

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

С.И. Козлов, А.Н. Ляхов

PROBABILISTIC IONOSPHERE MODELS FOR RADIOWAVES PROPAGATION

S.I. Kozlov, A.N. Lyakhov

В лекции обсуждается вероятностно-статистический подход, объединяющий моделирование пространственных случайных полей радиофизических параметров среды (с определенными из экспериментальных данных корреляционными параметрами) и моделирование распространения радиоволн выбранного частотного диапазона. Выходными параметрами модели являются плотности вероятности заданных радиофизических характеристик, необходимые в практических приложениях.

Under the probabilistic approach the ionospheric model includes the simulation of spatial random fields of certain parameters using existing evidence for the setup of correlation parameters and the calculation of radiowaves propagation in the given frequency range. Output model parameters are the probability density functions for the required radio-physics values.

Введение

В последние несколько десятилетий на основании многочисленных экспериментальных и теоретических исследований пришло понимание (см., например, [Зецер и др., 2012]) того, что ионосфера влияет на распространение радиоволн всех диапазонов частот, используемых на практике в гражданских и военных радиотехнических системах: СДВ, ДВ, СВ, КВ, ВЧ и СВЧ. Поэтому проблема создания моделей ионосферы различной сложности для прогноза состояния среды и распространения радиоволн указанных частот в различных гелиогеофизических условиях является весьма актуальной и стоит достаточно остро.

Все существующие сегодня модели можно разбить на исследовательские и прикладные. Первые из них прошли достаточно долгий путь с конца 60-х гг. прошлого века от простейших одномерных моделей ионосферы в диффузионном приближении с очень простой плазмохимией до огромных вычислительных комплексов, пытающихся промоделировать всю цепочку явлений – от корональных выбросов массы на Солнце до отклика нижней ионосферы Земли [Handbook..., 1996; Кринберг и др., 1986; Кринберг, Тащилин, 1984]. Самый громоздкий на сегодня вычислительный комплекс Space Weather Modelling Framework [Tott et al., 2005] включает следующие блоки: моделирование коронального выброса на Солнце, транспорт солнечного ветра, модель внутренней гелиосферы, глобальная модель магнитосферы, модель внутренней магнитосферы, модель радиационных поясов, глобальная модель ионосферы и термосферы и электродинамический блок ионосферно-магнитосферного взаимодействия. Первоочередная задача таких моделей – уточнение существующих представлений о среде и выявление механизмов передачи возмущений в системе магнитосфера–ионосфера–атмосфера, хотя при их разработке предполагалось, что с ростом вычислительных мощностей данные модели смогут использоваться и в качестве прогнозных.

Параллельно развивались и эмпирические модели ионосферы, представленные на сегодня практически только международной моделью IRI [Bilitza, 2001], вобравшей в себя ранее разработанные эмпирические модели отдельных областей ионосферы, и

набором российских ионосферных ГОСТов (см., например, [ГОСТ Р-25645.157-94, 1994]).

Результаты длительной программы верификации существующих теоретических и эмпирических моделей [Shim et al., 2012] оказались обескураживающими. Ни одна из расчетных моделей, включая ассимиляционные модели с подстройкой результатов под текущее состояние ионосферы, определяемое мировой сетью наземных и спутниковых наблюдений, не способна точно рассчитать даже такие ключевые параметры ионосферы, как концентрация и высота максимума F2-слоя ($N_m F2$ и $h_m F2$). Эмпирические модели в среднем имеют лучшие показатели, но также плохо описывают возмущенные условия, а в особенности неверно описывают ионосферу высоких широт. В части, касающейся нижней ионосферы, современная модель IRI не описывает удовлетворительно суточную и сезонную динамику амплитуд радиоволн СДВ- и ДВ-диапазонов. Следовательно, успешное решение прикладных задач прогноза распространения радиоволн по-прежнему стоит на повестке дня.

