

ИЗМИРАН

К работам НИИДАР были подключены многие организации, в том числе и ИЗМИРАН.

А.В. Попов рассказал:

— В поезде разговорился с попутчицей. Девушка спросила меня, где я работаю.

— Я ответил: «В Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Академии Наук»

— Она, мечтательно глядя в окно, произнесла: «И н с т и т у т
З е м н о г о... М а г н е т и з м а... Как это поэтично!»

В совместной договорной теме с ИЗМИРАН, которая называлась «Топаз», я представлял НФ НИИДАР. Я контактировал по этой теме с В.А. Соколовским, который предложил мне поступить в аспирантуру ИЗМИРАН, что я и сделал.

Научными руководителями были В.А. Соколовский и Ю.Н. Черкашин. Первоначально пытался начинать разговор об искусственной рефракции, но безуспешно. Коллеги по аспирантуре объяснили, что аспирант отличается от собаки только отсутствием хвоста и занимается только теми задачами, которые ставит перед ним научный руководитель. Мне была поставлена задача о распространении волн в случайных средах.

По окончании аспирантуры защитил кандидатскую диссертацию.

Но вопрос об искусственной рефракции модулированных волн в средах с частотной дисперсией оставался нерешенным. Никто из моих собеседников не мог сказать ничего вразумительного. Реакция практически каждого из них проходила три стадии:

Первая стадия: ух ты, как здорово! Возникают такие возможности!

Вторая стадия: но если этот эффект существует, его должны были бы давно исследовать в двадцатые годы, когда очень многие классики занимались дисперсией волн. Неужели они прошли мимо, не заметив целого волнового эффекта?

Третья стадия: темное это дело... То ли да, то ли нет... Почему о подобных вещах никто ничего не знает? Ведь если бы эффект был, он был бы уже давно исследован, о нем должны были бы рассказывать в институтском курсе радиофизики. А там, кроме линейной и нелинейной рефракции, ничего нет. Странно...

Тогда я и решил, что это будет темой моих дальнейших исследований. Начал с численного моделирования. Взял уравнение Клейна-Гордона, которое описывает различные волны с частотной дисперсией, в том числе и короткие радиоволны в ионосфере. Первые же результаты численных расчетов для волн с поперечной частотной модуляцией в однородной среде совершенно отчетливо показали наличие искусственной рефракции, которую я назвал «дисперсионной рефракцией». Причем этот эффект был именно рефракционным, т.е. намного больше длины волны, а не дифракционным, когда его величина сравнима с длиной волны. Например, длина радиоволны составляет двадцать метров, а она изменяет свою траекторию на двух тысячах километров – таковы характерные величины.

Приведем пример решения волнового уравнения и прокомментируем его.

На левой границе прямоугольной зоны расчета задана функция с поперечной частотной модуляцией, изображенная на рис. 3. Продольная координата в данном случае отображает время. Частота при $y=0$ максимальна, при $y=5$ км – минимальна. Выбор такой начальной волновой функции, имеющей всего три колебания, объясняется только соображениями наглядности результатов расчета.

На рис. 4, 5 и 6 показана амплитуда поля в пространственных координатах для однородной среды без частотной дисперсии (вакуума) в три последовательных момента времени. Видно, что волна распространяется вдоль оси x , практически не меняя своей формы.

Рис. 7-11 относятся к однородной среде с частотной дисперсией. Здесь картина распространения волны значительно сложнее. На рис. 7, 8 и 9 виден предвестник, который движется со скоростью света. За ним следует основная волна, распространяющая-

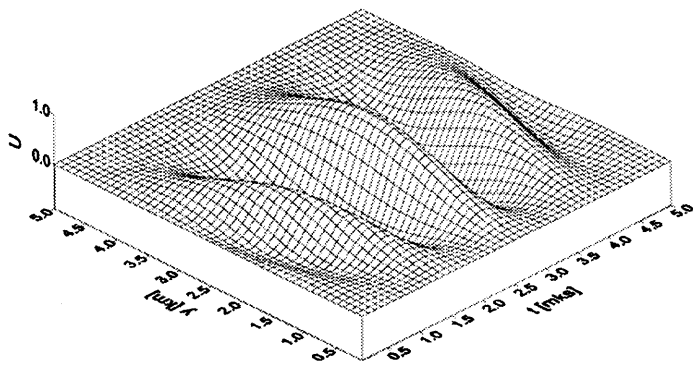


Рис. 3. Функция поля $U(t, y)$ на границе $x=0$.

