

Научная статья
УДК 621.391.812.3
<https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-3-51-60>

Методика расчета влияния фактора сезонности на распространение радиоволн в южных регионах России вблизи гидросферных объектов в диапазоне ультравысоких частот

**Олег Николаевич Пищин[✉], Дмитрий Сергеевич Пузанков,
Ксения Сергеевна Лыдкина**

*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, o.pishin@yandex.ru[✉]*

Аннотация. Обосновано утверждение, что для районов проектирования радиосвязи на территории вблизи гидросферных объектов (рек, озер, акватории морей) необходимо использовать методики расчета с учетом различия в уровне затухания сигналов из-за сезонности. Это особенно актуально для территории Астраханской области, для которой характерно жаркое лето (к которому целесообразно подключить крайний месяц весны – май – и первый месяц осени – сентябрь, также отличающиеся высокими температурами воздуха). Сезонные особенности распространения радиоволн определяются постоянством наличия сверхрефракции над водной частью радиолинии, формирующейся вследствие температурной инверсии в течение всего периода жаркой погоды на территории Астраханской области. Это достаточно длительный период времени (не менее 5 месяцев в году), который необходимо учитывать в системах проектирования для получения точной картины распределения уровня сигналов в диапазоне ультравысоких частот для таких систем, как системы телевидения и радиовещания, системы сотовой связи. На основе проведенных исследований и натуральных испытаний сделаны выводы, что эффект сверхдальнего распространения радиоволн в тропосферном волноводе не зависит от частотного диапазона излучающей системы. Разработана новая методика расчета затухания радиосигналов над водной гладью в приводном тропосферном волноводе.

Ключевые слова: распространение радиоволн, сезонные особенности, тропосферный волновод, приводный волновод, системы сотовой связи, проектирование, уровень затухания сигнала, волновод испарения, сверхрефракция

Для цитирования: Пищин О. Н., Пузанков Д. С., Лыдкина К. С. Методика расчета влияния фактора сезонности на распространение радиоволн в южных регионах России вблизи гидросферных объектов в диапазоне ультравысоких частот // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2022. № 3. С. 51–60. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-3-51-60>.

Original article

Methods of calculating influence of seasonality factor on propagation of radio waves in southern regions of Russia close to hydrospheric objects in ultra-high frequency range

Oleg N. Pishchin[✉], Dmitry S. Puzankov, Kseniya S. Lydkina

*Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, o.pishin@yandex.ru[✉]*

Abstract. The article substantiates the assertion that for radio communication design areas in the territory close to the hydrospheric objects (rivers, lakes, sea areas) it is necessary to use calculation methods taking into account the difference in the level of signal attenuation due to seasonality. This is especially true for the Astrakhan region characterized by hot summers (to which it is advisable to add the last month of spring - May - and the first month of autumn - September, also characterized by high air temperatures). Seasonal features of radio wave propagation are determined by the continuous superrefraction above the water part of the radio line, which is formed due to the temperature inversion during the whole period of hot weather in the Astrakhan region. This is a fairly long period of time (at least 5 months a year) that must be taken into account in design systems to obtain an accurate picture of the signal level distribution in the ultra-high frequency range for such systems as television and radio broadcasting systems, cellular communication systems. Upon the results of the research and field tests it has been inferred that the effect of ultra-long-range

propagation of radio waves in a tropospheric waveguide does not depend on the frequency range of the radiating system. A new method for calculating the attenuation of radio signals over the water surface in the near-water tropospheric waveguide has been developed.

Keywords: radio wave propagation, seasonal features, tropospheric waveguide, drive waveguide, cellular communication systems, design, signal attenuation level, evaporation waveguide, superrefraction

For citation: Pishchin O. N., Puzankov D. S., Lydkina K. S. Methods of calculating influence of seasonality factor on propagation of radio waves in southern regions of Russia close to hydrospheric objects in ultra-high frequency range. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics.* 2022;3:51-60. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-3-51-60>.

Введение

Водоемы являются неотъемлемой частью территорий большого числа населенных пунктов. Озера, пруды, водохранилища, а также реки могут иметь весьма значимые размеры или протяженности водной глади по сравнению с размерами населенных пунктов. На примере Астраханской области и аналогичных южных регионов в работах [1, 2] описаны примеры сверхдальнего распространения радиоволн над водной гладью (или над водной поверхностью) и модели расчета затухания радиосигнала в этих условиях. В работе [2] особенности распространения радиоволн в исследуемом диапазоне наблюдения обоснованы наличием температурной инверсии в жаркий период над водной поверхностью. Обосновано, что если наличие температурной инверсии, проявляемое над сушей, – явление временное, то над водной поверхностью это явление сезонное, т. е. оно сохраняется в летний период, особенно в периоды жаркой погоды. В работе [1] также обоснована необходимость использования полученных результатов в современных системах проектирования. Сезонные особенности в распространении радиоволн диапазона ультравысоких частот (УВЧ) в настоящее время в системах проектирования радиосистем не учитываются.

