

Б.В. ЖУКОВ, канд. техн. наук, К.В. НЕТРЕБЕНКО, канд. техн. наук

ДИАГНОСТИКА ТИПОВ УСЛОВИЙ ЗАГОРИЗОНТНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ УВЧ РАДИОВОЛН ПО ДАННЫМ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ В ОСВЕЩЕННОЙ ОБЛАСТИ

Введение

В последние десятилетия активно создаются и используются глобальные навигационные системы (GPS, ГЛОНАСС и др.). Большое количество навигационных ИСЗ, предварительно известные траектории движения и рабочие частоты излучателей, определяют перспективность использования бортовых источников для радиопросвечивания пограничного слоя атмосферы в интересах диагноза и прогноза условий распространения УВЧ радиоволн практически в любом регионе земного шара.

Данные системы предназначены для решения задач навигации, что определяет возможность приема сигнала бортовых источников практически только в освещенной области.

Использование данных радиопросвечивания в интересах диагноза и прогноза связано с восстановлением высотного профиля коэффициента преломления воздуха в рамках обратной задачи рефракции, решение которой не всегда корректно [1].

Однако в ряде ситуаций для выполнения практических задач оказывается полезной информация о типах [2, 3] условий распространения в зоне геометрической тени (стандартная атмосфера, наличие инверсий, аномальные условия).

В работе исследуется возможность диагноза типов условий распространения радиоволн УВЧ диапазона в зоне ближней тени по результатам вейвлет-анализа дистанционных зависимостей множителя ослабления, измеренных в освещенной области.

Методика получения дистанционных зависимостей

Схема расположения корреспондирующих пунктов при снятии зависимостей множителя ослабления $V(R)$ показана на рис. 1, где 1 – береговой приемный пункт, размещенный на высоте около 25 м над урезом воды; 2 – источник радиоизлучения УВЧ диапазона ($\lambda \approx 35$ см), расположенный на борту самолета, выполнявшего радиальные полеты вдоль траектории АВ на высотах 100 или 1500 м; 1OD – касательная к поверхности Земли; D – точка на траектории полетов, расстояние до которой от точки 1 соответствует дальности радиогоризонта. Для проведения исследований были использованы реализации $V(R)$ УВЧ диапазона из базы данных [2], соответствовавших I – IV типам условий распространения в зоне геометрической тени, где тип I соответствовал

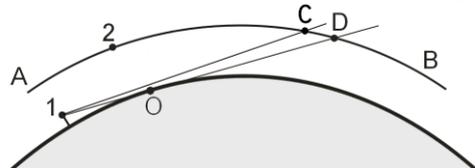


Рис. 1. Схема расположения корреспондирующих пунктов

условиям близким к стандартным, тип II – наличием инверсии, тип III – наличием приподнятой версии, тип IV – аномальным условиям распространения. В УВЧ диапазоне приводные инверсии не оказывают существенного влияния на условия распространения, что приводит к совпадению условий распространения для I и II типов. Поэтому для проведения анализа были использованы дистанционные зависимости II – IV типов.

Исследования проведены для дистанционных зависимостей $V(R)$, охватывавших освещенную область и зону тени, а также участков, полученных только в освещенной области (см. участок CD траектории АВ на рис. 1), а именно – в диапазоне удалений самолета от 20 до 62 км при высоте полета 100 м и от 120 до 180 км при высоте полета 1500 м.

Методика обработки экспериментальных данных

На начальном этапе анализа дистанционных зависимостей множителя ослабления $V(R)$ был опробован коррелограммный метод спектрального оценивания. Оказалось, что оценки

