

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В ТРОПОСФЕРНОМ ВОЛНОВОДЕ

М.В. Зинина

Тропосфера – нижняя часть атмосферы, располагающаяся на высотах до 15 км от поверхности Земли. В тропосфере температура убывает с высотой, так как в этой области нагревание воздуха происходит за счет нагретой солнцем Земли. Обычно температура убывает на 5–6 °С на километр. Но иногда на небольших интервалах высот наблюдается местное возрастание температуры с высотой, называемое температурной инверсией. Прекращением падения температуры и характеризуется верхняя граница тропосферы.

Электрические параметры тропосферы определяются давлением, температурой и влажностью, которые меняются с изменением метеорологических условий. Для удобства вводится понятие нормальной тропосферы, параметры которой соответствуют среднему состоянию: атмосферное дав-

ление у поверхности Земли 0,10 МПа (с увеличением высоты уменьшается на 12 кПа/км); температура у поверхности Земли 288 К (с увеличением высоты уменьшается на 5,5 К/км); относительная влажность 60 % и не меняется с высотой. Высота нормальной тропосферы принята равной 11 км.

Относительная диэлектрическая проницаемость тропосферы очень незначительно превышает единицу, однако изменение величины диэлектрической проницаемости во времени и пространстве существенно влияют на распространение радиоволн, особенно УКВ диапазона. Потери мощности радиоволн в тропосфере весьма малы во всех диапазонах, кроме волн короче 3 см.

Коэффициент преломления тропосферы не зависит от частоты для длин волн более 1 см и, как известно, определяется выражением

$$n = 1 + \left[\frac{78,5}{T} \left(p + \frac{4800 p_{\text{п}}}{T} \right) \right] 10^{-8},$$

где p – суммарное давление; $p_{\text{п}}$ – парциальное давление пара.

В силу малого отличия коэффициента преломления от единицы для удобства пользуются величиной $N = (n - 1) 10^6$, называемой индексом преломления тропосферы. Вблизи земной поверхности индекс преломления зависит от климатических и метеорологических условий и колеблется в пределах от 260 до 460. В нормальной тропосфере значение N изменяется с высотой линейно, причем для средних широт градиент изменения составляет $\frac{dN}{dh} = -40 \text{ км}^{-1}$. На высоте 9 км значение индекса преломления составляет 109 и постоянно в течение года на всем земном шаре.

В реальных условиях часто наблюдается нерегулярное изменение метеорологических параметров с высотой, что приводит к сложной зависимости индекса преломления от высоты. Индекс преломления уменьшается с высотой не плавно: на отдельных участках убывание оказывается более резким, на других наблюдается возрастание с высотой. Особенно велики отклонения от нормальной тропосферы на высотах до 2–3 км в летний период, когда часто образуются температурные инверсии и облачные слои, представляющие собой области повышенной влажности.

В тропосфере происходит непрерывное перемещение воздуха как вертикальными, так и горизонтальными потоками. Скорости движения воздуха при этом часто оказываются значительными, так что движение носит вихревой, турбулентный характер. Плотность воздуха в отдельных местах отличается от среднего значения, а следовательно, имеются местные отклонения температуры и давления газа, что приводит, в свою очередь, к местному отклонению индекса преломления тропосферы от среднего значения. Присутствие неоднородностей в тропосфере обуславливает возможность дальней УКВ связи.

Свойства среды распространения радиоволн (РРВ) характеризуются различными параметрами, в частности, коэффициентом преломления n , индексом преломления N и модифицированным индексом преломления M

$$M_z = N_z + 10^6 \frac{Z}{a_3},$$

где Z – высота над уровнем моря; $a_3 = 6371$ км (радиус Земли).