Отсутствие расчетных данных в сезонных отклонениях дальности распространения радиоволн при проектировании, оптимизации и настройке существующих сетей радиосвязи может привести к некорректным результатам радиопланирования при размещении новых объектов радиоэлектронных средств (РЭС), что в реальной электромагнит-

ной обстановке может привести к дополнительной паразитной интерференции, рассогласованности в построении иерархии сети, ошибочному назначению эстафетной передачи сигнала (хэндовера), образованию зон так называемых «островов», созданию внутрисистемных помех, снижающих качество функционирования систем связи в целом.

Особенности сверхдальнего распространения радиоволн в условиях сверхрефракции

В настоящее время среди существующих методов расчета затухания уровня электромагнитного поля при распространении сигналов в системах сотовой связи, работающих в диапазоне УВЧ [3, 4], отсутствуют методики, учитывающие распространение радиоволн в условиях сверхрефракции.

Сверхрефракция – редкое состояние атмосферы, при котором дальность действия радиосвязи резко возрастает, позволяя обеспечивать соединение абонентов далеко за пределами границ максимальной дальности радиосредств, описанных в их технических характеристиках, которые создаются для характерного рода работ в условиях стандартной атмосферы. Такой вид обеспечения связи еще называют «загоризонтная» радиосвязь. В условиях сверхрефракции кривизна траектории радиоволны становится больше кривизны поверхности Земли. При таком состоянии атмосферы существует волноводное распространение, когда радиоволны последовательно претерпевают внутреннее отражение от слоев атмосферы (в верхней части) и поверхности воды (в нижней части) (рис. 1) [5].

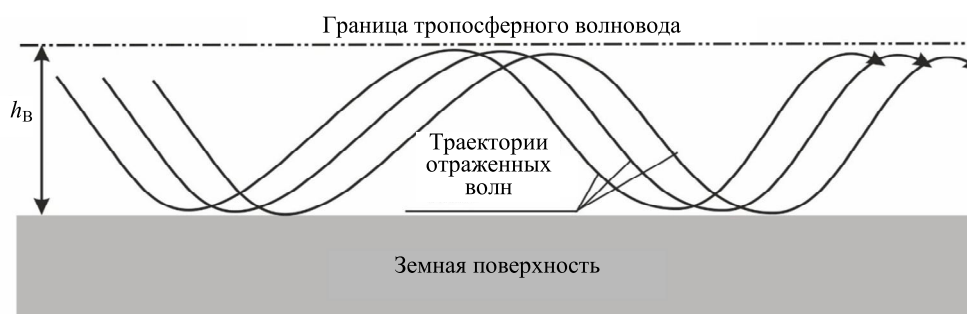


Рис. 1. Распространение радиоволны в тропосферном волноводе:
 h_b – высота приземного волновода над поверхностью земли

Fig. 1. Propagation of a radio wave in a tropospheric waveguide:
 h_b - the height of the surface waveguide above the earth's surface

Внутреннее отражение от верхнего слоя границы волновода является полным без потери энергии.

В работах [1, 2, 6] авторами проведены натурные испытания результирующих уровней затухания

в условиях сверхрефракции, по результатам исследований установлено, что над водой образуется приводный тропосферный волновод, в котором радиоволны высокой частоты распространяются с аномально малым ослаблением. Причиной малого ослабления является температурная инверсия, возникающая над водной поверхностью. Вблизи воды влажность воздуха велика и резко убывает с изменением высоты. Тогда температура снижается с высотой быстрее, чем обычно, а коэффициент преломления уменьшается с высотой медленнее. Это приводит к изменению направления траектории волны, так что радиоволна возвращается к земной поверхности. Наступает сверхрефракция.

Сверхрефракция обычно возникает при тихой погоде антициклонического типа, когда над относительно прохладной поверхностью воды находится теплый сухой воздух. Такие условия в Астраханской области над водной гладью являются постоянными, как минимум, весь летний период (сезон).

Условия возникновения сверхрефракции описываются следующими особенностями появления температурной инверсии:

1. Горизонтальный перенос воздушных масс в случае, когда теплый воздух находится над холодной частью водной глади (или земной поверхности).
2. Резкое охлаждение поверхности земли (водоема) после захода солнца, когда охлаждаются в первую очередь приповерхностные слои воздуха. Это характерно для засушливых районов.
3. Температурная инверсия возникает также при прохождении антициклонов, за счет выделения тепла при сжатии воздушных масс [7, 8].

Температурная инверсия возникает постоянно над водной гладью, когда температура воды ниже

температуры воздуха. Формируемый за счет этого тропосферный волновод часто называют волноводом испарения. Появление волновода испарения связано с инверсией влажности воздуха. Непосредственно на поверхности водоема влажность достигает 100 %. С увеличением высоты влажность уменьшается, хотя в нормальных условиях практически не зависит от высоты [10].

Приводные волноводы (волноводы испарения) – довольно частое явление в районах умеренных и экваториальных широт Индийского океана, Аравийского, Средиземного, Японского, Северного, Черного, Карибского морей. В этих районах воздух имеет высокую температуру и большую влажность у нижней границы тропосферного волновода [5]. Однако Каспийское море географически расположено на этих же широтах и имеет полную аналогию с исследованиями загоризонтной связи, изложенную в существующей литературе [11]. Область сверхрефракции может распространяться на значительные расстояния – более 1 000 км – в диапазоне УКВ-волн. Существует подтверждение сверхдальней связи за счет возникновения тропосферных волноводов от Липецка и Ростова-на-Дону до Молдавии, Венгрии, Болгарии и Румынии [11].

