

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Вьюнника Владимира Ивановича "Методы координатной трансформации в создании несингулярных анизотропных покрытий, обеспечивающих невидимость и мимикрию", представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика

Актуальность темы. Защита объектов от средств радиолокации является одной из приоритетных задач радиофизики. Одним из способов защиты является маскировка. Простейшим видом маскировки есть накрывание объекта куполом или нанесение покрытия, которые изготовлены из материалов, обладающих необходимыми электрофизическими свойствами рассеяния поля электромагнитного облучения. Традиционные методы радиомаскировки, как правило, обеспечивают поглощение энергии облучения или отсутствие отражённых волн от объекта и не способны обеспечить его невидимость для радиолокационных средств, которые базируются на разнесённом расположении источника излучения и приёмника и особенно развиваются с расширением возможностей спутниковой навигации. Следовательно, возникает необходимость сокрытия объекта, расположенного на трассе распространения радиоизлучения. Простейшим решением такой задачи является обеспечение обтекания объекта волнами излучения с сохранением их энергетических и фазовых характеристик, которые они имели бы при распространении в пространстве (среде) без объекта. Диссертация В. И. Вьюнника как раз и посвящена развитию нового направления радиофизики – трансформационной оптики, основанной на координатных трансформациях пространства и определении его электрофизических свойств, использование которых позволяет эффективно управлять распространением электромагнитных волн.

В свете сказанного, тема диссертационной работы Вьюнника В. И. является актуальной как в теоретическом, так и прикладном отношении. Цель работы заключается в:

- разработке и исследовании различных способов преобразований трансформационной оптики;
- определении характеристик рассеяния электромагнитных волн объектами как при паличии маскировки (приводящей к трансформации пространства относительно распространения волн), так и без неё;
- а также определении электрофизических параметров маскировки, обеспечивающих допустимые изменения энергетических и фазовых характеристик распространяющихся радиоволн, регистрация которых, в свою очередь, обеспечивает невидимость или мимикрию (иллюзию под другой объект) маскируемого объекта для средств радиолокации.

Дополнительным подтверждением актуальности темы является вхождение выбранной тематики в научные программы НАН Украины и Министерства образования и науки Украины. Как следует из материалов

диссертации, она выполнена в рамках трёх госбюджетных НИР в ХНУ им. В. Н. Каразина на кафедре СВЧ в период с 2006 г. по 2015 г.

Обоснованность научных положений диссертации следует из того, что они базируются на результатах количественного и качественного анализа адекватных электродинамических моделей неоднородных сред, в которых распространяются плоские монохроматические электромагнитные волны. Эти модели построены на основе численных решений уравнений Максвелла с использованием метода конечных элементов при учёте условий непрерывности тангенциальных составляющих поля на границах раздела сред, граничных условий на металлических поверхностях, а также условий излучения на бесконечности.

Известно, что форма записи уравнений Максвелла является инвариантной относительно выбора системы координат, чего нельзя утверждать о материальных уравнениях. В общем случае выражения для электрофизических параметров среды зависят от представления системы координат пространства. Любую деформацию пространства можно описать соответствующими преобразованиями системы координат. Деформация пространства всегда приводит к изменению его физических свойств. Так, например, изотропная среда становится анизотропной. В результате трасса распространения радиоволн в деформированном пространстве отличается от трассы в исходном (недеформированном) пространстве. Согласно принципу Ферма, в обоих пространствах трассы распространения радиоволн соответствуют кратчайшим оптическим путям. Возникает возможность такого рода деформации некоторой области пространства, при которой плоская волна проходит через пространство без искажений для наблюдателя, расположенного вдали от деформированной области. При этом информационным параметром остаётся только время запаздывания, которое, как правило, не регистрируется средствами радиолокации.

Для приближений, принятых при построении менее трудоемких при численной реализации и более наглядных в физическом отношении моделей некоторых плащей-ковров маскировки объектов, указаны условия их применимости. К таким приближениям относятся:

- облучение маскируемого объекта плоской E-поляризованной монохроматической волной;
- отсутствие электрических и магнитных потерь энергии волны вдоль всей трассы распространения, включая плащ-ковёр;
- использование координатного преобразования, при котором точка отображается в область конечных размеров.

Достоверность полученных количественных результатов и качественных выводов обусловлена:

- обоснованностью теоретических моделей трансформационной оптики;
- использованием хорошо апробированных численных методов решения краевых задач на основе уравнений Лапласа и Пуассона;

– а также хорошим совпадением расчётных значений интеграла напряжённости рассеянного электрического поля, полученных при аналитическом и численном подходах.

