

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2023.7.2.002

УДК 621.391

Исследование характеристик нестационарности тропосферного канала связи

Н. А. Воробьев, П. В. Луферчик✉, П. В. Штро, Е. В. Богатырев

АО «НПП «Радиосвязь» 660021, Россия,

г. Красноярск, ул. Декабристов, 19/2

✉ luferchikp@gmail.com

Аннотация

В статье представлены результаты экспериментальных исследований характеристик многолучевости и нестационарности тропосферного канала связи, выполненных на трассе Красноярск — Балахта протяженностью 144 км на частоте передачи радиосигналов 5 ГГц. Полученные данные измерений могут быть использованы при моделировании тропосферного канала в процессе проектирования систем тропосферной связи для оценки эффективности разрабатываемых алгоритмов, предназначенных для повышения энергетической эффективности систем тропосферной связи.

Ключевые слова

тропосферное распространение, частотно-селективные замирания, тропосферная связь, импульсная характеристика, частота быстрых замираний, интервал частотной корреляции.

Для цитирования

Воробьев Н. А., Луферчик П. В., Штро П. В., Богатырев Е. В. Исследование характеристик нестационарности тропосферного канала связи. *Ural Radio Engineering Journal*. 2023;7(2):123–136. DOI: 10.15826/urej.2023.7.2.002.

Research on Characteristics of Non-stationarity of the Troposcatter Communication Channel

N. A. Vorobev, P. V. Luferchik✉, P. V. Shtro, E. V. Bogatyrev

JSC NPP «Radiosvyaz», 19/2 Dekabristov Str., Krasnoyarsk, 660021, Russia

✉ luferchikp@gmail.com

Abstract

This paper presents the results of experimental research on the characteristics of multipath and non-stationarity of the tropospheric communication channel carried out on the 144 km long Krasnoyarsk-Balakhta path, at a radio signal transmission frequency of 5 GHz. The obtained measurement data may be used in modeling of the tropospheric channel in the process of designing tropospheric communication systems to evaluate the effectiveness of the developed algorithms designed to improve the energy efficiency of tropospheric communication systems.

Keywords

tropospheric propagation, frequency-selective fading, troposcatter communication, impulse response, frequency of rapid fading, frequency correlation interval.

For citation

Vorobev N. A., Luferchik P. V., Shtro P. V., Bogatyrev E. V. Research on characteristics of non-stationarity of the troposcatter communication channel. *Ural Radio Engineering Journal*. 2023;7(2):123–136. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2023.7.2.002.

Введение

Развитие глобальной информационной цифровой системы связи предполагает обеспечение высокоскоростной передачи данных в отдаленные районы, к которым относятся, например, арктические и субарктические регионы России. В таком случае построение систем связи сопряжено с определенными сложностями, связанными с неразвитой инфраструктурой данных территорий. Развертывание единой спутниковой системы связи с покрытием всей требуемой территории сопряжено с большими материальными затратами, поскольку из-за ее географических особенностей необходим вывод на орбиту новой группировки космических аппаратов. Альтернативным видом связи на дальние расстояния является тропосферная связь, которая по сравнению со спутниковой связью требует меньших экономических затрат на развертывание и ее функционирование, а также обладает высокой помехозащищенностью.

Основные исследования в области тропосферного распространения радиосигналов для нужд связи проводились во второй половине прошлого столетия. Были проведены многочисленные измерения характеристик тропосферного канала в диапазоне от 0,1 до 10 ГГц на трассах различной протяженности в разное время года. В процессе исследований были сформулированы основные положения, которые легли в основу построения общей теории тропосферного распространения радиосигналов [1].

Несмотря на отмеченные достоинства, тропосферная связь обладает рядом серьезных недостатков, связанных со спецификой распространения радиоволн в тропосфере. Она заключается в низком уровне сигнала в пункте приема, частотно-селективных замираниях, вызванных многолучевостью, а также в нестационарности канала, связанной с изменением положения и структуры рассеивающих неоднородностей тропосферы [1]. Все эти факторы приводят к ограничению пропускной способности систем тропосферной связи.