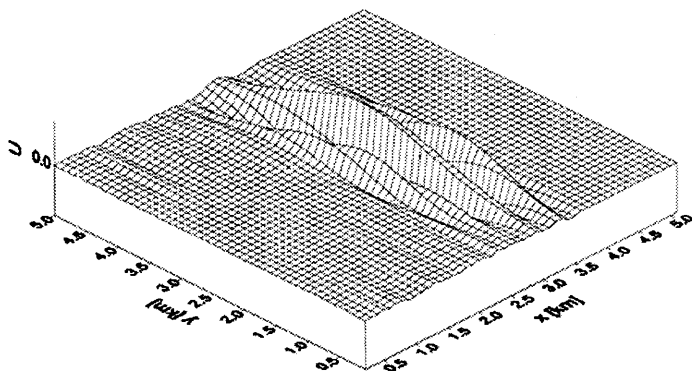


Рис. 4. Функция поля $U(x, y)$ в бездисперсной среде. $t=12$ мкс.

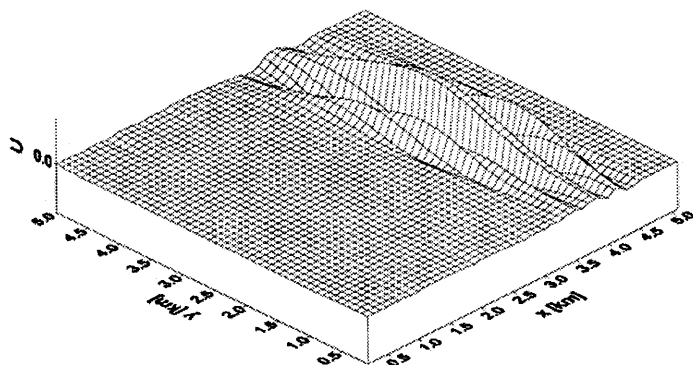


Рис. 5. Функция поля $U(x, y)$ в бездисперсной среде. $t=15$ мкс.

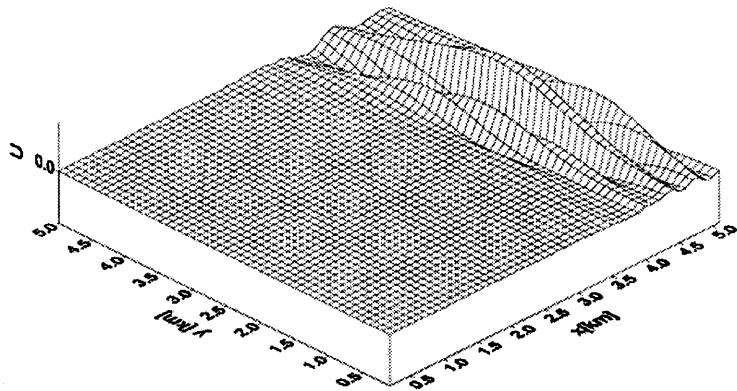


Рис. 6. Функция поля $U(x,y)$ в бездисперсной среде. $t=18$ нс.

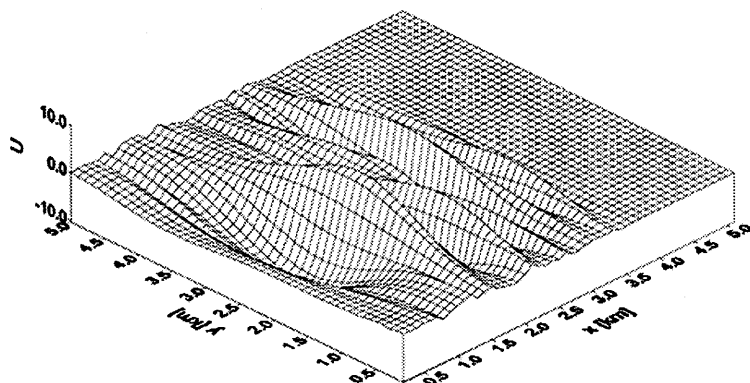


Рис. 7. Функция поля $U(x,y)$ в диспергирующей среде. $t=12$ нс.

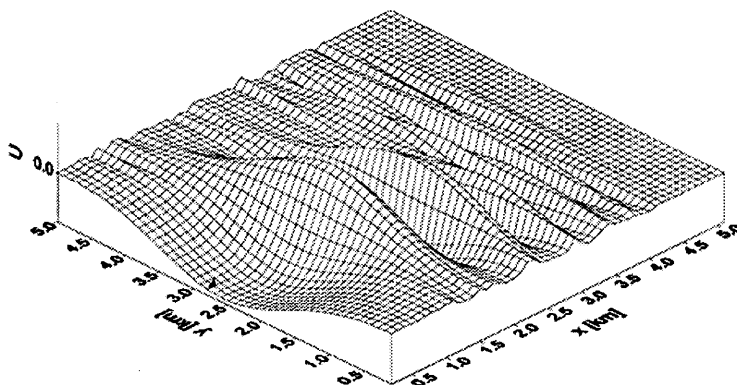


Рис. 8. Функция поля $U(x,y)$ в диспергирующей среде. $t=15$ нс.

