

Комплексный метод зондирования для определения параметров ионосферных каналов связи

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

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Поволжский государственный технологический университет»

424000, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3, RyabovaMI@volgatech.net

Представлены результаты разработки и исследования комплексного метода зондирования для определения параметров ионосферных каналов связи.

Presented the results of research and development of complex sounding method for determining the parameters of the ionospheric communication channels.

Введение

В задаче распространения радиосигналов (спектра гармонических колебаний) в ионосфере часто используется физический подход [1], когда вначале исследуется прохождение в среде электромагнитного колебания, имеющего во временной области гармонический вид. Переход к сигналу в этом случае связано с учетом спектрального состава сигнала. Это вызывает значительные вычислительные трудности и не обладает необходимой для общего решения задачи наглядностью. Кроме того, возникают трудности использования полученного решения для сигналов иной формы.

Другой подход развивался в радиотехнике. Его можно назвать системным [2]. В нем среда заменяется некоторой эквивалентной системой, обладающей частотной $H(f)$ и импульсной $h(\tau)$ характеристиками. В этом случае сигнал на выходе системы определяется интегралом свертки входного сигнала с импульсной характеристикой системы. При использовании данного подхода, однако, возникает проблема перехода к эквивалентной системе, связанная с установлением связи между механизмами распространения сигнала в ионосфере от передатчика к приемнику и характеристиками канала. В решении этой проблемы получает развитие гибридный подход. В этом случае физический подход дает описание механизмов распространения электромагнитных колебаний заданной частоты от передатчика к приемнику. Решения данной задачи позволяет синтезировать соответствующую эквивалентную систему, называемую радиоканалом, и определить ее частотную и импульсную характеристики с учетом стохастического характера распространения. Таким образом, гибридный подход позволяет с общих позиций исследовать распространение в диспергирующих средах SSB сигналов. Наиболее ценным при этом является возможность решения более значимой в данной проблеме задачи - исследования системных характеристик эквивалентной системы (радиоканала).

В настоящее время развитие гибридного подхода является актуальным направлением исследования задачи распространения радиосигналов в ионосфере. Поэтому рассмотрим сущность гибридного подхода более подробно, имея в виду случай исследования распространения СРС на коротких ионосферных радиотрассах (случай квазизенитного распространения (КЗР)).

Цель работы – развитие комплексного метода зондирования для определения параметров ионосферных каналов связи.

Составная часть гибридного подхода - физический метод исследования распространения ВЧ в ионосфере часто базируется на уравнении Гельмгольца (уравнении волнового типа), которое для гармонического колебания без учета магнитного поля Земли, имеет вид:

$$\nabla^2 E + k_0^2 n^2 E = 0, \quad (1)$$

где E - электрическое поле,

$k_0 = \omega/c = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 - длина волны в вакууме,

$\omega = 2\pi f$, f - частота волны,

c - скорость света в вакууме,

$n(\vec{r}, f, t, T)$ - комплексный показатель преломления.

Показатель преломления $n(\vec{r}, f, t, T)$ определяется средой распространения – ионосферой и зависит от частоты сигнала, текущего времени и «медленного времени», определяющего медленные изменения среды в канале распространения. Обычно медленное время предполагается почти неизменным за время анализа сигнала. Поэтому оно входит в показатель преломления как параметр и может учитывать изменения в канале от одной реализации сигнала к другой, например медленные глубокие замирания сигнала.

Существует ряд методов решения уравнения Гельмгольца. Все они приближенные. Наибольшее распространение получил метод геометрической оптики, когда механизм распространения волны от передатчика к приемнику описывается лучом.

В задачах, решаемых в данной работе, заданы пункты передачи и приема связного сигнала. Для уравнения Гельмгольца (дифференциального) это означает задание граничных условий, которое, как известно, приводит к дискретным решениям (многолучевости). Это могут быть лучи, приходящие в точку приема одним или несколькими скачками, нижним и верхним (луч Педерсена) лучами. Магнитное поле Земли приводит к двойному лучепреломлению и возникновению магнитоионных лучей (обыкновенному и необыкновенному). Влияние магнитного поля особенно проявляется при КЗР.

Удобство использования лучевого подхода при рассмотрении распространения ВЧ сигналов в ионосфере привело к тому, что используемая терминология связана с лучами. Например – термин многолучевость, дискретная и диффузная многолучевость и т.п..

В лучевом приближении для монохроматической волны $E = E(\vec{r}) \exp(i\omega t)$ многолучевое решение уравнения (1) имеет вид [3]:

$$E(\vec{r}, f, T) = \sum_{j=1}^m E_j(\vec{r}, f, T) = \sum_{j=1}^m u_j(\vec{r}, f, T) \exp[-ik_0 \psi_j(\vec{r}, f, T)], \quad (2)$$

где $u_j(\vec{r}, f, T)$ - амплитуда поля j -ого луча,

$\psi_j(\vec{r}, f, T)$ - эйконал j -ого луча,

m - количество принимаемых лучей,

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c},$$

λ_0 - длина волны в вакууме.

