

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯРНЫХ СЛОЕВ ИОНОСФЕРЫ

С. В. Литвинов, В. О. Скрипачев

В статье приводится оценка погрешностей определения параметров ионосферы. Рассматриваются особенности регулярных слоев ионосферной плазмы и модели построения дальностно-частотных характеристик, влияющие на точность оценки параметров ионосферы. Подробно анализируются методические основы получения статистической погрешности прогнозирования параметров регулярных слоев. Проведен анализ многолучевости радиотрасс радиолокационных станций загоризонтного обнаружения и предложен алгоритм определения оптимальных рабочих частот.

Ключевые слова: ионосфера, радиолокационные станции загоризонтного обнаружения, ионосферные слои, статистическая погрешность, многолучевость радиотрасс, загоризонтное обнаружение.

Разработчикам радиотехнических средств, работающих в диапазоне коротких волн [1], хорошо известно, что реализация заложенных характеристик зависит от грамотного выбора рабочей частоты. При эксплуатации таких средств для прогноза оптимальных частот используются программы моделирования ионосферных параметров, основанных на медианных значениях в терминах дневных, сезонных и солнечных циклических изменений. Среднее поведение ионосферы может быть описано таким образом, однако реальная ионосфера характеризуется большими флуктуациями относительно среднемесячных значений. Именно по этой причине разработчики применяют комплексные методы для определения параметров среды распространения и оптимального выбора рабочих частот.

Функционирование радиолокационных станций загоризонтного обнаружения (РЛС ЗГО) является одним из самых востребованных применений эффекта отражения радиоволн коротковолнового (КВ) диапазона от ионосферы. Основным предназначением таких РЛС является возможность обнаружения воздушных целей на расстоянии от 1000 до 3000 км. Радиолокатор обнаруживает массовый взлет летательных аппаратов, определяет траекторные параметры отдельных целей, таких как самолеты, беспилотные летательные аппараты и др. [2]. Вместе с тем для корректной работы таких РЛС необходим грамотный выбор рабочей частоты, основанный на занятости частотного диапазона и текущем состоянии ионосферы.

Для определения текущих параметров ионосферы в интересах РЛС ЗГО используются следующие основные подходы: применение глобальной модели ионосферы, возвратно-наклонное зондирование (ВНЗ) средствами самой РЛС, вертикальное зондирование на вынесенных позициях, наклонное зондирование на трассах РЛС – ионозонд и ионозонд – ионозонд. В дополнение к перечисленным наземным методам

применяется также и исследование ионосферы с использованием космической группировки, например радиозатменным методом по сигналам глобальных навигационных систем (ГНСС) [3]. Лучшим вариантом, очевидно, будет комплексное использование всех доступных источников. Отдельно каждый из этих подходов не обеспечит необходимой точности [4].

Целью настоящей работы является оценка погрешностей, вносимых различными факторами при определении параметров регулярных слоев ионосферы.

Особенности регулярных слоев ионосферы

Параметры регулярных слоев ионосферы находятся в строгой зависимости от солнечного излучения. Величина изменения концентрации электронов зависит от времени суток, солнечной активности (СА) и угла падения солнечного излучения на ионосферу, то есть от географической широты исследуемой области.

Интенсивность солнечного излучения зависит от уровня СА, являющейся функцией числа солнечных пятен. Эта зависимость явно указывает на долговременные изменения критической частоты слоев E , $F1$ в течение 11-летнего солнечного цикла. Плотность потока солнечного излучения также зависит от солнечного зенитного угла χ для заданного времени и места. Это, в свою очередь, указывает на наличие дневных и сезонных вариаций критических частот регулярных слоев E и $F1$.

Высота регулярного слоя E с максимальной степенью ионизации также варьируется, но в дневное время обычно находится в интервале высот 100 – 120 км. Высота регулярного слоя $F1$ с максимальной степенью ионизации в дневное время находится в интервале высот 140 – 210 км.

Слой $F2$ играет доминирующую роль в коротковолновой радиосвязи и радиолокации. Характе-

ристики этого слоя наиболее изменчивы во времени и пространстве. Максимальный уровень N_e наблюдается главным образом значительно позднее полудня в интервале высот от 250 до 400 км. Нерегулярная характеристика слоя $F2$ определяется воздействием магнитного поля Земли. Подробнее зависимость параметров ионосферы от СА рассмотрена в работах [5, 6].

