

СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И СЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

DOI: 10.24143/2072-9502-2019-4-115-121
УДК 621.391.812.3

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН УВЧ ДИАПАЗОНА В ПРИЗЕМНОМ И ПРИВОДНОМ ТРОПОСФЕРНОМ ВОЛНОВОДЕ

О. Н. Пицин, О. В. Каламбацкая

*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Российская Федерация*

Рассматриваются примеры сверхдальнего распространения радиоволн УВЧ диапазонов в системах подвижной сотовой связи. В Астраханской области данные факты преимущественно отмечаются в весенне-летний период (май-июнь) и предположительно связаны с резкими сезонными изменениями температуры воздуха, сопровождающимися дождями. Эффект температурной инверсии приводит к изменению индекса рефракции в приземном слое и, как следствие, к изменению направления волны – эффекту сверхрефракции в приземном атмосферном слое. Исследуются свойства радиоволн при их распространении в приземном и приводном (морском) волноводе. Получены значения высот приземных и приводных (морских) тропосферных волноводов для систем сотовой связи различных диапазонов. Описаны особенности возникновения тропосферных приземных и приводных тропосферных волноводов. Отмечается необходимость использования их свойств при проведении предварительного проектирования систем мобильной связи.

Ключевые слова: радиоволны, тропосферный волновод, системы сотовой связи, сверхдальнее распространение радиоволн, высота волновода.

Для цитирования: *Пицин О. Н., Каламбацкая О. В.* Особенности распространения радиоволн УВЧ диапазона в приземном и приводном тропосферном волноводе // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2019. № 4. С. 115–121. DOI: 10.24143/2072-9502-2019-4-115-121.

Введение

Фиксирование случаев сверхдальнего распространения радиоволн в системе сотовой связи на территории Астраханской области происходит уже продолжительный период. Так, специалистами по оптимизации параметров сети сотовой связи были зафиксированы случаи устойчивой связи между абонентами на несущей частоте базовой станции, находящейся в Астрахани, с абонентом, находящимся в г. Ахтубинске Астраханской области, в диапазоне GSM-1800 (дальность связи между объектами оказалась 350 км при максимальной дальности связи в указанном стандарте 3–5 км для открытого пространства), в с. Цветное Астраханской области в диапазоне GSM-900 (дальность 56 км при максимальной дальности для указанного стандарта в свободном пространстве не более 35 км), а также в море, в верховьях Каспия, в диапазоне GSM-900 (с дальностью уверенного приема на расстоянии более 180 км). Более того, в весенне-летний период (как правило, май-июнь) в Астрахани и Астраханской области ежегодно фиксируются помехи от собственных радиоэлектронных средств (РЭС) в сети подвижной радиосвязи в районах, где связь в течение года стабильна и помех не наблюдается, как и жалоб абонентов на качество сотовой

связи при постоянном мониторинге системы связи. Связывание начала периода массовых помех с повсеместным появлением листвы в весенний период, формированием из-за этих зон сниженной проницаемости для радиоволн систем сотовой связи основного сигнала и вероятностью увеличения помехового фона могло бы иметь основания, если бы помехи не прекращали свое отрицательное воздействие в период окончания дождей, как правило, с июня и на весь последующий период (примерно до мая будущего года).

Из результатов наблюдений следует, что резкое повышение температуры воздуха в мае (до $+30-35$ °С) в Астраханской области с одновременными частыми дождями приводит к внезапному и продолжающемуся 4–6 недель возникновению помех. А так как основной помехой в системах сотовой связи являются излучения РЭС собственной сети при повторе использования частот, можно однозначно полагать, что в указанный период происходит не запланированное проектированием дальнейшее распространение радиоволн частот, которые становятся мешающими (т. к. они повторяются) в районах, где их действие не предполагалось и в течение иных сезонов (кроме резкого потепления в мае-июне ежегодно) не фиксировалось.

Приземный тропосферный волновод

Известно, что системы сотовой связи работают в диапазоне ультравысоких частот (УВЧ) 300–3 000 МГц. Распространение радиоволн происходит направленно – вдоль земной поверхности, поэтому часто волны в системах сотовой связи называют «земными» волнами. В связи с тем, что все современные направленные антенны систем сотовой связи имеют электрический наклон диаграммы направленности от 2-х до 10°, направление электромагнитной волны распространяется средствами РЭС сотовой связи под углом к земной поверхности (рис. 1).



