

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА ВЫБОР РАБОЧИХ ЧАСТОТ РАДИОЛИНИЙ КВ-ДИАПАЗОНА

Велигоша А. В.¹, Третьяков Е. А.², Юрков В. В.³

DOI:10.21681/3034-4050-2026-5-91-99

Ключевые слова: ионосферные возмущения, распространение радиоволн, выбор рабочих частот, мониторинг ионосферы, адаптивное частотное планирование.

Аннотация

Цель исследования: обоснование направлений повышения устойчивости КВ радиосвязи за счёт адаптивного частотного планирования на основе данных аппаратно-программных средств мониторинга ионосферы.

Метод исследования: комплексный анализ, обобщение эмпирических данных и результатов математического моделирования распространения КВ-радиоволн в лучевом приближении с учётом фоновой и возмущающей составляющих электронной концентрации.

Результаты исследования: внешние факторы вызывают значительные отклонения ионосферных параметров: в периоды геомагнитных возмущений максимально применимая частота может снижаться на 25...50 %, поглощение радиоволн возрастает на 20...40 дБ и более, усиливается многолучёвость и глубина замираний. Выявлены закономерности сезонно-суточных и географических вариаций электронной концентрации. Обоснована необходимость перехода от статистических и прогностических методов к адаптивным и когнитивным системам частотного планирования, интегрирующим данные оперативного мониторинга ионосферы в системах специальной связи.

Практическая ценность заключается в систематизации количественных оценок влияния комплекса внешних факторов на выбор рабочих частот радиоприёмных КВ-диапазона с позиций обеспечения устойчивости связи, а также в обосновании перспектив применения аппаратно-программных комплексов мониторинга ионосферы для реализации гибридных адаптивных систем частотного планирования, сочетающих прогностические модели, данные реального времени и алгоритмы машинного обучения.

Введение

Ионосфера представляет собой динамичную и подверженную возмущениям среду. Солнечная активность, геомагнитные бури и другие внешние факторы вызывают значительные отклонения от спокойного состояния, что приводит к ухудшению или полному нарушению условий распространения коротких радиоволн. Ионосферные возмущения проявляются в резком изменении электронной концентрации, увеличении поглощения радиосигналов, усилении влияния многолучевости и росте глубины замираний сигнала, что непосредственно влияет на выбор рабочих частот радиоприёмных.

Актуальность исследования определяется возрастающими требованиями к надёжности и непрерывности радиосвязи в условиях солнечной активности и геомагнитных возмущений, а также необходимостью учёта этих факторов при частотном планировании. Понимание механизмов воздействия ионосферных аномалий необходимо для научного обоснования технических решений по адаптивному управлению частотным ресурсом и оперативному мониторингу каналов КВ-диапазона с целью обеспечения устойчивой связи.

Влияние солнечной активности и геомагнитных факторов на состояние ионосферы

Состояние ионосферы определяется совокупностью внешних воздействий, среди которых определяющую роль играют процессы солнечной активности. Само существование ионосферы обусловлено ионизирующим излучением Солнца в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах, а также корпускулярными потоками солнечного вещества [8]. Изменения интенсивности этих факторов приводят к вариациям электронной концентрации, что непосредственно сказывается на условиях распространения КВ-радиоволн и, следовательно, на выборе рабочих частот радиоприёмных.

Периодичностью, определяющей состояние ионосферы, является 11-летний цикл солнечной активности. В течение этого цикла изменяется относительное число солнечных пятен или число Вольфа, потоки радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см (индекс F10.7) и интенсивность экстремального ультрафиолетового излучения. Эти изменения приводят к соответствующим вариациям критических частот ионосферных слоёв.

¹ Велигоша Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры № 52 филиала военной академии им. Петра Великого. Серпухов, Россия. E-mail: Aveligosha@mail.ru

² Третьяков Евгений Александрович, адъюнкт филиала военной академии им. Петра Великого. Серпухов, Россия. E-mail: 2923201@mail.ru

³ Юрков Владислав Владимирович, курсант филиала военной академии им. Петра Великого. Серпухов, Россия. E-mail: Uikav@bk.ru

Связь между критическими частотами регулярных ионосферных слоёв и числом Вольфа имеет линейный характер, что позволяет прогнозировать изменения ионосферных параметров в зависимости от фаз 11-летнего цикла [8]. Например, для критической частоты слоя E установлена практически полная корреляция с изменениями числа солнечных пятен – как в межгодовых вариациях, в ходе отдельных циклов и в долгих трендах между циклами [3]. Более того, замена чисел Вольфа на поток экстремального ультрафиолетового излучения (EUV), непосредственно ответственного за ионизацию слоя E, даёт практически идентичные результаты [3]. Это подтверждает, что основным источником долгопериодических изменений ионосферных параметров является вариация солнечного излучения, а не антропогенные факторы [7].

