

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЙЯНИЯ ДЛЯ ИРНР

В.П. Ташлыков, С.С. Алсаткин, Р.В. Васильев, А.А. Щербakov

SIMULATING OF INCOHERENT SCATTERED SIGNAL FOR IRIS

V.P. Tashlykov, S.S. Alsatkin, R.V. Vasilijev, A.A. Shcherbakov

В данной работе приведены результаты численного моделирования рассеянного в ионосфере радиосигнала Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР). Модель ионосферы представляет собой пространство, условно разделенное на заданное количество слоев, в каждом из которых находится определенное количество рассеивателей. Рассеянным радиосигналом в предлагаемой модели является результат численной свёртки импульса заданной длительности и частоты, с заданными таблицами свойствами рассеивателей. Вклад в такой сигнал вносит каждый из рассеивателей, осуществляя сдвиг частоты, обусловленный эффектом Доплера, и задавая случайную начальную фазу отраженного от рассеивателя импульса. Сдвиг частоты задается случайно согласно закону распределения, которому соответствует теоретический спектр доплеровских сдвигов радиосигнала рассеянного в плазме, состоящей из ионов и электронов одного сорта, а начальное значение фазы распределено равномерно. Интенсивность рассеяния может определяться отдельно для каждого слоя, таким образом в модели учитывается эффект Фарадея, который вносит искажения в спектр ИР. Целью данной работы является изучение таких искажений и проверка работоспособности алгоритмов, определяющих характеристики плазмы по реальным данным ИРНР с использованием детерминированных модельных данных, приближенных к реальным условиям.

Results of the numerical modeling of scattered signal which is gained and treated with Irkutsk Radar of Incoherent Scattering are performed in the presented article. The model undertakes space, conditionally divided on set quantity of layers, each of which has a definite number of scatters. Scattered signal is an impulse for set length and frequency, reflected of widespread plasma. Every scatter makes a contribution to such signal putting through shift of frequency, conditioned by Doppler's effect, and setting steadily spread odd phase of reflected impulse. Phase shift is set randomly according to the law of distribution that corresponds to the theoretical power spectrum of plasma which consists of ions and electrons of the same kind. Fitting soared height spectrum changes according to the linear temperature gradient, and intensity changes through the each layer. Normally distributed noise is also added to the model as a real noise of receiver. The goal of this course work is checking how properly existing algorithms work using determined modeling data that is close to real conditions and defining the peculiarities of plasma according to real data acquisitions of IRIS.

Введение

Метод некогерентного рассеяния занимает ключевую роль в исследовании ионосферы. С его помощью можно изучать такие параметры ионосферой плазмы, как электронные и ионные концентрации и температуры, а также скорость дрейфа плазмы. Радары некогерентного рассеяния излучают импульсы на частотах, позволяющих зондирующим сигналам проникать на высоты выше главного максимума ионизации. Из-за того, что большая часть мощности зондирующего сигнала не отражается от определенных слоев ионосферы, а рассеивается по всей ее толщине, принимаемый сигнал имеет очень низкую мощность и, как следствие, низкий коэффициент отношения сигнал-шум. Поэтому на радарах ИР применяются мощные передатчики (на ИРНР 2.5–3.2 МВт) и сверхчувствительные приемники.

Эксперименты, выполняющиеся на ИРНР, основаны на измерении сигнала отклика ионосферы на зондирующий импульс заданной частоты и длительности. Интенсивность принятого сигнала говорит о концентрации заряженных частиц в зондируемой ионосфере, а по спектру принятого сигнала достаточно точно определяются значения температур электронов и скорость дрейфа плазмы. Однако структура антенн ИРНР, в частности, наличие поляризационного фильтра в апертуре антенны, требует учитывать специфику распространения в ионосфере радиоволн с плоской поляризацией. При зондировании ионосферы радиоволнами, поляризованными в одной плоскости, возникают замирания принятого радиосигнала, обусловленные эффектом Фарадея – вращении плоскости поляризации при распростра-

нении электромагнитной волны в замагниченной плазме ионосферы. Типичная форма высотного профиля мощности радиосигнала, искаженная за счёт фарадеевских вариаций, показана на рис. 1. Этот эффект имеет большое значение в технике определения параметров плазмы на ИРНР. Как показано в [Шпынев, 2000], концентрация электронов пропорциональна углу поворота вектора поляризации вдоль пути распространения сигнала. Это позволяет напрямую вычислять профиль концентрации электронов, не прибегая к другим методикам калибровки, например таким, как определение максимума концентрации при помощи ионозонда.

