

## ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ИОНОСФЕРЫ МЕТОДОМ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

### Введение

При исследовании ионосферы методом некогерентного рассеяния (НР) задача определения в одном режиме измерений одновременно двух таких параметров, как АКФ сигнала НР и высотное распределение электронной концентрации  $N_e(h)$ , причем с разрешением порядка десятка километров, решается применением составных зондирующих сигналов. Для случая работы в метровом диапазоне волн такие режимы описаны в [1, 2]. В этом диапазоне интервал корреляции на высотах максимума ионизации и ниже имеет значения  $\tau_k \approx 1$  мс, поэтому задача решается, например, использованием нескольких частотных каналов и выбором соответствующей аппаратуры обработки сигналов [2, 3].

Возросший потенциал ПК по скорости цифровой записи и соответствующего использования цифровых методов фильтрации создает в настоящее время дополнительные информационные возможности, которые, безусловно, можно реализовать для повышения эффективности ионосферных измерений [4].

*Цель исследований* – адаптация существующих цифровых технологий для обработки сигнала НР с тем, чтобы получить приемлемое разрешение по всем измеряемым параметрам в простейшем для передатчика режиме зондирования – при зондировании ионосферы радиоимпульсами с прямоугольной огибающей длительностью которых  $T_{и}$ , которая на действующих радиолокаторах НР обычно выбирается из приблизительного равенства  $T_{и} \cong \tau_k$ .

### Анализ состояния вопроса

Существенная проблема работы с такими импульсами состоит в том, что они не обеспечивают достаточное разрешение при исследованиях высотного распределения электронной концентрации. К тому же на характер измерительных преобразований влияет поведение в пределах импульсного объема априори неизвестной функции  $P(h)$  – высотного распределения мощности сигнала рассеяния [5]. В свою очередь, эти преобразования зависят от алгоритмов, которые используются для определения АКФ сигнала рассеяния. Данные алгоритмы [5, 6] определяют уровень статистической погрешности измерений и высотное разрешение. К сожалению, достижение малой статистической погрешности при их использовании противоречит получению хорошего высотного разрешения.

Если обратиться к традиционной радиолокации, то на начальной стадии ее развития задача разделения двух радиолокационных отметок на экране электронно-лучевой трубки решалась визуально, поэтому вопрос разрешения напрямую увязывался только с длительностью импульса. Позже было установлено [7], что при алгоритмах, обеспечивающих согласованную обработку, решающую роль в разрешении играют спектральные свойства радиолокационного сигнала, а именно – уровень высокочастотных составляющих в спектре зондирующего радиоимпульса.

Теоретически спектральная функция радиоимпульса, имеющего огибающую *идеально* прямоугольной формы, бесконечна, и можно ожидать, что использование импульсов с *крутыми фронтами* и при достаточно широкополосных радиоприемных устройствах

обеспечат лучшее высотное разрешение, чем это определяет общепринятая оценка ширины спектра сигнала, принимаемая за величину  $\Delta f = 1/T_{\text{и}}$ .

Рассмотрим реализацию такой возможности, которая применительно к радиолокаторам НР базируется на цифровой корреляционной обработке принимаемого сигнала.

### Алгоритмы обработки

При НР шаг следования отсчетов  $t_0$  выбирают, исходя из ожидаемого характера поведения АКФ сигнала НР. На основе выбранного значения  $t_0$  и ожидаемого интервала корреляции  $\tau_k$  рассчитывается необходимое количество ординат этой АКФ и выбирается соответствующая длительность зондирующего импульса. Как правило,  $T_{\text{и}} \cong \tau_k$ , а количество измеряемых ординат принимается в пределах  $k = 15 - 20$ . Стандартная обработка решается использованием в радиоприемном устройстве (РПрУ) канала для корреляционных измерений (штатный канал). Полоса пропускания этого канала определяется шириной спектра рассеянного сигнала и длительностью излученного радиоимпульса.

При стандартных методиках ионосферных измерений относительное высотное распределение электронной концентрации привязывают к ее абсолютным значениям в максимуме ионизации, используя, например, данные ионозонда. Как показывают теоретические модели и практика исследований [8], с целью адекватного представления  $N_e(h)$  необходимы измерения функции  $P(h)$  с разрешением в пределах 10 – 30 км.

Очевидным направлением в решении этой задачи является использование короткого импульса как вспомогательного элемента зонда. Однако это влечет использование для него еще одной рабочей частоты [2].

