

Исследование влияния факторов нелинейности дисперсионной характеристики на искажения импульсных характеристик широкополосных ионосферных радиоканалов

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

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

Представлены результаты исследования формы импульсной характеристики ионосферных радиоканалов в случае нелинейной дисперсии среды. Получено общее решение задачи распространения в такой среде различных сигналов с расширенным спектром при учете их согласованной обработки. Рассмотрены причины неопределенности связи производной $\tau = d\varphi/d\omega$ с искаженным дисперсией сигналом.

The results of the study form the impulse response of ionospheric radio channels in the case of nonlinear dispersion medium were presented. A general solution to the problem of sharing in such an environment different spread spectrum signals with regard to their consistent handling was recieved. The causes of uncertainty due to the distorted dispersion derivative $\tau = d\varphi/d\omega$ signal were considered.

Введение.

В настоящее время для современных систем высокочастотной связи (ВЧ) особенно актуальной является проблема расширения полосы частот радиосигналов, которая, непосредственно связана с другой неизученной до конца научной проблемой дисперсионных искажений [1]. Существующую проблему необходимо рассматривать в рамках развиваемого, особенно в последнее время, подхода, в котором задача распространения в среде радиосигналов заменяется на задачу прохождения им эквивалентной многомерной линейной системы с одним (в случае узкополосных систем) или многими (в случае широкополосных систем) выходами. Такие системы описываются в частотной области частотной (ЧХ) и дисперсионной (ДХ) характеристиками, а во временной – импульсной характеристикой (ИХ). Основной задачей в этом случае является исследование проблемы влияния частотной дисперсии на вид ДХ, ЧХ и ИХ широкополосных радиоканалов, с различными средними частотами из полосы прозрачности радиолинии [2].

Цель работы: исследование факторов нелинейности дисперсионной характеристики и влияния этих факторов на искажения импульсных характеристик различных ионосферных радиоканалов и широкополосных сигналов с различными видами модуляции с учетом их сжатия при обработке.

Импульсная характеристика радиоканала.

Искажения огибающей импульсной характеристики (ИХ) в случае регулярной линейной дисперсии рассмотрены в работах [3-5]. Влияние нелинейной дисперсии на ИХ ранее не рассматривалось. Поэтому обратимся к этой задаче. Будем исследовать ИХ $h(\tau)$ радиоканала, образованного k - лучами с суммарной частотной характеристикой $H(f)$:

$$h(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f) \cdot \exp\{i2\pi f\tau\} df = \sum_{k=1}^K \int_{\bar{f}-B/2}^{\bar{f}+B/2} H_{0k}(f) \cdot \exp\{-i\varphi_k(f)\} \exp\{i2\pi f\tau\} df = \sum_{k=1}^K h_k(\tau) \quad (1)$$

Рассмотрим влияние нелинейной регулярной составляющей ФЧХ на отдельное слагаемое (1), которое имеет вид:

$$h_k(\tau) = \int_{\bar{f}-B/2}^{\bar{f}+B/2} H_{0k}(f) \exp\left\{-i\left(\bar{\varphi}_{kp}(\bar{f}) + 2\pi\bar{\tau}_{kp}(\bar{f})(f-\bar{f}) + \pi\bar{s}_k(\bar{f})(f-\bar{f})^2 + \frac{\pi}{3}v_k(\bar{f})(f-\bar{f})^3\right)\right\} \exp\{i2\pi f\tau\} df \quad (2)$$

Для дальнейших преобразований введем обозначения:

$$a = \frac{\pi}{3}v_k(\bar{f}), \quad b = \pi s_k(\bar{f}), \quad c = 2\pi\bar{\tau}_{kp}(\bar{f}), \quad d = \bar{\varphi}_{kp}(\bar{f}), \quad (3)$$

а в интеграле (2) выполним замены переменных $z = (f - \bar{f})$ и $y = z - \frac{b}{3a}$. Кроме того, будем считать, что в полосе радиоканала амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) $H_{0k}(f)$ является почти постоянной, т.е. $H_{0k}(f) \approx H_{0k}(\bar{f})$.