Очевидно, что эффект Фарадея вносит систематическую погрешность в метод определения ионных температур, поскольку добавляет дополнительную модуляцию в принимаемый радиосигнал искажающую

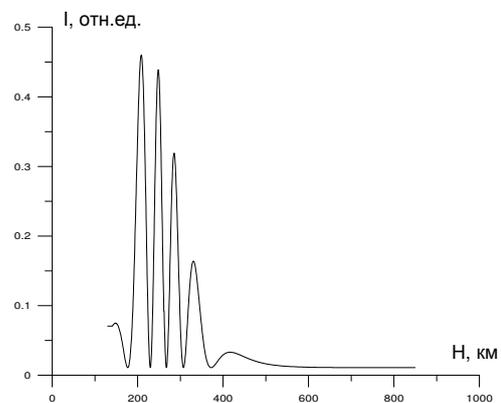


Рис. 1. Профиль фарадеевских вариаций – зависимость интенсивности принятого сигнала от высоты.

его спектр. Эту погрешность предполагается выявить с помощью численного моделирования. Имея достаточно гибкую модель взаимодействия среды с зондирующим сигналом, можно поэтапно изучать влияние на спектр НР всех фундаментальных характеристик ионосферы и радара. В работе [Алсаткин и др., 2003] описана подобная модель для сигналов сложной формы. Задача построения адекватной модели ионосферы была поставлена и перед авторами статьи [Díaz et al., 2008]. Для того чтобы имитировать реальный эксперимент по исследованию ионосферы, в предложенной нами модели рассматривается сложный радиоимпульс длительностью 900 мкс, состоящий из двух последовательных импульсов длительностями 700 мкс (для изучения спектральных характеристик) и 200 мкс (для изучения пространственных характеристик). Диапазон используемых частот соответствует рабочему диапазону частот ИРНР – 154–162 МГц. В модели предполагается, что импульс взаимодействует с некоторым ансамблем рассеивателей, распределённых равномерно по высоте. При этом каждый из рассеивателей вносит некоторый сдвиг по частоте в отражённый назад сигнал и задаёт случайную начальную фазу. Сигналы отражателей суммируются в соответствии с задержкой, связанной с их расположением по высоте, формируя сигнал отклика ионосферы на зондирующий импульс.

Спектр рассеянного сигнала

Важным шагом в определении входных данных модели является построение аналитического спектра частотных сдвигов сигнала, рассеивающегося в ионосферной плазме. Согласно [Шеффилд, Рассеяние электромагнитного излучения в плазме] теоретический спектр монохроматического радиосигнала, рассеянного в низкотемпературной стационарной плазме, для максвелловского распределения скоростей частиц имеет вид:

$$S(\omega) = \frac{2\sqrt{\pi}}{ka} \left\{ \frac{A_e + A_i}{(\varepsilon^2)} \right\},$$

где

$$A_e = \exp(-x_e^2) \times \left[\left(1 + \alpha^2 \frac{T_e}{T_i} R w(x_i) \right)^2 + \left(\alpha^2 \frac{T_e}{T_i} I w(x_i) \right)^2 \right];$$

$$A_i = \sqrt{\frac{m_i T_e}{m_e T_i}} \exp(-x_e^2) \times \left[(\alpha^2 R w(x_e))^2 + (\alpha^2 I w(x_e))^2 \right],$$

$$(\varepsilon^2 = \left\{ \left[1 + \alpha^2 \left(R w(x_e) + \frac{T_e}{T_i} R w(x_i) \right) \right]^2 + \right.$$

