2024.10694411.

96. Smit J. C., Burger E. H., Cilliers J. E. Comparison of MLFMM, PO and SBR for RCS investigations in radar applications // IET International Conference on Radar Systems (Radar 2012). – Glasgow (UK). 2012. P. 1–5. doi: 10.1049/cp.2012.1636.

97. Pienaar C., Odendaal J. W., Smit J. C., Joubert J., Cilliers J. E. Comparing different numerical methods for RCS prediction of a realistic electrically large complex airframe with measured data // 2015 1st URSI Atlantic Radio Science Conference (URSI AT-RASC). – Gran Canaria (Spain). 2015. P. 1–1. doi: 10.1109/URSI-AT-RASC.2015.7302866.

98. Pienaar C., Johann W. O., Johan C. S., Johan J., Jacques É. C. RCS results for an electrically large realistic model airframe // The Applied Computational Electromagnetics Society Journal. 2016. Vol. 1. No. 2.

99. Kadera P., Jiménez-Sáez A., Burmeister T., Lacik J., Schüßler M., Jakoby R. Gradient-index-based frequency-coded retroreflective lenses for mm-wave indoor localization // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 212765–212775. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3039986.

100. Ganau A., Vico Navarro J., Morcillo-Pallarés P., Balbastre Tejedor J. V. Design and validation of reflector elements to increase the radar cross-section of small drones // Progress In Electromagnetics Research C. 2023. Vol. 128. P. 129–142. doi: 10.2528/pierc22092003.

101. Batra A. Millimeter wave indoor SAR sensing assisted with chipless tags-based self-localization system: experimental evaluation // IEEE Sensors Journal. 2024. Vol. 24. No. 1. P. 844–857. doi: 10.1109/JSEN.2023.3332431.

102. Trzebiatowski K., Rzymowski M., Kulas L., Nyka K. Simple millimeter wave identification system based on 60 GHz Van Atta arrays // Sensors. 2022. Vol. 22. No. 24. P. 9809. doi: 10.3390/s22249809.

103. Pan J., Chen L. Zhao S., Zhang T. A 2-D fully polarized Van Atta array based on wide-beam tri-polarized antennas // *Micromachines*. 2024. Vol. 15. P. 1400. doi: 10.3390/mi15111400.
104. Desai D. Passive planar terahertz retroreflectors. Дис. канд. техн. наук. – United States: New Jersey Institute of Technology, 2018. – 74 p.
105. Li X. F., Ban Y. L., Sun Q., Che Y. X., Hu J., Nie Z. A compact dual-band Van Atta array based on the single-port single-band/dual-band antennas // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2023. Vol. 22. No. 4. P. 888–892. doi: 10.1109/lawp.2022.3227577.
106. Chen L., Qin M., Zou L., Zhang T. A low-RCS 2D multi-layer Van Atta array at X-band // *Electronics*. 2023. Vol. 12. P. 3486. doi: 10.3390/electronics12163486.
107. Kim Y., Lee W., Yoon Y. J. Monostatic RCS reduction using modified Van Atta array // *Proceedings of the 2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*. – Orlando, FL (USA). 2013. P. 1222–1223. doi: 10.1109/APS.2013.6711271.
108. Yazdani M. R., Heidar H., Mohseni A. H. Expandable shipboard decoy including adequate RCS by using trihedral corner reflectors // *IET Science, Measurement & Technology*. 2016. Vol. 10. No. 5. P. 485–491. doi: 10.1049/iet-smt.2015.0228.
109. Garthwaite M. C., Nancarrow S., Hislop A., Thankappan M., Dawson J. H., Lawrie S. The design of radar corner reflectors for the Australian geophysical observing system: a single design suitable for InSAR deformation monitoring and SAR calibration at multiple microwave frequency bands // *Geoscience Australia*. 2015. 86 p doi: 10.11636/record.2015.003.
110. Jayasri P. V., Niharika K., Yedukondalu K., Sita Kumari E. V. S., Prasad A. V. V. Radar cross section characterization of corner reflectors in different frequency bands and polarizations // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf.* 2018. Vol. XLII–5. P. 637–642. doi: 10.5194/isprs-archives-xlii-5-637-2018.
111. Calibration Services. Government of India. National Remote Sensing Centre. Available at: https://www.nrsc.gov.in/EOS_CAL_MicrowaveTargets?language_content_entity=en (accessed: 08.02.2025).
112. Ying L., Lixin G., Yanchun Z. Investigations of effects of geometric characteristics on RCS for corner reflectors // *2019 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM)*. – Shanghai (China). 2019. P. 1–2. doi: 10.1109/COMPEM.2019.8779187.
113. Wesztergom V., Bányaia L., Szűcs E., Bozsó I., Hooper A., Nagyc L., Szabóc J. Technical data package. – 143 p.
114. Bányaia L., Nagy L., Hooper A., Bozsó I., Szűcs E., Wesztergom V. Investigation of integrated twin corner reflectors designed for 3-D InSAR applications // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2020. Vol. 17. No. 6. P. 1013–1016. doi: 10.1109/LGRS.2019.2939675.
115. Armin W. D. Reflectors for SAR performance testing – second edition. – Sandia Report, 2014, 61 p.

116. Gisinger C., Willberg M., Balss U., Klügel T., Mähler S., Pail R., Eineder M. Differential geodetic stereo SAR with TerraSAR-X by exploiting small multi-directional radar reflectors // *Journal of Geodesy*. 2016. Vol. 91. No. 1. P. 53–67. doi: 10.1007/s00190-016-0937-2.
117. Qiu M., Ai X., Xu Z., Zhao F. Comparative analysis of monostatic and bistatic RCS scattering characteristics for corner reflector // 2022 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China). – Xuzhou (China). 2022. P. 1–3. doi: 10.1109/ACES-China56081.2022.10065107.
118. Hao J., Wang X., Yang S., Gao H. Intelligent simulation technology based on RCS imaging // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. No. 18. P. 10119. doi: 10.3390/app131810119.
119. Malachias N., Kakavas I., Said Al Harthi S. M., Said Al Saidi A. Design and experimental evaluation of a novel type radar reflector for use in the marine environment // *Conference Proceedings of ICMET Oman. International Conference on Marine Engineering and Technology Oman (IMarEST)*. – Muscat (Oman). 2019. P. 237–242. doi: 10.24868/icmet.oman.2019.033.
120. Luo Y., Guo L., Zuo Y., Liu W. Time-domain scattering characteristics and jamming effectiveness in corner reflectors // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 15696–15707. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3053116.
121. Wu L., Xu J., Hu S., Liu Z. High-frequency backscattering properties of quasi-omnidirectional corner reflector: The great-icosahedral-like reflector // *AIP Advances*. 2022. Vol. 12. No. 10. doi: 10.1063/5.0123981.
122. Gan L., Wu Z., Wang X., Li J. An angular blinking jamming method based on electronically controlled corner reflectors // *Journal of Systems Engineering and Electronics*. 2024. Vol. 35. No. 2. P. 330–338. doi: 10.23919/JSEE.2023.000068.
123. Jiang T., Luo J., Yu Z. Research on corner reflector array fitting method for ship scattering characteristics // 2023 IEEE 2nd International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA). – Changchun (China). 2023. P. 1309–1313. doi: 10.1109/EEBDA56825.2023.10090547.
124. Wang M., Xie M., Su Q., Fu X. Identification of ship and corner reflector based on invariant features of the polarization // 2019 IEEE 4th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP). – Wuxi (China). 2019. P. 545–549. doi: 10.1109/SIPROCESS.2019.8868738.
125. Wang L. Y., Jiang N., Sun Y. The mechanism analyzing and use of corner reflector against anti-ship missiles // *Proceedings of the 2017 5th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering (ICMMCCE 2017)*. – Chongqing (China). 2017. P. 998–1002. doi: 10.2991/icmmcce-17.2017.179.
126. Lingang W. U. Present situation and development trend of shipborne RF corner reflector equipment // *Modern Defense Technology*. 2023. Vol. 51. No. 6. P. 36–44. doi: 10.3969/j.issn.1009-086x.2023.06.005.
127. Guan S., Gao X., Lang P., Dong J. The corner reflector array recognition based on multi-domain features extraction and catboost // 2023 8th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP). – Xi'an (China). 2023. P. 1725–1730. doi: 10.1109/ICSP58490.2023.10248896.

