

Научная статья

УДК 621.391.83

<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.1.21>

Мониторинг спектра помех и доступности КВ-радиоканалов с полосами 3...24 кГц

Д. В. Иванов, В. А. Иванов, Н. В. Рябова, Р. Р. Бельгибаев[✉], А. В. Чернядьев

Поволжский государственный технологический университет,

Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

BelgibaevRR@volgatech.net[✉]

Аннотация. Развита методика и алгоритмы определения доступности КВ-радиоканалов с различными полосами 3...24 кГц для прогноза эффективности передачи информации в декаметровом диапазоне. На базе технологии SDR разработан лабораторный образец программно-аппаратного комплекса для реализации подхода спектрального мониторинга. Проведены круглосуточные экспериментальные исследования в наиболее сложной помеховой обстановке: промышленная зона, плотная городская застройка, время года – период летнего солнцестояния. Получены частотные диапазоны наиболее доступных радиоканалов в зависимости от времени суток, а также экспериментальные оценки их минутной доступности.

Ключевые слова: доступность спектра; широкополосный сигнал; уровень шума; минутная доступность радиоканала; адаптивный порог

Финансирование: работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 22-19-00073.

Введение. В настоящее время КВ-радиосвязь используется гражданскими, промышленными, военными службами и организациями. Полоса этого диапазона приходится на частоты от 3 до 30 МГц, что соответствует длинам декаметровых волн 100–10 м. Системы КВ-связи обладают рядом преимуществ, таких как: универсальность применения, относительно низкая стоимость, большая зона покрытия, что важно для связи в труднодоступной местности: горы, море и др. Условно считается, что в режиме тактической связи (дальность до 500 км) используют частоты 3–8 МГц, в режиме стратегической связи (до 3 000 км) используют частоты 9–30 МГц.

На современном уровне знаний в области беспроводной связи созданы мето-

ды, которые с различным успехом позволяют преодолевать влияние негативных эффектов КВ-радиоканала на передачу информации. Основные из них вызваны изменчивой межмодовой частотно-временной дисперсией в природном канале распространения радиоволн (геофизические), а также изменчивыми антропогенными канальными помехами. Действительно, частотная характеристика (ЧХ) канала оказывает существенное влияние на информацию, искажая спектр излучаемого (полезного) сигнала из-за межмодовой дисперсии. Методы преодоления её негативных проявлений связаны либо с фильтрацией ЧХ, либо с выбором параметров связного сигнала таким образом, чтобы влияние ЧХ канала на излучаемый сигнал было минимальным. Для решения

© Иванов Д. В., Иванов В. А., Рябова Н. В., Бельгибаев Р. Р., Чернядьев А. В. 2022.

Для цитирования: Иванов Д. В., Иванов В. А., Рябова Н. В., Бельгибаев Р. Р., Чернядьев А. В. Мониторинг спектра помех и доступности КВ-радиоканалов с полосами 3...24 кГц // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2022. № 1 (53). С. 21-32. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.1.21>

данной проблемы в работу системы КВ-связи стали включать режим зондирования множества каналов, позволяющий оценивать либо саму ЧХ каждого канала, либо её ключевые параметры, а также использовать OFDM-сигналы, устойчивые к межсимвольной интерференции. Поскольку качество связи определяется отношением сигнал/шум (отношением энергии сигнала к спектральной плотности помех в канале), то для КВ-связи стали развиваться методы когнитивного радио, позволяющие по результатам мониторинга работать системам в свободных от помех каналах (доступных). При этом спектральная плотность помех в КВ-диапазоне оценивается с разрешением не меньше полосы используемых подканалов. Одновременный анализ межмодовой дисперсии и спектра помех позволяет оценивать полную доступность радиоканалов как по параметрам дисперсии, так и по уровню помех. Актуальность учёта общей доступности особенно велика при решении задачи существенного увеличения пропускной способности КВ-связи (до значений 120 000 бит/с) путём расширения полосы частот каналов кратно 3 кГц до значений 24 кГц.

Необходимость введения дополнительных режимов работы систем КВ-связи требует развития и широкого использования технологии программно-конфигурируемого радио (SDR), а также создания специального программного обеспечения с элементами интеллектуальных технологий, таких как: технология технического обучения (ТО) для трансформации систем связи к адаптивному радио AR (Adaptive Radio) когнитивному радио CR (Cognitive Radio) и интеллектуальному радио IR (Inntelligent Radio).

Итак, проблема увеличения скорости передачи информации в КВ-диапазоне в рамках CR- и SDR-технологий требует развития методов и реализующих их алгоритмов для внедрения технологии технического обучения систем связи, а также создания лабораторных образцов аппаратуры.

Цель работы – разработка методики, алгоритмов и аппаратная реализация лабораторного образца устройства мониторинга спектра помех в КВ-диапазоне при различном (3, 6, 9, 12, 18, 24 кГц) разрешении, а также их экспериментальная верификация в сложных условиях городского приёма.

Решаемые задачи: развитие метода, алгоритмов спектральной оценки доступности радиоканалов, загруженных помехами; создание на базе технологии программно-конфигурируемого радио лабораторного образца программно-аппаратной системы мониторинга спектра помех на частотах ВЧ-диапазона; экспериментальная верификация развитых метода и алгоритмов в условиях в наиболее сложной для приёма помеховой обстановки.

Методика спектральной оценки доступности КВ-радиоканала. В рассматриваемой задаче широкополосная антенна с диапазоном 3 – 30 МГц принимает сигналы помех, поступающих из радиоэфира. Приёмной аппаратурой оценивается спектр сигналов помех в данном диапазоне с разрешением 3 кГц. Для этого сигнал помех фильтруется ФНЧ с полосой 300 МГц и с выхода фильтра оцифровывается АЦП с частотой дискретизации 100 МГц. Далее цифровой сигнал поступает на вход цифрового приёмника. Из них формируются примыкающие выборки по 65 536 отсчётов и над ними выполняется быстрое преобразование Фурье (БПФ). В этом случае разрешение в спектре по частоте (bin) составляет 381,4697 Гц, что даёт оценку загруженности в примыкающих КВ-каналах с такой же полосой частот. В работе исследуются примыкающие каналы с полосами 3, 6, 9, 12, 18, 24 кГц, поэтому полученные спектральные данные подвергаются обработке, основанной на следующей модели.

Учитывая [1], что для произвольного сигнала $u(t)$, имеющего во временной области длительность $T_b = t_2 - t_1$, а в частотной – спектр $U(jf)$, занимающий полосу

частот $B_b = f_2 - f_1$, энергию можно оценить по формуле:

$$E_b = \int_{t_1}^{t_2} |u(t)|^2 dt = \int_{f_1}^{f_2} |U(jf)|^2 df, \quad (1)$$

где $|U(jf)|^2$ – спектральная плотность энергии (СПЭ).

Разобьём полосу частот на равные отрезки величиной B_0 , тогда формула (1) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} E_b &= \int_{f_1}^{f_2} |U(jf)|^2 df \approx B_0 \sum_{r=1}^{N_0} |U(jf_r)|^2 = \\ &= B_0 N_0 \left(\sum_{r=1}^{N_0} |U(jf_r)|^2 / N_0 \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Увеличим полосу элемента разбиения по частоте в k раз $B_1 = kB_0$, тогда число разбиений уменьшится до $N_1 = N_0 / k$. Сгруппируем в формуле (2) слагаемые по k . В результате под знаком суммы получим N_1 слагаемых вида:

$$\begin{aligned} \overline{|U(jf_r)|^2}_k &= \\ &= \frac{|U(jf_1)|^2 + \dots + |U(jf_k)|^2}{k} + \dots, \end{aligned} \quad (3)$$

$\overline{|U(jf_r)|^2}_k$ – сумма из N_1 усреднённых по частоте k слагаемых.

