

Машинное обучение для анализа доступности коротковолнового канала связи

Н. А. Конкин, М. В. Вершинин

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия

Аннотация. Применение методов машинного обучения для прогнозирования максимально применимой частоты коротковолновых (КВ) каналов связи позволяет повысить надежность передачи информации в условиях помех, замираний сигналов и многолучевого распространения. Разработана методика оценки доступности КВ-канала на трассе о. Кипр — г. Йошкар-Ола с использованием модели Comb_Voting_Huber_p-10_mae, обеспечивающей прогноз МПЧ с отклонением менее 0.5 % в среднем за весь период исследования. На основе прогнозных и реальных значений МПЧ рассчитываются параметры сигнала, включая рабочую частоту, скорость передачи и длительность защитного интервала, для адаптации к динамической сигнально-помеховой обстановке. Анализ сезонных и суточных вариаций показал высокую точность модели: среднегодовая прогнозная доступность составила 93.46 % против реальной 93.23 %, с минимальной разницей SNR (0.06 дБ) и BER ($2.76 \cdot 10^{-4}$). Несмотря на редкие отклонения, вызванные ионосферными возмущениями, модель демонстрирует стабильность и пригодность для практического применения в адаптивных системах радиосвязи.

Ключевые слова: машинное обучение (МО); максимально применимая частота (МПЧ); оптимальная радиочастота (ОРЧ)

Machine learning for analyzing the availability of a shortwave communication channel

N. A. Konkin, M. V. Vershinin

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia

Abstract. The application of machine learning methods for predicting the Maximum Usable Frequency (MUF) of shortwave (HF) communication channels enhances the reliability of information transmission under conditions of interference, signal fading, and multipath propagation. A methodology was developed to assess the availability of an HF channel on the Cyprus–Yoshkar-Ola path using the Comb_Voting_Huber_p-10_mae model, achieving MUF prediction with a deviation of less than 0.5 %. Based on predicted and actual MUF values, signal parameters such as operating frequency, transmission rate, and guard interval duration are calculated to adapt to the dynamic signal-to-noise environment. Analysis of seasonal and diurnal variations demonstrated high model accuracy: the annual predicted channel availability was 93.46 % compared to the actual 93.23 %, with a minimal difference in SNR (0.06 dB) and BER ($2.76 \cdot 10^{-4}$). Despite occasional deviations due to ionospheric disturbances, the model exhibits stability and suitability for practical use in adaptive radio communication systems.

Keywords: machine learning (MO), Maximum Usable Frequency (MUF), Optimal Radio Frequency (ORF)

Введение

Доступность коротковолнового (КВ) радиоканала может снижаться из-за высокой загруженности помехами, затуханий сигналов, многолучевого распространения и других факторов, что ухудшает вероятность передачи сообщения в целом.

При передаче сообщений по КВ-радиоканалам на фиксированной частоте с постоянной скоростью передачи и неизменяющимся помехоустойчивым кодом можно передавать файлы небольших объемов (не более 10 Кбайт) со средней информационной скоростью порядка 100 бит/с и с вероятностью ошибки на бит $10^{-3} - 10^{-5}$ при использовании *BPSK* модуляции без мультиплексирования.

Для повышения достоверности передачи информации по КВ-каналу необходимо использовать методы адаптации к динамически изменяющейся сигнально-помеховой обстановке. В частности, в зависимости от обстановки следует изменять:

- 1) рабочую частоту;
- 2) техническую скорость передачи за счет изменения кратности модуляции;
- 3) избыточность и параметры помехоустойчивого кода;
- 4) длительность защитного интервала и элементарного сигнала;
- 5) количество и расстановку используемых субчастот;
- 6) адаптивное перераспределение информационного потока и мощности передатчикам между субчастотами сигналов.

Также для обеспечения безошибочного доведения сообщения по КВ-радиоканалу необходимо использовать помехоустойчивые коды с контролем достоверности и осуществлять переспрос неприятых или искаженных информационных блоков.

Применение методов машинного обучения позволит заблаговременно получать значения МПЧ — одной из основных характеристик коротковолновой радиосвязи — и использовать их в адаптивных системах передачи информации, тем самым увеличивая доступность коротковолновых радиоканалов.

Постановка задачи

Цель работы: оценка доступности коротковолнового радиоканала связи между о. Кипр и г. Йошкар-Ола с использованием модели машинного обучения *Comb_Voting_Huber_p-10_mae* на основе реального и прогнозного параметра МПЧ и их сравнение.

