

МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОИСХОЖДЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ПОМЕХ «АНГЕЛ-ЭХО» И ИХ ВИРТУАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Введение

Анализ теоретических работ и экспериментальных исследований [1 – 4], проведенных с участием авторов, позволяет утверждать, что наиболее вероятной причиной появления радиолокационных помех типа “ангел-эхо” (АЭ) является отражение электромагнитных волн (ЭМВ) от локальных неоднородностей тропосферы и земной поверхности. Вследствие неравномерного прогрева локальных областей земной поверхности, воды и воздуха неоднородности с повышенной температурой восходят вверх, образуя столбы, имеющие контраст макроскопических параметров, определяющих условия распространения ЭМВ. Например, это могут быть контрасты диэлектрической проницаемости или коэффициента преломления тропосферы. До настоящего времени эта среда считалась содержащей свободные электроны, имеющие отрицательные заряды, и рассматривалось их взаимодействие только с электрической составляющей волны. При этом отраженные сигналы исследовались макроскопическим методом как результат усреднения по распределению зарядов. Однако на практике характерной особенностью тропосферных атмосферных неоднородностей является также наличие в них частиц, обладающих парамагнитными свойствами. Эти частицы имеют магнитный момент, с которым взаимодействует магнитное поле ЭМВ. Для учета их влияния при исследованиях необходимо использовать микроскопический подход, учитывающий физические свойства частиц тропосферы. В настоящей работе приведены результаты исследований радиолокационных помех “ангел-эхо” с учетом магнитных аспектов их происхождения и магнитной составляющей ЭМВ РЛС.

Магнитные аспекты имеют место вследствие существования в природе следующих магнитных факторов: наличие в атмосфере парамагнитных газов (кислород, углекислый газ и др.); наличие электрических и парамагнитных свойств у частиц паров воды; наличие в атмосфере свободных заряженных частиц (электронов, протонов и ионов); наличие в атмосфере парамагнитных нейтронов, радикалов и ион-радикалов; наличие геомагнитного поля, направленного в северном полушарии сверху вниз; ориентация парамагнитных частиц в геомагнитном поле; поступательное движение электрических и магнитных частиц восходящих потоков в геомагнитном поле; вихревое движение заряженных частиц восходящих потоков в геомагнитном поле; магнитоакустический резонанс парамагнитных частиц на гиромагнитных частотах.

Перечисленные факторы делают магнитные аспекты радиолокации не менее важными, чем электрические.

Механизмы возникновения локальных атмосферных неоднородностей

По мнению авторов, наиболее достоверным является тепловой механизм возникновения атмосферных неоднородностей, изложенный в работах [1 – 4]. Здесь показано, что неоднородные атмосферные области образуются за счет тепловой энергии неравномерно нагретой Солнцем подстилающей поверхности. Локальные воздушные области с повышенной температурой поднимаются вверх, турбулентно перемешиваясь и разрушаясь. Восходящие потоки также подхватывают локальные воздушные объемы с повышенной влажностью и низкой температурой. Таким образом, формируются невидимые столбы неоднородностей атмосферы, по механизму образования и форме сходные с дымовыми столбами. В отсутствие ветра эти столбы направлены вертикально, а с его появлением отклоняются в сторону. Такие обра-

зования называются глобулами конвекционного типа. Турбулентное движение в них связано с непрерывным изменением скорости движения и интенсивным перемешиванием воздуха.

Практически могут возникать и развиваться две основные разновидности интересующих нас, атмосферных неоднородностей.

1. Атмосферные области с повышенной температурой, образующиеся за счет неравномерного нагрева поверхности земли. Сформированные разницей температур ΔT , они расширяются и под действием подъемной силы восходят вверх. При таком конвекционном движении атмосферных областей их состав и структура изменяются незначительно в пределах тропосферных флуктуаций. Такие образования называются термиками [5]. Для выявления природы и особенностей отражения радиоволн от таких областей достаточно знать скорости движения и степени турбулентности свободных электронов, входящих в их состав.