$$\left. + \left[\alpha^2 I w(x_e) + \alpha^2 \frac{T_e}{T_i} I w(x_i) \right]^2 \right\};$$

$$x_e = \omega / ka;$$

$$x_i = \omega / kb;$$

$$\alpha = 1 / k\lambda_D;$$

$$a = \sqrt{2KT_e / m_e};$$

$$b = \sqrt{2KT_i / m_i};$$

$$Rw(x) = 1 - 2x \exp(-x^2) \int_0^x \exp(p^2) dp;$$

$$Iw(x) = \sqrt{\pi} x \exp(-x^2).$$

Здесь k – волновой вектор, T_e и T_i – температуры электронов и ионов соответственно, a и b – средние тепловые скорости электронов и ионов, λ_D – радиус Дебая, $Iw(x)$ – мнимая часть, соответствующая затуханию Ландау, ε – продольная диэлектрическая проницаемость, а A_e и A_i – представляют соответственно выражения для электронной и ионной компоненты рассеянного сигнала. Теоретический спектр, рассчитанный для температуры электронов 3500 К и температуры ионов 2500 К, изображен на рис. 2, он имеет симметричную двугорбую форму. По форме спектра можно качественно оценивать температуру частиц плазмы: положение его пиков определяется температурой электронов, а глубина провала между ними – отношением электронных и ионных температур. В предлагаемой модели важно учитывать, что форма входного спектра будет изменяться с изменением высоты. В соответствии с приведенными выше формулами была написана программа, позволяющая численно рассчитывать значения теоретического спектра рассеянного сигнала. Результат работы этой программы используется в качестве параметра на входе рассматриваемой модели. На рис. 3 показан пример входного спектра доплеровских сдвигов рассеянного сигнала, который изменяется с высотой. Здесь температуры ионов и электронов увеличиваются линейно и равномерно. Из графика видно, что с увеличением температуры электронов горбы спектра раздвигаются, повышая ширину спектра, а с уменьшением отношения температур электронов и ионов глубина провала между горбами уменьшается. На рис. 4 представлен график для данных, полученных с помощью модели IRI. Здесь температуры ионов и электронов и концентрация электронов меняются каждые 600 м.

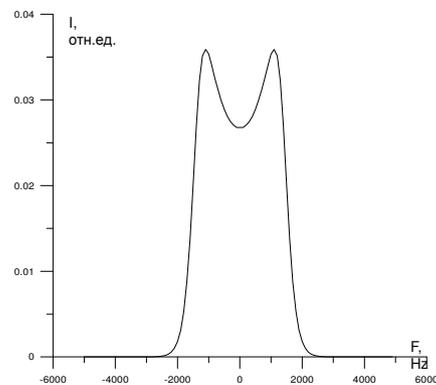


Рис. 2. Аналитический спектр плазмы для $T_e=3500$ К и $T_i=2500$ К.

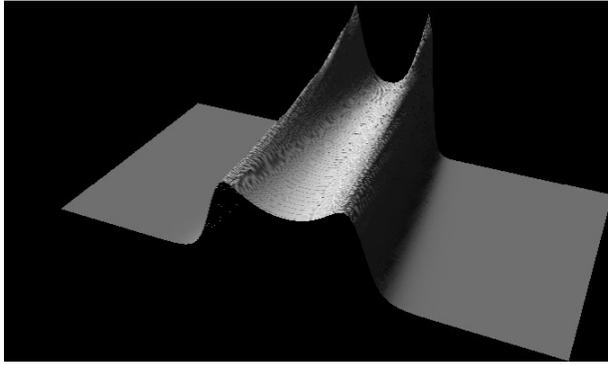


Рис. 3. Спектр НР для линейного градиента температур.