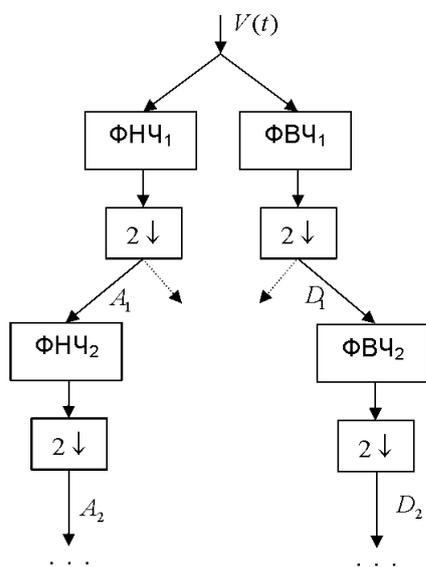


Рис. 2. Структурная схема вейвлет-анализа

спектров дистанционных зависимостей даже для одного типа условий распространения имеют заметное отличие, поэтому такой подход не представлялся эффективным для диагноза типа условий распространения. Визуальное сравнение хода зависимостей $V(R)$ различных типов натолкнуло на идею использования динамического спектрального оценивания, дающего двумерное представление сигналов в плоскости время – частота и позволяющего выявить локальные временные особенности. В последнее десятилетие эти методы активно вытесняются методами вейвлет-анализа [4], было принято решение применить пакетное вейвлет-разложение, как наиболее полное вейвлет-представление дискретных сигналов.

В соответствии с частотным подходом к дискретному вейвлет-преобразованию, процедуру анализа дистанционных зависимостей, представляющих из себя дискретную последовательность отсчетов множителя ослабления, взятых через равноотстоящие интервалы дальности, можно рассматривать как поэтапную процедуру фильтрации. Дискретную пере-

менную дальности $R = \Delta R n$, $n = \overline{1, N}$ (где N – количество измерений на всем диапазоне дальностей, ΔR – интервал дальности, через который измерялся множитель ослабления) можно заменить на переменную безразмерного дискретного времени $t = \Delta t n$ и произвести пакетное вейвлет-разложение зависимостей $V(t)$. При этом последовательность $V(t)$ подается одновременно на вход ФНЧ₁ и ФВЧ₁ (рис. 2), частотные характеристики которых разбивают весь частотный диапазон спектра последовательности, простирающийся, в соответствии с теоремой Котельникова, от 0 до $1/2\Delta t$ на два равных не перекрывающихся участка. Поскольку ширина спектров выходов этих фильтров вдвое меньше, производится децимация (прореживание) отсчетов в два раза. Дециматоры показаны на рисунке блоками с обозначением $2\downarrow$. Выходы дециматоров представляют собой коэффициенты вейвлет-разложения первого уровня ($lev = 1$).

Выходы дециматоров в ветке ФНЧ_{lev} называются аппроксимирующими коэффициентами A_{lev} , а в ветке ФВЧ_{lev} – детализирующими коэффициентами D_{lev} уровня lev . Коэффициенты, полученные на данном уровне разложения, подвергаются дальнейшему разложению до заданного уровня, аналогично тому, как это осуществлено на первом уровне разложения.

На уровнях $lev > 1$ появляются также смешанные коэффициенты (на рис. 2 не показаны), например аппроксимирующие коэффициенты в ВЧ ветке. Для нескольких уровней lev вейвлет-разложения проводился поиск таких коэффициентов разложения, которые бы максимально различались у зависимостей $V(t)$ каждого из рассматриваемых типов, т.е. были бы наиболее информативны и обладали заметным сходством в рамках одного типа. В данных исследованиях смешанные коэффициенты не обеспечили нужную информативность, поэтому для рассмотрения брались лишь чистые аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты: коэффициенты $A_4(m)$ и коэффициенты $D_2(l)$, поэтому в дальнейшем индексы уровня разложения и порядковые номера m и l будут опущены. Аппроксимирующие коэффициенты несут информацию об НЧ части спектра, которая отвечает за медленные измене-

ния анализируемого процесса. Изучение этих коэффициентов позволило найти отличия дистанционных зависимостей разных типов, исключая из внимания быстрые флуктуации радиополя. Детализирующие коэффициенты несут информацию о ВЧ компонентах спектра, поэтому в этих коэффициентах отображаются быстрые изменения множителя ослабления.

Обработка и анализ экспериментальных данных

Пригодность выбранного метода обработки данных была оценена на дистанционных зависимостях множителя ослабления, полученных при высоте бортового источника 100 м, для которых отсчеты значений $V(R)$ определялись по дальности с интервалом $\Delta R = 2$ км. Для каждого типа были использованы по две зависимости $V(R)$. Дальность радиогоризонта для этой высоты полета составляет $R_2 = 62$ км. Таким образом, максимальное удаление практически равнялось удвоенному R_2 . Зависимости типа II рис. 3, а близки к расчетной зависимости множителя ослабления для стандартной атмосферы (тип I), которые представлены на всех графиках штриховыми линиями. Тип II характеризуется невысокой приводной инверсией в высотном профиле коэффициента преломления $n(h)$, поэтому для волн дециметрового диапазона захватывания, свойственного волноводному распространению, не происходит в силу малой высоты тропосферного волновода: рабочая длина волны больше критической $\lambda_{кр}$ [5]. Вид соответствующих коэффициентов A представлен на рис. 4, а. Поскольку в аппроксимирующих коэффициентах вейвлет-разложения содержится информация лишь о НЧ составляющих спектра начиная с нулевой частоты, то эти коэффициенты отражают медленные изменения радиополя вдоль дистанции удаления R . Поэтому на поведении коэффициентов A не отражаются быстрые флуктуации поля и интерференционные лепестки.

