

## ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ СПЕКТРА ЗОНДИРУЮЩЕГО РАДИОИМПУЛЬСА НА ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В МЕТОДЕ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН

### Введение

Метод некогерентного рассеяния (НР) радиоволн [1] охватывает широкий набор радиотехнических подходов и процедур, среди которых важная роль отводится процессам зондирования ионосферы, приема и анализа сигнала рассеяния, и, наконец, выделения из сигнала информации о параметрах среды. Реализуется этот метод путем использования возможностей специализированных радиолокационных установок, объединенных в единую мировую сеть радаров НР и предназначенных для диагностики состояния околоземного космического пространства.

В настоящее время в мире около десяти обсерваторий ведут регулярные исследования ионосферы методом НР, причем одна из них – обсерватория Института ионосферы НАН и МОН Украины [2], уникальному радиолокационному оборудованию которой присвоен статус Национального достояния Украины, – расположена в 60 км от Харькова. Программа научных исследований с использованием этого комплекса основана на проведении радиофизических экспериментов в высотном диапазоне 100 – 1500 км, используя для этих целей 100-метровую зенитную и 25-метровую полноповоротную параболические антенны при мощности передающих устройств в пределах 2,4 – 3,6 МВт и длительности зондирующих импульсов от 40 мкс до 1 мс.

В таких сложных технических системах точность расчета параметров исследуемой среды зависит от множества факторов, одному из которых, связанному с импульсным режимом зондирования ионосферы, посвящена тема данной публикации.

### Анализ состояния вопроса

В методе НР сведения о состоянии ионосферы могут быть получены путем анализа как корреляционных характеристик сигнала рассеяния, так и формы его спектра. Так как информация о сигнале рассеяния заключена в очень узком частотном интервале, то этот факт вызывает необходимость учета всех особенностей зондирования, которые приводят даже к незначительным изменениям этой формы.

Классическая задача о рассеянии радиоволн в плазме формулируется следующим образом [3]. Распространяемая в плазме волна, взаимодействуя с флуктуациями ее плотности, вызывает появление рассеянных волн. При приеме рассеянного сигнала, в характеристики которого вкладываются существенные особенности среды, выбираются методы его обработки, определяемые характеристиками измерительной аппаратуры и методами выделения сведений о параметрах ионосферы. В целом процесс образования этого сигнала описывается при помощи математических выражений (так называемая прямая задача рассеяния), базирующихся, однако, на распространении в плазме лишь плоской монохроматической волны.

Такой режим зондирования, т.е. непрерывное излучение сигнала, применяется в бистатических радиолокационных системах, у которых из-за разнесенных на некоторое расстояние передающей и приемной антенн имеется возможность его реализовать. В случае использования радара НР в составе моностатической (однопозиционной) системы точность расчетов параметров зависит от характеристик сигнала более сложным образом [4]. В [1] акцентируется, что для случая работы радара в импульсном режиме достаточная точность оценки параметров по форме спектра рассеянного сигнала обеспечивается только в том случае, если сам зондирующий импульс имеет соответствующую длину, когда искажения спектра, вносимые фронтами импульса, незначительны.

В [3] выведены общие условия, согласно которым для извлечения большей части информации, содержащейся во флуктуационном спектре  $A(f)$ , ширина спектра импульса не должна превосходить  $1/5$  части спектрального расширения среды. Аналогично, в [4] уточняется, что помимо неискаженных измерений спектра флуктуаций электронной плотности (для случая, когда продолжительность импульса больше временного интервала корреляции процессов в плазме) с целью получения достаточного высотного разрешения зондирующий сигнал, в то же время, должен способствовать правильному отображению высотных изменений плотности электронов, т.е. быть короче диапазона  $\Delta h$ , на котором можно считать линейным закон изменения мощности сигнала рассеяния. Это говорит о том, что режимы излучения зондирующего сигнала, задаваемые его длительностью, должны определяться [2] еще и выотно-временными характеристиками рассеивающей среды.