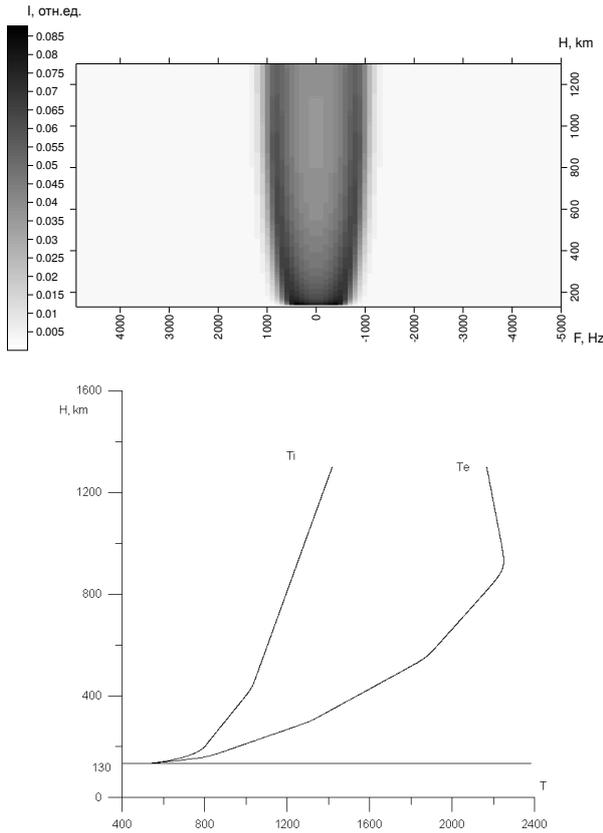


Рис. 4. (сверху) Спектр НР для градиента температур, полученного на IRI. Интенсивность черного цвета соответствует мощности спектра. (снизу) Градиенты температур ионов и электронов.

Описание модели

В первом приближении ионосфера представляется линейной одномерной системой. Рассеяние сигнала происходит в тонком слое, в котором находится некоторое количество рассеивателей. Разбив объем исследуемой ионосферы на множество таких слоев, и считая число рассеивателей в них постоянным, можно имитировать среду, в которой распространяется сигнал. Каждый рассеиватель имеет два параметра: сдвиг частоты, распределенный по определенному закону, и случайный, равномерно распределенный сдвиг фазы, с которой сигнал отражается от рассеивателя. В самом простом варианте модели входными данными будут длительность зондирующего импульса и закон распределения сдвигов частоты, который формально отражает распределение рассеивателей по скоростям для опреде-

ленного значения температур ионов и электронов плазмы (см. предыдущий пункт).

Алгоритм, моделирующий сигнал отклика работает следующим образом: после считывания входных данных запускается основной цикл, каждая итерация которого вычисляет единичный отклик модельной ионосферы на зондирующий сигнал. В основном цикле разыгрываются параметры рассеивателей, формируются квадратуры сигнала отклика, вычисляются и суммируются его спектр и автокорреляционная функция. Выходные данные формируются и сохраняются в памяти компьютера в соответствии с форматом данных, используемом на ИРНР. Комплексный сигнал отклика, представленный в виде квадратур, содержится в массивах $a(t)$ и $b(t)$, в которых порядковый номер элемента означает определенный момент времени, прошедший с момента предполагаемого излучения зондирующего импульса. Параметры рассеивателей – сдвиг по частоте и фазе – меняются для каждого сигнала отклика, и содержатся в двумерных массивах, в которых одно измерение представляет диапазон высот от 130 до 1300 км с шагом 0.6 км, а другое измерение представляет порядковый номер рассеивателя для конкретной высоты. Значения начальных фаз (от $-\pi$ градусов до π) разыгрываются с помощью генератора случайных чисел для равномерного распределения вероятностей, а значения частотных сдвигов разыгрываются с помощью генератора случайных чисел для распределения вероятностей соответствующего входному спектру доплеровских сдвигов для определенной высоты.