Учитывая сделанные замечания, формулу (2) приведем к виду:

$$h_k(\tau) = H_{0k}(\bar{f}) \exp\left\{i\left(\frac{bc}{3a} - \frac{2b^3}{27a^2} - d + 2\pi\left(\bar{f} - \frac{b}{3a}\right)\tau\right)\right\} \times \left\{ \int_{y_1}^{\infty} \exp\left\{i\left(ay^3 + \left(c - \frac{b^2}{3a} - 2\pi\tau\right)y\right)\right\} dy - \int_{y_2}^{\infty} \exp\left\{i\left(ay^3 + \left(c - \frac{b^2}{3a} - 2\pi\tau\right)y\right)\right\} dy \right\}. \quad (4)$$

Выразим интегралы, входящие в (4), через неполную функцию Эйри, используя данные работ [6-8]:

$$Ai(u; t) = \frac{1}{2\pi} \int_t^{\infty} \exp\left\{i\left(\frac{x^3}{3} + xu\right)\right\} dx. \quad (5)$$

Тогда в результате преобразований для огибающей ИХ $|h_k(\tau)|$ получим выражение:

$$|h_k(\tau)| = \frac{2\pi |H_{0k}(\bar{f})|}{\sqrt[3]{\pi |v_k(\bar{f})|}} \cdot \left| Ai\left(\frac{1}{\sqrt[3]{\pi v_k(\bar{f})}} \left\{ 2\pi\bar{\tau}_{kp}(\bar{f}) - \pi \frac{s_k^2(\bar{f})}{v_k(\bar{f})} - 2\pi\tau \right\}; \frac{B}{2} - \frac{s_k(\bar{f})}{v_k(\bar{f})}\right) - Ai\left(\frac{1}{\sqrt[3]{\pi |v_k(\bar{f})|}} \left\{ 2\pi\bar{\tau}_{kp}(\bar{f}) - \pi \frac{s_k^2(\bar{f})}{v_k(\bar{f})} - 2\pi\tau \right\}; \frac{B}{2} - \frac{s_k(\bar{f})}{v_k(\bar{f})}\right) \right|. \quad (6)$$

Учтем, что в случае нелинейной частотной дисперсии ИХ радиоканала, когда ИХ принимаемых мод разрешается модуль суммарной ИХ $|h(\tau)| = \sum_{k=1}^K |h_k(\tau)|$ представляет собой сумму, каждое слагаемое $|h_k(\tau)|$ которого определяется выражением (7).

Из формулы (6) видно, что свойства диспергирующего радиоканала определяются шестью ключевыми параметрами: средней частотой \bar{f} канала и его полосой B , АЧХ $H_{0k}(\bar{f})$, временем группового запаздывания $\bar{\tau}_{kp}(\bar{f})$, наклоном $s_k(\bar{f})$ ДХ и вогнутостью $v_k(\bar{f})$ ДХ. В зависимости от их значений из полученного решения можно получить частные случаи: канал без дисперсии; с линейной дисперсией и кубической дисперсионной ДХ.

На рисунке 1 представлены полученные нами результаты расчетов огибающей ДХ по формуле (6) в общем и частных случаях. Здесь и далее в тексте рисунки получены с учетом того, что начало отсчета задержки перенесено в точку с координатой $\tau = \bar{\tau}_{kp}(\bar{f}) = d\varphi/d\omega|_{f=\bar{f}}$.

На первом рисунке приведены примеры вида огибающей ИХ, нормированной к ее максимальному значению при отсутствии частотной дисперсии (при $s_k(\bar{f}) \rightarrow 0$ и $v_k(\bar{f}) \rightarrow 0$), когда (6) стремиться к виду:

$$|h_k(\tau)| \rightarrow H_{0k}(\bar{f})B \frac{|\sin \pi B(\tau - \bar{\tau}_{kp}(\bar{f}))|}{|\pi B(\tau - \bar{\tau}_{kp}(\bar{f}))|} = H_{0k}(\bar{f})B \left| \text{sinc} [\pi B(\tau - \bar{\tau}_{kp}(\bar{f}))] \right|. \quad (7)$$

Отметим, что в этом случае при расширении полосы канала ($B \rightarrow \infty$) функция $\text{sinc} [\pi B(\tau - \bar{\tau}_{kp}(\bar{f}))] \rightarrow \delta(\tau - \bar{\tau}_{kp}(\bar{f}))$.

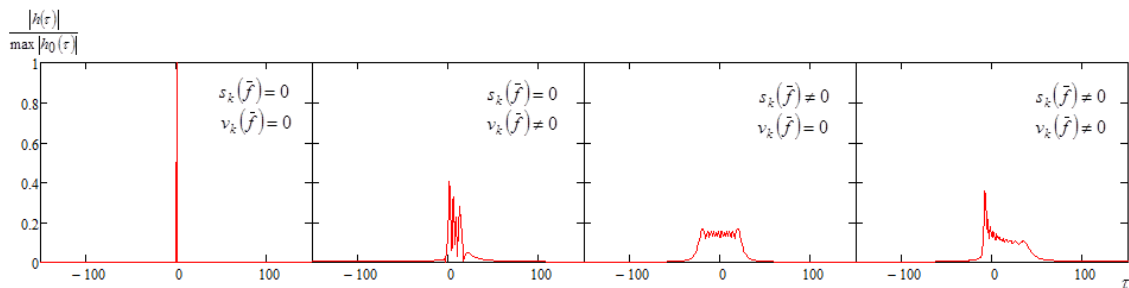


Рис. 1. Изменение амплитуды ИХ в зависимости от параметров $s_k(\bar{f})$ и $v_k(\bar{f})$ частотной дисперсии

Во втором случае ($s_k \rightarrow 0$) модуль ИХ стремиться к виду, полученному [1] для линейной дисперсии. Третий рисунок соответствует общему случаю. Из него видно влияние функций Эйри, приводящей к затухающим колебаниям амплитуды на пьедестале, образованном из-за линейной дисперсии.