Отсюда:

$$\begin{aligned} E_b &= B_0 N_0 \left(\sum_{r=1}^{N_0} |U(jf_r)|^2 / N_0 \right) = \\ &= B_1 N_1 \left(\sum_{r=1}^{N_1} \overline{|U(jf_r)|^2}_k / N_1 \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Итак, при увеличении полосы разбиения в k раз получаем последовательность СПЭ, состоящую из усреднённых по частоте значений СПЭ для k соседних отсчётов.

Среднюю на интервале $T_b = t_2 - t_1$ мощность можно оценить по формуле:

$$\bar{P} = \int_{f_1}^{f_2} \frac{|U(jf)|^2}{T_b} df = \int_{f_1}^{f_2} p(f) df, \quad (5)$$

где $p(f) = |U(jf)|^2 / T_b$ – спектральная плотность мощности сигнала (СПМ).

Отсюда СПЭ и СПМ связаны между собой соотношением:

$$|U(jf)|^2 = p(f) \cdot T_b. \quad (6)$$

Видно, что при $T_b = \text{const}$ для оценки СПМ с меньшим разрешением необходимо усреднить отсчёты, группируя их по k слагаемых. Итак, усредняя уровень СПМ шумового сигнала по 8 соседним бинам с полосой 381,4697 Гц, получим уровень СПМ шумового сигнала в канале с полосой 3,0518 кГц.

На рис. 1 показана методика получения СПМ шумового сигнала в канале с полосой 3,0518 кГц.

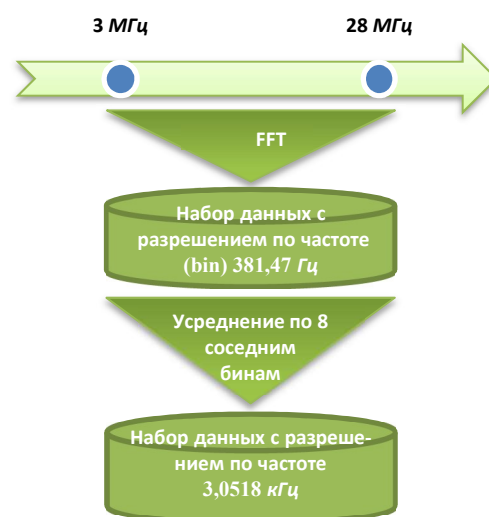


Рис. 1. Методика получения оценки СПМ шумового сигнала в каналах с полосой 3,0518 кГц

Fig. 1. Method for estimating the PSD of a noise signal in channels with a bandwidth of 3.0518 kHz

Для оценки СПМ шумового сигнала в каналах с полосой 3 кГц по данным для каналов с полосой 3,0518 кГц использовалась гипотеза линейности распределения мощности между соседними бинами (линейная интерполяция). Далее учитывалось, что полученные спектры носят слу-

чайный характер. Для увеличения статистической устойчивости оценки СПМ применялся метод усреднения 381 спектра, полученных за 1 с [3].

Полученный для КВ-диапазона спектр помех разбивался на мегагерцовые сегменты и в каждом выделялось по десять отсчётов с наименьшими значениями СПМ и по ним находилось среднее значение [2–5], используемое для нормировки всех спектральных отсчётов (бинов). Для нормированных значений вводился порог в 10 дБ [4]. Все каналы с нормированной СПМ выше порога считались загруженными и им присваивался уровень 0. Остальные считались доступными и обозначались уровнем 1.

Для прогнозирования доступности нами использовалась метрика, названная СМА. Она соответствует гипотезе о том, что если радиоканал доступен в течение двух минут, то он будет доступным и в третью минуту [2].

Лабораторный образец программно-аппаратной системы мониторинга спектра помех. Для исследования разработанных методик, анализа и интерпретации экспериментальных данных был разработан лабораторный образец программно-аппаратной системы мониторинга спектра помех в КВ-диапазоне. В его аппаратной части использовалась универ-

сальная платформа USRP N210 (см. рис. 2), созданная по технологии SDR. Программная часть экспериментальной установки реализована на основе разработанных методов и алгоритмов с использованием инструментария типа GNU Radio [6–15] и пакета программ PTC Mathcad15.

Платформа USRP N210 позволила для КВ-диапазона реализовать принцип «АЦП к антенне» с квадратурным преобразованием оцифрованного сигнала к нулевой промежуточной частоте (принцип переноса частоты вниз – DDC). Обработка заключалась в том, что шумовой сигнал с приёмной антенны, пройдя через фильтр нижних частот, оцифровывался 14-битным АЦП с частотой дискретизации 100 МГц. В ПЛИС он смешивался с цифровым синтезированным сигналом опорного генератора. Получившиеся синфазная (I) и квадратурная (Q) компоненты передавались по интерфейсу Gigabit LAN в персональный компьютер для дальнейшей спектральной и статистической обработки.

Для приёма сигнала использовалась антенна типа T2FD (см. рис. 2). Её диапазон рабочих частот 1,9–30 МГц, физическая длина антенны в рабочем состоянии (размах) равна 24,5 м. Антенна расположена на крыше пятиэтажного здания, близко к центру г. Йошкар-Олы.



Рис. 2. Основные технические устройства для оценки спектра помех с разрешением 3, 6, 9, 12, 18, 24 кГц

Fig. 2. Main equipment for interference spectrum estimation with resolution of 3, 6, 9, 12, 18, 24 kHz

Экспериментальная верификация методов и алгоритмов мониторинга спектра помех и оценки доступности КВ-радиоканалов. Экспериментальные исследования проводились круглосуточно для случаев наиболее сложной помеховой обстановки: близко расположенная промышленная зона, плотная городская застройка, время года – период летнего солнцестояния (июнь 2021 года). Исследования доступности по уровню шумов проводились для радиоканалов с полосами 3, 6, 9, 12, 18, 24 кГц.

Суточный ход доступности радиоканалов с полосой 3 кГц представлен на рис. 3.

Из полученных данных видно, что в полосе частот тактической связи (3 – 8 МГц) в ночное и вечернее время для каналов с полосой 3 кГц средняя доступность радиоканалов составляла 68 %, в дневное время она была около 79 %. В диапазоне частот стратегической связи (9 – 27 МГц) доступность радиоканалов в течение суток составляла в среднем 80 %. Однако в данном частотном диапазоне в ночное и вечернее время наблюдались поддиапазоны с ча-

стотами 9 – 10 МГц, 13 – 18 МГц и 20 – 23 МГц со средней доступностью 74 %.

Суточный ход доступности радиоканалов с полосой 6 кГц показан на рис. 4. Он иллюстрирует ожидаемый факт, что с ростом полосы канала в него попадает больше сосредоточенных антропогенных помех.

Для дневного времени в диапазоне частот тактической связи (3 – 8 МГц) доступность составляла в среднем 46 % в ночные и вечерние часы и 61 % в дневное время, что в среднем на 22 % меньше в вечерние и ночные часы и меньше на 18 % в дневные часы, чем для радиоканалов с полосой 3 кГц. В полосе частот стратегической связи (9 – 27 МГц) в ночное и вечернее время средняя доступность составляла 61 и 75 % в дневное время. Уменьшение доступности по сравнению с радиоканалами с полосой 3 кГц составляло 19 и 5 % соответственно.

Для каналов с полосой 9 кГц, по сравнению с каналами полосой 3 кГц, доступность ещё ниже как в дневное, так и в ночное время (см. рис. 5).