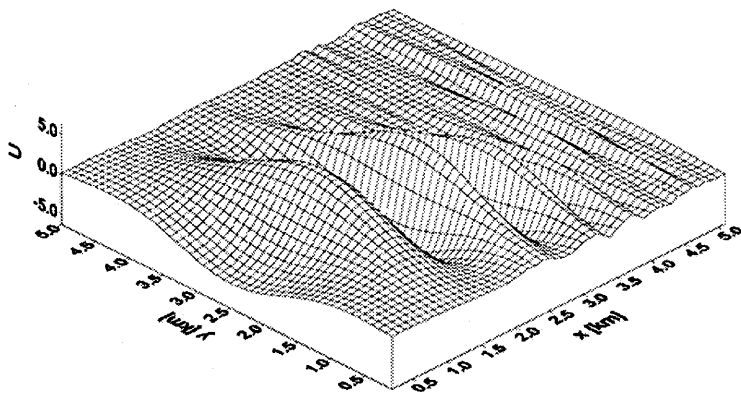


Рис. 9. Функция поля $U(x,y)$ в диспергирующей среде. $t=18$ мкс.

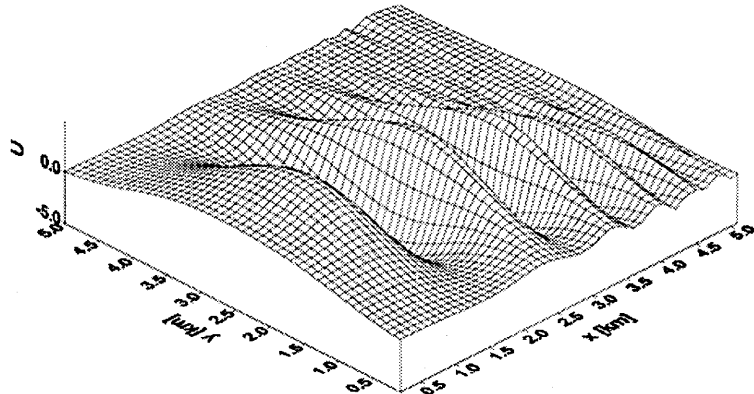


Рис. 10. Функция поля $U(x,y)$ в диспергирующей среде. $t=21$ мкс.

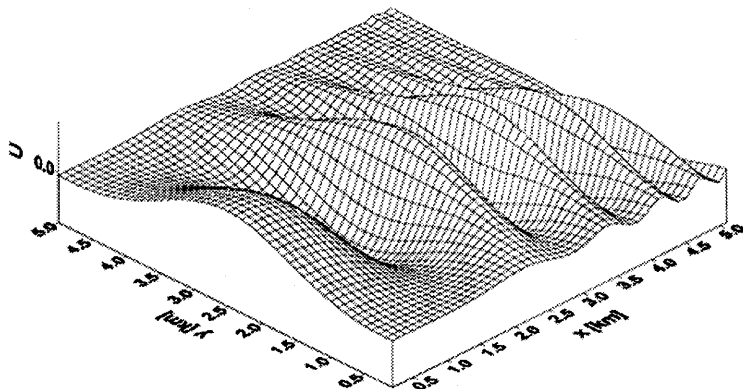


Рис. 11. Функция поля $U(x,y)$ в диспергирующей среде. $t=24$ мкс.

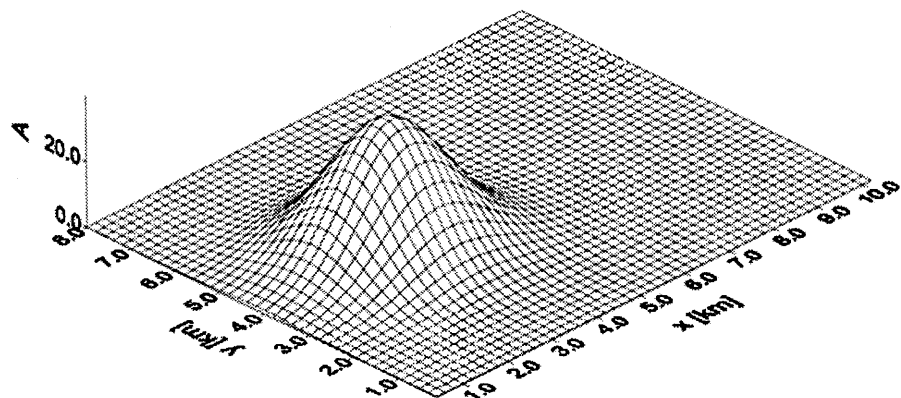


Рис. 12. Огибающая волны в бездисперсной среде. $t=25$ мкс.