На рис. 3 б представлены дистанционные зависимости типа III, ход которых определяется влиянием приподнятой инверсии высотного профиля коэффициента преломления $n(h)$, формирующей отражение радиоволн в область тени. Соответствующие этим зависимостям аппроксимирующие коэффициенты приведены на рис. 4, б. Дистанционный ход множителя ослабления в освещенной зоне и непосредственно за радиогоризонтом аналогичен зависимостям для стандартной атмосферы, но в области глубокой тени имеет место существенный рост $V(R)$. Это отражается на ходе соответствующих коэффициентов A , имеющих характерный провал в середине кривой.

На рис. 3, в приведены зависимости типа IV, для которых множитель ослабления в зоне тени близок к уровню в свободном пространстве. Соответствующие коэффициенты A даны на рис. 4, в. Ход коэффициентов для данного типа условий распространения имеет существенно пологий характер, что напрямую связано с незначительным изменением среднего уровня множителя ослабления по всей протяженности.

Детализирующие коэффициенты вейвлет-разложения D несут информацию о ВЧ компонентах спектра вплоть до частоты Найквиста, а значит в этих коэффициентах отображаются лишь быстрые изменения анализируемых процессов. Сравнение поведения коэффициентов D различных типов II, III и IV (рис. 5, а – в) показывает, что отличием зависимостей $V(R)$ типа III от типа II является наличие быстрых осцилляций поля в зоне тени, вызванных многолучевым распространением при отражении от приподнятой инверсии. Это должно подтверждаться поведением детализирующих коэффициентов. Действительно, сравнение коэффициентов D типов II и III показывает, что коэффициенты у типа III имеют заметно большую дисперсию для второй половины порядковых номеров l , которые условно соответствуют зоне тени. Для типа IV коэффициенты D заметно отличаются от нуля практически для всех l (рис. 5, в), т.к. поле носит быстро флуктуирующий характер на всей трассе. Это вызвано особенностью данного типа условий распространения [2]: либо многолучевостью при отражении от протяженных приподнятых инверсий профиля $n(h)$, либо интерференцией при многомодовом режиме в случае мощного тропосферного волновода, либо совместным

воздействием указанных механизмов. Таким образом, из анализа коэффициентов вейвлет-разложения дистанционных зависимостей множителя ослабления, взятых с максимальным удалением $2R_2$ следует, что как аппроксимирующие, так и детализирующие коэффициенты по отдельности выявляют различия трех рассмотренных типов.

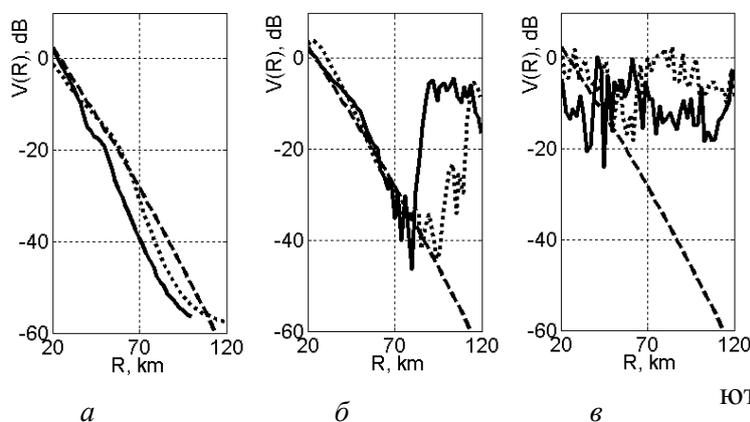


Рис. 3. Дистанционные зависимости множителя ослабления ($h=100$ м): а – тип II; б – тип III; в – тип IV

