



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2022-3-32-40>

УДК 621.371.3

Обнаружение неоднородностей в стратосфере радиолокаторами метрового диапазона волн

И. В. Васильев¹, Б. Т. Жумабаев², А. Д. Мустабеков³, В. Г. Петровский³, К. Ж. Исабаев³

¹Специальное конструкторское бюро «Гранит», Алма-Ата, Казахстан

²Институт ионосферы, Алма-Ата, Казахстан

³Военно-инженерный институт радиоэлектроники и связи, Алма-Ата, Казахстан

Для целей исследования тропосферной радиосвязи в метровом диапазоне радиоволн в Казахстане создан полигон для радиофизических исследований на базе радиотехнических средств Военно-инженерного института радиоэлектроники и связи (ВИИРЭиС). В работе приводится информация о характеристиках полигона и первых результатах научных исследований, полученных нем, а также об обнаружении неоднородностей в стратосфере. Сделана оценка высот расположения неоднородностей. Использование радиополигона позволит развить ряд перспективных направлений радиофизических исследований в Казахстане с использованием радиолокационных станций (РЛС).

Ключевые слова: интерференция, полигон, радиолокатор, стратосфера, тропосфера, тропосферное распространение радиоволн

Для цитирования: Васильев И. В., Жумабаев Б. Т., Мустабеков А. Д., Петровский В. Г., Исабаев К. Ж. Обнаружение неоднородностей в стратосфере радиолокаторами метрового диапазона волн // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2022. № 3. С. 32–40. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2022-3-32-40>

For citation: Vassilyev I. V., Zhumabayev B. T., Mustabekov A. D., Petrovskiy V. G., Isabaev K. Zh. Detection of irregularities in the stratosphere using VHF radars // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2022. No. 3. P. 32–40. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2022-3-32-40>

Поступила 23.11.2021 Отрецензирована 07.12.2021 Одобрена 18.03.2022 Опубликована 24.06.2022

В 2007 году в Специальном конструкторско-технологическом бюро «Гранит» (г. Алма-Ата) были изготовлены две первые казахстанские радиолокационные станции. Это модернизированные двухкоординатные радиолокаторы для обнаружения воздушных целей, получившие обозначение П-18М. В настоящее время эти радиолокаторы, количество которых исчисляется многими десятками, размещены по всей территории республики и используются для непрерывного контроля воздушного пространства [1].

Из-за того, что эти радиолокаторы имеют повышенный энергетический потенциал

по сравнению со своим аналоговым прототипом, выявились проблемы в области электромагнитной совместимости РЛС, работающих на одинаковых частотах. Они создавали помехи друг другу, работая на одинаковой частоте, несмотря на то что расстояние между ними могло превышать несколько сотен километров и их могли разделять друг от друга горные массивы. Столь дальнее загоризонтное распространение радиоволн метрового диапазона могло быть объяснено только тропосферным распространением, однако имеющиеся методики расчета тропосферных трасс давали неоднозначные результаты, не объясняющие наблюдаемые уровни помех. Международный союз электросвязи в своем справочнике по расчету радиотрасс рекомендует три методики [2], основанные на эмпирических и полуэмпирических

© Васильев И. В., Жумабаев Б. Т., Мустабеков А. Д., Петровский В. Г., Исабаев К. Ж., 2022



методах. Сравнение результатов расчетов для 25 трасс с результатами экспериментальных исследований [2, таблица 6], показывает разброс среднеквадратических значений коэффициента затухания радиосигнала на трассах тропосферного распространения до 7 дБ, что затрудняло планирование электромагнитной совместимости радиолокационных средств.

Для решения этой проблемы в 2020 году Министерство образования и науки РК выделило грант РК ИРН 00012/ГФ для организации наблюдений за тропосферным распространением радиоволн с целью уточнения методик расчета тропосферных радиотрасс в метровом диапазоне [3]. Это было необходимо не только из-за недостаточной точности расчетов загоризонтных радиотрасс [4] в данном диапазоне частот, но и в связи с изменениями климатических условий в регионе, требующем внесения корректировок в коэффициенты, учитывающие климатические факторы при расчетах. Это позволило создать уникальный полигон, позволяющий производить наблюдения за сигналами РЛС дежурного режима, расположенных на всей территории Казахстана, для проведения радиофизических исследований.

