

УДК 621.396.931, 550.388.2

СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ ПРОХОЖДЕНИЯ РАДИОВОЛН ЧЕРЕЗ ИОНОСФЕРУ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СПЕЦИФИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ РОССИЙСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

В.Б. Лапшин, Н.П. Данилкин, М.М. Анишин,
Н.Г. Котонаева, С.В. Журавлев, В.И. Денисова

Метод расчета, положенный в основу создающейся в ИПГ проблемно-ориентированной интеллектуальной информационной системы, обеспечивающей новое качество ионосферной радиосвязи между стационарными и подвижными объектами на железных дорогах России, представлен в работе. Система основана на входных данных о текущем состоянии ионосферы, получаемых в режиме "on-line" с развёртываемой в настоящее время в России системы геофизического мониторинга на базе сети спутниковых и наземных ионозондов и приёмников ГЛОНАСС/GPS.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ДЕКАМЕТРОВАЯ (КВ) РАДИОСВЯЗЬ, РЖД, РАДИОТРАССА, ДИАПАЗОН ОПТИМАЛЬНЫХ ЧАСТОТ, ЗОНЫ УВЕРЕННОГО ПРИЕМА.

1. ВВЕДЕНИЕ

Декаметровая радиосвязь обладает многими достоинствами, которые определяют актуальность ее использования при функционировании такого сложного комплекса как Российские железные дороги (РЖД). Прежде всего, это выражается в потенциальной возможности организации глобальной связи, включающей все объекты РЖД, на сравнительно недорогом радиооборудовании; отсутствии необходимости в развитой инфраструктуре, обслуживающей радиосвязь, и, кроме всего этого, в устойчивости к целенаправленному радиоэлектронному противодействию, что делает КВ-радиосвязь просто незаменимой в экстремальных ситуациях.

Несомненно, известны и проблемы, которые возникают при использовании систем КВ-радиосвязи. К ним обычно относят то, что связь на дальние расстояния возможна только в течение ограниченного интервала времени, связанного с состоянием отражающих слоев ионосферы, частотный ресурс в КВ-диапазоне труднодоступен из-за его перегруженности. и высокий уровень помех и искажений в канале связи требует постоянного управления рабочей частотой приемопередатчика. Все это усложняется еще особыми условиями эксплуатации радиосвязи на РЖД, выраженными также в том, что кроме стационарной радиосвязи между неподвижными объектами, необходима радио-

связь при перемещении объектов связи на значительные расстояния. При этом область отражения радиоволн в ионосфере быстро переходит из одних характерных ионосферных зон в другие, такие как области главного ионосферного провала, зоны перехода от ионосферы умеренных широт в высокоширотные и низкоширотные области, в области пространства и в интервалы времени, где «господствуют» низко расположенные спорадические слои ионосферы и т.п. Дальние маршруты связаны также со сменой не только времени суток, но часовых поясов.

В настоящее время создаются благоприятные условия для преодоления перечисленных трудностей. Прежде всего, для современного этапа развития ионосферной радиосвязи характерно совершенствование ее технических средств. Отметим те достижения, которые относятся к условиям декаметровой радиосвязи на РЖД. Это организация ретрансляции, включая зонную; практически полный переход к цифровым системам; использование методов многоуровневой адаптации; применение антенн с управляемой диаграммой направленности. Еще одним залогом успешного развития ионосферной радиосвязи является существенное повышение надежности современной электронной элементной базы приемопередающей аппаратуры, позволившей реализовать недо-

ступные ранее методы кодирования и оптимальной обработки сигналов.

Важнейшей стороной повышения надежности использования КВ-радиосвязи является внедрение оперативных прогнозов в процесс ведения радиосвязи. В настоящий момент происходит обновление всего программно-аппаратного комплекса Ионосферной службы (в том числе службы прогнозов условий распространения радиоволн) в РФ [1]. В ближайшие два-четыре года будет происходить замена аппаратуры наземных ионосферных станций, будут выведены на орбиты вокруг Земли специализированные ионосферные спутники, которые обеспечат контроль состояния ионосферы на всей территории РФ и стран СНГ. При этом впервые будет апробироваться совместное использование наземных и спутниковых ионосферных станций, которое будет обладать всеми особенностями системного радиозондирования [2]. Эта система будет в состоянии давать оперативную информацию о состоянии ионосферы в любой момент времени.

Таким образом, для того чтобы решить проблему качественного и непрерывного использования ионосферного радио для интеллектуализации процессов управления и информационного обеспечения на железнодорожном транспорте необходимо объединить технические достижения и использование достоверной

информации о состоянии ионосферы. Особую роль при этом играет разработка специальных методов расчета и прогнозирования характеристик распространения декаметровых радиоволн, работающих в условиях непрерывного перемещения друг относительно друга передатчиков и приемников одновременно для множества различных радиолиний.