2. Атмосферные неоднородности, характерные для влажных мест, образовавшихся после ливневых дождей при температурах окружающей среды 30 – 40°С. При данных условиях возникают области, состоящие из молекул паров воды и имеющие низкую температуру. Такие образования называют паротемпературными линзами или паротермиками [4]. Источниками таких линз могут также быть различного рода мелкие водоемы или места скопления влаги на поверхности земли. Как правило, радиолокационные мешающие отражения «ангел-эхо» формируются паротемпературными линзами, которые попадают в восходящие воздушные потоки и начинают перемещаться ими или под действием ветра и менять положение друг относительно друга.

При облучении таких линз электромагнитной энергией часть энергии отражается, а часть меняет направление распространения или поглощается. Традиционно, эти явления объясняют исходя из физики образования глобул и связывают с макроскопическими параметрами атмосферы. Например, в работе [4] они обуславливаются разностью значений коэффициента преломления ΔN в линзе и окружающей среде. Здесь показано, что для средних температур 25 – 30°С

$$\Delta N = -1,4\Delta T + 4,2\Delta l + 0,26\Delta p. \quad (1)$$

Здесь T – температура, К; p , l – давления воздуха и водяных паров, мбар.

Анализ выражения (1) показывает, что для паротемпературных линз различия в коэффициенте преломления ΔN могут быть в 4 – 6 раз больше, чем для термикон неоднородностей, сформированных только разницей температур ΔT .

Известно что, для выявления природы и особенностей отражающих неоднородностей АЭ достаточно определить скорости восходящих потоков, а по их уровням – степень турбулизованности этих воздушных потоков. Например, из [4] следует, что при значениях V_B несколько метров в секунду и размерах приземной воздушной массы, составляющих несколько десятков метров, движение сильно турбулизовано.

В нашем случае область турбулентного движения – это совокупность большого числа переносимых восходящими потоками вихрей различного размера. Максимальный размер L_0 определяется потоком в целом и разницей скоростей ΔV_B на расстоянии L_0 . Если скорость ΔV_B велика, то такой вихрь неустойчив и распадается под действием сил инерции на более мелкие вихри [3].

Известно также, что существует прямая связь между электрической восприимчивостью X , диэлектрической проницаемостью ε и показателем преломления n воздуха [3]: $X = \varepsilon - 1 = n^2 - 1$. Связь между n и метеорологическими параметрами воздуха [3] можно оценить с помощью индекса рефракции:

$$\Delta n = N = (n - 1)10^6 = \frac{77,6}{T} \left(p + \frac{4810}{T} l \right), \quad (2)$$

где T – температура, К; p, l – давления воздуха и водяных паров, мбар. При условии независимости параметров атмосферы p, l, T из формулы (2) можно получить выражение полного приращения показателя преломления ΔN при локальных неоднородностях атмосферы:

$$N = \Delta N_T + \Delta N_p + \Delta N_l = \frac{77,6}{T} \left[\Delta p + \frac{4810}{T} \Delta l - \left(p + \frac{9620}{T} l \right) \frac{\Delta T}{T} \right], \quad (3)$$

Здесь $\Delta N_T, \Delta N_p, \Delta N_l$ – приращения показателя преломления за счет изменений T, p, l соответственно. Степени изменения T, p, l характеризуют также энергетическую устойчивость (энтропию) или возможность турбулентных движений в атмосфере.

Таким образом, анализ приведенных результатов исследований подтверждает, что природа радиолокационных помех типа АЭ обусловлена атмосферными неоднородностями. АЭ по месту и времени возникновения являются нестационарными случайными процессами, имеющими случайные флуктуации, меняющиеся во времени и пространстве.

Используя приведенную модель глобулы в виде столба неоднородных атмосферных образований, можно обосновать природу как быстрых случайных флуктуаций (за счет мелких вихрей), так и медленных флуктуаций, соизмеримых с периодом обзора РЛС (за счет крупных вихрей). В результате интерференции колебаний от различных участков столба неоднородностей могут возникать медленные флуктуации, соизмеримые с периодом обзора. Если рассмотреть простейший случай биения сигналов двух отражателей, расположенных на верхнем и нижнем концах столба и имеющих разные V_{B1} и V_{B2} , то частота биения

$$\Delta F_{D2} = 2(V_{B1} \cos \theta_2 - V_{B2} \cos \theta_1) / \lambda, \quad (4)$$

где θ_1, θ_2 – углы между линией РЛС и векторами скоростей V_{B1}, V_{B2} . Рассчитанный согласно (4) для диапазона реальных скоростей, спектр биений достаточно широк от 0,004 до сотен герц.