В Казахстане имеется сложившаяся научная школа в области распространения радиоволн. Еще в 1961 году Академией наук Казахстана было принято решение о начале исследований распространения радиоволн в Казахстане и организован Сектор ионосферы при президиуме Академии наук (ныне Институт ионосферы), в состав которого вошли три комплексные магнито-ионосферные станции в районах городов Алматы, Темиртау (Карагандинская область) и Новоказалинска (Кызыл-Ординская область) [5].

Выбор мест расположения этих станций неслучаен. Они были развернуты вблизи полигонов Сары-Шаган, Байконур и Семипалатинск. Наблюдение за поведением ионосферы и магнитосферы в процессе испытаний вооружений дало много научных данных, позволивших не только расширить наше понимание о физике процессов, происходящих

в атмосфере Земли, но и разработать ряд методов дальнего обнаружения стартов ракет и ядерных испытаний.

Развитие радиофизических исследований напрямую зависит от наличия экспериментальной приборной базы и территориально распределенных измерительных полигонов. Для создания таких полигонов требуются большие финансовые средства как на обустройство, так и на содержание. Часто для проведения радиофизических исследований используется модифицированная техника военного назначения, так как эта техника, как правило, обладает уникальными характеристиками. Примером такого использования может быть Иркутский радар некогерентного рассеивания [6], созданный на базе радиолокационной станции системы предупреждения о ракетном нападении «Днепр».

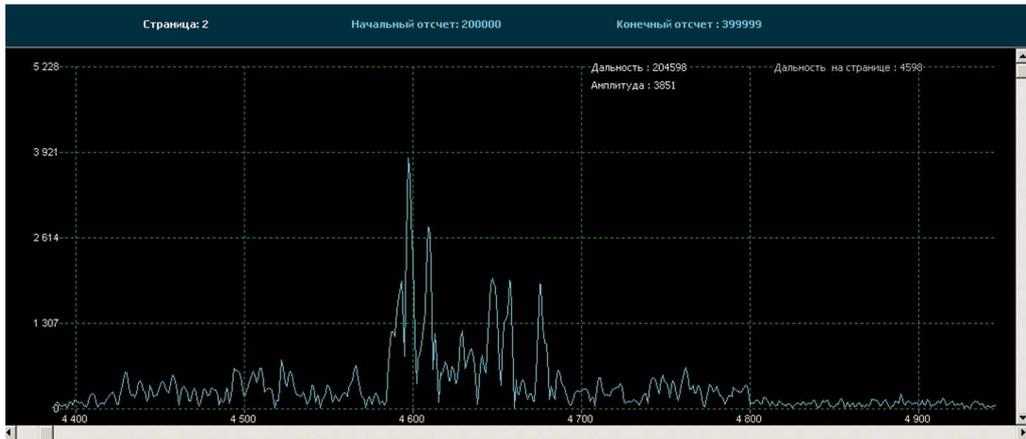
Для организации работы радиополигона потребовалось произвести калибровку радиоприемного устройства серийной радиолокационной станции П-18М, работающей в диапазоне частот 140–170 МГц, и разработать комплект специального программного обеспечения для реализации нестандартной обработки радиолокационных сигналов для приема сигналов от РЛС дежурного режима [7]. Уровень сигнала, соответствующий младшему разряду АЦП приемного устройства, соответствовал мощности -131 дБмВт. Средняя высота подъема антенны РЛС П-18М от поверхности земли составила 7,9 м, их коэффициент усиления – 250, а скорость вращения обзорных РЛС – 2, 4 или 6 оборотов в минуту. При данной высоте подъема антенны над поверхностью земли угол главного максимума диаграммы направленности в вертикальной плоскости составляет около 3,5 градуса от линии горизонта, а интерференционные боковые лепестки имеются через каждые примерно 7 градусов, уменьшаясь по уровню при увеличении угла над горизонтом. Импульсная мощность передающего устройства 8 кВт, длина фазокодированного сигнала, состоящего из 63 импульсов, равна 378 мкс. Длительность парциального импульса в кодовом сигнале – 6 мкс. Уровень боковых