На рис. 1 представлена условная схема работы вычислительно-информационной системы обеспечения объектов РЖД КВ-радиосвязью. Текущая ионосферная информация из данных государственной системы мониторинга ионосферы непрерывно поступает в Центр оперативного мониторинга ионосферы РФ. Одновременно по данным ГЛОНАСС-GPS определяется сиюминутное расположение (по отношению к заданному моменту) передатчиков и приемников всех объектов систем железнодорожной радиосвязи, при отсутствии этого блока используется пространственно-временное расписание движения поездов. На основании этого Радиоцентр РЖД с использованием специального вычислительного комплекса проводит расчет распространения радиоволн. Параметры расчета являются основой для принятия решения об утверждении предложенного расписания радиочастот и передачи его в объекты инфраструктуры.

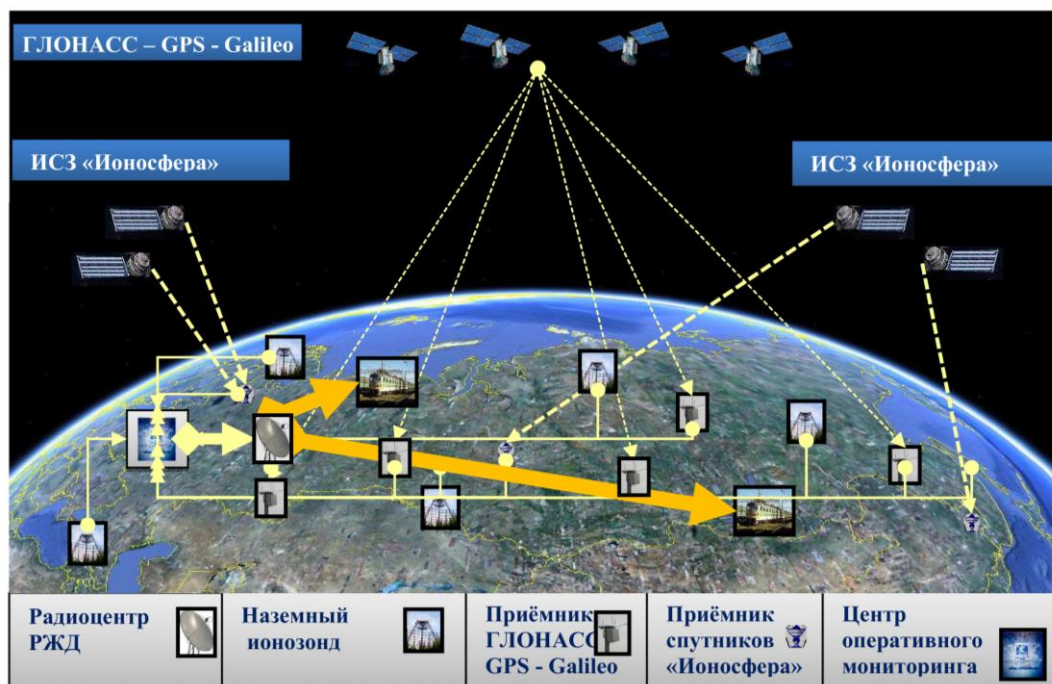


Рис. 1. Организация декаметровой радиосвязи на РЖД в условиях современного оперативного радиопрогноза.

2. МЕТОД РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ РАДИОСВЯЗИ

Общая схема проведения расчетов оптимальных параметров КВ-радиосвязи системы для нужд РЖД представлена на рис. 2.

Входной информацией для проведения расчетов является оперативная информация о состоянии ионосферы, карта магнитного поля, пространственно-временное расписание движения подвижного состава. Расчет параметров радиосвязи проводится на основе современной адаптируемой реферативной модели ионосферы (IRI 2012), которая экстраполируется по оперативным и прогнозным значениям параметров ионосферы и индексов солнечной активности.

При проведении расчетов учитывается прогноз космических и атмосферных шумов, а также промышленных помех.

Наличие информации о местоположении подвижного состава в конкретный момент времени является неременным условием надежной связи с этими объектами.

Выходной информацией работы вычислительного комплекса являются рекомендации по выбору оптимальных рабочих частот для связи объектов инфраструктуры РЖД.

При расчете траекторных характеристик используется модифицированный метод рефракционного интеграла (МРИ). Это позволяет получить точный и качественный расчет радио-

связи при значительном сокращении времени вычисления, что актуально при проведении массовых расчетов радиолиний. В отличие от метода рефракционного интеграла (РИ) [3] пространственная сетка разбиений дуги большого круга не является жестко заданной и изменяется при переходе к новой лучевой траектории. Метод предусматривает построение лучевой траектории.

Ионосферную плазму принимают двухмерно-неоднородной и учитывают только градиенты электронной концентрации вдоль трассы. В равноудаленных узловых точках вдоль дуги большого круга, соединяющей пункты передачи и приема, вычисляют высотный профиль электронной концентрации, каждый из которых является комплексом сопряженных друг с другом семи квазипарабол. Это обстоятельство является основой метода МРИ. Параметры квазипарабол (критические частоты, высоты максимумов и полутолщины) находятся по алгоритмам, заложенным в основу модели IRI-2012. Основные расчетные формулы модели даны в [4,5].

Построение лучевой траектории начинается с момента ее входа в ионосферу и осуществляется по стандартным аналитическим выражениям.

При расчетах учитывается возможность отражения радиоволн от спорадического слоя Es.