Так как большинство требований, предъявляемых [2, 4] к зондирующим импульсам как с точки зрения обеспечения монохроматичности излучения, так и с точки зрения обеспечения достаточной разрешающей способности носят противоречивый характер, необходимы усилия по дальнейшему усовершенствованию процедур учета статистических характеристик используемых при излучении сигналов. Для этого на примере работы радара НР Института ионосферы будет проведен анализ статистических характеристик вариантов зондирующих сигналов, которые наиболее часто применяются при импульсном зондировании ионосферы и оптимальны для решения задач своего круга.

Цель работы – анализ степени влияния ширины спектра зондирующего сигнала при импульсном режиме излучения радара НР на форму спектра сигнала рассеяния и последующая модификация процедур расчета ионосферных параметров с учетом этого фактора.

### Результаты расчета спектра зондирующих импульсов

Рассмотрим спектральную диаграмму периодического сигнала, которая характеризует излучаемый зондирующий радиоимпульс. Нас будет интересовать амплитудная диаграмма, позволяющая судить об относительном содержании тех или иных гармоник в спектре.

С помощью процедур моделирования представим излучаемые импульсы в форме отрезков синусоиды частотой  $f_0 = 158 \text{ МГц}$ , состоящих из целого числа периодов (рис. 1, левая верхняя часть). Пусть огибающая этих импульсов будет иметь прямоугольную форму и протяженность  $T_{\text{и}} = 660 \text{ мкс}$ . Частота следования импульсов равна  $24 \text{ Гц}$ . Данный режим излучения радара НР Института ионосферы [2] предназначен, в основном, для исследования ионосферы в диапазоне высот  $300 - 1000 \text{ км}$ . Режим излучения с использованием зондирующих импульсов длительностью  $T_{\text{и}} = 130 \text{ мкс}$  при частоте следования  $77 \text{ Гц}$  предназначен для исследования ионосферы ниже  $400 \text{ км}$ .

На рис. 1 приведены формы рассчитанных линейчатых спектров зондирующих радиоимпульсов для указанных режимов излучения. Ширина спектра основного лепестка по уровню половинной интенсивности в первом случае достигает  $\Delta f_1 = 1,5 \text{ кГц}$ , а во втором случае –  $\Delta f_2 = 7 \text{ кГц}$ .

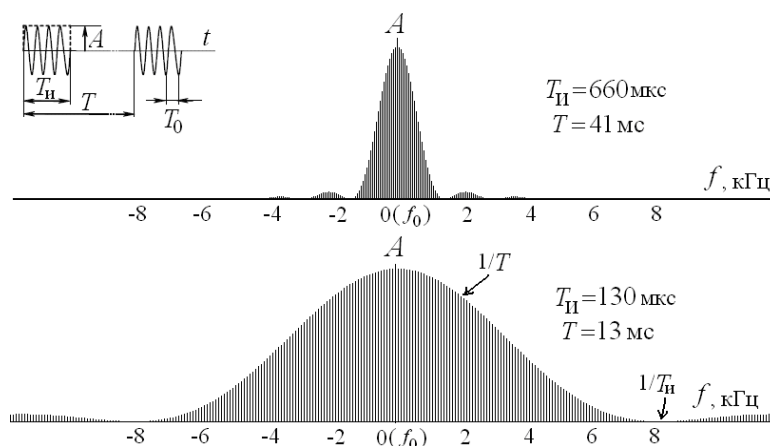


Рис. 1. Амплитудные спектры периодических последовательностей прямоугольных радиоимпульсов разной длительности

Следующий шаг моделирования заключается в анализе диапазона изменения ширины спектра сигнала рассеяния, поступающего с разных высот и полученного в результате процедуры линейной свертки флуктуаций электронной плотности в плазме со спектром зондирующего импульса. Вычисления проводились согласно выражению

$$s(n) = \sum_{m=0}^n a(m) \cdot b(n-m); n = 0 \dots (N + M - 2),$$

где  $a(n)$ ,  $n = 0 \dots N-1$  и  $b(n)$ ,  $n = 0 \dots M-1$  – два дискретных массива соответствующей длительности, описывающие формы рассматриваемых спектров.