Магнитные и электрические аспекты происхождения радиолокационных помех типа “ангел-эхо”

Электромагнитная волна радиолокатора состоит из двух векторных полей E и H , каждое из которых по разному взаимодействует с частицами окружающей среды. Поэтому характеристики отраженного электромагнитного поля могут быть определены как на основе интегрального макроскопического, так и на основе дифференциального микроскопического подходов.

При макроскопическом подходе рассматривается взаимодействие зондирующей ЭМВ с областью пространства имеющей контраст интегральных параметров, определяющих условия распространения волновых процессов. Макроскопическая электрофизическая модель происхождения радиолокационных помех “ангел-эхо” подходит для радиолокаторов, использующих вектор E ЭМВ, но она является неадекватной, поскольку нет достоверных оснований для изменений диэлектрической проницаемости воздуха конкретных атмосферных неоднородностей. Для повышения адекватности модели следует учитывать существование вектора H ЭМВ, геомагнитного поля и других магнитных аспектов вопроса. При этом необходимо использовать микроскопический подход, то есть учитывать электрические и магнитные свойства частиц атмосферных неоднородностей.

Традиционно область пространства вокруг РЛС представляют в виде линейного четырехполюсника с равномерным распределением коэффициента передачи. При магнитном рассмотрении это уже два четырехполюсника – диамагнитный и парамагнитный, включенные параллельно и находящиеся в геомагнитном поле. Здесь парамагнитные частицы распределены среди магнито- и электронейтральных частиц. Их распределение может быть равномерным или неравномерным (турбулентным).

Парамагнитные частицы слушаются геомагнитного поля и других внешних факторов. Частицы с нескомпенсированным магнитным моментом, переносимые облаком, всегда стремятся принять его ориентацию вдоль магнитного поля Земли. В то же время при наличии различного рода воздействий естественного и искусственного происхождения его ориентация становится хаотической. Существует больцмановское равновесие между влиянием напряженности геомагнитного поля и температуры атмосферы. Радиолокационное зондирование пространства ЭМВ нарушает больцмановское равновесие, и мы регистрируем появление вторичных волн [11].

Заряженные частицы под действием поля E падающей волны на заряд совершают вынужденные колебания с частотой, равной несущей частоте электромагнитных колебаний. В процессе колебательных движений они сталкиваются с нейтральными молекулами, атомами и ионами и увеличивают их кинетическую энергию. Таким образом, осуществляются переход энергии электромагнитного поля в тепловую энергию среды и поглощение зондирующих сигналов.

При зондировании атмосферы ЭМВ также происходит взаимодействие вектора H ЭМВ и магнитных моментов частиц магнитных газов и плазмы. Вектор H раскачивает магнитные моменты с частотой повторения зондирующих сигналов и вызывает их нутацию. Под действием механических и электрических возмущений эти частицы могут испускать роторные электромагнитные волны на гиромангнитных частотах [11]. Поэтому возможно принимать и слушать радиолокационные отражения от глобул аналогично слушанию турбинной модуляции сигналов, отраженных от реальных целей.

Как показано выше, глобулы термиком и паротермиком представляют собой тропосферные образования, находящиеся в геомагнитном поле. Поэтому при микроскопическом рассмотрении они состоят из частиц сухого воздуха и водяного пара, содержащихся в пропорциях нижнего слоя атмосферы. Здесь могут находиться атомы и молекулы газов и их ионы, свободные частицы, различные радикалы и ион-радикалы. Поскольку ЭМВ, зондирующие пространство, имеют электрическую и магнитную компоненты, то представляет интерес их взаимодействие с частицами атмосферы, имеющими электрические заряды и электрические дипольные моменты, а также магнитные моменты. К таким частицам относятся:

1. Электроны и протоны – ион-радикалы, имеющие точечный электрический заряд и спиновый магнитный момент. Их электрические заряды имеют одинаковую величину, но противоположные знаки. Величина магнитного момента у электрона на два порядка больше чем у протона. Поэтому их гиромангнитные частоты тоже отличаются на два порядка.

2. Нейтроны – радикалы, имеющие спиновый магнитный момент, равный по величине магнитному моменту протона. Поэтому нейтроны и протоны имеют одинаковые гиромангнитные частоты.

3. Молекулы магнитных газов – кислорода, водорода и углекислого газа, имеющие нескомпенсированные магнитные моменты двух электронов и являющиеся бирадикалами.

4. Молекулы водяного пара, имеющие электрический дипольный момент и нескомпенсированный магнитный момент двух протонов.

Как видно из анализа строения частиц атмосферы, наиболее сложный состав имеют молекулы паров воды. Поэтому вопросы зондирования молекул воды рассмотрим более подробно.

Для определения отражательных способностей отдельных частиц может быть использован структурный анализ, позволяющий определить их волновые сопротивления и коэффициенты отражения. Для этого частицы, имеющие магнитные моменты, рассматривают как элементарную приемную магнитную антенну – магнитный диполь, а частицы, имеющие электрический момент, рассматривают как электрический диполь. Некоторые частицы могут одновременно содержать и магнитный, и электрический диполи. Например, на рис. 1 показано изменение волнового сопротивления магнитного и электрического диполей молекулы воды от расстояния до РЛС. Здесь показано, что при зондировании глобулы локатор и частицы

находятся соответственно в дальних зонах передатчика РЛС и приемных диполей. Зондирующий сигнал при этом имеет волновое сопротивление воздуха $Z_0 = 120\pi = 377$ Ом. С таким сопротивлением он приближается к приемным диполям, и происходит его взаимодействие с их импедансами в ближней зоне. Видно, что для ближней зоны приема магнитный и электрический диполи имеют разные импедансы [12].

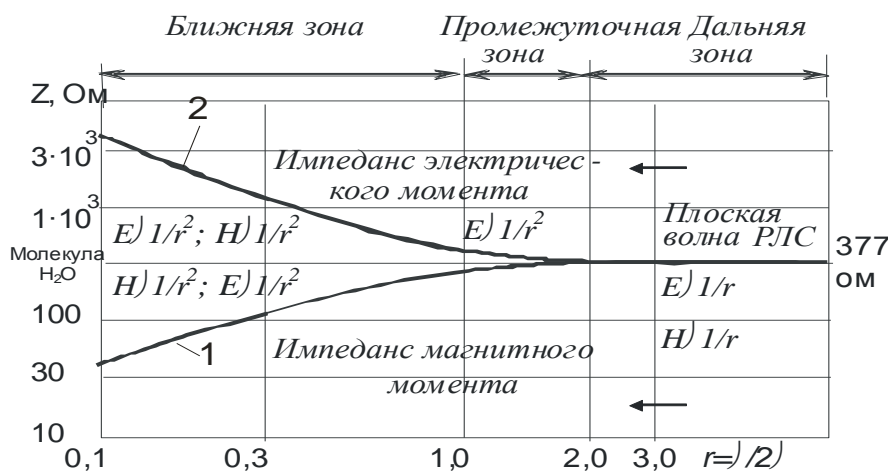


Рис. 1

Здесь молекула воды находится в начале координат. Зависимости импедансов ее электрического и магнитного диполей от дальности показаны цифрами 1 и 2. Из этих зависимостей следует, что по отношению к волновому сопротивлению поля плоской волны РЛС Z_0 , волновое сопротивление электрического диполя является высокоимпедансным, а магнитного диполя – низкоимпедансным.

С помощью выражения (5) и данных рис. 1 могут быть определены величина и знак коэффициента отражения сигнала РЛС от молекулы воды:

$$R = \frac{Z_i - Z_0}{Z_i + Z_0}, \quad (5)$$

где $i=1 \dots 2$; Z_1 – волновое сопротивление электрического диполя молекулы воды; Z_2 – волновое сопротивление магнитного диполя молекулы воды.

Как видно из выражения (5), условием появления отраженного сигнала является неравенство $-1 < R < 0$, которое выполняется при $Z_0 > Z_i$. В соответствии с рис. 1 эти условия выполняются для кривой 1. То есть молекула воды отражает ЭМВ РЛС благодаря наличию у нее магнитного момента протонов. По видимому, аналогичными свойствами также обладают свободные протоны, нейтроны и другие частицы, имеющие нескомпенсированный магнитный момент протона.

Электрический диполь молекулы воды участвует главным образом в поглощении ЭМВ РЛС. Условия появления сигналов, отраженных от электрического диполя, могут выполняться только при зондировании глобулы в ближней зоне локации, где E и H поля ЭМВ РЛС существуют раздельно. Заметим, что аналогичные рассуждения могут быть применены при зондировании свободных электронов, радикалов и ион-радикалов, имеющих нескомпенсированный магнитный момент электрона.

Таким образом, при формировании отражений от тропосферных неоднородностей главную роль играют нескомпенсированные магнитные моменты частиц. Полученные результаты могут быть использованы как для термиков, так и для паротермиков.

Как показано выше, при микроскопическом подходе рассматривается взаимодействие ЭМВ с одиночными частицами, а затем суммируются отраженные сигналы по пространству.

Максимальная напряженность суммарного поля, порождаемого N частицами глобулы,

$$H_{\Sigma} = H \cdot N = n \cdot V \cdot H, \quad (6)$$

где n – плотность частиц; V – объем глобулы.

Однако поля частиц складываются со случайными начальными фазами и амплитудами так, что при некогерентном сложении можно принять, что средняя величина напряженности поля

$$\langle H_{\Sigma} \rangle \approx H \cdot \sqrt{N}. \quad (7)$$

С учетом возможности когерентного суммирования можно записать

$$\langle H_{\Sigma} \rangle \approx H \cdot K, \quad (8)$$

где $\sqrt{N} < K < N$.

Из анализа (6) – (8) следует, что отражения от глобулы представляют собой шумовой процесс, образованный суперпозицией некогерентных излучений отдельных частиц. С приближением глобулы интенсивность шума растет. В ответ на импульсные излучения РЛС формируются выборки шума, следующие с частотой повторения. Таким образом формируются радиолокационные помехи «ангел-эхо», обладающие имитационными свойствами.

Магнитные и электрические аспекты виртуальных изображений радиолокационных помех «ангел-эхо»

Виртуальные изображения (ВИ) представляют практический интерес при исследовании нестационарных радиолокационных сигналов со сложными амплитудно-частотно-временными вариациями, характерными для радиолокационных отражений от различных атмосферных неоднородностей типа «ангел-объектов» [8, 9].

ВИ (от лат. *virtus* – потенциальное, возможное) – создаваемое техническими средствами изображение информации об исследуемом объекте, явлении, процессе. Синонимы: искусственное изображение, электронное изображение, компьютерная модель изображения. ВИ конструируют новый искусственный мир или дополнительно вносят отдельные искусственные элементы в восприятие мира реального. Объекты виртуального изображения должны вести себя аналогично объектам материальной реальности. Пользователь должен иметь возможность воздействовать на объекты виртуального изображения. Виртуальный мир в данной работе создается изображением спектральной картины физики возникновения и развития радиолокационных «ангел-эхо» как результат электромагнитного взаимодействия с локальными атмосферными неоднородностями [10].

Как указывалось ранее, могут возникать и развиваться две разновидности интересующих нас атмосферных неоднородностей термики и паротермики. РЛ отражения от атмосферных неоднородностей первого типа (турбулентных вихрей) формируют нестационарные сигналы, а отражения от неоднородностей второго типа (паротемпературных линз) – стационарные сигналы.

При исследовании спектров АЭ первого типа удобно использовать ВИ, полученные путем вейвлет-преобразования. Благодаря хорошей приспособленности к анализу нестационарных сигналов оно может стать мощной альтернативой классическому преобразованию Фурье. ВИ, полученные путем преобразования Фурье, больше приспособлены для анализа стационарных сигналов, т. е. для анализа АЭ второго типа. Главным элементом в вейвлет-анализе является функция-вейвлет. Вейвлет-функция должна удовлетворять двум условиям: среднее значение (интеграл по всей прямой) равен 0 и функция быстро убывает при $t \rightarrow \infty$. Обычно, функция-вейвлет обозначается буквой ψ . В общем случае вейвлет-преобразование

функции $f(t)$ выглядит так $W(x,s) = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{\infty} \psi^* \left(\frac{t-x}{s} \right) f(t) dt$, где t – ось времени, x – момент времени, s – параметр, обратный частоте, а $(*)$ – означает комплексно-сопряженное.

На рис. 2 показан вид нестационарного сигнала радиолокационного «ангел-эхо», полученного на обзорной РЛС десятисантиметрового диапазона при остановленной антенне (длительность импульса 1 мкс, частота зондирования 365 Гц). По горизонтальной оси отложено время в количестве зондирований РЛС, а по вертикальной оси – дискретная амплитуда (восьмиразрядный АЦП).

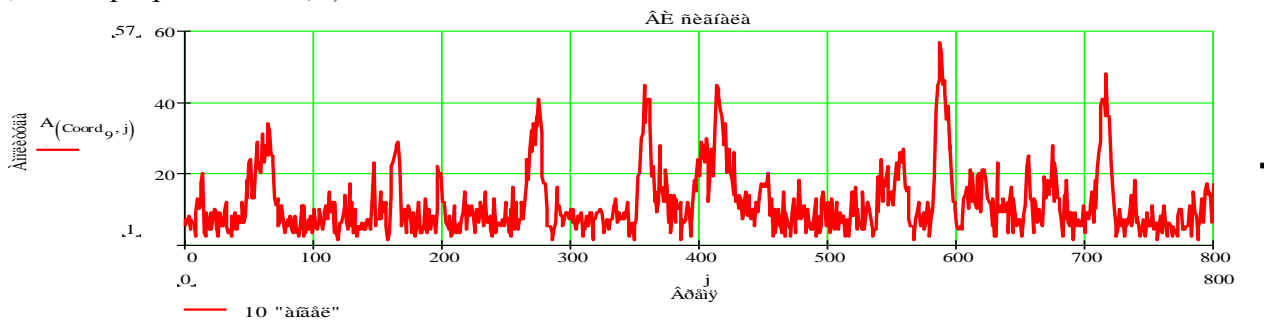
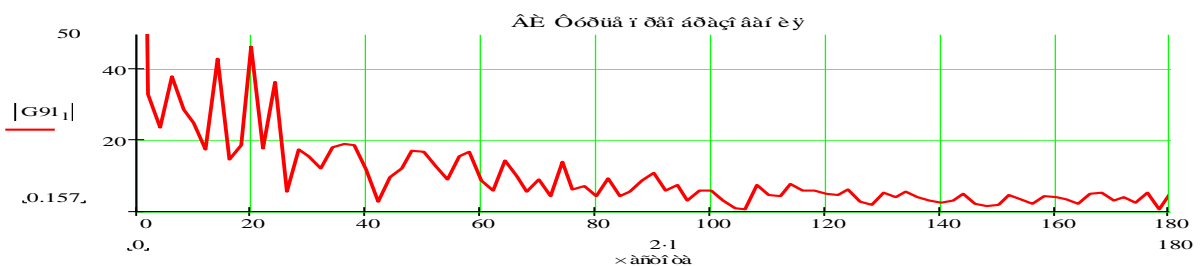
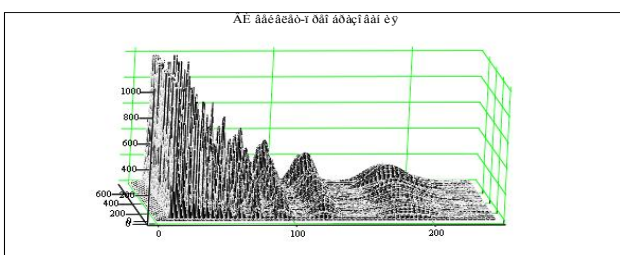


Рис. 2

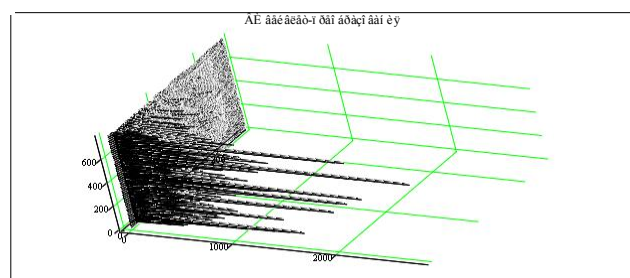
На рис. 3 показаны ВИ спектров, полученные путем Фурье (рис. 3, а) и вейвлет-преобразований (рис. 3, б) радиолокационного «ангел-эха», представляющего наложение сигналов АЭ первого и второго типов. На рис. 3, б по вертикальной оси откладывается амплитудное значение вейвлет-преобразования, а по горизонтальным осям ординат – частота и время. Анализ рисунков подтверждает приведенные ранее механизмы взаимодействия электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля РЛС с тропосферными неоднородностями. Для электрической составляющей это турбулентные вихри разного масштаба. Здесь часть волны рассеивается, а часть поглощается электрическими диполями частиц и на рис. 3, б видно, как спектр такого сигнала изменяется во времени (сигнал нестационарный). Для магнитной составляющей – это молекулы паров воды, магнитные моменты которых имеют низкий импеданс. В этой среде проявляется эффект непосредственного отражения волны (сигнал стационарный).