Рис. 1. Отражение радиоволны систем сотовой связи от земной поверхности при нормальном состоянии атмосферы

В обычных условиях волны, отражаясь от земной поверхности, рассеиваются, и основную энергетическую нагрузку несут прямые и отраженные волны.

Природа же временного сверхдальнего распространения сигналов сотовой связи, описанного во введении, заключается в том, что излучаемая радиоволна попадает в приземный тропосферный волновод.

На примере Астраханской области, с очень жарким летом, этот процесс можно описать следующим образом: в период жаркой погоды и ливневых дождей температура земли сильно и быстро снижается, а температура воздуха понижается значительно медленнее или не успевает снизиться, поэтому с увеличением высоты (на некотором расстоянии от земной поверхности) температура воздуха не уменьшается, как в нормальной тропосфере¹, а увеличивается. Этот процесс

¹ Нормальной тропосферой называют такую гипотетическую тропосферу, свойства которой отображают среднее состояние реальной тропосферы. Нормальную тропосферу характеризуют следующими свойствами: давлением у поверхности Земли ($p = 0,1013$ МПа), температурой ($T = 288$ К) и относительной влажностью ($S = 60$ %). С увеличением высоты на каждые 100 м давление уменьшается на 1,2 кПа, температура – на 0,55 К. Границей нормальной тропосферы считают высоту 11 км.

называется температурной инверсией, из-за нее изменяется и индекс рефракции в приземном слое и, как следствие, волна изменяет свое направление и возвращается к земной поверхности – наступает сверхрефракция в приземном атмосферном слое (рис. 2).

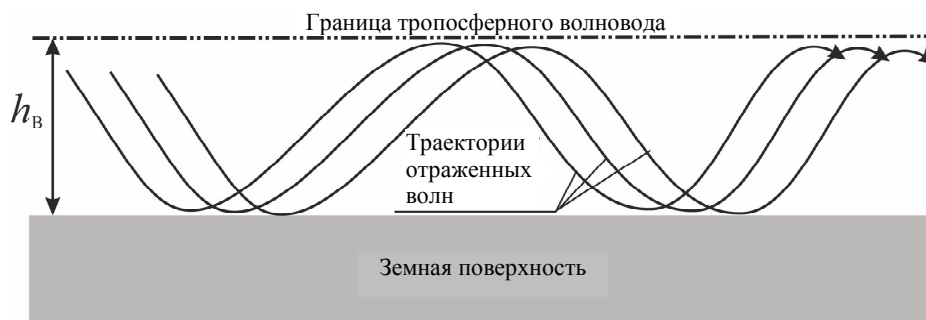


Рис. 2. Захват радиоволны систем РЭС сотовой связи в приземный тропосферный волновод

А прекращается этот эффект по мере прогрева земли и восстановления рефракционных свойств нормальной тропосферы.

Высота приземного тропосферного волновода определяется по аналогии с металлическим волноводом. Исходя из выражения, представленного в [1], имеется некоторая критическая длина волны $\lambda_{кр}$, длиннее которой волны быстро затухают и не распространяются. Критическая длина волны связана с высотой волновода, h_B , соотношением

$$\lambda_{кр} = 8 \cdot 10^{-4} h_B^{3/2}.$$

Тогда форма расчета высоты волновода в зависимости от частоты излучения имеет вид

$$h_B^{3/2} = \frac{\lambda_{кр}}{8 \cdot 10^{-4}}$$

или

$$h_B = \left(\frac{\lambda_{кр}}{8 \cdot 10^{-4}} \right)^{2/3}.$$

Отсюда можно рассчитать высоту волновода для определенных систем сотовой связи.

Таким образом, высота волновода для систем сотовой связи с различным диапазоном имеет следующие значения:

- GSM-900 – $h_{B-GSM-900} \approx 55$ м;
- DCS-1 800 – $h_{B-DCS-1\ 800} \approx 38$ м;
- CDMA (2 100 МГц) – $h_{B-CDMA-2\ 100} \approx 31$ м;
- LTE (2 600 МГц) – $h_{B-LTE-2\ 600} \approx 28$ м.

Эти значения подтверждаются документом [2], где приведены соответствия высоты (верхней границы) от поверхности земли поверхностного слоя приземного тропосферного волновода и частоты излучения передатчика (рис. 3).

