

# КОМПЬЮТЕРНЫЙ ИМИТАТОР ДЕКАМЕТРОВОГО КАНАЛА НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНО-ФИЗИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Вертоградов Г.Г., Вертоградова Е.Г.

Ростовский государственный университет, физический факультет  
344044, г.Ростов-на-Дону, ул.Зорге 5, кафедра радиофизики  
E-mail: vgg@phys.rsu.ru

Одним из необходимых условий успеха при разработке высокоскоростных систем связи, работающих в коротковолновом диапазоне является тестирование создаваемых систем в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным. До недавнего времени единственным надежным способом такого тестирования были натурные испытания, т.к. существующие феноменологические модели [1] ионосферного радиоканала не учитывали реальных процессов в среде и их влияние на распространение ДКМВ. Однако их высокая стоимость и невозможность точного повторного воспроизведения поведения реального канала делает этот способ мало эффективным на стадии разработки систем и узлов связи.

В настоящее время широко внедряются средства связи, использующие всю или значительную часть полосы ДКМ-канала. В то же время отсутствуют модели канала, позволяющие осуществлять тестирование, испытания и, наконец, исследования работы широкополосных систем связи в условиях приближенных к реальным.

Предлагаемое сообщение как раз и направлено на изложение опыта построения и эксплуатации компьютерного имитатора, разработанного на основе структурно-физического подхода к моделированию ионосферного радиоканала.

Принцип корректности модели при структурно-физическом подходе предполагает, с одной стороны, выявление и адекватное описание физических механизмов, оказывающих определяющее влияние на формирование структуры поля и ее динамику, с другой - достижение необходимых точностных параметров модели минимальными средствами. С этих позиций были сформулированы следующие исходные положения СФ-модели [2, 3]:

1. Суммарное поле отраженных от ионосферы волн в точке приема и его пространственное распределение определяются интерференцией небольшого числа дискретных лучей.

2. Количество лучей в каждой пространственно-временной точке, их параметры однозначно задаются глобальной регулярной неоднородностью ионосферы, связанной с терминатором, и среднemasштабными возмущениями электронной концентрации волновой природы.

3. Динамика отдельных лучей и суммарного интерференционного поля объясняется нестационарностью среды, обусловленной движением терминатора и перемещением волновых возмущений (ВВ).

4. Математической моделью среды служит мультипликативная модель пространственного распределения ионизации, имеющая градиенты в вертикальном направлении и в направлении вдоль траектории луча. ВВ, в свою очередь, представляется цугом гармонических волн, дискретных в пространстве, во времени и по частоте.

5. Интерференционное поле ищется в рамках геометрооптического приближения на основе решения уравнений эйконала и переноса с обязательным учетом действия магнитного поля Земли.

6. Вариации среды распространения происходят несоизмеримо медленнее по сравнению с изменениями сигналов, передаваемых через канал. Как следствие, текущее время разделяется на медленное, по которому разворачиваются динамические процессы в ионосфере, и быстрое, описывающее изменения информационных сигналов.

Возможны два пути при реализации компьютерного имитатора на основе структурно-физической модели (СФ-модели). Первый (временной) предполагает описание эквивалентного нестационарного ионосферного фильтра импульсной характеристикой  $h(\tau, t)$ , где  $t$  - так называемое медленное время, по которому разворачиваются изменения характеристик канала за счет медленных вариаций параметров частотно-временных лучей, формирующих суммарное интерференционное поле в точке приема, а  $\tau$  - назовем быстрым временем. Второй подход (частотный), выбранный нами при построении модели канала, основывается на описании фильтра динамической передаточной функцией  $H(\omega, t)$ , где  $\omega$  - круговая частота. Естественно  $H(\omega, t)$  и  $h(\tau, t)$  для каждого заданного  $t$  по переменным  $\omega$  и  $\tau$  связаны преобразованием Фурье.

