

А.В. ФИСУН (г. Харьков)

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗМЕРЕННЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ НЕКОГЕРЕНТНО РАССЕЯННОГО СИГНАЛА

У статті приведена процедура відновлення і поліпшення розрахунку висотного розрізнення параметрів іоносфери, одержаних за вимірними кореляційними функціями (КФ) некогерентно розсіяного сигналу. Показано, що завдання по експериментальному перетворенню КФ в реальну залежність від функції висоти теплових варіацій електронної концентрації може бути зведено до рішення рівняння Вольтерри першого роду.

In this article the procedure renews and improvement of height solution the parameters ionosphere, got from the correlation functions (CF) of incoherent scatter signal is resulted. It is shown that the task of experimental transformation of CF in the real dependence of function height variation of thermal vibrations of electron closeness can be reduced to the solution of equation the Volterra the first kind.

Метод некогерентного рассеяния (НР) позволяет получить большое число параметров ионосферы, таких как электронная концентрация $N_e(h)$, ионная и электронная температуры ($T_e(h)$, $T_i(h)$), ионный состав $\nu(h)$. Измерения производятся в широком диапазоне высот (100 - 1500 км). Для определения ионосферных параметров на высотах максимума F -области (400 - 500 км) и ниже применяются серии последовательностей коротких зондирующих радиоимпульсов или сигналы со сложными видами кодирования. Для получения ионосферных данных на высотах внешней ионосферы обычно применяются простые зондирующие радиоимпульсы (ПЗРИ) большой длительности ($T_{si} = 0,5 - 2$ мс). Однако, при этом значительно ухудшается разрешающая способность по высоте $\left(\Delta H = \frac{cT_{si}}{2} \right)$.

Например, при длительности зондирующего импульса $T_{si} = 0,8$ мс будет $\Delta H = 120$ км, что недостаточно точно для определения параметров нижней ионосферы.

Цель данной работы – восстановить измеренные высотно-временные зависимости корреляционных функций НР сигнала, полученные с недостаточным разрешением из-за зондирующих импульсов большой длительности.

Рассмотрим интегральное уравнение, полученное по методике, приведенной в [1], которое связывает измеренные значения высотного профиля КФ НР сигнала $R_{IS}(t, \tau_k)$ с ковариационной функцией тепловых флуктуаций электронной плотности $\rho_{TF}(h, \tau_k)$ ионосферной среды и

параметрами устройств радара НР:

$$R_{IS}(t_a, \tau) = \int_0^{ct_a/2} R(h, 0) \int_{t_a-t_S}^{t_a} U\left(x - \frac{2h}{c}\right) \cdot \gamma(x) \cdot g(t_a - x) \times \\ \times \int_{t_a+\tau-t_S}^{t_a+\tau} U\left(y - \frac{2h}{c}\right) \cdot \gamma(y) \cdot \rho_{TF}(x - y, h) \cdot g(t_a + \tau - y) dx dy dh. \quad (1)$$

Здесь $R(0, h) = P_{ini}(h)$ – неискажённый профиль мощности НР сигнала, $h = \frac{ct}{2}$, c – скорость света; $U(t)$ – огибающая зондирующего импульса, нормированная к максимальному значению; $\gamma(x)$ – функция неравномерности (например, характеристика восстановления антенных коммутаторов); $g(t)$ – импульсная характеристика приёмного канала, которая имеет длительность t_S . Ширина полосы пропускания приёмного канала выбирается из условия возможности определения вариаций ионного состава на высотах 450 - 1500 км. Из-за этого она в несколько раз превышает спектральную плотность мощности НР сигнала, принятого с высот, которые лежат в области максимума электронной концентрации и ниже. В этом случае импульсную характеристику $g(t)$ можно заменить дельта-функцией Дирака $\delta(t)$.

Тогда из выражение (1) получим формулу, близкую к приведенной в [3]:

$$R_{IS}(t, \tau) = \gamma(t) \cdot \gamma(t + \tau) \cdot \int_0^{\infty} F\left(t - \frac{2h}{c}, \tau\right) \cdot P_{ini}(h) \cdot \rho_{TF}(t, h) dh. \quad (2)$$

Здесь

$$F\left(t - \frac{2h}{c}, \tau\right) = \begin{cases} U\left(t - \frac{2h}{c}\right) \cdot U\left(t + \tau - \frac{2h}{c}\right), & \text{при } \frac{c \cdot (t + \tau - T_{si})}{2} \leq h \leq \frac{ct}{2}, \\ 0, & \text{при } h < \frac{c \cdot (t + \tau - T_{si})}{2}, \quad h > \frac{ct}{2}. \end{cases} \quad (3)$$

Положим $\gamma(t) = 1$. Выражение (2) представляет свёртку функции (3) с КФ $R_{ini}(h, \tau) = P_{ini}(h) \cdot \rho_{TF}(h, t)$. Оно может быть представлено интегральным уравнением Вольтерры I рода типа свёртки [2]. Из выражения (2) при $\tau = 0$ видно, что измеренная мощность НР сигнала – это результат свёртки огибающей ПЗРИ с истинным высотным профилем рассеянной мощности.