Рисунок 2 иллюстрирует для общего случая роль кубического слагаемого ФЧХ канала. Рисунок 2а соответствует случаю, когда преобладает линейная дисперсия, роль нелинейной дисперсии не велика ($s_k(\bar{f}) = 100 \text{ мкс} / \text{МГц}$, $v_k(\bar{f}) = 0.038 \text{ мкс} / \text{МГц}^2$). Рисунки 2б,в показывают возрастающую роль нелинейной дисперсии, которая связана с ростом вогнутости ДХ (б - $v_k(\bar{f}) = 0.076 \text{ мкс} / \text{МГц}^2$ и в - $v_k(\bar{f}) = 0.38 \text{ мкс} / \text{МГц}^2$ и обусловлена функциями Эйри. В случае выпуклости $v_k(\bar{f}) < 0$ вид ИХ меняется на тот, который получается при повороте данных ИХ относительно вертикальной прямой $\tau = 0$.

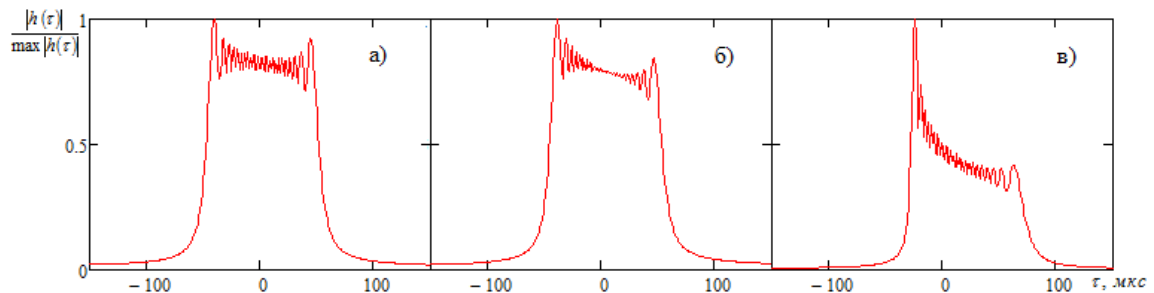


Рис. 2. Изменение формы ИХ при возрастании роли нелинейной составляющей дисперсии

Случай чисто кубической ДХ ранее также не рассматривался. Поэтому, для иллюстрации вклада этого члена ДХ в искажения ИХ, когда линейная дисперсия отсутствует, нами были проведены соответствующие вычисления.

Дисперсионные искажения в ионосфере различных сигналов с расширенным спектром.

Для анализа дисперсионных искажений в случае согласованной обработки предположим, что спектр излучаемого в среду сигнала имеет вид $S_T(f)$, характеристика согласованного фильтра равна $S_T^*(f)$, а эквивалентный канал распространения имеет частотную характеристику вида $H(f, T)$. Тогда спектр сигнала на выходе системы сжатия можно представить в виде [1, 9]:

$$S_R(f, T) = S_T(f) \cdot H(f, T) \cdot S_T^*(f) = |S_T(f)|^2 \cdot H(f, T) = \hat{S}_T(f, T) \cdot H(f, T). \quad (8)$$

Будем рассматривать сигналы с расширенным спектром (СРС): ЛЧМ, ППРЧ и ФКМ.

Сигналы с ЛЧМ и ППРЧ обладают тем свойством, что их спектральную амплитуду можно считать однородной в полосе частот сигнала - B_S . Спектральная амплитуда СРС с ФКМ из-за фильтрации при излучении основного лепестка будет иметь вид, близкий к функции Гаусса с носителем σ_S поэтому:

Аналогичный вид будет иметь и спектральная амплитуда СРС с ЛЧМ и ППРЧ в случае, если при обработке в приемнике для уменьшения боковых лепестков используются «гауссоподобные» функции-окна.