Модели построения

дальностно-частотных характеристик

Применение метода ВНЗ РЛС ЗГО позволяет скорректировать используемую модель ионосферы. При определении с помощью ВНЗ каких-либо характеристик радиолинии считаются неизвестными параметры ионосферы, полученные из результатов сеанса вертикального зондирования (ВЗ), поэтому применение совместного зондирования методами ВЗ и ВНЗ должно повышать информативность диагностики условий распространения радиоволн. Численная оценка для конкретной трассы уже проводилась автором ранее [7]. Для нахождения информации на участках за пределами зоны эффективного отражения необходимо разрабатывать приближенные модели построения дальностно-частотных характеристик (ДЧХ), с помощью которых путем аппроксимации и удастся экстраполировать интересующую ДЧХ на большие дальности. В работе Ю. К. Свешникова и М. П. Зубкова [8] проведено сравнение нескольких современных моделей построения ДЧХ ВНЗ по критерию наименьшего отклонения по дальности относительно экспериментальных данных, полученных при совмещенном методе вертикального ВНЗ ионосферы с целью выбора оптимальной модели для экстраполяции экспериментальных данных за пределами области эффективного отражения.

Методические основы получения статистической погрешности прогнозирования параметров регулярных слоев

Долгосрочная модель регулярных слоев ионосферы предназначена для расчета месячного медианного (фонового) состояния ионосферы Земли для заданного уровня СА, соответствующей выбранному году и номеру месяца в году. СА характеризуется 12-месячным сглаженным числом солнечных пятен (индекс R_{12}) и эффективным ионосферным индексом T . Указанные индексы, как за предыдущие годы, так и спрогнозированные на будущее, доступны через информационно-коммуникационную сеть «Интернет» [9].

Для оценки ионосферы применяются следующие основные частотные и высотные характеристики:

– f_0E – критическая частота О-компоненты самого низкого слоя в области E ;

– f_0F1 – критическая частота О-компоненты, отраженной от слоя $F1$;

– f_0F2 – критическая частота О-компоненты, отраженной от слоя $F2$;

– h_mF2 – минимальная действующая высота слоя $F2$;

– $M(3000)F2$ – коэффициент, показывающий отношение максимально применимой частоты (МПЧ) к критической частоте слоя $F2$ при наклонном падении на расстоянии скачка, равном 3000 км;

– ТЕС (Total electron content) – полное электронное содержание в ионосфере.

Таким образом, для прогнозирования параметров ионосферы необходим программный комплекс, способный обеспечивать расчет и отображение:

1. Карты распределения параметров f_0E , f_0F1 , f_0F2 , h_mF2 , $M(3000)F2$, ТЕС для заданного года, дня месяца и времени суток (мировое время – UT или местное время – LT).

2. Суточные вариации параметров f_0E , f_0F1 , f_0F2 , h_mF2 , $M(3000)F2$, ТЕС для заданного года, дня месяца в заданной точке (широта и долгота места).

3. Высотное распределение электронной концентрации $N_e(h)$ для заданного года, дня месяца, времени UT или LT в заданной точке (широта и долгота места).

Расчет ионосферных параметров проводится для интересующего региона исследования, либо в случае РЛС ЗГО для области отражения радиоволн от ионосферы. Результаты расчета являются дискретными функциями координат и времени. Для расчета в модели ионосферы принимаем, что медианные значения параметров ионосферы Земли должны задаваться с пространственной дискретностью, которая определяется величиной порядка 250 км или $2,5^\circ$ по долготе и $2,5^\circ$ по широте. Каждому участку присваивается номер i , при этом $i = 1 \dots i_{\max}$.

Пространственная дискретность определяется областью ионосферы, ответственной за проникновение волновых пакетов КВ-диапазона в зону обзора РЛС ЗГО. Размер ионосферной области по азимуту 60 градусов, по дальности – от 400 до 1450 км. Центры этих участков определяются координатами узловых точек. В узловых точках задаются медианные значения ионосферных параметров с определенным временным дискретом. Радиолокационные координаты узловых точек должны определяться:

– азимутальным направлением на узловую точку;

– дальностью от места дислокации изделия до узловой точки.

Временные интервалы получения экспериментальных данных определяются стандартным интервалом работы ионозондов ВЗ – 15 минут или 60 минут [10]. Параметры ионосферных слоев f_0E ,

f_0F1 и f_0F2 рассчитываются с темпом 15 минут. Каждому временному интервалу присваивается номер j , при этом $j = 1 \dots j_{\max}$. Для более точных расчетов используются истинные координаты ионозонда ВЗ, расположенного в узловой точке j .

Таким образом, ионосферная область, расположенная над интересующим регионом, разбита на i_{\max} участков размером порядка 150×250 км. Временные интервалы, в которых получают экспериментальные данные, разбиты на j_{\max} пятнадцатиминутных отрезков времени. Каждому измерению присваивается его местное время. Для этого местного времени и для заданных координат модель производит расчеты параметров f_0E , f_0F1 и f_0F2 при отсутствии коррекции $\lambda = 1$ и наличии коррекции $\lambda = Z$.

Таким образом, формируются массивы измеренных на ионозондах ВЗ величин: $\{f_0E\}_{i,j,\Delta}$, $\{f_0F1\}_{i,j,\Delta}$, $\{f_0F2\}_{i,j,\Delta}$ и массивы $\{f_0E\}_{i,j,M}$, $\{f_0F1\}_{i,j,M}$, $\{f_0F2\}_{i,j,M}$ величин, рассчитанных на модели ионосферы РЛС ЗГО.