128. Chen C., Liu W., Gao Y., Cui L., Chen Q., Fu J., Xing M. An imaging method for marine targets in corner reflector jamming scenario based on time–frequency analysis and modified clean technique // *Remote Sens.* 2025. Vol 17. P. 310. doi: 10.3390/rs17020310.
129. Liang Z., Wang Y., Zhang X., Xie M., Fu X. Identification of ship and corner reflector in sea clutter environment // 2020 15th IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP). – Beijing (China). 2020. P. 622–626. doi: 10.1109/ICSP48669.2020.9321063.
130. Xia L., Wang F., Pang C., Li N., Peng R., Song Z., Li Y. An identification method of corner reflector array based on mismatched filter through changing the frequency modulation slope // *Remote Sens.* 2024. Vol. 16. P. 2114. doi: 10.3390/rs16122114.
131. Yuan H., Fu X., Zhao C., Xie M., Gao X. Ship and corner reflector identification based on extreme learning machine // 2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP). – Chongqing (China). 2019. P. 1–5. doi: 10.1109/ICSIDP47821.2019.9173150.
132. Zhang K., Zhang J., Li C., Li S., Lan C. Combined jamming method of chaff and corner reflector against anti-ship missiles // 2024 IEEE 7th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Chongqing (China). 2024. P. 342–346. doi: 10.1109/IAEAC59436.2024.10503679.
133. Zhang Z. K., Wang D. H., Lei Y. S. A novel RCS enhancing device based on metamaterial // *Radio Engineering.* 2017. Vol. 47. No. 5. P. 67–70.
134. Zhang R., Feng D. J., Xu L. T. Design and polarization characteristics analysis of dihedral based on Salisbury screen // *Journal of Radars.* 2016. Vol. 5. No. 6. P. 658–665.
135. Sun T., Yin F., Xu C., Zhao S., Yan H., Yi H. Ultrawideband precision RCS regulation for trihedral corner reflectors by loading resistive film absorbers // *Electronics.* 2022. Vol. 11. P. 3696. doi: 10.3390/electronics11223696.
136. Wu L., Hu S., Feng C., Luo Y., Liu Z., Lin L. Dynamic doppler characteristics of maritime airborne corner reflector // *Journal of Marine Science and Engineering.* 2024. Vol. 12. No. 5. P. 727. doi: 10.3390/jmse12050727.
137. Bahman Z. Radar energy warfare and the challenges of stealth technology. – Springer, 2020. – 440 p.
138. Hwang J. T., Hong S. Y., Song J. H. Automated topology design to improve the susceptibility of naval ships using geometric deep learning // *Journal of Computational Design and Engineering.* 2023. Vol. 10. No. 2. P. 794–808. doi: 10.1093/jcde/qwad023.
139. Wu L., Hu S., Xu J., Liu Z. Dynamic sequential radar cross section properties of airborne corner reflector in array // *IET Radar, Sonar & Navigation.* 2023. Vol. 17. No. 9. P. 1405–1419. doi: 10.1049/rsn2.124299.
140. Blinkovsky N. K., Gulko V. L., Meshcheryakov A. A., Navigational group radio-optical reflectors of circular action // *Instruments and Experimental Techniques.* 2023. Vol. 66. No. 4. P. 672–679. doi: 10.1134/s0020441223030028.
141. Marker buoys for Indonesia. Resinex Asia Italian Design and Technology for The Asian Market [Электронный ресурс]. URL:

<https://www.resinexasia.com/post/marker-buoys-for-indonesia> (дата обращения: 15.11.2024).

142. Abo H., Osawa T., Sudi Parwata I. N., Ge P., Hiroki S., Ikemoto R. Slope displacement monitoring with corner reflectors by PSInSAR analysis using Sentinel-1 SAR data // 2023 8th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR). – Bali (Indonesia). 2023. P. 1–6. doi: 10.1109/APSAR58496.2023.10388604.

143. Gibert F., Gómez-Olivé A., Garcia-Mondéjar A., Francis R., Hernández S., De La Cruz A. F., Vendrell E., Aparici M. R. I. Radar altimetry external calibration with passive elements: Sentinel-6 MF long term monitoring with the montsec corner reflector facility // IGARSS 2024 - 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – Athens (Greece). 2024. P. 8900–8903. doi: 10.1109/igarss53475.2024.10642903.

144. Froese C., Poncos V., Mansour M., Martin C. D., Skirrow R. Characterizing complex deep seated landslide deformation using corner reflector insar (cr-insar): little smoky landslide, alberta. Proc // 4th Can. Conf. Geohazards. – NS (Canada). 2008. P. 1–4.

145. Jauvin M., Yan Y., Trouvé E., Fruneau B., Gay M., Girard B. Integration of corner reflectors for the monitoring of mountain glacier areas with Sentinel-1 time series // Remote Sensing. 2019. Vol. 11. No. 8. P. 988. doi: 10.3390/rs11080988

146. Algaftsh A., Inggs M., Mishra A. K. Measurements of signal penetration for P-band SAR system through trees using two trihedral corner reflectors // 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – Fort Worth, TX (USA). 2017. P. 3117–3120. doi: 10.1109/IGARSS.2017.8127658.

147. Lin S. Y. A function design for a power-generation corner reflector for SAR analysis // IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – Kuala Lumpur (Malaysia). 2022. P. 2518–2521. doi: 10.1109/IGARSS46834.2022.9884434.

148. Jiao Y., Zhang F., Liu X., Huang Z., Yuan J. C-SAR/02 Satellite polarimetric calibration and validation based on active radar calibrators // Remote Sens. 2025. Vol. 17. P. 282. doi: 10.3390/rs17020282.

149. Gibert F. A trihedral corner reflector for radar altimeter calibration // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2023. Vol. 61. P. 1–8. doi: 10.1109/TGRS.2023.3239988.

150. Yusri N. A. Calibration of 93.1 GHz FOD detection radar on airport runway using trihedral corner reflector // 2021 8th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI). – Semarang (Indonesia). 2021. P. 130–133. doi: 10.23919/EECSI53397.2021.9624210.

151. Saleeb D. A., Elkorany A. S., Saleeb A. A. Polarimetry radar calibration using trihedral corner reflectors with electromagnetic band gap polarization converters // 2015 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM). – Heidelberg (Germany). 2015. P. 1–4. doi: 10.1109/ICMIM.2015.7117936.

152. Iizuka T., Kosaka N., Hisada M., Kawahara Y., Sasatani T. Trimmed aperture corner reflector for angle-selective chipless RFID // IEEE Antennas and

Wireless Propagation Letters. 2023. Vol. 22. No. 10. P. 2537–2541. doi: 10.1109/LAWP.2023.3294940.

153. Iizuka T., Sasatani T., Nakamura T., Kosaka N., Hisada M., Kawahara Y., MilliSign: MmWave-based passive signs for guiding UAVs in poor visibility conditions // ACM MobiCom '23: 29th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. – New York, NY (USA). 2023. doi: 10.1145/3570361.3613264.

154. Kai-Daniel J., Benedikt S., Andreas R., Masoud S., Daniel E., Niels B. Enhanced radar cross-section for W-Band corner reflectors using ceramic additive manufacturing // 2022 IEEE 12th International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA). – Cagliari (Italy). 2022. P. 37–39. doi: 10.1109/RFID-TA54958.2022.9924073.

155. Jiménez-Sáez A. Frequency selective surface coded retroreflectors for chipless indoor localization tag landmarks // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2020. Vol. 19. No. 5. P. 726–730. doi: 10.1109/LAWP.2020.2975143.

156. Sánchez-Pastor J., Schüßler M., Jakoby R., Jiménez-Sáez A. Double-layer frequency selective surface-based corner reflector for indoor self-localization systems in the W-band // 2024 18th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – Glasgow (United Kingdom). 2024. P. 1–5. doi: 10.23919/EuCAP60739.2024.10501184.

157. Brinker K. R., Zoughi R. Corner reflector based misalignment-tolerant chipless RFID tag design methodology // IEEE J. Radio Freq. Identif. 2021. Vol. 5. No. 1. P. 94–105. doi: 10.1109/JRFID.2020.3034483.

158. Weng Y. K., Li S. Efficient solution to the RCS of trihedral corner reflector // Int. J. Appl. Electromagn. Mech. 2015. Vol. 47. No. 2. P. 533–539. doi: 10.3233/JAE-130156.

159. Sukharevsky O., Ryapolov I., Vasilets V., Nechitaylo S. The use of corner reflectors to simulate tactical aircraft // 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW). – Ukraine. 2022. P. 289–292. doi: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037097.

160. Najafnezhad E., Nourinia J., Ghobadi C., Majidzadeh M., Mirzamohammadi F. A high gain dual-band printed antenna for LTE base stations with a corner reflector // AEU - International Journal of Electronics and Communications. 2018. Vol. 87. P. 173–179. doi: 10.1016/j.aeue.2018.02.024.

161. Phaebua K., Lertwiriaprapa T., Phongcharoenpanich C., Chang Y. S., Torrungrueng D., Chou H. T. One-sixteenth spherical homogeneous dielectric lens antenna on metal corner reflector for high-gain radiation with size reduction // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2020. Vol. 19. No. 3. P. 378–382. doi: 10.1109/LAWP.2019.2959657.

162. Milijic M., Jokanovic B. Design of asymmetrical slot antenna array in corner reflector // 2020 55th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST). – Niš (Serbia). 2020. P. 203–206. doi: 10.1109/ICEST49890.2020.9232897.

163. Wang S., Zhang J., Cao R., Zhang Y., Tao X., Qi X. Research on calibration algorithm of two-dimensional plane based on corner reflector // 2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). – Hefei (China). 2023. P. 3483–3488. doi: 10.1109/CIEEC58067.2023.10166499.
164. Boas E. C. V., Ribeiro J. A. P., de Figueiredo F. A. P., Mejía-Salazar J. R. 3-D-printed all-dielectric corner-like bragg reflector for antenna gain enhancement // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2024. Vol. 23. No. 2. P. 558–562. doi: 10.1109/LAWP.2023.3329689.
165. Guo H., Zhou Z., Cai X., Lin Y., Ji L. Dielectric EBG corner reflector antenna with enhanced directivity and RCS reduction // 2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). – Shanghai (China). 2020. P. 1–3. doi: 10.1109/ICMMT49418.2020.9386755.
166. Decena B. A., Luzon J. R., Purisima M. C. L. 2.4 GHz pattern reconfigurable corner reflector antennas using frequency selective conductor loops and strips // TENCON 2017 - 2017 IEEE Region 10 Conference. – Penang (Malaysia). 2017. P. 2914–2919. doi: 10.1109/TENCON.2017.8228360.
167. Elzwawi G. H., Kesavan A., Alwahishi R., Denidni T. A. A new corner-reflector antenna with tunable gain based on active frequency selective surfaces // IEEE Open Journal of Antennas and Propagation. 2020. Vol. 1. P. 88–94. doi: 10.1109/OJAP.2020.2979053.
168. Chatterjee A., Parui S. K. Performance enhancement of a dual-band monopole antenna by using a frequency-selective surface-based corner reflector // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2016. Vol. 64. No. 6. P. 2165–2171. doi: 10.1109/TAP.2016.2552543.
169. Chatterjee A., Parui S. K. Beamwidth control of omnidirectional antenna using conformal frequency selective surface of different curvatures // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. Vol. 66. No. 6. P. 3225–3230. doi: 10.1109/TAP.2018.2819899.
170. Chatterjee A., Banerjee S., Frnda J., Dvorsky M. Planar FSS based dual-band wire monopole antenna for multi-directional radiation with diverse beamwidths // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 30427–30435. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3159337.
171. He W., Weng X., Luo W., Chen H., Wu X., Li K., Huang Y., Liu B., Li L. Investigation of radar cross-section reduction for dihedral corner reflectors based on camouflage grass // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2021. Vol. 20. No. 12. P. 2447–2451. doi: 10.1109/lawp.2021.3114302.
172. Kelevitz K., Wright T. J., Hooper A. J., Selvakumaran S. Novel corner-reflector array application in essential infrastructure monitoring // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2022. Vol. 60. P. 1–18. doi: 10.1109/TGRS.2022.3196699.
173. Huang Q., Zhang F., Li L., Liu X., Jiao Y., Yuan X., Li H. Quick quality assessment and radiometric calibration of C-SAR/01 satellite using flexible automatic corner reflector // Remote Sensing. 2022. Vol. 15. No. 1. P. 104. doi: 10.3390/rs15010104.