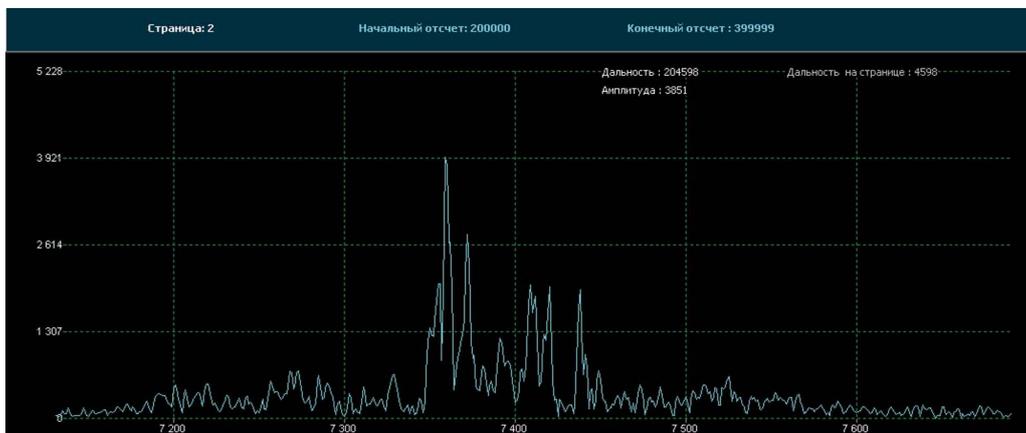
лепестков автокорреляционной функции для применяемого кода, составляет 4/63 от ее максимума. Расположение радара на территории учебного центра Военно-инженерного института радиоэлектроники и связи исключает возможность приема отраженных сигналов от движущихся наземных транспортных средств из-за углов закрытия антенны РЛС.

Углы закрытия связаны с наличием охранного ограждения и объектов инфраструктуры.

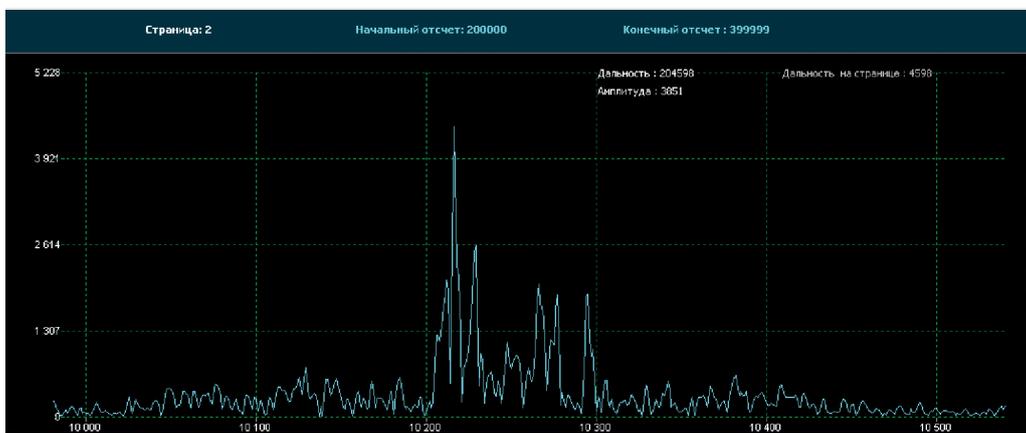
Первые опыты по приему сигналов тропосферного рассеивания дали неожиданные результаты. На рисунке 1 показан пример фазокодированного сигнала, принятого в мае 2021 года на частоте 161 МГц от радиолокационной станции, находящейся на удалении 41 км.