Методика пересчёта электрофизических параметров среды при переходе с физического пространства в виртуальное и наоборот базируется на хорошо известных и апробированных многими исследователями соотношениях (2.39) и (2.40), основу которых составляют элементы якобиановой матрицы преобразования одного пространства в другое.

Научная новизна результатов и выводов диссертации состоит в следующем:

1. Приобрели дальнейшее развитие:
 - трансформационная оптика в СВЧ диапазоне;
 - метод генетического отбора (оптимизации), применённый составной частью алгоритмов численного решения радиофизических задач маскировки объектов. Метод реализован при выборе функции-источника уравнения Пуассона, которое связывает координаты исходного и трансформированного пространств. При оптимизации достигнута высокая эффективность плаща маскировки идеально-проводящего кругового цилиндра, обеспечивающего минимальное значение интеграла напряжённости рассеянного электрического поля ($\sim 8,8$ мкВ/м) в свободном пространстве.
2. Продемонстрированы возможности трансформационной оптики при обеспечении маскировки объектов цилиндрическими плащами-коврами произвольного сечения. Обоснована методика определения электрофизических параметров таких плащей, обеспечивающих допустимые изменения энергетических характеристик распространения плоской Е-поляризованной волны с целью сокрытия или мимикрии маскируемого объекта для средств радиолокации. Элементы якобиановой матрицы преобразования одного пространства в другое, входящие в соотношения связи между электрофизическими параметрами физического и виртуального пространств (2.39 и 2.40), определены с применением численных методов.
3. Предложен новый подход к созданию покрытия (маскировочного плаща) объекта, обеспечивающего иллюзию заданной формы для средств радиолокации.

Научная и практическая значимость работы состоит в том, что в ней на основе построенных физико-математических моделей разработан вычислительный подход для расчёта и исследования параметров плащей-ковров маскировки объекта и значений напряжённости электрического поля, рассеянного на них. Предложенные автором модели координатной трансформации, которые использованы при определении электрофизических параметров несингулярных плащей маскировки и мимикрии объектов, несомненно, расширили возможности трансформационной оптики. Установленный эффект мимикрии создаёт предпосылки к развитию новых радиофизических способов сокрытия объектов от средств радиолокации.

Совпадения результатов аналитических и численных исследований рассеяния электрического поля на круговых цилиндрических плащах маскировки дают гарантию для применения вычислительной методики, разработанной автором на основе численных методов, при проектировании как однослойных, так и многослойных цилиндрических плащей произвольного сечения. Оригинальность и полезность некоторых результатов, полученных в этом направлении, подтверждаются выполнением основополагающих законов физики.

Научная и практическая значимость диссертационной работы подтверждается также тем, что её результаты используются в исследовательских работах, проводимых в ХНУ им. В. Н. Каразина, при анализе радиофизических явлений в средах с рассеивающими элементами, о чём свидетельствуют публикации сотрудников университета. Среди возможных путей использования результатов диссертации можно назвать внедрение развитых методов координатной трансформации в практику научно-проектных организаций, которые занимаются разработкой несингулярных анизотропных покрытий, обеспечивающих маскировку и мимикрию объектов для средств СВЧ радиолокации. Следует внедрить материалы диссертации в учебный процесс подготовки специалистов и магистров по направлению 0702 – "Прикладная физика" (специальности 7.070201 и 8.070201 – "Радиофизика и электроника"; 8.070203 – "Прикладная физика").

Замечания и недостатки. Подтверждая обоснованность выводов и полученных результатов, необходимо сделать следующие замечания:

1. Основные результаты получены для случая облучения маскируемых объектов плоской Е-поляризованной монохроматической волной. Очевидно, что это обстоятельство (условие) сильно ограничивает возможность практического применения полученных результатов, особенно при интенсивном развитии средств коротко импульсной сверхширокополосной радиолокации.
2. Во всех исследованиях, проведённых в рамках диссертации, не учитывались электрические и магнитные потери в пространстве распространения радиоволн.
3. Ни один из результатов по эффективности маскировки и мимикрии объектов для средств СВЧ радиолокации не подтвержден экспериментально.
4. Не указаны следующие критерии:
 - выбора связи между виртуальным и физическим пространствами (соотношения 2.1 и 3.6), согласно которой точка отображается в окружность;
 - перехода соотношений элементов якобиановой матрицы трансформации виртуального пространства в физическое для несингулярного плаща в соотношения для линейного сегмента и сингулярного плаща, результаты исследований которых приведены в табл. 3.2.
5. Распределения E_z компоненты рассеянного поля, приведённые на рисунках 2.5, 2.6, 3.4, 3.5, 3.6-3.9, 4.9-4.14, 4.21, 4.22, 5.4 и 5.5, вычислялись только при численном решении краевой задачи методом конечных элементов.