Теоретические модели «страдают» от недостаточной точности используемых эмпирических блоков, неточности входных и граничных условий, незнания и неучета ряда физических процессов.

Эмпирические модели вынужденно строятся по сети наблюдений, имеющей значительные «провалы» по территории, и дополнительно зависят от доминирования в статистике наблюдений спокойных дней.

Как правило, прикладные модели привязаны к определенному диапазону частот из-за разницы в наборе требующих учета радиофизических эффектов. Этот факт определяет требования к ионосферной модели. Так, для СДВ–ДВ-диапазона (3–300 кГц) главную роль играют D- и E-области ионосферы, которыми и можно ограничиться. А прогноз КВ-радиоканалов (1–50 МГц) требует модели ионосферы до высот 600–700 км. Распространение ВЧ- и СВЧ-радиосигналов на трассах «спутник–Земля» требует создания модели, включающей плазмосферу Земли (до высот 30 000 км). Все модели должны позволять определять пространственно-временной ход электронной концентрации N_e и эффективные частоты соударения ν_{eff} с нейтралами и ионами.

Особо обратим внимание на два очень важных обстоятельства. Во-первых, не вызывает сомнения, что ионосфера представляет собой нерегулярную, непрерывно меняющуюся среду. Во-вторых, к моделям ионосферы нужно предъявлять требования, принципиально отличающиеся от стандартных (типа согласие расчетных профилей с измерениями, совпадение расчетов с измерениями на станциях ионосферного зондирования), принятых в геофизике, а именно – расчеты радиофизических характеристик должны согласовываться с экспериментом [Козлов и др., 1978].

В прикладных задачах главным входным параметром является вероятность того или иного радиофизического параметра. Это может быть амплитуда и фаза электромагнитной волны, отношение сигнал/шум, эффективная площадь рассеяния, вероятность обнаружения цели в радиолокации, вероятность доведения сигнала в системах C^3-I (Command – Control – Communication – Intelligence). Такие вероятности зависят от параметров радиотехнических устройств и свойств ионосферы. Более того, сами устройства могут проектироваться исходя из расчетных значений вероятностей.

Таким образом, как с геофизической (многообразие возмущающих факторов, возникающих все время в разных комбинациях), так и с прикладной точки зрения (требуется не расчет параметров ионосферы сам по себе, а оценка вероятности радиофизических параметров) ионосферу целесообразно описывать статистическими, вероятностными моделями.

Перейдем к обоснованию основных принципов построения таких моделей, относящихся, по сути, к совершенно новому типу, и на некоторых примерах продемонстрируем их возможности при расчете распространения радиоволн.

Обсуждаемый класс моделей можно разбить на чисто стохастические, создаваемые на основе статистического анализа экспериментальных данных, но не сводящие этот анализ к процедурам регрессии, в отличие от существующих эмпирических моделей; и детерминированно-стохастические, в основу которых положены теоретические исследования (имеется расчетное теоретическое ядро модели), а вероятностный блок задает входные параметры. Необходимым элементом (инструментом) при построении вероятностной модели ионосферы в любом из вариантов является вычислительный код для расчета распространения радиоволн и необходимых на практике радиофизических параметров. Это отдельная задача, мы не будем ее рассматривать, предположив, что такой программный код существует, он верифицирован на практике и позволяет получать необходимые параметры.

В конечном счете в дальнейшем можно было бы попытаться разработать глобальную модель, рассматривая всю ионосферу как случайную среду.

Стохастические модели

Как сказано выше, в основе этих моделей лежит статистическая обработка экспериментальных данных по различным ионосферным параметрам с учетом солнечной и геомагнитной активности. В ре-

зультате этой обработки оцениваются математическое ожидание M , среднеквадратичное отклонение σ , плотности вероятности распределения параметров. В простейшем случае (не всегда реализуемом на практике) плотность вероятности подчинена нормальному закону распределения. В этом случае нам достаточно пары $\{M, \sigma\}$.