Таким образом, 11-летний цикл создаёт макроскопический фон, определяющий базовые значения максимальных применимых частот для каждой трассы. Солнечные вспышки представляют собой эпизодические взрывные выделения энергии в атмосфере Солнца, сопровождающиеся мощным электромагнитным излучением в широком диапазоне.

По характеру воздействия на ионосферу геофизические явления, связанные с солнечными вспышками, принято разделять на три группы.

Первая группа – явления, наступающие практически одновременно со вспышкой (разница во времени не превышает получаса). Они обусловлены повышением ультрафиолетовой и рентгеновской радиации Солнца во время вспышки. Типичным примером служит внезапное увеличение поглощения радиоволн в ионосфере (SWF – Short Wave Fadeout) на дневной стороне Земли, вызванное дополнительной ионизацией нижних слоёв ионосферы. Вероятность возникновения таких возмущений коррелирует с интенсивностью сопровождающего вспышку всплеска радиоизлучения: 67 % всплесков с мощными всплесками (интенсивность более чем в 10 раз выше среднего уровня) связаны с ионосферными возмущениями, тогда как для слабых всплесков этот показатель составляет лишь 17 %. Для слоя F2 также прослеживается связь между поведением критической частоты и интенсивными солнечными вспышками [10].

Вторая группа – явления, запаздывающие по отношению к началу вспышки на сутки и более и вызываемые корпускулярными потоками солнечного вещества – плазменными облаками, движущимися от Солнца к Земле со скоростями порядка 10^3 км/с [8]. К числу таких явлений относятся корональные выбросы массы (CME –

Coronal Mass Ejection). При достижении Земли эти потоки взаимодействуют с магнитосферой, вызывая геомагнитные бури и перераспределение плазмы в ионосфере [2]. Отклик ионосферы на CME может быть неодинаков на разных высотных уровнях: слои F2, E и спорадический слой Es демонстрируют различную реакцию на мощные проявления солнечной активности.

Третья группа – явления, связанные с воздействием на ионосферу высокоскоростных потоков солнечного ветра (HSS – High Speed Streams), истекающих из корональных дыр. В отличие от CME, представляющих собой эпизодические выбросы, высокоскоростные потоки могут существовать продолжительное время (несколько оборотов Солнца) и создают повторяющиеся возмущения с периодом, близким к 27 суткам (период вращения Солнца). Эти потоки также вызывают геомагнитные возмущения, однако характер их воздействия на ионосферу может отличаться от эффектов, обусловленных CME, что проявляется в различиях временных профилей изменения критических частот и степени поглощения радиосигнала.

Для количественной оценки уровня солнечной и геомагнитной активности применяется система индексов и параметров: солнечные и геомагнитные индексы.

Солнечные индексы:

- SSN (Sun Spot Number) – число Вольфа, характеризующее количество солнечных пятен;
- F10.7 – поток солнечного радиоизлучения на длине волны 10,7 см.

Геомагнитные индексы:

- Kp – планетарный трёхчасовой индекс геомагнитной активности, отражающий глобальные возмущения магнитного поля Земли. Согласно исследованиям, индекс Kp демонстрирует наиболее сильную стандартизованную связь с ионосферными возмущениями по сравнению с другими геомагнитными индексами [4];
- Dst (Disturbance Storm Time) – индекс, характеризующий интенсивность кольцевого тока во время магнитных бурь. Отрицательные значения Dst указывают на усиление тока, связанного с вторжением плазмы в магнитосферу;
- AE (Auroral Electrojet) – индекс, отражающий активность авроральных электроструй в полярных областях.

Спектральные исследования показывают, что периодичности в геомагнитных индексах отражают не только солнечные циклы (например, период 27 суток, соответствующий вращению

Солнца), но и месячные, сезонные и годовые циклы Земли. Это указывает на сложную модуляцию солнечных сигналов геофизическими факторами. В годы максимума солнечной активности, например, спектральный пик B_z -компоненты межпланетного магнитного поля с периодом 26,41 суток смещается в спектрах Dst , K_p и A_E к 27,76...27,86 суток [5].

Комплексное воздействие перечисленных геофизических детерминант определяет необходимость учёта как долгопериодных (11-летний цикл, сезонные вариации), так и спорадических (вспышки, СМЕ, геомагнитные бури) факторов при выборе рабочих частот КВ-радиолиний. Долгопериодные изменения задают базовый уровень МПЧ для каждой трассы, тогда как спорадические возмущения требуют оперативной коррекции частотного плана. Прогнозирование ионосферного состояния по данным о солнечной активности, включая индексы SSN , $F_{10.7}$, K_p и Dst , составляет основу современных систем адаптивного управления частотным ресурсом КВ-диапазона.

Регулярные сезонно-суточные и географические вариации параметров ионосферы

Состояние ионосферы подвержено регулярным изменениям, связанным с движением Земли вокруг Солнца и её вращением вокруг собственной оси. Эти изменения, в отличие от спорадических возмущений, имеют детерминированный характер и могут быть предсказаны с высокой степенью достоверности. Тем не менее их учёт важен при выборе рабочих частот КВ-радиолиний, поскольку сезонные и суточные вариации электронной концентрации могут приводить к изменению максимальных применимых частот в несколько раз [1].