Сформированные массивы используются для получения статистической погрешности прогнозирования критических частот регулярных слоев ионосферы E , $F1$, $F2$.

Оценка статистической погрешности прогнозирования критических частот регулярных слоев ионосферы

Для среднеширотных областей ионосферы статистическая погрешность прогнозирования критических частот регулярных ионосферных слоев f_0E , f_0F1 и f_0F2 определяется средним квадратическим отклонением экспериментальных значений $(f_0E)_{\Delta}$, $(f_0F1)_{\Delta}$ и $(f_0F2)_{\Delta}$ от прогнозируемых (модельных) значений $(f_0E)_M$, $(f_0F1)_M$ и $(f_0F2)_M$ соответственно [11].

В качестве исходных данных используются массивы:

– экспериментальных величин $\{f_0E\}_{i,j,\Delta}$, $\{f_0F1\}_{i,j,\Delta}$, $\{f_0F2\}_{i,j,\Delta}$, измеренных на ионозондах вертикального зондирования;

– прогнозируемых (модельных) величин $\{f_0E\}_{i,j,M}$, $\{f_0F1\}_{i,j,M}$, $\{f_0F2\}_{i,j,M}$, рассчитанных на модели ионосферы РЛС ЗГО.

На рис. 1 представлены примеры временной вариации параметров f_0E (а) и f_0F1 (б) для значений выше 1 МГц.

Из экспериментальных и модельных данных формируются относительные погрешности единичных оценок по формулам:

$$(f_0E)_e = \frac{(f_0E)_{i,j,\Delta} - (f_0E)_{i,j,\Delta}}{(f_0E)_{i,j,\Delta}}; \quad (1)$$

$$(f_0F1)_e = \frac{(f_0F1)_{i,j,\Delta} - (f_0F1)_{i,j,\Delta}}{(f_0F1)_{i,j,\Delta}}; \quad (2)$$

$$(f_0F2)_e = \frac{(f_0F2)_{i,j,\Delta} - (f_0F2)_{i,j,\Delta}}{(f_0F2)_{i,j,\Delta}}; \quad (3)$$

в которых $i_{\Delta} = i_M$, $j_{\Delta} = j_M$, $e = 1$ – модель без коррекции; $e = 2$ – модель с коррекцией. Без коррекции R_{12} – прогнозируемая величина на следующий месяц, коррекция R_{12} – текущей величиной R_{12} , скользящее среднее число солнечных пятен за 12 месяцев.

Далее формируются множества $\{f_0E\}_{e,n}$, $\{f_0F1\}_{e,n}$, $\{f_0F2\}_{e,n}$ дискретных значений единичных оценок, которые используются для определения соответствующих статистических погрешностей прогнозирования Δf_0E , Δf_0F1 и Δf_0F2 . Предполагается, что массивы дискретных значений множеств относительных погрешностей единичных оценок подчиняются нормальному закону, который зависит от двух параметров среднего – M и дисперсии σ^2 . Оценка M и σ проводится вычислением выборочного значения этих величин. При этом погрешность вычисления тем меньше, чем больше объем выборки n – число элементов в выборке.

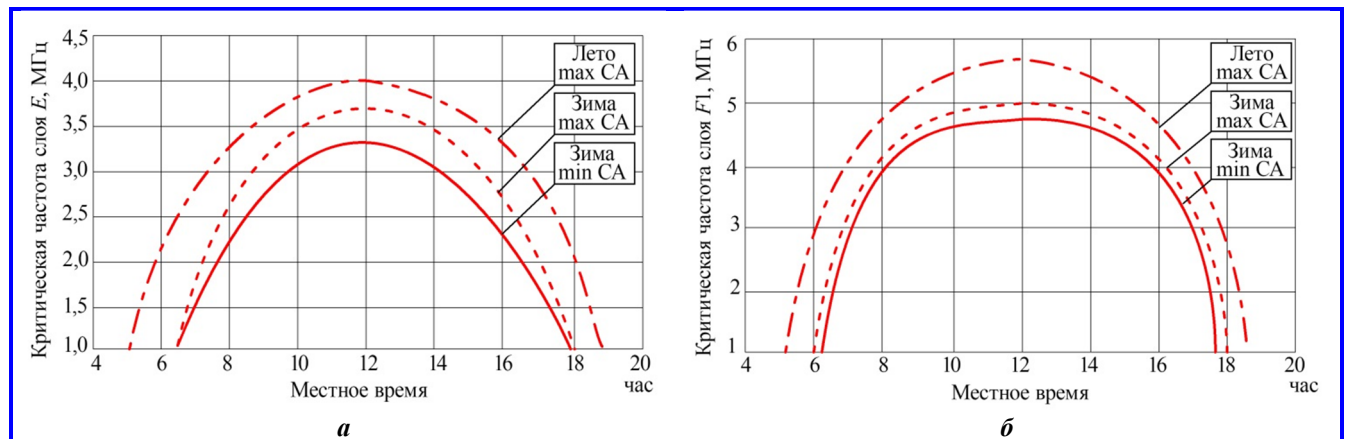


Рис. 1. Качественная картина вариаций критической частоты слоя E (а) и слоя $F1$ (б) в зависимости от времени, сезона и солнечной активности

