

## **Разработка методов исследования дисперсии в многомерных высокочастотных радиоканалах**

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

Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола,  
пл. Ленина, д.3, [IvanovVA@volgatech.net](mailto:IvanovVA@volgatech.net)

*Предложена и теоретически обоснована методика разделения дисперсионных характеристик на регулярную и стохастическую составляющие на основе метода полиномиальной фильтрации экспериментальных данных. Получены значения полиномов для аппроксимации дисперсионных характеристик для трасс различной протяженности и различных геофизических условий. Представлены результаты натурного эксперимента на трассе о. Кипр – г. Йошкар-Ола по исследованию параметров стохастической дисперсии: генеральное среднее и СКО.*

*The method of division dispersive characteristics on regular and stochastic components on the basis of polynomial filtering of experimental data is proposed and theoretically justified. The values of the polynomials for approximation the dispersion characteristics of radio paths of varying lengths and different geophysical conditions are obtained. The results of the full-scale experiment on the path of Cyprus - Yoshkar-Ola on the study parameters of the stochastic dispersion: general average and standard deviation are represented.*

В настоящее время существует актуальная задача исследования искажений сигналов при распространении в средах с частотной дисперсией. При ее решении часто используется физический подход (см. например [1, 2]), в рамках которого развиваются асимптотические методы.

Для практического использования в средах с дисперсией широкополосных сигналов с применением методов оптимального приема, возникла задача коррекции дисперсионных искажений, которая потребовала развития другого подхода – феноменологического, когда основные характеристики среды распространения задаются на основе зависимостей, полученных эмпирически. Для интерпретации экспериментальных результатов – развивается гибридный метод, использующий физические и технические модели среды в виде эквивалентных радиоканалов, обладающих частотной (ЧХ), импульсной (ИХ) и дисперсионной (ДХ) характеристиками [3, 4]. В последнее время для решения задачи исследования нелинейной ДХ применяются сложные (широкополосные) сигналы и их сжатие в приемнике. На этой основе развивается методика фильтрации экспериментальной ДХ и выделения регулярной и стохастической составляющих [3]. Данная методика требует дальнейшего развития. Кроме того, не решена задача оценки влияния стохастической составляющей дисперсии на искажения ИХ каналов, которую можно исследовать на основе полученных в эксперименте данных.

**Цель работы:** Разработка теоретических и экспериментальных методов исследования регулярной и стохастической дисперсии в многомерных широкополосных высокочастотных радиоканалах.

### **Методика разделения ДХ на регулярную и стохастическую составляющие.**

В работе [5] было показано, что для разделения ДХ на составляющие следует использовать метод полиномиальной фильтрации экспериментальных данных. При этом, в данном типе фильтрации степень полинома играет роль полосы фильтра

нижних частот. Поэтому в рамках работы решалась задача обоснования выбора степени полинома.

Степень полинома определялась путем математического моделирования ДХ [1, 2] на основе физического подхода. Модель профиля электронной концентрации задавалась в виде многослойного квазипараболического приближения. В данной модели высотная зависимость плазменной частоты в каждом слое задавалась формулой:

$$f_{0i}^2 = \frac{A_i}{r^2} + \frac{B_i}{r} + C_i, \quad (1)$$

$$\text{где } A_i = \pm \frac{f_{ki}^2 r_m^2 r_b^2}{y_{mi}^2}, \quad B_i = \pm \frac{2f_{ki}^2 r_m r_b^2}{y_{mi}^2}, \quad C_i = f_{kmi}^2 \mp \frac{f_{ki}^2 r_b^2}{y_{mi}^2}, \quad (2)$$

где  $f_k$  – критическая частота слоя;

$r$  – геоцентрическое расстояние;

$r_m$  – значение  $r$  в максимуме слоя;

$r_b$  – значение  $r$  в нижней границе слоя;

$y_m$  – полутолщина слоя.

В рамках этой модели время группового запаздывания для обыкновенной компоненты односкачковой моды может быть выражено функцией:

$$\bar{\tau}_1 = \frac{2}{c} \left\{ \int_{r_0}^{r_b} \frac{r dr}{\sqrt{r^2 - r_0^2 \cos^2 \beta_0}} + \int_{r_b}^{r_i} \frac{r dr}{\sqrt{A' r^2 + B' r + C'}} \right\}, \quad (3)$$

где  $c$  – скорость света,

$\beta_0$  – угол излучения,

$r_0$  – радиус Земли.

