

## **Восстановление импульсной характеристики и передаточной функции ионосферного радиоканала по данным зондирования непрерывным ЛЧМ-сигналом**

С.Н. Пономарчук<sup>1</sup>, Н.В. Ильин<sup>1</sup>, В.И. Куркин<sup>1</sup>, Г.В. Шабеганов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН

664033, г. Иркутск, ул.Лермонтова, 126А.

E-mail: [spon@iszf.irk.ru](mailto:spon@iszf.irk.ru), [ilyin@iszf.irk.ru](mailto:ilyin@iszf.irk.ru), [kurkin@iszf.irk.ru](mailto:kurkin@iszf.irk.ru), [schabaganov@list.ru](mailto:schabaganov@list.ru)

*Представлен метод вычисления импульсной характеристики и передаточной функции ионосферного радиоканала по реализациям квадратурных компонент регистрируемого коротковолнового радиосигнала с непрерывной линейно-частотной модуляцией. Используется быстрое преобразование Фурье. Изложена схема построения ионограмм на основе вычисления спектров огибающих импульсов – произведений реализации на движущееся временное окно. Предложена схема удаления сосредоточенных помех на основе анализа передаточной функции радиоканала. Фоновые и атмосферные помехи удаляются путем вычитания ионограмм, построенным для положительных и отрицательных частот. Приведены результаты восстановления ионограммы, импульсной характеристики и передаточной функции радиоканала для вертикального зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ- сигналом. Ключевые слова: радиоканал, линейно-частотно модулированный сигнал, передаточная функция, импульсная характеристика, квадратурные компоненты.*

## **Reconstruction of the impulse response and transfer function of the ionospheric radio channel using continuous chirp signal sounding data**

S.N. Ponomarchuk<sup>1</sup>, N.V. Ilyin<sup>1</sup>, V.I. Kurkin<sup>1</sup>, G.V. Shabaganov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS.

*The paper presents a method for reconstructing the impulse response and transfer function of the ionospheric radio channel. The approach is based on realizations of quadrature components of a recorded HF signal with continuous linear frequency modulation. The fast Fourier transform is used. A scheme for constructing ionograms is described, utilizing the spectra of pulse envelopes calculated via multiplication of the signal realization by a moving time window. A technique for suppressing concentrated interference is proposed, based on the analysis of the radio channel transfer function. Background and atmospheric noise are eliminated by subtracting ionograms constructed for positive and negative frequencies. The paper also presents the results of reconstructing the ionogram, impulse response, and transfer function for vertical sounding of the ionosphere using a continuous chirp signal.*

*Keywords: radio channel, linear frequency modulated signal, transfer function, impulse response, quadrature components*

### **Введение**

Первостепенной задачей для диагностики ионосферного радиоканала является выделение его импульсной характеристики и передаточной функции. В данной работе приведена численная схема восстановления импульсной характеристики и передаточной функции по реализациям регистрируемых квадратурных компонент коротковолнового линейно-частотно модулированного (ЛЧМ) сигнала [1-3]. Приведена схема построения ионограммы ЛЧМ-зондирования и способ фильтрации данных и удаления сосредоточенных помех.

### Восстановление импульсной характеристики и передаточной функции

Если на вход линейного стационарного радиоканала поступает сигнал  $u_0(t)$ , то сигнал на выходе радиоканала определяется интегралом Дюамеля [4]:

$$u(t) = \int_0^{\infty} h(z) u_0(t-z) dz. \quad (1)$$

Здесь  $h(z)$  – импульсная характеристика системы, равная отклику системы на  $\delta$ -функцию. Нижний предел в (1) можно заменить на  $-\infty$ , так как  $h(z) = 0$  при  $z < 0$  в силу принципа причинности.

Передаточная функция системы  $H(\omega)$  выражается через импульсную характеристику  $h(z)$ :

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(z) e^{-i\omega z} dz. \quad (2)$$

Тогда для  $h(z)$  формально имеем:

$$h(z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) e^{i\omega z} d\omega. \quad (3)$$

Излучаемый сигнал имеет вид непрерывного ЛЧМ-сигнала [2]:

$$u_0(t) = a_0(t) \cos\left(\omega_0 t + \frac{\beta t^2}{2}\right) = \operatorname{Re}\left\{a_0(t) e^{i(\omega_0 t + \beta t^2 / 2)}\right\}. \quad (4)$$

Продолжительность сеанса вертикального зондирования меньше 1 минуты. При регистрации непрерывного ЛЧМ методом сжатия по частоте, принятый сигнал умножается на опорный сигнал того же вида и фильтруется полосовым фильтром. Полоса фильтра выбирается из следующих соображений: частота сигнала непрерывно растет, и сигнал прошедший канал отстает по частоте от сигнала опорного на величину  $\beta\tau$ , где  $\tau$  – задержка сигнала, поэтому полоса должна вмещать все интересующие нас задержки. Средняя частота полосы анализа является промежуточной частотой, а колебание на промежуточной частоте имеет две низкочастотные квадратурные компоненты, которые и регистрируются. Обозначим их  $a(t)$  и  $b(t)$ .

Сигнал на выходе полосового фильтра имеет вид:

$$u(t) = a(t) \cos\left(\omega_0 t + \frac{\beta t^2}{2}\right) - b(t) \sin\left(\omega_0 t + \frac{\beta t^2}{2}\right) = \operatorname{Re}\left\{[a(t) + ib(t)] e^{i(\omega_0 t + \beta t^2 / 2)}\right\}. \quad (5)$$

Подставляя выражение для излучаемого сигнала (4) в экспоненциальной форме в формулу (1), получим

$$\begin{aligned} u(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} h(z) u_0(t-z) dz = \int_{-\infty}^{\infty} h(z) a_0(t-z) \exp\left\{i\left[\omega_0(t-z) + \frac{\beta(t-z)^2}{2}\right]\right\} dz = \\ &= e^{i(\omega_0 t + \beta t^2 / 2)} \int_{-\infty}^{\infty} h(z) a_0(t-z) e^{i\beta z^2 / 2} e^{-i(\omega_0 + \beta t)z} dz \end{aligned} \quad (6)$$

Сравнивая выражение (6) с (5), получим выражение для комплексной огибающей сигнала  $c(t) = a(t) + ib(t)$ :

$$c(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(z) a_0(t-z) e^{i\beta z^2 / 2} e^{-i(\omega_0 + \beta t)z} dz. \quad (7)$$

Амплитудный множитель  $a_0(t-z)$ , обычно считают равным единице:  $a_0(t-z) = 1$ . Тогда выражение (7) фактически есть Фурье-образ функции

$$h_1(z) = h(z)e^{i\beta z^2/2}, \quad (8)$$

отличающейся от импульсного отклика  $h(z)$  множителем с квадратичной фазой.

Запишем выражение (7) в виде:

$$c(p) = \int_{-\infty}^{\infty} h_1(z) e^{-ipz} dz, \quad (9)$$

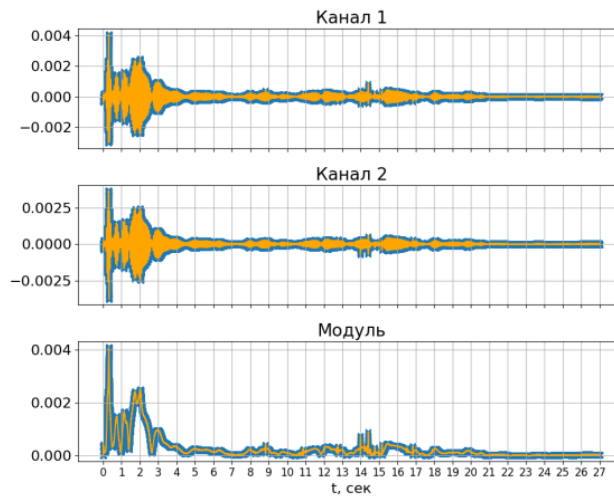
где  $p = \omega_0 + \beta t$ . Тогда из (8) получим

$$h_1(z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} c(p) e^{ipz} dp. \quad (10)$$

Таким образом, обратное преобразование Фурье  $F^{-1}[c(p)]$  дает функцию  $h_1(z)$ . Умножая ее на  $e^{-i\beta z^2/2}$ , получим импульсную характеристику  $h(z)$ . Выполнив прямое преобразование Фурье  $F[h(z)]$  (выражение (2)), получим передаточную функцию  $H(\omega)$ :

$$H(\omega) = \int_0^{\infty} h_1(z) e^{-i\beta z^2/2} e^{-i\omega z} dz. \quad (11)$$

На рис.1 приведены графики квадратурных компонент  $a(t)$ ,  $b(t)$  и модуля огибающей  $c(t)$  для радиосигнала, отраженного от ионосферы при вертикальном зондировании.



**Рис. 1. Квадратурные компоненты  $a(t)$  (канал 1),  $b(t)$  (канал 2) и модуль  $|c(t)|$  ЛЧМ-сигнала вертикального зондирования**

На рис. 2 приведен график импульсной характеристики  $h(z)$ , восстановленной согласно выражений (8) и (10) из реализации огибающей радиосигнала  $c(p)$ , используя быстрое преобразование Фурье. На рис. 3 приведены графики вещественной, мнимой частей и модуля передаточной функции  $H(\omega)$ . Из сравнения рис. 1 и рис.3 видно, что зависимости  $c(p)$  и  $H(\omega)$  практически совпадают, кроме частотных интервалов, содержащих сосредоточенные помехи, которые "сжимаются" множителем  $e^{-i\beta z^2/2}$  в выражении (11) и имеют уровень, превышающий уровень других составляющих радиосигнала.

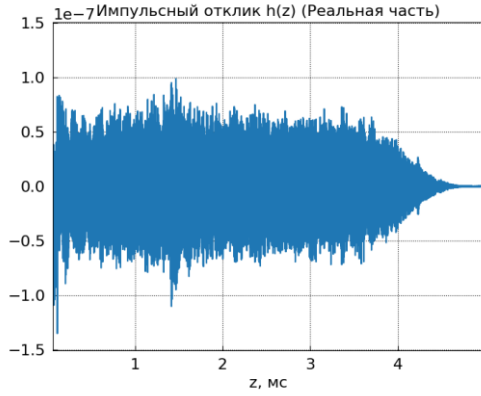


Рис. 2. Импульсная характеристика  $h(z)$

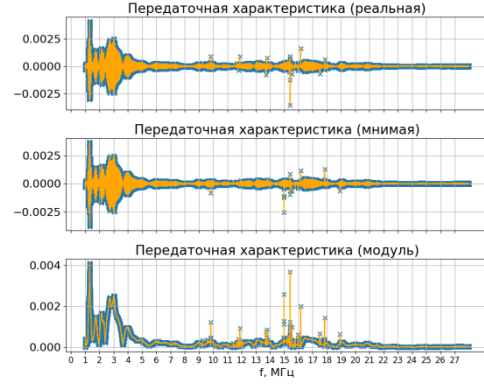


Рис. 3. Реальная, мнимая части и модуль передаточной функции  $H(\omega)$

### Построение ионограммы вертикального зондирования

Ионограмма ЛЧМ-зондирования строится на основе вычисления модуля спектра отрезка реализации ЛЧМ-сигнала, вырезанного временным окном  $W(t - t_k)$ . Выражение для вычисления спектра, образуемого комплексно-сопряженной огибающей  $c^*(t)$ , для момента времени  $t_k$  имеет вид [5]:

$$S_k^+(t_k, \Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} c^*(t) W(t - t_k) e^{-i\Omega t} dt. \quad (12)$$

Спектр  $S_k^+(t_k, \Omega)$  в основном сосредоточен в области положительных частот  $\Omega$ . Спектр  $S_k^-(t_k, \Omega)$ , образуемый реализацией  $c(t)$ , в основном сосредоточен в области отрицательных частот. Выполняются соотношения:

$$S_k^{+*}(t_k, -\Omega) = S_k^-(t_k, \Omega). \quad (13)$$

В качестве временного окна выбирается окно Ханна

$$W(t) = \begin{cases} \sin^2\left(\frac{\pi t}{T}\right), & t \in (0, T) \\ 0, & t \notin (0, T) \end{cases}, \quad (14)$$

которое можно использовать в разложении единицы:

$$\sum_k W(t - kT/2) = 1. \quad (15)$$

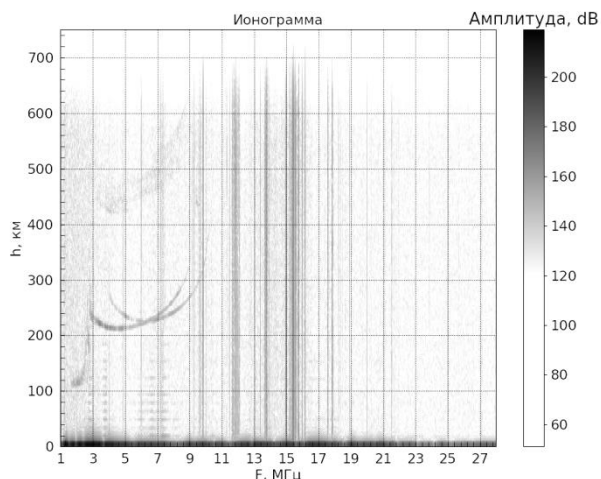
Вычисляя спектры сигналов  $S_k^+(t_k, \Omega)$  в точках  $t_k = kT/2, k = 0, N$  по формуле (12) получим ионограмму ВЗ в области положительных частот  $\Omega$ . Используется быстрое преобразование Фурье. Вычисление спектров  $S_k^-(t_k, \Omega)$  дает ионограмму ВЗ в области отрицательных частот  $\Omega$ .

На рис. 4 приведена ионограмма ВЗ в области положительных частот  $\Omega$ . На рис. 5 ионограмма – в области отрицательных частот  $\Omega$ . По вертикальной оси отложено абсолютное значение групповой задержки сигнала  $\tau = \Omega/\beta$ , переведенное в действующую высоту отражения  $h' = c\tau/2$ , где  $c$  – скорость света. По горизонтальной оси – частота излучения  $f_k = (\omega_0 + \beta t_k)/(2\pi)$ . Видно, что на ионограмме ВЗ для положительных частот  $\Omega$  присутствуют как отраженные от слоев ионосферы сигналы, так и помехи, включая сосредоточенные. На ионограмме для отрицательной области

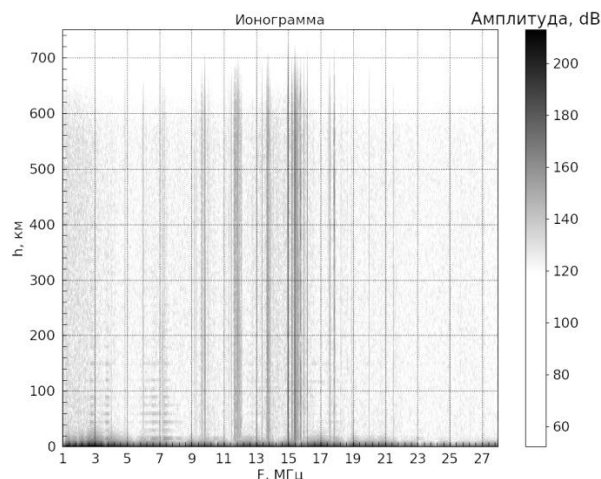
частот  $\Omega$  присутствуют только помехи, что позволяет построить в первом приближении ионограмму, очищенную от помех, путем вычитания ионограмм:

$$|S_k(t_k, \Omega)| = |S_k^+(t_k, \Omega)| - |S_k^-(t_k, \Omega)|. \quad (16)$$

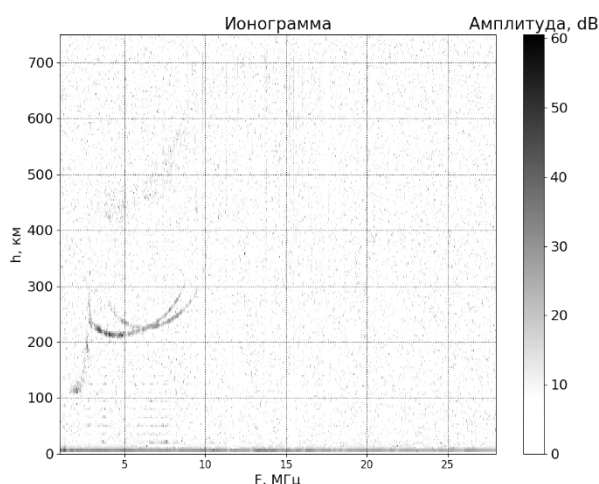
На рис. 6 приведена ионограмма ВЗ, очищенная от помех.



**Рис. 4. Ионограмма ВЗ в области положительных частот  $\Omega$**



**Рис. 5. Ионограмма ВЗ в области отрицательных частот  $\Omega$**



**Рис. 6. Ионограмма ВЗ**

### **Фильтрация и удаление сосредоточенных помех**

Предложенная процедура вычитания спектров по формуле (15) не позволяет удалять все помехи, включая сосредоточенные. В первую очередь, это касается низкочастотных (по  $\Omega$ ) помех, которые присутствуют на ионограммах для положительных частот  $\Omega$  в нижней части (рис.4 и рис. 6). Природа появления таких помех в реализациях квадратурных компонент ЛЧМ-сигнала может быть связана как с техническими, так и с физическими причинами. Для удаления помех предлагается предварительно проводить фильтрацию комплексной огибающей регистрируемого ЛЧМ-сигнала с целью удаления низкочастотной составляющей.

Далее, сосредоточенные помехи предпочтительнее и точнее удалять, используя частотную развертку модуля передаточной функции ионосферного канала  $H(\omega)$ , путем вырезания частотных интервалов, содержащих помеху. Вырезанные значения можно заполнять нулями или проводить интерполяцию между соседними частотами.

Для фильтрации низкочастотной составляющей в реализации комплексной огибающей  $c(t)$  используется фильтр с окном Кайзера. На рис. 7 приведены графики квадратурных компонент  $a(t)$ ,  $b(t)$  и модуля огибающей  $c(t)$  после фильтрации. Видно, что значения огибающих уменьшились примерно в пять раз. Результат вычисления импульсной характеристики  $h(z)$  по фильтрованной комплексной огибающей  $c(t)$  приведен на рис. 8. Результаты расчета передаточной функции  $H(\omega)$  по фильтрованной  $c(t)$  с удаленными сосредоточенными помехами приведен на рис. 9.

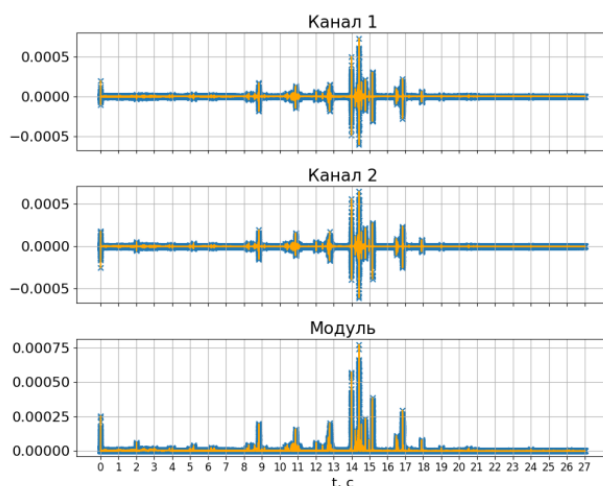


Рис. 7. Квадратурные компоненты  $a(t)$  (канал 1),  $b(t)$  (канал 2) и модуль  $|c(t)|$  ЛЧМ-сигнала после фильтрации

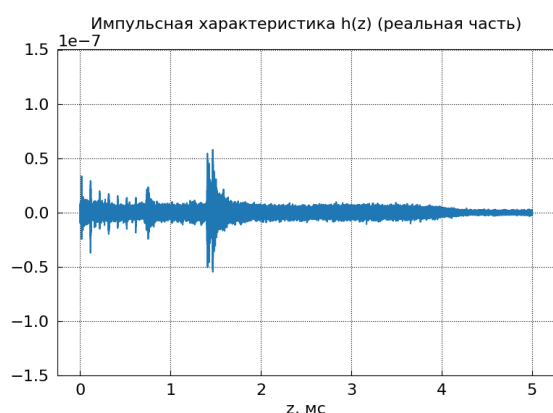


Рис. 8. Импульсная характеристика  $h(z)$



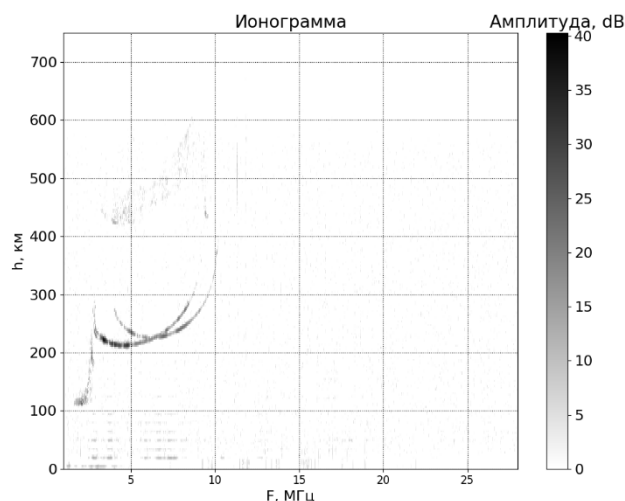
Рис. 9. Реальная, мнимая части и модуль передаточной функции  $H(\omega)$

Далее, для построения ионограмм ВЗ на основе вычисления спектров  $S_k^+(t_k, \Omega)$  и  $S_k^-(t_k, \Omega)$  необходимо восстановить комплексную огибающую ЛЧМ-сигнала по схеме:

$$H(\omega) \rightarrow h(z) \rightarrow h_1(z) \rightarrow c(t).$$

Итоговый результат вычитания спектров по формуле (13) приведен на рис. 10.

Так как передаточная функция практически совпадает с реализацией ЛЧМ-сигнала, поэтому можно вычислять спектры  $S_k^\pm(t_k, \Omega)$  по  $H(\omega)$  вместо  $c(t)$ .



**Рис. 10. Ионограмма ВЗ после очистки от помех**

### **Выводы**

Представлен метод вычисления импульсной характеристики и передаточной функции ионосферного радиоканала по реализациям квадратурных компонент регистрируемого коротковолнового ЛЧМ-сигнала. Используется быстрое преобразование Фурье. Изложена схема построения ионограмм на основе вычисления спектра отрезка реализации ЛЧМ-сигнала, вырезанного временным окном. Предложена схема удаления сосредоточенных помех на основе анализа передаточной функции радиоканала. Фоновые и атмосферные помехи удаляются путем фильтрации данных и вычитания ионограмм, построенным для положительных и отрицательных частот. Приведены результаты восстановления ионограммы, импульсной характеристики и передаточной функции радиоканала для вертикального зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (субсидия №075-ГЗ/Ц3569/278; проект 10.1.7, тема 91.2).*

### **Литература**

1. Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И., Березовский В.А., Киселев А.М., Петухов Е.В. Многофункциональный ЛЧМ – ионозонд для мониторинга ионосферы // Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 4. С. 24–31.
2. Подлесный А. В., Лебедев В. П., Ильин Н. В., Хахинов В. В. Реализация метода восстановления передаточной функции ионосферного радиоканала по результатам зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ – сигналом // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т. 19. № 1. С.63–70.
3. Kurkin V.I., Medvedeva I.V., Podlesnyi A.V. Effect of sudden stratosphere warming on characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances in the Asian region of Russia // Advances in Space Research. 2024. V.73. №.7. P. 3613-3623.
4. Левин Б.Р. Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике. – М.: Наука, 1980. 304 с.
5. Михайлов С.Я. Ионозонд с линейной частотной модуляцией радиосигнала как измеритель импульсной характеристики и передаточной функции радиоканала // Изв. Вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 12. С.933-944.