

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МОДУЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ МНОГОЛУЧЕВОЙ КВ-РАДИОЛИНИИ С ПОМОЩЬЮ ЕГО ПРОГРАММНОГО ИМИТАТОРА

А. О. Щирый (Йошкар-Ола)

Введение. Для всесторонней проверки разрабатываемых систем связи применяются имитаторы каналов связи, позволяющие в широких (но допустимых) пределах варьировать параметры канала и исследовать его свойства [1]. Традиционно, такие имитаторы реализовывались аппаратно (в виде прибора), однако развитие вычислительной техники открывает новые возможности, что особенно важно для исследовательских задач, когда используемые алгоритмы должны легко модифицироваться.

Коротковолновые (КВ) ионосферные радиолнии большой протяженности (сотни и тысячи километров) характеризуются многолучевостью распространения, что приводит к замираниям принимаемого сигнала вследствие интерференции лучей. Дело осложняется тем, что условия распространения КВ – радиоволн зависят от множества суточных, сезонных, гео- и гелиофизических факторов, протяженности и географического положения радиолнии и др. Одной из важнейших характеристик любого канала связи является его комплексная передаточная функция. Модуль комплексной передаточной функции называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ).

Цель работы – разработка программного имитатора и исследование посредством него свойств тонкой структуры АЧХ многолучевой КВ – радиолнии.

Математическая модель. Для оценки (с помощью ионозонда, использующего сигналы с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ)) с высоким частотным разрешением АЧХ многолучевой КВ – радиолнии была построена математическая модель [2], суть которой заключается в следующем.

В приемнике ЛЧМ-ионозонда происходит сжатие принятого сигнала в частотной области, состоящее в его умножении на сигнал гетеродина, комплексно-сопряженный излучаемому сигналу и дальнейшему спектральному анализу сигнала разностной частоты, в результате чего разделяются дискретные моды распространения сигнала. Результатом работы ионозонда является ионограмма, характеризующая зависимость амплитуды сигнала A от частоты f и времени группового запаздывания $\tau(f)$.

В приближении геометрической оптики передаточную функцию радиоканала с дискретной многолучевостью можно представить в виде суммы передаточных функций m отдельных лучей $H_i(f)$:

$$H(f, t) = \sum_{j=1}^m H_j(f, t). \quad (1)$$

Передаточную функцию отдельного луча с амплитудой $A_i(f)$ и фазой $\varphi_i(f)$ можно записать в виде (считая амплитуду не меняющейся за время Δt в полосе канала Δf):

$$H_j(f, t) = A_j(f) e^{-i\varphi_j(f, t)}. \quad (2)$$

Фаза находится как интеграл от времени группового запаздывания по частоте. Постоянная интегрирования равна начальной фазе первой точки луча $\varphi_j(f, t_0)$. Для получения аналитического выражения $\tau(f)$ на ионограмме наклонного ЛЧМ-зондирования радиолнии выделяются области, ограничивающие моды сигнала. Затем в выделенных областях в каждом спектре находятся точки максимума амплитуды. Далее производят-

ся их аппроксимация полиномом n -ой степени (обычно $n = 1.4$). Таким образом находим время группового запаздывания как функцию частоты.

Также в выражении фазы учитывается вклад доплеровского смещения частоты F_d [2, 3]. Оно влияет не на форму АЧХ, а на ее движение во времени.

Амплитуда моды находится по ионограмме (функция частоты и времени группового запаздывания), затем для удаления одиночных выбросов (вызванных, скорее всего, ошибкой выделения моды) подвергается медианной фильтрации.

В результате, получается следующее выражение для оценки АЧХ многолучевой ионосферной КВ-радиолинии [2]:

$$|H(f, t)| = \left| \sum_{j=1}^m |H_j(f)| e^{-i \left(\varphi_j(f, t_0) + 2\pi \cdot \sum_{k=0}^n \frac{a_{jk}}{k+1} ((f+\Delta f)^{k+1} - f^{k+1}) + 2\pi \cdot F_d \cdot \Delta t \right)} \right| \quad (3)$$

Программный имитатор АЧХ КВ – радиолинии. На основе построенной полуэмпирической модели разработан программный имитатор АЧХ многолучевой ионосферной КВ – радиолинии. Программное обеспечение (ПО) разработано в среде Borland Delphi на платформе Windows 9x/NT/2000/XP. Заметим, что описываемое в данной работе ПО относится к подсистеме вторичной обработки [4] (первичной называется обработка в реальном времени во время эксперимента (автоматическая регистрация без участия человека, в т.ч. круглосуточно); вторичной – после эксперимента с удобной для человека скоростью). На рис. 1 показано окно работы с ионограммой и треками мод распространения КВ – радиосигнала.