а



М



М

б

Рис. 3

Как видно из рис. 3, *а* преобразование Фурье дает информацию о стационарной части спектра частот, который присутствует в сигнале в промежутке времени анализа и при этом нам неизвестно, когда именно та или иная частота реально присутствовала в сигнале. В то же время вейвлет-преобразование (рис. 3, *в*) дает картину динамики изменения частотных характеристик во времени. Все это указывает на то, что вейвлет-преобразование более информативно по сравнению с преобразованием Фурье.

Таким образом, по полученным ВИ поведения спектров можно легко определить присутствие в полученном сигнале АЭ первого или второго типов, а затем осуществить операции распознавания и обнаружения воздушных объектов на их фоне.

Заключение

1. Приведены результаты анализа электрических и магнитных аспектов происхождения радиолокационных помех типа «ангел-эхо» и их виртуальных изображений. На основе микроскопического подхода рассмотрены взаимодействия электромагнитной волны РЛС с частицами локальных атмосферных неоднородностей в ближней и дальней зонах локации.

2. Показано, что особенности механизма возникновения атмосферных неоднородностей неотъемлемо связаны с возникновением и существованием «ангел-эха». Это подтверждается их виртуальными изображениями в частотной области и возможностью визуализации изменений спектра частот нестационарного сигнала типа «ангел-эхо».

3. Полученные результаты и подходы могут быть использованы для решения других актуальных задач радиолокации малозаметных объектов, распознавания и защиты от помех.

Список литературы: 1. Черников, А. А. Радиолокационные отражения от ясного неба / А.А. Черников. – Л. : Гидрометеиздат, 1979. – 126 с. 2. Радиолокатор видит Землю и «ангелов». collectedpapers.com.ua. – Опубликовано 15.12.2014. 3. Жирнов, В.В. Возможные причины и источники радиолокационных мешающих отражений типа "ангел-эхо" / В.В. Жирнов, А.И. Дохов, С.Н. Матюшенко, Л.З. Сахновская // Радиотехника. – 1997. – Вып. 104. – С. 102-111. 4. Гурвич, А.С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере / А.С. Гурвич, А.И. Кон, В.Л. Миронов, С.С. Хмелевцев. – М. : Наука, 1976. – 277 с. 5. Теоретические основы радиолокации ; под ред. Я.Д. Ширмана. – М. : Сов. радио, 1970. – 560 с. 6. Жирнов, В.В. Экспериментальные исследования радиолокационных отражений от локальных неоднородностей атмосферы / В.В. Жирнов, В.И. Стрельченко, Л.З. Сахновская // Радиотехника. – 2002. – Вып. 129. – С.46-50. 7. Вопросы перспективной радиолокации ; под ред. А.В.Соколова. – М. : Радиотехника, 2003. 8. Дьяконов, В. П. Вейвлеты. От теории к практике / В.П. Дьяконов – 2-е изд. – М. : СОЛОН-Пресс, 2005 – 400 с. 9. Жирнов, В.В. Применение вейвлет-преобразования для формирования радиолокационных виртуальных изображений / В.В. Жирнов, С.В. Солонская, И.И. Зима // Радиотехника. – 2013. – Вып. 175. – С. 142-146. 10. Жирнов, В. В. Распознавание радиолокационных отметок по спектральному изображению с адаптивными весовыми коэффициентами / В. В. Жирнов, С. В. Солонская // Радиоэлектроника и информатика. – 2006. – Вып. 1. – С. 121–124. 11. Зима, И.И. Роторный геомагнетизм. Немного фантазии / И.И. Зима – Харьков, 2014. – С. 200. 12. Князев, А.Д. Элементы теории и практики обеспечения ЭМС РЭС / А.Д. Князев. – М. : Радио и связь, 1984 – С.336.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 11.02.2016