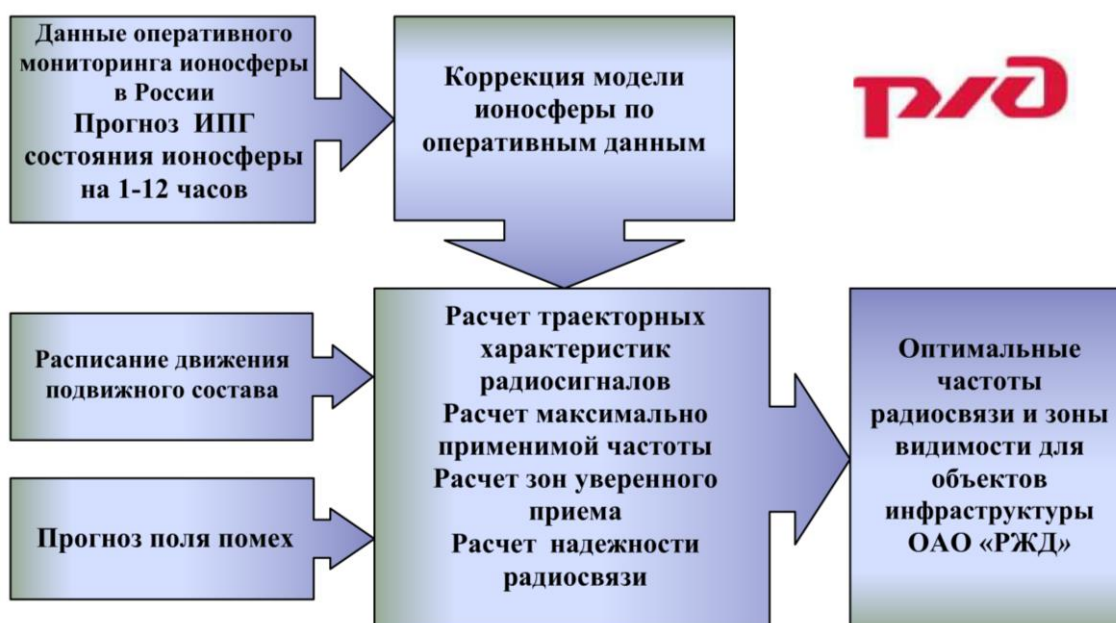


Рис. 2. Схема проведения расчетов оптимальных параметров КВ-радиосвязи для нужд РЖД.

Особенностью метода является учет влияния магнитного поля Земли, основанный на свойстве, изложенном в работе [6]. Согласно ему, обыкновенная и необыкновенная ветви угловых и дистанционно-частотных характеристик трасс в значительной степени повторяют форму аналогичных кривых, найденных без магнитного поля, отличаясь от них лишь смещением вдоль оси частот, соответственно, на δf_o и δf_x . В результате, рабочая частота заменяется двумя эквивалентными: $f_o = f + \delta f_o$; $f_x = f - \delta f_x$ и, хотя дальнейший расчет ведется в изотропной среде, задача о нахождении траекторных параметров магнитоионных компонент с частотой f решается полностью.

Величины поправок задаются аппроксимирующим кубическим полиномом $P(S_0, \gamma, I)$, имеющим вид:

$$\frac{\delta f_{o,x}}{f_H} = P(S_0, \gamma, I) = \sum_{i,j,k=0}^3 C_{i,j,k}^{(o,x)} S_0^i \gamma^j I^k.$$

Здесь S_0 – длина трассы в тыс. км, геомагнитный азимут γ в радианах. Параметры геомагнитного поля: гирочастота f_H в МГц, магнитное наклонение I в радианах, магнитное склонение D в радианах найдены в узлах пространственно-временной сетки по компонентам вектора напряженности поля \vec{H} , заданного глобальной моделью [7]. Коэффициенты полиномов $C_{i,j,k}^{(o,x)}$ для каждой магнитоионной компоненты приведены в [8].

Далее в приведенной ниже сводке формул будут опущены индексы o и x для обозначения обыкновенной и необыкновенной компонент, если для этого нет необходимости. Следует понимать, что формулы аналогичны для каждой компоненты.

После вычисления поправок для каждой компоненты решается граничная задача точка-точка. Находятся все траектории, которые приходят из пункта передачи в пункт приема путем решения уравнения:

$$S(f, \Delta) = S_0 \quad (1)$$

где $S(f, \Delta)$ — расстояние по Земле, пройденное лучом как функция угла места Δ и рабочей частоты f .

Суть метода состоит в том, что, начиная с начального угла $\Delta_{\min} = 1^\circ$, с шагом $\delta\Delta = 0,5^\circ$ вычисляются значения функции:

$$F(\Delta) = S(f, \Delta) - S_0$$

до тех пор, пока не выполнится одно из перечисленных ниже условий.

1) При очередном угле места лучевая траектория пересекает высоту максимума электронной концентрации ионосферы.

2) В процессе увеличения углов с шагом $\delta\Delta$, текущий угол превысил предельную, заранее выбранную величину - 90° . В этом случае процесс поиска корней и исследование уравнения (1) для заданной частоты завершается.