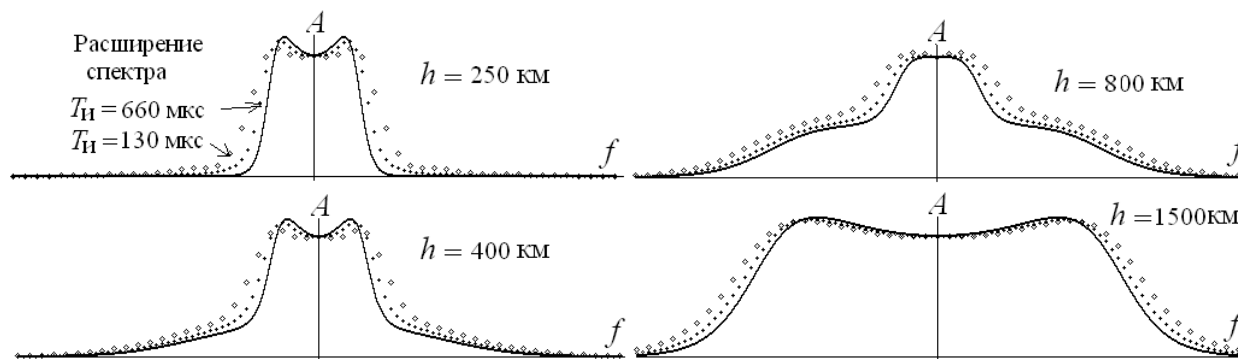


Рис. 2. Примеры расширения спектра сигнала рассеяния

На рис. 2 приведен результат модельного расчета (прямая задача теории рассеяния) некоторых спектральных функций (сплошные линии) флуктуаций плотности частиц плазмы для различных температур и ионного состава ионосферы. Для варианта весенней спокойной ионосферы информация моделировалась по отношению к участкам с центрами на разных высотных уровнях, параметры ионосферной среды на которых приведены ниже в таблице.

Длительность импульса $T_i$ , мкс	$h = 250$ км	$h = 400$ км	$h = 800$ км	$h = 1500$ км
	$T_i = 1000$ К	$T_i = 1000$ К	$T_i = 1500$ К	$T_i = 3000$ К
$T_e = 1000$ К	$T_e = 1500$ К	$T_e = 2000$ К	$T_e = 3000$ К	
$H^+ = 0\%$	$H^+ = 20\%$	$H^+ = 50\%$	$H^+ = 100\%$	
Относительное расширение спектра, %				
660	18	15	10	4
130	42	36	25	10

Для случая применения каждого из режимов излучения была реализована свертка спектра флуктуаций электронной плотности со спектром излучаемого импульса. Результаты этой операции приведены в виде точечных значений. Как можно видеть, влияние зондирующего импульса привело к расширению спектра сигнала рассеяния в зависимости от высоты на относительные значения от 4 до 18 % в одном случае, и от 10 до 42 % – во втором.

### Результаты уточнения расчетов параметров ионосферы при немонохроматичности зондирующего импульса

Измеренная форма энергетического спектра либо корреляционной функции (КФ) сигналов НР является промежуточной характеристикой для оценки параметров ионосферной плазмы. Оценка вектора параметров (обратная задача рассеяния) производится путем сравнения измеренных, к примеру, КФ с набором аналогичных функций, рассчитанных теоретически [5]. Для минимизации расхождения функций в качестве инструмента используется метод наименьших квадратов и покоординатный спуск по каждой составляющей вектора.

Модификация процедур расчета ионосферных параметров с учетом спектральных характеристик зондирующего импульса, используемого при исследовании радаром НР Института ионосферы верхней ионосферы, состояла в следующем.

1. Выполнялась прямая задача рассеяния, которая заключалась в расчете спектров сигнала НР в виде линейной свертки спектра флуктуаций, полученного из теории НР, для всех

реально возможных значений  $T_e$ ,  $T_i$  и ионного состава, со спектром используемого зондирующего сигнала длительностью  $T_n = 660$  мкс.