Для преодоления данных ограничений в последние десятилетия специалистами АО «НПП “Радиосвязь”» ведутся активные исследования и разработки алгоритмов повышения пропускной способности и энергетической эффективности тропосферной связи [2–7]. Современные методы моделирования позволили построить наиболее полную модель тропосферного канала, с помощью которой появилась возможность оценить эффективность разрабатываемых алгоритмов борьбы с многолучевостью распространения радиоволн. Однако разработанная модель требует учета дополнительных данных, которые на сегодняшний день могут быть получены только экспериментально для конкретных условий эксплуатации системы связи.

В настоящей статье представлены результаты натурных испытаний станций тропосферной связи на трассе Красноярск — Балахта, в которых получены требуемые для моделирования характеристики многолучевости и нестационарности тропосферного канала, включающие в себя количество лучей, их относительные задержки и амплитуды, а также скорость изменения состояния канала, определяемую частотой быстрых замираний.

Особенности распространения сигналов по тропосферному каналу

Согласно общепризнанной теории, считается, что при загоризонтном распространении сигналов, к которому относится и дальнейшее тропосферное распространение, основное влияние оказывают эффекты рефракции и рассеяния на диэлектрических неоднородностях тропосферы [1].

Эффект рефракции (преломления) излучаемой волны обусловлен тем, что величина диэлектрической проницаемости в тропосфере с высотой уменьшается, а фазовая скорость увеличивается. Это позволяет описать тропосферу как слоистую структуру, каждый слой которой характеризуется своей величиной диэлектрической проницаемости и фазовой скорости. Поскольку в верхних слоях тропосферы волна распространяется быстрее, то верхняя часть фронта волны обгоняет нижнюю и фронт волны поворачивается (луч искривляется) в сторону Земли. При этом чем меньше разница в значениях диэлектрической проницаемости и фазовой скорости соседних слоев, тем более плавным становится искривление луча и, соответственно, сигнал может быть передан на большее расстояние. Это явление также способствует распространению радиоволн за пределы прямой видимости, поскольку за счет рефракции волна может огибать возвышенности [8].

Диэлектрические неоднородности тропосферы в свою очередь вызывают явление рассеяния электромагнитной волны. Физический смысл данного явления заключается в том, что неоднородности выступают в качестве пассивных ретрансляторов электромагнитного излучения. При этом основная часть энергии излучается в свободное пространство, и только малая часть энергии излучается в сторону приемной антенны. Поскольку в области пересечения диаграмм направленности передающей и приемной антенн, которая также называется областью (объемом) рассеяния (рис. 1), обычно оказывается несколько неоднородностей, то это приводит к явлению многолучевого распространения сигналов [8]. Относительная величина максимальной задержки между лучами в этом случае пропорциональна расстоянию между верхней и нижней точками области рассеяния.

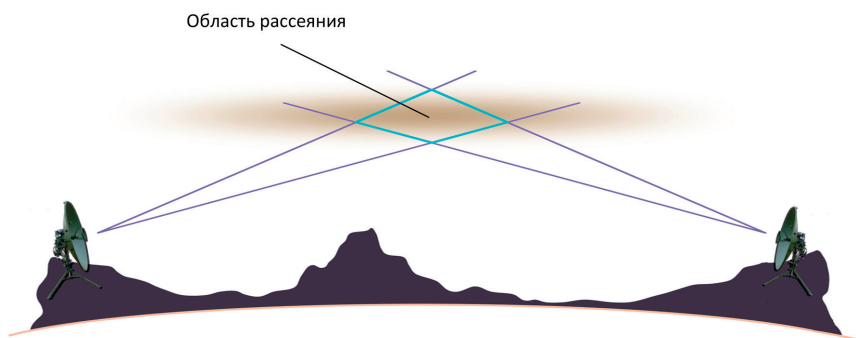


Рис. 1. Тропосферное распространение радиоволн
Fig. 1. Tropospheric scattering propagation

На данный момент при проектировании систем связи, функционирующих в условиях многолучевого распространения радиоволн, широко используется компьютерное моделирование каналов связи. При этом для получения наиболее достоверных результатов стоит задача проверки адекватности разработанных моделей. Для этого могут быть использованы стандарты и рекомендации, описывающие усредненные характеристики канала в нормальных условиях, либо характеристики, полученные в результате экспериментального измерения тропосферного канала. Здесь выбран, как отмечалось, второй путь решения задачи.

