

ОТЗЫВ

официального оппонента Ю.М. Ямпольского
на диссертационную работу Ю.Ф. Логвинова «РАСПРОСТРАНЕНИЕ
РАДИОВОЛН НАД ВЗВОЛНОВАННОЙ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПРИ
МАЛЫХ УГЛАХ СКОЛЬЖЕНИЯ», представленную на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 -
радиофизика

Диссертационная работа Ю.Ф. Логвинова посвящена обобщению исследований эффектов рассеяния радиоволн сантиметрового и миллиметрового диапазонов на взволнованной морской поверхности при скользящем распространении. Следует сразу отметить, что данная тематика является приоритетной для Института радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, который занимает по этому направлению одно из лидирующих мест в мире. Теоретические и экспериментальные исследования рассеяния волн и сигналов на шероховатых поверхностях были начаты в Украине более полувека назад и увенчались созданием двух новых научных направлений – статистической теории дифракции и радиоокеанографии. Оба эти направления обеспечили разработку и успешное функционирование многочисленных радиолокационных систем наземного, корабельного и спутникового базирования. Основным ограничением для их практического применения было использование условий достаточно высоких углов облучений, когда эффектами затенений можно пренебречь.

В тоже время появление новых объектов обнаружения и исследования, расположенных на самой поверхности либо вблизи ее на высотах, соизмеримых с размером самих «шероховатостей» и приемно-передающих пунктов, приводило к трудностям в расчете полей и создании алгоритмов обнаружения различных целей. Основной, маскирующей полезный сигнал компонентой в случае скользящих углов облучения является «пассивная помеха» - поле, рассеянное морской поверхностью. До работ с непосредственным участием соискателя традиционным методом описания поля, рассеянного пространственно-временными флуктуациями высот поверхности, являлся метод касательной плоскости. Его суть состоит в аппроксимации окрестности области отражения идеально проводящей плоскостью, наклоненной в соответствии с локальным градиентом формы поверхности. Угол наклона формировал «зеркально» отраженную компоненту поля от каждой освещенной неоднородности. Результирующее поле представлялось в виде суперпозиции полей парциальных компонент. Очевидно, что в таком подходе эффекты затенения и рассеяния на «гребнях» неоднородностей не учитывались. Известно достаточно большое число экспериментальных наблюдений под малыми углами, показывающих значительное превышение уровней рассеянной (в диссертации «диффузной») компоненты над прогнозируемыми расчетными зависимостями. Диссертант взялся за такую трудную проблематику и успешно с ней справился, разобравшись в физических механизмах формирования

результатирующего поля и предложив метод его расчета. По сути, в работе предложен не только новый «метод описания» поля, рассеянного взволнованной морской поверхностью при малых углах скольжения, а идентифицирован физический механизм формирования диффузной компоненты – дифракция радиоволн на гребнях волнения. На основании выше изложенной преамбулы, считаю диссертационную работу *актуальной и важной для практического использования*.

Диссертационная работа состоит из введения, шести разделов, выводов и списка использованной литературы. Полный объем диссертации составляет 299 страниц, из них основная часть (введение, разделы, выводы) составляет 271 страницу.

Во **Введении** сформулированы цели работы, обоснованы ее актуальность и практическая значимость. Дана краткая сводка наблюдательных фактов, свидетельствующих об их противоречии традиционным методам описания механизмов формирования поля при скользящем распространении радиоволн над взволнованной морской поверхностью. Обоснована необходимость усовершенствования модельных физических представлений для снятия противоречий между теорией и экспериментом. Достаточно четко и подробно перечислены основные результаты диссертации и подчеркнута их новизна. Проиллюстрирована связь выполненных исследований с основной научной тематикой института, отмечено их практическое использование при выполнении многочисленных НИР. Во введении также охарактеризован личный вклад соискателя в основополагающие публикации, которые выполнены совместно с коллегами. Достаточно убедительно обоснована правомочность использования автором их основных результатов для представления в диссертации. Кратко изложено содержание работы по разделам.