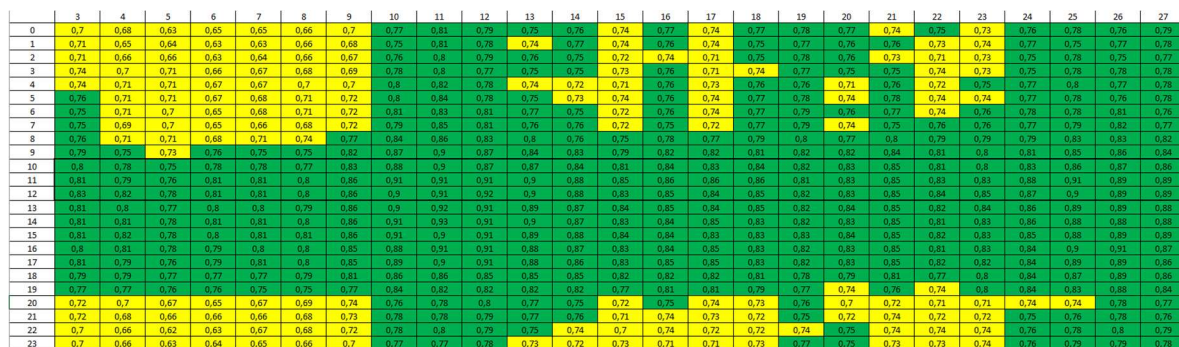
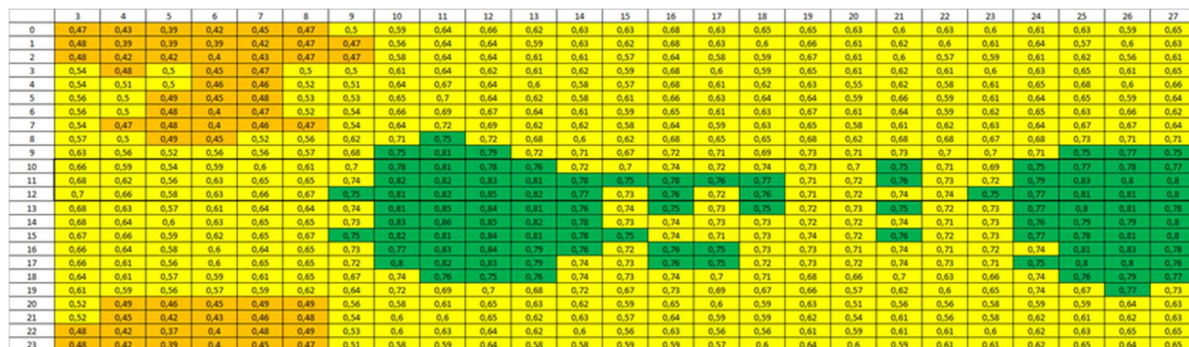


Рис. 3. Суточный ход доступности радиоканалов с полосой 3кГц

Fig. 3. Diurnal variations of the availability of 3 kHz radio channels



	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
0	0.33	0.28	0.27	0.3	0.31	0.34	0.35	0.44	0.51	0.53	0.51	0.53	0.52	0.59	0.56	0.56	0.53	0.5	0.5	0.53	0.49	0.51	0.52	0.47	0.55
1	0.32	0.28	0.26	0.27	0.29	0.34	0.33	0.42	0.51	0.52	0.48	0.53	0.5	0.58	0.56	0.5	0.54	0.48	0.52	0.51	0.49	0.55	0.46	0.48	0.51
2	0.32	0.26	0.26	0.28	0.3	0.34	0.32	0.45	0.52	0.51	0.48	0.51	0.44	0.55	0.5	0.48	0.56	0.49	0.48	0.46	0.48	0.53	0.51	0.44	0.49
3	0.38	0.32	0.35	0.33	0.34	0.37	0.35	0.48	0.53	0.5	0.52	0.47	0.51	0.53	0.5	0.52	0.49	0.52	0.51	0.49	0.55	0.54	0.51	0.54	0.54
4	0.37	0.35	0.37	0.35	0.32	0.38	0.36	0.5	0.57	0.53	0.49	0.48	0.45	0.59	0.55	0.53	0.52	0.42	0.52	0.48	0.5	0.56	0.58	0.5	0.55
5	0.4	0.34	0.37	0.34	0.34	0.38	0.38	0.52	0.52	0.5	0.48	0.5	0.56	0.56	0.55	0.52	0.46	0.56	0.48	0.5	0.55	0.54	0.48	0.53	0.53
6	0.4	0.34	0.35	0.3	0.33	0.36	0.39	0.53	0.6	0.56	0.52	0.5	0.46	0.56	0.53	0.53	0.56	0.49	0.54	0.48	0.49	0.55	0.52	0.55	0.5
7	0.38	0.29	0.34	0.29	0.32	0.31	0.39	0.5	0.64	0.58	0.5	0.51	0.46	0.54	0.5	0.52	0.53	0.43	0.5	0.51	0.5	0.54	0.55	0.57	0.54
8	0.41	0.33	0.32	0.32	0.38	0.43	0.48	0.59	0.66	0.62	0.58	0.5	0.5	0.58	0.58	0.54	0.58	0.48	0.57	0.58	0.54	0.6	0.63	0.62	0.62
9	0.49	0.4	0.36	0.4	0.42	0.45	0.55	0.65	0.73	0.7	0.65	0.63	0.57	0.65	0.66	0.58	0.62	0.6	0.64	0.6	0.57	0.65	0.65	0.69	0.67
10	0.53	0.44	0.38	0.44	0.48	0.51	0.6	0.69	0.72	0.69	0.7	0.65	0.6	0.67	0.67	0.65	0.62	0.6	0.65	0.62	0.57	0.7	0.69	0.71	0.69
11	0.56	0.48	0.41	0.5	0.54	0.55	0.65	0.75	0.74	0.76	0.75	0.7	0.65	0.7	0.69	0.69	0.6	0.61	0.67	0.64	0.61	0.74	0.76	0.72	0.71
12	0.58	0.52	0.44	0.5	0.56	0.57	0.66	0.75	0.73	0.79	0.76	0.7	0.64	0.68	0.64	0.66	0.6	0.61	0.65	0.65	0.65	0.7	0.73	0.72	0.72
13	0.56	0.49	0.42	0.48	0.53	0.54	0.63	0.74	0.77	0.78	0.74	0.69	0.64	0.68	0.66	0.67	0.61	0.63	0.66	0.63	0.63	0.7	0.72	0.73	0.69
14	0.56	0.51	0.46	0.5	0.53	0.54	0.62	0.76	0.8	0.78	0.76	0.71	0.63	0.66	0.67	0.62	0.61	0.62	0.66	0.62	0.63	0.69	0.71	0.7	0.72
15	0.54	0.53	0.44	0.48	0.53	0.57	0.64	0.74	0.72	0.76	0.74	0.7	0.66	0.67	0.63	0.63	0.63	0.62	0.68	0.63	0.62	0.71	0.69	0.73	0.71
16	0.53	0.5	0.43	0.46	0.52	0.55	0.63	0.68	0.74	0.77	0.72	0.7	0.62	0.68	0.69	0.63	0.63	0.61	0.65	0.62	0.61	0.67	0.73	0.76	0.69
17	0.53	0.47	0.41	0.46	0.52	0.54	0.61	0.72	0.73	0.76	0.72	0.66	0.63	0.69	0.68	0.63	0.63	0.63	0.63	0.64	0.64	0.6	0.69	0.72	0.71
18	0.5	0.46	0.42	0.45	0.48	0.53	0.55	0.65	0.66	0.65	0.68	0.67	0.66	0.67	0.64	0.64	0.58	0.55	0.62	0.53	0.53	0.48	0.67	0.7	0.7
19	0.45	0.44	0.4	0.44	0.46	0.49	0.51	0.62	0.59	0.4	0.58	0.65	0.58	0.67	0.63	0.6	0.56	0.46	0.54	0.5	0.52	0.67	0.57	0.67	0.65
20	0.37	0.33	0.33	0.33	0.35	0.34	0.41	0.45	0.48	0.53	0.51	0.54	0.48	0.55	0.53	0.5	0.5	0.38	0.45	0.45	0.45	0.49	0.49	0.53	0.54
21	0.37	0.3	0.3	0.32	0.33	0.33	0.39	0.46	0.48	0.53	0.5	0.55	0.47	0.54	0.52	0.5	0.5	0.41	0.5	0.45	0.45	0.51	0.51	0.51	0.54
22	0.33	0.26	0.25	0.28	0.35	0.35	0.37	0.48	0.52	0.53	0.52	0.52	0.45	0.55	0.49	0.45	0.5	0.44	0.51	0.49	0.49	0.52	0.52	0.53	0.54
23	0.33	0.27	0.27	0.29	0.33	0.33	0.36	0.43	0.46	0.52	0.47	0.49	0.47	0.5	0.51	0.51	0.52	0.47	0.48	0.51	0.5	0.53	0.55	0.53	0.54