а



б



в

Рис. 1. Осциллограмма принятого радиолокационного сигнала

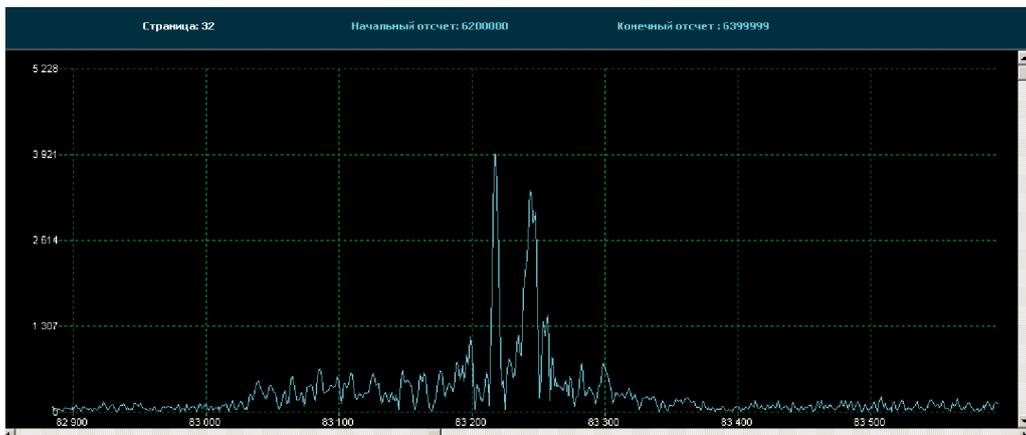


На приведенном рисунке по оси абсцисс отображаются номера тактов аналого-цифрового преобразователя (АЦП) регистрирующего устройства после прохождения оптимального фильтра. Один такт соответствует временному интервалу 2 мкс. По оси ординат – уровень сигнала в единицах АЦП приемного устройства. На рисунках 1а, 1б и 1в показаны уровни принятого сигнала от трех зондирующих импульсов наблюдаемой РЛС, излученных друг относительно друга через 6 миллисекунд (3000 тактов АЦП). В верхней части экрана указан начальный отсчет в отображаемом блоке данных в тактах АЦП, а по оси абсцисс – номер такта относительно начала отображаемого блока данных. Из этого рисунка видно, что на приемный пункт приходит еще несколько мод, существенно задержанных по времени. Разность времени между первым и последним сигналом составляет 90 отсчетов (180 мкс), что соответствует дополнительному пути 54 километра,

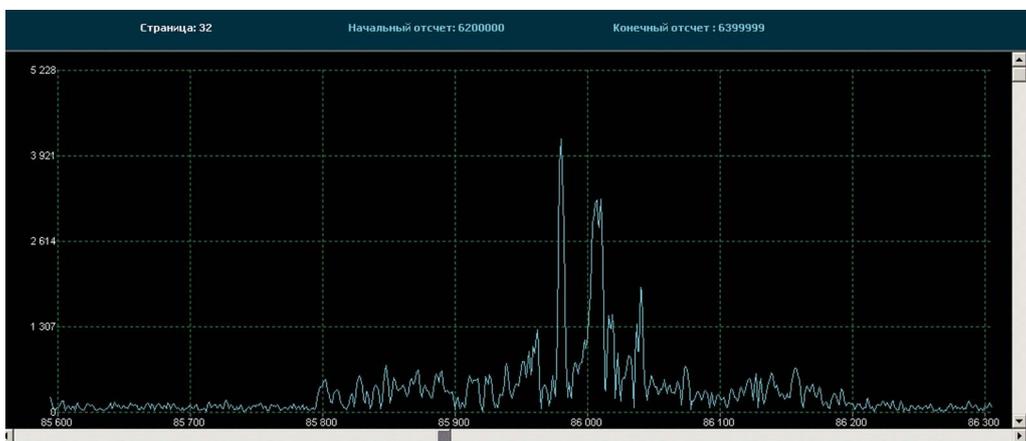
пройденному радиосигналом. При этом последовательность принятых импульсов и их амплитуда относительно стабильны.

Однако уже на следующем обороте наблюдаемого локатора (через 12 секунд, или через 6 миллионов тактов АЦП) ситуация существенно меняется (рисунок 2).