В северных районах вероятность появления приводных волноводов низкая. Средние высоты приводных волноводов в Северной Атлантике составляют 14 м, в Японском море – 8–12 м. Высота волновода (толщина поверхностного слоя) зависит от излучаемой частоты (рис. 2) и определяется нормами, указанными в Рекомендациях Международного союза электросвязи [12, 13].

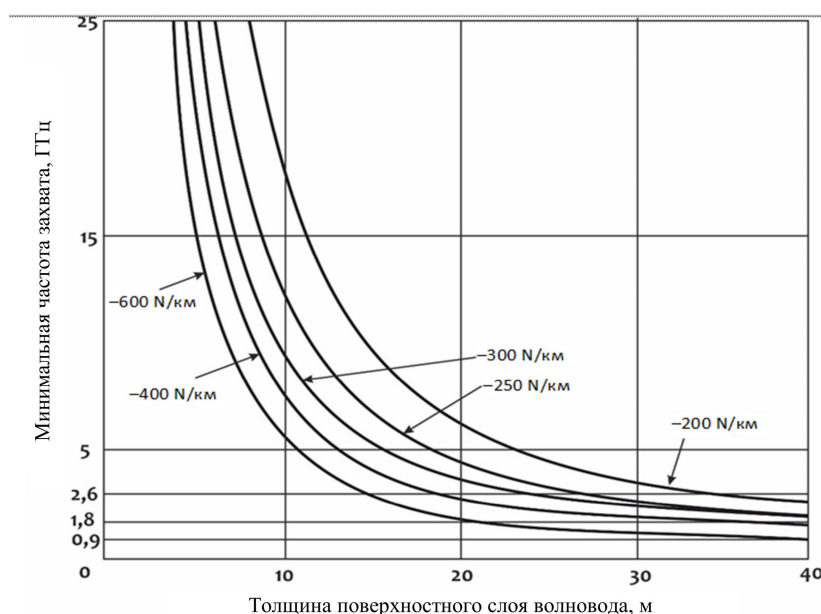


Рис. 2. Зависимость толщины поверхностного слоя (высоты) волновода от частоты излучения сигнала

Fig. 2. Dependence of the waveguide surface layer thickness (height) on a signal emission frequency

Fishkin O. N., Puzankov D. S., Lyubkina K. S. Methods of calculating influence of seasonality factor on propagation of radio waves in southern regions of Russia close to hydrospheric objects in ultra-high frequency range

Пилин О. Н., Пузанков Д. С., Лыдкина К. С. Методика расчета влияния фактора сезонности на распространение радиоволн в южных регионах России вблизи гидросферных объектов в диапазоне ультравысоких частот

Дальность радиосвязи резко возрастает, если антенна системы связи и отражающий объект (антенны РЭС) находятся внутри волновода. В соответствии с проведенными исследованиями [1, 6] для систем сотовой связи, антенны РЭС, как правило, всегда и размещены внутри тропосферного волновода.

Изменение рефракции над морем носит сезонный характер [10]. В районах с умеренным климатом повышенная рефракция и сверхрефракция проявляются летом и в начале осени. Цикл измерений по определению дальностей обнаружения судов [10] показал, что дальность возможной радиосвязи над водной гладью в летний период в 5–8 раз выше, чем в зимний.

В работе [1] представлены результаты измерений уровня затухания сигнала на местности, где

сигнал проходит через приводный тропосферный волновод. Для проведения натурных испытаний была выбрана площадка с базовыми станциями в диапазонах 1 800 и 900 МГц, с установленными антеннами на опоре высотой 45 м. Активные азимуты исследуемых направлений излучения антенн составляли 0 (ноль) и 110° для обоих стандартов. Установленные у оператора антенные системы KATHREIN K739623 (GSM 900) и KATHREIN K739495 (DCS 1 800) имеют диаграммы направленности в горизонтальной плоскости 65°, что позволяет нивелировать некоторую приближенность азимутальной точности размещения измерительного оборудования во время проведения эксперимента.

Макет размещения измерительного оборудования на местности представлен на рис. 3.

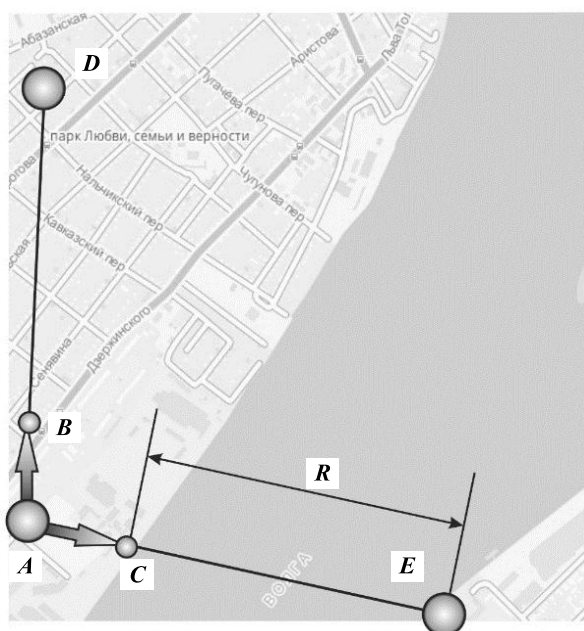


Рис. 3. Макет размещения измерительного оборудования при проведении эксперимента:

A – место размещения базовой станции; B – пункт измерения уровня сигнала на расстоянии 140 м от базовой станции; C – пункт измерения уровня сигнала у начала водной глади, на расстоянии 140 м от базовой станции; D – точка измерения уровня сигнала над сушей на расстоянии 940 м от базовой станции; E – точка измерения уровня сигнала за водной гладью на расстоянии 940 м от базовой станции; R – протяженность радиолуча над водной гладью

Fig. 3. Layout of placing the measuring equipment during the experiment:

A - the location of the base station; B - the signal level measurement point at a distance of 140 m from the base station; C - the signal level measurement point at the beginning of the water surface, at a distance of 140 m from the base station; D - the signal level measurement point over land at a distance of 940 m from the base station; E - the point of measuring the signal level behind the water surface at a distance of 940 m from the base station; R - the length of the radio beam over the water surface

Площадка базовых станций размещена в точке A (46° 20' 41" с. ш., 47° 59' 43" в. д.), измерения проводились в точках B, C, D, и E. Расстояние от базовой станции до точек B и C составляет 140 м.

Расстояния CE и BD равны 800 м (см. рис. 3). Результаты проведенных натурных испытаний представлены в табл. 1–8, итоговые результаты исследований занесены в табл. 9.

Таблица 1

Table 1

Эксперимент «Распространение сигнала над водной гладью» на частоте 900 МГц.
 Радиоизмерения в диапазоне GSM-900 на расстоянии от источника радиосигнала 940 м
 над водной гладью (прямая видимость)

Experiment "Signal propagation above the water surface" at 900 MHz.
 Radio measurements in the GSM-900 range at a distance of 940 m from the radio signal source
 above the water surface (line of sight)

Тип измерительного оборудования	Уровни затухания сигнала с учетом быстрых замираний, dBm									M _x , dBm
Nokia 3310	-40	-41	-42	-43	-42	-45	-46	-44	-42	≈42,8
Nokia E51	-44	-48	-46	-47	-47	-44	-45	-48	-45	≈46,0
Sagem OT-290	-44	-46	-51	-45	-47	-48	-44	-46	-49	≈46,7
Motorola L9	-46	-50	-47	-48	-49	-50	-46	-47	-47	≈47,8

Таблица 2

Table 2

Эксперимент «Распространение сигнала над водной гладью» на частоте 1 800 МГц.
 Радиоизмерения в диапазоне DCS-1 800 на расстоянии от источника радиосигнала 940 м
 над водной гладью (прямая видимость)

Experiment "Signal propagation above the water surface" at 1 800 MHz.
 Radio measurements in the DCS-1 800 band at a distance of 940 m from the radio signal source
 over the water surface (line of sight)

Тип измерительного оборудования	Уровни затухания сигнала с учетом быстрых замираний, dBm									M _x , dBm
Nokia 3310	-66	-60	-59	-62	-63	-60	-59	-58	-62	≈61,0
Nokia E51	-63	-64	-63	-63	-63	-64	-63	-64	-63	≈63,3
Sagem OT-290	-64	-60	-58	-61	-64	-62	-63	-63	-63	≈62,0
Motorola L9	-65	-62	-63	-66	-62	-63	-65	-65	-60	≈63,2

Таблица 3

Table 3

Эксперимент «Распространение сигнала над сушей» на частоте 1 800 МГц.
 Радиоизмерения в диапазоне DCS-1 800 на расстоянии от источника радиосигнала 940 м
 над сушей (прямая видимость)

Experiment "Signal propagation over land area" at 1 800 MHz.
 Radio measurements in the DCS-1 800 band at a distance of 940 m from the radio signal source
 over land (line of sight)

Тип измерительного оборудования	Уровни затухания сигнала с учетом быстрых замираний, dBm									M _x , dBm
Nokia 3310	-76	-77	-78	-79	-80	-79	-80	-80	-79	≈78,7
Nokia E51	-79	-83	-80	-81	-82	-83	-80	-82	-81	≈81,2
Sagem OT-290	-78	-75	-74	-92	-85	-86	-87	-80	-79	≈81,8
Motorola L9	-85	-86	-87	-88	-89	-91	-90	-84	-86	≈87,3

Таблица 4

Table 4

Эксперимент «Распространение сигнала над сушей» на частоте 900 МГц.
 Радиоизмерения в диапазоне GSM-900 на расстоянии от источника радиосигнала 940 м
 над сушей (прямая видимость)

Experiment "Signal propagation above land area" at 900 MHz.
 Radio measurements in the GSM-900 band at a distance of 940 m from the radio signal source
 over land (line of sight)