Первая и, по-видимому, единственная попытка разработки стохастической модели невозмущенной среднеширотной ионосферы для диапазона высот 60–450 км для задач коротковолновой загоризонтной радиолокации была предпринята более тридцати лет назад [Козлов и др., 1978]. Основные принципы ее построения были следующие. Задаваемые исходные данные: характеристики РЛС (излучаемая мощность; азимут излучения; рабочая частота f , зависящая от состояния ионосферы в вершине первого скачка; активность Солнца (индекс $F10.7$); магнитная активность (K_p -индекс); время, дата и год, когда производится расчет; географические координаты передающей (приемной) позиции; общая дальность трассы распространения R и шаг ΔR по ней, с которым надо производить расчеты $N_e(h)$, $v_{\text{eff}}(h)$ и их градиентов. Блок-схема модели состоит из блоков расчета географических координат по трассе, температуры и плотности нейтральной атмосферы по модели Яккиа-73; выбора конкретных значений $F10.7$ и K_p ; расчета $N_e(h)$ – используется феноменологическая аналитическая модель [Ching, Chin, 1973], усовершенствованная в [Козлов и др., 1978] и совмещенная с моделью D-области; температуры электронов, выражаемой на $h > 230$ км через $N_e(h)$; определения вероятности появления спорадического слоя E_s с некоторой критической частотой (оценивается по экспериментальным данным в зависимости от времени суток, сезона, солнечной и геомагнитной активности); расчета $v_{\text{eff}}(h)$ и градиентов по пути распространения на каждой высоте.

Статистическое моделирование для решения задач загоризонтной КВ-радиолокации заключается в следующем. С учетом исходных данных рассчитываются средние опорные параметры ионосферы. Затем с помощью датчиков случайных чисел, включенных в модель, в соответствии с заложенными в них законами распределения выбираются конкретные величины (получаем некоторую реализацию), которые используются для расчета затухания W КВ-радиоволны. Подобным образом делается N реализаций. Общее количество итераций определяется устойчивостью расчета W к N (привязка к затуханию необязательна, может быть использован любой другой рассчитываемый радиофизический эффект). На трассах протяженностью $R < 10000$ км сходимости по W наблюдалась в разных гелиофизических условиях при $N \leq 25-50$ с шагом $\Delta R \sim 50 \dots 100$ км. В модель вводилось критическое затухание W_k , определяемое параметрами РЛС. Если $W < W_k$, связь (обнаружение) считалась установленной. Например, в каких-то условиях сходимости по W имеет место при $N=40$, из которых в десяти случаях $W < W_k$, что означает вероятность обнаружения 0.25.

Важной методической проблемой была оценка законов распределения варьируемых (стохастических)