Основной цикл содержит вложенные циклы, в которых сначала производится суммирование сигналов от отдельных рассеивателей, а затем суммирование результирующих сигналов в массивы $a(t)$ и $b(t)$, в соответствии с временем распространения сигнала от момента излучения до момента приёма. Импульсы, отраженные от каждого рассеивателя в одном слое, складываются друг с другом, образуя сложный многогармонический сигнал с длительностью равной длительности зондирующего импульса:

$$\sum_{i=1}^N \cos((\omega + \omega_i)t + j_i),$$

где ω – угловая несущая частота радара, ω_i и ϕ_i – указанные выше параметры рассеивателей, N – количество рассеивателей в одном слое. Сигнал отклика от каждого слоя имеет задержку, равную удвоенному времени распространения радиоволны от антенны радара до соответствующей высоты. Сигнал, отраженный от рассеивателей, расположенных на одной высоте, накладывается на часть сигнала, отраженного от рассеивателей расположенных на другой высоте, увеличивая длительность результирующего сигнала. С учетом вышесказанного и применением фильтрации нижних частот сигнала, которая в приёмном тракте ИРНР организована аналоговым способом, выражения для квадратур сигнала отклика можно записать следующим образом:

$$a(t) = \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N I_{ik} \cos(\omega_{ik} (t + \frac{2(130 + kdH)}{C}) + \phi_{ik})$$

$$b(t) = \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N I_{ik} \sin(\omega_{ik} (t + \frac{2(130 + kdH)}{C}) + \varphi_{ik})$$

где ω_{ik} и φ_{ik} – элементы двумерных массивов частотных сдвигов и начальных фаз, dH – шаг по высоте, C – скорость света, M – количество рассматриваемых слоев, I – интенсивность сигнала, отраженного от рассеивателя и заданного профилем фарадеевских вариаций (рис. 5).

После формирования одного результирующего сигнала отклика модельной ионосферы вычисляется его спектр с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье. Спектры всех реализаций сигналов отклика суммируются, чтобы получить усредненный спектр и уменьшить статистические вариации, которые в описываемой модели схожи по величине со статистическими вариациями реальных измерений на ИРНР. В результате накопления достаточной статистики можно судить о тех искажениях, которые вносит в спектр НР моделируемый сигнал и среда его распространения.

Моделирование рассеянного сигнала и обсуждение результатов

В простейшем, детерминированном варианте модели случайными задаются лишь фазы рассеивателей, а значения доплеровских сдвигов равномерно распределены на описанном спектре. Результат накопления спектров на 4000 реализаций для 100 рассеивателей в каждом слое представлен на рис. 6. Данные результаты приводятся без учета профиля фарадеевских вариаций.

В другом варианте модели доплеровские частоты также задаются случайно согласно закону распределения, заданному формой теоретического спектра. В таком приближении значения аналитического спектра определяют вероятность того, что рассеиватель будет иметь соответствующую доплеровскую частоту. Результат накопления спектров на 4000 реализаций для 100 рассеивателей в каждом слое представлен на рис. 7. В сравнение с предыдущими спектрами наблюдается явно большая дисперсия. Для того чтобы приблизить форму моделируемого спектра к аналитическому, приходится увеличивать количество рассеивателей, что сказывается на вычислительных объемах. Однако второй вариант является более приближенным к действительности и позволяет рассматривать в предлагаемом методе моделирования задачи, в которых спектр сигнала не детерминируется какой-либо определённой функцией, а задаётся, исходя из некоторых локальных физических соображений, как в модели PIC.

На рис. 6 и 7 сплошной линией обозначен аналитический спектр, штриховыми – полученные в результате моделирования спектры для импульсов длительностей 200, 700 и 900 мкс. Очевидно, что для импульса 200 мкс спектр имеет наибольшую ширину и при свертке со спектром плазмы полностью его «замывает». Для 700 мкс двугорбая форма проявляется отчетливо, и общая мощность спектра выше. Аналогично для спектра, свернутого со спектром импульса 900 мкс.