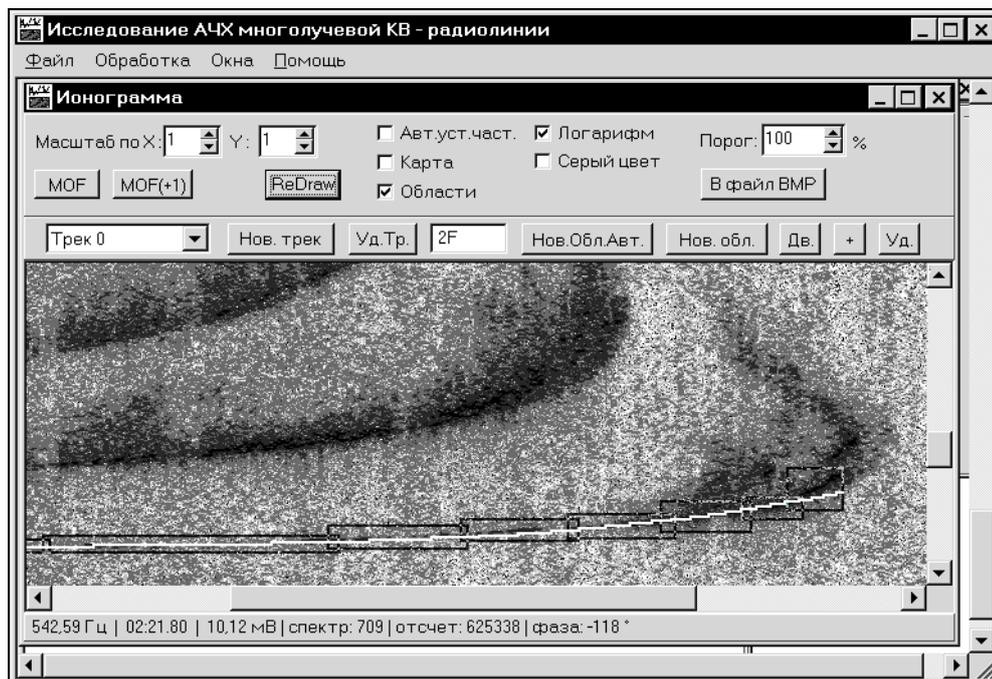


Рис. 1

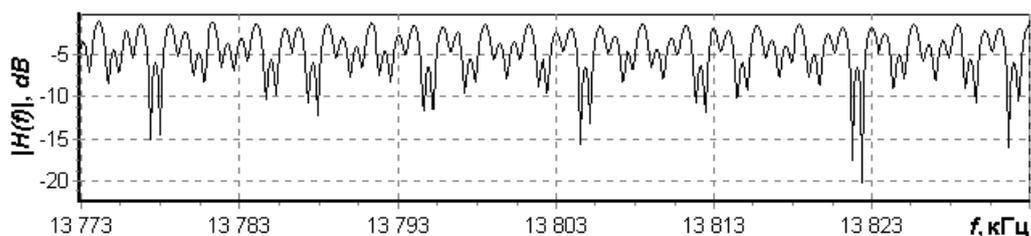


Рис. 2

Пример полученной АЧХ КВ-радиолинии приведен на рис. 2. В таком виде полученная АЧХ может быть использована для имитации радиоканала в традиционном понимании: спектр информационного сигнала (представляющего собой смесь несущего колебания с модулирующей сигнальной посылкой) перемножается с АЧХ ионосферного радиоканала. В зависимости от целей исследования, могут также быть учтены: аддитивные помехи в радиоканале, АЧХ приемника, внутренние помехи приемника, в т.ч. нелинейные процессы в нем и т. д. Так что, реализованный программный имитатор АЧХ КВ-радиолинии является основой имитатора всего («сквозного») радиоканала.

Однако, цели настоящей работы предполагают также исследования свойств АЧХ КВ-радиолинии, выявлении наиболее общих закономерностей ее «поведения». Такие исследования были проведены с помощью разработанного программного имитатора, АЧХ КВ-радиолинии. Ключевыми параметрами используемой модели АЧХ являются амплитуды мод КВ-радиосигнала и межмодовые задержки (разности времен их группового запаздывания) [2]. Общепринятый подход [5] при подобных исследованиях состоит в разбиении всего диапазона распространения на интервалы по числу и типам мод распространения КВ – радиосигнала и отнесения наиболее часто встречающихся сочетаний числа и типов мод к так называемым моделям многолучевости (ММЛ). Средства идентификации ММЛ также программно реализованы (см. рис. 3).