Передаточная характеристика ионосферного канала в СФ-модели представляется в виде:

$$H(\omega, t) = \sum_{j=0}^{n(\omega, t)-1} a_j(\omega, t) e^{-i \frac{\omega P_j(\omega, t)}{c}}, \quad (1)$$

где  $a_j(\omega, t)$  и  $\frac{\omega P_j(\omega, t)}{c}$  - АЧХ и ФЧХ парциального  $j$ -ого канала. Каждый парциальный канал формируется отдельными частотно-временными лучами, интерференция между которыми и образует суммарное поле в точке приема. Число лучей  $n(\omega, t)$ , нелинейные динамические АЧХ и ФЧХ парциальных каналов в (1)

вычисляются на двухмерной частотно-временной сетке  $[\omega_k, t_l]$  для заданных гелио- и гео- физических условий в рамках геометрооптического приближения. При этом численно решается граничная задача, сформулированная для расширенной системы нелинейных дифференциальных лучевых уравнений, записанных для трехмерно-неоднородной магнитоактивной ионосферы, параметры которой заданы моделью IRI-95. Нестационарность ионосферной плазмы обуславливается с одной стороны суточными вариациями ее параметров, а с другой - учетом среднемасштабных неоднородностей волновой природы (типа ПИВ)

Сетка разбиения по частоте  $\{\omega_k\}$  охватывает всю полосу пропускания ионосферного радиоканала для заданной трассы, а сетка по времени  $\{t_l\}$  - интервал моделирования канала.

В результате решения граничной задачи для каждого  $j$ -ого луча рассчитываются: фазовый путь  $P_j(\omega_k, t_l)$ ; групповой путь  $P'_j(\omega_k, t_l)$ ; доплеровское смещение частоты  $\delta\omega_j(\omega_k, t_l)$ ; амплитуда  $a_j(\omega_k, t_l)$ ; углы вылета и прихода находится множество ветвей распространения, часть из которых может существовать не на всей частотно-временной плоскости. Для каждой из ветвей путем сплайн-аппроксимации таблично заданных параметров лучей вычисляются непрерывные АЧХ и ФЧХ парциальных каналов в (1). Причем используются сплайны пятого порядка, обеспечивающие непрерывность функций и их производных до третьего порядка. При аппроксимации учитываются известные после решения расширенной системы лучевых уравнений производные фазового пути  $P_j$  по частоте и времени до второго порядка включительно. Как следствие, сплайн-аппроксимированная функция  $P_j(\omega, t)$  должна в узлах временной сетки удовлетворять дифференциальному соотношению  $\delta\omega = -\frac{\omega}{c} \frac{\partial P}{\partial t}$ , а в узлах частотной сетки дифференциальному соотношению

$$P' = P + \omega \frac{\partial P}{\partial \omega}.$$

Процесс имитации состоит из двух этапов. На первом, наиболее вычислительно трудоемком, производится расчет передаточной функции канала  $H(\omega, t)$  в заданном временном и частотном интервалах (*ионосферный модуль*). На втором – собственно обеспечивается имитация канала в реальном или квазиреальном времени (*модуль прогона сигнала*), при этом компьютер выполняет роль цифрового фильтра с рассчитанной на первом этапе передаточной функцией.

Обработка сигнала производится на низкой (звуковой) частоте, что позволяет построить цифровой фильтр (1) на базе быстрого преобразования Фурье (БПФ) с разбиением обрабатываемой последовательности на группы отсчетов (кадры). В течение каждого кадра передаточная функция фильтра считается не зависящей от времени и обновляется при переходе от одного кадра к другому. Применяется специальный алгоритм, обеспечивающий непрерывность импульсной характеристики фильтра на границах соседних кадров, благодаря чему и становится возможным использование метода БПФ при реализации нестационарного фильтра.

Остановимся на основных моментах *модуля «прогона» сигнально-кодовых комбинаций* через структурно физическую модель, параметры которой найдены на первом этапе с помощью *ионосферного модуля*.