Рис. 5. Суточный ход доступности радиоканалов с полосами 9 кГц

Fig. 5. Diurnal variations of availability of 9 kHz radio channels

В ночное и вечернее время для диапазона частот тактической связи (3 – 8 МГц) доступность радиоканалов с полосой 9 кГц в среднем составляла 32 и 48 % – в дневное время. В полосе частот стратегической связи (9 – 27 МГц) в ночное и вечернее время средняя доступность радиоканалов с полосой 9 кГц составляла 50 %. В дневное время – 66 %. Уменьшение доступности радиоканалов с полосой 9 кГц по сравнению с радиоканалами с полосой 3 кГц в области рабочих частот тактической связи в вечернее и ночное время составило в среднем на 36 и 31 % в дневное время. В полосе частот стратегической связи данное уменьшение составило 30 % в вечерние и ночные часы и 14 % в дневные.

Для каналов с полосой 12 кГц (см. рис. 6) в ночное и вечернее время для диапазона частот тактической связи (3 – 8 МГц) доступность в среднем составляла 24 и 37 % – в дневное время. В полосе частот стратегической связи (9 – 27 МГц) в ночное и вечернее время средняя доступность радиоканалов с полосой 12 кГц со-

ставляла 42 %. В дневное время – 57 %. Уменьшение доступности радиоканалов с полосой 12 кГц для тактической связи в вечернее и ночное время составило в среднем на 44 и на 42 % в дневное время, по сравнению с радиоканалами с полосой 3 кГц. В полосе частот стратегической связи данное уменьшение составило 38 % в вечерние и ночные часы и 23 % в дневные.

Для каналов с полосой 18 кГц происходило дальнейшее уменьшение их доступности (см. рис. 7).

Для дневного времени в диапазоне частот тактической связи (3 – 8 МГц) доступность составляла в среднем 14 % в ночные и вечерние часы и 22 % в дневное время, что меньше на 54 % в вечернее и ночное время и на 57 % – в дневное время, чем для радиоканалов с полосой 3 кГц. В полосе частот стратегической связи (9 – 27 МГц) в ночное и вечернее время средняя доступность составляла 30 и 46 % в дневное время. Уменьшение доступности по сравнению с радиоканалами с полосой 3 кГц составляло 50 и 34 % соответственно.

	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
0	0.23	0.2	0.19	0.24	0.25	0.27	0.27	0.35	0.44	0.46	0.42	0.45	0.43	0.53	0.49	0.48	0.46	0.41	0.42	0.44	0.42	0.43	0.43	0.38	0.45
1	0.22	0.16	0.16	0.2	0.23	0.27	0.25	0.33	0.44	0.44	0.38	0.44	0.42	0.52	0.5	0.41	0.46	0.39	0.44	0.42	0.42	0.48	0.38	0.39	0.4
2	0.21	0.17	0.16	0.2	0.24	0.27	0.25	0.35	0.44	0.42	0.37	0.42	0.36	0.5	0.43	0.39	0.48	0.39	0.42	0.37	0.4	0.46	0.41	0.36	0.37
3	0.25	0.21	0.21	0.25	0.27	0.3	0.28	0.38	0.46	0.43	0.4	0.44	0.38	0.55	0.46	0.4	0.45	0.41	0.43	0.4	0.42	0.47	0.46	0.43	0.43
4	0.25	0.24	0.26	0.28	0.28	0.31	0.29	0.4	0.49	0.46	0.4	0.4	0.37	0.54	0.49	0.44	0.45	0.32	0.44	0.38	0.41	0.48	0.51	0.42	0.44
5	0.27	0.24	0.26	0.27	0.25	0.3	0.29	0.42	0.55	0.45	0.4	0.4	0.41	0.5	0.5	0.46	0.44	0.38	0.47	0.38	0.42	0.47	0.47	0.39	0.42
6	0.27	0.24	0.24	0.24	0.27	0.3	0.43	0.53	0.48	0.41	0.42	0.38	0.51	0.45	0.43	0.48	0.4	0.45	0.37	0.42	0.46	0.44	0.45	0.42	0.42
7	0.25	0.16	0.22	0.23	0.23	0.21	0.29	0.4	0.56	0.51	0.39	0.41	0.38	0.47	0.43	0.41	0.41	0.33	0.42	0.39	0.4	0.44	0.47	0.48	0.45
8	0.28	0.2	0.2	0.22	0.23	0.23	0.38	0.5	0.58	0.54	0.49	0.4	0.41	0.52	0.51	0.44	0.49	0.38	0.47	0.47	0.44	0.52	0.54	0.54	0.54
9	0.37	0.26	0.27	0.26	0.32	0.35	0.47	0.56	0.67	0.63	0.58	0.56	0.49	0.6	0.6	0.49	0.52	0.51	0.53	0.5	0.48	0.58	0.57	0.62	0.59
10	0.41	0.31	0.34	0.31	0.38	0.42	0.52	0.61	0.66	0.6	0.63	0.58	0.54	0.62	0.61	0.55	0.53	0.51	0.56	0.51	0.47	0.63	0.6	0.63	0.61
11	0.45	0.36	0.38	0.39	0.45	0.45	0.57	0.68	0.67	0.68	0.69	0.65	0.59	0.65	0.63	0.6	0.51	0.51	0.58	0.55	0.52	0.68	0.7	0.65	0.64
12	0.47	0.4	0.41	0.39	0.47	0.48	0.58	0.66	0.66	0.72	0.7	0.64	0.58	0.48	0.56	0.54	0.52	0.51	0.56	0.55	0.57	0.64	0.65	0.65	0.64
13	0.45	0.37	0.39	0.37	0.43	0.44	0.44	0.55	0.66	0.71	0.71	0.68	0.62	0.59	0.63	0.6	0.57	0.53	0.55	0.57	0.53	0.56	0.62	0.65	0.62
14	0.45	0.39	0.34	0.38	0.43	0.43	0.54	0.68	0.74	0.71	0.7	0.65	0.57	0.61	0.6	0.52	0.54	0.53	0.57	0.53	0.55	0.62	0.63	0.62	0.64
15	0.42	0.41	0.31	0.36	0.42	0.45	0.55	0.66	0.65	0.69	0.68	0.66	0.6	0.62	0.56	0.52	0.56	0.53	0.6	0.53	0.53	0.64	0.62	0.64	0.64
16	0.41	0.38	0.3	0.34	0.42	0.45	0.55	0.59	0.68	0.7	0.65	0.64	0.56	0.63	0.63	0.54	0.55	0.53	0.55	0.53	0.51	0.6	0.66	0.7	0.62
17	0.41	0.35	0.28	0.34	0.41	0.44	0.52	0.64	0.67	0.69	0.65	0.6	0.58	0.64	0.62	0.53	0.55	0.55	0.54	0.53	0.51	0.63	0.65	0.63	0.61
18	0.38	0.34	0.3	0.34	0.38	0.42	0.45	0.56	0.58	0.57	0.6	0.6	0.6	0.62	0.58	0.56	0.51	0.48	0.54	0.43	0.44	0.61	0.59	0.64	0.63
19	0.33	0.32	0.29	0.34	0.37	0.38	0.42	0.53	0.51	0.51	0.49	0.48	0.52	0.42	0.56	0.54	0.49	0.4	0.47	0.39	0.44	0.62	0.49	0.6	0.59
20	0.26	0.26	0.26	0.26	0.28	0.25	0.31	0.36	0.4	0.46	0.43	0.47	0.4	0.48	0.46	0.42	0.42	0.3	0.37	0.35	0.36	0.4	0.41	0.43	0.45
21	0.26	0.22	0.21	0.24	0.26	0.25	0.29	0.37	0.4	0.46	0.41	0.48	0.39	0.48	0.48	0.42	0.42	0.3	0.41	0.35	0.36	0.42	0.43	0.42	0.45
22	0.23	0.16	0.17	0.2	0.27	0.27	0.28	0.38	0.44	0.46	0.46	0.43	0.44	0.38	0.5	0.4	0.36	0.41	0.34	0.42	0.39	0.42	0.42	0.44	0.44
23	0.22	0.16	0.17	0.2	0.27	0.27	0.28	0.38	0.44	0.46	0.46	0.43	0.44	0.38	0.5	0.4	0.36	0.41	0.34	0.42	0.39	0.42	0.42	0.44	0.44