Задачи:

1. Разработка методики оценки доступности коротковолнового радиоканала с использованием реальных и прогнозных значений максимально применимой частоты;
2. Программная реализация методики оценки доступности КВ-каналов на основе машинного обучения с использованием языка программирования Python и специализированных библиотек Pandas и Scipy;
3. Проведение эксперимента оценки доступности КВ-каналов связи с использованием реальных и прогнозных значений максимально применимой частоты;
4. Анализ результатов эксперимента доступности КВ-каналов связи путем сравнения доступности радиоканалов при использовании реальных и прогнозных данных;
5. Составление вывода о применимости машинного обучения для устранения или снижения негативного воздействия причин возникновения высокой загруженности.

Теория

Одной из основных характеристик коротковолновых радиоканалов является максимально применимая частота (МПЧ, *MUF – Maximum Usable Frequency*), поскольку она определяет наивысшую частоту, которая может быть отражена ионосферой, для связи на дальние расстояния. Использование частоты ниже МПЧ гарантирует, что радиоволны будут отражены обратно к Земле. Если же частота выше МПЧ, то волны пройдут сквозь ионосферу и связь не состоится. Выбор наиболее близкой к МПЧ частоты обычно обеспечивает наилучшее распространение, но для стабильности часто используют частоту немного ниже, поскольку она непостоянна и меняется в зависимости от времени суток, года и солнечной активности, поэтому знание текущего значения МПЧ позволяет выбрать наиболее подходящую частоту для надежной связи в конкретный момент. Стабильная частота, вычисляемая как 85 % от МПЧ, называется оптимальной радиочастотой (ОРЧ, *ORF – Optimal Radio Frequency*) и является такой же важной по значимости характеристикой радиоканала.

Анализ ошибки определения доступности КВ-канала связи осуществляется на основе прогнозного МПЧ по сравнению с реальным. Максимально применимая частота является опорной для расчета оптимальной радиочастоты, на которой должен работать передатчик, чтобы обеспечить минимально необходимую напряженность электромагнитного поля для приемника. Вычисление ОРЧ выполнено следующим образом:

$$f_{orf} = 0,85 \times f_{muf}. \quad (1)$$

Рассмотрим доступность канала целевого датасета исследования (о. Кипр — г. Йошкар-Ола). Доступность оценим по метрике *BER* для *BPSK*-модуляции:

$$Avail_{BER} = \frac{(t \mid BER(t) \leq 10^{-5})}{N} \times 100, \quad (2)$$

где $BER(t) \leq 10^{-5}$ — пороговое значение *BER* для *BPSK* модуляции КВ-канала связи; *t* — временная точка, соответствующая заданному условию; *N* — общее число точек.

Эффективный SNR с учетом кодирования

$$SNR_{eff} = SNR_{corr} + G_c, \quad G_c = 5 \text{ дБ}, \quad (3)$$

с переводом в линейную шкалу

$$SNR_{eff,lin} = 10^{SNR_{corr}/10}. \quad (4)$$

Рассчитаем BER как

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{SNR_{eff,lin}} \right), \quad (5)$$

где erfc — дополнительная функция ошибок.

SNR_{corr} определяется с учетом затухания F , которое моделируется распределением Рэлея с параметром σ :

$$F \sim \text{Rayleigh}(\sigma), \quad \sigma = 0.7. \quad (6)$$

Таким образом, определяем SNR_{corr} как

$$SNR_{corr} = SNR - M \times F, \quad (7)$$

где M — параметра глубины замирания (8 дБ); F — случайная составляющая (по распределению Рэлея).

Выполним расчет базового SNR:

$$SNR = P_{rx} - P_{noise}, \quad (8)$$

где P_{rx} — принимаемая мощность, P_{noise} — мощность шума. Мощность шума определим как

$$P_{noise} = 10 \log_{10} (k \cdot T \cdot B) + NF + 30, \quad (9)$$

где $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ Дж/К}$ — постоянная Больцмана; $T = 290 \text{ К}$ — шумовая температура (в Кельвинах); B — полоса канала (Гц), NF — шумовая фигура (8 дБ). Принимаемая мощность

$$P_{rx} = 10 \log_{10} (P_{tx}) + G_{tx} + G_{rx} - L_{tot}, \quad (10)$$

где P_{tx} — мощность передатчика, G_{tx} — коэффициент усиления передающей антенны, G_{rx} — коэффициент усиления приемной антенны, $L_{tot} = L_{fslp} + L_{abs}$ — итоговые потери (L_{fslp} — потери в свободном пространстве, L_{abs} — потери на поглощении ионосферой). Потери в свободном пространстве определим как

$$L_{fslp} = 20 \log_{10} (d) + 20 \log_{10} (f_{orf}) + 32.45, \quad (11)$$

где d — расстояние от передатчика до приемника, f_{orf} — оптимальная радиочастота. Потери на поглощении ионосферой определим следующим образом:

$$L_{abs} = \alpha \frac{d}{1000} \cdot \frac{1}{f_{orf}^2}, \quad \alpha = 0.02 \frac{\text{дБ}}{\text{МГц} \cdot 1000 \text{ км}}. \quad (12)$$