Признаком наличия корней уравнения (1) на произвольном отрезке $[\Delta_i, \Delta_{i+1}]$, где $\Delta_{i+1} = \Delta_i + \delta\Delta$, является изменение знака $F(\Delta)$, т.е. $F(\Delta_i) \cdot F(\Delta_{i+1}) < 0$. В этом случае процесс исследования уравнения приостанавливается (локализация корня установлена), и одновременно инициализируется поиск корня на отрезке. Для его определения используется комбинация методов бисекции и секущих, что обеспечивает быструю сходимость итерационного процесса при минимальном количестве вычислений.

Процесс поиска максимальной применимой частоты (МПЧ) трассы также связан с решением граничной задачи (задачи точка-точка). В этом случае необходимо найти максимальную частоту, для которой существует хотя бы одно решение уравнения (1).

После решения граничной задачи (1) и нахождения всех n траекторий, приходящих из пункта передачи в пункт приема, рассчитывается действующее значение напряженности электрического поля (в дБ (относительно 1 мкВ/м)) каждой магнитоионной компоненты каждого луча, отразившегося от регулярных слоев ионосферы, по формуле:

$$E_i = 104,77 + 10 \cdot \lg P - L - L_s - L_p - L_r + G_1, \quad (2)$$

где P — мощность передатчика в кВт;

G_1 — коэффициент усиления передающей антенны.

$L; L_s; L_p; L_r$ — энергетические характеристики ослабления напряженности, описанные ниже.

Для расчетов поглощения L радиоволн используется авторский метод [9], позволяющий с высокой точностью находить столкновительные потери в ионосфере для обеих магнитоионных компонент за счет применения обобщенной теоремы эквивалентности, связы-

вающей поглощение при наклонном и вертикальном падении.

Соотношение эквивалентности между интегральным поглощением при наклонном и вертикальном распространении в сферической горизонтально-неоднородной магнитоактивной ионосфере имеет вид:

$$L = L(f, \nu, f_H) = 0,5[L_{V1}(f_{V1}, \nu'_{1}, f'_{H1}, \eta_1) + L_{V2}(f_{V2}, \nu'_{2}, f'_{H2}, \eta_2)]$$

Здесь $L(f, \nu, f_H)$ – наклонное поглощение на частоте f с профилем частот соударений $\nu = \nu(h)$ и гирочастотой f_H , $L_{V1}(f_{V1}, \nu'_{1}, f'_{H1}, \eta_1)$ и $L_{V2}(f_{V2}, \nu'_{2}, f'_{H2}, \eta_2)$ – значения поглощения при вертикальном падении на ионосферу, вычисленные при высотных распределениях электронной концентрации, соответственно, в пунктах входа-выхода наклонной траектории в ионосферу. Эквивалентные частоты $f_{V1,2}$, профили частот соударений $\nu'_{1,2}(h)$, гирочастоты $f'_{H1,2}$ находятся по формулам:

$$\begin{aligned} f_{V1,2} &= f \cdot \sin \Delta_{1,2}; \\ \nu'_{1,2}(h) &= \nu(h) \cdot \sin \Delta_{1,2}; \\ f'_{H1,2} &= f_H \cdot \sin \Delta_{1,2} \end{aligned}$$

Углы места (углы входа и выхода) $\Delta_{1,2}$ берутся в точках пересечения лучом нижней границы ионосферы, как и углы $\eta_{1,2}$ между векторами геомагнитного поля и волновой нормалью.

В свою очередь поглощение при вертикальном падении для двух значений угла $\eta_{1,2}$ находится численным интегрированием мнимой части показателя преломления Эпплтона [10] по высоте. При расчете поглощения для высотного профиля ионизации используется модель IRI без квазипараболической аппроксимации. В качестве высотного распределения частоты соударений – профиль, близкий к газокинетическому [11]:

$$\nu(h) = \exp(12,807 - 0,158h) + \exp(-6,175 - 0,0042h),$$

где h – высота над уровнем Земли в км.

Расчет пространственного ослабления L_S осуществляется упрощенным способом. Считается, что в горизонтально-неоднородной ионосфере пространственное ослабление определяется с достаточной точностью соотношением:

$$L_S = 10 \lg \left| R_3 \sin \frac{S_0}{R_3} \frac{\sin \Delta_2}{\cos \Delta_1} \frac{dS(\Delta, f)}{d\Delta} \right| \text{ дБ,}$$

где Δ_1 – угол излучения (места), Δ_2 – угол прихода луча на поверхность Земли, R_3 – радиус Земли (6370 км).

Одной из специфических форм проявления анизотропии ионосферной плазмы являются поляризационные потери, вызванные пространственным несовпадением векторов электромагнитного поля падающей на антенну волны с необходимым пространственным расположением элементов антенны. Соответствующее поляризационное поглощение радиоволн в ряде случаев может достигать 20-30 дБ. В связи с этим расчет поляризационных потерь является составной частью разработанного метода.