Тип измерительного оборудования	Уровни затухания сигнала с учетом быстрых замираний, dBm									M _x , dBm
Nokia 3310	-71	-63	-65	-60	-69	-62	-66	-70	-62	≈65,3
Nokia E51	-66	-63	-65	-64	-67	-65	-69	-69	-64	≈65,8
Sagem OT-290	-65	-66	-67	-64	-65	-63	-65	-67	-66	≈65,3
Motorola L9	-67	-66	-64	-65	-64	-68	-67	-66	-66	≈65,8

Pishchin O. N., Puzanov D. S., Lyudskina K. S. Methods of calculating influence of seasonality factor on propagation of radio waves in southern regions of Russia close to hydrosptrific objects in ultra-high frequency range

Таблица 5

Table 5

Эксперимент «Распространение сигнала над сушей» на частоте 900 МГц.
 Радиоизмерения в диапазоне GSM-900 на расстоянии от источника радиосигнала 140 м
 над сушей (прямая видимость)

Experiment "Signal propagation above land area" at 900 MHz.
 Radio measurements in the GSM-900 band at a distance of 140 m from the radio signal source
 over land (line of sight)

Тип измерительного оборудования	Уровни затухания сигнала с учетом быстрых замираний, dBm									M _x , dBm
Nokia 3310	-42	-39	-41	-37	-42	-43	-38	-39	-40	≈40,1
Nokia E51	-40	-38	-43	-42	-40	-39	-40	-41	-44	≈40,8
Sagem OT-290	-39	-40	-43	-37	-38	-43	-38	-40	-41	≈39,9
Motorolla L9	-41	-40	-38	-40	-42	-43	-39	-40	-40	≈40,3

Таблица 6

Table 6

Эксперимент «Распространение сигнала над сушей» на частоте 900 МГц.
 Радиоизмерения в диапазоне DCS-1 800 на расстоянии от источника радиосигнала 140 м
 над сушей (прямая видимость)

Experiment "Signal propagation above land area" at 900 MHz.
 Radio measurements in the DCS-1 800 band at a distance of 140 m from the radio signal source
 over land (line of sight)

Тип измерительного оборудования	Уровни затухания сигнала с учетом быстрых замираний, dBm									M _x , dBm
Nokia 3310	-65	-63	-58	-59	-60	-61	-59	-60	-60	≈60,6
Nokia E51	-53	-52	-52	-53	-56	-54	-60	-56	-55	≈54,6
Sagem OT-290	-56	-58	-57	-59	-55	-54	-58	-55	-56	≈56,4
Motorolla L9	-57	-56	-55	-59	-58	-54	-53	-55	-56	≈55,9

Таблица 7

Table 7

Математическое ожидание уровней затухания в сравнении на различных частотах

Mathematical expectation of attenuation levels compared at different frequencies

Частотный диапазон	Математическое ожидание (M _x) уровней затухания сигнала с учетом быстрых замираний, dBm							
	GSM 900				DCS 1 800			
	Nokia 3310	Nokia E51	Sagem OT-290	Motorolla L9	Nokia 3310	Nokia E51	Sagem OT-290	Motorolla L9
Тестовые телефоны, используемые измерительным комплексом								
Затухание над сушей (R = 140 м)	≈40,1	≈40,8	≈39,9	≈40,3	≈60,6	≈54,6	≈56,4	≈55,9
Затухание над сушей (R = 940 м)	≈65,3	≈65,8	≈65,3	≈65,8	≈78,7	≈81,2	≈81,8	≈87,3
Затухание над водной гладью (R = 940 м)	≈42,8	≈46,0	≈46,7	≈47,8	≈61,0	≈63,3	≈62,0	≈63,2

Таблица 8

Table 8

Математическое ожидание уровней затухания в сравнении на различных частотах
 (средневзвешенное значение всех приборов)

Mathematical expectation of attenuation levels in comparison at different frequencies
 (weighted average of all instruments)

Частотный диапазон	Математическое ожидание (M _x) уровней затухания сигнала с учетом быстрых замираний, dBm	
	GSM 900	DCS 1 800
Затухание над сушей (R = 140 м)	40,3	56,9
Затухание над водной гладью (R = 940 м)	45,8	62,4
Затухание над сушей (R = 940 м)	65,6	82,3

Таблица 9

Table 9

Итоговые результаты экспериментальных исследований затухания радиосигнала в УВЧ-диапазоне для частот 900–1 800 МГц над водной гладью в летний период

Final results of experimental studies of radio signal attenuation in the UHF band for frequencies 900-1 800 MHz over water surface in summer period

Используемый частотный диапазон f , МГц	Используемая длина волны λ , м	Математическое ожидание уровней затухания сигнала, dBm, с учетом быстрых замираний		
		Затухание в точках B и C , дБ	Затухание в точке D , дБ	Затухание в точке E , дБ
900	0,32	40,3	65,6	45,8
1 800	0,16	56,9	82,3	62,4

В результате исследований подтверждено, что затухание сигнала над водой значительно меньше, чем над сушей.