Расчет направлен на количественную оценку доступности коротковолнового радиоканала связи между двумя точками: о. Кипр — г. Йошкар-Ола. Основным исходным параметром служит максимальная применимая частота (МПЧ, MUF), которая получена в результате прогноза и измерений. На ее основе рассчитывается оптимальная рабочая частота (ORF) (1) как 85 % от MUF , что отражает устойчивую область передачи в ионосферном канале. Используя ORF , проводим оценку потерь сигнала в канале. В расчет включаются потери в свободном пространстве ($FSPL$), которые зависят от расстояния и частоты, а также дополнительное поглощение в D-слое ионосферы (11, 12). Эти потери суммируются, чтобы определить общее затухание. Сигнал также подвержен замираниям, что моделируется с помощью распределения Рэлея, влияющего на итоговый уровень SNR (6). Затем рассчитывается мощность принимаемого сигнала с учетом мощности передатчика, усиления антенн и всех потерь (10). Также оценивается мощность шума приемника, основанная на температуре, ширине полосы и шумовой фигуре (9). Разность между мощностью сигнала и шумом дает SNR в децибелах (8). Полученное значение SNR используется для оценки битовой ошибки (BER) на основе выбранной

модуляции (5). В данной реализации используется *BPSK*, для которой *BER* выражается через дополнительную функцию ошибок и зависит от эффективного значения *SNR* с учетом кодирующего выигрыша. Итоговая доступность канала определяется как доля временных точек, в которых уровень *SNR* превышает минимальный допустимый порог (например, 10 дБ) (2) или $BER \leq 10^{-5}$.

В качестве основного метода прогнозирования применён *Voting Regressor*, который объединяет предсказания трёх моделей — *ElasticNet*, *Huber* и *XGBoost* — посредством усреднения. Такой ансамбль позволяет эффективно компенсировать недостатки отдельных моделей: линейные регрессоры (*ElasticNet* и *Huber*) обеспечивают устойчивость к выбросам и надёжное моделирование линейных зависимостей, в то время как *XGBoost*, обладая мощными механизмами градиентного бустинга, идентифицирует сложные нелинейные паттерны и взаимодействия между признаками. Основным мотивом применения *Voting Regressor* — достижение большей точности и стабильности прогноза за счёт синергии моделей с разной природой.

Специальное внимание уделено настройке *Huber Regressor*. Его гиперпараметры были оптимизированы, включая подбор параметра δ (*epsilon*), разделяющего квадратичную и линейную зоны функции потерь, что позволяет значительно снизить влияние выбросов. Для предотвращения переобучения была реализована стратегия ранней остановки (*early stopping*), контролируемая по метрике *MAE* на валидационной выборке; обучение прекращается при отсутствии улучшения *MAE* в течение 10 итераций. Такой подход обеспечивает баланс между чувствительностью к малым отклонениям и устойчивостью к сильным выбросам.

Настройка оказалась оправданной выбором только *Huber Regressor* для тонкой настройки: *Voting Regressor* уже обеспечивает ансамблевое усиление, углублённая оптимизация всех моделей была бы избыточной и ресурсоёмкой. При этом ключевой эффект достигается за счёт регуляризации наиболее чувствительного к выбросам компонента — именно *Huber* — без необходимости усложнять весь ансамбль.

Программная реализация методики оценки доступности коротковолновых (КВ) каналов связи выполнена на языке Python с использованием библиотек *Pandas*, *Scipy* и *Plotly*. Разработанный код обеспечивает загрузку и обработку данных о максимально применимой частоте (МПЧ) из файлов Excel и CSV, расчет оптимальной радиочастоты (ОРЧ) как 85 % от МПЧ, а также вычисление ключевых параметров канала: отношения сигнал/шум (*SNR*), вероятности битовой ошибки (*BER*) и доступности канала на основе порогового значения *BER* ($\leq 10^{-5}$). Для учета потерь сигнала реализованы модели свободного пространства и ионосферного поглощения, а также моделирование замираний с использованием распределения Рэлея. Библиотека *Pandas* применяется для управления временными рядами и их агрегации, *Scipy* — для вычислений, включая функцию ошибок (*erfc*) для расчета *BER*. Визуализация результатов осуществляется через тепловые карты и графики с помощью *Plotly*, что позволяет анализировать сезонные и суточные вариации отклонений. Сравнение реальных и прогнозных данных выполнено с использованием метрик *MAE* и *MSE*, обеспечивая количественную оценку точности модели *Comb_Voting_Huber_p-10_mae*. Программный код включает модульную структуру с функциями для обработки данных, расчета метрик и визуализации, что обеспечивает гибкость и воспроизводимость анализа.