1. Передаваемое сообщение разбивается на элементарные кадры длительностью  $T \cong 25ms$  (численное значение подбирается эмпирически и ограничено сверху нестационарностью ионосферного канала). Сформированный кадр умножается на специальную оконную функцию, удовлетворяющую определенным необходимым условиям и подготавливающую кадр к прохождению через модель канала. Как следствие, исходное сообщение  $x(t)$  представляется в форме суперпозиции кадров  $x_k(t)$ :

$$x(t) = \sum_k x_k(t) = x(t) \sum_k s(t - kT_0), \quad \sum_k s(t - kT_0) \cong 1, \quad (2)$$

где  $s(t)$ - симметричная относительно  $T/2$  оконная функция, обращающаяся в ноль вне отрезка  $[0, T]$ , а  $T_0$  задает смещение каждого следующего кадра относительно предыдущего и одновременно представляет собой шаг обновления передаточной характеристики нестационарного ионосферного канала по медленному времени. Причем необходимые условия, которым должна удовлетворить оконная функция в (2) можно определить в следующем виде:

$$s(t) \cong 1, \quad T - T_0 \leq t \leq T_0;$$

$$s(t - kT_0) + s(t - (k+1)T_0) \cong 1, \quad (k+1)T_0 \leq t \leq kT_0 + T.$$

Далее каждый кадр дополняется двумя защитными интервалами  $T_{under}$  и  $T_{up}$ , учитывающими соответственно предисторию сигнала и послереакцию (память) канала (численные значения этих величин определяются условиями распространения и обычно составляют 5...10 мс).

2. Для данного момента времени, соответствующего выбранному кадру, с шагом  $T_0$  по медленному времени, в полосе, определяемой передаваемым сигналом, вычисляется мгновенная передаточная характеристика ионосферного радиоканала. При этом используется бинарный файл с параметрами канала, подготовленными на первом этапе моделирования с помощью *ионосферного модуля*. Шаг по частоте задается длительностью дополненного кадра, т.е. равен  $1/(T + T_{under} + T_{up})$ .
3. Вычисляется спектр элементарного кадра передаваемого сигнала с использованием алгоритма БПФ.
4. Спектр кадра умножается на мгновенную передаточную характеристику и выполняется ОБПФ. Как следствие, получаем комплексный образ элементарного кадра на выходе ионосферного канала. Отметим, что применение специальной оконной функции позволяет пропускать не все сообщение целиком, а фрагментами, по мере поступления сигнально-кодовых комбинаций на вход канала. Это с одной стороны позволяет избежать излишне подробной дискретизации передаточной характеристики, согласуя шаг дискретизации с полосой сигнала, а с другой, корректно учесть изменение параметров канала со временем, т.е. учесть его нестационарность.
5. Комплексный сигнал, соответствующий пропущенному через модель элементарному кадру ставится по времени в нужную временную позицию и суммируется с комплексными образами ранее пропущенных через канал элементарными кадрами. Начальная временная позиция, определяющая положение каждого следующего кадра задается двумя факторами: временным положением кадра в передаваемом сообщении и минимальным групповым временем распространения сигнала в канале связи. Следует напомнить, что последняя величина является свойством канала в данный момент времени и изменяется от кадра к кадру. Операция временного сдвига и суммирования учитывает следующие обстоятельства:
  - специальную форму оконной функции, из-за которой каждый кадр смещается на величину меньшую, чем его длительность;
  - память канала связи, обусловленную временным рассеянием (последнее свойство проявляется как в уширении одиночного импульсы за счет частотной дисперсии, так и в размножении импульса на приемной стороне за счет многолучевого распространения).
6. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет исчерпано все исходное сообщение.

В итоге построенный имитатор декаметрового радиоканала может быть использован в двух направлениях. *Ионосферный модуль* имитатора позволяет прогнозировать все традиционно используемые характеристики (МПЧ, напряженность поля, структура сигнала), распространения ДКМВ, включая шумы естественного происхождения и станционные помехи. Важной отличительной особенностью является то, что он позволяет определять АЧХ и ФЧХ канала, его частотные, временные и пространственные корреляционные свойства, а также ожидаемую статистику поля сигнала. Причем, все эти характеристики соответствуют конкретным условиям распространения на трассе, которые, в свою очередь, могут быть заданы прогнозом или данными текущей диагностики среды распространения. Но основное применение компьютерного имитатора – имитационное моделирование прохождения как узкополосных так и широкополосных сообщений через ДКМ-канал связи. Причем следует учитывать два обстоятельства:

- узкополосные сигналы (с полосой до 10 кГц) при современной вычислительной технике могут пропускаться в реальном масштабе времени с использованием в качестве устройства ввода-вывода аналоговых сигналов широко распространенных звуковых плат типа Creative Sound Blaster 16;
- в квазиреальном масштабе времени никаких ограничений на полосу используемых сигналов не накладывается.