В работе [1] получено представление сигнала в виде погонного коэффициента затухания (линейной зависимости), но для систем мобильной связи затухание уровня поля, как правило, рассчитывается по логарифмической зависимости. Полученные в этой работе формулы представлены ниже:

$$L_{AW_900}(r) = 0,95 \cdot (33,5 + 5 \lg(f) + 5 \lg(r)); \quad (1)$$

$$L_{AW_1800}(r) = 0,95 \cdot (49,5 + 5 \lg(f) + 5 \lg(r)), \quad (2)$$

где f – рабочая частота, ГГц; r – дистанция от передатчика базовой станции до приемника абонентской радиостанции, м.

Однако в моделях (1) и (2) допущена неточность. При формировании формул в затухание уровня поля включено и значение затухания и над сушей, и над водой, что приводит к неточности при последующих расчетах. Значения исследований приведены в табл. 10.

Таблица 10

Table 10

Значения затухания сигнала над водной поверхностью

Values of signal attenuation above water surface

Используемый частотный диапазон f , МГц	Используемая длина волны λ , м	Значение затухания при $r = 0$ м, дБ	Значение затухания при $r = 800$ м, дБ
900	0,32	0	5,5
1 800	0,16	0	5,5

Отметим, что значения затухания для разных диапазонов оказались идентичными. Указанное в табл. 10 затухание на дистанции 800 м в количестве 5,5 дБ может быть на самом деле не затуханием над водной гладью, а результатом затухания сигнала при его преодолении границы двух сред (суша-вода и вода-суша), тогда актуально предположение о полном отсутствии затухания в среде тропосферного волновода, что позволяет нам исключить зависимость уровня поля от частоты излучения в исследуемом диапазоне 1–2 ГГц.

Аппроксимируя измеренные значения, получим логарифмическую зависимость затухания от расстояния между BC и AC . Уравнение логарифмической регрессии имеет вид

$$y = a + b \ln x.$$

Со значениями проведенных натуральных испытаний выражение для расчета имеет вид

$$L_{AW_900-1800}(r) = 4,428 + 0,369 \log(r). \quad (3)$$

Для подтверждения адекватности новой методики в среде MathCad были построены графики некоторых существующих статистических моделей расчета уровня поля и новой методики расчета ($L_{(AW_900-1800)}(r)$), а также идеальные значения, за которые были приняты результаты натуральных испытаний (рис. 4).

Пилин О. Н., Пузанков Д. С., Лыдыкина К. С. Методика расчета влияния фактора сезонности на распространение радиоволн в южных регионах России вблизи гидросферных объектов в диапазоне ультравысоких частот

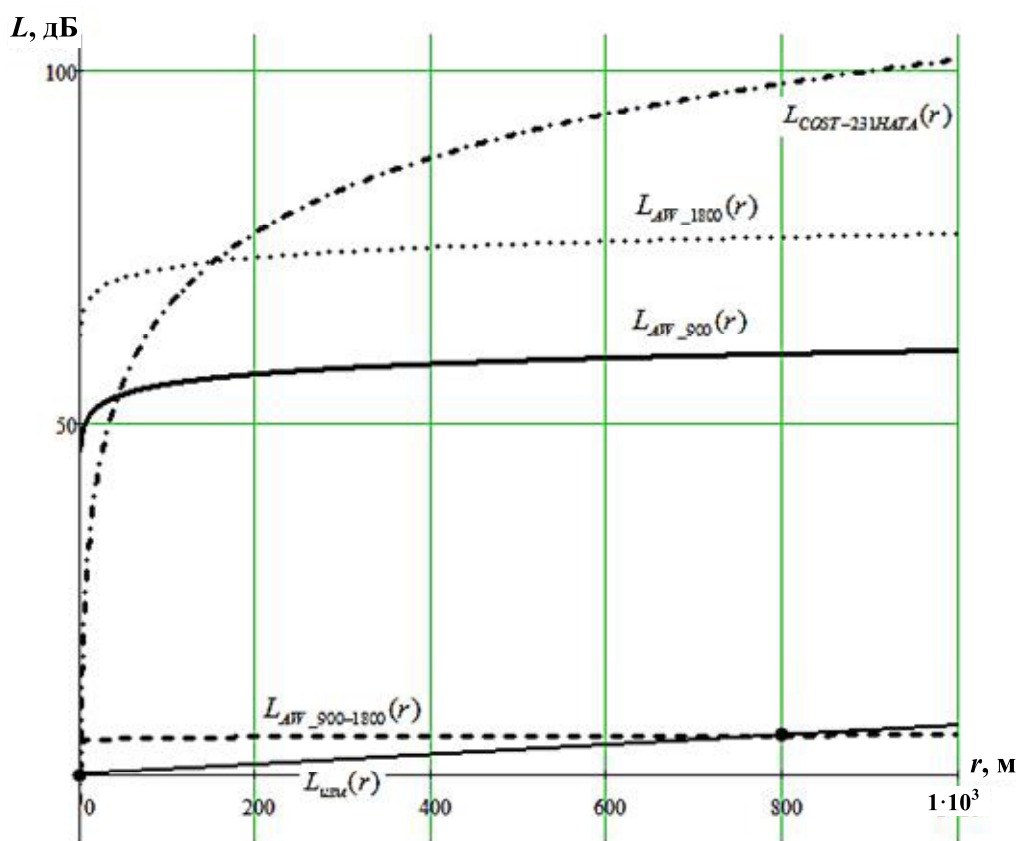


Рис. 4. Графики уровня затухания при использовании различных моделей:

$L_{AW_900-1800}(r)$ – новая методика (формула (3));
 $L_{AW_900}(r)$ – модель, полученная в работе [7] для частотного диапазона 900 МГц (формула (1));
 $L_{AW_1800}(r)$ – модель, полученная в работе [7] для частотного диапазона 1 800 МГц (формула (2));
 $L_{COST-231HATA}(r)$ – модель COST-231HATA для сельской местности

Fig. 4. Graphs of attenuation level built by using different models:

$L_{AW_900-1800}(r)$ - new method (formula (3));
 $L_{AW_900}(r)$ - model obtained in operation [7] for the frequency range 900 MHz (formula (1));
 $L_{AW_1800}(r)$ - model obtained in operation [7] for the frequency range of 1 800 MHz (formula (2));
 $L_{COST-231HATA}(r)$ - model COST-231HATA for the rural area

Графическое представление позволяет представить новую методику расчета затухания уровня сигналов в диапазоне 1–2 ГГц в условиях сверхрефракции (3) как наиболее близкую к идеальным значениям, полученным в результате натуральных испытаний.

Заключение

В результате проведенных исследований получена новая методика (эмпирическая модель), позволяющая проводить расчеты затухания уровня электромагнитного поля систем подвижной радиосвязи в диапазоне 900–1 800 МГц при распространении радиосигнала в условиях сверхрефракции внутри тропосферного волновода:

$$L_{AW_900-1800}(r) = 4,428 + 0,369 \log(r).$$

Проведенные натурные испытания и полученная новая методика расчета доказывают, что затухание в условиях тропосферного волновода не зависит от частоты излучения, т. е. сигнал в условиях сверхрефракции имеет полное отражение.

Следует полагать, что новая методика расчета потерь затухания в тропосферном волноводе также будет актуальна и для систем сотовой связи в современных активных диапазонах 2 100 и 2 600 МГц для систем 3-го и 4-го поколения.

Использование новой методики в системах автоматизированного проектирования позволит учитывать сезонные особенности в распространении радиоволн и проводить проектирование в системах широкополосного радиодоступа, эффективнее проектировать системы нового поколения и для таких систем, как цифровое телевидение и радиовещание.

Список источников

1. Пищин О. Н., Бестаева Н. В., Зубова А. Д., Орлова А. А. Учет особенностей распространения радиоволн над водной гладью при проектировании уровня электромагнитного поля в системах подвижной радиосвязи // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2018. № 1 (29). С. 64–71.
2. Пищин О. Н., Каламбацкая О. В. Особенности распространения радиоволн УВЧ диапазона в приземном и приводном тропосферном волноводе // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2019. № 4. С. 115–121.
3. Василенко Г. О. Оценка ослабления сигналов сетей подвижной связи на коротких трассах прямой видимости // Электроника: наука, техника, бизнес. 2008. № 4. С. 72–74.
4. Бабков В. Ю., Степанец В. А. Сети мобильной связи: планирование, оптимизация, управление. СПб.: Энергомашиностроение, 2007. 108 с.
5. Дуров А. А., Кан В. С., Ничипоренко Н. Т., Устинов Ю. М. Судовая радиолокация. Судовые радиолокационные системы и САРП: учеб. для вузов. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2005. 280 с.
6. Пищин О. Н. Анализ и экспериментальные исследования затухания радиосигнала систем сотовой подвижной радиосвязи над водной гладью // Изв. Юж. федер. ун-та. Техн. науки. 2009. № 1. С. 43–49.
7. Буянов Ю. И., Гошин Г. Г. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства: учеб. пособие. М.: ТУСУР, 2013. 300 с.
8. Муромцев Д. Ю., Зырянов Ю. Т., Федюнин П. А., Белоусов О. А. Электродинамика и распространение радиоволн: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2022. 448 с.
9. Боклов Л. А., Замотринский В. А., Мандель А. Е. Электродинамика и распространение радиоволн: учеб. пособие. М.: ТУСУР, 2013. 410 с.
10. Михайлов М. С., Волкова А. А., Бородко Е. А., Кожевников К. Ю., Пермяков В. А. Учет влияния тропосферных волноводов и морской поверхности на распространение радиоволн в локационных задачах. URL: <https://mpei.ru/personal/Lists/CadrePapers/Attachments/2479/ВПГ%202018%20ВИ.pdf> (дата обращения: 03.04.2022).
11. Фехтел К. Внимание: тропосферное прохождение // Радио. 1976. № 1. С. 12–14.
12. МСЭ-R P.1546-5. Метод прогнозирования для трасс связи «пункта с зоной» для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 3000 МГц. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1546-5-201309-I!!PDF-R.pdf (дата обращения: 03.04.2022).
13. ITU-R Recommendations. 2001. P. 1546. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1546-1-200304-S!!PDF-E.pdf (дата обращения: 03.04.2022).