Результаты экспериментов

Для прогнозирования максимально применимой частоты (МПЧ) и оценки доступности коротковолнового радиоканала связи на трассе о. Кипр — г. Йошкар-Ола (протяженность около 2700 км) были сформирован датасет, охватывающий период с 22 января по 31 декабря 2023 года. Данные собирались с использованием метода наклонного зондирования и программно-определяемых радиоприемников (SDR) с дискретизацией 5 минут, что соответствует 288 замерам в сутки. Общее количество отсчетов составило 99072 (344 дня \times 288 замеров) для полного года, из которых 98784 отсчета приходятся на указанный период.

Описанные расчеты применены для реального хода МПЧ и прогнозного для модели *Comb_Voting_Huber_p-10_mae*, сводный результат представлен в таблице 1.

Таблица 1. Сводные данные доступности по сезонам

Сезон	Реальный, %	Прогноз, %	Разница (прогн. – реал.)
Весна	92.47	92.03	–0.44
Лето	94.09	94.56	+0.47
Осень	92.45	92.63	+0.18
Зима	93.23	93.46	+0.23

Для каждого из сезонов была построена тепловая карта отклонения (разности) значений доступности канала связи по прогнозу МПЧ (модель Comb_Voting_Huber_p-10_mae) от доступности по реальному ходу МПЧ за различные сезоны.

Тепловая карта представляет собой графическое представление данных, где отдельные пороговые значения отклонения в матрице отображаются в виде цветов (ось OZ). На оси OX отображается дата, в момент которой были получены значения, на оси OY — время суток. Данный способ визуализации данных использует цвет для представления значения переменной. Использование данного метода особенно полезно для обнаружения закономерностей и тенденций в больших наборах данных, которые сложно увидеть, рассматривая просто массив чисел.

Тепловая карта доступности за весенний период (рис. 1) показывает, что по мере приближения к летнему периоду суточное окно, в котором сконцентрировано примерно 80 % периодов с отклонениями, отличными от 0, расширяется. Так, минимальное окно 01.03 начинается с 07:00, заканчивается в 15:00 и имеет длительность 8 часов. Максимальное окно в 24 часа наблюдается 31.05. Ночное время (с 22:00 до 6:00) характеризуется максимальным отклонением в 42 %, медианное значение отклонения — 0 %, а среднее — 4.2 %. Дневное время характеризуется максимальным отклонением в аналогичные 42 %, медианное значение отклонения — 8.3 %, а среднее — 8.7 %.

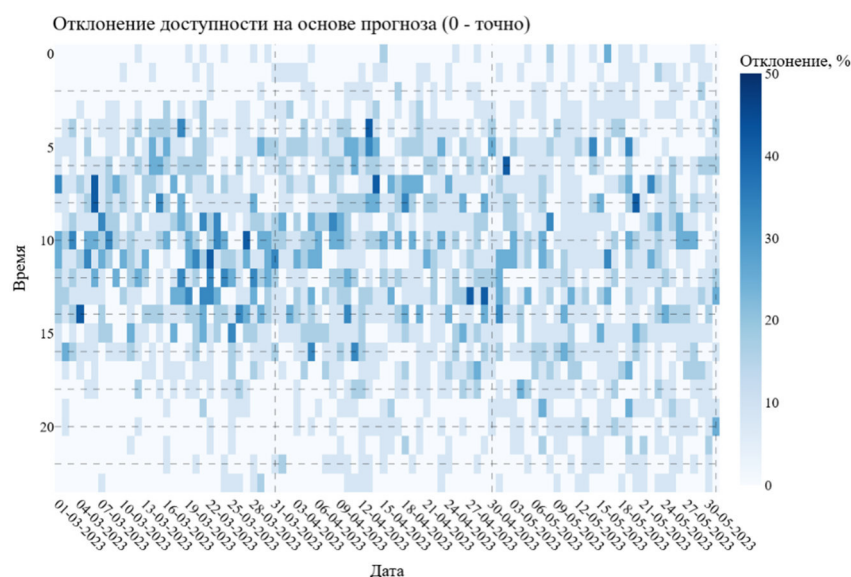


Рис. 1. Тепловая карта отклонения значений доступности канала связи по прогнозу МПЧ-модели Comb_Voting_Huber_p-10_mae от доступности по реальному ходу МПЧ за весенний период

Тепловая карта доступности за летний период (рис. 2) демонстрирует, что суточное окно отклонений идентично за весь сезон и составляет 24 часа. Ночное время (с 22:00 до 05:00) характеризуется максимальным отклонением в 41.67 %, медианным значением отклонения — 4.17 %, а средним — 5.09 %. Дневное время (с 06:00 до 21:00) характеризуется максимальным отклонением в 41.67 %, медианным значением отклонения — 8.33 %, а средним — 7.51 %.