Суточный ход электронной концентрации в ионосфере определяется прежде всего изменением зенитного угла Солнца в течение дня. С восходом Солнца начинается ионизация верхней атмосферы, и электронная концентрация в слоях D , E и F_1 возрастает, достигая максимума в околополуденные часы.

Критическая частота слоя F_2 (f_oF_2) в средних широтах достигает максимума не в полдень, а в послеполуденные часы. Это явление связано с динамическими процессами в термосфере, в частности с вертикальными дрейфами плазмы под действием электромагнитных сил и нейтральных ветров [3]. Минимальные значения f_oF_2 наблюдаются в предрассветные часы, когда ионизация минимальна, а рекомбинация достигла наибольшего уровня.

Полное электронное содержание (ПЭС) также демонстрирует отчётливый суточный ход, который может быть описан несколькими главными эмпирическими модами, отражающими суточные вариации на различных широтах и долготах [4]. Наибольшие значения ПЭС наблюдаются в послеполуденные часы, наименьшие – в предрассветные.

На средних широтах северного полушария наблюдаются две основные сезонные закономерности, отклоняющиеся от простой модели Чепмена, согласно которой электронная концентрация должна быть максимальной в летние месяцы [9].

Зимняя аномалия заключается в превышении зимних дневных значений электронной концентрации в максимуме F_2 -слоя над летними при одинаковом уровне солнечной активности. Это явление наиболее ярко выражено на средних широтах северного полушария в дневные часы. При этом зимнее превышение f_oF_2 сопровождается пониженным значением высоты максимума h_mF_2 .

Причиной зимней аномалии служат сезонные изменения нейтрального состава термосферы. Отношение концентраций атомарного кислорода и молекулярного азота зимой оказывается больше, чем летом [5]. Поскольку атомарный кислород является основным источником ионов O^+ в F_2 -слое, а молекулярный азот – главным агентом потерь, увеличение этого отношения приводит к росту равновесной электронной концентрации, несмотря на меньший уровень ионизации в зимний период.

Декабрьская аномалия представляет собой частный случай зимней аномалии, при котором аномально высокие значения электронной концентрации наблюдаются в ноябре–январе [10]. Этот эффект усиливает сезонную аномалию в северном полушарии.

Эмпирические данные показывают, что интенсивность зимней аномалии зависит от уровня солнечной активности. При возрастании солнечной активности наблюдается увеличение как f_oF_2 , так и h_mF_2 в течение всего времени суток, однако рост f_oF_2 в зимнее дневное время особенно заметен. Поэтому эффект зимней аномалии в абсолютных значениях более выражен при высокой солнечной активности, хотя в относительных величинах может преобладать при меньшей активности.

Высотная протяжённость зимней аномалии ограничена интервалом 180...450 км, то есть сосредоточена вблизи высоты максимума F_2 -слоя. На более низких и более высоких высотах сезонные вариации электронной концентрации

могут иметь противоположный знак или не проявляться вовсе. В полном электронном содержании зимняя аномалия также наблюдается, однако её пространственное распределение зависит от долготного сектора и уровня солнечной активности [5].

Ионосферные параметры демонстрируют существенные географические различия. Наряду с широтными градиентами, обусловленными изменением зенитного угла Солнца и геомагнитной конфигурации, наблюдаются отчётливые долготные вариации. Так, интенсивность зимней аномалии в ПЭС в Азиатском регионе выше, чем в Европейском, что связывают с соответствующими долготными вариациями отношения $n(O) / n(N_2)$ [5]. В Североамериканском секторе на проявление зимней аномалии дополнительно влияют магнитосферные процессы.

Между широтным положением трассы и характером сезонно-суточных вариаций также существует тесная связь. На экваториальных широтах преобладает экваториальная аномалия – образование двух максимумов электронной концентрации по обе стороны от геомагнитного экватора, связанное с действием динамо-электрических полей. В полярных широтах значительную роль играют процессы вторжения энергичных частиц, магнитосферно-ионосферного взаимодействия и возмущённые динамо-поля.

Регулярные сезонно-суточные вариации ионосферных параметров задают основу для частотного планирования КВ-радиолиний. Суточные изменения f_oF2 обуславливают необходимость перехода на более высокие частоты в дневное время и на более низкие – в ночное. Сезонные изменения требуют коррекции рабочих частот в течение года: летом, несмотря на более высокий уровень ионизации в нижних слоях (что увеличивает поглощение), МПЧ могут быть ниже, чем зимой из-за эффектов зимней аномалии и изменения нейтрального состава.

Географические вариации необходимо учитывать при проектировании радиолиний различной протяжённости и ориентации. Широтное положение трассы определяет характер суточных вариаций, а долготные эффекты могут приводить к различиям в условиях распространения даже на одинаковых широтах.