References

1. Pishchin O. N., Bestaeva N. V., Zubova A. D., Orlova A. A. Uchet osobennostei rasprostraneniia radiovoln nad vodnoi glad'iu pri proektirovanii urovnia elektromagnitnogo polia v sistemakh podvizhnoi radiosvazi [Accounting for features of radio wave propagation over water surface when designing level of electromagnetic field in mobile radio communication systems]. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy*, 2018, no. 1 (29), pp. 64-71.
2. Pishchin O. N., Kalambatskaia O. V. Osobennosti rasprostraneniia radiovoln UVCh diapazona v prizemnom i privodnom troposfernom volnovode [Peculiarities of propagation of UHF radio waves in near-land and near-water tropospheric waveguide]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naia tekhnika i informatika*, 2019, no. 4, pp. 115-121.
3. Vasilenko G. O. Otsenka oslableniia signalov setei podvizhnoi sviazi na korotkikh trassakh priamoi vidimosti [Evaluation of signal attenuation of mobile communication networks on short line-of-sight paths]. *Elektronika: nauka, tekhnika, biznes*, 2008, no. 4, pp. 72-74.
4. Babkov V. Iu., Stepanets V. A. *Seti mobil'noi sviazi: planirovanie, optimizatsiia, upravlenie* [Mobile communication networks: planning, optimization, management]. Saint-Petersburg, Energomashinostroenie Publ., 2007. 108 p.
5. Durov A. A., Kan V. S., Nichiporenko N. T., Ustinov Iu. M. *Sudovaiia radiolokatsiia. Sudovye radiolokatsionnye sistemy i SARP: uchebnik dlia vuzov* [Ship radar. Ship radar systems and ARPA: textbook for universities]. Petropavlovsk-Kamchatskii, Izd-vo KamchatGTU, 2005. 280 p.
6. Pishchin O. N. Analiz i eksperimental'nye issledovaniia zatukhaniia radiosignala sistem sotovoi podvizhnoi radiosvazi nad vodnoi glad'iu [Analysis and experimental studies of attenuation of radio signal of cellular mobile radio communication systems above water surface]. *Izvestiia Iuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2009, no. 1, pp. 43-49.
7. Buianov Iu. I., Goshin G. G. *Rasprostranenie radiovoln i antenno-fidernye ustroistva: uchebnoe posobie* [Propagation of radio waves and antenna-feeder devices: textbook]. Moscow, TUSUR Publ., 2013. 300 p.
8. Muromtsev D. Iu., Zyrianov Iu. T., Fedunin P. A., Belousov O. A. *Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln: uchebnoe posobie* [Electrodynamics and propagation of radio waves: study guide]. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2022. 448 p.
9. Bokov L. A., Zamotrinskii V. A., Mandel' A. E. *Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln: uchebnoe posobie* [Electrodynamics and propagation of radio waves: textbook]. Moscow, TUSUR Publ., 2013. 410 p.
10. Mikhailov M. S., Volkova A. A., Borodko E. A., Kozhevnikov K. Iu., Permiakov V. A. *Uchet vliianiia troposfernykh volnovodov i morskoi poverkhnosti na rasprostranenie radiovoln v lokatsionnykh zadachakh* [Accounting for influence of tropospheric waveguides and sea surface on radio wave propagation in location problems]. Available at: <https://mpei.ru/personal/Lists/CadrePapers/Attachments/2479/ВПГ%202018%20ВИ.pdf> (accessed: 03.04.2022).
11. Fekhtel K. Vnimanie: troposfernoe prokhozhdienie [Attention: tropospheric transit]. *Radio*, 1976, no. 1, pp. 12-14.
12. MSE-R P.1546-5. *Metod prognozirovaniia dlia trass sviazi «punkta s zonoii» dlia nazemnykh sluzhb v diapazone chastot ot 30 MGts do 3000 MGts* [ITU-R P.1546-5. Point-to-area prediction method for terrestrial services in frequency range 30 MHz - 3 000 MHz]. Available at:

https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1546-5-201309-I!!PDF-R.pdf (accessed: 03.04.2022).

13. *ITU-R Recommendations*. 2001. P. 1546. Available at: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1546-1-200304-S!!PDF-E.pdf (accessed: 03.04.2022).

Статья поступила в редакцию 06.05.2022; одобрена после рецензирования 30.06.2022; принята к публикации 21.07.2022
The article is submitted 06.05.2022; approved after reviewing 30.06.2022; accepted for publication 21.07.2022

Информация об авторах / Information about the authors

Олег Николаевич Пишин – кандидат технических наук, доцент; заведующий кафедрой связи; Астраханский государственный технический университет; o.pishin@yandex.ru

Oleg N. Pishchin – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department of Radiocommunication; Astrakhan State Technical University; o.pishin@yandex.ru

Дмитрий Сергеевич Пузанков – студент направления «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»; Астраханский государственный технический университет; Puzankov_dmitriy_astu@mail.ru

Dmitriy S. Puzankov – Student of the Direction “Infocommunication Technologies and Communication Systems”; Astrakhan State Technical University; Puzankov_dmitriy_astu@mail.ru

Ксения Сергеевна Лыдкина – студент направления «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»; Астраханский государственный технический университет; svyaz@astu.org

Kseniya S. Liydkina – Student of the Direction “Infocommunication Technologies and Communication Systems”; Astrakhan State Technical University; svyaz@astu.org