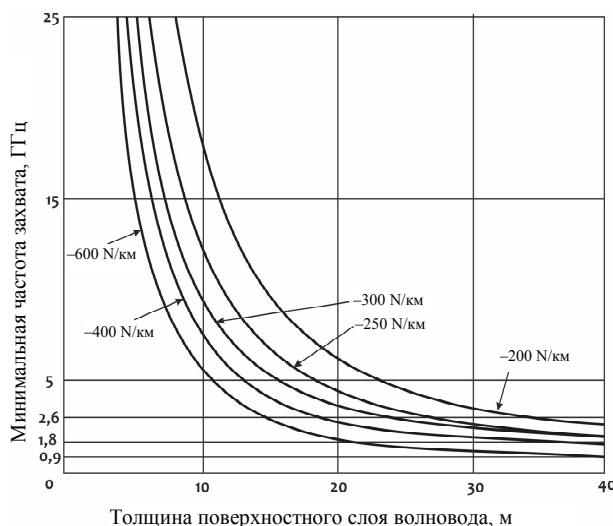


Рис. 3. Минимальная частота захвата сигнала в атмосферные радиоволны с постоянными градиентами рефракции [2]

Уникальным случаем для систем сотовой связи, работающих в дециметровом диапазоне (с длинами волн 12–33 см), является то, что излучатель РЭС находится в системах сотовой связи практически всегда внутри волновода, т. к. размещение антенн базовых станций, как правило, планируется и является оптимальным на высотах 20–40 м (рис. 4).



Рис. 4. Стандартное размещение антенн базовых станций в системах сотовой связи

Следует отметить, что сверхдальному распространению сигнала подвергается энергия не только основного лепестка диаграммы излучения антенны, но иногда и заднего лепестка диаграммы направленности. Как правило, это происходит в случае, когда физический (электрический) наклон антенны приближается к своему максимуму в 10° . Операторы сотовой связи, управляя углом наклона антенны относительно горизонта, ограничивают зону обслуживания одного (или нескольких) секторов базовой станции (рис. 5).



Рис. 5. Распространение сигнала от заднего лепестка диаграммы направленности в поверхностном тропосферном волноводе

Однако не рассеяние, а дальнейшее распространение сигнала заднего лепестка при возникновении тропосферного волновода также может привести к незапланированному внесению внутрисистемных помех в сеть сотовой связи. Происходить это может в случае, когда граница приземного тропосферного волновода близко расположена к месту размещения антенны и сама антенна находится внутри тропосферного волновода.

Приводный тропосферный волновод

Встречаются явления, когда в тропосфере создаются условия, при которых коэффициент преломления изменяется с высотой необычно. Например, после захода солнца поверхность земли может быстро охлаждаться; охлаждаются и нижние слои воздуха, верхние же слои еще остаются нагретыми. Значит, температура воздуха в этом случае не убывает, а растет с увеличением высоты, а коэффициент преломления убывает с увеличением высоты более резко, чем при нормальной рефракции.

Резкое убывание коэффициента преломления с увеличением высоты наблюдается постоянно над водной поверхностью: вблизи воды влажность воздуха велика и резко убывает с изменением высоты. Тогда температура убывает с высотой быстрее, чем обычно, а коэффициент преломления убывает с высотой медленнее, чем обычно, или может даже возрастать.

Если в случае образования приземных тропосферных волноводов этот процесс носит случайный характер и может возникать над любыми территориями суши в зависимости от погодных условий, то места возникновения приводного тропосферного волновода известны заблаговременно, т. к. местоположение водных объектов и их береговой линии можно считать неизменным, и особенности распространения радиоволн над такими участками местности, как реки, озера, водохранилища и акватории морей, необходимо учитывать при проектировании сетей подвижной сотовой радиосвязи.

В работе [3] проведены натурные испытания с измерением уровней радиосигнала систем сотовой связи в диапазоне DCS-1800 над водной гладью (в приводном тропосферном волноводе), а в работе [4] получены уточняющие модели затухания радиоволн:

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

а для систем, использующих диапазон частот 1 800 МГц, модель имеет вид

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

где L_{AW_900} , L_{AW_1800} – потери передачи (затухание) в соответствующих диапазонах над водной поверхностью (приводном тропосферном волноводе); f – рабочая частота, ГГц; r – дистанция от передатчика базовой станции до приемника абонентской радиостанции, м; 0,95 – коэффициент отражения сигнала от водной поверхности (табл.).