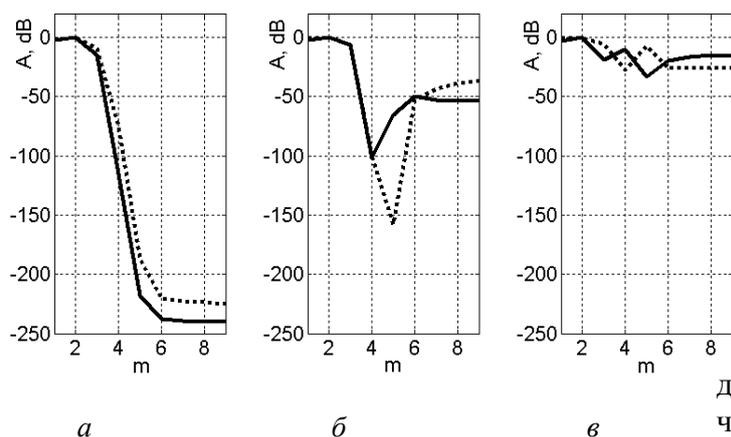


Рис. 4. Аппроксимирующие коэффициенты вейвлет-разложения ($h=100$ м): а – тип II; б – тип III; в – тип IV

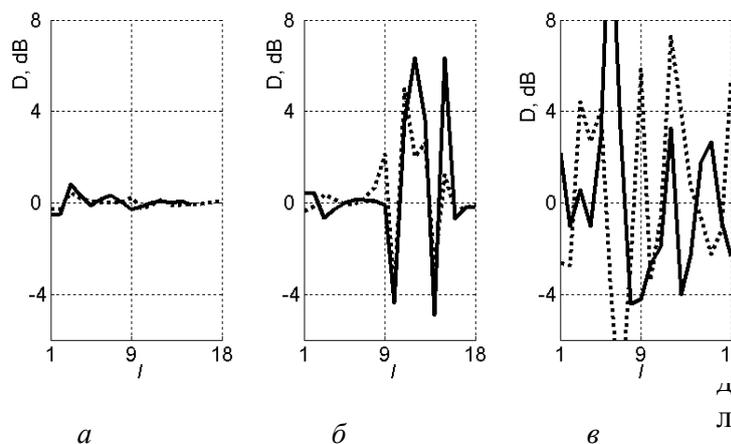


Рис. 5. Детализирующие коэффициенты вейвлет-разложения ($h=100$ м): а – тип II; б – тип III; в – тип IV

С уменьшением анализируемого гэрвала дальностей до $R=20$ – км аппроксимирующие коэффициенты для типа III более не имеют характерного провала, поскольку с-зависимости $V(R)$ на дистанции 80 км лишь монотонно убывают. Этому для данного диапазона удалий коэффициенты A для типов II и III неразличимы, но для типа IV различия коэффициентов A сохраняются. В то же время сохраняются особенности детализирующих коэффициентов D , отмеченные ранее (для сокращения объема статьи рисунки не приводятся). При дальнейшем уменьшении рассматриваемого гэрвала дальностей вплоть до радиогоризонта ($R=20$ – 60 км) детализирующие коэффициенты также сохраняют отличие только для типа IV. Сложность выявления отличий типов II и III на расстояниях с максимальным удалением ≤ 80 км объясняется тем, что ход самих дистанционных зависимостей на этих дистанциях практически не различим, так как эффекты, вызываемые приподнятыми инверсиями $n(h)$ при высоте источника 100 м не проявляются.

Практический интерес для диапазона представляет анализ зависимости $V(R)$ при высоте источника, превышающей высоты приподнятых версий. Такие дистанционные зависимости множителя ослабления для трех типов условий распространения, полученные для высоты поля зрения $h=1500$ м, приведены на рис. 6; гэрвал $\Delta R=1$ км. Дальность радиогоризонта в этом случае составляет 178 км. Приведенные дистанционные зависимости анализировались для интервала удаления $R=100$ – 180 км. Однако для наглядности

зависимости $V(R)$ для типа III включают и зону тени. Преимущественно, ход дистанционных зависимостей в области тени носит такой же характер, что и для высоты передающей антенны 100 м. Отличительной чертой является то, что источник излучения находится выше высоты приподнятых инверсий. Поэтому радиосигнал бортового источника, прошедший через приподнятую инверсию в освещенной области, должен нести информацию, по крайней мере, о ее наличии в тропосфере.

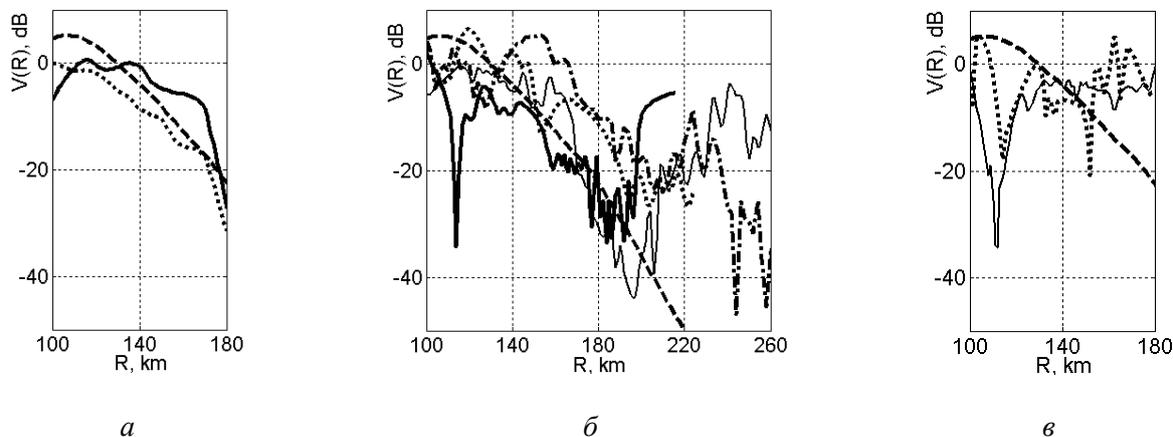


Рис. 6. Дистанционные зависимости множителя ослабления ($h=1500$ м):
a – тип II; *б* – тип III; *в* – тип IV

Анализ аппроксимирующих коэффициентов (рис. 7) показывает, что коэффициенты типов II и IV существенно различны, в то время как коэффициенты типа III могут быть сходны с коэффициентами типа II. Это сходство имеет место для зависимостей $V(R)$, поведение которых определяется наличием высокорасположенной приподнятой инверсией профиля коэффициента преломления $n(h)$; при этом наблюдается значительный спад интенсивности радиополя непосредственно за радиогоризонтом (рис. 6, *б*, кривые, показанные тонкой и толстой сплошными линиями). Установить принадлежность таких зависимостей к типу III можно, прибегнув к рассмотрению коэффициентов D , которые имеют заметно большую дисперсию (рис. 8, *б*, кривые, показанные тонкой и толстой сплошными линиями) в сравнении с дисперсией детализирующих коэффициентов у типа II (рис. 8, *а*). Для двух других зависимостей типа III коэффициенты A более имеют пологий ход (рис. 7, *б*), что характерно и для самих зависимостей $V(R)$ – незначительный спад за радиогоризонтом определяется низкой высотой инверсии $n(h)$.

Таким образом, анализ коэффициентов вейвлет-разложения позволил установить принадлежность зависимостей $V(R)$ для освещенной области к одному из трех типов. Поэтому на основании коэффициентов D и A можно найти классифицирующие признаки типов условий загоризонтного распространения с последующей автоматизацией диагноза, что является предметом дальнейших исследований.

Выводы

Выполненный вейвлет-анализ экспериментальных дистанционных зависимостей множителя ослабления в освещенной области свидетельствует, что в случае высокорасположенного источника излучения совместный анализ поведения аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов обеспечивает возможность определения в УВЧ диапазоне основных типов условий загоризонтного распространения, соответствующих условиям, близким к стандартной атмосфере, наличию приподнятых инверсий и аномальным условиям.

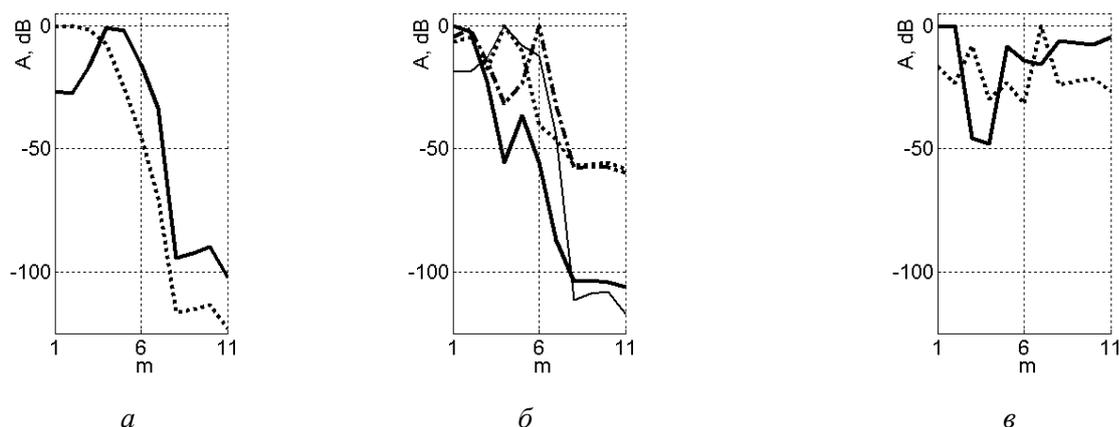


Рис. 7. Аппроксимирующие коэффициенты вейвлет-разложения ($h=1500$ м):
a – тип II; *б* – тип III; *в* – тип IV

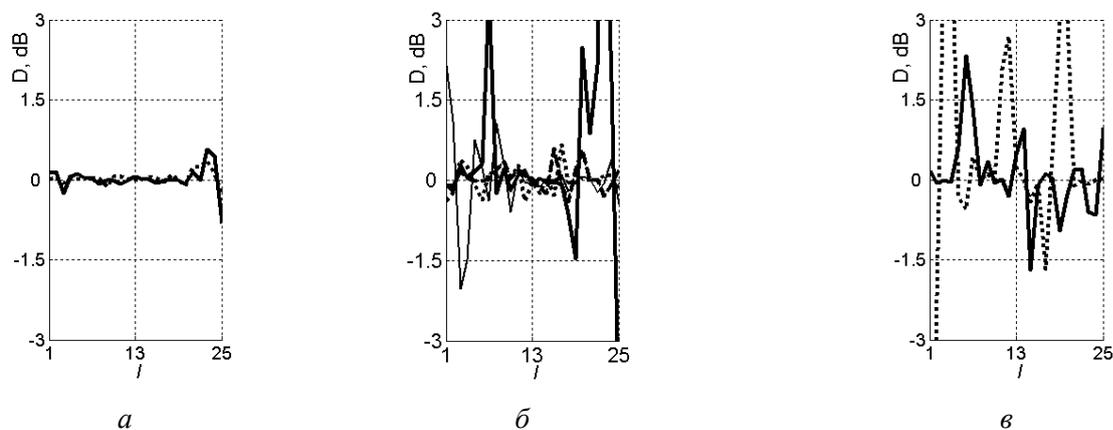


Рис. 8. Детализирующие коэффициенты вейвлет-разложения ($h=1500$ м):
a – тип II; *б* – тип III; *в* – тип IV

Коэффициенты вейвлет-разложения могут быть использованы для нахождения классифицирующих признаков с последующей автоматизацией процедуры определения типа условий загоризонтного распространения.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о перспективности апробации вейвлет-анализа для диагноза типов условий загоризонтного распространения радиоволн УВЧ диапазона по данным зондирования тропосферы бортовыми источниками навигационных ИСЗ.

Список литературы: 1. Гайкович К. П., Гурвич А. С., Наумов А. П. О восстановлении метеопараметров по внутриатмосферным измерениям оптической рефракции космических источников // Изв. АН СССР ФАО. – 1983. – Т. 19, № 7. – С. 675 – 681. 2. Жуков Б. В. Диагноз типов условий загоризонтного распространения радиоволн в прибрежной зоне экваторий по данным радиопросвечивания тропосферы // Радиотехника. – 2010. – Вып. 163. – С. 256 – 260. 3. Диагностика условий распространения УКВ в тропосфере; под ред. Г. И. Хлопова. – Киев: Наук. думка, 2010. – 264 с. 4. Яковлев А. Н. Введение в вейвлет-преобразования. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с. 5. Распространение ультракоротких радиоволн; пер. с англ.; под ред. Б. А. Шиллерова. – М.: Сов. радио, 1954. – 710 с.

Институт радиофизики и электроники
 НАН Украины

Поступила в редколлегию 05.11.2014