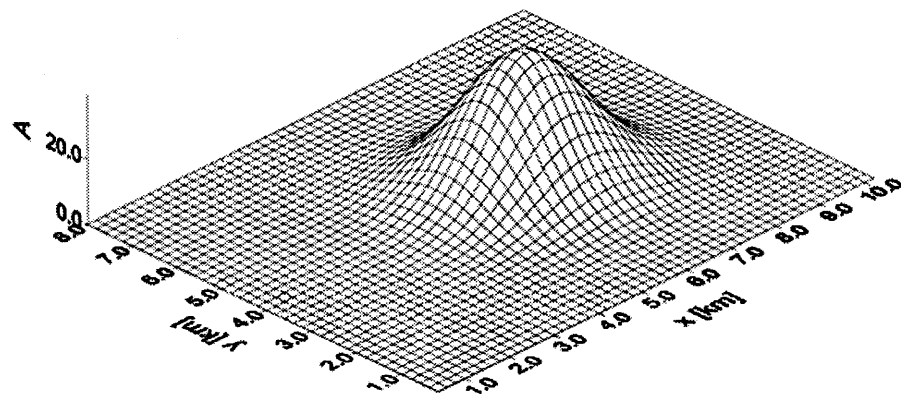


Рис. 13. Огибающая волны в бездисперсной среде. $t=35$ мкс.

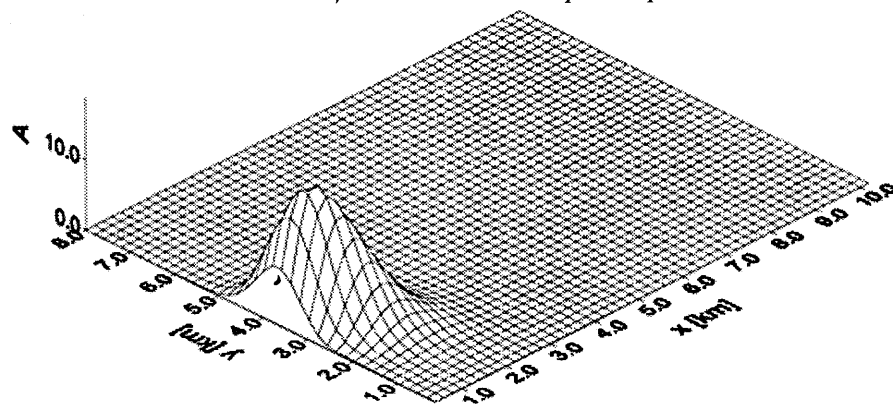


Рис. 14. Огибающая волны в диспергирующей среде. $t=25$ мкс.

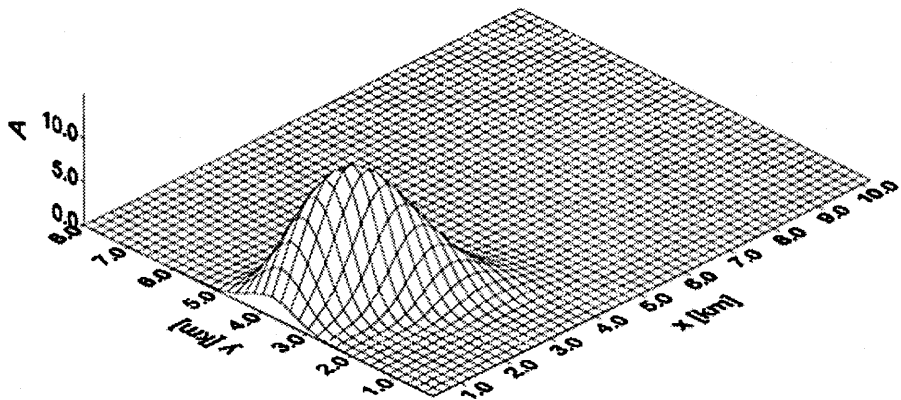


Рис. 15. Огибающая волны в диспергирующей среде. $t=35$ мкс.