	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
0	0.13	0.1	0.1	0.14	0.16	0.18	0.18	0.21	0.31	0.33	0.3	0.33	0.3	0.4	0.38	0.39	0.36	0.28	0.28	0.33	0.35	0.28	0.3	0.25	0.28
1	0.32	0.27	0.28	0.1	0.15	0.19	0.11	0.21	0.31	0.32	0.27	0.33	0.28	0.39	0.39	0.31	0.34	0.25	0.31	0.32	0.34	0.35	0.28	0.24	0.31
2	0.31	0.28	0.29	0.1	0.15	0.18	0.11	0.21	0.31	0.32	0.27	0.33	0.28	0.37	0.32	0.27	0.36	0.27	0.31	0.31	0.31	0.28	0.25	0.25	0.28
3	0.34	0.31	0.31	0.35	0.35	0.33	0.31	0.31	0.31	0.32	0.26	0.43	0.36	0.28	0.34	0.3	0.28	0.3	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
4	0.34	0.34	0.37	0.38	0.35	0.35	0.38	0.25	0.37	0.36	0.3	0.29	0.25	0.43	0.4	0.31	0.35	0.3	0.29	0.29	0.31	0.34	0.38	0.28	0.28
5	0.35	0.33	0.37	0.38	0.36	0.21	0.34	0.26	0.43	0.33	0.3	0.29	0.29	0.36	0.39	0.34	0.32	0.26	0.33	0.29	0.32	0.33	0.35	0.25	0.28
6	0.35	0.34	0.35	0.34	0.35	0.38	0.33	0.27	0.41	0.36	0.3	0.31	0.25	0.39	0.33	0.27	0.36	0.28	0.31	0.34	0.3	0.3	0.31	0.28	0.3
7	0.34	0.28	0.32	0.32	0.34	0.33	0.38	0.25	0.44	0.39	0.29	0.3	0.26	0.34	0.31	0.27	0.29	0.29	0.27	0.26	0.3	0.28	0.31	0.33	0.3
8	0.35	0.28	0.28	0.3	0.37	0.22	0.25	0.35	0.44	0.41	0.38	0.27	0.28	0.39	0.4	0.31	0.36	0.28	0.3	0.36	0.31	0.37	0.39	0.4	0.39
9	0.36	0.37	0.3	0.32	0.38	0.21	0.31	0.42	0.54	0.51	0.46	0.43	0.36	0.47	0.51	0.38	0.39	0.37	0.36	0.38	0.34	0.43	0.42	0.47	0.45
10	0.25	0.38	0.31	0.37	0.25	0.3	0.37	0.48	0.52	0.47	0.52	0.46	0.42	0.51	0.52	0.44	0.43	0.38	0.4	0.4	0.34	0.48	0.46	0.48	0.48
11	0.27	0.2	0.34	0.38	0.33	0.37	0.44	0.56	0.53	0.56	0.59	0.54	0.48	0.55	0.54	0.5	0.41	0.35	0.44	0.48	0.38	0.55	0.58	0.51	0.5
12	0.29	0.23	0.37	0.25	0.36	0.37	0.44	0.56	0.53	0.61	0.6	0.52	0.47	0.52	0.45	0.46	0.42	0.35	0.43	0.43	0.45	0.5	0.51	0.49	0.51
13	0.26	0.2	0.34	0.22	0.28	0.3	0.39	0.54	0.59	0.59	0.57	0.5	0.48	0.51	0.49	0.47	0.41	0.42	0.41	0.41	0.44	0.49	0.52	0.52	0.49
14	0.27	0.21	0.35	0.22	0.28	0.29	0.37	0.55	0.63	0.6	0.6	0.55	0.45	0.49	0.51	0.4	0.43	0.4	0.43	0.41	0.42	0.48	0.49	0.47	0.51
15	0.24	0.23	0.37	0.23	0.27	0.32	0.39	0.53	0.51	0.55	0.57	0.55	0.48	0.49	0.47	0.39	0.46	0.39	0.46	0.42	0.42	0.5	0.5	0.48	0.51
16	0.23	0.21	0.37	0.24	0.27	0.31	0.39	0.44	0.54	0.59	0.54	0.54	0.43	0.43	0.51	0.55	0.43	0.43	0.41	0.4	0.44	0.39	0.45	0.53	0.55
17	0.21	0.18	0.33	0.28	0.26	0.3	0.35	0.51	0.53	0.58	0.54	0.51	0.48	0.52	0.54	0.39	0.46	0.42	0.38	0.41	0.38	0.5	0.5	0.47	0.49
18	0.18	0.15	0.34	0.28	0.23	0.28	0.28	0.42	0.44	0.42	0.48	0.47	0.49	0.5	0.5	0.46	0.43	0.34	0.42	0.32	0.32	0.49	0.44	0.53	0.49
19	0.15	0.14	0.33	0.25	0.24	0.26	0.37	0.38	0.36	0.36	0.45	0.4	0.49	0.45	0.45	0.35	0.31	0.39	0.28	0.33	0.31	0.51	0.35	0.5	0.47
20	0.13	0.12	0.31	0.24	0.2	0.26	0.37	0.34	0.28	0.33	0.33	0.37	0.27	0.37	0.34	0.32	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
21	0.13	0.1	0.3	0.2	0.17	0.16	0.34	0.28	0.28	0.34	0.29	0.38	0.27	0.35	0.36	0.32	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
22	0.13	0.08	0.27	0.1	0.18	0.18	0.33	0.28	0.34	0.33	0.35	0.26	0.38	0.38	0.34	0.29	0.21	0.3	0.27	0.32	0.32	0.28	0.28	0.29	0.27
23	0.11	0.1	0.31	0.23	0.17	0.17	0.31	0.23	0.29	0.34	0.29	0.32	0.28	0.32	0.34	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33