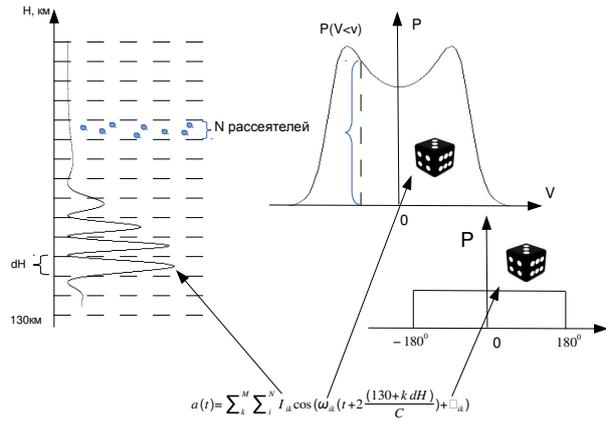


Рис. 5.

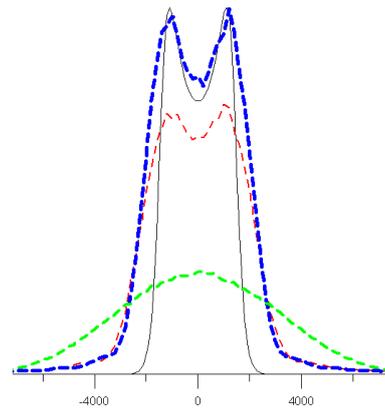


Рис. 6.

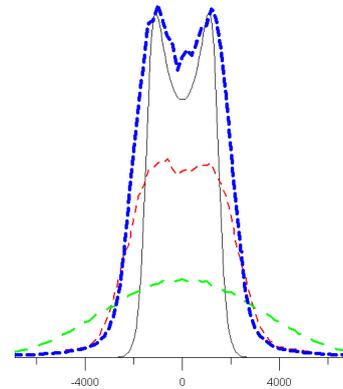


Рис. 7.

Полученный результат очевиден и говорит в первом приближении о правильности используемой модели, поскольку в процессе моделируемого рассеяния происходит свертка аналитического спектра со спектром зондирующего импульса – функцией sinc, а их энергетическое соотношение и относительная ширина зависят от длительности импульса. Положение максимумов спектра должно остаться прежним, а вот его ширина и форма (наклон) горбов несколько изменятся.

Используя теорему Винера-Хинчина, которая говорит о том, что спектр мощности и автокорреляционная функция сигнала взаимосвязаны преобразованием Фурье, можно получить АКФ. Из действительной части АКФ по ее характерным точкам определяются температуры ионов и электронов, а из фазы – скорость дрейфа плазмы (рис. 8, 9).

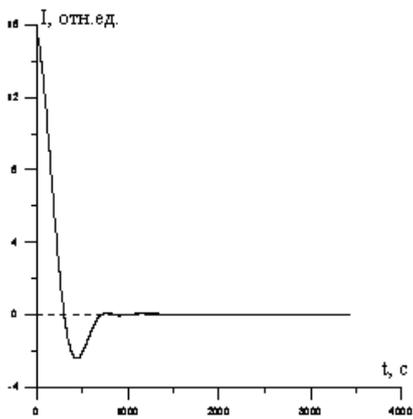


Рис. 8. Действительная часть АКФ.

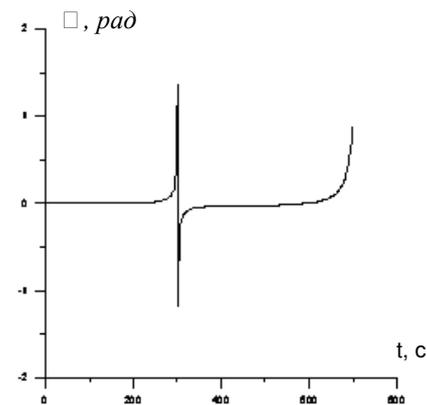


Рис. 9. Фаза АКФ НР.