174. Zhou Y., Li C., Ma L., Yang M. Y., Liu Q. Improved trihedral corner reflector for high-precision SAR calibration and validation // 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. – Quebec City, QC (Canada). 2014. P. 454–457. doi: 10.1109/IGARSS.2014.6946457.

175. Gan L., Sun G., Feng D., Li J. Characteristics of an eight-quadrant corner reflector involving a reconfigurable active metasurface // Sensors. 2022. Vol. 22. No. 13. P. 4715. doi: 10.3390/s22134715.

176. Mamedes D. F., Neto A. G., Bornemann J. Reconfigurable corner reflector using PIN-diode-switched frequency selective surfaces // 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting. – Montreal, QC (Canada). 2020. P. 127–128. doi: 10.1109/IEEECONF35879.2020.9329791.

177. Sánchez-Pastor J., Kamel A., Schüßler M., Jakoby R., Jiménez-Sáez A. Double-notch frequency-coded corner reflectors for sub-THz chipless RFID tags // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2024. Vol. 23. No. 9. P. 2688–2692. doi: 10.1109/LAWP.2024.3404625.

178. Lazaro A., Lorenzo J., Villarino R., Girbau D. Modulated corner reflector using frequency selective surfaces for FMCW radar applications // 2015 European Microwave Conference (EuMC). – Paris (France). 2015. P. 111–114. doi: 10.1109/EuMC.2015.7345712.

179. Morrow I. L., Morrison K., Finnis M., Whittow W. A low profile retrodirective frequency selective surface for radar earth observation // 2015 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC). – Loughborough (UK). 2015. P. 1–4. doi: 10.1109/LAPC.2015.7366143.

180. Williams R. J., Gatesman A. J., Goyette T. M., Giles R. H. Radar cross section measurements of frequency selective terahertz retroreflectors // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 9102. – Bellingham, WA (United States). 2014. P. 91020R. doi: 10.1117/12.2051802.

181. Zhou Z., Wang J., Sui R., Li L., Pang C. Simulation analysis of vertex triangle filling type abnormal corner reflector // 2022 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS). – Harbin (China). 2022. P. 1–3. doi: 10.1109/IWS55252.2022.9977804.

182. Sui R., Feng D., Wang J., Sun G. Simulation analysis of abnormal shape trihedral corner reflector scattering characteristics // 2021 CIE International Conference on Radar (Radar). Haikou, Hainan (China). 2021. P. 1127–1130. doi: 10.1109/Radar53847.2021.10028083.

183. Yakimov A. N., Bestugin A. R., Kirshina I. A. Parametric optimization of the corner reflector of electromagnetic waves // 2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – St. Petersburg (Russian Federation). 2022. P. 1–4. doi: 10.1109/WECONF55058.2022.9803381.

184. Ren Z., Yin H., Sun X., Liu Y. -Q. Active corner reflector based on electrically tunable metasurface // 2024 IEEE 10th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless

Communications (MAPE). – Guangzhou (China). 2024. P. 1–2. doi: 10.1109/MAPE62875.2024.10813715.

185. Liu H., Zhou B., Miao C., Li S., Xu L., Zheng K., Li G., Yang S., Zhu M. Refinement analysis of real dihedral and trihedral CR-InSAR based on TerraSAR-X and Sentinel-1A images // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2024. Vol. 17. P. 18739–18750. doi: 10.1109/jstars.2024.3472220.

186. Li C., Yin J., Zhao J., Zhang G., Shan X. The selection of artificial corner reflectors based on RCS analysis // Acta Geophysica. 2011. Vol. 60. No. 1. P. 43–58. doi: 10.2478/s11600-011-0060-y.

187. Garthwaite M. C., Thankappan M., Williams M. L., Nancarrow S., Hislop A., Dawson J. Corner reflectors for the Australian geophysical observing system and support for calibration of satellite-borne synthetic aperture radars // 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium – IGARSS. – Melbourne, VIC (Australia). 2013. P. 266–269. doi: 10.1109/IGARSS.2013.6721143.

188. Algaftsh A., Inggs M., Mishra A. K. The effect of perforating the corner reflector on maximum radar cross section // 2016 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS). – Abu Dhabi (United Arab Emirates). 2016. P. 1–4. doi: 10.1109/MMS.2016.7803815.

189. Alexandra C., Elaine C., Angelica C., Brandon H., Scott H., Yunling L., Rich M. AirMoSS P-band SAR calibration // 2011 CEOS SAR Calibration and Validation Workshop, JPL Open Repository. 2011. <https://hdl.handle.net/2014/43534>.

190. Garthwaite M. On the design of radar corner reflectors for deformation monitoring in multi-frequency InSAR // Remote Sensing. 2017. Vol. 9. No. 7. P. 648. doi: 10.3390/rs9070648.

191. Unal I., Gulum T. O., Bayramoglu E. C. Investigations of electrical size effects on radar cross section for orthogonally distorted corner reflectors // 2015 IEEE Radar Conference (RadarCon). – Arlington, VA (USA). 2015. P. 1515–1519. doi: 10.1109/RADAR.2015.7131236.

192. Döring B., Schwerdt M., Bauer R. TerraSAR-X calibration ground equipment // Wave Propagation in Communication, Microwaves Systems and Navigation (WFMN). – Germany. 2007. P. 5.

193. Yuan Y., Ji L., Wang Z., Yang D., Zhang B., Wang H. Design of a high precision spaceborne millimeter wave SAR corner reflector // 2022 3rd China International SAR Symposium (CISS). – Shanghai (China). 2022. P. 1–5. doi: 10.1109/CISS57580.2022.9971251.

194. Булатова Л. И., Гилаев Д. М., Назаров Р. Р. Апробация конструкции уголкового отражателя для обеспечения наблюдений за геодинамическими полигонами с использованием радарных съемок // XI Международная научно-практическая конференция «Актуальные Вопросы Геодезии И Геоинформационных Систем». – Казанский (приволжский) федеральный университет, 2022. – С. 28–31.

195. Corner reflectors. Trealtamira [Электронный ресурс]. URL: <https://site.tre-altamira.com/insar-solutions/insar-corner-reflectors/> (дата обращения: 15.01.2025).

196. Gu J., Dai F., Chen Q., Gu D., Liao Y., Wang B. Research on RCS calculation and weight loss method of radar angle reflector // 2022 3rd China International SAR Symposium (CISS). – Shanghai (China). 2022. P. 1–4. doi: 10.1109/CISS57580.2022.9971366.

197. Gazizov T. R., Hasan A. A., Nguyen M. T. A simple modeling methodology for creating hidden antennas // 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Sochi (Russian Federation). 2023. P. 1080–1084. doi: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139026.

References

1. David B. D. A review of important recent developments in full-wave CEM for RF and microwave engineering. Proceedings. ICCEA 2004. 2004 3rd International Conference on Computational Electromagnetics and Its Applications. Beijing, China, 2004, pp. PS/1–PS/4. DOI: 10.1109/iccea.2004.1459268.

2. Niziolek M. Review of methods used for computational electromagnetics. 2009 2nd International Students Conference on Electrodynamics and Mechatronics. Opole, Poland, 2009, pp. 15–16. DOI: 10.1109/ISCON.2009.5156093.

3. Chen Z., Wang C. F., Hoefer W. J. R. A unified view of computational electromagnetics. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2022, vol. 70, no. 2, pp. 955–969. DOI: 10.1109/TMTT.2021.3138911.

4. Peterson A., Mittra R. Iterative-based computational methods for electromagnetic scattering from individual or periodic structures. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1987, vol. 12, no. 2, pp. 458–465. DOI: 10.1109/JOE.1987.1145270.

5. Guo J., Man L., Yin H., Li X., Li M. Controllability analysis of polarization characteristics of scattering elements for reproduction application. 2021 International Applied Computational Electromagnetics Society. Symposium, Chengdu, China, 2021, pp. 1–2. DOI: 10.23919/ACES-China52398.2021.9581545.

6. Yan Y., Wu G., Dong Y. Polarization scattering matrix analysis for weak target detection in sea clutter. 2021 CIE International Conference on Radar (Radar). Haikou, Hainan, China, 2021, pp. 1169–1172. DOI: 10.1109/Radar53847.2021.10028319.

7. Parinov E. G., Kopylov A. A., Zimin I. V. The use of a model of calculation of polarization scattering matrices for the study of informativeness of polarization attributes for classification of objects of observation. 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). Divnomorskoe, Russia, 2019, pp. 236–239. DOI: 10.1109/RSEMW.2019.8792745.