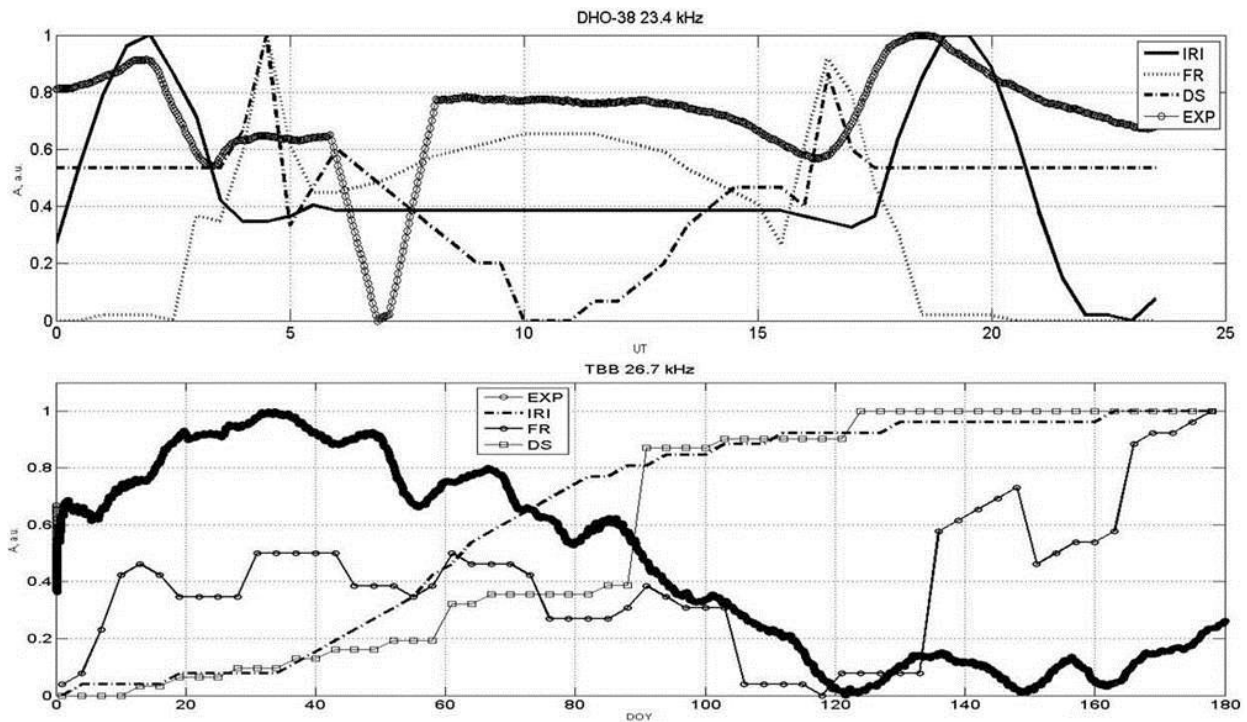


Рис. 1. Экспериментально наблюдаемый суточный ход амплитуды СДВ-сигнала передатчика DHO-38 (трасса запад–восток, верхняя панель) и сезонный ход амплитуды СДВ-сигнала передатчика TBB (трасса север–юг, нижняя панель), а также расчетные зависимости амплитуды по моделям IRI, IRI–Friedrich и Данилова–Смирновой (DS).

параметров. Ее необходимо делать на основании статистического анализа многолетних экспериментальных данных, но выбор объема этих данных, учитывая методы их получения и сильную зависимость от геофизических условий, оставался не до конца ясным. Было принято, что значения K_p и характеристики E_s-слоя (вероятность появления, характерные размеры, критическая частота) подчиняются равномерному закону распределения, а все остальные параметры – нормальному. Как показали расчеты W в различных геофизических условиях на разных трассах и их сопоставление с данными экспериментов, используемые распределения близки к реальным.

Стохастическая и детерминированно-стохастическая модель области D для расчета распространения радиоволн СДВ–ДВ-диапазона

Стимулом для разработки вероятностной стохастической модели нижней ионосферы послужил тот факт, что существующие эмпирические модели нижней ионосферы оказались не в состоянии воспроизвести экспериментальные данные по распространению радиоволн СДВ–ДВ-диапазона. На рис. 1 в качестве примера представлены результаты расчета суточного хода амплитуды сигнала передатчика DHO-38 (26.7 кГц, 53° N, 7° E) и сезонного хода амплитуды сигнала передатчика TBB (26.7 кГц, 37°41 N, 27°32 E). Экспериментальные данные получены в геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН (54°94 N, 37°73 E) с помощью приемника-измерителя ESMB Rhode&Schwarz [Егошин и др., 2012].

Принципы построения вероятностной модели близки к изложенным в предыдущем разделе для чи-

сто стохастического варианта. При задании исходных данных рабочая частота фиксировалась. Предполагалось, что главные характеристики нейтральной атмосферы – плотность и температура – мало меняются, что позволило использовать стандартную аппроксимацию для эффективной частоты соударений электронов с нейтралами:

$$v_{eff}(h) = 1.8 \cdot 10^{11} \exp(-0.15h),$$

где высота h измерена в км.