Количественно поляризационное рассогласование характеризуется коэффициентом связи, который определяет долю энергии, переходящую из падающей волны в волну характеристическую, при входе в ионосферу. Для обыкновенной волны имеем [12, 13]:

$$F_o = \frac{(1 + M_1 M_2)^2 \cos^2(\phi_1 - \phi_2)}{(1 + M_1^2)(1 + M_2^2)} + \frac{(M_1 + M_2)^2 (1 - \cos^2(\phi_1 - \phi_2))}{(1 + M_1^2)(1 + M_2^2)}$$

где M_1, M_2 ($|M| \leq 1$) – отношения малых полуосей эллипсов поляризации к большим для падающей на ионосферу и возбуждаемой в ней волн; ϕ_1, ϕ_2 – углы наклона большой полуоси эллипсов поляризации к плоскости распространения.

Для необыкновенной волны:

$$F_x = 1 - F_o.$$

Поляризационные потери в дБ вычисляются по формуле:

$$L_p = 10 \cdot \lg F_{o,x}.$$

Параметры эллипсов поляризации характеристических волн на входе в ионосферу и на выходе из нее рассчитываются на основе теории предельной поляризации [12, 13].

Энергетические потери, связанные с отражением от поверхности Земли, в используемом методе для случая многоскачкового распространения характеризуются фактором потерь

энергии F_G . Фактор F_G , имеющий для вертикальной и горизонтальной составляющей вектора электрического поля комплексные коэффициенты отражения \dot{R}_v и \dot{R}_h , определяется следующим выражением [12, 13]:

$$F_G = \frac{|\dot{R}_v A + \dot{R}_h B|^2}{(1 + M_1^2)(1 + M_2^2)};$$

где:

$$A = (\cos \phi_1 + jM_1 \sin \phi_1)(\cos \phi_2 - jM_2 \sin \phi_2);$$

$$B = (\sin \phi_1 - jM_1 \cos \phi_1)(\sin \phi_2 + jM_2 \cos \phi_2);$$

M_1, M_2 — отношение малой полуоси эллипса поляризации к большой — для падающей и отраженной волн, соответственно;

ϕ_1, ϕ_2 — углы наклона большой полуоси эллипса поляризации к плоскости распространения, для падающей и отраженной волн;

j — мнимая единица.

Потери при отражении от поверхности Земли L_r в дБ вычисляются по формуле:

$$L_r = 10 \cdot \lg F_G.$$

Суммарная напряженность интерференционного поля в точке приема (действующее значение) вычисляется как результат некогерентного сложения n напряженностей поля E_i парциальных лучей, рассчитанных по формуле (2).

$$\bar{E} = 10 \cdot \lg \left[\sum_{i=1}^n 10^{E_i/10} \right], \text{ дБ}$$

(относительно 1 мкВ/м).

Напряжение сигнала на входе приемника для i -го луча в мкВ равно:

$$U_{ic} = 10^{20} I_{\partial c} \frac{E_i}{l_{\partial c}},$$

где $l_{\partial c}$ — действующая длина (высота) антенны, м.

Суммарное действующее значение напряжения сигнала на входе приемника в дБ относительно 1 мкВ:

$$U_c = 10 \cdot \lg \left(\sum U_{ic}^2 \right).$$

Основным показателем качества и основной характеристикой передачи сигнала для любой системы является отношение сигнал-шум (ОСШ), вычисляемое, как отношение напряжений сигнала и шума $U_c/U_{ш}$. Прогнозное значение $U_{ш}$ вычисляется на основе данных о предполагаемых величинах атмосферных, космических и промышленных (индустриальных) помех, их зависимости от географических координат пункта приема, от частоты диапазона, изменчивости во времени и типа окружающей среды. В программе применен метод расчета, рекомендованный ИТУ-R[14].

3. ДЕМОСТРАЦИОННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

3.1 Расчет переменных значений МПЧ

Ниже приведены результаты расчета МПЧ и оптимальной рабочей частоты (ОРЧ) и наименьшей применимой частоты (НПЧ) по пути следования поезда 002м Москва-Владивосток. Результаты представлены в таблице №1 и на рис. 4. ОРЧ определяется как $k \cdot \text{МПЧ}$. При спокойном состоянии ионосферы на практике рекомендуют брать $k \approx 0,85$.

Расчеты проводились при следующих условиях:

- Мощность передатчика — 1000 Вт.
- Место нахождения передатчика — Москва.
- Место нахождения приемника — движущийся поезд 002м Москва-Владивосток.
- Полоса приемника — 3 кГц.
- Антенна передающая — двойная горизонтальная ромбическая антенна РГД75, с коэффициентом усиления $G_1 = 27,7$ дБи для обеих компонент.
- Антенна приемная — горизонтальный диапазонный вибратор ВГД, с коэффициентом усиления $G_2 = 1,7$ дБи для обыкновенной компоненты и $G_2 = 2,1$ дБи для необыкновенной компоненты.

Таблица 1.