2. В памяти вычислителя на базе полученных спектров сигнала НР была сформирована библиотека КФ.

3. Процедура определения температур  $T_e$ ,  $T_i$  и  $N^+$  была построена таким образом, чтобы экспериментально полученные в корреляторе радара НР КФ сопоставлялись со всеми элементами библиотеки, и выбирался наилучший вариант совпадения.

Результаты модификации теоретических (библиотечных) спектров и соответствующих им КФ приведены на рис. 3.

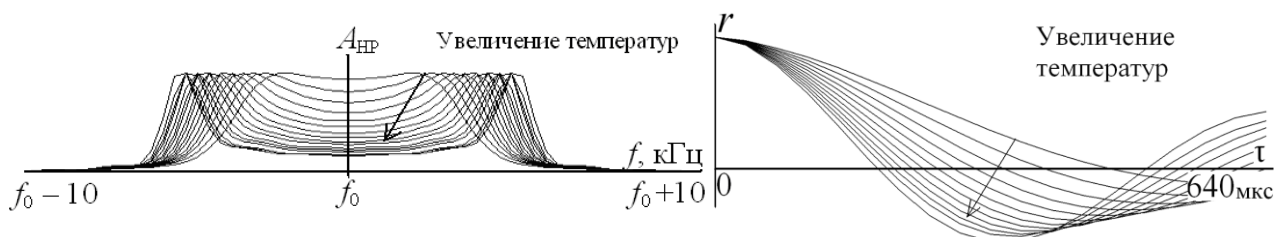


Рис. 3. Библиотечные спектры и КФ сигнала рассеяния после их модификации

### Результаты обработки сигнала НР с учетом ширины спектра зондирующего импульса

Для проверки действенности модифицированных библиотек была произведена обработка КФ (рис. 4) для двух вариантов расчета кинетических температур и ионного состава ионосферной плазмы.