Ионосферные возмущения и их влияние на распространение КВ-радиоволн

Ионосферные возмущения представляют собой отклонения параметров ионосферы от значений в её спокойном состоянии, обусловленные внешними воздействиями различной

природы. Эти отклонения могут носить как регулярный, так и спорадический характер. В условиях возмущённой ионосферы условия распространения коротких радиоволн претерпевают существенные изменения, что непосредственно сказывается на выборе рабочих частот и надёжности КВ-радиолиний.

Влияние ионосферных возмущений на короткие волны реализуется через несколько физических механизмов. Изменение условий отражения. Максимальная применимая частота связана с критической частотой слоя F2 соотношением (1):

$$f_{МПЧ} = \frac{f_{кр}F2}{\sin(\Delta)}, \quad (1)$$

где Δ – угол падения волны на слой. При возмущениях электронной концентрации изменяется $f_{кр}F2$, что ведёт к изменению МПЧ. В периоды геомагнитных бурь отклонения $f_{кр}F2$ от средних значений могут достигать 30...50 % на средних широтах и более 50 % в полярных областях. На радиолиниях, работающих на частотах, близких к МПЧ, связь полностью отсутствует, а частоты, рассчитанные для спокойных условий, оказываются непригодными [2].

Поглощение радиоволн в ионосфере определяется в основном слоем D и нижней частью слоя E и описывается выражением (2):

$$A = \int_0^L \frac{N(z)v(z)}{\omega^2 + \nu^2(z)} dz, \quad (2)$$

где A – интегральное поглощение; $N(z)$ – электронная концентрация на высоте; $\nu(z)$ – эффективная частота соударений электронов; ω – круговая частота радиоволны; ω_H – гирочастота электрона; L – протяжённость трассы в ионосфере.

При внезапных ионосферных возмущениях, вызванных солнечной активностью, электронная концентрация в слое D возрастает на 1...2 порядка, что приводит к резкому увеличению неогерентного поглощения. В результате сигналы, уверенно проходившие в спокойных условиях, могут ослабевать на 20...40 дБ и более [5].

При ионосферных возмущениях изменяется высотный профиль электронной концентрации, что ведёт к увеличению числа лучей, приходящих в точку приёма. Каждый луч имеет разное время запаздывания и различный доплеровский сдвиг. В результате сигнал на входе приёмника представляет собой суперпозицию многих лучей, что проявляется в частотной селективности канала и межсимвольной интерференции в цифровых системах. Доплеровский сдвиг может возрастать в периоды возмущений до нескольких герц, а разброс времён запаздывания – до нескольких миллисекунд [2].

При прохождении через возмущённую ионосферу, содержащую неоднородности, происходит перераспределение энергии между обыкновенной и необыкновенной компонентами волны, а также изменение эллиптичности поляризации. Это может приводить к дополнительным потерям при приёме, так как приемные антенны, рассчитаны на приём сигнала с определённой поляризацией.

Воздействие ионосферных возмущений на распространение радиоволн существенно различается в зависимости от широтного положения трассы.

Полярные широты характеризуются наибольшей уязвимостью к геомагнитным возмущениям. Здесь сильное влияние оказывают вторжения энергичных заряженных частиц, приводящие к резкому возрастанию поглощения (так называемое полярное поглощение) и деградации отражающих свойств F-слоя. В периоды сильных геомагнитных бурь связь через полярные области может быть полностью невозможна в течение нескольких часов или суток. При этом наблюдаются значительные горизонтальные градиенты электронной концентрации, что приводит к изменению направления распространения волн (рефракционные эффекты) [5].

Средние широты также подвержены влиянию геомагнитных возмущений, хотя и в меньшей степени. Здесь наиболее заметны изменения критической частоты F2-слоя и высоты максимума ионизации. Помимо широтных, существенны долготные эффекты, что приводит к различным условиям на трассах одинаковой широты, но разных долгот. В периоды возмущений связь на трассах средних широт может сохраняться, однако требуется оперативная коррекция рабочих частот.

Экваториальные широты демонстрируют иной характер возмущений. Здесь наблюдается экваториальная аномалия – образование двух максимумов электронной концентрации по обе стороны от геомагнитного экватора. При возмущениях эта аномалия может усиливаться или ослабевать, что влияет на условия распространения вдоль и поперёк экваториальной зоны. Дополнительным фактором является наличие экваториальных спорадических слоёв Es, которые могут отражать сигналы на необычно высоких частотах.

Ионосферные возмущения требуют принципиально иного подхода к выбору рабочих частот по сравнению со спокойными условиями. В периоды возмущений прогнозируемые значения МПЧ, рассчитанные по стандартным моделям, могут давать значительные ошибки. Это требует

использования данных оперативного мониторинга ионосферы – ионозондов, наклонного зондирования. При выборе резервных частот целесообразно учитывать наличие альтернативных трасс, проходящих через разные широтные зоны. Кроме того, при расчёте энергетики радиолиний в периоды возмущений необходимо закладывать дополнительные запасы по мощности, чтобы компенсировать возросшее поглощение, особенно на нижних частотах КВ-диапазона, где поглощение максимально. Одним из оптимальных методов борьбы с этими поглощениями является переход на более высокие частоты, где поглощение существенно ниже.