Подготовка и проведение экспериментальных исследований

При проведении экспериментальных исследований разработанных алгоритмов была поставлена сначала задача получения для выбранной трассы импульсной (ИХ) и амплитудно-частотной (АЧХ) характеристик тропосферного канала, а также характеристик частоты и глубины быстрых замираний.

Измерения характеристик проводились в ходе трассовых испытаний станций тропосферной связи «Гроза» 21 августа 2022 года в период с 16:00 до 18:00 по местному времени. В ходе испытаний одна станция находилась на полигоне в окрестности Красноярска, а другая — в районе поселка городского типа Балахта Красноярского края, длина трассы — 144 км. В период проведения трассовых испытаний наблюдались следующие климатические условия: окрестности Красноярска (согласно архиву показаний метеостанции, расположенной на окраине Красноярска) — температура воздуха +19 °С, скорость ветра 5 м/с, относительная влажность воздуха 47 %, повышенная облачность, без осадков; окрестности поселка городского типа Балахта (согласно архиву показаний метеостанции, расположенной в поселке городского типа Балахта) — температура воздуха +18 °С, скорость ветра 2 м/с, относительная влажность воздуха 59 %, повышенная облачность, ливневый дождь. Полигон в окрестностях Красноярска расположен в поле и представляет собой оборудованную площадку для проведения трассовых испытаний. Точка в окрестностях поселка городского типа Балахта располагается в поле на окраине лесного массива. Рельеф местности трассы горный, в лесном массиве преобладают смешанные леса. Карта местности и профиль трассы приведены на рис. 2.

Обобщенная структурная схема выполнения экспериментов представлена на рис. 3. Рабочее место, использовавшееся при измерении характеристик канала связи, включает векторный генератор сигналов (Keysight N5182B), усилитель мощности (выход-

ная мощность 100 Вт) и антенный пост станции тропосферной связи «Гроза» на стороне передатчика. На стороне приемника применялся аналогичный антенный пост, содержащий малошумящий усилитель производства АО «НПП «Радиосвязь» и анализатор спектра (Keysight N9040B). Рубидиевые стандарты частоты использовались для синхронизации опорных генераторов передатчика и приемника. Передача сигналов через тропосферный канал производилась на частоте 5 ГГц. Все измерения выполнялись на интервале времени в одну секунду с частотой записи отсчетов 30 МГц. Эти условия были выбраны с целью оценки динамики изменения характеристик канала за интервал времени в одну секунду.

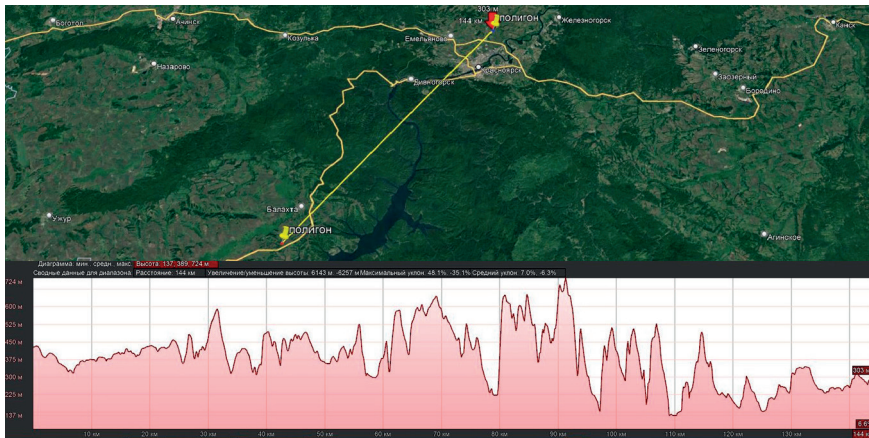


Рис. 2. Карта местности и профиль измеренной трассы
Fig. 2. Terrain map and path profile of measured path

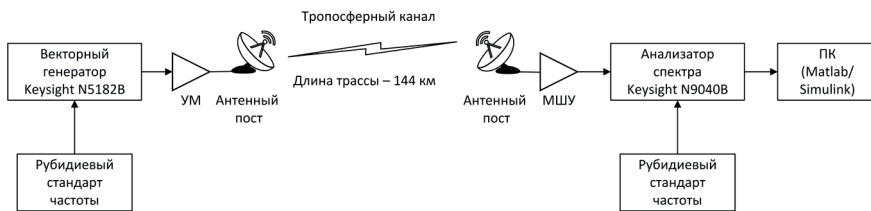


Рис. 3. Обобщенная схема использованного рабочего места
Fig. 3. General scheme of the used up workplace

Сигналы, использовавшиеся при проведении измерений, представляли собой M-последовательность длиной 127 бит с модуляцией BPSK, а также псевдослучайную последовательность с модуляцией более высокого порядка (QPSK, 8-PSK).