8. Bilal A., Hamza S. M., Taj Z., Salamat S. Comparison of SBR and MLFMM techniques for the computation of RCS of a fighter aircraft. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2019, vol. 13, no. 10, pp. 1805–1810. DOI: 10.1049/iet-rsn.2019.0070

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. Song J., Cai-Cheng L., Weng C. C. Multilevel fast multipole algorithm for electromagnetic scattering by large complex objects. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1997, vol. 45, no. 10, pp. 1488–1493. DOI: 10.1109/8.633855.
11. Dang T. P., Alhaj Hasan A. F., Gazizov T. R. MoM-based performance analysis of different corner reflector scatterers using wire grid. 2024 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). Saratov, Russian Federation, 2024, pp. 113–116. DOI: 10.1109/APEDE59883.2024.10715940.
12. Rashid A. K., Zhang Q. An efficient method of moments for thick-wire antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, vol. 70, no. 12, pp. 12399–12404. DOI: 10.1109/TAP.2022.3209277.
13. Yuan K., Grassi F., Spadacini G., Pignari S. A. Accounting for wire coating in the modeling of field coupling to twisted-wire pairs. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, vol. 60, no. 1, pp. 284–287. DOI: 10.1109/TEM.2017.2707666.
14. Du Plessis J. T., Dommissie W. R., Botha M. M., Rylander T. Scattering analysis of thick wires with the MoM using macro basis functions. 2022 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). Cape Town, South Africa, 2022, pp. 340–342. DOI: 10.1109/ICEAA49419.2022.9899911.
15. Balanis C. A. Balanis' Advanced Engineering Electromagnetics, 3rd Edition. John Wiley & Sons, 2024.
16. Mahadevan K., Auda H. A., Glisson A. W. Scattering from a thin perfectly-conducting square plate. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 1992, vol. 34, no. 1, pp. 26–32. DOI: 10.1109/74.125886.
17. Bao S., Wang D., Mo Y., Hu S., Gu J., Tang W. Fully analytical evaluation of singular integrals with RWG and rooftop basis functions. *IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques*, 2020, vol. 5, pp. 217–226. DOI: 10.1109/JMMCT.2020.3029064.
18. Huang S., Xiao G., Hu Y., Liu R., Mao J. Multibranch Rao–Wilton–Glisson basis functions for electromagnetic scattering problems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, vol. 69, no. 10, pp. 6624–6634. DOI: 10.1109/TAP.2021.3070058.
19. Basis Function. Altair Feko. Available at: https://help.altair.com/2021/feko/topics/feko/user_guide/solver_solution_methods/basis_functions_feko_c.htm (accessed: 15.02.2025).
20. RCS. MATLAB Help Center. Available at: <https://www.mathworks.com/help/antenna/ref/cavity.rcs.html> (accessed: 15.01.2024).
21. *Electromagnetic Simulation Solvers*. Dassault Systèmes. Available at: <https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite/electromagnetic-simulation-solvers> (accessed: 10.10.2024).
22. Alhaj Hasan A. F., Dang T. P., Gazizov T. R. Scattering from a perfectly conducting plate using wire-grid and MoM with pulse basis functions. 2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). Vyborg, Russian Federation, 2024, pp. 1–6. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617518.
23. Dang T. P., Alhaj Hasan A. F., Gazizov T. R. MoM scattering analysis of dihedral corner reflector: TALGAT verification. 2024 Systems of Signal

Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). Vyborg, Russian Federation, 2024, pp. 1–5. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617635.

24. Dang T. P., Alhaj Hasan A. F., Gazizov T. R. Triangular trihedral corner reflector analysis using wire-grid and MoM with pulse basis functions. 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). Magnitogorsk, Russian Federation, 2024, pp. 108–113. DOI: 10.1109/UralCon62137.2024.10718914.

25. Alhaj Hasan A. On modeling antennas using MoM-based algorithms: wire-grid versus surface triangulation. *Algorithms*, 2023, vol. 16, no. 4, p. 200. DOI: 10.3390/a16040200.

26. Dang T. P., Alhaj Hasan A. F., Gazizov T. R. Comparative analysis of wire grid scatterers with different cells using MoM and pulse basis functions. 2024 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH). Vienna, Austria, 2024, pp. 1–6. DOI: 10.1109/EMCTECH63049.2024.10741792.

27. Trueman C. W., Kubina S. J. Fields of complex surfaces using wire grid modelling. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1991, vol. 27, no. 5, pp. 4262–4267. DOI: 10.1109/20.105043.

28. Алхадж Хасан А. Ф. Модель и методики для оценки уровня электромагнитного излучения печатных плат с модальным резервированием и антенн с аппроксимацией проводной сеткой. Дис. канд. техн. наук. – Томск: ТУСУР, 2023. – 214 с.

29. Alhaj Hasan A., Klyukin D. V., Kvasnikov A. A., Komnatnov M. E., Kuksenko S. P. On wire-grid representation for modeling symmetrical antenna elements. *Symmetry*, 2022, vol. 14, p. 1354. DOI: 10.3390/sym14071354.

30. *The Conformal Method of Moments. Golden Engineering Empowering Your Antenna Innovations.* Available at: <https://antennasimulator.com/index.php/knowledge-base/conformal-moment-method/> (accessed: 15.05.2024).

31. Inclán-Sánchez L. Performance evaluation of a low-cost semitransparent 3D-printed mesh patch antenna for urban communication applications. *Electronics*, 2024, vol. 13, no. 1, pp. 153. DOI: 10.3390/electronics13010153.

32. 4NEC2. Available at: <https://www.qsl.net/4nec2/> (accessed: 15.01.2025).

33. Some 4Nec2 features. Available at: <https://www.qsl.net/4nec2/features.htm> (accessed: 10.01.2025).

34. Alhaj Hasan A., Nguyen T. M., Kuksenko S. P., Gazizov T. R. Wire-Grid and sparse MoM antennas: past evolution, present implementation, and future possibilities. *Symmetry*, 2023, vol. 15, no. 2, p. 378. DOI: 10.3390/sym15020378.

35. *Scattering - RCS calculation with NEC2.* Available at: <https://www.aeronetworks.ca/2017/09/scattering-rcs-calculation-with-nec2.html> (accessed: 10.02.2025).

36. *Quick Start Guide. Golden Engineering Empowering Your Antenna Innovations.* Available at: <https://antennasimulator.com/?s=scatterer> (accessed: 05.01.2025).

37. Система TUSUR.EMC. Available at: <https://emc.tusur.ru/talgat-software/> (accessed: 10.12.2024).
38. Cai Q. M., Zhao Y. W., Zheng Y. T., Jia M. M., Zhao Z., Nie Z. P. Volume integral equation with higher order hierarchical basis functions for analysis of dielectric electromagnetic scattering. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, vol. 63, no. 11, pp. 4964–4975. DOI: 10.1109/TAP.2015.2481925.
39. Abbas H. T., Aljihmani L. N., Nevels R. D., Qaraqe K. A. Electromagnetic scattering of two- dimensional electronic systems. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 106521–106526. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2932506.
40. Gholami R., Zheng S., Okhmatovski V. I. Surface-volume-surface EFIE for electromagnetic analysis of 3-D composite dielectric objects in multilayered media. *IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques*, 2019, vol. 4, pp. 383–394. DOI: 10.1109/JMMCT.2020.2966366.
41. Gholami R., Zheng S., Okhmatovski V. Overview of surface-volume-surface electric field integral equation formulations for 3-D composite metal-dielectric objects. 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Copenhagen, Denmark, 2020, pp. 1–4. DOI: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135784.
42. Oğuzer T., Kutluay D. A novel impedance matrix localization for the fast modeling of 2D electromagnetic scattering using the localized Green's function. 2019 19th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF). Nancy, France, 2019, pp. 1–2. DOI: 10.1109/ISEF45929.2019.9097022.
43. Bayjja M., Moubadir M., Boussouis M., Amar Touhami N. Analysis of dipole antennas using moment methods and haar wavelet. 2015 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM). Marrakech, Morocco, 2015, pp. 1–6. DOI: 10.1109/WINCOM.2015.7381315.
44. Ahmad M. H., Kasilingam D. P. Spectral domain fast multipole method for solving integral equations of electromagnetic wave scattering. *Prog. Electromagn. Res.*, 2019, vol. 80, pp. 121–131. DOI: 10.2528/PIERM18081602.
45. Meng L. H., Chai S. R., Dai P. K. Analysis of bistatic RCS of multiple simple targets based on MoM-ACA algorithm. 2024 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China). Xi'an, China, 2024, pp. 1–3. DOI: 10.1109/ACES-China62474.2024.10699860.
46. Chai S. R., Meng L. H., Zou Y. F., Dai P. K. Fast computation of EM scattering from moving PEC target based on MT-ACA-MoM algorithm. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, vol. 23, no. 12, pp. 4628–4632. DOI: 10.1109/LAWP.2024.3462446.
47. Chai S. R., Meng L. H., Guo L. X. Efficient analysis of EM scattering from multiple identical targets using a tailored ACA-MoM. 2024 14th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). Hefei, China, 2024, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ISAPE62431.2024.10840962.
48. Chai S. R., Meng L. H., Guo L. X., Dai P. K. A Dual-ACA-MoM algorithm for EM scattering from multiple identical rigid targets. *IEEE Transactions on*

Microwave Theory and Techniques, 2025, vol. 73, no. 2, pp. 878–889. DOI: 10.1109/TMTT.2024.3432635.

49. Bao Y., Song J., Liu Z. MoM based MLACA to accelerate solving eddy current problems. 2019 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - China (ACES). Nanjing, China, 2019, pp. 1–2. DOI: 10.23919/ACES48530.2019.9060790.

50. Wulf D., Bungler R. An efficient implementation of the combined wideband MLFMA/LF-FIPWA. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, vol. 57, no. 2, pp. 467–474. DOI: 10.1109/TAP.2008.2011176.

51. Kong W. B., Zhou H. X., Zheng K. L., Hong W. Analysis of multiscale problems using the MLFMA with the assistance of the FFT-based method. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, vol. 63, no. 9, pp. 4184–4188. DOI: 10.1109/TAP.2015.2444442.

52. Liu Y. N., Pan X. M., Sheng X. Q. A fast algorithm for volume integral equation using interpolative decomposition and multilevel fast multipole algorithm. 2016 11th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). Guilin, China, 2016, pp. 519–522. DOI: 10.1109/ISAPE.2016.7834003.

53. Pan X., Wei J., Peng Z., Sheng X. A fast algorithm for multiscale electromagnetic problems using interpolative decomposition and multilevel fast multipole algorithm. *Radio Science*, 2012, vol. 47, no. 01, pp. 1–11. DOI: 10.1029/2011RS004891.