Математическое моделирование распространения КВ-радиоволн в ионосфере

Для количественного прогнозирования условий распространения КВ-радиоволн и обоснованного выбора рабочих частот применяются математические модели, учитывающие состояние ионосферы вдоль трассы.

В основе большинства моделей лежит лучевое приближение геометрической оптики. Распространение волны в ионосферной плазме описывается через показатель преломления, который для изотропного приближения (без учёта геомагнитного поля) имеет вид:

$$n = \frac{\sqrt{1 - (80,8 \cdot N_e)}}{f^2}, \quad (3)$$

где N_e – электронная концентрация, м^{-3} ; f – рабочая частота, Гц.

Для учёта ионосферных возмущений в модели электронная концентрация представляется как сумма фоновой и возмущающей составляющих [9]:

$$N_e(r) = N_e 0(r) + \delta N_e(r), \quad (4)$$

Фоновое распределение $N_e 0$ может быть получено из эмпирических моделей или экспериментальных данных. Возмущающая компонента δN_e описывает отклонения, вызванные солнечными вспышками, геомагнитными бурями или перемещающимися ионосферными возмущениями. Пространственная структура возмущений может быть задана в виде гармонических неоднородностей с характерными масштабами, определяемыми природой возмущающего фактора.

На основе решения лучевых уравнений для заданной трассы рассчитываются основные параметры КВ-канала: максимальная применимая частота, групповое время запаздывания сигнала, наличие многолучевости и доплеровские искажения.

На рисунке 1 представлен суточный ход МПЧ для трассы средней широты ($45...55^\circ$ с.ш., расстояние 2500 км) в спокойных и возмущённых условиях, рассчитанный с использованием лучевой модели распространения КВ-радиоволн, а также приведены оптимальные рабочие частоты (ОРЧ), составляющие 85 % от МПЧ, которые рекомендуется использовать для обеспечения надёжной коротковолновой связи.

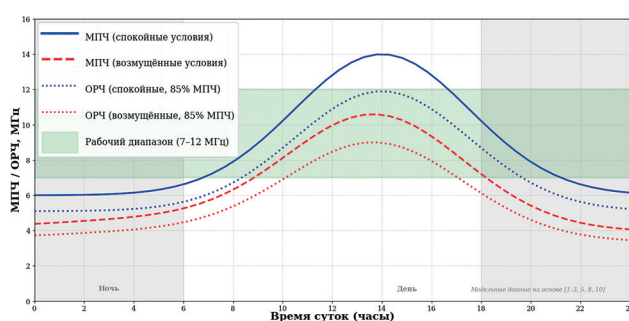


Рис. 1. Суточный ход максимальной применимой частоты для трассы средней широты в спокойных и возмущённых условиях

Из рисунка 1 видно, что в периоды геомагнитных возмущений МПЧ может снижаться на 25...35 %, особенно в утренние часы, что сужает доступный частотный диапазон и требует оперативной коррекции рабочих частот.

Сравнение результатов моделирования с данными наклонного зондирования позволяет верифицировать модель и уточнять прогнозы для конкретных трасс. Практическое применение таких моделей заключается в возможности прогнозирования доступности частотных каналов в условиях возмущённой ионосферы и выработки рекомендаций по адаптивному выбору рабочих частот.

Методы и подходы к выбору рабочих частот радиотрасс КВ-диапазона

Выбор оптимальной рабочей частоты является одной из центральных задач при организации КВ-радиотрасс. От правильности этого выбора зависит не только качество и надёжность связи, но и сама возможность установления канала в конкретных ионосферных условиях [8]. В зависимости от решаемых задач, доступных средств и уровня автоматизации сложились различные подходы к частотному планированию, которые можно классифицировать по степени учёта динамики изменения состояния ионосферы и оперативности принятия решений.

Физические механизмы и математические модели распространения КВ-радиоволн в ионосфере служат основой для решения практической

задачи — обоснованного выбора рабочих частот радиотрасс. Исторически первыми и наиболее распространёнными являются методы, основанные на статистических моделях ионосферы и долговременных прогнозах. Эти подходы используют заранее рассчитанные таблицы и карты, содержащие среднемесячные значения критических частот и максимальных применимых частот для различных трасс и сезонов [11].

В основе таких методов лежат эмпирические модели, которые базируются на многолетних данных ионосферных станций. Для расчёта МПЧ используются статистические распределения f_oF_2 , привязанные к солнечным индексам SSN и F10.7, а также к широтно-долготным координатам трассы.