Далее для сокращения описания множества дискретных значений $\{f_0E\}_{e,n}$, $\{f_0F1\}_{e,n}$, $\{f_0F2\}_{e,n}$ заменим множеством $\{x\}_{e,n}$. Принимается, что статистическая погрешность прогнозирования определяется положительным значением квадратного корня из централизованного момента второго порядка, который определяется по формуле:

$$\sigma_x = \text{СКО}_x = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{n_{\max}} (x_n - x)^2}{n - 1}}, \quad (4)$$

где n – количество дискретных значений относительных погрешностей единичных оценок.

Определяется доверительное значение случайной погрешности прогнозирования. Принимается, что доверительное значение случайной погрешности прогнозирования параметров ионосферы (в частности f_0) есть ее максимальное значение с указанной доверительной вероятностью P_d , то есть сообщение, что часть реализаций погрешности с вероятностью $1 - P_d = q$ может быть больше указанного значения погрешности. В этом случае пример записи результатов выглядит следующим образом: $\Delta_{0,9}$ при $P_d = 0,9$ или $\Delta_{0,95}$ при $P_d = 0,95$. Переход от оценки σ_x к квантильной оценке погрешности прогнозирования с заданной доверительной вероятностью P_d проводится по формуле:

$$\Delta_P = t_H \times \sigma_x, \quad (5)$$

где t_H – нормированная квантиль нормального распределения для заданной вероятности P_d . Значения нормированных квантилей нормального распределения для ряда уровней значимости $q = 1 - P_d$, где P_d – двусторонняя вероятность для $n \geq 30$, приведена в табл. 1.

При квантильной оценке Δ_P при малом числе наблюдений $n < 30$ используется распределение Стьюдента. Квантили распределения Стьюдента для двухстороннего симметричного доверительного интервала приведены в табл. 2.

Использование данных табл. 2 состоит в том, что при $n < 30$ доверительное значение погрешности оценки σ_x находится по формулам $\Delta_{0,9} = t_{H,0,9} \times \sigma_x$ или $\Delta_{0,95} = t_{H,0,95} \times \sigma_x$.

При уменьшении объема выборки n значения t_H Стьюдента резко возрастают. Однако при $n > 8$ отличие квантилей распределения Стьюдента от квантилей нормального распределения составляет уже менее 20%.

Таблица 1

Значения нормированных квантилей (нормальное распределение)

$q = 1 - P_d$	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
P_d	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
t_H	1,28	1,64	1,96	2,33	2,58

Таблица 2

Значения нормированных квантилей (распределение Стьюдента)

n	2	3	4	5	7	10	15	20	30
$t_{H,0,9}$ для $P_d = 0,9$	6,31	2,92	2,35	2,13	1,94	1,83	1,76	1,73	1,70
$t_{H,0,95}$ для $P_d = 0,95$	12,7	4,30	3,18	2,78	2,45	2,26	2,14	2,09	2,04

Анализ результатов оценки статистической погрешности прогнозирования критических частот регулярных слоев ионосферы

Если в результате оценки статистической погрешности прогнозирования f_0E и f_0F1 установлено, что доверительное значение случайной погрешности прогнозирования Δ_P с двухсторонней вероятностью $P_d \geq 0,9$ не будет превышать для слоя E величины $\Delta_{P,E} \leq 0,2$ МГц, а для слоя $F1$ величины $\Delta_{P,F1} \leq 0,3$ МГц, то принимается решение, что данная реализация модели ионосферы (с коррекцией или без коррекции) может быть использована в интервале дальностей $\Delta D \in [D_{\min}, D \leq 1800 \text{ км}]$ [12].

В этом случае возможно использование квази-параболической аппроксимации $N_e(h)$ профиля регулярного слоя E или слоя $F1$ с учетом кривизны Земли при определении МПЧ, $K\tau$, $\delta\beta$ на заданный интервал дальности. Квазипараболическая аппроксимация $N_e(h)$ профиля:

$$N_e(h) = N_{\max} \left[1 - \left(\frac{h_m - h}{Y_T} \times \frac{h_H + R}{h + R} \right) \right], \quad (6)$$

где h_H – высота начала слоя; R – радиус Земли; Y – полутолщина ионосферного слоя; N_{\max} – электронная концентрация в максимуме слоя E или $F1$ на высоте h_m .