В качестве основного статистически меняющегося параметра принимается $N_e(h)$. Большая корректность по сравнению с [Козлов и др., 1978] достигается наличием достаточно емких банков данных измерений $N_e(h)$ в средних широтах [Нестерова, Гинзбург, 1985].

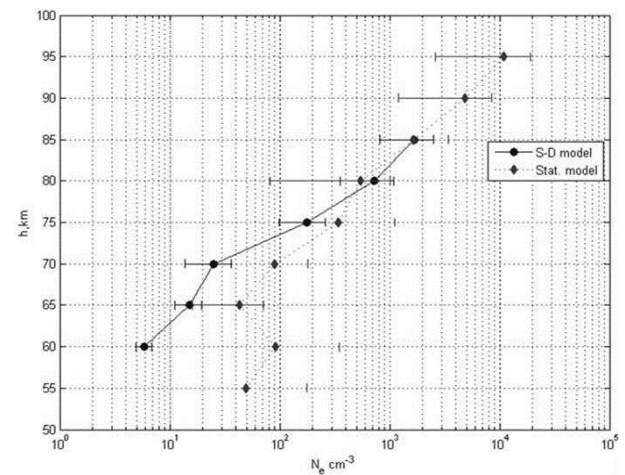


Рис. 2. Высотные профили электронной концентрации по детерминированно-стохастической (S-D) и стохастической (Stat) моделям.

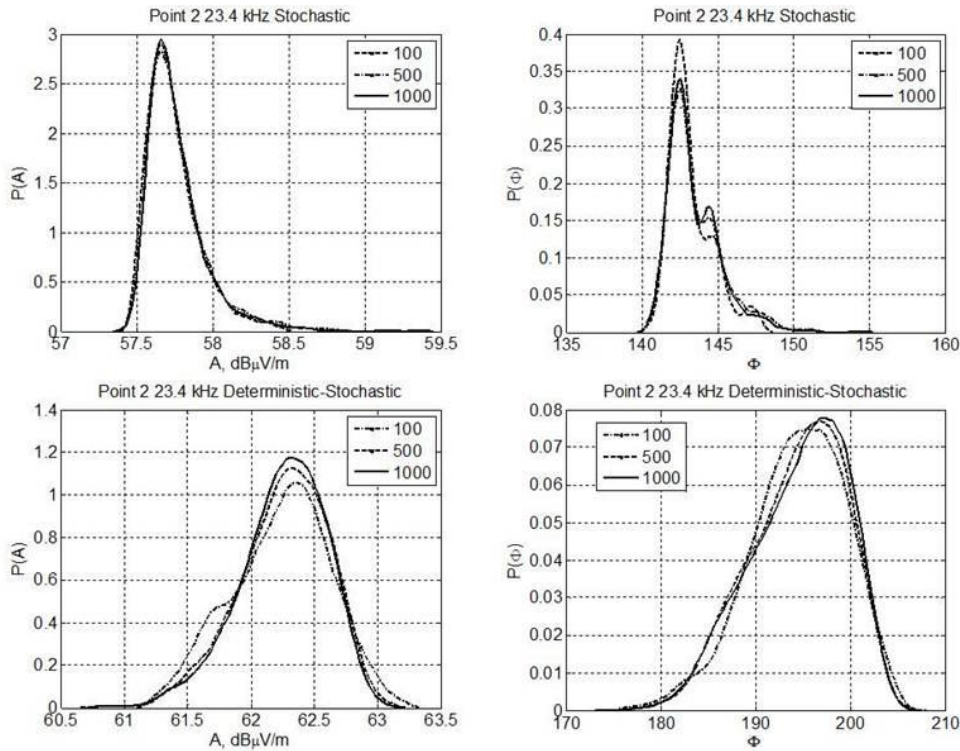


Рис. 3. Плотности вероятности амплитуды и фазы для частоты 23.4 кГц, рассчитанные по стохастической (вверху) и детерминированно-стохастической (внизу) моделям.

Расчет распространения СДВ–ДВ-радиосигнала по трассе выполнялся с помощью программного кода Long Wave Propagation Model [Fergusson, 1992, 1995]. Точностные характеристики этой программы лежат в диапазоне 4–6 дБ·м кВ/м.

Все результаты, представленные ниже, получены для зимних дневных условий при высокой солнечной активности. Для значений $N_e(h)$ принимался нормальный закон распределения, организовывался процесс генерации ансамбля ионосфер по трассе распространения (29 точек) и производился расчет амплитуды и фазы сигнала по трассе. При 1000 итераций была достигнута сходимость по амплитуде и фазе сигнала по всей трассе распространения. Отметим, что плотности вероятности для амплитуды и фазы не подчиняются нормальному закону распределения.

Прежде чем перейти к обсуждению собственно результатов, рассмотрим вариант детерминированно-стохастической модели. В этом варианте в модель было включено 5-компонентное расчетное ядро [Егошин и др., 2012] для ионов NO^+ , O_2^- , положительных и отрицательных ионов-связок Св^+ , Св^- и электронов. Входными, рандомизированными параметрами были температура нейтральной атмосферы T , H_2O , CO_2 , O_3 , коэффициенты ион-ионной α_i и диссоциативной α_d рекомбинации. Для α_i был принят равномерный закон распределения в интервале $10^{-8} \leq \alpha_i \leq 10^{-6}$, для α_d – равномерный закон распределения в интервале $10^{-8} \leq \alpha_d \leq 10^{-6}$; для $[\text{CO}_2]$ – нормальный закон распределения $10^{-5} n \leq [\text{CO}_2] \leq 10^{-3} n$, $n = [\text{O}_2] + [\text{N}_2]$; для $[\text{H}_2\text{O}]$ – нормальный закон распределения $10^{-7} n \leq [\text{H}_2\text{O}] \leq 10^{-5} n$; для T – равномерный закон распределения в интервале 200–260 К и

для озона – равномерный закон распределения в интервале $0.2[\text{O}_3]^A \leq [\text{O}_3] \leq 3[\text{O}_3]^A$, где опорный профиль $[\text{O}_3]^A$ был получен из измерений на ИСЗ EOS-Aura для зимних дневных условий.

После генерации ансамбля атмосфер были выполнены расчеты по фотохимической модели и получена сходимость электронной концентрации на всех высотах за 700–1000 итераций. Распределения N_e оказались далеки от нормальных, сильно асимметричны, с «тяжелыми» хвостами в области больших значений N_e .

Сравнение получившихся профилей $N_e(h)$ представлено на рис. 2. В интервале высот 70–85 км профиль, полученный в рамках детерминированно-стохастического подхода, хорошо согласуется с профилем, полученным по чисто стохастической модели. Расхождение в области меньших высот объясняется неадекватностью 5-компонентной модели – требуется учет большего числа малых нейтральных компонент и динамических процессов.

На рис. 3 представлены результирующие распределения плотности вероятности для амплитуды и фазы СДВ-сигнала с частотой 23.4 кГц на трассе протяженностью 2000 км, полученные при расчетах по стохастической и детерминированно-стохастической модели. За 1000 итераций достигается сходимость решения. На рисунке представлены значения в пункте приема. В остальных точках по трассе, включая область интерференционного минимума, наблюдается аналогичный результат (в смысле сходимости), хотя конкретный вид распределений меняется. Обратим внимание на качественно разный вид распределений (разносторонность асимметрии, разные средние значения). Это согласуется