Обработка результатов измерений

Обработка результатов измерения производилась в среде моделирования Matlab/Simulink. Определение количества лучей распространения и их характеристик основано на использовании автокорреляционной функции (АКФ) сигнала. Поскольку передаваемая последовательность на приеме известна, с помощью построенной АКФ переданного сигнала можно получить импульсную характеристику канала распространения, которая содержит количество лучей, относительные задержки каждого луча, а также относительные амплитуды лучей. Количество лучей определяется количеством пиков АКФ сигнала, а длительность импульсной характеристики канала — задержкой между первым и последним лучами.

Измерение частоты быстрых замираний производилось методом, описанным в книге Б. А. Введенского [1]. Этот метод заключается в подсчете количества пересечений мгновенным значением мощности сигнала его среднего значения за время измерения, то есть в нашем случае за одну секунду.

Колебание уровня сигнала и глубина замираний оценивалась по результатам измерений мощности сигнала в полосе частот с помощью встроенного в Simulink анализатора спектра.

Также важной характеристикой канала является интервал частотной корреляции, показывающий, при каком минимальном значении частотного разнесения сигналов их замирания являются некоррелированными. Значение интервала частотной корреляции для тропосферного канала может быть рассчитано по формуле [9]:

$$\Delta f = 1,06 \cdot \frac{c \cdot a_3}{d^2 \cdot \theta_B}, \quad (1)$$

где c — скорость света, a_3 — эквивалентный радиус Земли (стандартное значение при нормальных условиях — 8500 км), d — длина трассы, θ_B — ширина диаграммы направленности (ДН) антенн в вертикальной плоскости.

Эквивалентный радиус Земли в общем случае определяется по формуле:

$$a_3 = \frac{a}{1 + \frac{a+g}{2}}, \quad (2)$$

где $a = 6371$ км — средний радиус Земли, g — вертикальный градиент диэлектрической проницаемости.

Градиент диэлектрической проницаемости при этом отражает текущее состояние участка тропосферы, в котором располагается

объем рассеяния, и потому претерпевает как сезонные, так и суточные изменения. Это в свою очередь приводит к изменению величины эквивалентного радиуса Земли и, соответственно, интервала частотной корреляции.

Согласно формуле (1) рассчитаем интервал частотной корреляции для выбранной трассы. При длине трассы $d = 144$ км, ширине ДН антенн по уровню половинной мощности $\theta_{\text{в}} = 1,6^\circ$ и нормальных условиях распространения радиоволн в результате вычислений получим значение интервала частотной корреляции равно $\Delta f = 4,67$ МГц.

Экспериментальные результаты

С помощью сигналов с шириной полосы от 0,0586 до 24 МГц получены следующие параметры многолучевости тропосферного канала:

- количество лучей импульсной характеристики канала — от 2 до 4;
- длительность импульсной характеристики канала — от 200 до 533 нс;
- частота быстрых замираний — от 5 до 12 Гц.

Для полученных значений длительности импульсного отклика канала определим интервал частотной корреляции [9] по формуле:

$$\Delta f = \frac{1}{\Delta \tau}. \quad (3)$$

Рассчитанные по формуле (3) значения интервала частотной корреляции канала находятся в пределах от 1,88 до 5 МГц. Среднее значение по всем измерениям составило порядка 3,53 МГц, что находится в пределах нормальных значений для данных климатических условий согласно ГОСТ Р 53363–2009 [10].

На графике автокорреляционной функции сигнала (рис. 4) явно выделяются четыре луча (обозначены цифрами от 1 до 4), что обусловлено недостаточной частотой дискретизацией аппаратуры на приемной стороне. Однако полученные результаты позволяют сформулировать общие требования к параметрам многолучевости тропосферного канала при построении модели канала связи.