Первый раздел посвящен обзору современного состояния проблемы распространения и рассеяния радиоволн над шероховатой подстилающей поверхностью при малых углах облучения. Отмечено, что традиционно принято рассматривать результирующее поле как суперпозицию двух компонент – зеркальной (когерентной) и диффузной (рассеянной), их соотношение определяется многими факторами: интенсивностью волнения, дальностью, величиной угла падения и др. В разделе дана сводка экспериментальных результатов о поведении амплитуды результирующего поля в зависимости от длины волны (3,2 см и 8,1 мм) для разных протяженностей радиолинии (от 16 км до 750 м). Проанализировано поведение спектров флуктуаций амплитуды, сделан вывод о том, что основной энергетический максимум совпадает с максимумом спектра морского волнения. Установлен степенной закон убывания спектральной плотности вариаций амплитуд с показателем степени $n = 2...2,6$. Четкая зависимость «наклона» спектра от длины волны и метеопараметров не установлена. На достаточно обширном экспериментальном материале проанализированы флуктуации траекторных характеристик рассеянных и отраженных сигналов, в частности, вариаций углов прихода – азимута и угла места. Отмечены более значительные вариации углов места, чем азимута.

Важным экспериментальным фактом является отсутствие спадания уровня рассеянной компоненты при предельно низких углах скольжения, которое не удается объяснить в модели зеркального механизма отражения. В целом сводка экспериментальных данных и их анализ стимулировал автора сформулировать предположение о возможном дифракционном механизме формирования диффузной компоненты поля. В этом же разделе после анализа существующих методов расчета отраженных от неровностей полей в качестве альтернативного рассмотрен метод френелевской дифракции для описания эффектов рассеяния электромагнитных волн на вершинах (ребрах) неровностей. Обоснована замена клиновидной формы возвышений полуплоскостью, оценены множители ослабления для дифракции на полуплоскости и цилиндре. Сделан вывод о том, что в дифракционном подходе удастся описать и «зеркальную», и диффузную компоненты.

Во **втором разделе** рассмотрены схемы расчета дифракционных полей с учетом многократного рассеяния. Элементы взаимодействия волны с поверхностью разделены на три области: переходную, области полутени и глубокой тени. Проанализированы приближения для выбора методики дифракционного представления результирующего поля. Обосновано допущение о возможности представления поля в точке приема в виде суммы - поля в свободном пространстве и волн, рассеянных на всех освещенных вершинах препятствий. Оценен возможный вклад в рассеяние мелкомасштабной «ряби», показано, что этим компонентом при скользящих углах рассеяния можно пренебречь. В качестве еще одного теоретического подхода моделирования использован метод Кирхгофа в комбинировании с методом вторичных источников (метод Гюйгенса). Роль вторичных источников в модельном приближении играли гребни волнения, замененные полуплоскостями. Проведено сравнение двух методик расчета. Первая из них предполагает представление вторичного поля как продукта аддитивного сложения отраженного и дифрагированного электромагнитных полей. Второй подход, основанный на расчете методом Кирхгофа – Гюйгенса, хоть и позволяет учесть эффекты многократного рассеяния, но требует значительно больших вычислительных ресурсов. Исследования этого раздела позволили выбрать в дальнейшем оптимальный метод представления рассеянных полей как результат многократной дифракции на шероховатостях поверхности.

Третий раздел посвящен моделированию ветровой компоненты морского волнения. Как уже отмечалось в отзыве выше, представление формы поверхности является одним из ключевых звеньев в проблеме рассеяния электромагнитных волн даже вне зависимости от углов облучения. В общем случае, без упрощенного модельного представления структуры самой поверхности и ее динамики, расчет отраженной и рассеянной компонент поля превращается в трудно решаемую проблему. При моделировании ветрового морского волнения для правильного учета затенений поверхности моря необходимо задавать длину применяемой электромагнитной волны и в соответствии с этим производить выбор максимальной частоты, учитываемой в

спектре морского волнения. В разделе проанализированы различные степени развитости ветрового волнения и соответствующие им распределения участков затенения для разных углов скольжения. Динамические свойства рассеянного поля зависят от скорости распространения морских волн и направления их движения. В частности, важнейшей «радиотехнической» характеристикой является время «жизни» освещенных участков, которые формируют «мгновенный» портрет рассеяния. Анализ этого параметра, проведенный диссертантом, показал, что время жизни при неизменной бальности волнения сильно сокращается по мере уменьшения угла скольжения. Весьма подробное исследование этого параметра позволило промоделировать различные варианты волнения, реализуемые на практике, и подобрать оптимальные динамические характеристики взволнованной поверхности для дальнейшего сопоставления с экспериментальными данными. В этом же разделе методом численного моделирования в зависимости от угла скольжения оценены распределения высот, наклонов, кривизны, длин освещенных и затененных участков морской поверхности. Полученные результаты в дальнейшем послужили исходными данными для модельных расчетов характеристик рассеяния радиоволн на морской поверхности под малыми углами скольжения.