Видим, что эйконал это фазовый путь, измеренный в длинах волн.

При интерференции, приводящей к замираниям сигнала, важны фазовые соотношения. Набег фазы волны в ионосфере в лучевом приближении можно записать в виде [4]:

$$\varphi_j(\omega, T) = \frac{\omega}{c} \int_{s_j(T)} n(\omega, \vec{r}, T) d\vec{r}, \quad (3)$$

где $s_j(T)$ - длина дуги вдоль искривленного луча,

$$\varphi_j = k_0 \psi_j = 2\pi \frac{\psi_j}{\lambda_0}.$$

Без учета магнитного поля и соударений показатель преломления можно записать в виде:

$$n^2 = 1 - \frac{k}{f^2} N(\vec{R}, h, T), \quad (4)$$

где k - константа,

$$\vec{r} = (\vec{R}, h),$$

$N(\vec{R}, h)$ - профиль электронной концентрации в заданной точке \vec{R} на земном шаре.

Видим, что фаза волны определяется профилем концентрации электронов. Поэтому физический подход связан с выбором такой модели среды, которая позволяет оценивать профиль концентрации в любой заданной на земле точке для любого времени суток и сезона. Часто для этих целей используется модель IRI при аппроксимации, задаваемого ей профиля электронной концентрации, сегментами парабол (квазипарабол - MQR аппроксимация).

Системный подход основан на том, что частотная зависимость реакции системы на сигналы вида $\exp(i\omega t)$ в радиотехнике является частотной характеристикой (ЧХ) линейного четырехполюсника:

$$H(f, T) = E(f, T) = \sum_{j=1}^m H_j(f, T) = \sum_{j=1}^m H_{0j}(f, T) \exp[-i\varphi_j(f, T)], \quad (5)$$

для которого зависимость $H_{0j}(f, T) = u_j(f, T)$ является амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), а $\varphi_j(f, T)$ - фазо-частотной характеристикой (ФЧХ) для j -ого тракта [5].

Гибридный подход основан на том факте, что распространение гармонического колебания по парциальному лучу приводит к смещению ее фазы (набегу) на $\varphi_j(f, T)$ и изменению ее амплитуды на $H_{0j}(f, T)$. Поэтому распространение ВЧ сигнала по лучам можно заменить его распространением в многомерной системе (радиоканале) с множеством входов (по лучам) и одним выходом. При этом каждый парциальный тракт (вход) имеет свою ФЧХ и АЧХ. Учитывая изменения во времени среды распространения (перемещения уровня отражения или изменения интегральной вдоль луча концентрации электронов) получим, что ЧХ - $H(T, f)$ является также функцией времени T , т.е. линейная система имеет переменные во времени параметры.

Переход во временную область к импульсной характеристике (ИХ) многомерной системы (радиоканала) осуществляется с использованием преобразования Фурье:

$$\begin{aligned}
h(T, \tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} H(T, f) \cdot \exp(if\tau) df = \int_{f_1}^{f_2} H(T, f) \cdot \exp(if\tau) df = \\
&= \sum_{j=1}^m \int_{f_1}^{f_2} H_j(T, f) \cdot \exp(if\tau) df
\end{aligned}
\tag{6}$$

Видно, что ИХ является функцией как «быстрого» - τ (задержки), так и «медленного» - T времени, пределы интегрирования в (6) ограничены отрезком $[f_1, f_2]$ из-за включения в состав радиоканала каналообразующей аппаратуры. Последнее, позволяет преодолеть известные сложности, связанные со свойствами несобственных интегралов.

Заключение.

В ходе данного исследования рассмотрены достоинства и недостатки применяемых ранее физического и радиотехнического подходов исследования распространения радиосигналов в ионосфере Земли. Предложен и апробирован комплексный метод мониторинга.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 13-07-00371-а; 13-02-00524-а; 15-07-05280; 15-07-05294), госзадания Министерства образования и науки РФ (проекты 8.2697.2014/К, 3.2695.2014/К).

Литература

1. Гинзбург, В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме / В.Л. Гинзбург. – М.: Наука, 1967.
2. Иванов, В. А. Основы радиотехнических систем ДКМ диапазона / В. А. Иванов, Н. В. Рябова, В. В. Шумаев. – Йошкар-Ола, 1998. – 204 с.
3. 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.
4. Иванов В.А. Зондирование ионосферы и декаметровых каналов связи сложными радиосигналами // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы, 2010. № 1 (8). С. 3-37.
5. Аллин, И.В. Классификация пространственной фокусировки видеоимпульсов в плазме на основе теории катастроф / И.В. Аллин, А.С. Крюковский, Д.С. Лукин, Д.В. Растягаев //Нелинейный мир. - 2009. - Т.7. - № 10. - С. 727-739.