Простота реализации и отсутствие необходимости в специализированной аппаратуре мониторинга делают статистические методы удобным инструментом для заблаговременного планирования частотных сеток. Они применимы для широкого круга трасс и обеспечивают приемлемую точность в спокойных ионосферных условиях. Однако в периоды геомагнитных возмущений ошибки прогноза МПЧ могут достигать 30...50 % от реальных значений, поскольку статистические модели не учитывают спорадические явления и локальные особенности состояния ионосферы вдоль конкретной трассы. Кроме того, традиционный подход к выбору рабочей частоты в диапазоне 0,8...0,9 от МПЧ, рекомендованный для обеспечения надёжности отражения не ниже 90 % [3], не позволяет в полной мере контролировать многолучевость, что ухудшает частотно-временные характеристики канала.

Дальнейшим развитием статистических подходов стали методы, использующие современные физические и эмпирические модели ионосферы. В отличие от табличных методов, эти модели позволяют рассчитывать пространственно-временное распределение электронной концентрации с учётом текущих значений солнечной активности, геомагнитных индексов и сезонно-суточных вариаций.

Прогностические методы базируются на решении лучевых уравнений для заданной трассы с использованием модели электронной концентрации, которые обеспечивают более высокую точность по сравнению со статистическими, поскольку учитывают динамику ионосферы через модельные расчёты. Они позволяют получать прогнозы с различной временной дискретностью. Вместе с тем точность таких методов ограничена в условиях сильных возмущений, особенно в высоких широтах, где модели могут

давать значительные ошибки при отсутствии актуальных входных данных об ионосферном состоянии.

Наиболее точными и оперативными являются адаптивные методы, использующие данные реального времени о состоянии ионосферы вдоль трассы. Эти подходы базируются на сети средств ионосферного зондирования: вертикального (ВЗ), наклонного (НЗ) и возвратно-наклонного (ВНЗ) зондирования, а также на приёме сигналов от радиомаяков и спутниковых навигационных систем.

Принцип действия адаптивных систем заключается в циклическом зондировании рабочих и резервных частотных каналов, измерении их качества (отношение сигнал/шум, битовая ошибка, уровень помех) и выборе наилучшего канала для связи. В системах с обратной связью информация о качестве канала передаётся от приёмной стороны к передающей, что позволяет динамически корректировать рабочую частоту. Примером реализации адаптивного подхода является метод BAFS (Burst Adaptive Frequency Selection), при котором зондирование каналов осуществляется короткими импульсными сигналами, а выбор частоты происходит на основе измерений в реальном времени без разрыва основного канала связи.

Адаптивные методы обеспечивают высокую точность в реальных ионосферных условиях, включая периоды возмущений, и позволяют автоматизировать процесс выбора частоты. Их применение особенно эффективно в условиях, когда ошибки прогноза становятся недопустимыми. Вместе с тем такие системы требуют развёртывания аппаратуры зондирования, организации каналов обратной связи, что усложняет их реализацию на мобильных и маломощных платформах.

Как показывают исследования, при нормальном уровне диффузности ионосферы значение параметра Райса может изменяться в широких пределах (от 0,2 до 100), что существенно зависит от выбора рабочей частоты относительно МПЧ. При сильной диффузности ионосферы, характерной для возмущённых условий, замирания в диапазоне отношений $f_o / f_{МПЧ}$ от 1 до 0,4 приближаются к релеевским [12].

Современным направлением в области выбора рабочих частот являются когнитивные подходы, использующие алгоритмы машинного обучения и искусственного интеллекта. Эти методы объединяют принципы адаптивного частотного выбора с возможностью самообучения системы на основе накопленного опыта и анализа широкого спектра факторов [12].

Когнитивные системы КВ-связи способны непрерывно анализировать всю полосу КВ-диапазона, выявлять закономерности распространения сигналов и источников помех, и на основе этого прогнозируют оптимальные частоты для установления связи [4]. Применение нейросетевых алгоритмов, статистического обучения и методов подкрепления позволяет значительно повысить точность прогноза и адаптироваться к изменяющимся условиям быстрее, чем традиционные системы [6].

Экспериментальные данные показывают, что когнитивные системы способны использовать частоты вплоть до 19 МГц там, где традиционные статистические модели предсказывают их непригодность [4]. Это связано с тем, что естественные и техногенные помехи сосредоточены в нижней части КВ-диапазона, и переход на более высокие частоты обеспечивает лучшее качество канала. Потенциально когнитивные подходы обладают наиболее высокой адаптивностью, позволяя учитывать широкий спектр факторов – ионосферных, помеховых и аппаратных – при автоматизированном выборе частоты без участия оператора. Однако на современном этапе развития такие системы требуют значительных вычислительных ресурсов и больших объёмов экспериментальных данных для обучения, а их эффективность напрямую зависит от качества и актуальности исходных данных.

Заключение

Проведённый анализ показывает, что развитие методов выбора рабочих частот эволюционирует от статических статистических таблиц к интеллектуальным когнитивным системам, причём каждый из подходов сохраняет свою область применения. Статистические методы остаются основой для долгосрочного частотного планирования и работы в спокойных ионосферных условиях. Прогностические модели целесообразно использовать для расчётов с учётом текущей фазы солнечного цикла и сезонных вариаций. Адаптивные методы необходимы для обеспечения связи в условиях возмущений, когда ошибки прогноза становятся недопустимыми. Когнитивные системы являются наиболее перспективным направлением, позволяющим автоматизировать выбор частот учитывая ионосферные, помеховые и аппаратные факторы.