В четвертом разделе проведен анализ распределения уровней полей для трех ранее означенных областей пространства. В освещенной зоне рассчитаны значения нормированных амплитуд волновых полей в точке наблюдения, переизлученных гребнями волн. В качестве нормировки использованы значения амплитуд поля в свободном пространстве. Выполнены оценки статистических характеристик уровней рассеяния, при этом для усреднения по ансамблю реализаций суммировались поля, переизлученные гребнями с совпадающими порядковыми номерами. Результаты расчетов дистанционных зависимостей полей, выполненные «дифракционным» методом, сопоставлены с распределениями, полученными в рамках традиционного подхода «касательных плоскостей». Наглядно продемонстрировано их существенное отличие в центральной части радиотрассы, особенно заметное при малых высотах корреспондирующих пунктов. В этом же разделе проанализированы угловые спектры рассеяния в зависимости от высот расположения приемного и передающего пунктов. Получен ряд оригинальных результатов, демонстрирующих необходимость учета эффектов дифракции, особенно существенно сказывающихся вблизи поверхности. Впервые оценен вклад различных участков трассы в когерентную и случайную составляющие вторичного поля. В области полутени учтены эффекты, вызванные многократной дифракцией. Во впадинах засветка поверхности за счет дифрагируемой компоненты пренебрежимо мала и может осуществляться только благодаря рассеянию поля на тропосферных неоднородностях. Исследована зависимость высотного множителя ослабления от числа экранов, используемых в расчете. Важным результатом является вывод о том, что «множитель ослабления поля с уменьшениями высоты точки наблюдения в зоне полутени убывает значительно медленнее, чем при интерференционном

представлении поля над поверхностью, оставаясь существенно отличным от нуля на границе геометрической тени и ниже ее». Этот вывод позволяет объяснить одно из противоречий, возникавших при сопоставлении экспериментальных данных с расчетами, выполненными традиционным методом касательных плоскостей без учета эффектов дифракции. В этом же разделе сформулированы условия применимости оригинального метода с учетом дифракционных эффектов, а также проанализированы поведения когерентной и некогерентной («диффузной») компонент электромагнитного поля после взаимодействия с шероховатой поверхностью.

Пятый раздел посвящен практическим аспектам применения предложенной методики расчета для оценивания угловых координат целей над взволнованной поверхностью. Очевидно, что для разностно-фазовых пеленгационных систем пространственная многолучевость приводит к деформации фазового фронта результирующего поля и не позволяет восстанавливать истинное направление на источник. Степень искажения волнового фронта определяется соотношением уровней полезного сигнала и пассивной помехи – поля, рассеянного подстилающей поверхностью. Проанализированы искажения угломестных и азимутальных направлений в разных по степени засветки областях радиотрассы. Впервые показано, что при измерении угла места источника излучения пеленгатором, находящимся ниже границы тени, создаваемой одиночным препятствием или их группой, измеренное значение оказывается близким к направлению на границу ближайшего к приемнику экрана. Установлено, что основной вклад в азимутальные ошибки вносит наклон границы экрана по отношению к горизонтальной плоскости. Представленные результаты позволяют качественно объяснить полученные в экспериментальных исследованиях особенности угломестных и азимутальных ошибок пеленгования.

В шестом разделе исследованы эффекты двукратного взаимодействия радиоволны с шероховатой поверхностью. Вследствие значительного уменьшения амплитуды волны при каждом акте рассеяния рассмотрение оригинального метода расчета дифракционных эффектов ограничено учетом только двукратного взаимодействия. В процессе анализа характеристик рассеянного поля выяснено, что мелкомасштабные шероховатости, присутствующие практически всегда на взволнованной морской поверхности и приводящие к изотропному рассеянию падающей на морскую поверхность радиоволны, могут значительно ослаблять влияние двукратного взаимодействия на радиосигнал в точке приема. Рассмотрено влияние поляризационных характеристик распространяющегося электромагнитного поля на уровень его двукратного взаимодействия с подстилающей поверхностью. Выяснено, что вертикально поляризованные электромагнитные волны, для которых абсолютные значения коэффициента отражения от водной поверхности в зависимости от локального угла скольжения падающей радиоволны могут быть близким к нулю, в меньшей мере подвержены влиянию двукратного взаимодействия.