Формула (8) означает, что задача распространения рассматриваемых СРС в диспергирующей среде сводится к задаче распространения только в одной среде некоторого сигнала с синфазным спектром вида $\hat{S}_T(f, T)$ либо однородным, либо гауссоподобной формы. Поэтому такой «обобщающий» сигнал $\hat{u}(t)$ со спектром $\hat{S}_T(f, T)$ был назван [10] эквивалентным. Видим, что для представленных СРС имеются эквивалентные сигналы двух типов. При этом спектр эквивалентного сигнала второго типа можно рассматривать как спектр сигнала первого типа, умноженный на функцию Гаусса.

Итак, задача распространения произвольного СРС с учетом его сжатия в приемнике сводится к задаче распространения в среде эквивалентного сигнала. Для эквивалентного сигнала первого типа спектр принимаемого сигнала пропорционален ЧХ радиоканала с полосой B_S . Поэтому сам принимаемый эквивалентный сигнал первого типа будет пропорционален ИХ радиоканала:

$$u_{RE}(\tau, T) = k_S \cdot h(\tau, T), \quad (9)$$

где $h(\tau, T) = \sum_{k=1}^K h_k(\tau, T)$.

Следовательно, дисперсионные искажения соответствующих СРС будут совпадать с рассмотренными выше искажениями ИХ радиоканала.

Второй случай отличается тем, что в полосе канала частотная характеристика должна иметь гауссову спектральную плотность мощности.

Отметим один важный эффект, связанный с групповым запаздыванием сигнала при его распространении в среде с дисперсией. Он заключается в том, что величина производной $d\varphi/d\omega$ совпадает с групповым запаздыванием сигнала лишь в случае

отсутствия дисперсии. Точнее, когда ее параметры стремятся к нулю ($s_k \rightarrow 0$ и $v_k \rightarrow 0$). В случае существенной дисперсии ситуация становится неопределенной: производная может быть равна времени запаздывания, отнесенного к середине ИХ, или запаздыванию переднего фронта ИХ.

Выводы.

Получено общее решение задачи дисперсионных искажений широкополосных радиосигналов при распространении в среде с частотной дисперсией. Показано, что в частных случаях оно переходит в известные решения для линейной дисперсии и отсутствия дисперсии. Исследования формы импульсной характеристики показали, что для линейной дисперсии она не меняется при смене знака наклона ДХ, а в общем случае – меняется при смене выпуклости на вогнутость ДХ форму на кривой, получаемой в результате поворота исходной относительно прямой $\tau = d\varphi/d\omega$. Получено общее решение задачи распространения в среде с дисперсией различных сигналов с расширенным спектром при учете их согласованной обработки при приеме. Рассмотрены причины неопределенности связи производной $\tau = d\varphi/d\omega$ с искаженным дисперсией сигналом, которая совпадает с групповым запаздыванием огибающей только в среде без дисперсии, а в диспергирующих средах ее смысл становится неопределенным.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: проекты № 13-07-00371-а; 13-02-00524-а; 13-07-97041.

Литература

1. Иванов, Д.В. Методы и математические модели исследования распространения в ионосфере сложных декаметровых сигналов и коррекции их дисперсионных искажений / Д.В. Иванов – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. – 266 с.
2. Иванов, В.А. Многомерный высокочастотный радиоканал и экспериментальные исследования его основных характеристик / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова, А.А. Чернов // Электромагнитные волны и электронные системы. -2013. Т.18, №8. – С. 40-48.
3. Крюковский А. С., Лукин Д. С., Палкин Е. А., Растягаев Д.В. Теория катастроф в проблемах стационарной и нестационарной дифракции // Труды X школы - семинара по дифракции и распространению волн .7 - 15.02.1993./М.: МФТИ. 1993. С. 36-111.
4. Крюковский, А.С. Особенности распространения радиоимпульсов в средах с дисперсией / А.С. Крюковский, И.В. Зайчиков // Электромагнитные волны и электронные системы. - 2008. - Т.13. - № 8. - С.36-41.
5. Арманд, Н.А. Коррекция дисперсионных искажений широкополосных сигналов / Н.А. Арманд, В.А. Иванов // Тр.ХХI Всерос. науч. конф. «Распространение радиоволн». – Йошкар-Ола, 2005, т.1, С.10-18.
6. Бережной, Ю.А. Радужное рассеяние в ядерных столкновениях. / Ю.А. Бережной, А.В. Кузниченко, Г.М. Онищенко // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 1987. -Т.18. - Вып.2. - С. 289-321
7. Кравцов, Ю.А. Каустики, катастрофы и волновые поля / Ю.А. Кравцов, Ю.И. Орлов // Успехи физических наук. – 1983. - Т.141. - Вып.4. - С.591-627
8. Анютин, А.П. Развитие асимптотических и численных методов моделирования дифракционных полей сигналов в средах с дисперсией Автореферат дис. ... д-ра. физ.-мат. наук: 01.04.03. – Москва. - 2008. 33 с.