В соответствии с видом M -профиля проводится классификация условий РРВ. В частности, если в интервале высот ΔZ имеется область, где $\frac{dM}{dz} < 0$, то в этой области образуется волновод – приповерхностный или приподнятый. Интенсивность тропосферного волновода определяется величиной ΔM , а толщина слоя – величиной ΔZ , в пределах которой $\frac{dM}{dz} < 0$.

Толщина тропосферного волновода составляет величину до 200 м, а высота приподнятого – до трех километров.

В тоже время в реальных условиях функционирования радиолокационных систем (РЛС) имеется ряд признаков и параметров эхо-сигналов, по которым можно судить о наличии тропосферного волновода и возможности обнаружения маловысотных целей за пределами радиогоризонта.

Такая возможность появляется, если на трассе РРВ имеются реперы – поверхностно-распределенные объекты (ПРО) с известными характеристиками по их высоте над уровнем моря, дальности R_{Π} и величине эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) σ_{Π} .

В акватории моря такие объекты составляют противоположную береговую линию и находятся на расстоянии от 300 до 450 км, а также к ним относится горный массив за береговой линией высотой до 2–3 км.

Наличие достаточно мощных эхо-сигналов, временная задержка которых соответствует дальности до береговой черты или возвышенностей на определенном расстоянии от нее, свидетельствует о существовании тропосферного волновода.

Если сигнал наблюдается на всех азимутах (в том числе от относительно низкого берега), тропосферный волновод является приповерхностным (приводным), если от возвышенностей – приподнятым.

Для определения наличия тропосферного волновода и оценки дальности обнаружения маловысотных целей за пределами радиогоризонта целесообразно использовать режим обнаружения РЛС с использованием узкополосного сигнала [1]. В ходе обзора осуществляется измерение «веса» (амплитуды) эхо-сигнала, если он превысил порог, с временной задержкой, соответствующей дальности до ПРО.

Если тропосферный волновод приводный, то при его запитке эхо-сигнал будет от всей береговой линии, а если приподнятый – то от возвышенностей за пределами береговой линии.

Оценка параметров тропосферного волновода может быть проведена на основе анализа параметров эхо-сигналов от эталонных ПРО с известными параметрами по дальности и ЭПР (от реперов). Для получения более достоверной информации о параметрах тропосферного волновода, оценку целесообразно проводить для нескольких азимутальных направлений с последующим усреднением результатов. Степень захвата энергии зондирующего сигнала тропосферным волноводом зависит от типа диаграммы направленности по углу места, поэтому анализ необходимо проводить для трех основных типов диаграммы направленности по ϵ – для значений сдвига фазы в системе фазирования зондирующих сигналов верхней и нижней антенной структуры РЛС ($\Delta\varphi = 0; \pi/2; \pi$).

Стабильность параметров тропосферного волновода, в частности, степени захвата энергии сигнала, можно оценить по значениям разброса амплитудных и фазовых характеристик эхо-сигналов на входе приемника за определенный интервал времени. Режим когерентной обработки канала фазотраекторного накопления позволяет уточнить значения радиальной составляющей скорости цели и обеспечить разрешение ее элементов.

При формировании математических моделей радиоканала (РК) обычно исходят из следующих предположений [2]:

1) весь РК состоит из последовательности элементов канала, в первом приближении считается, что обратные связи между ними отсутствуют;

2) каждый элемент РК является многополюсником с известной связью входа и выхода;

3) каждому из элементов РК в виде многополюсника сопоставляется некоторый оператор (стохастический или детерминированный), конкретный вид которого определяется на основании физических особенностей данного элемента.

Сигнал на выходе приемного тракта РЛС может быть найден из выражения

$$\vec{a}_2(t) = \vec{A}_r \left[\vec{F}_s \vec{A}_t \vec{a}_1(t) + \vec{N}_n \right],$$

где \vec{A}_r – оператор, характеризующий свойства приемного тракта; \vec{F}_s – оператор преобразования сигналов на трассе распространения; \vec{A}_t – оператор передающего тракта радиотехнических систем (РТС), описывающий формирование сгенерированного сигнала $\vec{a}_1(t)$ в излучаемую электромагнитную волну с заданной пространственно-временной и поляризационной структурой; \vec{N}_n – вектор помех.