Значения  $A'$ ,  $B'$  и  $C'$  находились из уравнений:

$$A' = 1 - C/f^2, \quad B' = -B/f^2, \quad C' = -r_0^2 \cos^2 \beta_0 - A/f^2.$$

Для необыкновенной компоненты значение времени группового запаздывания вычислялось на основе формулы:

$$\tau_2 = \frac{1}{c} \int du + \frac{1}{c} \int \frac{1}{2} XY du = \tau_1 + \Delta\tau, \quad (4)$$

где  $\tau_1$  – время группового запаздывания обыкновенной моды (в отсутствии магнитного поля),

$\Delta\tau$  – коррекция задержки обыкновенной волны для получения задержки необыкновенной волны.

Синтезированные на основе формул (3) и (4) ионограммы, являются дисперсионными характеристиками обыкновенной и необыкновенной мод радиоканала. Для ночной ионосферы использовалась двухслойная модель, а дневной – трехслойная. Скачковые моды большей кратности находились в приближении равных скачков. Исходный профиль для средней точки радиотрассы задавался, исходя из данных модели IRI.

Полученные таким образом ДХ служили основой для исследования их полиномиальной аппроксимации в полосе частот  $F = f - \bar{f} \in [-B_C/2; B_C/2]$ . Искомая функция задавалась полиномом Тейлора (за исключением точек разрыва):

$$\bar{\tau}(F) = \bar{\tau}(0) + \bar{\tau}^{(1)}(0)F + \frac{\bar{\tau}^{(2)}(0)}{2}F^2 + \frac{\bar{\tau}^{(3)}(0)}{3!}F^3 + \frac{\bar{\tau}^{(4)}(0)}{4!}F^4 \dots = \sum_{k=0}^n \frac{\bar{\tau}^{(k)}(0)}{k!}F^k. \quad (5)$$

Максимальная степень полинома определялась из следующих соображений. Поскольку  $\bar{\tau}(f) = \frac{1}{2\pi} d\varphi(f)/df$  и  $\bar{\tau}(F) = \frac{1}{2\pi} d\varphi(F)/dF$ , т.к.  $df = dF$ , то, решая для набега фазы  $\varphi(F)$  распространяющейся в ионосфере моды данное дифференциальное уравнение при начальных условиях  $\varphi(F)_{F=0} = \varphi(0)$ , получим:

$$\varphi(F) = \varphi(0) + 2\pi \sum_{k=0}^n \frac{\bar{\tau}^{(k)}(0)}{(k+1)!} F^{k+1}. \quad (6)$$

Учитывали, что ограничение сверху степени полинома означает отбрасывание остальных слагаемых полинома. Для  $k$ -ого слагаемого это возможно, если выполняется неравенство:

$$2\pi \frac{\bar{\tau}^{(k)}(0)}{(k+1)!} B_C^{k+1} \ll 2\pi \text{ или } \Theta_k = \frac{\bar{\tau}^{(k)}(0)}{(k+1)!} B_C^{k+1} \ll 1, \text{ т.к. } F \sim B_C. \quad (7)$$

Согласно формуле (7) при задании  $\bar{\tau}(F)$  полиномом первой степени должно выполняться условие:  $\Theta_1 = \bar{\tau}^{(2)}(0) \cdot B_C^3 / 24 \ll 1$ ; - полиномом второй степени – условие:  $\Theta_2 = \bar{\tau}^{(3)}(0) \cdot B_C^4 / 24 \ll 1$  и третья степени -  $\Theta_3 = \bar{\tau}^{(4)}(0) \cdot B_C^5 / 120 \ll 1$ .

Производные от ДХ находились путем численного дифференцирования.

В таблице 1 представлены результаты выполненных расчетов для параметров окрестностей критических точек ДХ от полосы канала для дня весной-осенью.

Таблица 1. Значения параметров окрестностей критических точек ДХ в зависимости от полосы канала для дневного времени суток и зимы

полоса канала \ степень полинома	1	2	3
50 кГц	$n_E = 0,05, m_E = 0,04,$ $n_{F2} = 0,02$	$n_E = 0,02, m_E = 0,02,$ $n_{F2} = 0,01$	$n_E = 0,01, m_E = 0,01,$ $n_{F2} = 0,01$
100 кГц	$n_E = 0,13, m_E = 0,07,$ $n_{F2} = 0,15$	$n_E = 0,08, m_E = 0,11,$ $n_{F2} = 0,06$	$n_E = 0,04, m_E = 0,06,$ $n_{F2} = 0,05$
200 кГц	$n_E = 0,21, m_E = 0,29,$ $n_{F2} = 0,15$	$n_E = 0,16, m_E = 0,18,$ $n_{F2} = 0,09$	$n_E = 0,11, m_E = 0,12,$ $n_{F2} = 0,05$

Для необыкновенной моды и среднеширотных коротких радиолиний критические частоты вычислялись с использованием выражения:

$$f_{k2} \approx f_{k1} + f_H / 2, \quad (8)$$

где  $f_{k1}$  - критическая частота слоя ионосферы (критическая частота для обыкновенной моды);

$f_{k2}$  - критическая частота слоя для необыкновенной моды.