Визуальное представление метода оценки частоты быстрых замираний представлено на рис. 5. На рисунке также можно отметить, что, помимо глубоких замираний, которые были подсчитаны описанным в предыдущем разделе методом, существуют также и небольшие флуктуации уровня сигнала.

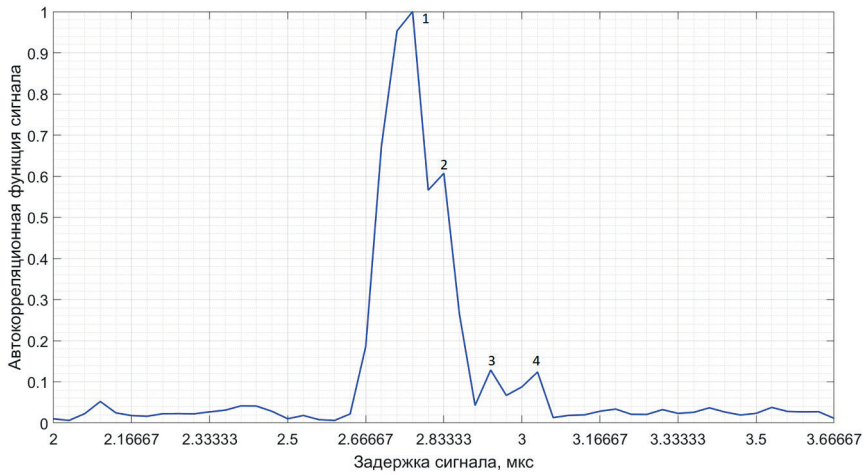


Рис. 4. АКФ-сигнала с символьной скоростью 15 Мбит/с
Fig. 4. Autocorrelation function of the signal with the symbol rate of 15 Mbit/s

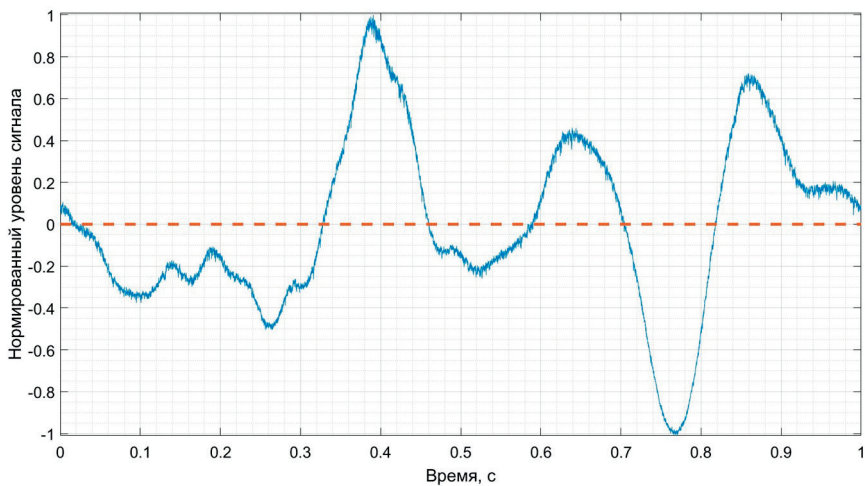


Рис. 5. График изменения уровня сигнала BPSK с шириной полосы 0,9375 МГц и его среднее значение за 1 с (пунктирная линия)
Fig. 5. Amplitude fluctuation of the BPSK signal with the bandwidth of 0.9375 MHz and its mean value for 1 second (dash line)

В таблице 1 представлены экспериментальные результаты измерения глубины и частоты быстрых замираний сигналов с разной шириной полосы. Среди измеренных значений указаны диапазоны изменения мощности сигнала, определяющие глубину замираний, а также частота быстрых замираний, измеренная согласно методу, указанному выше.