В заключении отметим, что авторы успешно применяли описанный компьютерный имитатор для исследования работы как узкополосных, так и широкополосных устройств декаметровых систем связи.

#### Литература

1. Goodman J.M. HF Communication: Science and Technology. New York, 1992, 631p.
2. Барабашов Б.Г., Вертоградов Г.Г. Динамическая адаптивная структурно-физическая модель ионосферного радиоканала //Математическое моделирование. 1996. Т.8.№2. С.3-18.
3. Barabashov B.G., Vertogradov G. Structural Physical Model of Ionosphere Channel//Millennium conference on antennas & propagation. 9-14 April 2000, Davos, Switzerland. (report p0532).

THE COMPUTER SIMULATOR OF THE HF-CHANNEL IN TERMS OF THE STRUCTURAL – PHYSICAL APPROACH

Vertogradov G.G., Vertogradova E.G.

Rostov-on-Don State University, physics faculty, radiophysics department,  
5 Zorge, Rostov-on-Don, 344044 RUSSIA.  
E-mail:vgg@phys.rsu.ru

It is necessary for successful development of high velocity communication systems working in a HF wave band to test framed systems under conditions, maximum approximated to external environment. Until recently the only reliable means of such testing was field testing, since the present phenomenological models [1] of an ionospheric radio channel left out of actual processes in medium and their effect on HF waves propagation. However their high cost and impossibility of reiteration of experiment under the same conditions makes this method poorly effective whilst working up systems and info centres.

Communication facilities, exploiting the entire HF-channel band or the greater part of it, are widely introduced today. At the same time there are no models of the channel permitting to realise testing, trial and, at last, investigations of operation of wide-band communication systems under conditions approximated to actual.

We are going to give an account of build-up and operation experience of the computer simulator, designed in terms of the structural - physical (SP) approach [2, 3] to simulation of ionospheric radio channel.

There are two ways of realisation of the computer simulator based on SP-model. The first one (called time method) presumes description of the equivalent non-stationary ionospheric filter by a pulse response  $h(\tau, t)$ , where  $t$  is the slow time. Channel characteristics change with this time because of slow variations of the time-and-frequency rays' parameters only. These time-and-frequency rays form total multipath field at the reception site. And  $\tau$  is the fast time, which describes the change of information signals.

But we use, whilst constructing channel model, the second approach (called frequency) where filter describes by a dynamic transfer function  $H(\omega, t)$ . Here  $\omega$  is a circular frequency. It's clear that  $H(\omega, t)$  and  $h(\tau, t)$  are coupled by Fourier transform for each fixed  $t$ .

The transfer function of ionospheric channel in SP-model is

$$H(\omega, t) = \sum_{j=0}^{n(\omega, t)-1} a_j(\omega, t) e^{-i \frac{\omega P_j(\omega, t)}{c}} \quad (1)$$

Here  $a_j(\omega, t)$  and  $\frac{\omega P_j(\omega, t)}{c}$  are gain-frequency characteristic (GFC) and phase-frequency characteristic (PFC) of partial  $j$  channel. Each partial channel is shaped by individual time-and-frequency rays (as it already mentioned, the rays interference forms total multipath field at the reception site). Number of rays  $n(\omega, t)$  and non-linear dynamic GFC and PFC of partial channels in (1) were computed on a two-dimensional time-and-frequency grid  $[\omega_k, t_l]$  for given helio- and geo- physical conditions in terms of geometrical optics approximation, when a boundary problem was solved formulated for combined augmented non-linear differential ray equations. These equations were written for three-dimensional heterogeneous magnetoactive ionosphere, the parameters of ionosphere were given by IRI-95 model. The variations of ionospheric plasma are caused on the one hand by diurnal variations of its parameters, and on the other hand by TID.