54. Pham Xuan V., Condon M., Brennan C. Modified multilevel fast multipole algorithm for stationary iterative solvers. *IEEE Access*, 2015, vol. 3, pp. 774–786. DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2437876.

55. Miranda M. J., Ozdemir T., Burkholder R. J. Hardware acceleration of an FMM-FFT solver using consumer-grade GPUs. 2016 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM). Boulder, CO, USA, 2016, pp. 1–2. DOI: 10.1109/USNC-URSI-NRSM.2016.7436241.

56. Gar'cia E., Delgado C., Lozano L., Catedra F. Efficient strategy for parallelisation of multi level fast multipole algorithm using CUDA. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2019, vol. 13, no. 10, pp. 1554–1563. DOI: 10.1049/iet-map.2018.5568.

57. Adelman R., Gumerov N. A., Duraiswami R. FMM/GPU accelerated boundary element method for computational magnetics and electrostatics. *IEEE Transactions on Magnetism*, 2017, vol. 53, no. 12, pp. 1–11. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2725951.

58. Topa T., Noga A., Stefański T. P. FPGA acceleration of matrix-assembly phase of RWG-based MoM. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2022, vol. 21, no. 9, pp. 1847–1851. DOI: 10.1109/LAWP.2022.3183168.

59. Chen Y., Lin Z., Zhang Y., Jiang S., Zhao X. Parallel out-of-core higher-order method of moments accelerated by graphics processing units. 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. Vancouver, BC, Canada, 2015, pp. 1674–1675. DOI: 10.1109/APS.2015.7305226.

60. Carpentieri B., Tavelli M., Sun D. L., Huang T. Z., Jing Y. F. Fast iterative solution of multiple right-hand sides MoM linear systems on CPUs and GPUs computers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2024, vol. 72, no. 8, pp. 4431–4444. DOI: 10.1109/TMTT.2023.3345478.
61. Mrdakovic B. L., Kostic M. M., Olcan D. I., Kolundzija B. M. Acceleration of in-core LU-decomposition of dense MoM matrix by parallel usage of multiple GPUs. 2017 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems (COMCAS). Tel-Aviv, Israel, 2017, pp. 1–4. DOI: 10.1109/COMCAS.2017.8244769.
62. Li J., Zhang M., Jiang W., Wei P. Improved FBAM and GO/PO method for EM scattering analyses of ship targets in a marine environment. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 17, p. 4735. DOI: 10.3390/s20174735.
63. Huang Y., Zhao Z., Qi C., Nie Z., Liu Q. H. Fast point-based KD-tree construction method for hybrid high frequency method in electromagnetic scattering. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 38348–38355. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2853659.
64. Sevgi L., Rafiq Z., Majid I. Radar cross section (RCS) measurements [Testing ourselves]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2013, vol. 55, no. 6, pp. 277–291. DOI: 10.1109/MAP.2013.6781745.
65. Algar M. J., Lozano L., Moreno J., González I., Cátedra F. An efficient hybrid technique in RCS predictions of complex targets at high frequencies. *Journal of Computational Physics*, 2017, vol. 345, pp. 345–357. DOI: 10.1016/j.jcp.2017.05.035.
66. Fan T. Q., Guo L. X., Liu Z. Y. SBR-PO/PTD method for backward scattering of airplane model and application to ISAR image. 2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). Nanjing, China, 2015, pp. 1–3. DOI: 10.1109/APMC.2015.7413517.
67. Huang W. F., Zhao Z., Zhao R., Wang J. Y., Nie Z., Liu Q. H. GO/PO and PTD with virtual divergence factor for fast analysis of scattering from concave complex targets. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2015, vol. 63, no. 5, pp. 2170–2179. DOI: 10.1109/TAP.2015.2405086.
68. Zan G., Guo L., Liu S., Liu W., Zuo Y., Yang R. Scattering characteristics of the multi-corner reflector based on SBR method. 2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). Hangzhou, China, 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ISAPE.2018.8634124.
69. Taygur M. M., Sukharevsky I. O., Eibert T. F. Investigation of massive MIMO scenarios involving rooftop propagation by bidirectional ray-tracing. *Progress In Electromagnetics Research C*, 2019, vol. 91, pp. 129–142. DOI: 10.2528/pierc18122703.
70. Xu W., Guo L., Chai S. Improved SBR method for backward scattering of ship target under shallow sea background. 2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). Hangzhou, China, 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ISAPE.2018.8634251.
71. Qian X., Huang Y., Zhu X., Xing L., Duxbury P., Noonan J. A hybrid FEM-GO approach to simulate the NSA in an anechoic chamber. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 2024, vol. 32, no. 11, pp. 1035–1041.

72. Yun Z., Iskander M. F. Ray tracing for radio propagation modeling: principles and applications. *IEEE Access*, 2015, vol. 3, pp. 1089–1100. DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2453991.
73. Breglia A., Capozzoli A., Curcio C., Liseno A. GPU implementation of hybrid GO/PO BVH-based algorithm for RCS predictions. 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. Vancouver, BC, Canada, 2015, pp. 1500–1501. DOI: 10.1109/APS.2015.7305139.
74. Yang W., Kee C. Y., Wang C. F. Novel extension of SBR-PO method for solving electrically large and complex electromagnetic scattering problems should be a space in half-space. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2017, vol. 55, pp. 3931–3940. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2684241.
75. Kee C. Y., Liu Z. L., Wang C. F., Yeo T. S. Implementing PTD efficiently for electrically large objects. 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS). Shanghai, China, 2016, pp. 2638–2638. DOI: 10.1109/PIERS.2016.7735079.
76. Kee C. Y., Ang L. K., Liu Z. L., Wang C. F. GPU accelerated EM modeling tool for electrically large objects. 2020 IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS). Singapore, 2020, pp. 416–416. DOI: 10.1109/ICOPS37625.2020.9717953.
77. Mei X., Zhang Y., Lin H. A new efficient hybrid SBR/MoM technique for scattering analysis of complex large structures. 2015 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics. Hong Kong, China, 2015, pp. 306–308. DOI: 10.1109/COMPEM.2015.7052643.
78. Hua M., He S. Efficient EM scattering modeling from metal targets coated with anisotropic thin layers. *Electronics*, 2024, vol. 13, p. 536. DOI: 10.3390/electronics13030536.
79. Wang X., Zhang S., Xue H., Gong S. X., Liu Z. L. A Chebyshev approximation technique based on AIM-PO for wideband analysis. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, vol. 15, pp. 93–97. DOI: 10.1109/LAWP.2015.2431313.
80. Zhang C. An efficient higher order MoM-PO method for EM scattering from electrically large objects. 2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI). Singapore, 2021, pp. 1331–1332. DOI: 10.1109/APS/URSI47566.2021.9703809.
81. Wang X., Gong S. X., Ma J., Wang C. F. Efficient analysis of antennas mounted on large-scale complex platforms using hybrid AIM-PO technique. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2014, vol. 62, no. 3, pp. 1517–1523. DOI: 10.1109/TAP.2013.2296326.
82. Liu Z. L., Wang C. F. Efficient iterative method of moments – Physical optics hybrid technique for electrically large objects. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2012, vol. 60, pp. 3520–3525. DOI: 10.1109/TAP.2012.2196963.
83. Akbas M., Alatan L., Ergul O. Accuracy and efficiency improvements in iterative hybridization of the method of moments (MoM) and physical optics (PO). 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Davos, Switzerland, 2016, pp. 1–5. DOI: 10.1109/EuCAP.2016.7481926.

84. Xiao L., Wang X. H., Wang B. Z., Zheng G., Chen P. An efficient hybrid method of iterative MoM-PO and equivalent dipole-moment for scattering from electrically large objects. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, vol. 16, pp. 1723–1726. DOI: 10.1109/lawp.2017.2669910.

85. Zhou H., Wang X. H., Xiao L., Wang B. Z. Efficient EDM-PO method for the scattering from electrically large objects with the high-order impedance boundary condition. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, vol. 70, no. 9, pp. 8242–8249. DOI: 10.1109/TAP.2022.3177560.

86. Xue Z. Y., Mao Wu Y., Jin Y. Q. An efficient iterative MoM-PO hybrid method for calculating scattered fields of the multiscale and multiphysics scatterers. 2020 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO). Hangzhou, China, 2020, pp. 1–3. DOI: 10.1109/NEMO49486.2020.9343657.

87. Guo L., Li M., Xu S., Yang F., Li J. Modeling of multiscale wave interactions based on an iterative scheme of MoM-PO-EPA algorithm. *Electronics*, 2022, vol. 11, p. 990. DOI: 10.3390/electronics11070990.

88. Yla-Oijala P., Koivumaki P., Jarvenpaa S. Hybrid multilevel fast multipole algorithm – physical optics for impedance surfaces. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, vol. 64, no. 12, pp. 5475–5478. DOI: 10.1109/tap.2016.2606570.

89. Mei X., Lin H. Enhancing the accuracy of hybrid SBR/MoM method based on new interaction. 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. Vancouver, BC, Canada, 2015, pp. 1678–1679. DOI: 10.1109/APS.2015.7305228.

90. He Y., He H., Hu C., Yin J., Yang J. Polarization analysis of trihedral corner reflector with high-frequency approximation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, vol. 70, no. 10, pp. 9607–9620. DOI: 10.1109/TAP.2022.3177536.

91. Gao P., Wang X., Liang Z., Gao W. Efficient GPU implementation of SBR for fast computation of composite scattering from electrically large target over a randomly rough surface. Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. USNC/URSI Nat. Radio Sci. Meeting. Vancouver, BC, Canada, 2015, pp. 1666–1667. DOI: 10.1109/APS.2015.7305222.

92. Jianzhou L., Haixuan Z., Shuhui C. Development of an integrative electromagnetic simulation software. 2022 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China). Xuzhou, China, 2022, pp. 1–3. DOI: 10.1109/ACES-China56081.2022.10065232.