Выбор конкретного подхода определяется требованиями к надёжности, наличием аппаратуры мониторинга, допустимыми затратами ресурсов и условиями эксплуатации радиолинии. В перспективе наиболее эффективными будут гибридные системы, сочетающие прогностические модели, данные оперативного

зондирования и алгоритмы машинного обучения для принятия решений в реальном времени.

Таким образом, для обеспечения устойчивой КВ-радиосвязи в условиях изменяющейся внешней среды необходим комплексный подход, сочетающий долгосрочное планирование, оперативную коррекцию частот по данным

мониторинга и применение интеллектуальных алгоритмов прогнозирования. Дальнейшие исследования целесообразно направить на развитие гибридных систем адаптивного частотного планирования, интегрирующих данные глобальных сетей мониторинга ионосферы с методами машинного обучения.

Литература

1. Благовещенский Д. В. Моделирование распространения КВ-радиоволн в высоких широтах / Д. В. Благовещенский, А. В. Благовещенская // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2016. – Т. 56. – № 5. – С. 621–630.
2. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере: пер. с англ. / К. Дэвис. – М.: Мир, 1973. – 502 с.
3. Иванов Д. В. Эффекты дисперсии в ионосферных радиоканалах. Ч. 2. Виды частотно-временной дисперсии / Д. В. Иванов, В. А. Иванов, М. И. Рябова, В. В. Овчинников // Радиотехника. – 2024. – Т. 88. – № 12. – С. 63–77.
4. Иванов Д. В. Подходы к экспериментальному оцениванию SDR-сенсором вариаций спектральной плотности мощности помех и прогнозированию вариаций их среднего уровня при изменении полосы КВ-радиоканала / Д. В. Иванов, В. А. Иванов, Н. В. Рябова, Р. Р. Бельгибаев // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2025. – Т. 30. – № 1. – С. 68–78.
5. Клименко М. В. Высотная протяженность зимней аномалии и её проявление в полном электронном содержании / М. В. Клименко, В. В. Клименко, И. Е. Захаренкова и др. // Химическая физика. – 2019. – Т. 38. – № 10. – С. 83–90.
6. Крюковский А. С. Математическое моделирование амплитудных, угловых и временных характеристик коротких радиоволн при слабонаклонном зондировании ионосферы / А. С. Крюковский, Д. С. Лукин, Е. В. Михалёва, Д. В. Растягаев // Радиотехника и электроника. – 2023. – Т. 68. – № 6. – С. 553–562.
7. Пашинцев В. П. Методика оценки влияния диффузности ионосферы и выбора рабочей частоты на помехоустойчивость коротковолновой связи / В. П. Пашинцев, Д. А. Белоконов, В. А. Цимбал и др. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 12.
8. Рыбаков А. И. Моделирование основных характеристик и параметров функциональных блоков и системы в целом при выборе оптимальных частотных каналов связи / А. И. Рыбаков // Экономика и качество систем связи. – 2019. – № 1 (11). – С. 13–18.
9. Семенова Н. А. Моделирование распространения КВ-радиоволн на трассе Кипр – Нижний Новгород при регистрации Z-образных ПИВ / Н. А. Семенова, Ф. И. Выборнов, С. М. Грач // Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – М.: ИКИ РАН, 2024. – С. 490.
10. Выборнов Ф. И., Шейнер О. А. Отклик ионосферы Земли на явления солнечной активности в феврале – марте 2023 года // Космические исследования. – 2024. – Т. 62. – № 2. – С. 157–167.
11. Брюнелли Б. Е. Физика ионосферы / Б. Е. Брюнелли, А. А. Намгаладзе. – М.: Наука, 1988. – 528 с.
12. Hirvonen E. A. O. AU-Ray Program for Modeling Radio Wave Propagation in the Ionosphere / E. A. O. Hirvonen, K. Kauristie, E. Kallio // Radio Science. – 2025. – Vol. 60. – No. 8. – DOI: 10.1029/2024RS008209.

STUDY OF THE INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS ON THE CHOICE OF OPERATING FREQUENCIES OF HF RADIO LINKS

Veligosha A. V.⁴, Tretyakov E. A.⁵, Yurkov V. V.⁶

Keywords: ionospheric disturbances, radio wave propagation, selection of operating frequencies, ionospheric monitoring, adaptive frequency planning.

Abstract

The purpose of the work: substantiation of directions for improving the stability of HF radio communications through adaptive frequency planning based on data from hardware and software ionosphere monitoring tools.