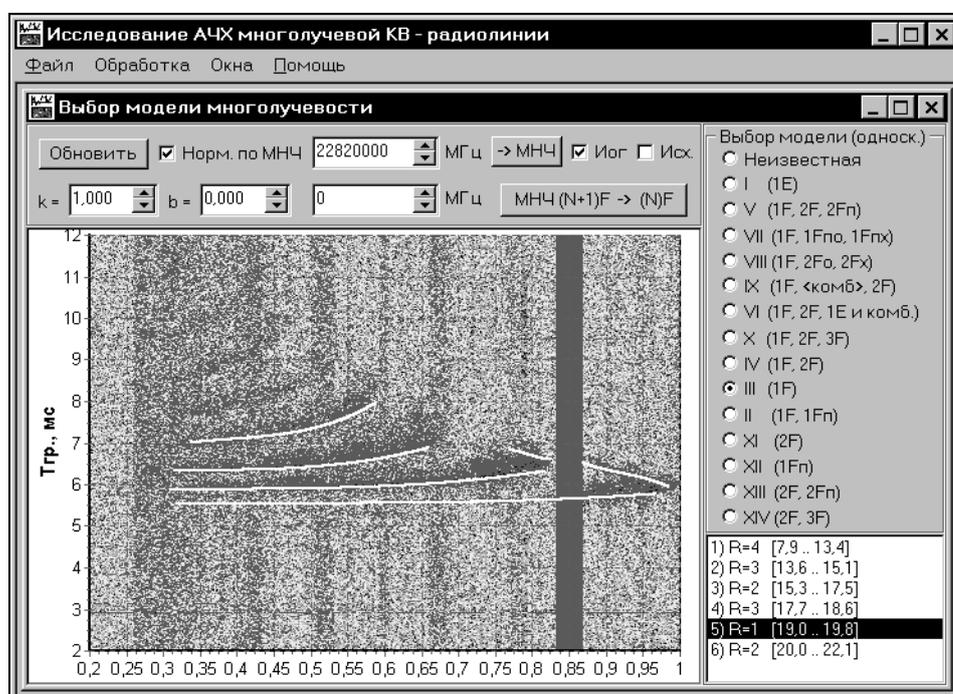


Рис. 3

Разработанное ПО позволило собрать обширную статистику по вариациям межмодовых задержек и амплитуд парциальных мод. Всего было обработано более 5500 ионограмм наклонного зондирования ионосферных радиолиний различной протяженности и географической ориентации.

Вариации амплитуд парциальных мод. Нужно сразу отметить, что амплитудные характеристики парциальных мод определяются типом используемой антенны, так как различные моды распространения имеют различные углы прихода, а в ряде случаев и различную поляризацию. Естественно, антенны с разной диаграммой направленности в вертикальной плоскости будут давать разную информацию о соотношениях амплитуд различных мод. На результаты измерения межмодовых задержек диаграмма направленности антенны не повлияет. В проведенных экспериментах по наклонному зондированию ионосферы использовалась антенна типа широкополосный горизонтальный диполь. Поэтому полученная статистика по амплитудам мод может считаться достоверной только для данного типа антенны.

Исследования показали, что математические ожидания амплитуд «основных» мод примерно равны. К «основным» модам были отнесены $1F_2$, $2F_2$, $3F_2$, $1F_{2п}$ для однокачковых радиолиний и мод $2F_2$, $3F_2$, $4F_2$, $2F_{2п}$ для двухкачковых радиолиний. Индексом «п» обозначены верхние лучи (Педерсеновские моды). С ростом порядка моды наблюдается увеличение разброса значений: коэффициент вариации возрастал с 0,1 для моды наименьшего порядка до 0,4 для наибольшего порядка (из «основных»); для верхних лучей коэффициент вариации амплитуды моды составляет 0,3–0,4.

Вследствие магнитоионных расщеплений радиолуча на обыкновенную (O) и необыкновенную (X) компоненты, на некоторых модах наблюдаются биения сигнала (когда разрешающей способности ионозонда по задержке недостаточно) с периодом, обратным межмодовой задержке $\Delta\tau$ между O и X. Однако, постоянная составляющая, как правило в несколько раз (в 3–10) превышает амплитуду биений (см. рис. 4, жирн. линия – АЧХ моды после медианной фильтрации). Период биений позволяет определять $\Delta\tau$ между O и X: на приведенных в качестве примера фрагментах на рис. 4 период замирающий АЧХ составляет 250–500 кГц, следовательно $\Delta\tau \sim 2 \dots 4$ мсек.