Рис. 7. Суточный ход доступности радиоканалов с полосами 18 кГц

Fig. 7. Diurnal variations of availability of 18 kHz radio channels

	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
0	0.06	0.05	0.05	0.08	0.09	0.1	0.11	0.14	0.23	0.25	0.2	0.24	0.21	0.29	0.31	0.3	0.29	0.14	0.19	0.23	0.28	0.37	0.21	0.18	0.19
1	0.06	0.03	0.04	0.05	0.08	0.11	0.1	0.12	0.23	0.24	0.19	0.24	0.19	0.28	0.31	0.22	0.26	0.17	0.23	0.22	0.27	0.25	0.17	0.14	0.15
2	0.05	0.03	0.04	0.05	0.08	0.11	0.1	0.12	0.23	0.24	0.19	0.24	0.19	0.28	0.31	0.22	0.26	0.17	0.23	0.22	0.27	0.25	0.17	0.14	0.15
3	0.07	0.05	0.07	0.08	0.1	0.12	0.12	0.15	0.25	0.25	0.21	0.21	0.17	0.32	0.27	0.2	0.26	0.23	0.18	0.22	0.26	0.23	0.18	0.18	0.12
4	0.07	0.07	0.1	0.11	0.08	0.12	0.12	0.14	0.29	0.27	0.21	0.21	0.18	0.32	0.31	0.23	0.28	0.23	0.18	0.22	0.26	0.23	0.18	0.18	0.12
5	0.08	0.07	0.1	0.09	0.08	0.11	0.11	0.13	0.35	0.24	0.21	0.2	0.2	0.28	0.29	0.25	0.25	0.18	0.23	0.23	0.23	0.22	0.25	0.15	0.2
6	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08	0.1	0.11	0.13	0.33	0.28	0.23	0.22	0.18	0.31	0.32	0.16	0.28	0.2	0.23	0.15	0.21	0.18	0.21	0.18	0.25
7	0.07	0.05	0.06	0.06	0.07	0.06	0.12	0.13	0.34	0.32	0.2	0.2	0.2	0.18	0.28	0.22	0.17	0.2	0.17	0.14	0.17	0.18	0.21	0.19	0.25
8	0.07	0.05	0.05	0.05	0.09	0.14	0.17	0.22	0.34	0.32	0.27	0.17	0.19	0.26	0.31	0.22	0.27	0.15	0.19	0.26	0.23	0.24	0.27	0.28	0.31
9	0.12	0.08	0.04	0.06	0.09	0.13	0.2	0.3	0.44	0.4	0.35	0.33	0.33	0.27	0.34	0.42	0.29	0.28	0.26	0.26	0.28	0.25	0.32	0.28	0.34
10	0.14	0.08	0.05	0.1	0.15	0.18	0.28	0.36	0.43	0.35	0.42	0.35	0.32	0.39	0.43	0.35	0.35	0.28	0.3	0.32	0.34	0.34	0.34	0.37	0.37
11	0.17	0.11	0.07	0.13	0.23	0.25	0.33	0.46	0.42	0.45	0.49	0.44	0.39	0.43	0.44	0.41	0.34	0.24	0.35	0.36	0.29	0.43	0.47	0.41	0.4
12	0.23	0.13	0.09	0.14	0.26	0.28	0.34	0.46	0.42	0.5	0.51	0.4	0.38	0.4	0.36	0.35	0.34	0.25	0.32	0.34	0.36	0.38	0.4	0.4	0.42
13	0.34	0.11	0.08	0.13	0.17	0.2	0.27	0.42	0.49	0.49	0.48	0.39	0.39	0.39	0.37	0.33	0.33	0.33	0.32	0.32	0.34	0.38	0.39	0.42	0.4
14	0.37	0.12	0.11	0.14	0.18	0.17	0.26	0.44	0.52	0.49	0.51	0.44	0.35	0.36	0.43	0.3	0.34	0.3	0.34	0.35	0.32	0.36	0.4	0.36	0.4
15	0.45	0.14	0.09	0.14	0.16	0.23	0.25	0.41	0.39	0.43	0.47	0.45	0.39	0.37	0.4	0.28	0.4	0.3	0.37	0.34	0.33	0.39	0.38	0.4	0.4
16	0.34	0.12	0.1	0.29	0.15	0.2	0.28	0.41	0.44	0.48	0.44	0.44	0.35	0.39	0.45	0.34	0.37	0.33	0.31	0.35	0.31	0.33	0.39	0.44	0.4
17	0.34	0.11	0.08	0.1	0.15	0.19	0.28	0.4	0.44	0.48	0.46	0.41	0.39	0.4	0.46	0.28	0.4	0.33	0.29	0.31	0.31	0.39	0.35	0.37	0.41
18	0.1	0.08	0.08	0.11	0.13	0.17	0.18	0.3	0.33	0.32	0.38	0.36	0.39	0.37	0.42	0.36	0.35	0.25	0.34	0.34	0.35	0.38	0.3	0.45	0.38
19	0.07	0.07	0.08	0.12	0.16	0.15	0.14	0.25	0.26	0.25	0.26	0.33	0.31	0.36	0.35	0.36	0.28	0.24	0.24	0.17	0.25	0.39	0.26	0.41	0.37
20	0.08	0.06	0.05	0.08	0.12	0.1	0.13	0.13	0.2	0.24	0.24	0.29	0.18	0.27	0.25	0.23	0.24	0.12	0.15	0.17	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22
21	0.08	0.05	0.05	0.07	0.1	0.08	0.12	0.13	0.2	0.25	0.21	0.3	0.18	0.25	0.27	0.24	0.25	0.13	0.19	0.17	0.18	0.13	0.1	0.18	0.22
22	0.06	0.04	0.03	0.05	0.11	0.1	0.11	0.16	0.22	0.27	0.21	0.27	0.17	0.28	0.33	0.33	0.3	0.14	0.21	0.19	0.24	0.2	0.18	0.18	0.19
23	0.08	0.05	0.06	0.07	0.1	0.1	0.1	0.14	0.21	0.26	0.21	0.24	0.19	0.23	0.25	0.25	0.27	0.23	0.18	0.18	0.25	0.24	0.18	0.17	0.17

Рис. 8. Суточный ход доступности радиоканалов с полосами 24 кГц

Fig. 8. Diurnal variations of availability of 24 kHz radio channels

Для каналов с полосой 24 кГц доступность в диапазоне частот 3 – 9 МГц продолжала уменьшаться.