⁴ Aleksandr V. Veligosha, Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor of Department No. 52 of the Branch of the Peter the Great Military Academy. Serpukhov, Russia. E-mail: Aveligosha@mail.ru

⁵ Evgeny A. Tretyakov, adjunct of the branch of the Peter the Great Military Academy. Serpukhov, Russia. E-mail: 2923201@mail.ru

⁶ Vladislav V. Yurkov, cadet of the branch of the Peter the Great Military Academy. Serpukhov, Russia. E-mail: Uikav@bk.ru

Research method: comprehensive analysis, generalization of empirical data and results of mathematical modeling of HF radio wave propagation in the ray approximation, taking into account background and disturbing components of electron concentration.

Results of the study: it is shown that external factors cause significant deviations of ionospheric parameters: during periods of geomagnetic disturbances, the MUF can decrease by 25–50 %, radio wave absorption increases by 20–40 dB and more, multipath propagation and fading depth increase. Regularities of seasonal-diurnal and geographical variations of electron concentration have been revealed. The necessity of transitioning from statistical and predictive methods to adaptive and cognitive frequency planning systems integrating operational ionosphere monitoring data is substantiated.

Scientific novelty consists in systematization of quantitative assessments of the influence of a complex of external factors on the selection of operating frequencies of HF radio links from the standpoint of ensuring communication stability, as well as in substantiation of the prospects for the use of hardware and software ionosphere monitoring complexes for the implementation of hybrid adaptive frequency planning systems combining predictive models, real-time data and machine learning algorithms.

References

1. Blagoveshchenskij D. V. Modelirovanie rasprostraneniya KV-radiovoln v vysokih shirotah / D. V. Blagoveshchenskij, A. V. Blagoveshchenskaya // Geomagnetizm i aehronomiya. – 2016. – V. 56. – No. 5. – Pp. 621–630.
2. Dehvis K. Radiovolny v ionosfere: per. s angl. / K. Dehvis. – M.: Mir, 1973. – 502 p.
3. Ivanov D. V. Ehffekty dispersii v ionosfernyh radiokanalakh. Ch. 2. Vidy chastotno-vremennoj dispersii / D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, M. I. Ryabova, V. V. Ovchinnikov // Radiotekhnika. – 2024. – V. 88. – No. 12. – Pp. 63–77.
4. Ivanov D. V. Podhody k ehksperimental'nomu ocenivaniyu SDR-sensorom variacij spektral'noj plotnosti moshchnosti pomeh i prognozirovaniyu variacij ih srednego urovnya pri izmenenii polosy KV-radiokanala / D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, R. R. Bel'gibaev // Ehlektronnaya fizika i ehlektronnyye sistemy. – 2025. – V. 30. – No. 1. – Pp. 68–78.
5. Klimenko M. V. Vysotnaya protyazhennost' zimnej anomalii i eyo proyavlenie v polnom ehlektronnom soderzhanii / M. V. Klimenko, V. V. Klimenko, I. E. Zaharenkova i dr. // Himicheskaya fizika. – 2019. – V. 38. – No. 10. – Pp. 83–90.
6. Kryukovskij A. S. Matematicheskoe modelirovanie amplitudnyh, uglovyyh i vremennyh harakteristik korotkih radiovoln pri slabonaklonnom zondirovanii ionosfery / A. S. Kryukovskij, D. S. Lukin, E. V. Mihalyova, D. V. Rastyagaev // Radiotekhnika i ehlektronika. – 2023. – V. 68. – No. 6. – Pp. 553–562.
7. Pashincev V. P. Metodika ocenki vliyaniya diffuznosti ionosfery i vybora rabochej chastoty na pomehoustoichivost' korotkovolnovoy svyazi / V. P. Pashincev, D. A. Belokon', V. A. Cimbal i dr. // Zhurnal radioehlektroniki. – 2024. – No. 12.
8. Rybakov A. I. Modelirovanie osnovnyh harakteristik i parametrov funktsional'nyh blokov i sistemy v celom pri vybore optimal'nyh chastotnyh kanalov svyazi / A. I. Rybakov // Ehkonomika i kachestvo sistem svyazi. – 2019. – No. 1 (11). – Pp. 13–18.
9. Semenova N. A. Modelirovanie rasprostraneniya KV-radiovoln na trasse Kipr – Nizhnij Novgorod pri registratsii Z-obraznyh PIV / N. A. Semenova, F. I. Vybornov, S. M. Grach // Materialy 22-j Mezhdunarodnoj konferentsii «Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa». – M.: IKI RAN, 2024. – P. 490.
10. Vybornov F. I., Shejner O. A. Otklik ionosfery Zemli na yavleniya solnechnoj aktivnosti v fevrale – marte 2023 goda // Kosmicheskie issledovaniya. – 2024. – V. 62. – No. 2. – Pp. 157–167.
11. Bryunelli B. E. Fizika ionosfery / B. E. Bryunelli, A. A. Namgaladze. – M.: Nauka, 1988. – 528 p.
12. Hirvonen E. A. O. AU-Ray Program for Modeling Radio Wave Propagation in the Ionosphere / E. A. O. Hirvonen, K. Kauristie, E. Kallio // Radio Science. – 2025. – Vol. 60. – No. 8. – DOI: 10.1029/2024RS008209.