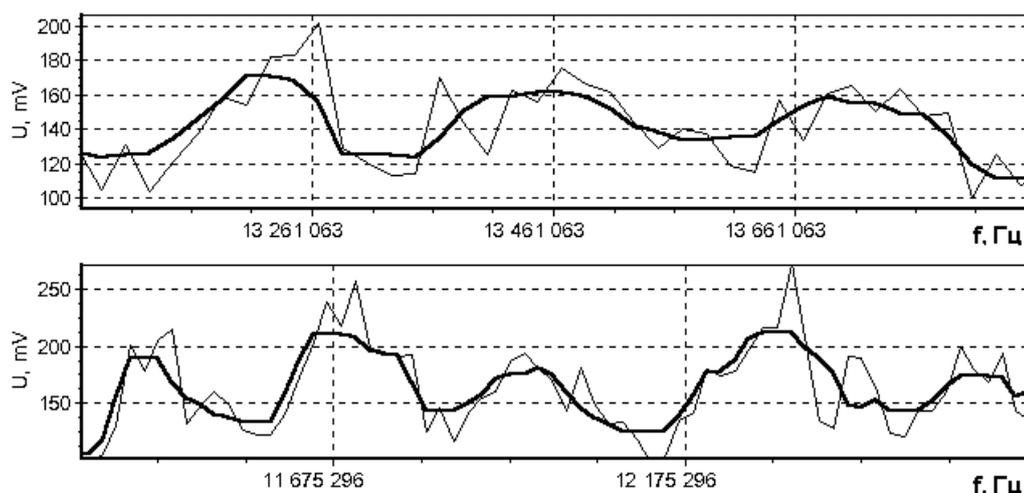


Рис. 4

Таким образом, для оценочных расчетов, можно считать равными амплитуды мод $1F_2$, $2F_2$, $3F_2$, $1F_{2п}$ для однокачковых радиолиний и мод $2F_2$, $3F_2$, $4F_2$, $2F_{2п}$ для

двухскачковых радиолиний. Не обнаружено значимых частотных, суточных и сезонных зависимостей вариаций амплитуд парциальных мод (на интервалах ММЛ).

Значит, определяющими для вариаций АЧХ многолучевой КВ-радиолинии остаются межмодовые задержки.

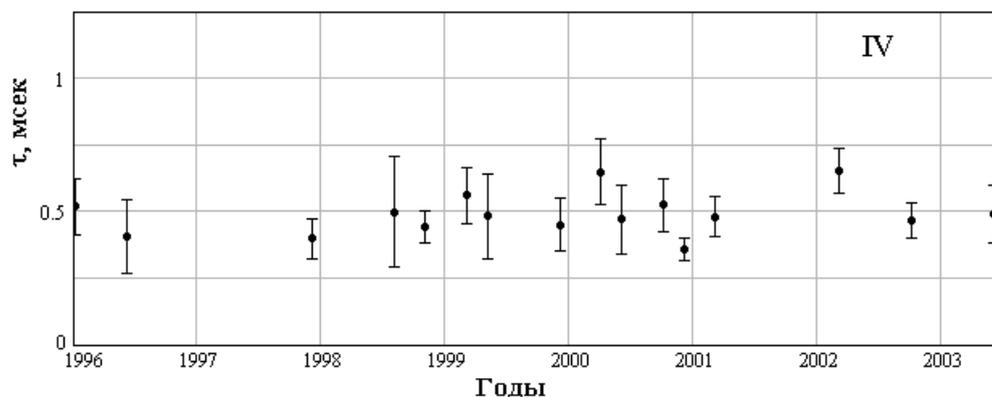


Рис. 5

Вариации межмодовых задержек (ММЗ). Равенство амплитуд мод существенно упрощает расчет характеристик АЧХ: по одним только ММЗ можно будет судить о виде АЧХ радиолинии (период замираний обратно пропорционален ММЗ [2]). ММЗ вычислялись относительно минимальной на текущей частоте задержки. Статистика ММЗ собиралась отдельно для каждой радиолинии и ММЛ. Получены суточные, сезонные, сезонно-годовые вариации ММЗ для каждой ММЛ. В качестве примеров на рис. 5,6 показаны вариации ММЗ, причем рис. 5 иллюстрирует сезонно-годовой ход ММЗ полученный по 2446 ионограммам 1996–2003 гг. на трассе 2-1, а рис.6 суточный ход ММЗ 1 марта 2001 на трассах 2-1, 3-1. Радиотрассы: 2-1 – Хабаровск–Йошкар-Ола; 3-1 – Великобритания–Йошкар-Ола. ММЛ обозначены (в скобках для двухскачковых): IV – $1F_2, 2F_2 (2F_2, 3F_2)$; V – $1F_2, 2F_2, 2F_{2п} (2F_2, 3F_2, 3F_{2п})$; XIV – $2F_2, 3F_2 (3F_2, 4F_2)$. Для моделей с двумя модами на картинках приведено по одному графику, для модели с тремя модами – два (т. е. задержки второй и третьей мод относительно первой).