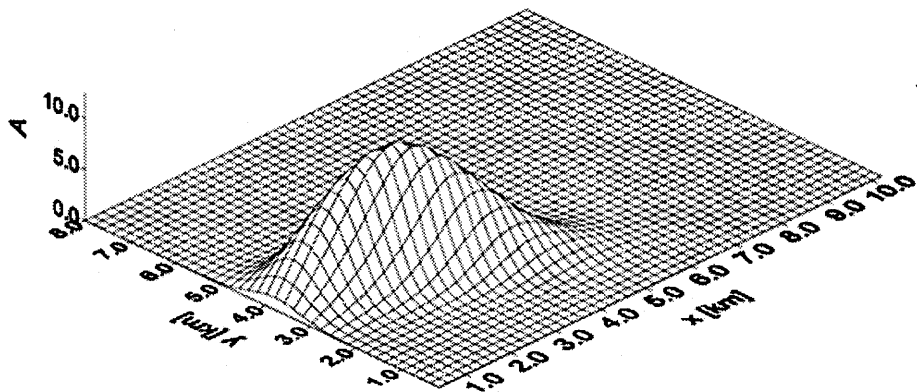


Рис. 16. Огибающая волны в диспергирующей среде. $t=45$ мкс.

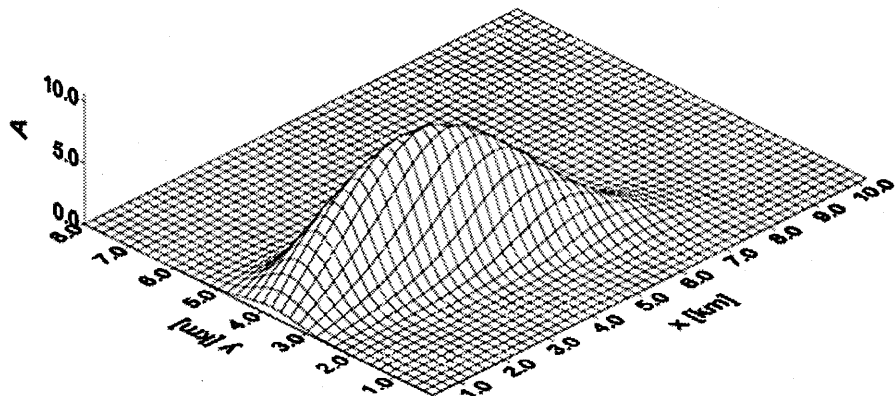


Рис. 17. Огибающая волны в диспергирующей среде. $t=55$ мкс.

ся с меньшей скоростью. Она испытывает дисперсионные искажения продольной формы, а также поперечный снос энергии к правой границе — дисперсионную рефракцию.

Оказалось, что кроме исходного волнового уравнения, эффект дисперсионной рефракции совершенно уверенно наблюдается и с помощью нестационарного параболического приближения этого уравнения.

Здесь также приведем результаты численных расчетов. В отличие от предыдущего случая, где мы наблюдали волновую функцию, в данном случае мы будем наблюдать огибающую этой функции, имеющей поперечную частотную модуляцию и несколько тысяч осцилляций.

На рис 12 и 13 показана огибающая волны с поперечной частотной модуляцией в вакууме для двух моментов времени. Видно, что волна распространяется со скоростью света, не меняя своей формы.

На рис. 14-17 показано распространение волны с поперечной частотной модуляцией в однородной среде с частотной дисперсией. Как и в решении полного волнового уравнения, здесь наблюдается продольное расплывание волны и поперечный ее снос — дисперсионная рефракция.

Основным асимптотическим методом в радиофизике является пространственно-временная геометрическая оптика (ПВГО), как обобщение лучевого, или геометрооптического подхода, развиваемого с конца 19 века. Она как раз и создавалась для описания рефракции.

Я стал исследовать эффект дальше, а так же выступать на семинарах.

Единственным, кто мгновенно все понял и однозначно положительно оценил идею, был Сергей Михайлович Рытов. Когда я выступал на его семинаре, то был просто поражен, насколько быстро он «схватил» суть и через несколько минут стал моим фактическим содокладчиком. На все вопросы зала отвечал уже он, не выпуская изо рта папиросу «Беломор». Например, на вопрос, как создать волну с поперечной частотной модуляцией, ответил:

Любой движущийся источник волн создает в окружающем пространстве волновой процесс с поперечной частотной модуляцией.



Рис. 18. Возникновение поперечной частотной модуляции при движении источника волн.

— Да очень просто. Любой движущийся источник волн в поперечном относительно движения направлении излучает такие волны!