Отчетливо видна разница во временной расстановке принятых импульсов и в их амплитуде, хотя за время 6 миллисекунд между замерами, показанными на рисунках 2а и 2б, расстановка импульсов остается достаточно стабильной. Такая временная изменчивость наблюдаемых мод принятого сигнала исключает вариант возможного приема отражений от удаленных неподвижных местных предметов, например гор. Это неожиданный результат, так как измеренные задержки слишком велики для тропосферного распространения. В рекомендациях МСЭ оценка тропосферных задержек из-за



а



б

Рис. 2. Осциллограмма принятого радиолокационного сигнала с задержкой 12 секунд

многолучевости оценивается величинами не более 0,1–1 мкс [2].

Методика расчета тропосферного канала радиосвязи, например [8], предполагает наличие четырех факторов, влияющих на потери сигнала на трассе. Это потери в свободном пространстве из-за расстояния между станциями, дополнительные медианные потери из-за рассеивания сигнала на неоднородностях атмосферы (в рассматриваемом случае около 17 дБ) и потери из-за замираний сигналов. Эти замирания разделяются на быстрые и медленные, они описываются разными законами распределения. Природа этих замираний до настоящего времени еще до конца не выяснена. Полученные результаты позволяют высказать предположение, что наличие нескольких областей рассеивания с различной эффективной поверхностью рассеивания, перемещающихся под действием ветров, приводит к интерференции сигналов, рассеянных на различных неоднородностях.

При измерении радиосигналов только в одной точке невозможно однозначно решить задачу определения координат рассеивающей неоднородности в пространстве. В пространстве может быть множество точек, в которых может находиться рассеивающая неоднородность, обеспечивающих одинаковое время распространения радиоволны между источником излучения и приемником. Все эти точки должны находиться на поверхности эллипсоида вращения, в фокусах которого (А, В) находятся передатчик и приемник (рисунок 3).

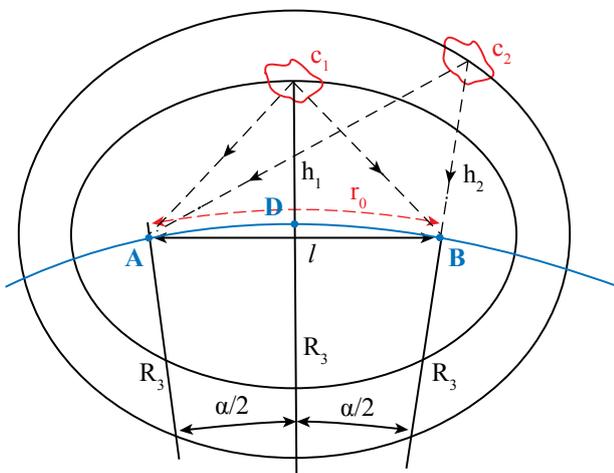


Рис. 3. Распространение радиоволн, рассеивающихся на неоднородностях атмосферы

Тем не менее можно оценить высоту рассеивающей неоднородности, исходя из предположения, что она находится, с большой степенью вероятности, над линией АВ между точкой излучения и приема радиосигналов, так как сигнал при наблюдениях принимается только когда антенны локаторов направлены друг на друга. Рассмотрим два случая: когда неоднородность расположена над точкой D, в середине трассы между локаторами, и когда неоднородность находится над одним из локаторов, это даст возможность оценить пределы максимальной и минимальной возможной высоты расположения неоднородности для конкретного измеренного значения времени задержки. Обозначим точку в центре Земли – «О», угол между направлениями на локаторы из центра Земли – α , радиус Земли – R_3 , а высоту неоднородности от поверхности Земли – h .

По известному расстоянию между локаторами r_0 , вычислим угол α .

$$\alpha = \frac{r_0}{R_3}. \quad (1)$$

Расстояние между фокусами эллипсоида вращения составит

$$l = 2R_3 \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (2)$$

Рассмотрим первый случай.