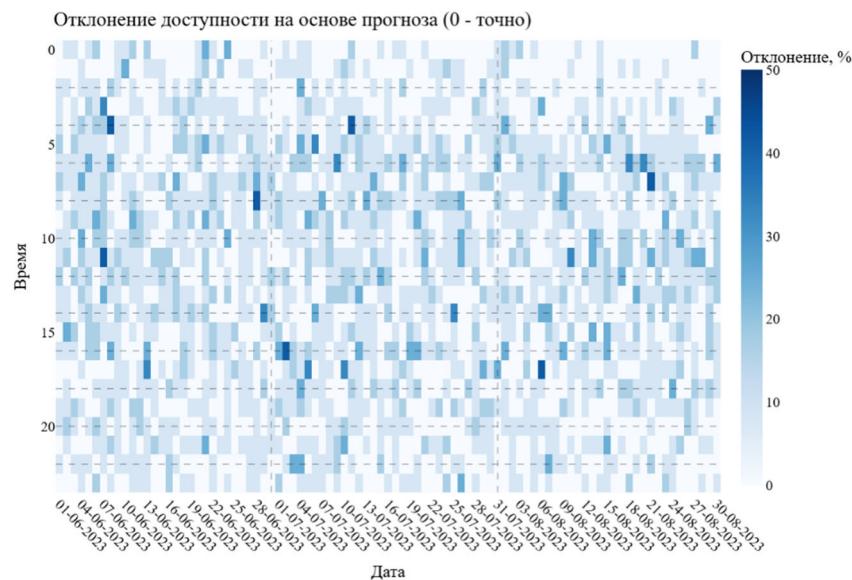


Рис. 2. Тепловая карта отклонения значений доступности канала связи по прогнозу МПЧ-модели Comb_Voting_Huber_p-10_mae от доступности по реальному ходу МПЧ за летний период

Тепловая карта доступности за осенний период (рис. 3) показывает, что суточное окно отклонений сужается с начала до конца сезона. Так, 01.09 – 05.09 начинается примерно с 01:00, заканчивается примерно в 19:00 и соответственно имеет длительность 18 часов. В конце сезона 28.11 – 30.11 начинается примерно с 05:00, заканчивается примерно в 15:00 и соответственно имеет длительность 10 часов. Ночное время характеризуется максимальным отклонением в 33.33 %, медианным значением отклонения — 0 %, а средним — 3.37 %. Дневное время характеризуется максимальным отклонением в 50 %, медианным значением отклонения — 8.33 %, а средним — 7.81 %.

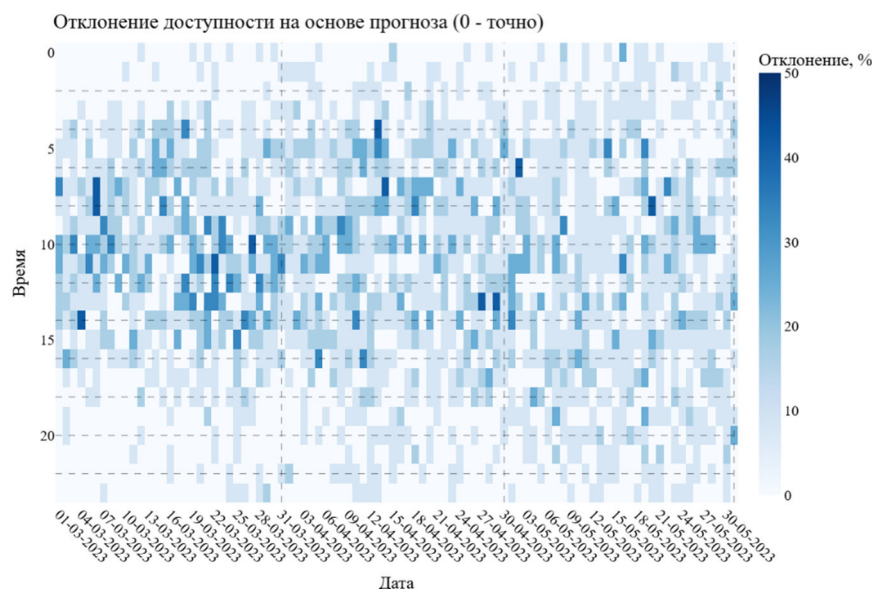


Рис. 3. Тепловая карта отклонения значений доступности канала связи по прогнозу МПЧ-модели Comb_Voting_Huber_p-10_mae от доступности по реальному ходу МПЧ за осенний период