Задачей измерений методом НР является определение КФ НР сигнала и

расчет по ней характеристик ионосферной плазмы, таких, как $N_e(h)$, $T_e(h)$, $T_i(h)$ и др. Преобразуем уравнение (2) в уравнение второго рода, которое может гарантировать устойчивое решение методом последовательных приближений. Продифференцируем уравнение (2) по времени t , учитывая, что в соответствии с (3), нижний предел интегрирования равен $c \cdot \frac{(t + \tau - T_{is})}{2}$,

а верхний будет $\frac{ct}{2}$:

$$R'(t, \tau) = \frac{c}{2} \cdot U(0) \cdot U(t) \cdot P_{ini} \left(\frac{ct}{2} \right) \cdot \rho_{TF} \left(\frac{ct}{2}, t \right) - \frac{c}{2} \cdot U(T_{si} - t) \cdot U(T_{si}) \times \\ \times \rho_{TF} \left(\frac{c \cdot (t + t - T_{si})}{2}, t \right) + \int_{c(t+t-T_{si})/2}^{ct/2} \frac{\partial \left(F \left(t - \frac{2h}{c}, t \right) \cdot P_{ini}(h) \cdot \rho_{TF}(h, t) dh \right)}{\partial t}.$$

(4)

Если ПЗРИ имеет прямоугольную огибающую, т.е. $U(t) = \text{const}$ при $0 \leq t \leq T_{si}$ и $U(t) = 0$ при $t < 0$, $t > T_{si}$, то выведенная интегральная формула значительно упрощается:

$$R'(t, \tau) = P_{ini}(t) \cdot \rho_{TF}(t, \tau) - P_{ini}(t + \tau - T_{si}) \cdot \rho_{TF}(t + \tau - T_{si}, \tau).$$

(5)

Здесь учитывается, что $h = \frac{ct}{2}$. Из выражения (5) получен итерационный алгоритм решения выражения (2) в соответствии с каждым высотным профилем $R_{ini}(h, t)$ при $\tau = \tau_k$:

$$R_{ini_n}(t + \tau - T_{si}) = \lambda_{n-1} R_{ini_{n-1}}(t, \tau) - R'(t, \tau),$$

(6)

где λ_{n-1} – коэффициент соразмерности между $R'(t, \tau)$ и первой производной, которая рассчитывается по формуле (6) для $(n-1)$ -го приближения.

В соответствии с выражением (6) разработан итерационный алгоритм восстановления. В качестве нулевого приближения берётся измеренная высотная зависимость (или временная, т.к. высота $h = \frac{ct}{2}$). Итерационный процесс продолжается до максимального приближения коэффициента λ к единице.

Проведено моделирование погрешности восстановления параметров ионосферы для 22.03.07 г, 22.06.07 г, 22.12.07 г (12-00) и 22.12.07 г (06-30). Результаты работы алгоритма восстановления приведены на рис. 1, а - е и рис. 2, а - е. Исходные параметры ионосферы рассчитаны по международной справочной модели *IRI-95*.

На рисунках показаны среднеквадратичные погрешности измерения нормированной КФ $dr(h)$ и электронной концентрации $dN_e(h)$, относительной погрешности электронной $dT_e(h)$ и ионной $dT_i(h)$ температур, рассчитанных по КФ. На рис. 1, б, рис. 1, д, рис. 2, б, рис. 2, д (тонкая линия – исходное значение, толстая – восстановленное) приведены восстановленные высотные зависимости электронной концентрации $N_e(h)$ и температур заряженных частиц. Как видно из рис. 1, а - е и рис. 2, а - е предложенный метод восстановления хорошо работает на высотах от 160 км и выше. Было проведено моделирование для различного времени суток и времен года.

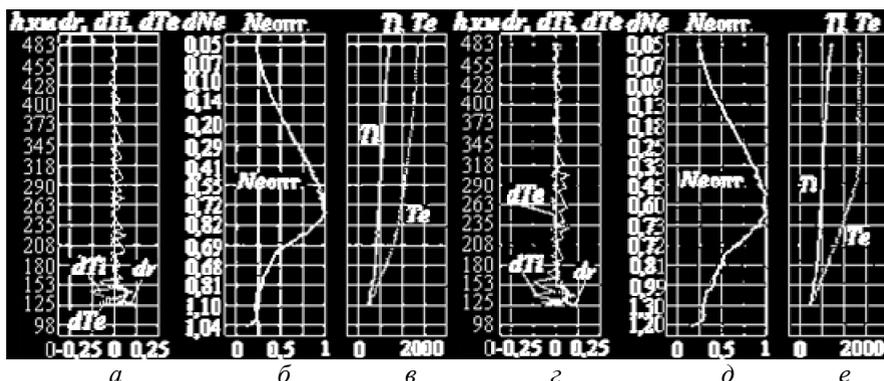


Рис. 1. Результаты моделирования восстановления измеренных высотных профилей КФ 22.03.07г и 22.06.07г (полдень)

На рис. 2, а - в и рис. 2, г - е видно, что параметры, рассчитанные в один день с разницей в пять половиной часов, сильно различаются.