93. Kim K., Kim J. H., Choi T. M., Cho D. S. Development of radar cross section analysis system of naval ships. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2012, vol. 4, no. 1, pp. 20–32. DOI: 10.2478/ijnaoe-2013-0075.

94. Amin B. G. Physical optics analysis for RCS computation of a relatively small complex structure. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 2014, vol. 29, no. 7, pp. 530–540.

95. Dang T. P., Alhaj Hasan A. F., Gazizov T. R. Wire grid scatterer modeling: TALGAT verification. 2024 International Russian Automation Conference

(RusAutoCon). Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 443–448. DOI: 10.1109/RusAutoCon61949.2024.10694411.

96. Smit J. C., Burger E. H., Cilliers J. E. Comparison of MLFMM, PO and SBR for RCS investigations in radar applications. IET International Conference on Radar Systems (Radar 2012). Glasgow, UK, 2012, pp. 1–5. DOI: 10.1049/cp.2012.1636.

97. Pienaar C., Odendaal J. W., Smit J. C., Joubert J., Cilliers J. E. Comparing different numerical methods for RCS prediction of a realistic electrically large complex airframe with measured data. 2015 1st URSI Atlantic Radio Science Conference (URSI AT-RASC). Gran Canaria, Spain, 2015, pp. 1–1. DOI: 10.1109/URSI-AT-RASC.2015.7302866.

98. Pienaar C., Johann W. O., Johan C. S., Johan J., Jacques É. C. RCS results for an electrically large realistic model airframe. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 2016, vol. 1, no. 2.

99. Kadera P., Jiménez-Sáez A., Burmeister T., Lacik J., Schüßler M., Jakoby R. Gradient-index-based frequency-coded retroreflective lenses for mm-wave indoor localization. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 212765–212775. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3039986.

100. Ganau A., Vico Navarro J., Morcillo-Pallarés P., Balbastre Tejedor J. V. Design and validation of reflector elements to increase the radar cross-section of small drones. *Progress In Electromagnetics Research C*, 2023, vol. 128, pp. 129–142. DOI: 10.2528/pierc22092003.

101. Batra A. Millimeter wave indoor SAR sensing assisted with chipless tags-based self-localization system: experimental evaluation. *IEEE Sensors Journal*, 2024, vol. 24, no. 1, pp. 844–857. DOI: 10.1109/JSEN.2023.3332431.

102. Trzebiatowski K., Rzymowski M., Kulas L., Nyka K. Simple millimeter wave identification system based on 60 GHz Van Atta arrays. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 24, p. 9809. DOI: 10.3390/s22249809.

103. Pan J., Chen L., Zhao S., Zhang T. A 2-D fully polarized Van Atta array based on wide-beam tri-polarized antennas. *Micromachines*, 2024, vol. 15, p. 1400. DOI: 10.3390/mi15111400.

104. Desai D. *Passive planar terahertz retroreflectors*. Diss. kand. tehn. nauk. United States, New Jersey Institute of Technology, 2018, 74 p.

105. Li X. F., Ban Y. L., Sun Q., Che Y. X., Hu J., Nie Z. A compact dual-band Van Atta array based on the single-port single-band/dual-band antennas. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, vol. 22, no. 4, pp. 888–892. DOI: 10.1109/lawp.2022.3227577.

106. Chen L., Qin M., Zou L., Zhang T. A low-RCS 2D multi-layer Van Atta array at X-band. *Electronics*, 2023, vol. 12, p. 3486. DOI: 10.3390/electronics12163486.

107. Kim Y., Lee W., Yoon Y. J. Monostatic RCS reduction using modified Van Atta array. Proceedings of the 2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). Orlando, FL, USA, 2013, pp. 1222–1223. DOI: 10.1109/APS.2013.6711271.

108. Yazdani M. R., Heidar H., Mohseni A. H. Expandable shipboard decoy including adequate RCS by using trihedral corner reflectors. *IET Science*,

Measurement & Technology, 2016, vol. 10, no. 5, pp. 485–491. DOI: 10.1049/iet-smt.2015.0228.

109. Garthwaite M. C., Nancarrow S., Hislop A., Thankappan M., Dawson J. H., Lawrie S. The design of radar corner reflectors for the Australian geophysical observing system: a single design suitable for InSAR deformation monitoring and SAR calibration at multiple microwave frequency bands. *Geoscience Australia*, 2015, 86 p. DOI: 10.11636/record.2015.003.

110. Jayasri P. V., Niharika K., Yedukondalu K., Sita Kumari E. V. S., Prasad A. V. V. Radar cross section characterization of corner reflectors in different frequency bands and polarizations. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf.*, 2018, vol. XLII–5, pp. 637–642. DOI: 10.5194/isprs-archives-xxii-5-637-2018.

111. Calibration Services. Government of India. National Remote Sensing Centre. Available at: https://www.nrsc.gov.in/EOS_CAL_MicrowaveTargets?language_content_entity=en (accessed: 08.02.2025).

112. Ying L., Lixin G., Yanchun Z. Investigations of effects of geometric characteristics on RCS for corner reflectors. 2019 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM). Shanghai, China, 2019, pp. 1–2. DOI: 10.1109/COMPEM.2019.8779187.

113. Wesztergom V., Bányai L., Szűcs E., Bozsó I., Hooper A., Nagyc L., Szabóc J. *Technical data package*, 143 p.

114. Bányai L., Nagy L., Hooper A., Bozsó I., Szűcs E., Wesztergom V. Investigation of integrated twin corner reflectors designed for 3-D InSAR applications. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, vol. 17, no. 6, pp. 1013–1016. DOI: 10.1109/LGRS.2019.2939675.

115. Armin W. D. *Reflectors for SAR performance testing – second edition*. Sandia Report, 2014, 61 p.

116. Gisinger C., Willberg M., Balss U., Klügel T., Mähler S., Pail R., Eineder M. Differential geodetic stereo SAR with TerraSAR-X by exploiting small multi-directional radar reflectors. *Journal of Geodesy*, 2016, vol. 91, no. 1, pp. 53–67. DOI: 10.1007/s00190-016-0937-2.

117. Qiu M., Ai X., Xu Z., Zhao F. Comparative analysis of monostatic and bistatic RCS scattering characteristics for corner reflector. 2022 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China). Xuzhou, China, 2022, pp. 1–3. DOI: 10.1109/ACES-China56081.2022.10065107.

118. Hao J., Wang X., Yang S., Gao H. Intelligent simulation technology based on RCS imaging. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 18, p. 10119. DOI: 10.3390/app131810119.

119. Malachias N., Kakavas I., Said Al Harthi S. M., Said Al Saidi A. Design and experimental evaluation of a novel type radar reflector for use in the marine environment. Conference Proceedings of ICMET Oman. International Conference on Marine Engineering and Technology Oman (IMarEST). Muscat, Oman, 2019, pp. 237–242. DOI: 10.24868/icmet.oman.2019.033.

120. Luo Y., Guo L., Zuo Y., Liu W. Time-domain scattering characteristics and jamming effectiveness in corner reflectors. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 15696–15707. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3053116.

121. Wu L., Xu J., Hu S., Liu Z. High-frequency backscattering properties of quasi-omnidirectional corner reflector: The great-icosahedral-like reflector. *AIP Advances*, 2022, vol. 12, no. 10. DOI: 10.1063/5.0123981.
122. Gan L., Wu Z., Wang X., Li J. An angular blinking jamming method based on electronically controlled corner reflectors. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2024, vol. 35, no. 2, pp. 330-338. DOI: 10.23919/JSEE.2023.000068.
123. Jiang T., Luo J., Yu Z. Research on corner reflector array fitting method for ship scattering characteristics. 2023 IEEE 2nd International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA). Changchun, China, 2023, pp. 1309–1313. DOI: 10.1109/EEBDA56825.2023.10090547.
124. Wang M., Xie M., Su Q., Fu X. Identification of ship and corner reflector based on invariant features of the polarization. 2019 IEEE 4th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP). Wuxi, China, 2019, pp. 545–549. DOI: 10.1109/SIPROCESS.2019.8868738.
125. Wang L. Y., Jiang N., Sun Y. The mechanism analyzing and use of corner reflector against anti-ship missiles. Proceedings of the 2017 5th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering (ICMMCCE 2017). Chongqing, China, 2017, pp. 998–1002. DOI: 10.2991/icmmcce-17.2017.179.
126. Lingang W. U. Present situation and development trend of shipborne RF corner reflector equipment. *Modern Defense Technology*, 2023, vol. 51, no. 6, pp. 36–44. DOI: 10.3969/j.issn.1009-086x.2023.06.005.
127. Guan S., Gao X., Lang P., Dong J. The corner reflector array recognition based on multi-domain features extraction and catboost. 2023 8th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP). Xi'an, China, 2023, pp. 1725–1730. DOI: 10.1109/ICSP58490.2023.10248896.
128. Chen C., Liu W., Gao Y., Cui L., Chen Q., Fu J., Xing M. An imaging method for marine targets in corner reflector jamming scenario based on time–frequency analysis and modified clean technique. *Remote Sens*, 2025, vol 17, p. 310. DOI: 10.3390/rs17020310.
129. Liang Z., Wang Y., Zhang X., Xie M., Fu X. Identification of ship and corner reflector in sea clutter environment. 2020 15th IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP). Beijing, China, 2020, pp. 622–626. DOI: 10.1109/ICSP48669.2020.9321063.
130. Xia L., Wang F., Pang C., Li N., Peng R., Song Z., Li Y. An identification method of corner reflector array based on mismatched filter through changing the frequency modulation slope. *Remote Sens*, 2024, vol. 16, p. 2114. DOI: 10.3390/rs16122114.
131. Yuan H., Fu X., Zhao C., Xie M., Gao X. Ship and corner reflector identification based on extreme learning machine. 2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP). Chongqing, China, 2019, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICSIDP47821.2019.9173150.
132. Zhang K., Zhang J., Li C., Li S., Lan C. Combined jamming method of chaff and corner reflector against anti-ship missiles. 2024 IEEE 7th Advanced

Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Chongqing, China, 2024, pp. 342–346. DOI: 10.1109/IAEAC59436.2024.10503679.