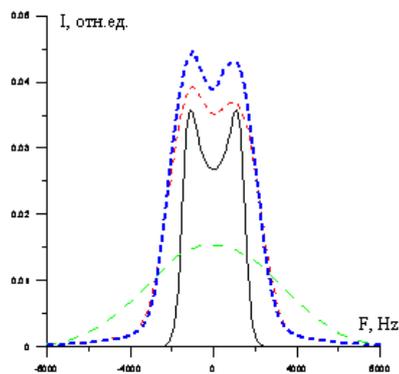
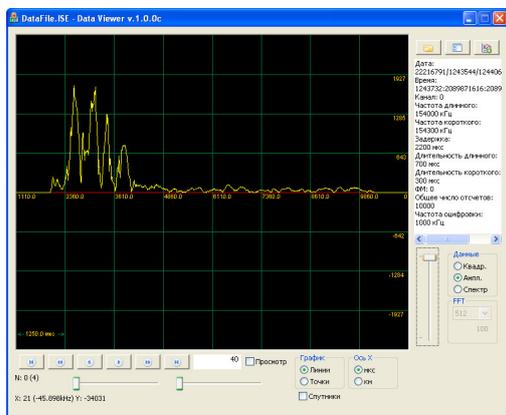


Рис. 10. (сверху) Результат моделирования (мощность сигнала) с учетом эффекта Фарадея на одной реализации. (снизу) Усредненный спектр НР с учетом эффекта Фарадея по 4000 независимых реализаций.

Помимо искажений, вносимых в спектр зондирующим сигналом, значительное влияние на него окажет и профиль фарадеевских вариаций. На рис. 10 изображен результат моделирования ионосферы с использованием рассеивателей, обладающих не равномерными амплитудами по всей высоте, а меняющихся с высотой. Изменение амплитуды рассеяния с высотой описывает некий реальный профиль мощности, полученный на ИРНР и содержащий влияние эффекта Фарадея. Как видно из рис. 10, эффект Фарадея сказывается на форме спектра НР, внося заметную асимметрию в спектр сигнала отклика.

Заключение

Главной задачей, поставленной при моделировании, было исследование искажений спектра НР, вносимых зондирующим импульсом (в зависимости от длительности) и фарадеевским вращением электромагнитной волны. Как видно из приведенных результатов, существует зависимость спектра сигнала отклика от длительности зондирующего сигнала, причем эта зависимость не противоречит основным положениям теории сигналов.

Моделирование сигнала с учетом искажений, вносимых эффектом Фарадея, указывает на существование заметного влияния фарадеевских замираний на спектр сигнала отклика, выражающееся в появлении асимметрии в результирующем спектре. При этом преобразование Фурье от моделируемого сигнала бралось по всей временной развертке. Используя оконное преобразование Фурье, можно более детально исследовать природу таких искажений.

Заложена в предлагаемую модель возможность использовать входные спектры, изменяющиеся с высотой, позволяет проводить исследования влияния фарадеевских вариаций на высотные профили электронных и ионных температур.

При необходимости в модели можно включить нормально-распределенный шум, имитирующий аппаратные и космические шумы. Также в результате накопления можно построить автокорреляционную функцию НР, из которой непосредственно вычисляются параметры ионосферной плазмы. В дальнейшем планируется увеличить размерность моделируемой среды с учетом всех значимых физических процессов, протекающих в ней, а также усовершенствовать модель с помощью метода частиц в ячейках, описанного в статье [Diaz et al., 2008]. Также можно исследовать влияние на сигнал диаграммы направленности антенн радара. Таким образом, возможно конструктивно изучать влияние на спектр НР различных явлений и параметров, как отдельно, так и их различными комбинациями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алсаткин С.С., Медведев А.В., Кушнарв Д.С. Исследование возможности применения сложных сигналов в методе НР путем математического моделирования // Современные проблемы в астрофизике и физике космической плазмы. БШФФ. 2007. С. 72–76.

Шеффилд Дж. Рассеяние электромагнитного излучения в плазме. М.: АТОМИЗДАТ 1978. 129 с.

Шпынев Б.Г. Методы обработки сигналов методом некогерентного рассеяния: Автореферат дис. ... к.ф.-м.н. Иркутск, ИСЗФ СО РАН, 2000. 85 с.

Diaz M.A., Semeter J.L., Oppenheim M., Zettergren M. Particle-in-cell simulation for the incoherent scatter radar spectrum // Radio Science. V. 43.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия