

## **Исследование импульсных характеристик трансионосферного радиоканала**

Д. В. Иванов, В. А. Иванов, Н. В. Рябова, М. И. Рябова, А. А. Кислицын

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Поволжский государственный технологический университет» пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, 424000, KislitsinAA@volgatech.net*

*Рассматривается задача построения и исследования импульсных характеристик трансионосферных радиоканалов. Приведено описание программной реализации построения импульсных характеристик и представлены характерные формы спектров сигнала для различных случаев частотной дисперсии.*

*The problem of the construction and study of the impulse responses transionospheric of radio channels. The description of the software implementation of the construction of the impulse responses, and presented characteristic signal shape of the spectra for various frequency dispersion*

### **Введение**

В современных космических системах связи и в радиолокации широкое применение нашли широкополосные и сверхширокополосные сигналы [1-2]. Особенности их использования является высокая пропускная способность каналов, высокая разрешающая способность по дальности, а также обеспечение более высокой помехоустойчивости систем радиосвязи. Также для диапазона данных радиоволн актуальной является проблема расширения полосы частот применяемых в системах связи и радиолокации радиосигналов, которая, однако, наталкивается на недостаточно изученную научную проблему их дисперсионных искажений при трансионосферном распространении. Данную проблему необходимо рассматривать в рамках развиваемого в настоящее время подхода, в котором процесс распространения в среде радиосигналов заменяется на прохождение ими эквивалентной многомерной линейной системы. Такие системы описываются в частотной области частотной (ЧХ) и дисперсионной (ДХ) характеристиками, а во временной – импульсной характеристикой (ИХ) [3]. Для повышения эффективности работы космических систем требуется проведение комплексных исследований трансионосферного радиоканала в различных частотных диапазонах при различных состояниях околоземного космического пространства. Такие исследования важны для развития физики распространения радиосигналов при трансионосферном зондировании.

Методики и результаты исследования ЧХ и ДХ трансионосферного радиоканала подробно изложены в работах [4–7], поэтому в настоящей статье акцентируем внимание на исследование и оценку ИХ.

**Цель работы** – является оценка влияния частотной дисперсии на искажения сигналов в трансионосферном радиоканале на основе исследования импульсных характеристик. Реализация поставленной цели достигается на основе решения следующих задач:

- выбор аппаратно-программных средств для исследования;
- рассмотрение методики расчёта импульсной характеристики;
- анализ результатов импульсных характеристик трансионосферного радиоканала.

### Программно-аппаратный комплекс для исследования

На рис. 1 представлена структурная схема комплекса для задач мониторинга, исследования и измерений основных параметров трансионосферного радиоканала с использованием спутниковых навигационных систем. Для получения исходных данных использовалось радионавигационное оборудование фирмы NovAtel, а также параметры существующих космических систем связи. Программная реализация для решения поставленной задачи осуществляется в среде программирования NI LabVIEW 12.0. Сущность работы комплекса заключается в следующем: на вход приёмника поступает сигналы со спутников (1), принимаемые антенной (2). В радиочастотном блоке приёмника (3) выполняется преобразование входного радиочастотного сигнала в сигнал промежуточной частоты. Также в РЧ-блоке отфильтровываются возможные помехи. В цифровом блоке приёмника преобразованный усиленный сигнал оцифровывается и в дальнейшем обрабатывается персональным компьютером (4).

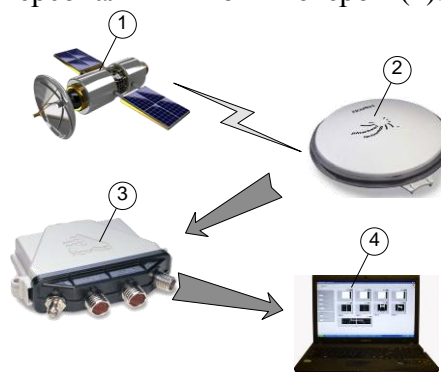


Рис. 1. Структурная схема системы (1 – базовая станция ГЛОНАСС/GPS; 2 – антенна NovAtel GPS-702 GG; 3 – навигационный приёмник NovAtel FlexPak-V2; 4 – вычислительный блок)

### Методика исследования импульсных характеристик

На первом этапе определяются параметры дисперсии различных порядков путем представления фазового сдвига сигнала в виде разложения в ряд Тейлора [5].

$$\begin{aligned} \varphi(\omega, t) &= \varphi(\bar{\omega}, t) + \varphi'_\omega \cdot \Omega + \varphi''_\omega \cdot \frac{\Omega^2}{2!} + \varphi'''_\omega \cdot \frac{\Omega^3}{3!} + \dots = \beta_0 + \beta_1 \cdot \Omega + \frac{1}{2} \beta_2 \cdot \Omega^2 + \frac{1}{6} \beta_3 \cdot \Omega^3 + \dots = \\ &= \varphi(\bar{f}) + 2\pi\tau_{g|_0} \cdot (f - \bar{f}) + \pi s_{|_0} (f - \bar{f})^2 + \frac{\pi}{3} v_{|_0} (f - \bar{f})^3 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  и  $\tau_{g|_0}, s_{|_0}, v_{|_0}$  – параметры фазовой частотной дисперсии первого, второго и третьего порядка, соответственно,  $\Omega = 2\pi f = \omega - \bar{\omega} \leq \Omega_c$ .

Следующим шагом, в зависимости от учёта коэффициентов разложения, выражаются параметры дисперсии различных порядков. При этом дисперсия первого порядка равна времени группового запаздывания и называется дисперсией групповой задержки.

Для случая высокочастотного приближения (ВЧ) определяется следующим выражением:

$$\tau(f) = \frac{2\pi \cdot z}{c} + 4 \cdot \pi \frac{40,32 \cdot N_t}{c \cdot f^2} \quad (2)$$

Параметр нелинейной частотной дисперсии второго порядка равен наклону  $s(f)$  кривой  $\tau(f)$ , для ВЧ приближения запишется следующим образом:

$$s(f) = \frac{d\tau}{df} = -8 \cdot \pi \frac{40,32 \cdot N_t}{c \cdot f^3} \quad (3)$$

Параметр дисперсии третьего порядка – вогнутость  $v(f)$  кривой  $\tau(f)$ :

$$v(f) = \frac{d^2\tau}{d^2f} = 24 \cdot \pi \frac{40,32 \cdot N_t}{c \cdot f^4} \quad (4)$$

Для случая дисперсии второго порядка, вводится понятие полосы когерентности радиоканала. Расчет полосы когерентности для случая ВЧ-приближения выражается следующим образом.

$$\Delta f_k = \frac{2}{\sqrt{\pi |s(f)|}} = \sqrt{\frac{cf_p^3}{2\pi^2 \cdot 40,32 N_t}} \quad (5)$$

Для расчёта необходимых параметров следует провести вычисление значений полного электронного содержания ионосферы. При проведении измерений ПЭС по данным зондирования сигналами навигационных систем ГЛОНАСС/GPS, учитываются как несущие частоты, так и их коды модуляции (псевдодалномерные измерения) [8].

Далее проводится оценка полосы сигнала с полосой когерентности. При этом основным требованием является ограничение полосы передаваемых сигналов относительно полосы когерентности ( $F_p < F_k$ ). Когда предельная полоса частот сигнала превышает частоту полосы когерентности, фазочастотная характеристика канала становится частотно-зависимой и можно судить о наличии искажений. Характер данных искажений можно оценить по результатам построенных спектров сигналов для случаев с линейной и нелинейной частотной дисперсией.

### Результаты эксперимента

Исследования проводились для спутниковой системы Global Star на несущей частоте 1600 МГц и ширине спектра 1250 кГц для различных случаев частотной дисперсии с учётом:

- только линейных слагаемых фазы (случай без частотной дисперсии),  $z0(\alpha)$ ;
- чисто кубической нелинейной составляющей фазы с учетом линейных слагаемых,  $y(\alpha)$ ;
- квадратичной нелинейной составляющей фазы с учетом линейных слагаемых (случай линейной частотной дисперсии),  $u0(\alpha)$ ;
- нелинейной составляющей фазы с учетом линейных слагаемых (случай нелинейной частотной дисперсии),  $w0(\alpha)$ ;

На рис. 2-5 приведены результаты построения импульсных характеристик для различных сезонов, при соответствующих значениях наклона и параметра нелинейности для заданной рабочей частоты.

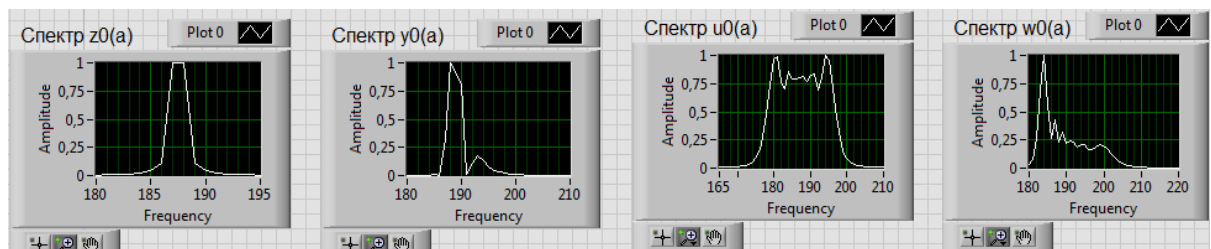
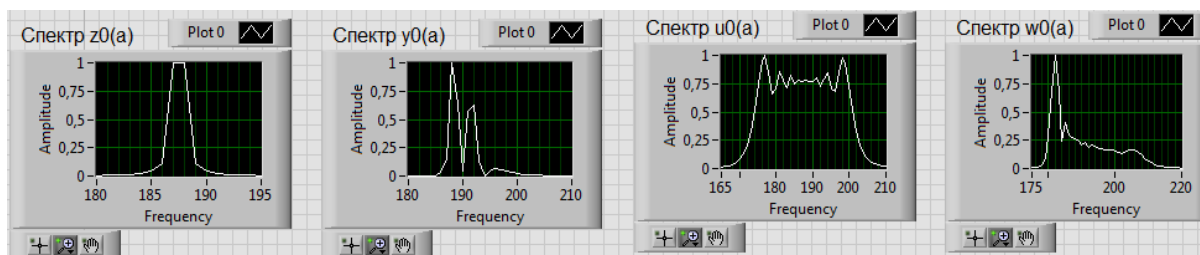
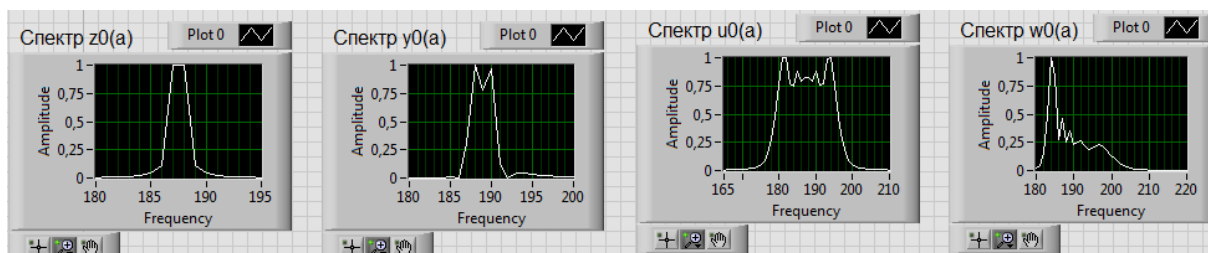


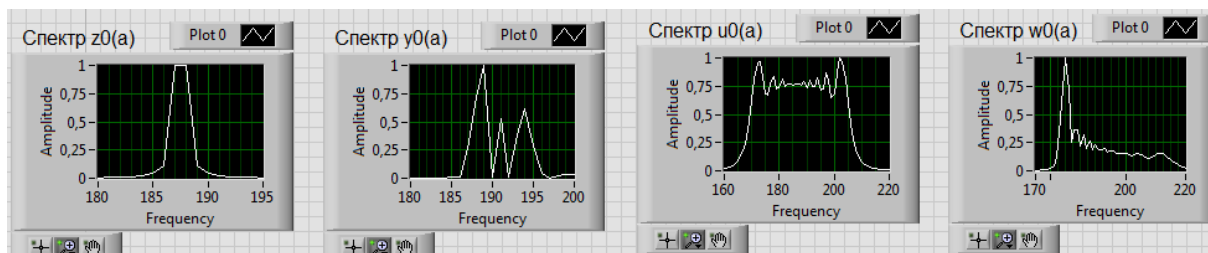
Рис.2. Результаты построения импульсных характеристик (лето (июнь);  $s=0,0014$  мкс/МГц,  $v=2,611$  мкс/МГц<sup>2</sup>)



**Рис.3. Результаты построения импульсных характеристик (осень (ноябрь);  $s=0,00198$  мкс/МГц,  $\nu=3,722$  мкс/МГц<sup>2</sup>)**



**Рис.4. Результаты построения импульсных характеристик (зима (январь);  $s=0,00126$  мкс/МГц,  $\nu=2,353$  мкс/МГц<sup>2</sup>)**



**Рис.5. Результаты построения импульсных характеристик (весна (март);  $s=0,0026$  мкс/МГц,  $\nu=4,88$  мкс/МГц<sup>2</sup>)**

Анализируя полученные результаты можно сделать следующие выводы: при отсутствии влияния частотной дисперсии импульс сигнала для всех сезонов одинаковый (Спектр  $z_0(\alpha)$ ); добавление в составляющую сигнала параметра нелинейности приводит к изменению формы импульса и для каждого сезона ИХ сигнала приобретает своеобразный вид; при учёте квадратических и кубических слагаемых фазы (влияние линейной и нелинейной частотной дисперсии) происходит изменение формы ИХ, а именно её расширение (форма пьедестала). Причем одновременное увеличение параметров наклона и вогнутости, расширяет форму ИХ (случай для осеннего и весеннего периодов).

### Заключение

Представлена методика для исследования и построения импульсных характеристик трансионосферных радиоканалов. Получены результаты построения импульсных характеристик для спутниковой системы Global Star. Установлено, что при учете линейной и нелинейной частотной дисперсии происходит изменение и искажение формы ИХ.

## Литература

1. Иванов, Д.В. Методы и математические модели исследования распространения в ионосфере сложных декаметровых сигналов и коррекции их дисперсионных искажений: монография / Д.В. Иванов. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. – 268 с.
2. Арманд, Н. А. Коррекция дисперсионных искажений широкополосных сигналов / Н. А. Арманд, В. А. Иванов // Распространение радиоволн: сборник докладов XXI Всероссийской научной конференции. В 2-х т.: Т 1. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. – С. 20-18.
3. Иванов, В. А. Дисперсионные искажения системных характеристик широкополосных ионосферных радиоканалов: монография / В. А. Иванов, Д. В. Иванов, Н. Н. Михеева, М. И. Рябова – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2015. – 156 с.
4. Иванов, Д. В. Исследование дисперсионных искажений радиосигналов при трансionoсферном зондировании / Д.В. Иванов, В. А. Иванов, Н. В. Рябова, М. И. Рябова, А. А. Кислицын / Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике: Материалы V Всероссийской научной конференции (Муром, 29.06.-01.07.2015 г.) (V Всероссийские Армандовские чтения) [Электронный ресурс] – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2014. –С. 87-91.
5. Иванов, В. А. Влияние частотной дисперсии на распространение сигналов при трансionoсферном зондировании / В. А. Иванов, Н. В. Рябова, М. И. Рябова, А. А. Кислицын // Материалы XV Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций»(ПТиТТ-2014). – Казань. – 2014. – С. 136-139.
6. Иванов, В.А. Определение параметров частотной дисперсии по данным трансionoсферного зондирования / В.А. Иванов, Н.В. Рябова, М.И. Рябова, А.А. Кислицын // «Труды ПГТУ. Сер.: «Технологическая». – 2014. – Вып. 2. – С. 82-86.
7. Иванов Д. В., Иванов В. А., Рябова М. И., Михеева Н. Н., Катков Е. В. Искажения широкополосного радиосигнала в ионосфере, вызванные нелинейной частотной дисперсией // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы, 2013. № 2(18). С. 5-15.
8. Ясюкевич Ю. В., Мыльникова А. А., Демьянов В.В., Иванов В. А., Рябова Н. В., Зуев А. В., Рябова М.И., Кислицын А. А. Суточная динамика вертикального полного электронного содержания над городами Иркутск и Йошкар-Ола по данным GPS/ГЛОНАСС и модели IRI-2012 // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы, 2013. № 3(19). С. 18-29.