В **Выводах** сформулированы основные результаты диссертации и перечислены задачи исследования, в ходе которых апробирован новый метод представления электромагнитного поля, рассеянного шероховатой поверхностью при малых углах облучения.

В целом диссертация производит хорошее впечатление законченного фундаментального научного труда, имеющего важное практическое применение. Рукопись написана четким научным языком с общепринятой терминологией. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Основные выводы хорошо обоснованы, результаты оригинального физического моделирования апробированы на достаточно обширном массиве экспериментальных данных и сопоставлены с известными модельными представлениями. Основные результаты достаточно полно опубликованы в статьях и тезисах многочисленных национальных и международных конференций. Работа, несомненно, представляет большой интерес для ученых радиофизиков и радиоинженеров, занимающихся разработкой надводных радиолокационных и связных систем, функционирующих при скользких углах облучения взволнованной морской поверхности.

Несмотря на перечисленные достоинства, диссертация имеет ряд недостатков, некоторые из них считаю необходимым отметить:

1. При постановке задачи распространения электромагнитной волны над взволнованной морской поверхностью при скользких углах визирования не сделан четкий акцент на описания эффектов рассеяния «вперед». В ряде утверждений и выводах создается впечатление о радиолокационной постановке. Во вводной части работы отсутствует необходимый рисунок расположения передающего и приемного пункта относительно подстилающей поверхности. Впервые он появляется только на стр. 60 (рис. 1.8).

2. Расчет рассеянных полей проведен в скалярной постановке (см., например, формулы 2.20 и 2.27), в тоже время в разделах 5 и 6 рассматриваются поляризационные эффекты, сопровождавшиеся моделированием. В постановочной части работы нет обоснования правомочности пренебрежения поляризационными эффектами, хотя очевидно, что скользкое распространение радиоволн над хорошо проводящей поверхностью приводит к разному поведению ТЕ и ТМ компонент электромагнитного поля.

3. Отсутствует четкая аргументация - почему модель системы идеально проводящих полуплоскостей рассматривается в свободном пространстве, а не вблизи проводящей границы. Какова погрешность такого упрощения?

4. На странице 90 неудачно применен термин «линейное приближение» относительно общепринятого описания морского волнения случайной поверхностью.

5. Общим замечанием ко всем рисункам, которые заимствованы из «чужих» публикаций и приведены в диссертации, является отсутствие ссылок в подрисуночных подписях на соответствующий источник графического материала. В современной научной литературе это требование является

обязательным.

6. В постановочной части работы постулируется пренебрежение эффектами тропосферной рефракции, в тоже время при расчете множителя ослабления (стр. 189) при численном оценивании используется эквивалентный радиус Земли 8500 км, полученный с учетом рефракции...

7. В ходе изложения материала для одних и тех же физических величин, например, электромагнитного поля, используются разные обозначения (см. формулы 2. 19 -220 и 4.15).

8. Нельзя считать удачной рубрикацию изложения материала. Объем разделов, например, максимально большого - третьего (83 страницы) в четыре раза превышает объемы разделов 2 и 6.

Отмеченные недостатки не умаляют достоинство работы и могут быть учтены соискателем при продолжении дальнейших исследований.

В заключение считаю необходимым отметить следующее:

1) Представленная работа выполнена на достаточно **высоком уровне**, она вносит **существенный вклад** в проблему распространения радиоволн над взволнованной морской поверхностью, которая, несомненно, **актуальна** сегодня и перспективна в будущем.

2) Основные результаты, полученные в диссертации, имеют **важное фундаментальное и прикладное** значение.

3) Высокая квалификация соискателя мне **хорошо известна** из моих многочисленных научных дискуссий с автором и его публичных выступлений на научных семинарах и конференциях.

Считаю, что рецензируемая диссертационная работа Ю.Ф. Логвинова «Распространение радиоволн над взволнованной водной поверхностью при малых углах скольжения» удовлетворяет требованиям МОН Украины, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 01.04.03 – радиофизика, и соискатель заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Главный научный сотрудник РИ НАНУ
Член корреспондент НАН Украины,
Доктор физ.-мат. наук, профессор,
Заслуженный деятель науки и техники Украины

Ю.М. Ямпольский

Подпись главного научного сотрудника РИ НАНУ, член-корреспондента НАН Украины, доктора физ.-мат. наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники Украины заверяю

Ученый секретарь РИ НАНУ
Кандидат физ.-мат. наук



А.П. Удовенко