Усредненные значения коэффициентов отражения

Вид поверхности	Ф при длинах волн, см			
	18–15	8–7	5	3–1,5
Водная поверхность	0,99–0,95	0,95–0,85	0,85–0,63	0,45–0,2
Равнина, пойменные луга, солончаки	0,99–0,95	0,8–0,6	–	–
Ровная лесистая местность	0,8–0,6	0,6–0,5	0,5–0,3	0,3–0,1
Среднепересеченная лесистая местность	0,5–0,3	0,3–0,2	–	–

Наличие, свойства и использование в некоторых системах связи особенностей приводного тропосферного волновода описаны в работах [5–8].

Для Астраханской области и районов с идентичными климатическими особенностями появление приводного (морского) тропосферного волновода – явление сезонное, что необходимо учитывать в системах проектирования для мобильной радиосвязи.

Заключение

Таким образом, для проведения адекватного проектирования радиосистем в диапазоне систем мобильной связи необходимо учитывать особенности распространения радиоволн с учетом тропосферных волноводов. Нестандартная дальность распространения сигналов может оказывать

как положительное, так и отрицательное воздействие на качество связи внутри системы. Полезный (ожидаемый) сигнал в предсказуемой области является элементом стабилизации систем связи, остальные сигналы могут являться помехой в новой зоне. Не только управление стабильностью системы связи, но и возможное использование недостаточно изученных процессов должно стать повышением уровня качества при предоставлении услуг связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распространение УКВ на большие расстояния в условиях сверхрефракции. URL: <http://rateli.ru/books/item/f00/s00/z0000000/st028.shtml> (дата обращения: 15.07.2019).
2. Рекомендация МСЭ-R P.834-6. Влияние тропосферной рефракции на распространение радиоволн.
3. Пищин О. Н. Анализ и экспериментальные исследования затухания радиосигнала систем сотовой подвижной радиосвязи над водной гладью // Изв. Юж. федер. ун-та. Сер.: Технические науки. 2009. № 1. С. 43–49.
4. Пищин О. Н., Бестаева Н. В., Зубова А. Д., Орлова А. А. Анализ модели распространения радиоволн над водной поверхностью и их использование при расчетах уровней электромагнитного поля в системах подвижной радиосвязи // Прикаспийский журнал. Управление и высокие технологии. 2017. № 3. С. 121–130.
5. Карлов В. Д., Мисайлов В. Л., Петрушенко Н. Н. Свойства морского тропосферного волновода как элемента радиоканала // Системы обработки информации. 2008. Вып. 6. С. 54–58.
6. Светличный В. А., Смирнова О. В. Исследование особенностей распространения ультракоротких радиоволн в приводном волноводе в зависимости от его параметров и длины радиоволны // Радиотехника и электроника. 2018. Т. 63. № 7. С. 682–690.
7. Иванов В. К., Шалыпин В. Н., Левадный Ю. В. Рассеяние ультракоротких радиоволн на тропосферных флуктуациях в приводном волноводе // Изв. высших учебных заведений. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 4. С. 307–317.
8. Михайлов М. С., Волкова А. А., Бородко Е. А., Кожевников К. Ю. Загоризонтное распространение радиоволн в тропосферных волноводах // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн: материалы II Всерос. науч. конф. по проблемам радиофизики и дистанц. зондирования сред, проводимой в рамках VIII Всерос. Армандовских чтений (Муром, 26–28 июня 2018 г.). Муром: Изд-во Муром. ин-та (филиала) ВГУ им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, 2018. С. 181–186.

Статья поступила в редакцию 15.07.2019

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пищин Олег Николаевич – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; канд. техн. наук; зав. кафедрой связи; o.pishin@yandex.ru.

Каламбацкая Оксана Владимировна – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; доцент; преподаватель кафедры связи; k.oksana19@mail.ru.



CHARACTERISTICS OF UHF WAVES DISTRIBUTION IN LAND AND WATER SURFACE TROPOSPHERIC WAVEGUIDE

O. N. Pishchin, O. V. Kalambatskaya

*Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russian Federation*

Abstract. The article considers examples of ultra-long propagation of UHF radio waves in mobile cellular communication systems. The phenomena are mainly observed in the Astrakhan region in the spring-summer period (May-June) and are presumably associated with sharp seasonal changes of air temperature followed by rains. The effect of temperature inversion results in changing the refraction index in the surface layer and, as a result, in changing the wave direction as the effect of superrefraction in the surface atmospheric layer. The properties of radio waves in their propagation in the land and sea-water surface waveguide are investigated. The values of the heights of land and

sea-water surface tropospheric waveguides for cellular communication systems of different ranges are obtained. The features of existing of tropospheric land and sea-water surface tropospheric waveguides are described. The need to use their properties in the mobile communication systems design is stated.