Для определения характеристик тропосферного волновода можно ввести следующие допущения:

1) излучаемый сигнал полностью известен;

2) передача и прием ведутся на идентичные антенны, тогда $\vec{A}_t = \vec{A}_r$;

3) за время распространения сигнала параметры среды существенно не изменяются;

4) активных и пассивных помех нет, в канале присутствует только белый шум, тогда $\vec{N}_n = 0$.

С учетом данных допущений выражение (1) примет вид

$$\vec{a}_2(t) = \vec{A}_r \vec{F}_s \vec{A}_t \vec{a}_1(t) + n(t),$$

где $n(t)$ – аддитивный шум на выходе приемника.

Если радиоволна излучается под некоторым углом, меньшим критического, то при распространении в волноводе его траектория искривляется настолько, что волна направляется вниз и происходит как бы отражение от стенки тропосферного волновода. Верхняя стенка такого волновода образуется за счет резкого уменьшения коэффициента преломления с высотой. У нижней стенки происходит такой же процесс, и траектория радиоволны изгибается вверх. Если же нижняя стенка волновода образована подстилающей поверхностью, то происходит не рефракция, отражение радиоволны.

Если море неспокойно, то радиоволна, падающая на его поверхность под углом $\Theta_{\text{пад}} \leq \Theta_{\text{кр}}$, может отражаться под углом $\Theta_{\text{отр}} > \Theta_{\text{кр}}$ и выходить из волновода. Это приводит к увеличению погонного затухания радиоволн и ухудшению энергетических характеристик тропосферного волновода.

Радиоволны, излучаемые под разными углами, распространяются по различным траекториям и приходят в одну точку, пройдя неодинаковые расстояния. Этот эффект называется многолучевостью или лучевой (межмодовой) дисперсией.

Из-за разностей хода лучей сигнал в приемной антенне является суммой отдельных колебаний с различными фазами и амплитудами. Интерференция этих колебаний является основной причиной флуктуаций амплитуд и фаз составляющих сигнала. Канал с амплитудными флуктуациями называется каналом с замираниями. Кроме того происходит искажение формы сигнала и возможно появление частотной дисперсии.

Исследования РРВ в тропосферном волноводе над акваторией Черного моря [2] показали, что при горизонтальной дальности 300 км максимальное отклонение времени запаздывания сигнала от среднего значения составляет порядка 0,25 мкс, а полоса пропускания тропосферного волновода составляет 4 МГц.

Если нижней стенкой тропосферного волновода выступает взволнованная поверхность моря, то при однократном отражении от подстилающей поверхности происходит расширение спектра сигнала.

Относительное расширение $\alpha_{\Delta f}$ спектра передаваемого сигнала Δf_c при распространении его в приводном тропосферном волноводе

$$\alpha_{\Delta f} = \frac{\Delta f N_{\text{отр}}}{\Delta f_c} = \frac{14,5 f_0 v_0 N_{\text{отр}}}{C \Delta f_c},$$

где $N_{\text{отр}}$ – число скачков радиоволны (отражений от морской поверхности); f_0 – несущая частота сигнала; v_0 – скорость ветра над морской поверхностью; C – скорость света.

Данная формула позволяет сделать вывод, что для РТС, использующих узкополосные сигналы на высоких несущих частотах возможно значительное расширение спектра сигнала при распространении его в тропосферном волноводе.

Одними из основных параметров, отражающих состояние атмосферы, являются температура, давление и влажность воздуха, которые определяют индекс рефракции атмосферы, играющий важнейшую роль при распространении радиоволн. Зависимость индекса рефракции N от температуры, давления и влажности для волн метрового и дециметрового диапазонов может быть выражена известным соотношением

$$N = 77,6 \frac{p}{T} + 599,7 \frac{sp}{T^2},$$

где p – атмосферное давление; T – температура воздуха; s – удельная влажность воздуха.