Самое интересное, что он стоял у истоков пространственно-временной геометрической оптики, которая как раз и не описывает эффект дисперсионной рефракции. Я ознакомился с его докторской диссертацией «Модулированные колебания и волны», заложившей основы ПВГО, опубликованной в 1940 г. и все понял: и в чем причина его мгновенной реакции, и почему в то время он не обнаружил эффекта дисперсионной рефракции.

Волны с различными типами пространственной и временной модуляции, в которые входит, как частный случай, поперечная частотная модуляция, обсуждаются С.М. Рытовым на первых же страницах его диссертации. Там он рассматривает и способы получения различных видов модуляции. Ответ на вопрос о спосо-

бах возбуждения волн с поперечной частотной модуляцией был у него готов еще в 1940 г.

Обнаружить дисперсионную рефракцию он не мог принципиально, поскольку не рассматривал среды с частотной дисперсией.

Для получения уравнений геометрической оптики он применил разложение волновой функции в ряд по степеням малого параметра (малый параметр – это величина, обратная большому параметру). В качестве нулевого приближения он использовал уравнение эйконала.

Следуя законам математики, он понимал, что обоснованность использования только одного члена бесконечного ряда требует оценки величин суммы всех отбрасываемых членов.

Ввиду важности этого факта приведу цитату из диссертации С.М. Рытова.

«Мне не удалось провести до конца оценку сходимости разложения (21,2) и доказать асимптотический характер нулевого приближения путем обобщения способа, изложенного в параграфе 17 для осциллятора. Трудность заключается в оценке верхней границы членов соответственно обобщенного ряда Неймана, в котором ядра являются не просто функциями, а содержат операцию дифференцирования по двум направлениям, ортогональным к лучу.»

Последователи С.М. Рытова, которые тоже взяли за основу лучевой ряд и разработали стандартный вариант ПВГО, обобщенный на случай сред с частотной дисперсией, в многочисленных монографиях, учебниках и статьях по непонятной причине даже не упоминают о необходимости оценок величины отбрасываемых членов. Только в какой-то статье я видел сноску, в которой говорилось: «В общем случае о сходимости лучевого ряда ничего не известно».

Способ оценки ряда, которым пытался воспользоваться С.М. Рытов, сложен, и ему не удалось решить эту задачу.

Но существует элементарный метод оценки приближенных решений – метод невязки, или метод несоответствия. Функция волнового поля, которая получается в результате приближенного решения, подставляется в исходное волновое уравнение.

Возможны три варианта результата подстановки:

1) «нуль равен нулю». Мы нашли точное решение волнового уравнения.

2) «члены, значимые только на длине волны, равны нулю». Мы имеем геометрикооптическое решение, описывающее рефракцию на дальностях, значительно больших длины волны. Дифракционные эффекты здесь не учитываются

3) «члены с величиной рефракционных явлений равны нулю». Решение не соответствует приближению геометрической оптики.

Метод невязки для сред без частотной дисперсии дает второй вариант ответа: стандартная ПВГО является асимптотическим решением волнового уравнения.

Однако метод невязки для сред с частотной дисперсией дает третий вариант ответа: стандартная ПВГО не является асимптотическим решением волнового уравнения на больших расстояниях, т.е. неправильно описывает рефракцию волн в среде. Сумма отбрасываемых членов соизмерима с величиной, полученной только из уравнения эйконала. Стандартная ПВГО имеет систематическую ошибку с масштабами рефракции.

Необходимость пересмотра ПВГО стала очевидной. Мною была предложена новая модель поля и новый способ вывода уравнений.

Предложенная модель задается функцией Эйри и является асимптотической на больших расстояниях, т.е. правильно описывает рефракцию волн в линейных средах с частотной дисперсией, о чем говорит метод невязки.

Стандартная модель поля — это локально-плоская локально-однородная и локально монохроматическая волна, которая является точным решением волнового уравнения в однородной среде. Функция Эйри — точное решение простейшей рефракционной задачи, когда диэлектрическая проницаемость меняется линейно вдоль фронта.

Используя уравнения баланса энергии, были получены новые уравнения для ПВГО, которую я назвал «модифицированной».

Модифицированная ПВГО, кроме члена, единственного в обычной ПВГО содержит еще два дополнительных.