Тепловая карта доступности за зимний период (рис. 4) демонстрирует самую стабильную ситуацию по сравнению с другими временами года. Суточное окно отклонений продолжает сужение примерно на 4 часа, с 15 в начале сезона до 7 в конце. Ночное время характеризуется максимальным отклонением в 25 %, медианным значением отклонения — 0 %, а средним — 2.43 %. Дневное время характеризуется максимальным отклонением в 50 %, медианным значением отклонения — 4.17 %, а средним — 7.03 %.

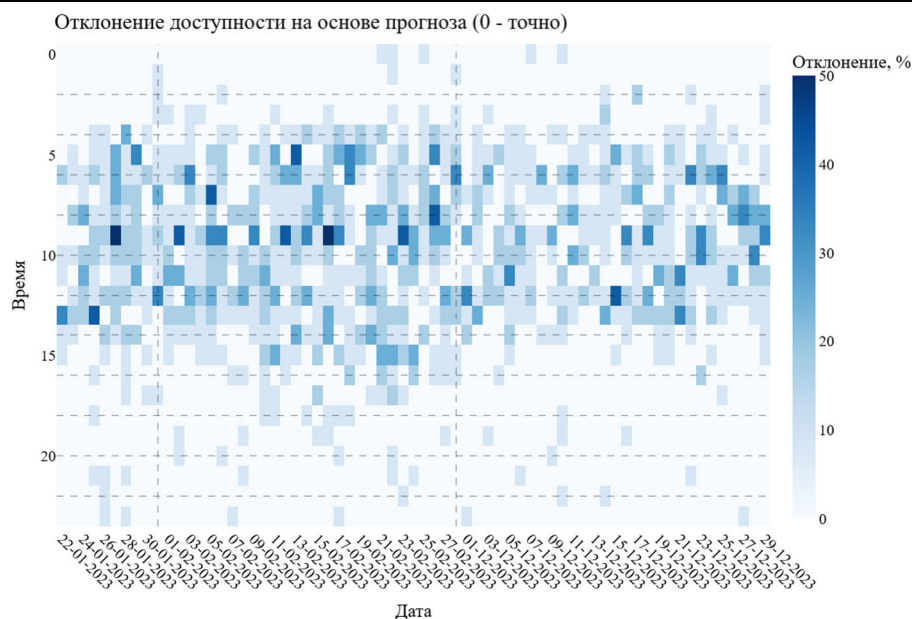


Рис. 4. Тепловая карта отклонения значений доступности канала связи по прогнозу МПЧ-модели Comb_Voting_Huber_p-10_mae от доступности по реальному ходу МПЧ за зимний период

Тепловая карта доступности за год (рис. 5) демонстрирует ярко выраженную годовую цикличность, где летний период характеризуется высокой изменчивостью с максимальным отклонением в 41.67 %, медианным значением 4.17 % в ночное и 8.33 % в дневное время, а средними значениями 5.09 % и 7.51 % соответственно. Зимний период демонстрирует наибольшую стабильность с максимальным отклонением в 25 % в ночное время и 50 % в дневное, медианным значением 0 % в ночное время и 4.17 % в дневное, а средними значениями 2.43 % и 7.03 % соответственно. Значения в ночные часы демонстрируют большую стабильность, чем значения в дневное время, что подтверждается более низкими медианными и средними значениями отклонений в ночной период по сравнению с дневным во всех сезонах.