Key words: radio waves, tropospheric waveguide, cellular communication systems, ultra-long propagation of radio waves, height of a waveguide.

For citation: Pishchin O. N., Kalambatskaya O. V. Characteristics of UHF waves distribution in land and water surface tropospheric waveguide. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2019;4:115-121. (In Russ.) DOI: 10.24143/2072-9502-2019-4-115-121.

REFERENCES

1. *Rasprostranenie UKV na bol'shie rasstoianiia v usloviakh sverkhrefraktsii* [Ultra short waves propagation over long distances under super refraction effect]. Available at: <http://rateli.ru/books/item/f00/s00/z0000000/st028.shtml> (accessed: 15.07.2019).
2. Rekomendatsiia MSE-R P.834-6. *Vliianie troposfernoi refraktsii na rasprostranenie radiovoln* [Recommendation ITU-R P.834-6. Influence of tropospheric refraction on propagation of radio waves].
3. Pishchin O. N. Analiz i eksperimental'nye issledovaniia zatukhaniia radiosignala sistem sotovoi podvizhnoi radiosviazi nad vodnoi glad'iu [Analysis and experimental studies of attenuation of radio signal of cellular mobile radio systems above water surface]. *Izvestiia Iuzhnogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2009, no. 1, pp. 43-49.
4. Pishchin O. N., Bestaeva N. V., Zubova A. D., Orlova A. A. Analiz modeli rasprostraneniia radiovoln nad vodnoi poverkhnost'iu i ikh ispol'zovanie pri raschetakh urovnei elektromagnitnogo polia v sistemakh podvizhnoi radiosviazi [Analysis of radio waves propagation model on water surface and their use in calculating electromagnetic field levels in mobile radio communication systems]. *Prikaspiiskii zhurnal. Upravlenie i vysokie tekhnologii*, 2017, no. 3, pp. 121-130.
5. Karlov V. D., Misailov V. L., Petrushenko N. N. Svoistva morskogo troposfernogo volnovoda kak elementa radiokanala [Properties of marine tropospheric waveguide as element of radio channel]. *Sistemi obrobki informatsii*, 2008, iss. 6, pp. 54-58.
6. Svetlichnyi V. A., Smirnova O. V. Issledovanie osobennosti rasprostraneniia ul'trakorotkikh radiovoln v privodnom volnovode v zavisimosti ot ego parametrov i dliny radiovolny [Study of propagation of ultrashort radio waves in water surface waveguide depending on its parameters and radio wave length]. *Radiotekhnika i elektronika*, 2018, vol. 63, no. 7, pp. 682-690.
7. Ivanov V. K., Shaliapin V. N., Levadniy Iu. V. Rasseianie ul'trakorotkikh radiovoln na troposfernykh fluktuatsiiakh v privodnom volnovode [Scattering of ultrashort radio waves on tropospheric fluctuations in water surface waveguide]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Radiofizika*, 2009, vol. 52, no. 4, pp. 307-317.
8. Mikhailov M. S., Volkova A. A., Borodko E. A., Kozhevnikov K. Iu. Zagorizontnoe rasprostranenie radiovoln v troposfernykh volnovodakh [Horizontal propagation of radio waves in tropospheric waveguides]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia, radiolokatsii, rasprostraneniia i difraktsii voln: materialy II Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii po problemam radiofiziki i distantsionnogo zondirovaniia sred, provodimoi v ramkakh VIII Vserossiiskikh Armandovskikh chtenii (Murom, 26–28 iunია 2018 g.)*. Murom, Izd-vo Murom. in-ta (filiala) VGU im. A. G. i N. G. Stoletovykh, 2018. Pp. 181-186.

The article submitted to the editors 15.07.2019

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pishchin Oleg Nikolaevich – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Candidate of Technical Sciences; Head of the Department of Communication; o.pishin@yandex.ru.

Kalambatskaya Oxana Vladimirovna – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Assistant Professor; Lecturer of the Department of Communication; k.oksana19@mail.ru.