Пространственные вариации метеорологических параметров и, как следствие, индекса рефракции могут влиять на кривизну траектории распространения радиоволн, приводить к появлению многолучевого распространения, а движение таких неоднородностей может приводить к изменению спектра принимаемого сигнала. Как показывают наблюдения [3] возникновением градиентов давления и температуры вследствие масштабных вихревых процессов, инициируемых солнечными вспышками, можно пренебречь.

Анализ и обобщение полученных в последнее время результатов работ [3] дали возможность предложить модель влияния солнечных событий на свойства атмосферы и, в частности, тропосферы. Эта модель предполагает, что атмосфера может рассматриваться как регулируемый оптический фильтр, способный изменять свои поглощающие и рассеивающие свойства под влиянием факторов, обусловленных вариациями солнечной активности и магнитного поля Земли. Активными составляющими оптического фильтра являются содержащиеся в атмосфере NO , NO_2 , H_2O , O_3 и другие, которые могут влиять на диссипацию солнечного электромагнитного излучения в средней и верхней частях нижней атмосферы в диапазоне высот от 10 до 30 км.

На временных интервалах, в течение которых отсутствуют вспышечные процессы на Солнце, в земную атмосферу проникают галактические космические лучи с энергией от 0,5 до 2 ГэВ. Их пространственное распределение определяется магнитным полем, являющимся результатом взаимодействия собственного магнитного поля Земли и относительно стабильного магнитного поля, замороженного в поток плазмы спокойного Солнца,

достигшей пределов магнитосферы. При этом галактические космические лучи создают в толще атмосферы определенную концентрацию NO , NO_2 и O_3 , обеспечивающую «среднюю» прозрачность при прохождении к земной поверхности электромагнитного излучения Солнца. При возникновении сильных солнечных вспышек наиболее быстро атмосферного фильтра достигают рентгеновское и ультрафиолетовое вспышечные излучения, а также поток высоко энергичных солнечных космических лучей. Ультрафиолетовое и рентгеновское излучения резко повышают интенсивность физико-химических процессов, вызывающих увеличение концентрации NO , NO_2 и O_3 , что и приводит к изменению оптических свойств фильтра: при возрастании концентрации NO_2 прозрачность атмосферного фильтра уменьшается и соответственно уменьшается поток электромагнитной энергии Солнца, поступающего в нижнюю тропосферу. Это приводит к падению температуры слоя тропосферы под фильтром и к конденсации в нем водяного пара с образованием капель на ядрах, образующихся под воздействием вторгающихся вспышечных солнечных космических лучей.

После прекращения воздействия на атмосферу рентгеновского и ультрафиолетового излучений, связанных с солнечной вспышкой, а также солнечных космических лучей, в фильтровом слое начинают преобладать релаксационные процессы, уменьшающие концентрацию активных составляющих фильтра, тем самым просветляя его. Помимо этого, поток солнечной вспышечной плазмы, достигающий орбиты Земли через 1,5–2 суток после вспышки и интенсивно возмущающий геомагнитное поле, вытесняет из околоземного пространства галактические космические лучи (Форбуш-эффект). Это также приводит к уменьшению концентрации активных составляющих фильтра.

Процесс «просветления» фильтра сопровождается повышением температуры под его слоем и испарением сконденсировавшейся влаги, если она не выпала в виде осадков после конденсации на ионах, произведенных солнечными космическими лучами. Экспериментальные исследования радиолокационным методом двух тропосферных трасс протяженностью 600 км, проведенные в периоды времени, включающие предвспышечную, вспышечную и послевспышечную ситуации, показали, что при солнечной вспышке в тропосфере возникает инверсионный слой, создающий аномалию в распространении радиоволн по сравнению с довспышечными условиями. Возникновение этого слоя можно объяснить быстрым падением температуры в верхнем слое тропосферы и интенсивной конденсацией на ядрах, создаваемых солнечными космическими лучами, водяного пара с образованием капель.