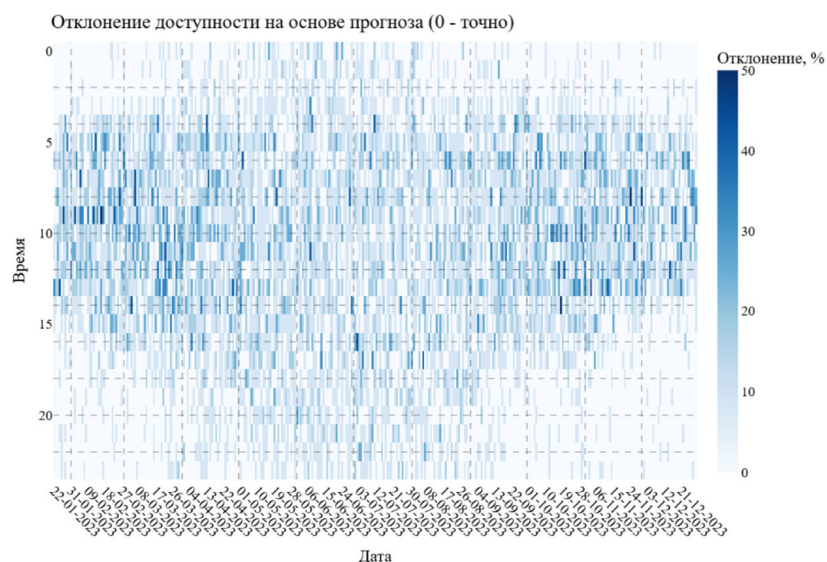


Рис. 5. Тепловая карта отклонения значений доступности канала связи по прогнозу МПЧ-модели Comb_Voting_Huber_p-10_mae от доступности по реальному ходу МПЧ за весь год

Сезонные различия в результатах обусловлены не только ионосферными процессами, но и внешними факторами, такими как геомагнитные возмущения и уровень солнечной активности. Летний период, с его высокой изменчивостью, отражает интенсивные ионосферные процессы, вызванные

максимальной солнечной активностью, что приводит к увеличению отклонений (максимум 41.67 % в ночное и дневное время) и расширению суточного окна. Зимний период, напротив, характеризуется низкой солнечной активностью, что снижает вариабельность ионосферных параметров и обеспечивает наибольшую стабильность прогнозов, особенно в ночное время (медиана – 0 %, среднее – 2.43 %). Осенний и весенний периоды представляют переходные состояния, где изменения солнечной активности вызывают сужение или расширение окна отклонений. Дневное время во всех сезонах демонстрирует более высокие отклонения (медиана – до 8.33 %, максимум до 50 % осенью и зимой), что связано с усилением ионосферных возмущений в дневные часы из-за солнечного излучения. Ночные часы, напротив, более стабильны, особенно зимой, когда минимальная ионизация снижает вероятность значительных отклонений.

Обсуждение результатов

По результатам анализа доступности канала по сезонам и за весь год прогнозный набор *MUF* демонстрирует очень близкие показатели к реальным измерениям. Весной (с марта по май) прогноз несколько занижил доступность: если реальный канал был доступен в 92.47 % времени, то прогнозный — в 92.03 %, то есть отставание всего на 0.44 %. Летом ситуация обратная: реальная доступность составила 94.09 %, а прогноз поднялся до 94.56 % – превышение на 0.47 %. Осенью (сентябрь-ноябрь) прогноз оказался выше, чем реальные данные, на 0.18 % (92.63 % против 92.45 %). За год реальная доступность составила 93.23 %, а прогнозная — 93.46 %, что говорит о небольшом положительном смещении прогнозной модели на 0.23 %.

Средний скорректированный *SNR* по реальным данным составил 11.79 дБ, а по прогнозным — 11.73 дБ, разница 0.06 дБ, что находится в пределах погрешности измерений и моделирования. Тем не менее среднеквадратичная ошибка прогноза *SNR* достигает примерно 4.18 дБ, что указывает на редкие, но заметные отклонения на отдельных временных отрезках.

BER оказалась на одинаково низком уровне: в среднем $2.76 \cdot 10^{-4}$ как для реального, так и для прогнозных каналов. Средняя абсолютная ошибка прогноза по *BER* не превышает $5 \cdot 10^{-4}$.

Прогноз МПЧ позволяет воспроизвести основные характеристики *HF*-канала — доступность, *SNR* и *BER* — с точностью, достаточной для практического применения. Прогнозная модель чуть завышает доступность летом и осенью, занижает ее весной, но в масштабах года наблюдается стабильность и среднегодовая доступность выше 93%.

Выводы и заключение

Была проведена оценка доступности коротковолнового радиоканала связи между о. Кипр и г. Йошкар-Ола с использованием модели машинного обучения *Comb_Voting_Huber_p-10_mae*, основанной на прогнозировании параметра максимально применимой частоты (МПЧ). Для достижения поставленной цели были выполнены следующие задачи: разработана методика оценки доступности коротковолнового радиоканала с использованием реальных и прогнозных значений МПЧ, реализована программная платформа на языке Python с применением библиотек *Pandas* и *Scipy* для обработки данных и анализа, проведен эксперимент по оценке доступности канала связи, а также выполнен детальный анализ полученных результатов с учетом сезонных и суточных вариаций.