Таблица 1. Экспериментальные результаты измерения глубины замираний и частоты быстрых замираний сигналов с разной шириной полосы

Table 1. Experimental results of the fade depth and frequency of fast fading measurements of signals with different bandwidths

Вид модуляции	Ширина полосы, МГц	P_{\min} , дБмВт	P_{\max} , дБмВт	ΔP , дБ	Частота быстрых замираний, Гц
BPSK	0,0586	-41,5	-20,5	21	3
BPSK	0,1172	-41	-19,5	21,5	5
BPSK	0,2344	-41	-22,5	18,5	6
BPSK	0,4688	-35,5	-21	14,5	9
BPSK	0,9375	-33,5	-21,5	12	6
BPSK	1,875	-32	-18,5	13,5	7
BPSK	3,75	-38,5	-19,5	19	8
BPSK	7,5	-32	-22	10	5
BPSK	15	-31	-19	12	5
BPSK	24	-34	-26	8	12
8-PSK	0,09375	-49,5	-28,5	21	9
8-PSK	0,1875	-47,5	-31	16,5	5
8-PSK	0,375	-49,5	-28	21,5	9
8-PSK	0,75	-44,5	-29	15,5	9
8-PSK	1,5	-45	-29,5	15,5	8
8-PSK	3	-45,5	-29	16,5	8
8-PSK	6	-38	-25	13	9
8-PSK	12	-38	-27	11	11
8-PSK	24	-37,5	-29,5	8	12

Примечание: P_{\min} — минимальное значение измеренной мощности сигнала за 1 секунду, P_{\max} — максимальное значение измеренной мощности сигнала за 1 секунду, ΔP — диапазон изменения значений мощности сигнала за 1 секунду.

По результатам измерений, отраженных в таблице 1, можно сделать вывод о том, что при увеличении ширины полосы сигнала наблюдается уменьшение диапазона изменения значений мощности. Также можно сделать вывод о том, что частота быстрых замираний от ширины полосы не зависит.

Для визуализации зависимости глубины замираний от ширины полосы передаваемого сигнала построены гистограммы распределения значений средней мощности за одну секунду, для

сигналов с разной шириной полосы (рис. 6). На гистограммах отчетливо видно, что сигнал с более широкой полосой подвергается менее глубоким замираниям и его средняя мощность колеблется реже, что выражается в наличии пика на гистограмме.

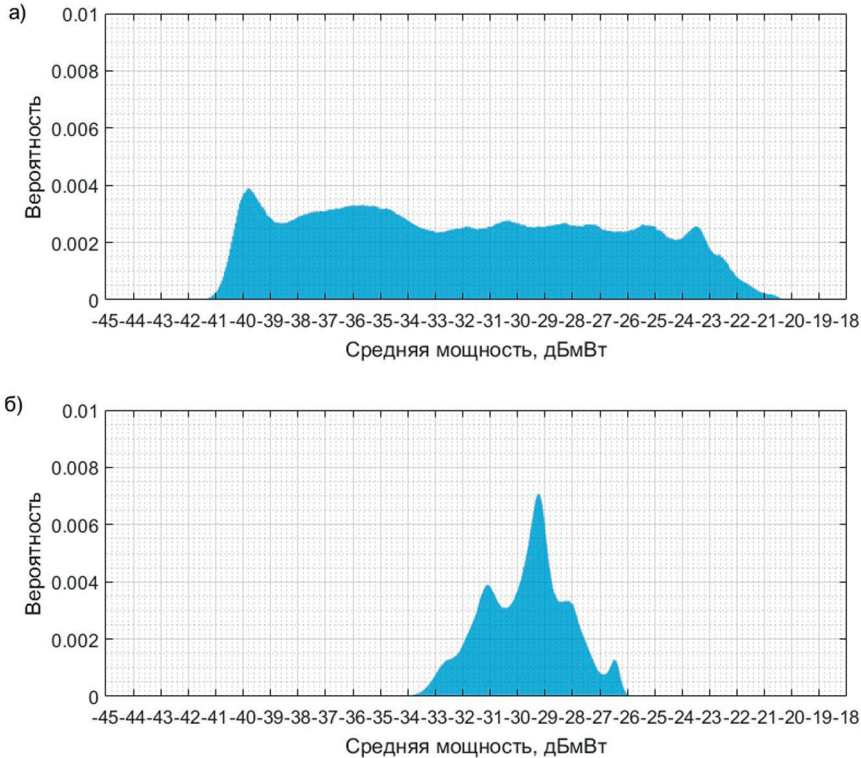


Рис. 6. Гистограмма распределения значений средней мощности для сигналов с полосой: *a* — 0,0586 МГц; *b* — 24 МГц

Fig. 6. Histogram of the average power distribution of signals with the bandwidth of: *a* — 0,0586 МГц; *b* — 24 MHz