Предлагаемое решение предполагает введение дополнительного широкополосного канала на той же рабочей частоте, а обработку сигнала построить с учетом следующих факторов: форма прямоугольного зондирующего импульса близка к идеальной; период следования отсчетов многократно меньше длительности импульса  $T_{\text{и}}$ . Предполагалось, что на интервале высот  $\Delta H = mct_0/2$  изменения функции  $P(h)$  все еще носят *линейный* характер. Тогда соответствующее этому условию максимальное значение  $m$  способствует получению наилучшего соотношения между статистической погрешностью и допустимой систематической ошибкой измерений.

Высота $h_i$											
	$h_8$										
	$h_7$										
$h_6$											
$h_5$											
$h_4$											
$h_3$											
$h_2$											
$h_1$											
	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	Номер отсчёта $S_i$					

Покажем, что именно то обстоятельство, что период следования отсчетов  $t_0$  многократно меньше длительности идеально прямоугольного зондирующего радиоимпульса, позволяет при работе с импульсом длительностью  $T_{\text{и}}$  и для *нелинейного* профиля мощности  $P(h)$  получать высотное разрешение лучшее, чем  $cT_{\text{и}}/2$ . Для этого поступающие в канал отсчеты синхронизируются с отсчетами в корреляционном канале и выбираются с кратным шагом:  $m = 2, 3, 4, \dots$ . При таком техническом решении можно улучшить высотное разрешение без ухудшения соотношения сигнал/шум.

Рассмотрим, как происходит рассеяние радиоимпульса на пространственных неоднородностях плотности электронов, полагая для простоты рассуждений, что в широкополосном канале соблюдается кратность, равная  $m = 4$ , т.е. что  $T_{\text{и}} = 4t_0$ . На рисунке иллюстрируется эффект продвижения такого зонда в ионосфере.

Можно видеть, что каждому отсчету соответствует положение зонда на конкретном интервале высот. При достаточно широкой полосе пропускания РПрУ квадрат  $S_i$  каждого принятого сигнала соответствует оценке мощности сигнала НР от всего интервала протяженностью  $cT_{\text{и}}/2$ . На рисунке это отображено сменой положения затемненных фрагментов по высоте.

Последовательность отсчетов  $S_i$  отражает процесс высотного перемещения зондирующего сигнала. Каждый последующий отсчет фиксирует смещение зонда по высоте на интервал  $\Delta h = h_{i+1} - h_i = ct_0/2$ . Этот факт дает основание считать, что в широкополосном канале сигналы поступают от условно выделенных высотных элементов, имеющих размеры  $\Delta h$  порядка десятки километров. Это существенно больше дебаевского радиуса, поэтому рассеянный на них сигнал в силу специфики некогерентного рассеяния можно представить как суперпозицию статистически независимых составляющих.

Вследствие того, что мощность, фиксируемая при приеме, равна сумме мощностей  $P_i$  от каждого высотного элемента, то это означает, что каждый из элементов  $S_i$  можно выразить в виде  $S_i = P_i + P_{i+1} + P_{i+2} + P_{i+3}$ .

Используя такое представление для случая, изображенного на рисунке, составим систему уравнений в следующей конфигурации:

$$\begin{cases} P_7 + P_6 + P_5 + P_4 = S_4, \\ P_6 + P_5 + P_4 + P_3 = S_3, \\ P_5 + P_4 + P_3 + P_2 = S_2, \\ P_4 + P_3 + P_2 + P_1 = S_1. \end{cases} \quad (1)$$

В этой системе каждое  $P_i$  есть значение функции  $P(h_i)$ , которая на выделенном интервале, задаваемом двойной длительностью зондирующего радиоимпульса, уже может описать нелинейный закон высотного распределения мощности сигнала рассеяния.

Полагаем, что на любом достаточно коротком интервале эту функцию можно представить в виде полинома. Как показывает практика ионосферных измерений [8], на интервале порядка 100 км высотное распределение мощности вполне удовлетворительно описывается полиномом третьей степени

$$P(h) = a_0 + a_1h + a_2h^2 + a_3h^3. \quad (2)$$

Так как полоса пропускания согласована с длительностью условно выделенных элементов, то значения  $P_i$  связаны между собой только функциональной зависимостью  $P(h)$ . В ней значения  $h_i$  известны для всех высотных интервалов, а значит, после подстановки

получаем систему линейных уравнений [9] относительно неизвестных  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  и  $a_3$  в виде (3).