Задержка рассеянной в тропосфере радиоволны относительно поверхностной волны будет определяться разностью путей прохождения этих мод

$$\Delta t_1 = (AC_1 + BC_1 - r_0) / c, \quad (3)$$

где c – скорость света, или

$$(AC_1 + BC_1) = 2 AC_1 = \Delta t_1 c + r_0. \quad (4)$$

С помощью теоремы косинусов величину AC_1 можно найти из треугольника OAC_1

$$AC_1^2 = OA^2 + OC_1^2 - 2 \times OA \times OC_1 \times \cos \alpha/2 = R_3^2 + (R_3 + h_1)^2 - 2 \times R_3 \times (R_3 + h_1) \times \cos \alpha/2. \quad (5)$$

Решив совместно уравнения (4) и (5), получим квадратное уравнение, из которого можно определить приближенное значение высоты



области рассеивания, игнорируя малозначащие члены уравнения

$$h_1 \approx \frac{\sqrt{(\Delta t_1 c + r_0)^2 - 8R_3^2 \left(1 - \cos\left(\frac{r_0}{2R_3}\right)\right)}}{2}. \quad (6)$$

Подставив значение максимального зафиксированного времени задержки 180 мкс и расстояния между локаторами 41 км, получим значение высоты рассеивающей неоднородности 42,8 км над поверхностью Земли.

Для второго случая задержка рассеянной в тропосфере радиоволны относительно поверхностной будет определяться уравнением

$$\Delta t_2 = (AC_2 + BC_2 - r_0) / c, \quad (7)$$

где c – скорость света,

$BC_2 = h_2$ – искомая высота неоднородности над поверхностью Земли.

В другой записи

$$(AC_2 + BC_2) = (AC_2 + h_2) = \Delta t_2 c + r_0. \quad (8)$$

Известны две стороны треугольника $OA = R_3$ и $OC_2 = R_3 + h_2$, а также угол между ними α . Из теоремы косинусов следует

$$AC_2^2 = R_3^2 + (R_3 + h_2)^2 - 2R_3(R_3 + h_2) \cos \alpha. \quad (9)$$

Решая совместно уравнения (8) и (9), получим линейное уравнение, из которого, игнорируя малозначительные члены, определим высоту рассеивающей области (10)

$$h_2 \approx \frac{(r_0 + \Delta t_2 c)^2 - 2R_3^2 \left(1 - \cos\frac{r_0}{R_3}\right)}{2(r_0 + \Delta t_2 c)}. \quad (10)$$

Для времени задержки 180 мкс и расстояния между локаторами 41 км высота рассеивающей неоднородности должна быть 38,5 км над поверхностью Земли.

Этот расчет дает возможность оценить минимальную высоту, на которой может находиться область рассеивания. Полученные оценки в пределах от 38,5 до 42,8 км свидетельствуют, что наблюдаемые неоднородности находились в стратосфере, так как верхняя граница тропосферы не превышает 15 км.

Сам факт наличия неоднородностей в стратосфере, способных преломлять путь прохождения радиоволны, был известен.

Однако считалось, что этот эффект выражен существенно слабее, чем в тропосфере [9]. Применение методов спутникового «просветного» зондирования атмосферы в диапазонах сантиметровых и дециметровых волн [10] выявило наличие образований в стратосфере, рассеивающих радиоволны на высотах до 30 км. При этом максимумы наблюдались на высотах 20–25 км и обнаруженные неоднородности были более стабильными, чем в тропосфере.

Первый успешный опыт использования радиолокаторов обзора воздушного пространства для получения новых научных данных позволяет сделать вывод о расширении области радиофизических исследований. Необходимо организовать регулярные наблюдения за распространением радиоволн на радиотрассах различной протяженности, проходящих как над равнинной местностью, так и над горными массивами. При этом наблюдения необходимо проводить как минимум из двух точек, чтобы уточнить пространственное распределение и динамику движения регистрируемых неоднородностей. Эти наблюдения помогут уточнить модели тропосферного и стратосферного распространения радиоволн для разных сезонов, времени суток и для разной погоды. Однако эти эксперименты выходят за рамки выполняемого гранта, и в Казахстане недостаточно научных кадров, специализирующихся в области физики атмосферы.

Министерство образования и науки Республики Казахстан поощряет международное сотрудничество казахстанских ученых и предоставляет грантовое финансирование для проведения совместных исследований. С условиями проводимых конкурсов можно ознакомиться на сайте [11]. Авторы приглашают научную общественность принять участие в проведении совместных исследований на новом полигоне.