133. Zhang Z. K., Wang D. H., Lei Y. S. A novel RCS enhancing device based on metamaterial. *Radio Engineering*, 2017, vol. 47, no. 5, pp. 67–70.

134. Zhang R, Feng D. J., Xu L. T. Design and polarization characteristics analysis of dihedral based on Salisbury screen. *Journal of Radars*, 2016, vol. 5, no. 6, pp. 658–665.

135. Sun T., Yin F., Xu C. Zhao S., Yan H., Yi H. Ultrawideband precision RCS regulation for trihedral corner reflectors by loading resistive film absorbers. *Electronics*, 2022, vol. 11, p. 3696. DOI: 10.3390/electronics11223696.

136. Wu L., Hu S., Feng C., Luo Y., Liu Z., Lin L. Dynamic doppler characteristics of maritime airborne corner reflector. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, vol. 12, no. 5, p. 727. DOI: 10.3390/jmse12050727.

137. Bahman Z. *Radar energy warfare and the challenges of stealth technology*. Springer, 2020. 440 p.

138. Hwang J. T., Hong S. Y., Song J. H. Automated topology design to improve the susceptibility of naval ships using geometric deep learning. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2023, vol. 10, no. 2, pp. 794–808. DOI: 10.1093/jcde/qwad023.

139. Wu L., Hu S., Xu J., Liu Z. Dynamic sequential radar cross section properties of airborne corner reflector in array. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2023, vol. 17, no. 9, pp. 1405–1419. DOI: 10.1049/rsn2.124299.

140. Blinkovsky N. K., Gulko V. L., Meshcheryakov A. A., Navigational group radio-optical reflectors of circular action. *Instruments and Experimental Techniques*, 2023, vol. 66, no. 4, pp. 672–679. DOI: 10.1134/s0020441223030028.

141. *Marker buoys for Indonesia. Resinex Asia Italian Design and Technology for The Asian Market*. Available at: <https://www.resinexasia.com/post/marker-buoys-for-indonesia> (accessed: 15.11.2024).

142. Abo H., Osawa T., Sudi Parwata I. N., Ge P., Hiroki S., Ikemoto R. Slope displacement monitoring with corner reflectors by PSInSAR analysis using Sentinel-1 SAR data. 2023 8th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR). Bali, Indonesia, 2023, pp. 1–6. DOI: 10.1109/APSAR58496.2023.10388604.

143. Gibert F., Gómez-Olivé A., Garcia-Mondéjar A., Francis R., Hernández S., De La Cruz A. F., Vendrell E., Aparici M. R. I. Radar altimetry external calibration with passive elements: Sentinel-6 MF long term monitoring with the montsec corner reflector facility. IGARSS 2024 - 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Athens, Greece, 2024, pp. 8900–8903. DOI: 10.1109/igarss53475.2024.10642903.

144. Froese C., Poncos V., Mansour M., Martin C. D., Skirrow R. Characterizing complex deep seated landslide deformation using corner reflector insar (cr-insar): little smoky landslide, alberta. Proc. 4th Can. Conf. Geohazards. NS, Canada, 2008, p. 1–4.

145. Jauvin M., Yan Y., Trouvé E., Fruneau B., Gay M., Girard B. Integration of corner reflectors for the monitoring of mountain glacier areas with Sentinel-1 time series. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, no. 8, p. 988. DOI: 10.3390/rs11080988.
146. Algaftsh A., Inggs M., Mishra A. K. Measurements of signal penetration for P-band SAR system through trees using two trihedral corner reflectors. 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Fort Worth, TX, USA, 2017, pp. 3117–3120. DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8127658.
147. Lin S. Y. A function design for a power-generation corner reflector for SAR analysis. IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Kuala Lumpur, Malaysia, 2022, pp. 2518–2521. DOI: 10.1109/IGARSS46834.2022.9884434.
148. Jiao Y., Zhang F., Liu X., Huang Z., Yuan J. C-SAR/02 Satellite polarimetric calibration and validation based on active radar calibrators. *Remote Sens*, 2025, vol. 17, pp. 282. DOI: 10.3390/rs17020282.
149. Gibert F. A trihedral corner reflector for radar altimeter calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, vol. 61, pp. 1–8. DOI: 10.1109/TGRS.2023.3239988.
150. Yusri N. A. Calibration of 93.1 GHz FOD detection radar on airport runway using trihedral corner reflector. 2021 8th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI). Semarang, Indonesia, 2021, pp. 130–133. DOI: 10.23919/EECSI53397.2021.9624210.
151. Saleeb D. A., Elkorany A. S., Saleeb A. A. Polarimetry radar calibration using trihedral corner reflectors with electromagnetic band gap polarization converters. 2015 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM). Heidelberg, Germany, 2015, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICMIM.2015.7117936.
152. Iizuka T., Kosaka N., Hisada M., Kawahara Y., Sasatani T. Trimmed aperture corner reflector for angle-selective chipless RFID. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, vol. 22, no. 10, pp. 2537–2541. DOI: 10.1109/LAWP.2023.3294940.
153. Iizuka T., Sasatani T., Nakamura T., Kosaka N., Hisada M., Kawahara Y., MilliSign: MmWave-based passive signs for guiding UAVs in poor visibility conditions. ACM MobiCom '23: 29th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York, NY, USA, 2023. DOI: 10.1145/3570361.3613264.
154. Kai-Daniel J., Benedikt S., Andreas R., Masoud S., Daniel E., Niels B. Enhanced radar cross-section for W-Band corner reflectors using ceramic additive manufacturing. 2022 IEEE 12th International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA). Cagliari, Italy, 2022, pp. 37–39. DOI: 10.1109/RFID-TA54958.2022.9924073.
155. Jiménez-Sáez A. Frequency selective surface coded retroreflectors for chipless indoor localization tag landmarks. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, vol. 19, no. 5, pp. 726–730. DOI: 10.1109/LAWP.2020.2975143.
156. Sánchez-Pastor J., Schüßler M., Jakoby R., Jiménez-Sáez A. Double-layer frequency selective surface-based corner reflector for indoor self-localization systems in the W-band. 2024 18th European Conference on Antennas and

Propagation (EuCAP). Glasgow, United Kingdom, 2024, pp. 1–5. DOI: 10.23919/EuCAP60739.2024.10501184.

157. Brinker K. R., Zoughi R. Corner reflector based misalignment-tolerant chipless RFID tag design methodology. *IEEE J. Radio Freq. Identif.*, 2021, vol. 5, no. 1, pp. 94–105. DOI: 10.1109/JRFID.2020.3034483.

158. Weng Y. K., Li S. Efficient solution to the RCS of trihedral corner reflector. *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.* 2015, vol. 47, no. 2, pp. 533–539. DOI: 10.3233/JAE-130156.

159. Sukharevsky O., Ryapolov I., Vasilets V., Nechitaylo S. The use of corner reflectors to simulate tactical aircraft. 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW). Ukraine, 2022, pp. 289–292. DOI: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037097.

160. Najafnezhad E., Nourinia J., Ghobadi C., Majidzadeh M., Mirzamohammadi F. A high gain dual-band printed antenna for LTE base stations with a corner reflector. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 2018, vol. 87, pp. 173–179. DOI: 10.1016/j.aeue.2018.02.024.

161. Phaebua K., Lertwiriyaprapa T., Phongcharoenpanich C., Chang Y. S., Torrungrueng D., Chou H. T. One-sixteenth spherical homogeneous dielectric lens antenna on metal corner reflector for high-gain radiation with size reduction. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, vol. 19, no. 3, pp. 378–382. DOI: 10.1109/LAWP.2019.2959657.

162. Milijic M., Jokanovic B. Design of asymmetrical slot antenna array in corner reflector. 2020 55th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST). Niš, Serbia, 2020, pp. 203–206. DOI: 10.1109/ICEST49890.2020.9232897.

163. Wang S., Zhang J., Cao R., Zhang Y., Tao X., Qi X. Research on calibration algorithm of two-dimensional plane based on corner reflector. 2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). Hefei, China, 2023, pp. 3483–3488. DOI: 10.1109/CIEEC58067.2023.10166499.

164. Boas E. C. V., Ribeiro J. A. P., de Figueiredo F. A. P., Mejía-Salazar J. R. 3-D-printed all-dielectric corner-like bragg reflector for antenna gain enhancement. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, vol. 23, no. 2, pp. 558–562. DOI: 10.1109/LAWP.2023.3329689.

165. Guo H., Zhou Z., Cai X., Lin Y., Ji L. Dielectric EBG corner reflector antenna with enhanced directivity and RCS reduction. 2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Shanghai, China, 2020, pp. 1–3. DOI: 10.1109/ICMMT49418.2020.9386755.

166. Decena B. A., Luzon J. R., Purisima M. C. L. 2.4 GHz pattern reconfigurable corner reflector antennas using frequency selective conductor loops and strips. TENCON 2017 - 2017 IEEE Region 10 Conference. Penang, Malaysia, 2017, pp. 2914–2919. DOI: 10.1109/TENCON.2017.8228360.

167. Elzwawi G. H., Kesavan A., Alwahishi R., Denidni T. A. A new corner-reflector antenna with tunable gain based on active frequency selective surfaces. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 2020, vol. 1, pp. 88–94. DOI: 10.1109/OJAP.2020.2979053.