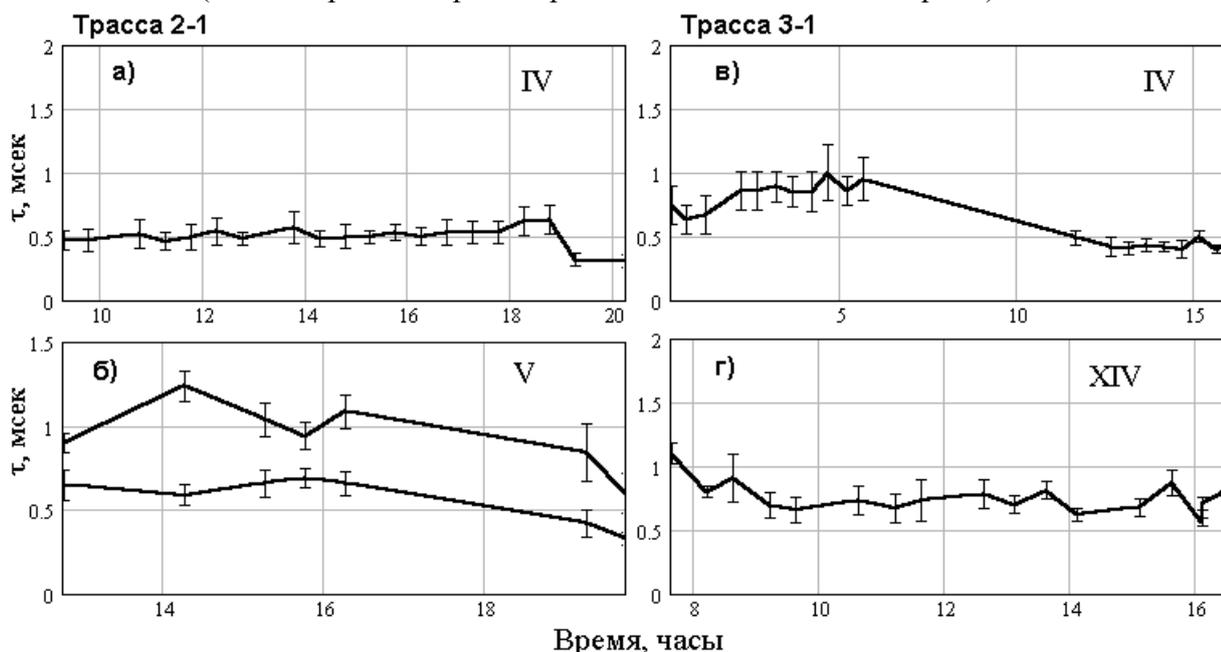


Рис. 6

Заключение. Проведенное имитационное моделирование на основе разработанной полуэмпирической модели и полученная статистика по амплитудам и задержкам парциальных мод, позволили разработать простую инженерную методику оценки характеристик АЧХ многолучевой КВ-радиолинии.

Литература

1. **Бобровская И.К., Осипов Б.Г., Жигач В.П., Кожин В.С., Федорова Е.Л.** Имитаторы каналов связи//Электросвязь, 1979, №6. – с. 26–29.
2. **Щирий А.О.** Методика и результаты исследования АЧХ многолучевой ионосферной КВ-радиолинии с использованием ЛЧМ-ионозонда//Труды 5-ой Сессии молодых учёных «Гелио- и геофизические исследования». – Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2002. – с. 88–90.
3. **Иванов В.А., Колчев А.А., Шумаев В.В.** Определение передаточной функции широкополосного КВ – радиоканала для отдельных мод распространения//Сб. ст. «Проблемы дифракции и распространение волн». – М.: МФТИ, 1995. – с. 122–131.
4. **Щирий А.О.** Автоматизированный программно-аппаратный комплекс обработки в реальном времени сигналов в системе частотного обеспечения КВ-связи//Тез. докл. IV Всерос. науч.-техн. конф. «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике». – Чебоксары: ЧГУ, 2002. – с. 323–324.
5. **Хмельницкий Е.А.** Оценка реальной помехозащищенности приема сигналов в КВ диапазоне. – М.: Связь, 1975. – 232 с.