№	Маршрут следования	Прибытие московское время	Отправление московское время	Дата	Протяженность трассы, км	МПЧ МГц	ОРЧ МГц	НПЧ МГц
1	Москва	---	23:45	14.01.13	0	---	---	---
2	Нижний Новгород	05:38	05:50	15.01.13	401	3,1	2,6	2,0
3	Пермь	19:37	19:57	15.01.13	1155	8,4	7,1	2,0
4	Екатеринбург	01:03	01:29	16.01.13	1416	6,5	5,5	2,0
5	Тюмень	06:13	06:34	16.01.13	1709	5,6	4,8	2,0
6	Омск	13:35	13:53	16.01.13	2236	32,8	23,8	7,2
7	Новосибирск	22:07	22:26	16.01.13	2810	8,5	7,2	2,7
8	Красноярск	09:13	09:35	17.01.13	3349	18,4	15,6	8,2
9	Иркутск	02:32	02:57	18.01.13	4204	7,2	5,9	2,9
10	Чита	19:01	19:26	18.01.13	4734	9,8	8,3	3,8
11	Белогорск	00:28	00:58	20.01.13	5612	9,9	8,4	3,7
12	Хабаровск	10:48	11:18	20.01.13	6142	26,9	22,9	16,0
13	Владивосток	23:17	---	20.01.13	6412	10,5	8,9	3,6

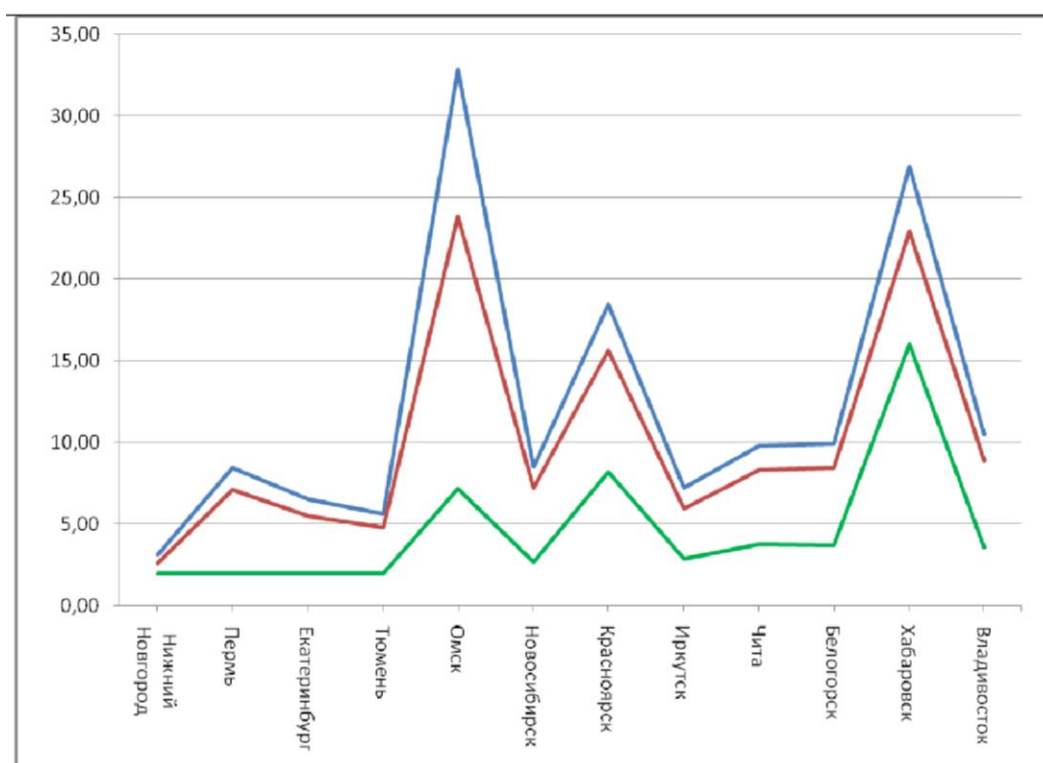


Рис. 3. График изменения зависимости МПЧ (синяя линия), ОРЧ (красная линия) и НПЧ (зеленая линия) для радиосвязи поезда «Москва–Владивосток» с передатчиком в Москве.

По пути следования поезда 002м для расчета были выбраны промежуточные населенные пункты, указанные в таблице №1. В таблице кроме рассчитанных данных также указаны дата и время (московское) прибытия (отправления) поезда и протяженность трассы в км вдоль дуги большого круга, соединяющей точки приема и передачи. На рисунке 3 приведены графические зависимости МПЧ (синяя линия), ОРЧ (красная линия) и НПЧ (зеленая

линия) от расположения поезда в различных населенных пунктах.

Рис. 3 демонстрирует изменение диапазона рабочих частот по пути следования поезда 002м. Частоты, применимые для связи при нахождении поезда в Хабаровске (18LT), неприменимы в интервал времени, когда поезд находится в окрестности Красноярска (14:35LT), либо в ночное время в Чите (1LT).

В качестве примера в таблицах № 2 и 3 приведен полный расчет всех параметров ра-

диосвязи при нахождении поезда 002м в Хабаровске. Использовались обозначения результирующих и промежуточных параметров, указанные выше в статье.

Расчеты проводились при следующих дополнительных условиях:

- Рабочая частота – 22,9 МГц.
- Дата и время расчета взяты из таблицы №1 (строка 12).
- Азимут на приемник (Хабаровск) – 53,2 град.
- Азимут на передатчик (Москва) – 317,2 град.
- Протяженность трассы 6142 км.