Исследования [4] показали, что на дальность и качество тропосферной радиосвязи оказывают влияние некоторые нерегулярные астрономические явления, например, такие как солнечное затмение.

При загоризонтном распространении радиоволн УКВ диапазона над водной поверхностью ослабление сигнала зависит от одновременного действия нескольких факторов: регулярной рефракции в тропосфере; дифракции вокруг выпуклой поверхности; отражения от приподнятых инверсных слоев; рассеяния на турбулентностях тропосферы; дальнее тропосферное рассеяние и др. Как показывает исследование [4], на расстоянии, равном 600 км до момента солнечного затмения, прием сигналов может осуществляться некогерентным рассеиванием на флуктуациях коэффициента преломления. На высотах от 5 до 7,7 км механизм рассеяния на неоднородностях тропосферы позволяет передавать сигналы с большим ослаблением. В момент солнечного затмения происходят изменения тропосферы в объеме рассеяния: появляются неоднородности большей величины и инверсионные слои, что приводит к изменению спектра и увеличению уровня сигнала [5].

Так же нельзя пренебречь влиянием тропопаузы, высота которой близка к вышеназванным высотам. Исследования подтверждают наличие протяженных анизотропных неоднородностей, свойства которых существенно зависят от влияния солнечных лучей. Вследствие этого во время солнечного затмения на высоте тропопаузы образуется инверсионный слой, являющийся причиной увеличения уровня сигналов на расстоянии 700–750 км.

Из вышеизложенного материала следует:

- тропосферные волноводы обладают широкой полосой пропускания и сверхрефракционное распространение радиоволн не сказывается на форме сигнала;
- расширение спектра сигнала в тропосферном волноводе приводит к высокому уровню помех в соседних каналах систем связи, использующих узкополосные сигналы на высоких несущих частотах;
- в период солнечного затмения увеличивается уровень сигнала за пределами радиогоризонта;
- при солнечной вспышке в тропосфере возникает инверсионный слой, создающий аномалию в РРВ по сравнению с довыспышечными условиями;
- для установления факта наличия тропосферного волновода и оценки его параметров можно использовать реперы – поверхностно-распределенные объекты с эталонными характеристиками, которые имеются на трассе РРВ.

Библиографический список

1. Карлов, В.Д. Оценка возможностей обнаружения целей при наличии морского тропосферного волновода / В.Д. Карлов, М.М. Петрушенко, В.В. Челпанов, К.П. Квиткин // Системи обробки інформації. – 2010. – Вып. 6 (87). – С. 91–94.
2. Карлов, В.Д. Свойства морского тропосферного волновода как элемента радиоканала / В.Д. Карлов, В.Л. Мисаилов, Н.Н. Петрушенко // Системи обробки інформації. – 2008. – Вып. 6 (73). – С. 54–58.
3. Шапиро, А.А. Экспериментальные исследования распространения радиоволн в тропосфере в условиях солнечных вспышечных событий / А.А. Шапиро,

Ю.В. Гончаренко // Геомагнетизм и аэрономия. – 2003. – Т.°43, № 5. – С. 669–672.

4. Мыщенко, И.М. Исследование распространения радиоволн УКВ диапазона над океанской поверхностью в период солнечного затмения. / И.М. Мыщенко // Радиофизика и электроника. – 2007. – Т.°12, № 1. – С. 192–194.

5. Олейников, В.Н. Оценка некоторых характеристик турбулентных процессов в тропосфере радиолокационным методом / В.Н. Олейников, О.А. Соляшик, Д.Б. Евсеев // Прикладная радиоэлектроника. – 2004. – Т. 3, № 1. – С. 35–40.