Первый из них в явном виде описывает дисперсионную рефракцию волн с поперечной частотной модуляцией. Вторым корректирует в сторону уменьшения эффект обычной рефракции

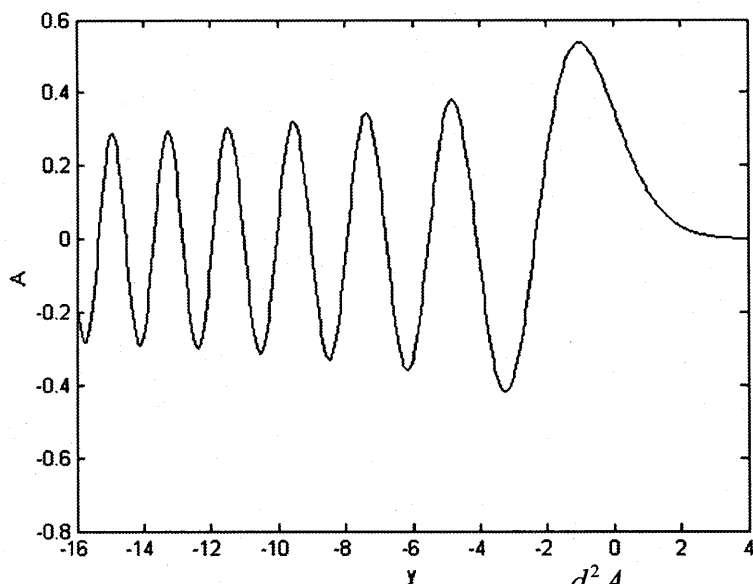


Рис. 19. Функция Эйри – решение уравнения $\frac{d^2 A}{dy^2} - Ay = 0$.

Рефракция волн в стандартной и модифицированной ПВГО

Стандартная ПВГО

Модель поля (плоская волна) – точное решение волнового уравнения для однородной среды, т.е. при отсутствии рефракции.

$$\frac{d\vec{V}_x}{dt} = -c^2 \frac{\omega_L}{\omega^2} \nabla \omega_L$$

Модифицированная ПВГО

Модель поля (плавнонеоднородная волна) – точное решение волнового уравнения для рефракции в линейном слое.

$$\frac{d\vec{V}_x}{dt} = -c^2 \frac{\omega_L}{\omega^2} \nabla \omega_L - c^2 \frac{\omega_L^2}{\omega^3} \nabla_{\perp} \omega + c^2 \frac{\omega_L^3}{\omega^4} \nabla_{\perp} \omega_L$$

Модифицированная ПВГО имеет два дополнительных члена, один из которых описывает эффект дисперсионной рефракции, связанный с поперечной частотной модуляцией волны и дисперсией среды, а второй корректирует в сторону уменьшения эффект обычной рефракции немодулированных волн.

Рис. 20. Различие между стандартной и модифицированной ПВГО.

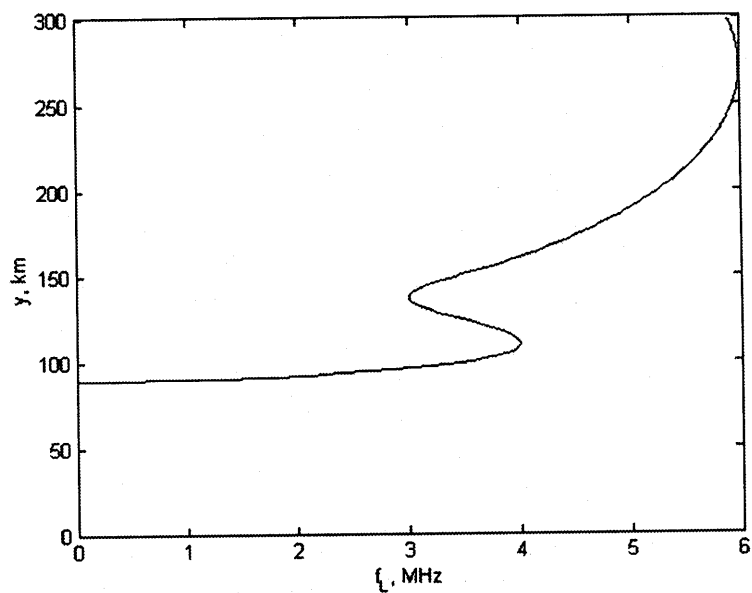


Рис. 21. Зависимость плазменной частоты ионосферы от высоты.