В таблице № 2 представлен вывод основных результатов. Дополнительно приведены значения: отношение сигнал/шум $U_c/U_{ш}$, динамический диапазон dE – заданный интервал

значений напряженности поля, в пределах которого лежат амплитуды лучей, учитываемые при определении суммарного поля, память канала – разность времени распространения лучей, амплитуды которых входят в динамический диапазон $dE = 20$ дБ, и качество связи, определяемое как минимальная необходимая мощность передатчика P_{min} для обеспечения заданных категории обслуживания (КО – 10 дБ), времени действия (ВД – 90%) и вероятности обслуживания (ВО – 90 %), здесь же выводится ВО для заданных КО = 10 дБ и ВД = 90% и при заданной в расчете мощности передатчика. Принятый алгоритм вычисления качества связи совпадает с рекомендациями ITU-R. НПЧ находится на частоте, при которой отношение сигнал/шум становится выше некоторого порога, равного в данном расчете 20 дБ.

Таблица 2.

Время (Московское декретное) 10:48					
МПЧ 26,9 МГц			НПЧ 16,0 МГц		
Рабочая частота f , МГц	U_c , дБ	$U_c/U_{ш}$, дБ	Память канала, мс ($dE=20$ дБ)	P_{min} , кВт	ВО, %
22,90	39,7	34,8	0,01	0,50	94,18

Таблица 3.

f , МГц	Мода	Тип луча	Δ_1 , град	Δ_2 , град	L_s , дБ	L_r , дБ	T , мс	U_c , дБ	$U_c/U_{ш}$, дБ	L_p , дБ	L_r , дБ	M	ϕ град
22,9	F2F2F2	0	7,0	7,5	74,3	11,6	21,3	30,4	25,6	13,4	12,9	0,92	-21,3
22,9	F2F2F2	x	6,9	7,4	74,3	12,1	21,3	39,1	34,3	5,6	11,9	-0,92	68,8

Дополнительно для анализа и принятия оптимальных решений не только по выбору интервала рабочих частот, но и по выбору оснащения антеннами объектов инфраструктуры РЖД, приводятся промежуточные результаты расчетов (таблица №3). Дополнительно приведены значения:

- мода (тип слоя, от которого произошло отражение на данном скачке), три указанных слоя свидетельствуют о том, что в расчете трасса трехскачковая;
- тип луча (обыкновенный – «о», необыкновенный – «х»);
- время распространения, T .
- отношение осей эллипса поляризации в точке приема, M .
- угол наклона эллипса поляризации в точке приема, отсчитанный от вертикали

при наблюдении вдоль волнового вектора, ϕ .

Как видно из представленных расчетов, важным моментом для улучшения качества связи является правильность выбора антенны как на приемном, так и на передающем пункте. В этом случае применение антенн с управляемой диаграммой направленности (антенная решётка и т.д.) на передающем стационарном пункте, способной сформировать максимум для рассчитанного по программе направления прихода доминирующего луча (азимуту и углу места), значительно повысит надежность КВ-радиосвязи.

3.2 Расчет зон уверенного приема

При определении зон уверенного приема ставится своего рода обратная задача: «Где будет осуществляться уверенный прием сиг-

нала передатчика, установленного на движущемся поезде и излучающего сигнал на постоянной частоте?» Под зоной уверенного приема (зоной видимости) понимают области, в которых отношение напряжений сигнал/шум превышает 20 дБ.

Для примера проведен расчет зон уверенного приема передатчика на движущемся поезде 056ы для маршрута «Москва-Новосибирск». Расчет выполнен при характерных для РЖД параметрах передающей антенны: антенна ВГДШ длина 6 м, высота 4 м, азимут 0°, рабочая частота 2,5 МГц, мощность передатчика 100 Вт, полоса приемника 3 кГц. Расписание движения поезда приведено в табл. 4.

Таблица 4.

№	Маршрут следования	Прибытие московское время	Отправление московское время	Дата
1	Москва	---	16:20	14.01.13
2	Нижний Новгород	22:48	23:00	14.01.13
3	Пермь	14:57	15:17	15.01.13
4	Екатеринбург	20:32	21:01	15.01.13
5	Тюмень	02:30	02:50	16.01.13
6	Омск	10:51	11:59	16.01.13
7	Новосибирск	18:40	19:23	16.01.13