Результаты, полученные для обеих магнитоионных мод позволяют заключить, что для коротких трасс ДХ может быть аппроксимирована полиномом первой степени за пределами окрестности критических точек с мерой 11-15% от значений критических

частот ионосферных слоев при любом состоянии ионосферы. Второй степени – за пределами 7-9% окрестности, а третьей степени – за пределами 4-6% окрестности.

Исследования, проведенные для каналов с полосой 1МГц и протяженных радиотрасс ( $D = 2500$ км), показали, что для моды  $1F_2$  на относительных средних частотах  $\hat{f} \leq 0,85$  для полиномиальной фильтрации можно использовать многочлены первой степени (т.е ДХ линейная), а для  $0,85 < \hat{f} < 0,95$  – многочлены второй степени.

### Экспериментальные данные о параметрах стохастической дисперсии.

Устройство для определения ДХ различных мод распространения высокочастотных (ВЧ) радиоволн было создано в Поволжском государственном технологическом университете (ПГТУ) на основе ионозонда с непрерывным линейно-частотно-моделированным сигналом. Натурные эксперименты по исследованию характеристик стохастической дисперсии проводились с 01.02.2012г. по 29.02.2012г. на трассе о. Кипр – Йошкар-Ола, протяженностью 2363 км. Сеансы зондирования проводились каждые 5 мин и относились к разному времени суток. При этом возмущенность ионосферы была слабой. Исследовались ДХ радиоканалов с полосой 1 МГц и средними относительными частотами 0,5; 0,7 и 0,9. Экспериментальные отсчеты ДХ получали с шагом 20кГц. Полиномиальная фильтрация ДХ позволяла выделять ее остаточную компоненту  $\tau_S(f)$  и исследовать ее статистические характеристики. При этом на полосе 1МГц получали 50 отсчетов, которые и составляли выборку для заданных относительных частот 0,5; 0,7 и 0,9.

Для проверки гипотезы о случайном характере остаточной компоненты ДХ использовался критерий Пирсона при уровне значимости 0.01. Проведенные вычисления показали, что остаточная компонента ДХ является стохастической и может быть описана с помощью нормального закона распределения. В таком случае анализу были подвергнуты основные параметры распределения: среднее  $\bar{\tau}_S(f)$  и СКО  $\sigma_\tau$  [6].

На рис. 1 и рис. 2 представлены флуктуации выборочных значений параметров распределения стохастической дисперсии в течении суток за весь период наблюдения для каналов с полосой 1 МГц на относительной средней частоте  $\hat{f} = 0.7$ .

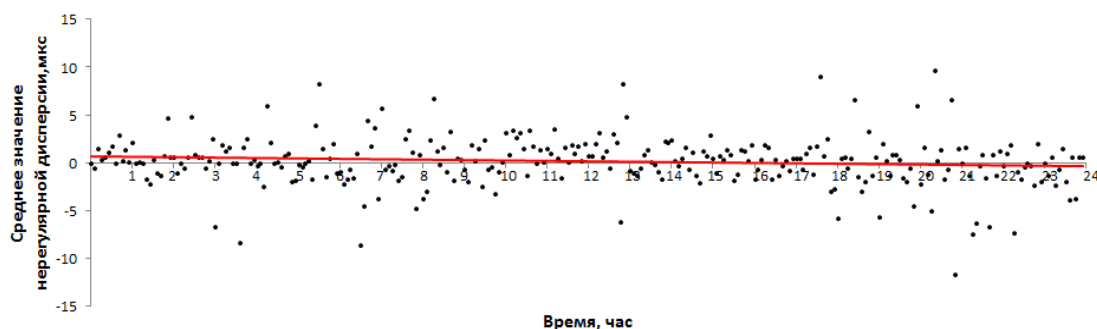
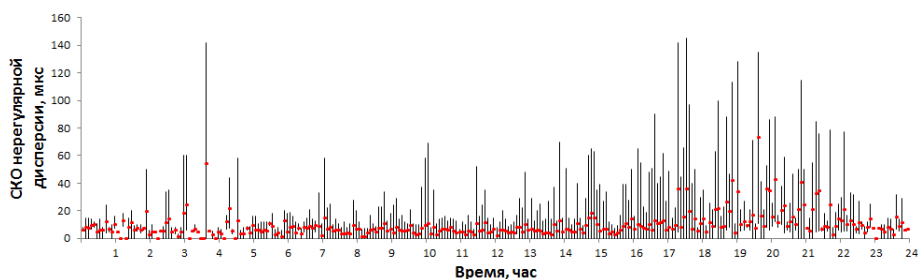


Рис. 1. Суточный ход среднего значения нерегулярной дисперсии каналов на  $\hat{f} = 0.7$ .