As a result of such consideration for each  $j$  ray we calculate: a phase path  $P_j(\omega_k, t_l)$ , a group path  $P'_j(\omega_k, t_l)$ , a Doppler translation of frequency  $\delta\omega_j(\omega_k, t_l)$ , an amplitude  $a_j(\omega_k, t_l)$ , outlet and incoming angles as well as a lot of propagation branches. The domain of time-and-frequency space of some branches can be smaller than time-and-frequency space of simulation. The continuous GFC and PFC of partial channels in (1) are computed for each branch using spline - approximation of given rays' parameters. We use the fifth order splines, since the fifth order splines provide functions and their derivatives up to third order with continuity. We take into account, doing this approximation, 1-th, 2-th time and frequency derivatives of the phase path  $P_j$ , which are known after the solving of combined augmented ray equations.

The process of simulation consists of two stages. On first stage, which is the most computationally difficult, the transfer function of the channel  $H(\omega, t)$  is calculated for given time and frequency intervals (this is ionospheric module). On second - the channel simulation is realised in a real or near-real time (module of the signal's "passage"), at that the computer operates as a digital filter using the calculated at the first stage transfer function.

The signal processing is carried out at low (audio) frequency, that allows to construct a digital filter (1) using the fast Fourier transform (FFT) and dividing processed sequence into groups (called frames). During each frame the transfer function of the filter is considered time-independent and is updated when the next frame replaces the

previous. We apply the special algorithm to be sure that the pulse response is continuous in the points of joint of frames. Because of that it is possible to use FFT method whilst realising non-stationary filter.

The module of "passage" of signal-code combinations through SP model (as it was already mentioned the model's parameters were obtained at the first stage with the help of the ionospheric module). The key features of "passage" module are:

- The signalled message is divided into frames, it's duration is  $T \cong 25mc$  (this value is fitted in accordance with the computer experiment and is limited by non-stationarity of ionospheric channel). Each frame is supplemented with two protective intervals  $T_{under}$  and  $T_{up}$ , they contain information about channel's memory. The formed frame is multiplied by special window function. This function satisfies defined requirements and prepares the frame for passage through the model of channel.
- The momentary transfer characteristic of ionospheric radio channel is computed for a given time moment (time moment corresponds to a selected frame). We use for that the binary file whose input parameters are the parameters of the channel. The binary file is prepared at the first stage of simulation by means of the ionospheric module.
- The spectrum of the frame of a transmitted signal is evaluated using FFT method.
- The frame spectrum is multiplied by the momentary transfer characteristic and an inverse FFT is make. As a consequence we obtain a complex image of a frame at the output of the ionospheric channel.
- The complex signal, corresponding to a passing through the model frame, is put in the needed time position and is summed with earlier passed frames.
- The process is iterated till the end of initial message.

The suggested simulator of an ionospheric radio channel has two applications. For example we can obtain all HF propagation characteristics, traditionally used in the radio forecasts. But simulation of passing of both narrow-band and wide-band signals through a HF-channel is the main it's application. We'd like to take note of two features:

- 1) The narrow-band (up to 10 kHz) signals can be passed through the model in real time using widespread Creative Sound Blaster 16 -type sound cards as an input/output device of analog signals.
- 2) There are no band limitations when working in a near-real time.

In the conclusion we notice, that the suggested computer simulator was successfully applied by us for the investigation of operation of both narrow-band and wide-band devices of HF communication system.

#### Reference

1. Goodman J.M. HF Communication: Science and Technology. New York, 1992, 631p
2. Barabashov B.G., Vertogradov G.G. Dinamic adaptiv structural physical model of ionospheric channel// Mathematical modeling. Vol.8, pp. 3-18, February 1996.
3. Barabashov B.G., Vertogradov G.G. Structural Physical Model of Ionosphere Channel //Millennium conference on antennas & propagation. 9-14 April 2000, Davos, Switzerland. (report p0532).