Анализ результатов показал, что прогноз МПЧ, выполненный с помощью модели *Comb_Voting_Huber_p-10_mae*, позволяет воспроизвести ключевые характеристики коротковолнового радиоканала — доступность, отношение сигнал/шум (*SNR*) и вероятность битовой ошибки (*BER*) — с высокой точностью, достаточной для практического применения в адаптивных системах радиосвязи. Для весеннего сезона прогнозная доступность радиоканала составила 92.03 % против реальной — 92.47 % (разница –0.44 %), для летнего сезона — 94.56 % против 94.09 % (разница +0.47 %), для осеннего сезона — 92.63 % против 92.45 % (разница +0.18 %), а для зимнего сезона — 93.46 % против 93.23 % (разница +0.23 %). Среднегодовая прогнозная доступность достигла 93.46 %, что лишь на 0.23 % выше реального значения 93.23 %, это свидетельствует о высокой стабильности модели в годовом масштабе.

Прогнозная модель демонстрирует тенденцию к небольшому завышению доступности в летний и осенний периоды, что связано с повышенной ионосферной активностью и сложностью учета всех факторов, таких как геомагнитные возмущения. Весной модель слегка занижает доступность, что обусловлено переходным характером ионосферных условий в этот период. Средний скорректированный SNR составил 11.73 дБ для прогнозных данных против 11.79 дБ для реальных, с разницей всего 0.06 дБ, что находится в пределах погрешности измерений. Среднеквадратичная ошибка прогноза SNR составила 4.18 дБ, указывая на редкие, но заметные отклонения в отдельных временных интервалах, вызванные случайными ионосферными возмущениями. Вероятность битовой ошибки (BER) для прогнозных и реальных данных оказалась идентичной на уровне $2.76 \cdot 10^{-4}$, а средняя абсолютная ошибка прогноза BER не превысила $5 \cdot 10^{-4}$, что подтверждает высокую точность модели в воспроизведении характеристик канала.

Тепловые карты отклонений, построенные для каждого сезона, выявили четкую сезонную динамику. Весной суточное окно отклонений расширяется с 8 до 24 часов, что связано с увеличением солнечной активности. Летом окно стабильно составляет 24 часа, отражая высокую изменчивость ионосферных условий. Осенью и зимой наблюдается сужение окна (с 18 до 10 часов осенью и с 15 до 7 часов зимой), что соответствует снижению солнечной активности и повышению стабильности ионосферы. Ночные часы во всех сезонах демонстрируют меньшие отклонения (медиана 0 % в весне, осени и зиме, 4.17 % летом), по сравнению с дневными (медиана до 8.33 %), что объясняется меньшей ионосферной турбулентностью в ночное время. Максимальные отклонения достигают 50 % в дневное время осенью и зимой, что указывает на влияние дневных ионосферных возмущений.

Полученные результаты подтверждают эффективность применения ансамблевой модели Comb_Voting_Huber_p-10_mae для прогнозирования МПЧ и оценки доступности коротковолнового радиоканала. Высокая точность прогнозов (отклонение менее 0.5 %) и способность модели адаптироваться к сезонным и суточным вариациям ионосферных условий делают ее перспективным инструментом для реализации адаптивных систем радиосвязи, способных минимизировать воздействие помех, замираний и многолучевого распространения. Дальнейшие исследования могут быть направлены на учет дополнительных геофизических параметров, таких как индексы солнечной активности, для дальнейшего повышения точности прогнозов в условиях высокой ионосферной нестабильности.

Источник финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант (Теория, методы и средства сенсорной диагностики доступности каналов когнитивной КВ радиосвязи с учетом частотно-временной дисперсии, канальных помех и с применением технологий программно-конфигурируемых радиосистем и анализом больших данных, № 24-29-00442).

Список литературы

1. Рябова Н. В., Конкин Н. А., Елчанинова А. С. Разработка методики прогнозирования максимальной применимой частоты ионосферных КВ радиолиний на основе синтеза нейросети // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2024. Т. 7, № 4. С. 691-705.
2. Елчанинова А. С., Конкин Н. А., Чернов А. А. Исследование нейронной сети типа LSTM с целью прогнозирования параметров трансionoсферного радиоканала // VI Научный форум «Телекоммуникации: теория и технологии» ТТТ-2023 : материалы XXV Международной научно-технической конференции, Казань, 22–24 ноября 2023 года. Казань: Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, 2023. С. 129-131.
3. Рябова Н. В., Конкин Н. А., Вершинин М. В. Восстановление временного хода ПЭС с использованием методов машинного обучения // Распространение радиоволн : сборник докладов I Всероссийской молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти Д. С. Лукина, Йошкар-Ола, 11–14 ноября 2024 года. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2024. С. 113-117.
4. Шаптала В. С. Моделирование системы цифровой коротковолновой радиосвязи // Техника средств связи. 2019. № 2(146). С. 154-156.