Статистическая погрешность прогнозирования критической частоты f_0F2 , полученная при различных видах коррекции модели, позволяет оценить эффективность коррекции. Для оценки эффективности коррекции определяется разность

$$\Delta_{P,F2,e=1} - \Delta_{P,F2,e=2} = \delta F_{2,e}, \quad (7)$$

которая должна быть значимо больше нуля. В противном случае делается вывод, что принятый вари-

ант коррекции для реализованной модели ионосферы непригоден. Если $\delta_{F2} \gg 0$, то проверка осуществляется для статистических погрешностей прогнозирования МПЧ, $K\tau$, $\delta\beta$.

Дискретная многолучевость

Дискретная многолучевость связана с приходом в заданную точку земной поверхности нескольких скачковых мод [13]. Для моностатической схемы построения загоризонтных радаров радиолокационные трассы содержат две радиотрассы прямого и обратного распространения радиоволн соответственно: передатчик – ионосфера – удаленная точка; удаленная точка – ионосфера – приемник.

На рис. 2 и 3 передатчик (T) и приемник (R) расположены в одной точке (T, R). Ионосфера определена регулярным слоем E , виртуальная высота отражения радиоволны от которого обозначена hE , и регулярным слоем $F2$, виртуальная высота отражения от которого обозначена $hF2$.

Передатчик нагружен на антенну, которая излучает зондирующий сигнал на частоте f в секторе углов места $\delta\theta$. При $f < \text{МПЧ}$ волна отражается от ионосферы, падает на поверхность Земли (точки x_1 и x_2 на рис. 2 и 3). Основная часть энергии зеркально отражается от земной поверхности и распространяется дальше в направлении от передатчика. Небольшая часть энергии радиоволны рассеивается земной поверхностью в обратном направлении и после отражения от регулярного слоя ионосферы возвращается в точку T, R . Рассеянный сигнал содержит информацию об условиях ионосферного распространения. При расстоянии между передающей и приемной антеннами много меньше наземной дальности до удаленных точек x_1 и x_2 допустим принцип эквивалентности (взаимности) параметров ионосферных трасс.

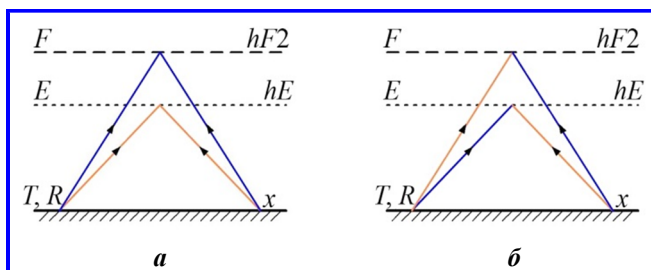
Рассматривая схему односкачкового распространения при наличии двух отражающих слоев E и $F2$ (см. рис. 2), видно, что отраженная в обратном направлении радиоволна может распространяться как через тот же слой, что и прямая волна, так и через другой слой. То есть при ВНЗ попадание сигнала в приемник может происходить по четырем трассам распространения. Система обозначения этих трасс может быть представлена следующим образом: $E - E$; $F - F$; $E - F$; $F - E$ – где первая буква соответствует прямому распространению, вторая – обратному.

Главное следствие многолучевого распространения, с точки зрения работы РЛС ЗГО, состоит в том, что от одиночной цели может быть принято несколько эхо-сигналов с разными задержками, доплеровскими смещениями и углом места прихода. С другой стороны, наличие траекторий $E - F$

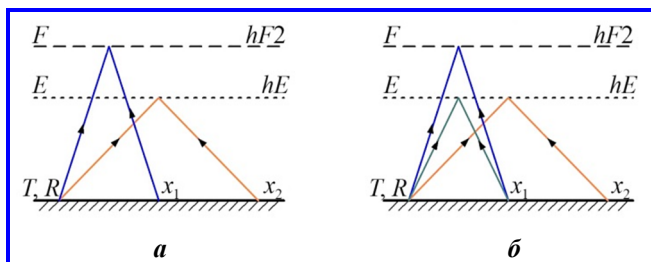
и $F - E$ с одинаковыми задержками может привести к глубокому и быстрому замиранию из-за взаимной интерференции эхо-сигналов.

На рис. 3 приводится ситуация, когда эхо-сигналы от различных источников рассеяния, расположенных в точках x_1 и x_2 , попадают на вход приемного устройства радиолокатора по разным траекториям, но с одинаковой задержкой. Таким образом, на входе приемного устройства могут произойти интерференции эхо-сигналов, прошедших через ионосферу различными путями, что приводит к наложению сигналов различных мод в объемном элементе разрешения. Интерференция эхо-сигналов может привести к изменениям доплеровской частоты сигнала и его уширению в области доплеровских частот. Такая ситуация может негативно сказаться на способности РЛС ЗГО обеспечивать решение задач обнаружения и сопровождения целей.

Управление угломестной диаграммой направленности (ДН) приемной или передающей антенн (но не сразу двух ДН) не обеспечивает достаточной защиты от загрязнения доплеровского спектра, обусловленного многолучевым сценарием двуправленного распространения. Рассмотрим пример выбора приемной антенной угла места, который соответствует приему моды $E - E$. Согласно рис. 3, на этом угле места, помимо моды $E - E$, присутствует мода $F - E$, отраженная на прямом пути от слоя F . Для минимизации влияния сигнала мод F



**Рис. 2. Моды распространения сигналов возвратно-наклонного зондирования при рассеянии от точки x :
а – $E - E$ и $F - F$ двукратное отражение от одного слоя;
б – $E - F$ и $F - E$ смешанно-слойное отражение**



**Рис. 3. Моды распространения сигналов возвратно-наклонного зондирования при рассеянии от точек x_1 и x_2 , длина пути от точек x_1 и x_2 одинакова;
а – углы места разные; б – примерно равны**

необходимо уменьшить коэффициент усиления (КУ) передающей антенны на углах места, соответствующих подсветке слоя F . В этом случае слой F не облучается, а распространяются только моды $E - E$ и $E - F$. Таким образом, селекция эхо-сигнала от слоя E на приеме возможна с помощью угломестной подстройки ДН приемной антенны и минимизации КУ передающей системы в угломестной плоскости в направлении на слой F . В результате этого на входе приемной антенны остается только желательная доминантная мода распространения $E - E$. К сожалению, подобный метод селекции мод за счет формирования однолучевой ДН для передачи и приема невозможен для всего диапазона дальностей загоризонтных РЛС, так как данные об углах места полезной и нежелательной моды эхо-сигнала не только априорно неизвестны, но также являются функцией рабочей частоты и дальности.

На настоящем этапе возможна только реализация алгоритма коррекции ширины и конечной частоты диапазона оптимальных рабочих частот (ОРЧ) $\Delta F_{\text{ОРЧ}}$ путем получения частотной зависимости ширины доплеровского спектра частот $\delta f_{\text{Д},10}$ – занимаемой узкополосной компонентой сигнала. Предполагается, что диапазон частот, в котором наблюдается минимальная ширина $\delta f_{\text{Д},10}$ на уровне минус 10 дБ, соответствует диапазону с минимальным количеством мод.

Таким образом, последовательность решения задачи определения ширины и конечной частоты $\Delta F_{\text{ОРЧ}}$ следующая:

1. Определяется МПЧ (ΔD) на заданный интервал дальности.
2. Определяется конечная частота диапазона $\Delta F_{\text{ОРЧ}}$: $F_{\text{К, ОРЧ}} = 0,85 \times \text{МПЧ} (\Delta D)$.
3. Определяется начальная частота диапазона $\Delta F_{\text{ОРЧ}}$: $f_{\text{Н, ОРЧ}} = 0,05 \times f_{\text{К, ОРЧ}}$.
4. Определяется $\Delta F_{\text{ОРЧ}}^*$ по критерию $\delta f_{\text{Д},10 \text{ min, min}}$.
5. Участок совпадения $\Delta F_{\text{ОРЧ}}$ и $\Delta F_{\text{ОРЧ}}^*$ является уточненным диапазоном оптимальных рабочих частот.

Заключение

Принято считать, что процесс загоризонтного обнаружения может быть описан в виде сочетания отдельных теоретических фрагментов и их стыковки на основании радиофизического моделирования и эксперимента. В соответствии с этим создание РЛС ЗГО сопряжено с рядом допущений, при этом предполагается, что допущения подлежат последо-

вательному обоснованию в части дополнения теорией и подтверждения теории результатами работы.

Расхождение фактических данных с прогностическими имеет большое значение с точки зрения обеспечения заданных параметров РЛС ЗГО. Именно по этой причине применяется модель ионосферы, корректируемая результатами измерений, проведенных на средствах ионосферных наблюдений. Предполагается, что корректируемая модель ионосферы обеспечивает снижение погрешности определения МПЧ, K_t , $\delta\beta$, которые используются при определении координат обнаруженных целей.

Погрешность определения координат обнаруженных целей определяется:

- погрешностью определения и прогнозирования параметров $Ne(h)$ профиля и K_t , $\delta\beta$ в модели ионосферы;
- погрешностью, которая определяется методом учета этих параметров в алгоритме обнаружения РЛС ЗГО.

Разработаны методические положения оценки статистической погрешности прогнозирования f_0E , f_0F1 и f_0F2 в модели ионосферы, применяемой в РЛС ЗГО, без коррекции и с коррекцией.

Также необходимо учитывать фактор дискретной многолучевости, который связан с приходом в заданную точку земной поверхности нескольких скачковых мод. Для разнесенной схемы построения РЛС ЗГО радиолокационные трассы содержат две радиотрассы прямого и обратного распространения радиоволн соответственно.

Литература

1. Зависимость надежности связи в декаметровая радиолнии от выбора рабочей частоты с учетом сигнально-помеховой обстановки и диффузности ионосферы / В. П. Пашицев, А. Д. Скорик, С. А. Коваль [и др.] // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 4. – С. 300–322. – DOI : 10.24411/2410-9916-2019-10412.
2. Расчеты РЛС загоризонтного обнаружения «Контейнер» заступили на боевое дежурство в 2019 году // Министерство обороны Российской Федерации (Минобороны России). Департамент информации и массовых коммуникаций Министерства обороны Российской Федерации : [сайт]. – 01.12.2019. – URL : https://function.mil.ru/news_page/country/more.htm?id=12264487 (дата обращения: 21.09.2022).
3. Аспекты построения антенн для радиозатменного метода диагностики ионосферы / А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев, П. А. Шмачилин [и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2020. – № 1-1. – С. 188–189.
4. Джузеппе А. Фабрицио Высоочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение / перевод с английского

- Н. Л. Бирюкова [и др.] ; под редакцией д. т. н., д. э. н., проф. С. Ф. Боева. – Москва : Техносфера, 2018. – 935 с.
5. Особенности регулярных слоев ионосферной плазмы / В. Ю. Салеев, С. В. Литвинов, Г. А. Милорадов [и др.] // Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты: сборник трудов Национальной научно-практической конференции : под. ред. С. У. Увайсова. – Москва : РГУ МИРЭА, 2022. – С. 335–340.
6. Котонаева Н. Г. Модели ионосферы и их коррекция по оперативной информации с ионосферной наблюдательной сети / Н. Г. Котонаева, М. В. Коломин, В. В. Михайлов // Метеорология и гидрология. – 2021. – № 3. – С. 77–85. – DOI : 10.52002/0130-2906-2021-3-77-85.
7. Литвинов С. В. Сравнение ошибок расчета измерения дальности до цели по Земле в загоризонтной радиолокации при различных методах определения параметров ионосферы // Общество. Наука. Инновации (НПК – 2022): Сборник статей XXII Всероссийской научно-практической конференции : В 2-х томах. Киров, 11 – 29 апреля 2022 года. – Киров : Вятский государственный университет, 2022. – Т. 2. – С. 358–365.
8. Свешников Ю. К. Сравнение моделей построения дистанционно-частотных характеристик по результатам вертикального и возвратно-наклонного зондирования ионосферы земли / Ю. К. Свешников, М. П. Зубков // Техника радиосвязи. – 2012. – № 17. – С. 18–26.
9. Статистическое моделирование относительных вариаций критических частот области F ионосферы / Ю. К. Калинин, Н. П. Сергеев, А. Л. Дзвонковская [и др.] // Геомагнетизм и аэрномия. – 2010. – Т. 50. – № 1. – С. 67–71.
10. Гивишвили Г. В. Оценка ионосферного поглощения радиоволн по одной ионограмме вертикального зондирования / Г. В. Гивишвили, Н. П. Данилкин, М. Ю. Филиппов // Геомагнетизм и аэрномия. – 2016. – Т. 56. – № 1. – С. 86–92. – DOI : 10.7868/S0016794016010065.
11. Мандрикова О. В. Прогнозирование данных критической частоты ионосферы на основе многокомпонентной модели / О. В. Мандрикова, Н. В. Глушкова // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2013. – № 23. – С. 22–28.
12. Шейнер О. А. Прогностическая оценка критической частоты слоя F2 ионосферы по наблюдениям радиоизлучения в периоды регистрации корональных выбросов массы на коронографах // Physics of Auroral Phenomena. – 2021. – Т. 44. – № 1. – С. 158–162. – DOI : 10.51981/2588-0039.2021.44.037.
13. Пашинцев В. П. Структурно-многолучевой подход к разработке пространственно-временной модели одномодового декаметрового канала связи с диффузной многолучевостью / В. П. Пашинцев, С. А. Коваль, В. А. Цимбал // Журнал радиоэлектроники. – 2022. – № 6. – DOI : 10.30898/1684-1719.2022.6.3.

Поступила в редакцию 14.12.2022

*Святослав Викторович Литвинов, преподаватель кафедры РЭСК,
т. (499)215-65-65, e-mail: litvinov_s@mirea.ru.*

*Владимир Олегович Скрипачев, кандидат технических наук, доцент кафедры РЭСК.
(МИРЭА – Российский технологический университет).*

ESTIMATION OF FORECASTING ERRORS PARAMETERS OF REGULAR IONOSPHERE LAYERS

S. V. Litvinov, V. O. Skripachev

The article deals with the issue of inaccuracy of ionospheric parameters determination. The features of regular layers of ionospheric plasma and models of construction of range-frequency characteristics affecting the accuracy of estimation of ionospheric parameters are considered. The methodological basis for obtaining statistical error in predicting parameters of regular layers is analyzed in detail. Analysis of multibeam radar paths of OTH-radars is carried out and an algorithm for determining the optimum operating frequencies is proposed.

Keywords: ionosphere, OTH-radars, ionospheric layers, statistical error, multibeam radio traces, over-the-horizon detection.

References

- Decameter radio line communication reliability dependence of the operating frequency choice taking into account the signal-noise situation and ionosphere diffuseness / V. P. Pashintsev, A. D. Skorik, S. A. Koval' [at al.] // Systems of Control, Communication and Security. – 2019. – No. 4. – P. 300–322. – DOI : 10.24411/2410-9916-2019-10412.
- Calculations of the «Container» over-the-horizon detection radar began combat duty in 2019 // Directorate of Media service and Information Ministry of Defence of the Russian Federation : [website]. – 01.12.2019. – URL : https://function.mil.ru/news_page/country/more.htm?id=12264487 (date of access: 21.09.2022).
- Aspects of antenna construction for radio occultation method of ionosphere diagnosis / A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev, P. A. Shmachilin [at al.] // Microwave Technology and Telecommunication Technologies. – 2020. – № 1-1. – P. 188–189.

4. Fabrizio G. A. High Frequency Over-the-Horizon Radar / G. A. Fabrizio // 2019 IEEE Radar Conference (RadarConf). – Boston, MA, USA, 2019. – P. 1–166. – DOI : 10.1109/RADAR.2019.8835812.
5. Features of regular layers of ionospheric plasma / V. Y. Saleev, S. V. Litvinov, G. A. Miloradov [at al.] // Fundamental, search, applied research and innovation projects: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference : ed. S. U. Uvaisov. – Moscow : RTU MIREA, 2022. – P. 335–340.
6. Kotonaeva N. G. Ionosphere Models and Their Correction Using Operational Data from the Ionospheric Observation Network / N. G. Kotonaeva, M. V. Kolomin, V. V. Mikhailov // Russian Meteorology and Hydrology. – 2021. – Vol. 46. – No. 3. – P. 187–193. – DOI : 10.3103/S1068373921030079.
7. Litvinov S. V. Comparison of errors in calculating the measurement of range to the target on the ground in the over-the-horizon radiolocation at different methods of determining the parameters of the ionosphere / S. V. Litvinov // Society. Science. Innovations (NPC – 2022) : Collection of articles of XXII All-Russian Scientific and Practical Conference : In two volumes. Kirov, April 11 – 29, 2022. – Kirov : Vyatka State University, 2022. – Vol. 2. – P. 358–365.
8. Sveshnikov Y. K. Comparison of models for constructing remote-frequency characteristics based on the results of vertical and return-slant sounding of the earth ionosphere / Y. K. Sveshnikov, M. P. Zubkov // Radio Communications Technique. – 2012. – № 17. – P. 18–26.
9. Statistical modeling of relative variations in the critical frequencies of the ionospheric F region / Y. K. Kalinin, N. P. Sergeenko, A. L. Dzvонkovskaya [at al.] // Geomagnetism and Aeronomy. – 2010. – Vol. 50. – No. 1. – P. 64–68. – DOI : 10.1134/S0016793210010081.
10. Givishvili G. V. Estimation of ionospheric radiowave absorption based on one vertical sounding ionogram / G. V. Givishvili, N. P. Danilkin, M. Y. Filippov // Geomagnetism and Aeronomy. – 2016. – Vol. 56. – No. 1. – P. 80–86. – DOI : 10.1134/S0016793216010060.
11. Mandrikova O. V. Prediction of critical frequency data of the ionosphere based on a multicomponent model / O. V. Mandrikova, N. V. Glushkova // Bulletin of Kamchatka State Technical University. – 2013. – № 23. – P. 22–28.
12. Sheiner O. A. Predictive estimation of the critical frequency of the F2 layer of the ionosphere from radio emission observations during periods of coronal mass ejection registration on coronagraphs / O. A. Sheiner // Physics of Auroral Phenomena. – 2021. – Vol. 44. – № 1. – P. 158–162. – DOI : 10.51981/2588-0039.2021.44.037.
13. Structural-multipath approach to the development of a space-time model of a single-mode decameter communication channel with diffuse multipath / V. P. Pashintsev, S. A. Koval, V. A. Tsimbal [at al.] // Journal of Radioelectronics. – 2022. – № 6. – DOI : 10.30898/1684-1719.2022.6.3.

*Svyatoslav Viktorovich Litvinov, lecturer at the Department of RSC,
tel.: (499)215-65-65, e-mail: litvinov_s@mirea.ru.
Vladimir Olegovich Skripachev, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of RSC.
(MIREA – Russian Technological University).*