Заключение

Проведенные измерения тропосферного канала на трассе Красноярск — Балахта протяженностью 144 км позволили получить основные характеристики данного канала связи. При этом определены параметры многолучевости канала: максимально определенное количество лучей — 4, максимальная задержка между лучами — 533 нс. Получены также значения частоты быстрых замираний, максимальное значение которых достигало 12 Гц, что соотносится с аналогичными измерениями отечественных ученых, выполненными в другом диапазоне частот, а также с приближенными значениями для диапазона УКВ, которые указаны

в рекомендациях Международного союза электросвязи по тропосферному распространению сигналов [1, 11]. Вычисленные по максимальной задержке между лучами значения интервала частотной корреляции, в среднем равные 3,53 МГц, оказались в пределах нормальных значений для данных климатических условий. Построенные гистограммы распределения значений средней мощности сигналов с максимальной и минимальной шириной полосы показали, что сигналы с узкой полосой подвержены более глубоким замираниям и более частым колебаниям мощности.

Полученные характеристики тропосферного канала могут быть использованы при моделировании тропосферного канала в процессе проектирования систем тропосферной связи для оценки эффективности разрабатываемых алгоритмов повышения пропускной способности и энергетической эффективности систем тропосферной связи.

Список литературы

1. *Дальнее тропосферное распространение ультракоротких волн.* Под ред. Б. А. Введенского, М. А. Колосова, А. И. Калинина, Я. С. Шифрина. М.: Советское радио; 1965. 415 с.
2. Луферчик П. В., Луферчик А. В., Штро П. В., Захаров П. Н., Валиуллин Д. Р., Милованов А. А. Экспериментальное исследование модема станции тропосферной связи с энергетически эффективным режимом работы. *Радиотехника.* 2022;86(4):67–75. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202204-10>
3. Луферчик П. В., Луферчик А. В., Галеев Р. Г., Богатырев Е. В., Штро П. В. Повышение энергетических характеристик модема тропосферной связи. *Успехи современной радиоэлектроники.* 2022;76(5):50–54. DOI: <https://doi.org/10.18127/j20700784-202205-04>
4. Луферчик П. В., Комаров А. А., Конев А. Н., Галеев Р. Г., Богатырев Е. В. Энергетически эффективный OFDM режим с возможностью адаптации к условиям распространения в каналах с многолучевостью. *Радиотехника.* 2022;86(8):122–131. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202208-13>
5. Луферчик П. В., Конев А. Н., Богатырев Е. В., Галеев Р. Г. Методы повышения энергетической эффективности OFDM модемов в каналах связи с частотно-селективными замираниями. *Сибирский аэрокосмический журнал.* 2022;23(2):189–196. DOI: [10.31772/2712-8970-2022-23-2-189-196](https://doi.org/10.31772/2712-8970-2022-23-2-189-196)
6. Фролов А. Н., Богатырев Е. В., Строкова А. Ю. Перспективы применения OFDM в системах спутниковой и тропосферной связи. В: *Системы связи и радионавигации: сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции. Красноярск, 2–3 октября, 2014.* Красноярск: ОАО НПП «Радиосвязь»; 2014. С. 16.

7. Строкова А.Ю., Фролов А.Н., Алешечкин А.М. Эффективность использования OFDM в тропосферном канале связи, способы повышения помехоустойчивости. *Вестник СибГАУ*. 2013;2(48):91–94.

8. Долуханов М.П. *Распространение радиоволн*. Учебник для вузов. М.: Связь; 1972. 336 с.

9. Гусятинский И.А., Немировский А.С., Соколов А.В., Троицкий В.Н. *Дальняя тропосферная радиосвязь*. М.: Связь; 1968. 248 с.

10. *ГОСТ Р 53363–2009*. Цифровые радиорелейные линии. Показатели качества. Методы расчета. М.: Стандартинформ; 2020. 41 с.

11. *Рекомендация МСЭ-R P. 617–5*. Методы прогнозирования и данные о распространении радиоволн, необходимые для проектирования тропосферных радиорелейных систем. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.617-5-201908-1!!PDF-R.pdf (дата обращения 18.05.2023)

References

1. Vvedenskii B.A., Kolosov M.A., Kalinin A.I., Shifrin Ya.I. (eds.) *Dal'nee troposfernoe rasprostranenie ul'trakorotkikh voln [Far tropospheric propagation of ultra-short waves]*. Moscow: Sovetskoe radio; 1965. 415 p. (in Russ.)