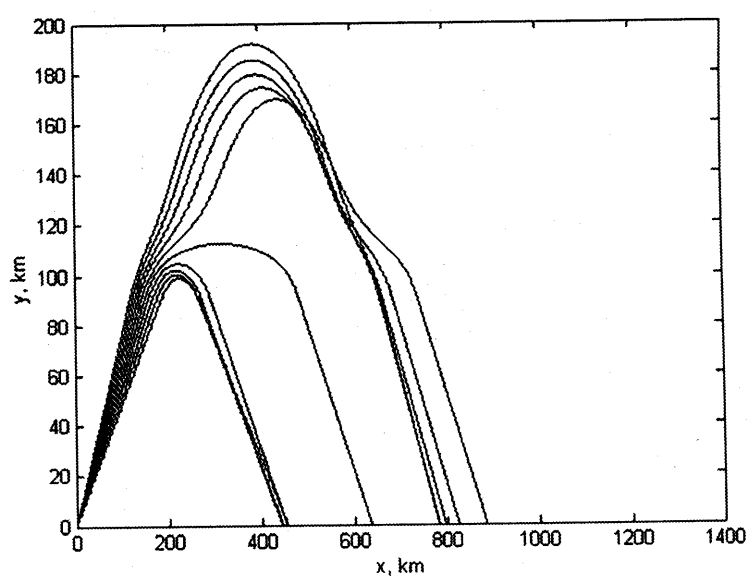


Рис. 22. Проекция ПВ-лучей на пространственные координаты.
Стандартный вариант ПВГО.

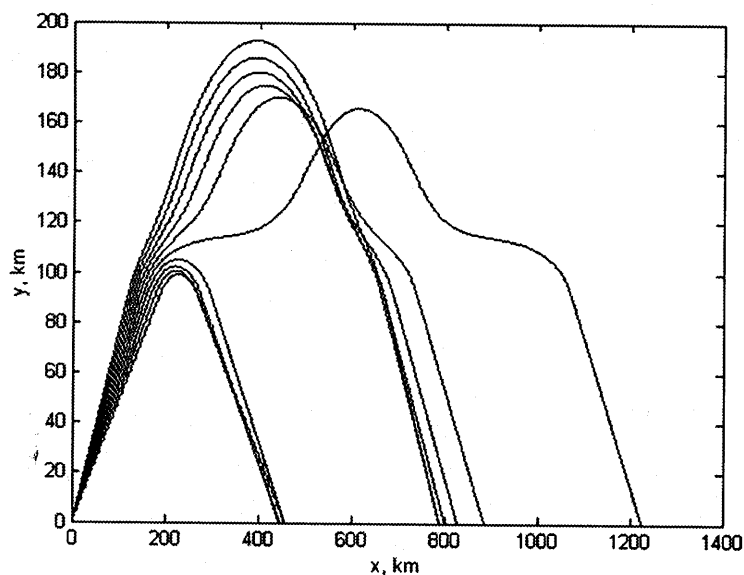


Рис. 23. Проекция ПВ-лучей на пространственные координаты.
Модифицированный вариант ПВГО.

немодулированных волн, получаемый при описании стандартной ПВГО.

Ошибка стандартной ПВГО при расчетах распространения обычных, без поперечной модуляции радиоволн в ионосфере, может быть разной, что зависит от задачи, но она существует всегда. При расчете скачкового механизма ошибка минимальна, но при расчетах скользящего или волноводного распространения приближенное решение очень сильно отличается от точного решения. Максимальная ошибка стандартной ПВГО по отношению к модифицированной может достигать 96%.

Приведем пример расчета в прямоугольной (несферической) модели ионосферы, имеющей слой Е и «долину» между слоями Е и F. Цель этих расчетов – показать разницу между стандартной и модифицированной ПВГО.

Сравнение рисунков 21 и 22 позволяет сделать следующие выводы:

1) скачковые моды с точностью до разрешения рисунка не отличаются;

2) межслоевые моды, представленные пятым лучом, имеют принципиально разный характер траектории.

Разгадка загадки или, по крайней мере, разгадка части загадки радиолокатора 5Н32, о которой мне рассказал А.А. Кирякин на ночной дороге между Николаевым и Калиновкой, заключается в том, что для теоретических расчетов распространения коротких радиоволн в ионосфере сотрудники НИИДАР пользовались формулами стандартной геометрической оптики, имеющими большую систематическую ошибку. При расчете трансформации волны в скользящий или волноводный механизм ошибка настолько велика, что результат не имеет ничего общего с реальностью. Этого факта уже достаточно, чтобы модель радиоканала не работала.

По результатам своих исследований я подготовил докторскую диссертацию и весной 1993 г. ее защитил.

Во время очень скромного (время было такое) банкета по поводу успешной защиты один из моих официальных оппонентов Ю.А. Чернов сказал:

– Очень интересная и нужная работа. Мы в НИИ Радио занимаемся радиовещанием на коротких волнах. Давно выяснили, что рассчитываемые нами зоны вещания не совпадают с реальными.

– Теперь все становится понятным: мы пользуемся неправильной геометрической оптикой.

– Удивительно, почему теоретики за 50 лет не удосужились проверить сходимость лучевого ряда?