Для каналов с полосой 24 кГц (см. рис. 8) в ночное и вечернее время для диапазона частот тактической связи (3 – 8 МГц) доступность в среднем составляла 8 и 14 % – в дневное время. В полосе частот стратегической связи (9 – 27 МГц) в ночное и вечернее время средняя доступность радиоканалов с полосой 24 кГц составляла 21 %. В дневное время – 36 %. Уменьшение доступности радиоканалов с полосой 24 кГц для тактической связи

Список источников

1. Proakis J., Salehi M. Digital Communications. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2008. 1150 p.
2. Furman W., Nieto J., Koski E. Initial Wideband HF ALE: Approach and On-Air Test Results // The Nordic Shortwave Conference HF13, Faro, Sweden, 2013. Pp. 1–10.
3. Furman W., Nieto J., Batts W. Wideband HF Channel Availability – Measurement Techniques and Results // 14th International Ionospheric Effects Symposium, Alexandria, Virginia, USA, 2015. Pp. 1–7.
4. Mostafa M., Haralambous H. Wideband Channel Availability Statistics over the High Frequency Spectrum in Cyprus // 2nd URSI AT-RASC, Gran Canaria, Spain, 2018. Pp. 1–4.
5. Recommendation ITU-R P.372-14 “Radio noise”, 20 SEPTEMBER 2019. 78 p.
6. Universal ionosonde for diagnostics of ionospheric HF-radio channels and its application in estimation of channel availability / D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova et al. // 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018). London, 2018. Pp. 1-5. doi: 10.1049/cp.2018.0473.
7. Software-Defined Radio Ionosonde for Diagnostics of Wideband HF Channels with the Use of USRP Platform / R. R. Belgibaev, V. A. Ivanov, D. V. Ivanov et al. // 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). Saint-Petersburg, Russia, 2019. Pp. 1-4. doi: 10.1109/WECONF.2019.8840637.
8. Efficiency of HF Communication Modems Operating Over a Mid-latitude Long-Range Propagation Path / V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, R. R. Belgibaev et al. // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). Minsk, 2018. Pp. 1-5. doi: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457021.
9. Adaptive Algorithms for Filtering Ionograms and Measuring Channel Parameters to Estimate its Availability / D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, R. R. Belgibaev et al. // 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). Russia, 2019. Pp. 1-4. doi: 10.1109/SYNCHROINFO.2019.8813917.
10. Анализ занятости каналов с полосами от 3 до 24 кГц в задаче когнитивного КВ радио / Д.В. Иванов, В.А. Иванов, Р.Р. Бельгибаев и др. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. № 1-2. С. 96-97.
11. Определение занятости КВ-радиоканалов с полосами 3...24 кГц для повышения эффективности передачи информации / Д.В. Иванов, В.А. Иванов, Н.В. Рябова и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2020. № 3 (47). С. 6-17. doi: 10.25686/2306-2819.2020.3.6
12. Improving the efficiency of data transmission over the HF radio channel with bandwidths of 3-24 kHz / D.V. Ivanov, V.A. Ivanov, R.R. Belgibaev et al. // 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, (WECONF). 2020. Pp. 9131161. doi: 10.1109/WECONF48837.2020.9131161
13. Изменение загруженности КВ радиоканалов при расширении их полосы пропускания от 3 кГц до 24 кГц / Д.В. Иванов, В.А. Иванов, Н.В. Рябова и др. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2021. № 3. С. 88-89.
14. Новые задачи ионосферной КВ-связи. Развитие методик, аппаратных решений и экспериментальные результаты их исследования / Д.В. Иванов, В.А. Иванов, Н.В. Рябова и др. // Распространение радиоволн. Труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции. Калининград, 2021. С. 68-85.
15. Universal complex for sounding and estimation of ionospheric radio channels ranging from 3 kHz to 1 MHz wide / D. Ivanov, V. Ivanov, N. Ryabova et al. // 2021 International Symposium on Antennas and Propagation, ISAP 2021. 2021. Pp. 1-2.

Статья поступила в редакцию 02.02.2022; одобрена после рецензирования 03.03.2022; принята к публикации 10.03.2022

Информация об авторах

ИВАНОВ Дмитрий Владимирович – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, проректор по научной работе, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – локационные и телекоммуникационные системы. Автор 300 научных публикаций. ORCID: orcid.org/0000-0002-3609-1157

ИВАНОВ Владимир Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий кафедрой высшей математики, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – ионосфера, распространение радиоволн, моделирование, широкополосные сигналы. Автор 400 научных публикации. ORCID: orcid.org/0000-0002-9860-4771

РЯБОВА Наталья Владимировна – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники и связи, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – информационно-телекоммуникационные системы, ионосфера, распространение радиоволн, прогнозирование, моделирование, адаптивные и когнитивные системы. Автор 290 научных публикаций. ORCID: orcid.org/0000-0002-3515-4750

БЕЛЬГИБАЕВ Руслан Рашидович – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и связи, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – ионосфера, распространение радиоволн, моделирование, цифровая обработка сигналов, радиосвязь. Автор 45 научных публикаций.

ЧЕРНЯДЬЕВ Андрей Владимирович – аспирант, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – ионосфера, распространение радиоволн, моделирование, радиосвязь. Автор трёх научных публикаций.

Вклад авторов:

Иванов Д. В. – концепция работы; интерпретация данных; окончательное утверждение версии для публикации, новые методы и математические модели.

Иванов В. А. – дизайн работы, интерпретация данных; составление статьи и её итоговая переработка, окончательное утверждение версии для публикации.

Рябова Н. В. – техническое и алгоритмическое обеспечение работы в части созданных в ней новых методов.

Бельгибаев Р. Р. – разработка и программная реализация алгоритмов, сбор данных и их анализ, составление статьи.

Чернядьев А. В. – сбор и анализ экспериментальных данных.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 621.391.83

<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.1.21>**Monitoring of Interference Spectrum and Availability of HF Radio Channels of 3...24 Khz Width****D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, R. R. Bel'gibaev[✉], A. V. Chernjad'ev**Volga State University of Technology,
3, Lenin sqr., Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation
BelgibaevRR@volgatech.net[✉]**Keywords:** spectrum availability; wideband signal; noise level; channel-minute availability; adaptive threshold**ABSTRACT**

Introduction. Currently, HF radio communication is used by civil, industrial, military services and organizations. HF communication systems have a number of advantages, such as: many uses or applications, relatively low cost, large coverage area, which is important for communication in remote areas (mountains, sea, etc.). At the current level of knowledge in the field of wireless communication, there have been created methods that allow to overcome the influence of the negative effects of the HF radio channel on the data transmission, however, with various performance. They imply the use of the sounding mode for multiple channels in the operation of HF communication systems, as well as the use of OFDM signals that exhibit resistance to intersymbol interference. Since the quality of communication is determined by the signal-to-noise ratio (the ratio of signal energy to the spectral density of interferences in the channel), there have been developed cognitive radio methods for HF communications, taking into account the negative effects of intermode dispersion and channel occupancy with interferences. This allows to establish the channel availability. The urgency of the approach is especially high when solving the problem of significant increasing the bandwidth of HF communication (up to 120,000 bps) by spreading the channel bandwidth by a multiple of 3 kHz up to 24 kHz. The need to introduce additional operation modes for HF communication systems requires the development and widespread use of software-defined radio (SDR) technology, as well as the creation of special software with elements of intelligent technologies, such as: technology of machine learning (ML) for the transformation of communication systems to AR (Adaptive Radio), CR (Cognitive Radio) and IR (Intelligent Radio). So, the problem of increasing the data rate in the HF band within the framework of CR and SDR technologies requires the development of methods and algorithms for the introduction of technology for machine learning of communication systems, as well as the creation of laboratory equipment. The **aim** of the research: development of methods, algorithms and hardware implementation of a laboratory facility for monitoring the interference spectrum in the HF band at different (3 kHz, 6 kHz, 9 kHz, 12 kHz, 18 kHz, 24 kHz) resolution, as well as their experimental verification in a challenging urban reception conditions. **Tackled tasks:** development of the method, algorithms for the spectral estimation of the availability of radio channels occupied with interferences; creation a laboratory facility for monitoring the spectrum of interferences at HF frequencies based on the software-defined radio technology; experimental verification of the developed method and algorithms in the most difficult reception case - interference environment. **Conclusion.** A laboratory facility of a software hardware complex developed on the basis of SDR technology for monitoring the interference spectrum in the HF band for radio channels of 3 kHz to 24 kHz width is presented. A scientific statement of methods for estimating and analyzing the availability of such channels for operating frequencies of tactical and strategic communications is given. Experimental verification of methods, algorithms and hardware, carried out during the month of the summer solstice (June) in a challenging urban interference environment, showed that with an increase in the channel bandwidth, their overall availability decreases both in the day and at night. There are presented figures showing that spectral monitoring, implemented on the basis of developed methods and algorithms allows to find available radio channels of tactical and strategic communication systems almost around the clock when operating with low-power signals, even in a challenging interference conditions typical for the cities.