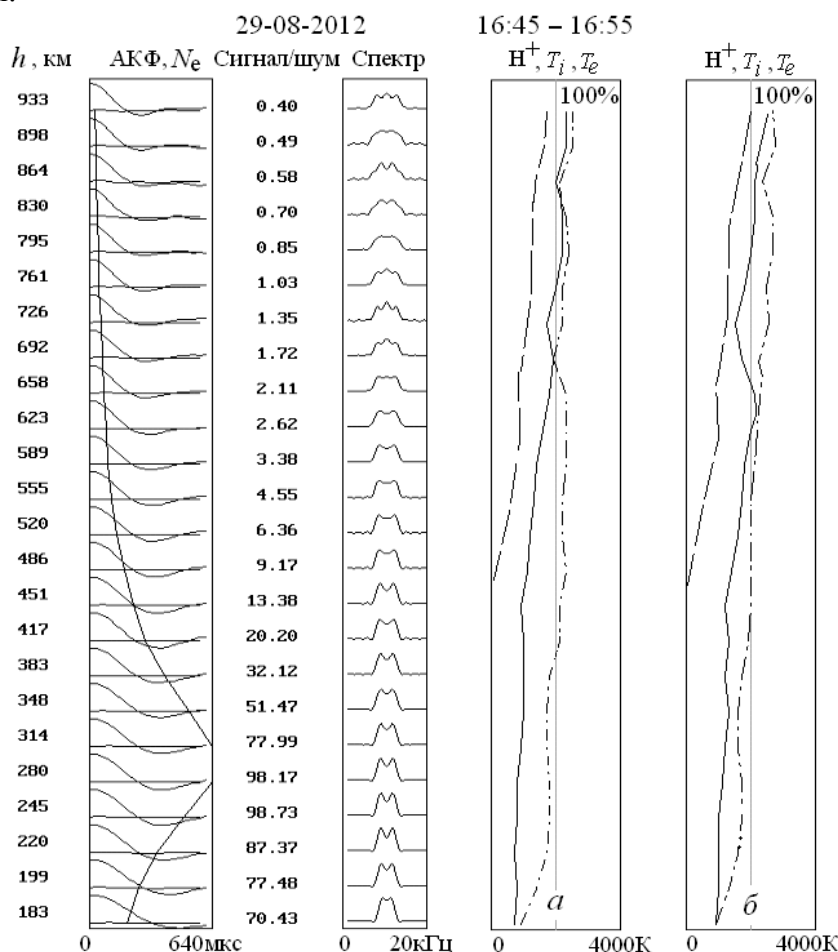


Рис. 4. Результаты сравнительного расчета экспериментальных АКФ, спектров и соответствующих им параметров ионосферы при использовании обычной (а) и модифицированной (б) библиотек

Согласно высотному распределению КФ сигнала НР, полученных 29 августа 2012 г. в 16:50 в одном из сеансов измерений длительностью 10 мин, в первом варианте расчета производился поиск параметров с использованием библиотечных функций до их уточнения (а), и с использованием модифицированных библиотечных функций (б). На панелях (а) и (б) график высотного профиля концентрации ионов водорода показан прерывистой линией, температуры ионов – сплошной, а температуры электронов – штрих-пунктирной.

С помощью приведенных примеров расчета параметров в данном сеансе можно наблюдать общую тенденцию, имеющую место при обработке и сравнении результатов, получаемых с помощью этих двух вариантов библиотечных функций в любых других сеансах, – нахождение по немодифицированной библиотеке заниженных отношений температур  $T_e/T_i$  при увеличенных значениях абсолютных показателей, в основном температур ионов.

Более подробный анализ показывает следующее. Ширина спектра зондирующего импульса не оказывает заметного влияния на точность расчетов такого параметра, как дрейф плазмы (не приведено на рисунке) и концентрация электронов. В это же время значения температур ионов могут иметь приращения до 20 %, а температуры электронов и концентрации ионов водорода – до единиц процентов. С ростом высоты  $h$  из-за увеличивающейся в составе ионосферной плазмы концентрации легких ионов и увеличении кинетических температур собственная ширина спектра сигнала рассеяния увеличивается, что приводит к снижению величины погрешности, так как степень относительного влияния спектра зондирующего импульса уменьшается.

### **Заключение**

Приведены результаты моделирования степени влияния длительности зондирующего импульса на статистические характеристики сигнала рассеяния. Выяснено, что при зондировании ионосферы в метровом диапазоне волн (особенности работы аппаратуры харьковского радара НР) влияние зондирующего импульса на сигнал рассеяния в его режимах излучения заключается в расширении его спектра и появлении погрешностей определения параметров плазмы, даже когда используется достаточно длинный зондирующий импульс. Применение режимов зондирования с импульсом более короткой длительности приводит к появлению погрешностей расчетов параметров более высокого порядка, что свидетельствует о необходимости учета расширения спектра в процессе обработки ионосферной информации. С ростом высоты степень искажения спектра сигнала НР падает и погрешность оценки параметров среды не превосходит единиц процентов.

**Список литературы:** 1. Брюнелли Б. Е. Метод некогерентного рассеяния радиоволн / Б. Е. Брюнелли, М. И. Кочкин, И. Н. Пресняков и др. – Л. : Наука, 1979. – 188 с. 2. Рогожкин Е. В. Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом НР / Е. В. Рогожкин, В. А. Пуляев, В. Н. Лысенко. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2008. – 256 с. 3. Эванс Дж. В. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом НР радиоволн / Дж. В. Эванс // ТИИЭР. – 1976. – Т.57, №4. – С. 139–175. 4. Рогожкин Е. В. Анализ зондирующих сигналов для исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния / Е. В. Рогожкин, А. С. Мазманишвили // Электромагнитные явления. – 1998. – Т.1, №4. – С. 545–551. 5. Пуляев В. А. Определение параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн / В. А. Пуляев, Д. А. Дзюбанов, И. Ф. Домнин. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – 240 с.

*Институт ионосферы НАН и МОН Украины*

*Поступила в редколлегию 15.06.2013*