

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; IOD – 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

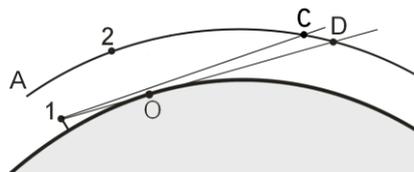


Рис. 1. Схема расположения корреспондирующих пунктов

зоне геометрической тени, где тип I соответствовал условиям близким к стандартным, тип II – наличию приводной инверсии, тип III – наличию приподнятой инверсии, 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

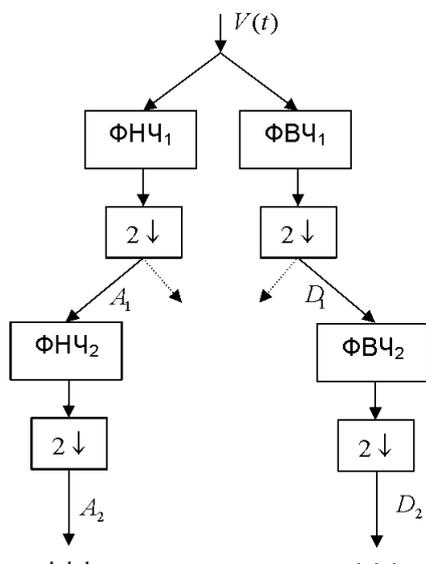


Рис. 2. Структурная схема вейвлет-анализа

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 переменную 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 изменения анализируемого процесса. Изучение этих коэффициентов позволило найти отличия дистанционных зависимостей разных типов, исключая из внимания быстрые флюктуации 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 флюктуации 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.

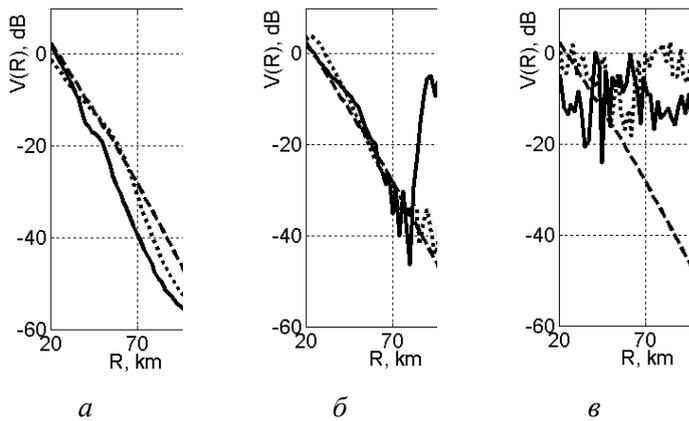


Рис. 3. Дистанционные зависимости множителя ослабления ($h=100$ м): *a* – тип II; *б* – тип III; *в* – тип IV

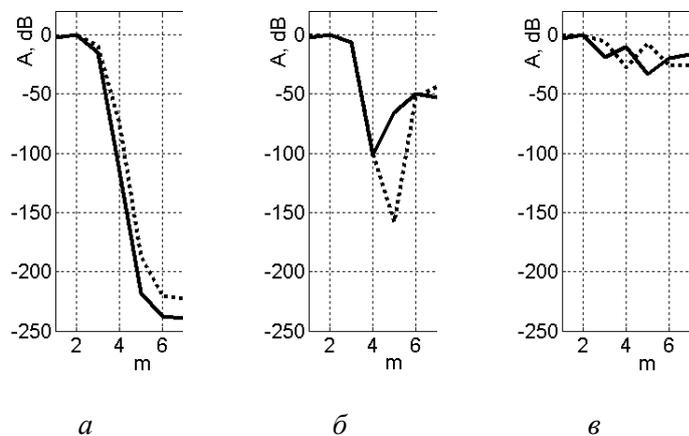


Рис. 4. Аппроксимирующие коэффициенты вейвлет-разложения ($h=100$ м): *a* – тип II; *б* – тип III; *в* – тип IV

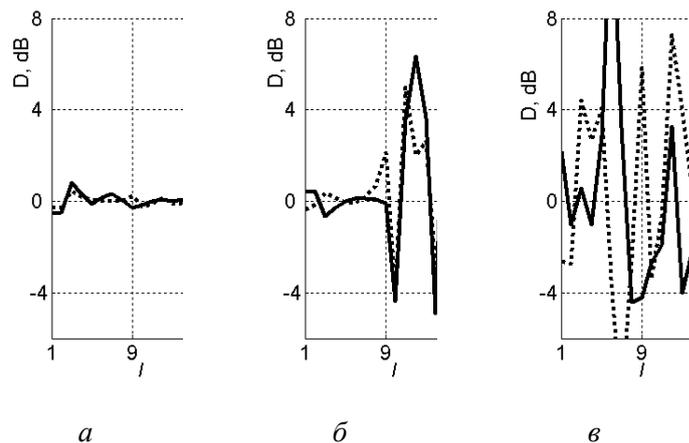


Рис. 5. Детализирующие коэффициенты вейвлет-разложения ($h=100$ м): *a* – тип II; *б* – тип III; *в* – тип IV

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

С уменьшением анализируемого интервала дальностей до $R = 20 - 80$ км аппроксимирующие коэффициенты для типа III более не имеют характерного провала, поскольку сами зависимости $V(R)$ на дистанции до 80 км лишь монотонно убывают. Поэтому для данного диапазона удалений коэффициенты A для типов II и III неразличимы, но для типа IV отличия 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 интервала 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 диагноза представляет анализ зависимостей $V(R)$ при высоте источника, превышающей высоты приподнятых инверсий. Такие дистанционные зависимости множителя ослабления для трех типов условий распространения, полученные для высоты полета $h = 1500$ м, приведены на рис. 6; интервал $\Delta R = 1$ км. Дальность радиогоризонта в этом случае составляет 178 км. Приведенные дистанционные зависимости

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.

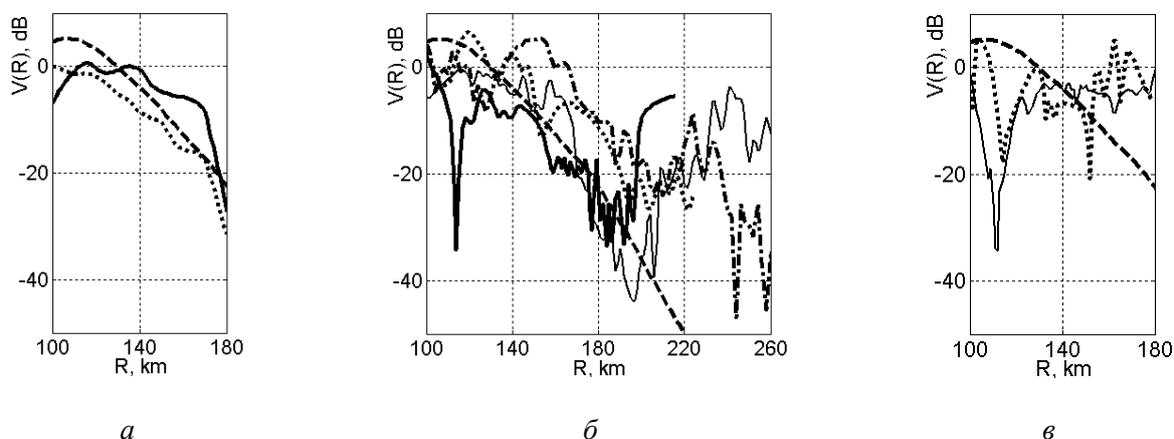


Рис. 6. Дистанционные зависимости множителя ослабления ($h=1500$ м):
a – тип II; *б* – тип III; *в* – тип IV

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, наличие приподнятых инверсий и аномальным условиям.

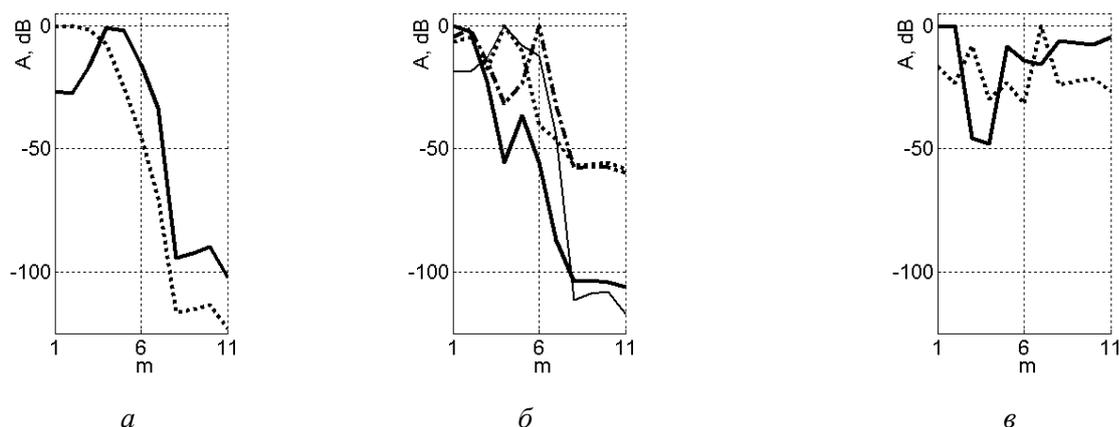


Рис. 7. Аппроксимирующие коэффициенты вейвлет-разложения ($h=1500$ м):
а – тип II; *б* – тип III; *в* – тип IV

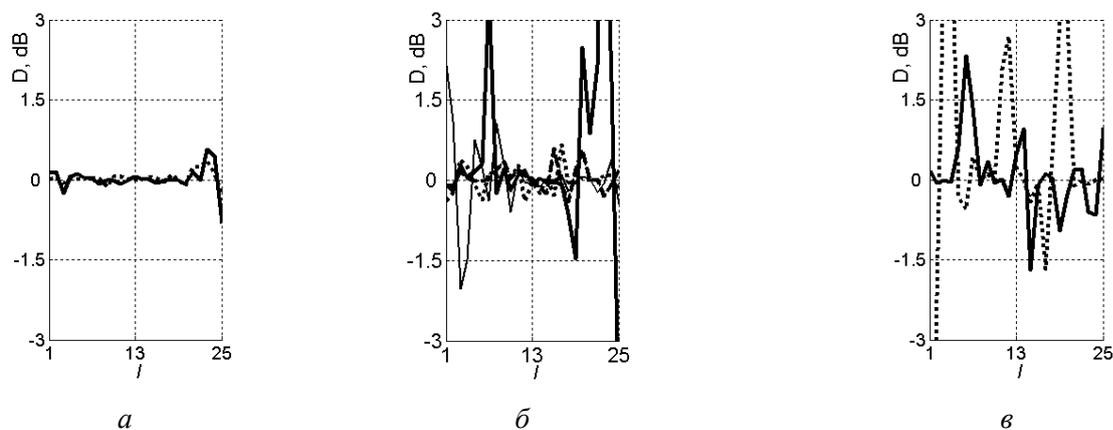


Рис. 8. Детализирующие коэффициенты вейвлет-разложения ($h=1500$ м):
а – тип II; *б* – тип III; *в* – тип IV

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