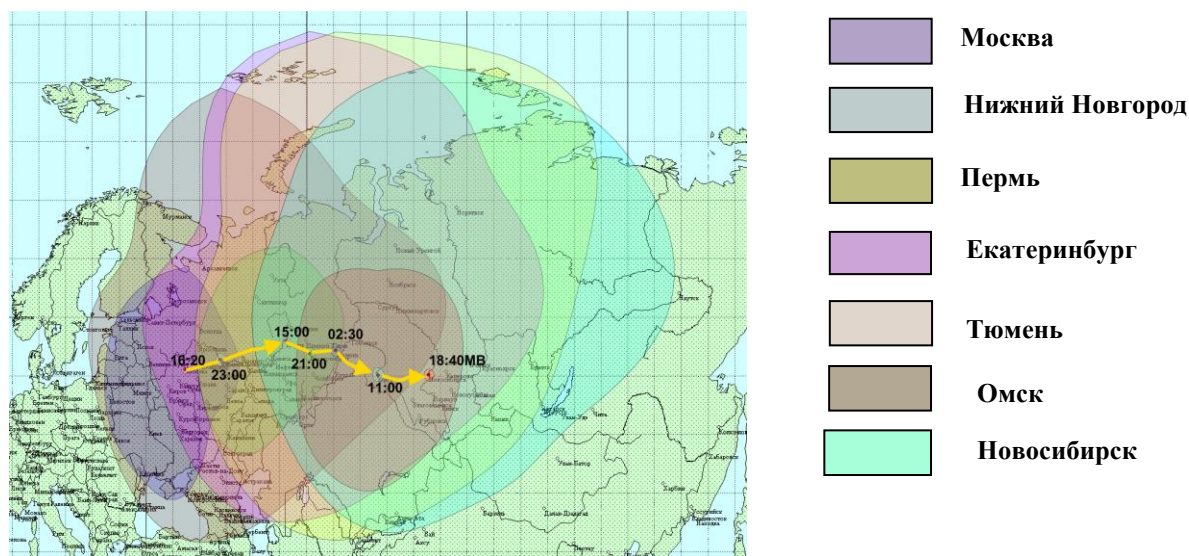


Рис. 4. Зоны уверенного приема при прохождении поездом 056ы населенных пунктов в соответствии с расписанием.

Результаты расчета зон видимости приведены на рисунке 4. Каждая зона видимости соотнесена по времени к указанному маршруту. Вытянутость зон к северу является следствием расположения антенны ВГДШ вдоль состава, который движется на восток. На карте указано московское время. Радиусы зон на карте различны и обозначены цветовой палитрой, пересечение зон изображается наложением цветов. Основной причиной этого является поглощение радиоволн. В дневное время суток, когда поглощение большое, зоны уверенного приема меньше, в вечерние и ночные часы при малом поглощении зоны видимости больше. При расчете учтены атмосферные и космические шумы, а также промышленные помехи. Из рисунка 4 видно, что для непрерывной связи с поездом необходимо иметь расписание смены стационарных приемных

пунктов в крупных городах, находящихся в зонах уверенного приема сигналов передатчика.

ВЫВОД

Проводимая в настоящее время модернизация отечественной системы мониторинга ионосферы, будучи приложена к современным требованиям развития радиосвязи на железнодорожном транспорте России, действительно должна привести к существенному улучшению качества декаметрового радиосвязи и к созданию новых, более прогрессивных методов организации связи с подвижным составом железнодорожного транспорта.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-07-13125 офи_m_РЖД.

THE MODERN APPROACH TO THE CALCULATION OF RADIO-WAVE PROPAGATION THROUGH THE IONOSPHERE WITH RESPECT TO THE SPECIFIC CONDITIONS OF THE RUSSIAN RAILWAYS

The method of calculation, which is the basis of a problem-oriented intelligent information system for an ionospheric radio presented in the paper. IPG creates this system to provide a new quality of radio communication via ionosphere between stationary and moving objects of the Russian railways. The system is based on the input data of the current state of the ionosphere, resulting in a mode «on-line» with currently deployed in Russia geophysical monitoring system based on satellite and ground-based ionosondes and GLONASS / GPS receivers.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лапшин В.Б., Н.П. Данилкин, В.И. Денисова, С.А. Пулинец, Г.В. Гивишвили // Сборник докладов XXIII Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн», Йошкар-Ола, 23-26 мая. 2011 г.– Т. 1.
2. Данилкин Н.П., С.В. Журавлев, Н.Г. Котонаева. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Т. 1-3 “Ионосферная плазма”. – М.:Янус-К., 2009. Ч. 2. –С.35-44.
3. Кияновский М.П. и др.// Техника средств связи. Серия Системы связи. Вып.5. 1987. - с.4.
4. Bilitza D. // NSSDC90-22, Greenbelt, Maryland, 1990. 158p.
5. Bilitza D. // Radio Sci. 2001. v.36. N2. p.261-275.
6. Барабашов Б.Г., Вертоградов Г.Г., Федоров С.А. //Изв. СКНЦ, серия: естественные н., 1980. - 4. – с.45-47.
7. Jonsen D.C., Cain J.C. // J. Geophys.Res. v.9. - p.3568-3569.
8. Барабашов Б.Г., Вертоградов Г.Г. // Радиотехника. 1981. т.36. –12. – с.35-37.
9. Барабашов Б.Г., Вертоградов Г.Г. // Труды НИИР. 1989. –2. – с.50-54.
10. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. – М.: Мир, 1973. .
11. Curtis A.R. A // U.K. Atom. Energy AWRE Report No.34/72. – 1972.
12. Moorat A.J.G., Bradley P.A. //Electronics Record. Reprinted from Proceed. IEEE. 1968. v.115. №.5/6. – p.771-781.
13. Phillips G.J., Knight P. // Proc. IEEE. 1965. v.112. –1. – p. 31-39.
14. Recommendation of ITU-R. – P.372–10 Radio noise (10/2009).