Как видно из рис. 1 и показывают расчеты, генеральное среднее стохастической дисперсии близко к нулю ( $\bar{\tau}_S(f) = 0.041$  мкс).



**Рис. 2.** Суточный ход СКО стохастической дисперсии на  $\hat{f} = 0.7$ .

Точками на рис.2 обозначены средние значения выборочных значений параметра  $\sigma_\tau$ , вычисленные по его выборочным значениям. При этом разброс средних значений параметра  $\bar{\sigma}_\tau$  на относительной частоте  $\hat{f} = 0,5$  составлял  $\sim 20$ мкс, на частоте  $\hat{f} = 0,7$  – составлял  $\sim 10$ мкс, а на частоте  $\hat{f} = 0,9$  – составлял  $\sim 25$ мкс. На частоте  $\hat{f} = 0,9$  от дня к ночи (17.30-03.30мск) наблюдался двойной рост параметра  $\bar{\sigma}_\tau$  от  $\sim 10$ мкс до  $\sim 25$ мкс.

### **Выводы**

1. Предложена и теоретически обоснована методика разделения ДХ на регулярную и стохастическую составляющие на основе метода полиномиальной фильтрации экспериментальных данных.

2. В результате вычислительного эксперимента было получено, что для коротких трасс ДХ может быть аппроксимирована полиномом первой степени за пределами окрестности критических точек с мерой 11-15% от значений критических частот ионосферных слоев при любом состоянии ионосферы. Второй степени – за пределами 7-9% окрестности, а третьей степени – за пределами 4-6% окрестности. Исследования, проведенные для каналов с полосой 1 МГц и протяженных радиотрасс ( $D = 2500$ км), показали, что для моды  $1F_2$  на относительных средних частотах  $\hat{f} \leq 0,85$  для полиномиальной фильтрации можно использовать многочлены первой степени (т.е ДХ линейная), а для  $0,85 < \hat{f} < 0,95$  – многочлены второй степени.

3. В результате натурального эксперимента на трассе о. Кипр – г. Йошкар-Ола проведены исследования параметров стохастической дисперсии: среднее  $\bar{\tau}_S(f)$  и СКО  $\sigma_\tau$ . Показано, что генеральное среднее стохастической дисперсии близко к нулю ( $\bar{\tau}_S(f) = 0.041$  мкс), а разброс средних значений параметра  $\bar{\sigma}_\tau$  на относительной частоте  $\hat{f} = 0,5$  составлял  $\sim 20$ мкс, на частоте  $\hat{f} = 0,7$  – составлял  $\sim 10$ мкс, а на частоте  $\hat{f} = 0,9$  – составлял  $\sim 25$ мкс. На частоте  $\hat{f} = 0,9$  от дня к ночи (17.30-03.30мск) наблюдался двойной рост параметра  $\bar{\sigma}_\tau$  от  $\sim 10$ мкс до  $\sim 25$ мкс.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: проекты № 11-07-00420-а; 12-02-31734 мол\_а; ФЦП: ГК №14.132.21.1418; АВЦП: № 8.2523.2011, № 8.2448.2011, № 8.2559.2011; 8.2346.2011.*

### **Литература**

1. Крюковский, А.С. Теория пространственной фокусировки видеоимпульсов в диспергирующих средах / А.С. Крюковский, Д.С. Лукин, Д.В. Растягаев // Электромагнитные волны и электронные системы. - 2007. - Т.12. - № 8. - С.15-25.

2. Арманд, Н.А. Распространение широкополосных сигналов в дисперсионных средах / Н.А. Арманд // Радиотехника и электроника. – 2003.-Т.48. – №9. – С. 1045-1057.
3. Иванов, В.А. Искажение сложных декаметровых радиосигналов в дисперсных ионосферных радиоканалах при квазизенитном распространении / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, М.И. Рябова, Н.А. Сорокин // Вестник МарГТУ: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. -2010. -№ 1. -С. 43 -53.
4. Иванов, Д.В. Имитационная модель системы радиосвязи с квазизенитным распространением / Д.В. Иванов, М.И. Рябова // Сборник статей Межд. н-тех. сем. «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов для связи и вещания». – 2011. - С. 122-123.
5. Иванов, В.А. Исследование влияния поляризационной интерференции на искажения характеристик многомерного ионосферного радиоканала /В.А. Иванов, Д.В. Иванов, М.И. Рябова // Электромагнитные волны электронные системы. -2012. - №9. –С. 55-60.
6. Иванов, В.А. Стохастические дисперсионные искажения характеристик широкополосных высокочастотных радиоканалов /В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.Н. Михеева // Электромагнитные волны электронные системы. -2012. - №9. –С. 37-41.