Привлекая стандартные методы решения подобных систем, рассчитываем все ее неизвестные, а затем с помощью полинома (2) вычисляем профиль  $P(h)$  на заданном отрезке высотной шкалы.

$$\begin{cases} 4a_0 + a_1 \sum_{i=1}^7 h_i + a_2 \sum_{i=1}^7 h_i^2 + a_3 \sum_{i=1}^7 h_i^3 = S_4, \\ 4a_0 + a_1 \sum_{i=1}^6 h_i + a_2 \sum_{i=1}^6 h_i^2 + a_3 \sum_{i=1}^6 h_i^3 = S_3, \\ 4a_0 + a_1 \sum_{i=1}^5 h_i + a_2 \sum_{i=1}^5 h_i^2 + a_3 \sum_{i=1}^5 h_i^3 = S_2, \\ 4a_0 + a_1 \sum_{i=1}^4 h_i + a_2 \sum_{i=1}^4 h_i^2 + a_3 \sum_{i=1}^4 h_i^3 = S_1. \end{cases} \quad (3)$$

Отметим еще два аспекта. При цифровом представлении сигнала дополнительные возможности по привлечению цифровых методов фильтрации позволяют и в корреляционном канале на каждом высотном интервале добиваться максимально возможного соотношения сигнал/шум. Это существенно повышает качество ионосферных измерений, особенно если учесть, что ширина спектра рассеяния меняется в зависимости от ионного состава. Она монотонно увеличивается с высотой: примерно в четыре раза вдоль интервала 100 – 1000 км. Применяв цифровую фильтрацию, на фоне уменьшающейся концентрации электронов можно поднять высотный диапазон ионосферных исследований, отодвинув тот момент, когда соотношение сигнал/шум по мощности снизится до значений меньше 0,1. Кроме того, результаты решения системы (3) позволяют корректировать те измерительные преобразования, которые возникают как следствие импульсного зондирования и существенно затрудняют интерпретацию измеренной АКФ сигнала НР.

## Выводы

Разработанный вариант цифровой обработки сигнала при зондировании ионосферы методом НР дает возможность ввести в обработку полиномы, описывающие распределение мощности в пределах рассеивающего объема. Это представляет возможность при интерпретации АКФ учитывать те измерительные преобразования, которые являются следствием использования радиоимпульсов длительностью  $T_{\text{и}} \cong \tau_k$ . Расчет и использование функции  $P(h)$  позволяют получить разрешение  $\Delta h$  не хуже 25 – 35 км, к тому же по отношению ко всему исследуемому интервалу высот она может быть представлена совокупностью согласованных по высоте полиномов, каждый из которых привязан к конкретной высотной области.

**Список литературы:** 1. Рогожкин, Е.В., Мазманишвили, А.С. Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом НР 1. Структурные особенности // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. – 1999. – Вып. 31. – С. 54–60. 2. Рогожкин, Е.В., Пуляев, В.А., Лысенко, В.Н. Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом НР. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2008. – 256 с. 3. Zamlutti, C.J., Farley, D.T. Incoherent scatter multiple-pulse measurements // Radio Sci. – 1969. – v. 4, No 10. – p. 935–953. 4. Пуляев, В.О., Рогожкин, Э.В., Богомаз, О.В. Обчислювальні процедури при аналізі НР в іоносферній плазмі : монографія. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – 272 с. 5. Рогожкин, Е.В. Измерение параметров ионосферной плазмы по АКФ сигнала НР // Ионосферные исследования. № 27. – М. : Высш. шк., 1979. – С. 46–59. 6. Белозеров, Д.П., Пуляев, В.А., Рогожкин, Е.В. Использование имитаторов для отладки алгоритмического обеспечения радиолокаторов НР // Радиоэлектроника и информатика. – Харьков : ХНУРЭ, 2009. – №27. 7. Вудворд, Ф.М. Теория вероятностей и теория

информации с применением в радиолокации ; пер. с англ. ; под ред. Г.С. Горелика. – М. : Сов. Радио, 1995. – 312 с.

8. *Evans, J.V., Loewental, M.* Ionospheric backscatter observations // Planet. Spase Sci. – 1964. – V.12. – P. 915–944. 9. *Пуляев, В.О., Рогожкін, Є.В.* Спосіб відновлення висотного профілю потужності сигналу НР // Патент України на корисну модель № 112018. 2016. Бюл. № 22.

*Институт ионосферы НАН Украины и МОН Украины*

*Поступила в редколлегию 09.10.2016*