168. Chatterjee A., Parui S. K. Performance enhancement of a dual-band monopole antenna by using a frequency-selective surface-based corner reflector. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, vol. 64, no. 6, pp. 2165–2171. DOI: 10.1109/TAP.2016.2552543.
169. Chatterjee A., Parui S. K. Beamwidth control of omnidirectional antenna using conformal frequency selective surface of different curvatures. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, vol. 66, no. 6, pp. 3225–3230. DOI: 10.1109/TAP.2018.2819899.
170. Chatterjee A., Banerjee S., Frnda J., Dvorsky M. Planar FSS based dual-band wire monopole antenna for multi-directional radiation with diverse beamwidths. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 30427–30435. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3159337.
171. He W., Weng X., Luo W., Chen H., Wu X., Li K., Huang Y., Liu B., Li L. Investigation of radar cross-section reduction for dihedral corner reflectors based on camouflage grass. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, vol. 20, no. 12, pp. 2447–2451. DOI: 10.1109/lawp.2021.3114302.
172. Kelevitz K., Wright T. J., Hooper A. J., Selvakumaran S. Novel corner-reflector array application in essential infrastructure monitoring. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, vol. 60, pp. 1–18. DOI: 10.1109/TGRS.2022.3196699.
173. Huang Q., Zhang F., Li L., Liu X., Jiao Y., Yuan X., Li H. Quick quality assessment and radiometric calibration of C-SAR/01 satellite using flexible automatic corner reflector. *Remote Sensing*, 2022, vol. 15, no. 1, p. 104. DOI: 10.3390/rs15010104.
174. Zhou Y., Li C., Ma L., Yang M. Y., Liu Q. Improved trihedral corner reflector for high-precision SAR calibration and validation. 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Quebec City, QC, Canada, 2014, pp. 454–457. DOI: 10.1109/IGARSS.2014.6946457.
175. Gan L., Sun G., Feng D., Li J. Characteristics of an eight-quadrant corner reflector involving a reconfigurable active metasurface. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 13, p. 4715. DOI: 10.3390/s22134715.
176. Mamedes D. F., Neto A. G., Bornemann J. Reconfigurable corner reflector using PIN-diode-switched frequency selective surfaces. 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting. Montreal, QC, Canada, 2020, pp. 127–128. DOI: 10.1109/IEEECONF35879.2020.9329791.
177. Sánchez-Pastor J., Kamel A., Schüssler M., Jakoby R., Jiménez-Sáez A. Double-notch frequency-coded corner reflectors for sub-THz chipless RFID tags. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, vol. 23, no. 9, pp. 2688–2692. DOI: 10.1109/LAWP.2024.3404625.
178. Lazaro A., Lorenzo J., Villarino R., Girbau D. Modulated corner reflector using frequency selective surfaces for FMCW radar applications. 2015 European Microwave Conference (EuMC). Paris, France, 2015, pp. 111–114. DOI: 10.1109/EuMC.2015.7345712.
179. Morrow I. L., Morrison K., Finnis M., Whittow W. A low profile retrodirective frequency selective surface for radar earth observation. 2015

Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC). Loughborough, UK, 2015, pp. 1–4. DOI: 10.1109/LAPC.2015.7366143.

180. Williams R. J., Gatesman A. J., Goyette T. M., Giles R. H. Radar cross section measurements of frequency selective terahertz retroreflectors. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* 9102. Bellingham, WA, United States, 2014, p. 91020R. DOI: 10.1117/12.2051802.

181. Zhou Z., Wang J., Sui R., Li L., Pang C. Simulation analysis of vertex triangle filling type abnormal corner reflector. 2022 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS). Harbin, China, 2022, pp. 1–3. DOI: 10.1109/IWS55252.2022.9977804.

182. Sui R., Feng D., Wang J., Sun G. Simulation analysis of abnormal shape trihedral corner reflector scattering characteristics. 2021 CIE International Conference on Radar (Radar). Haikou, Hainan, China, 2021, pp. 1127–1130. DOI: 10.1109/Radar53847.2021.10028083.

183. Yakimov A. N., Bestugin A. R., Kirshina I. A. Parametric optimization of the corner reflector of electromagnetic waves. 2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). St. Petersburg, Russian Federation, 2022, pp. 1–4. DOI: 10.1109/WECONF55058.2022.9803381.

184. Ren Z., Yin H., Sun X., Liu Y.-Q. Active corner reflector based on electrically tunable metasurface. 2024 IEEE 10th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications (MAPE). Guangzhou, China, 2024, pp. 1–2. DOI: 10.1109/MAPE62875.2024.10813715.

185. Liu H., Zhou B., Miao C., Li S., Xu L., Zheng K., Li G., Yang S., Zhu M. Refinement analysis of real dihedral and trihedral CR-InSAR based on TerraSAR-X and Sentinel-1A images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, vol. 17, pp. 18739–18750. DOI: 10.1109/jstars.2024.3472220.

186. Li C., Yin J., Zhao J., Zhang G., Shan X. The selection of artificial corner reflectors based on RCS analysis. *Acta Geophysica*, 2011, vol. 60, no. 1, pp. 43–58. DOI: 10.2478/s11600-011-0060-y.

187. Garthwaite M. C., Thankappan M., Williams M. L., Nancarrow S., Hislop A., Dawson J. Corner reflectors for the Australian geophysical observing system and support for calibration of satellite-borne synthetic aperture radars. 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium – IGARSS. Melbourne, VIC, Australia, 2013, pp. 266–269. DOI: 10.1109/IGARSS.2013.6721143.

188. Algafsh A., Inggs M., Mishra A. K. The effect of perforating the corner reflector on maximum radar cross section. 2016 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS). Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2016, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MMS.2016.7803815.

189. Alexandra C., Elaine C., Angelica C., Brandon H., Scott H., Yunling L., Rich M. AirMoSS P-band SAR calibration. 2011 CEOS SAR Calibration and Validation Workshop, JPL Open Repository, 2011. <https://hdl.handle.net/2014/43534>.

190. Garthwaite M. On the design of radar corner reflectors for deformation monitoring in multi-frequency InSAR. *Remote Sensing*, 2017, vol. 9, no. 7, p. 648. DOI: 10.3390/rs9070648.
191. Unal I., Gulum T. O., Bayramoglu E. C. Investigations of electrical size effects on radar cross section for orthogonally distorted corner reflectors. 2015 IEEE Radar Conference (RadarCon). Arlington, VA, USA, 2015, pp. 1515–1519. DOI: 10.1109/RADAR.2015.7131236.
192. Döring B., Schwerdt M., Bauer R. TerraSAR-X calibration ground equipment. *Wave Propagation in Communication, Microwaves Systems and Navigation (WFMN)*. Germany, 2007, pp. 5.
193. Yuan Y., Ji L., Wang Z., Yang D., Zhang B., Wang H. Design of a high precision spaceborne millimeter wave SAR corner reflector. 2022 3rd China International SAR Symposium (CISS). Shanghai, China, 2022, pp. 1–5. DOI: 10.1109/CISS57580.2022.9971251.
194. Bulatova L. I., Gilaev D. M., Nazarov R. R. Aprobatsiya konstruktssii ugolkovogo otrazhatelya dlya obespecheniya nablyudeniy za geodinamicheskimi poligonami s ispol'zovaniyem radarnykh s'yemok [Testing the design of a corner reflector to ensure observations of geodynamic polygons using radar surveys]. XI Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Aktual'nyye Voprosy Geo-dezii i Geoinformatsionnykh Sistem» [XI International Scientific and Practical Conference “Current Issues of Geodesy and Geoinformation Systems”]. Kazan, Kazan Federal University, 2022, pp. 28–31 (in Russian).
195. *Corner reflectors. Trealtamira*. Available at: <https://site.trealtamira.com/insar-solutions/insar-corner-reflectors/> (accessed: 15.01.2025).
196. Gu J., Dai F., Chen Q., Gu D., Liao Y., Wang B. Research on RCS calculation and weight loss method of radar angle reflector. 2022 3rd China International SAR Symposium (CISS). Shanghai, China, 2022, pp. 1–4. DOI: 10.1109/CISS57580.2022.9971366.
197. Gazizov T. R., Hasan A. A., Nguyen M. T. A simple modeling methodology for creating hidden antennas. 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi, Russian Federation, 2023, pp. 1080–1084. DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139026.

Статья поступила 17 апреля 2025 г.

Информация об авторе

Данг Туан Фьонг – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Сотрудник кафедры телевидения и управления. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: моделирование рассеивателей; численные методы. E-mail: dang.p.2213-2023@e.tusur.ru

Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 40.

Corner Reflector and Key Electromagnetic Scattering Modelling Techniques: A 10-Year Review

T. P. Dang

Task statement: Over the last decade, electromagnetic scattering analysis techniques have been greatly improved, which has helped in analysing both simple and complex structures. Along with this, a typical example of a scatterer, the corner reflector (CR), has also been modernised and has been widely used in various applications. Nevertheless, a detailed evaluation of the modelling methods and development process of CRs still faces a number of limitations. With the continuous development of electromagnetic technologies, there is an important need to analyse and optimise the CR to meet the performance requirements of modern electromagnetic systems. **Objective:** summary and evaluation of the results achieved in the design and optimisation of CRs, as well as the development and improvement of methods of scattering analysis over the last 10 years. **Methods used:** Method of moments, optical methods and their hybrids. **Novelty:** Summary and comparison of various scatterer modelling methods, and considers the current difficulties in optimally choosing between accuracy and computational efficiency. Particular attention is paid to modern applications, to the specifics of CR design and to new approaches to their optimisation in order to reduce mass and size, increase durability and improve scattering performance. **Result:** A comprehensive assessment of the evolution of the method of moments, optical methods and their hybrids, as well as a comparative analysis of their efficiency and accuracy are presented. In addition, the development of different types of CRs, their shape, size, application and scattering characteristics are reviewed. Promising CRs can be optimised in terms of mass, size, durability and performance to better meet the growing requirements in space, military and civilian applications. **Practical significance:** The results are useful for researchers and engineers involved in electromagnetic scattering modelling, as well as for specialists developing CRs.

Key words: method of moments, optical methods, wire grid, scattering, corner reflector.

Information about Author

Tuan Phuong Dang – Ph.D. of Engineering Sciences. Associate of the Department of Television and Control. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: modelling of scatterers; numerical methods. E-mail: dang.p.2213-2023@e.tusur.ru

Address: Russia, 634050, Tomsk, Lenina prospekt, 40.