Заключение

В настоящее время организован и действует радиополигон по исследованию распространения радиоволн метрового диапазона на базе Военно-инженерного института радиоэлектроники и связи Министерства обороны Республики Казахстан. Приведены



характеристики приемопередающих средств, использованных для наблюдений.

Получены первые результаты измерений тропосферного рассеяния радиоволн метрового диапазона, которые выявили эффект стратосферного рассеивания метровых волн, ранее мало изученный. Это стало возможным из-за использования в качестве источника излучения импульсного сигнала с длительностью менее 10 мкс и, соответственно, разрешением по дальности менее 3 км.

Обнаружение многочисленных рассеивающих неоднородностей позволяет выдвинуть гипотезу о том, что быстрые замирания сигналов на тропосферных трассах связаны с изменением длины путей распространения сигналов из-за перемещения рассеивающих неоднородностей в пространстве под действием ветров, а причина медленных замираний – изменения размеров неоднородностей и коэффициентов преломления (давления, температуры и влажности).

Обнаруженные стратосферные неоднородности могут играть роль «воздушных линз», являющихся естественной причиной лесных пожаров [12]. Применение РЛС метрового диапазона для их своевременного обнаружения может способствовать разработке методов своевременного оповещения о пожарной опасности, что является актуальной проблемой во всем мире.

Полученные результаты должны представлять интерес для проектировщиков модемов, применяемых на тропосферных линиях загоризонтной связи, так как дают новую информацию о причинах высокой нестабильности каналов связи, ограничивающей скорость передачи данных [13].

Список литературы

1. Международное информационное агентство «DKNews». Системная работа по модернизации вооружения и военной техники воздушной обороны. URL: <https://dknews.kz/ru/v-strane/102907-sistemnaya-rabota-pomodernizacii-vooruzheniya-i> (дата обращения: 11.12.2021).
2. Данные о распространении радиоволн для проектирования наземных линий связи пункта с пунктом. Справочник [Электронный ресурс] / Международный союз электросвязи, 2008 г. URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-54-2009-OAS-PDF-R.pdf (дата обращения: 02.11.2021).
3. Васильев И. В., Атыкенов О. С., Петровский В. Г., Калипанов М. М., Исабаев К. Ж. Перспективы малокабельных тропосферных станций метрового диапазона // Инфокоммуникационные технологии: Современное состояние и пути развития (10 декабря 2019 г.) Материалы международной научно-практ конф. – Алматы, Военно-инженерный институт радиоэлектроники и связи, Республика Казахстан, 2019, С. 59–63.
4. Serov V. V. Methodical ehnergeticheskogo rascheta zagorizontnoj linii radiosvyazi. Metod of energy calculation of over-the-horizon radio communication line/ Moscow, 2011: MNIRTI. 38 p.
5. Жумабаев Б. Т. Институту ионосферы 70 лет // Журнал эволюции открытых систем. Вып. 17. Т. 1. – 2015. С. 7–13.
6. Д. С. Кушнарев и др., Модернизация иркутского радара некогерентного рассеивания // Солнечно-земная физика, 2017, т. 3, № 3. стр. 88–94, DOI: 10.12737/szf-33201708.
7. К. Ж. Исабаев. Опыт калибровки приемного устройства РЛС П-18М для проведения научных измерений / Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2021 [текст]: сб. тр. IV междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т. 1./ под общ. ред. О. В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2021; Рязань, С. 66–69.
8. Мандель А. Е., Замотринский В. А. Распространение радиоволн: учеб. пособие / А. Е. Мандель, В. А. Замотринский. – Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2006. – 164 с.
9. Стенин Ю. М. Распространение радиоволн. Конспект лекций. [Электронный ресурс] / Казань, 2012. – 40 с. URL: <https://core.ac.uk/download/197367163.pdf> (дата обращения: 02.11.2021).
10. Ануфриев В. А. Атмосферные флуктуации амплитуды и фазы сантиметровых и дециметровых радиоволн в затменных экспериментах на трассах спутник-спутник: Дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03. – Москва, 2003. – 154 с.:



ил. РГБ ОД, 61 03-1/1007-1. URL: <http://www.dslib.net/radiofizika/atmosfernye-fluktuacii-amplitudy-i-fazy-santimetrovyh-i-decimetroyh-radiovoln-v.html> (дата обращения: 02.11.2021).