Funding: this work was supported by the grant № 22-19-00073 from the Russian Science Foundation.

REFERENCES

1. Proakis J., Salehi M. Digital Communications. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2008. 1150 p.
2. Furman W., Nieto J., Koski E. Initial Wideband HF ALE: Approach and On-Air Test Results. *The Nordic Shortwave Conference HF13*, Faro, Sweden, 2013. Pp. 1–10.
3. Furman W., Nieto J., Batts W. Wideband HF Channel Availability – Measurement Techniques and Results. *14th International Ionospheric Effects Symposium*, Alexandria, Virginia, USA, 2015. Pp. 1–7.
4. Mostafa M., Haralambous H. Wideband Channel Availability Statistics over the High Frequency Spectrum in Cyprus. *2nd URSI AT-RASC*, Gran Canaria, Spain, 2018. Pp. 1–4.
5. Recommendation ITU-R P.372-14 “Radio noise”, 20 SEPTEMBER 2019. 78 p.
6. Ivanov D. V., Ivanov V. A., Ryabova N. V. et al. Universal ionosonde for diagnostics of ionospheric HF-radio channels and its application in estimation of channel availability. *12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018)*. London, 2018. Pp. 1-5. doi: 10.1049/cp.2018.0473.
7. Belgibaev R. R., Ivanov V. A., Ivanov D. V. et al. Software-Defined Radio Ionosonde for Diagnostics of Wideband HF Channels with the Use of USRP Platform. *2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. Saint-Petersburg, Russia, 2019. Pp. 1-4. doi: 10.1109/WECONF.2019.8840637.
8. Ivanov V. A., Ryabova N. V., Belgibaev R. R. et al. Efficiency of HF Communication Modems Operating Over a Mid-latitude Long-Range Propagation Path. *2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. Minsk, 2018. Pp. 1-5. doi: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457021.
9. Ivanov D. V., Ivanov V. A., Belgibaev R. R. et al. Adaptive Algorithms for Filtering Ionograms and Measuring Channel Parameters to Estimate its Availability. *2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. Russia, 2019. Pp. 1-4. doi: 10.1109/SYNCHROINFO.2019.8813917.
10. Ivanov D.V., Ivanov V.A., Belgibaev R.R., Konkin N.A. Analiz zanjatosti kanalov s polosami ot 3 do 24 kGc v zadache kognitivnogo KV radio [Analysis of channel occupancy with 3 to 24 kHz bandwidths in the task of cognitive HF radio]. *SVCh-tehnika i telekommunikacionnye tehnologii* [Microwave engineering and telecommunication technologies]. 2020. No 1-2. P. 96-97. (In Russ.).
11. Ivanov D.V., Ivanov V.A., Rjabova N.V., Belgibaev R.R. Opredelenie zanjatosti KV-radiokanalov s polosami 3...24 kGc dlja povyshenija jeffektivnosti peredachi informacii [Measuring HF radio channel occupancy with bandwidth from 3 to 24 kHz to increase the efficiency of data transmission]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy»* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series “Radio Engineering and Infocommunication Systems”]. 2020. No 3(47). P. 6-17. DOI: 10.25686/2306-2819.2020.3.6
12. Ivanov D.V., Ivanov V.A., Belgibaev R.R. et al. Improving the efficiency of data transmission over the HF radio channel with bandwidths of 3-24 kHz. *2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, (WECONF)*. 2020. Pp. 9131161. doi: 10.1109/WECONF48837.2020.9131161
13. Ivanov D.V., Ivanov V.A., Rjabova N.V., Belgibaev R.R. Izmenenie zagruzhennosti KV radiokanalov pri rasshirenii ih polosy propuskaniya ot 3kGc do 24 kGc [Changes in the occupancy of HF radio channels with spreading their bandwidth from 3 kHz to 24 kHz]. *SVCh-tehnika i telekommunikacionnye tehnologii* [Microwave engineering and telecommunication technologies]. 2021. No 3. P. 88-89.
14. Ivanov D.V., Ivanov V.A., Rjabova N.V., Belgibaev R.R., Elsukov A.A., Ovchinnikov V.V. Nove zadachi ionosfernoj KV-svjazi. Razvitie metodik, apparatnyh reshenij i jeksperimental'nye rezul'taty ih issledovaniya [Advances in ionospheric HF communication. development of methods, hardware solutions and research findings]. *Rasprostranenie radiovoln. Trudy XXVII Vserossijskoj otkrytoj nauchnoj konferencii* [XXVII Russian open conference “radio waves propagation”]. Kaliningrad: Immanuel Kant Baltic Federal University (IKBFU), 2021. P. 68-85.
15. Ivanov D., Ivanov V., Ryabova N. et al. Universal complex for sounding and estimation of ionospheric radio channels ranging from 3 kHz to 1 MHz wide. *2021 International Symposium on Antennas and Propagation. ISAP 2021*. 2021. Pp. 1-2.

The article was submitted 02.02.2022; approved after reviewing 03.03.2022;
accepted for publication 10.03.2022

For citation: Ivanov D. V., Ivanov V. A., Ryabova N. V., Belgibaev R. R., Chernjad'ev A. V. Monitoring of Interference Spectrum and Availability of HF Radio Channels of 3...24 KHz Width. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems*. 2022. No 1 (53). Pp. 21–32. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.1.21>

Information about the authors

Dmitry V. Ivanov – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Corresponding Member of RAS, Vice-Rector for Research, Volga State University of Technology. Research interests are location and telecommunication systems. The author of 300 scientific publications. ORCID: orcid.org/0000-0002-3609-1157

Vladimir A. Ivanov – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, the Head of the Chair of Higher Mathematics, Volga State University of Technology. Research interests are the ionosphere, the propagation of radio waves, modeling and wideband signals. The author of 400 scientific publications. ORCID: orcid.org/0000-0002-9860-4771

Natalya V. Ryabova – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, the Head of the Chair of Radio engineering and Communications, Volga State University of Technology. Research interests are information and telecommunication systems, ionosphere, the propagation of radio waves, forecasting, modeling, adaptive and cognitive systems. The author of 290 scientific publications. ORCID: orcid.org/0000-0002-3515-4750

Ruslan R. Bel'gibaev – Candidate of Technical Sciences, associate professor at the Chair of Radio engineering and Communications, Volga State University of Technology. Research interests are ionosphere, the propagation of radio waves, modeling, digital signal processing, radio communication. The author of 45 scientific publications.

Andrej V. Chernjad'ev – PhD student at Volga State University of Technology. Research interests are ionosphere, the propagation of radio waves, modeling, radio communication. The author of 3 scientific publications.

Contribution of authors:

Ivanov D. V. – concept of work; data interpretation; final approval of the manuscript, new methods and mathematical models.

Ivanov V. A. – work design, data interpretation; preparation of the manuscript and its final processing, final approval of the manuscript.

Ryabova N. V. – technical and algorithmic support in terms of creating new methods.

Bel'gibaev R. R. – development and software implementation of algorithms, data gathering and analysis, writing a manuscript.

Chernjad'ev A. V. – gathering and analysis of experimental data.

Authors declare that they have no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.