2. Luferschik P.V., Luferschik A.V., Shtro P.V., Zakharov P.N., Valiullin D.R., Milovanov A.A. Experimental study of the modem of a tropospheric communication station with an energetically efficient mode of operation. *Radiotekhnika*. 2022;86(4):67–75. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202204-10>

3. Luferschik P.V., Luferschik A.V., Galeev R.G., Bogatyrev E.V., Shtro P.V. Improvement of the energy characteristics of a tropospheric communication modem. *Achievements of modern radioelectronics*. 2022;76(5):50–54. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18127/j20700784-202205-04>

4. Luferschik P.V., Komarov A.A., Konev A.N., Galeev R.G., Bogatyrev E.V. Energy efficient OFDM mode with the ability to adapt to propagation conditions in multipath channels. *Radiotekhnika*. 2022;86(8):122–131. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202208-13>

5. Luferschik P.V., Konev A.N., Bogatyrev E.V., Galeev R.G. Methods for improving the energy characteristics of OFDM modems in frequency selective fading communication channels. *Siberian Aerospace Journal*. 2022;23(2):189–196. (In Russ.) DOI: [10.31772/2712-8970-2022-23-2-189-196](https://doi.org/10.31772/2712-8970-2022-23-2-189-196)

6. Frolov A.N., Bogatyrev E.V., Strokova A. Yu. Prospects for the use of OFDM in satellite and tropospheric communication systems. In: *Sistemy svyazi i radionavigatsii [Communication and radio navigation system]*. Collection of scientific papers of the All-Russian Scientific and Technical

Conference. Krasnoyarsk, October 2–3, 2014. Krasnoyarsk: OAO NPP «Radiosvyaz'»; 2014. P. 16. (In Russ.)

7. Strokova A.Yu., Frolov A.N., Aleshechkin A.M. Efficiency of use OFDM in the troposcatter communication channel, ways of noise stability rise. *Vestnik SibGAU*. 2013;2(48):91–94. (In Russ.)

8. Dolukhanov M.P. *Rasprostranenie radiovoln [Radio wave propagation]*. Moscow: Svyaz'; 1972. 336 p. (In Russ.)

9. Gusyatsinskii I.A., Nemirovskii A.S., Sokolov A.V., Troitskii V.N. *Dal'nyaya troposfernaya radiosvyaz' [Far tropospheric propagation]*. Moscow: Svyaz'; 1968. 248 p. (In Russ.)

10. *GOST R 53363–2009*. Digital radio-relay links. Quality parameters. Calculation methods. Moscow: Standartinform; 2020. 41 p. (In Russ.)

11. *Recommendation ITU-R P. 617–5*. Propagation prediction techniques and data required for the design of trans-horizon radio-relay systems. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.617-5-201908-I!!PDF-E.pdf (Accessed: 18.05.2023)

Информация об авторах

Николай Андреевич Воробьев, инженер-конструктор, АО «НПП “Радиосвязь”» (г. Красноярск, Россия)

Павел Валерьевич Луферчик, начальник отдела, АО «НПП “Радиосвязь”» (г. Красноярск, Россия)

Павел Викторович Штро, главный специалист, АО «НПП “Радиосвязь”» (г. Красноярск, Россия)

Евгений Владимирович Богатырев, кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научно-техническому развитию, АО «НПП “Радиосвязь”» (г. Красноярск, Россия)

Information about the authors

Nikolay A. Vorobev, Design Engineer, JSC SPE Radiosvyaz (Krasnoyarsk, Russia)

Pavel V. Luferschik, Head of the Department, JSC SPE Radiosvyaz (Krasnoyarsk, Russia)

Pavel V. Shtro, Chief Specialist, JSC SPE Radiosvyaz (Krasnoyarsk, Russia)

Evgeny V. Bogatyrev, Candidate of Technical Sciences, Deputy General Director of Scientific and Technical Development, JSC SPE Radiosvyaz (Krasnoyarsk, Russia)

Поступила / Received: 10.03.2023

Принята в печать / Accepted: 25.04.2023