11. АО «НЦГНТЭ». Конкурсы. URL: <https://www.ncste.kz/ru/competition> (дата обращения: 17.12.2021).

12. Васильев И. В., Козин И. Д., Федудина И. Н., Шапель В. А. Естественные причины возникновения лесных пожаров. Известия НАН РК,

серия физико-математическая, 2004. № 4. – С 134–139.

13. Богатырев Е. В. Разработка и исследование модемов помехозащищенных станций спутниковой и тропосферной связи [Электронный ресурс]. / Дис. ... канд. тех. наук, Красноярск – 2018. URL: <http://www.docme.su/doc/4223751/razrabotka-i-issledovanie-modemov-pomehozashhishhyonnyh-stanci...> (дата обращения: 02.11.2021).

Об авторах

Васильев Иван Вениаминович – кандидат физико-математических наук, директор департамента ТОО СКТБ «Гранит», Алма-Ата, Казахстан.

Область научных интересов: радиофизика, радиолокация, антенны, радиосвязь, защита информации.

Жумабаев Бейбит Тенелович – кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории Института ионосферы, Алма-Ата, Казахстан.

Область научных интересов: радиофизика, геофизика.

Мустабеков Аскар Досбосынович – доктор философии (PhD), начальник Военного института радиоэлектроники и связи, Алма-Ата, Казахстан.

Область научных интересов: военное дело, радиотехника.

Петровский Василий Григорьевич – ассоциативный профессор Военного института радиоэлектроники и связи, Алма-Ата, Казахстан.

Область научных интересов: военное дело, радиотехника.

Исабаев Кайыртай Жулдызтаевич – старший преподаватель Военного института радиоэлектроники и связи, Алма-Ата, Казахстан.

Область научных интересов: радиоэлектроника, информационные технологии, антенны, радиолокационные станции, нейронные сети.



Detection of irregularities in the stratosphere using VHF radars

Vassilyev I. V.¹, Zhumabayev B. T.², Mustabekov A. D.³, Petrovskiy V. G.³, Isabaev K. Zh.³

¹Special Design and Technological Bureau “Granit”, Almaty, Kazakhstan

²Institute of Ionosphere, Almaty, Kazakhstan

³Military Engineering Institute of Radio Electronics and Communications, Almaty, Kazakhstan

To study tropospheric radio communications in the VHF band, a radiophysical research test site has been created in Kazakhstan on the basis of radio equipment of the Military Engineering Institute of Radio Electronics and Communications (VIIREiS). The paper provides information about the characteristics of the test site and the first on-site research results. The data on detection of irregularities in the stratosphere are presented. The altitudes of irregularities are estimated. The use of the radar test site will make it possible to develop a number of promising radiophysical research areas in Kazakhstan using radar stations.

Keywords: interference, test site, radar, stratosphere, troposphere, tropospheric propagation of radio waves

Information about the authors

Vassilyev Ivan Veniaminovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Director of Department, SKTB “Granit” Ltd, Almaty, Kazakhstan.

Research interests: radiophysics, radiolocation, antennas, radio communications, information security.

Zhumabayev Beibit Tenelovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Laboratory, Institute of Ionosphere, Almaty, Kazakhstan.

Research interests: radiophysics, geophysics.

Mustabekov Askar Dosbosynovich – Doctor of Philosophy (PhD), Head of the Military Engineering Institute of Radioelectronics and Communications, Almaty, Kazakhstan.

Research interests: military science, radio engineering.

Petrovskiy Vasily Grigorievich – Associate Professor, Military Engineering Institute of Radioelectronics and Communications, Almaty, Kazakhstan.

Research interests: military science, radio engineering.

Isabaev Kaiyrtay Zhuldzytayeovich – Senior Lecturer, Military Engineering Institute of Radioelectronics and Communications, Almaty, Kazakhstan.

Research interests: radioelectronics, information technology, antennas, radars, neural networks.