Ниже 150 км в ряде случаев появляются значительные ошибки (более 10 %) из-за появляющейся вычислительной погрешности и отсутствия измеренных данных вследствие влияния бланкирования приемного канала на время действия зондирующего радиоимпульса.

Обсуждение результатов моделирования. Для разного времени дня и дат погрешности измерения отличаются между собой. Максимальных по абсолютной величине значений (0,25 - 0,5) они достигают в области высот, где электронная концентрация и температуры заряженных частиц

имеют большой высотный градиент. На высотах более 700 км, где эти параметры изменяются медленно, ошибка не превышает 0,02 - 0,07.

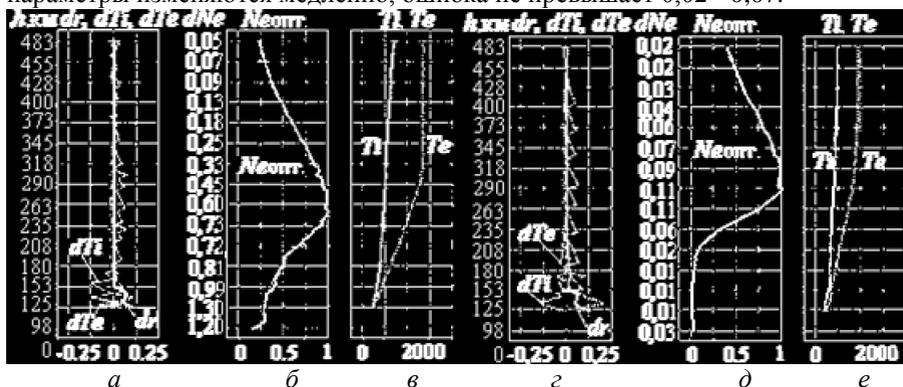


Рис. 2. Результаты моделирования восстановления измеренных высотных профилей КФ 22.09.07 г (полдень), 22.12.07 г (06-30)

Выводы. Рассмотренный метод восстановления измеренных высотных профилей КФ позволяет улучшить высотное разрешение в области максимума электронной концентрации и ниже его (со 120 км до 4,5...10 км), при зондировании ионосферы импульсами длительностью 0,8 мс. Метод особенно полезен для одновременного измерения параметров ионосферы в широком диапазоне высот при наблюдениях ионосферных бурь и солнечных затмений.

Список литературы: 1. Лысенко В.Н. Динамические искажения некогерентно рассеянного сигнала // Ионосфера. Республиканский межведомственный науч.-техн. сборник 1991.– Вып. 1.– С.102-110. 2. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы.– К.: Наукова думка, 1986.– 544 с. 3. Лысенко В.Н., Дзюбанов Д.А., Боговский В. К. Повышение высотного разрешения электронной концентрации, ионной и электронной температур, полученных методом некогерентного рассеяния. Труды XX всероссийской научной конференции “Распространение радиоволн” 2002. – С.50-51.

Поступила в редколлегию 30.05.08

А.Л. ХАРЧЕНКО, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ» (г. Харьков),
Е. А. ЧМУТОВА, Т.А. КУНАХ, НТУ «ХПИ» (г. Харьков)

МЕТОДЫ АППАРАТУРНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА СЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ

У статті наведений порівняльний аналіз відомих методів вимірювання оцінок спектральної щільності потужності випадкових сигналів (класичних і кореляційно-фільтрового), аналіз основ (структур, принципів) побудови відомих цифрових фільтрових аналізаторів спектру, обґрунтування напрямів, приватних завдань і методів досліджень.

This article covers known methods (classic and filter-correlation) of random signals spectral density measuring estimations comparative analysis, analysis of known digital filter spectrum analyzer construction basics (both structure and working principles), justification of research course, private tasks and research methods.

Постановка проблеми. Спектральная плотность мощности (СПМ) является одной из наиболее распространенных характеристик в практике спектрального анализа случайных сигналов в различных областях науки и техники. Поэтому методы и средства измерения оценки СПМ (или спектрального анализа) всегда привлекали широкое внимание исследователей и разработчиков, и в настоящее время выделились в самостоятельный вид измерений, называемый аппаратным спектральным анализом.

Цель статьи кратко рассмотреть суть методов аппаратного спектрального анализа, а затем провести их сравнительный анализ.

Под аппаратным спектральным анализом понимают экспериментальный анализ спектров сигналов, при котором определяют одну или несколько спектральных характеристик случайных сигналов [1]. Одной из важнейших таких характеристик является спектральная плотность мощности, а при аппаратном анализе - её оценка.

Известные методы аппаратного спектрального анализа могут быть сведены в пять взаимосвязанных групп [2,3,4]:

- метод, основанный на временном усреднении квадрата фильтрованной реализации исследуемого случайного сигнала $x(t)$ или так называемый «фильтровый метод»;
- метод, использующий усеченное преобразование Фурье оценки корреляционной функции реализации случайного сигнала;
- метод, использующий усреднение коэффициентов Фурье реализации случайного сигнала по частотам;