Автору следовало бы решить задачу аналитически и привести выражение для E_z компоненты поля.

6. В выводах к разделу 2 утверждается, что диаграммы рассеяния поля плоской E -поляризованной волны плащом невидимости в дальней зоне при несингулярной координатной трансформации (которая исследовалась в разделе) и при сингулярной координатной трансформации отличаются примерно на децибел. Каким образом получен этот результат?
7. В работе имеются недостатки оформительного характера. В частности:
 - в разделах 2 и 3 одни и те же величины имеют разные обозначения, что вносит определённые трудности для читателя;
 - величины в (2.1) не расшифрованы. Представляет особый интерес назначение величины " a ".

Вместе с тем, указанные замечания не нарушают принципиально суть работы, не влияют существенно на конечные результаты исследований, выполненных автором, не уменьшают научную значимость и актуальность диссертации и не снижают высокую оценку научного уровня диссертационной работы. Замечания 4, 6 и 7, скорее, являются рекомендацией автору излагать свои результаты более четко и аргументировано. Замечание 5, принципиальное в части решения краевых задач, не сказывается на достоверности полученных результатов по эффективности исследованных цилиндрических плащей маскировки и мимикрии объектов для средств радиолокации. Первые 3 замечания относятся к предложению о развитии дальнейших исследований и совершенствовании радиофизических методов маскировки объектов с применением трансформационной оптики. В целом, высказанные замечания и отмеченные недостатки не снижают общую положительную оценку работы.

Общая оценка работы. Переходя к общей оценке диссертации, следует отметить, что она представляется законченным и целостным исследованием, с четкой структурой и логическим представлением материала и свидетельствует о персональном вкладе автора в науку. Она посвящена решению актуальной задачи маскировки объектов от средств СВЧ радиолокации, которая связана с теоретическими исследованиями распространения плоской E -поляризованной монохроматической волны в неоднородном пространстве с применением методов трансформационной оптики. Результаты диссертационной работы достаточно полно освещены в соответствующих публикациях, которые включают 5 статей, одна из которых опубликована за рубежом (США, в журнале *Telecommunication and Radio Engineering*) и 4 – в изданиях, входящих в Перечень профессиональных изданий Украины по специальности 01.04.03, и 5 докладов на международных конференциях. Статья, опубликованная в журнале "Радиофизика и радиоастрономия", продублирована в переводном одноименном издании США. Анализ публикаций автора показал, что они имеют все необходимые элементы, подчёркивающие полноту и глубину раскрытия рассматриваемых вопросов. Работа имеет широкую апробацию на 5 международных научных конференциях. Диссертация написана с использованием принятой в данной научной области терминологии достаточно понятно и логично. Стиль изложения материала характеризуется цельностью,

содержательной завершенностью, последовательностью и взаимосвязанностью. Содержание и структура автореферата В. И. Вьюнника в достаточной мере соответствуют структуре, основным положениям и выводам диссертации. Объем и оформление диссертации соответствуют существующим требованиям.

Выводы по работе в целом. Диссертационная работа В. И. Вьюнника "Методы координатной трансформации в создании несингулярных анизотропных покрытий, обеспечивающих невидимость и мимикрию" является завершённым трудом. Отражённые в ней научно обоснованные результаты о свойствах неоднородных сред, в которых распространяются плоские монохроматические электромагнитные волны, являются значительным достижением в развитии радиофизики. По своей актуальности, новизне, научной и практической значимости полученных результатов диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям "Порядка присуждения учёных степеней и присвоения учёного звания старшего научного сотрудника", предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.03 – радиофизика.

С учётом вышеизложенного считаю, что Вьюнник Владимир Иванович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук

по специальности радиофизика,

старший научный сотрудник,

ведущий научный сотрудник отдела "Радиофизики твёрдого тела"

Института радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова

НАН Украины

Ю. В. Прокопенко Ю. В. Прокопенко

Подпись Прокопенко Ю. В. удостоверяю
Ученый секретарь ИРЭ им. А. Я. Усикова НАН Украины,
канд. физ.-мат. наук



И. Е. Почанина И. Е. Почанина