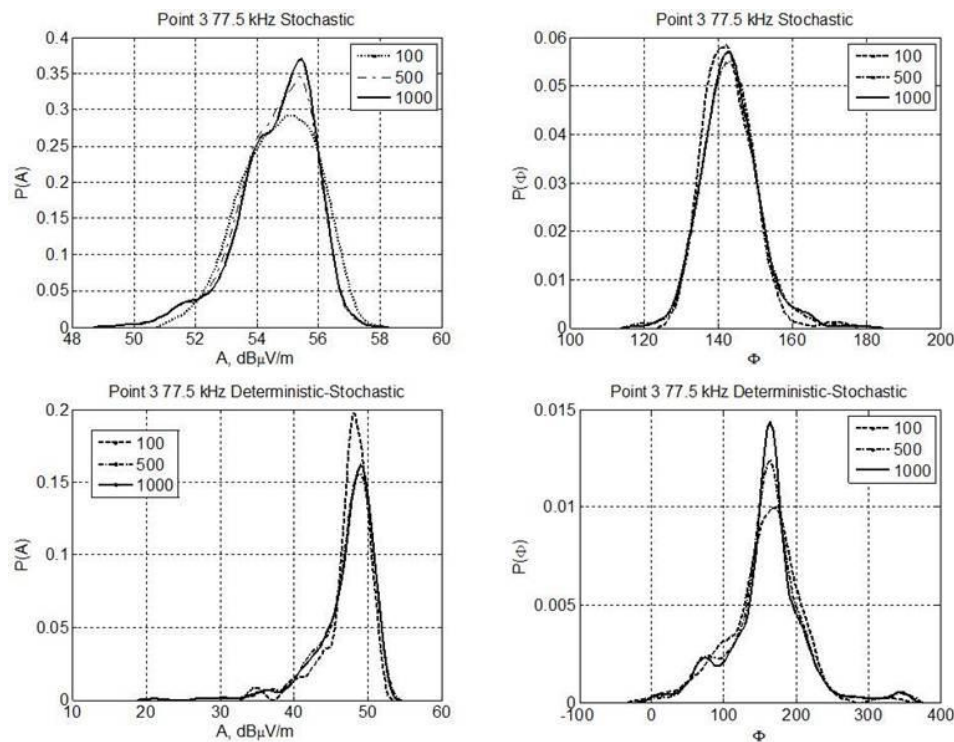


Рис. 4. Плотности вероятности амплитуды и фазы для частоты 77.5 кГц, рассчитанные по стохастической (вверху) и детерминированно-стохастической (внизу) моделям.

и с данными рис. 2 – различием ионосфер на низких высотах, где идет распространение сигнала с частотой 23.4 кГц.

На рис. 4 представлены результаты для ДВ-диапазона с частотой 77.5 кГц на трассе той же протяженности. Здесь получившиеся распределения амплитуд и фаз находятся в лучшем качественном и количественном согласии, но разброс значений для расчетов по детерминированно-стохастической модели оказался больше. Сходимость по расчету радиофизических параметров практически экспоненциальная. Наблюдаемые в расчетах по детерминированно-стохастической модели «тяжелые» хвосты в области малых амплитуд соответствуют реально наблюдаемой ситуации в экспериментальных данных многолетнего мониторинга сигналов СДВ- и ДВ-радиостанций в обсерватории «Михнево».

Представленные результаты доказывают работоспособность предложенного подхода к построению прикладных моделей ионосферы для решения задач распространения радиоволн. В заключение укажем на один исключительно важный момент при построении моделей такого класса. Успех или неуспех зависит от двух факторов. Первый – наличие верифицированной надежной программы моделирования распространения радиоволн. Второй – грамотное моделирование двумерного случайного поля ионосферных и атмосферных параметров. Ключевым здесь является задание пространственных (по высоте и по расстоянию) и временных радиусов корреляции рандомизированных параметров. В пределах заданного радиуса корреляции рандомизация выполняется с сохранением «направления», что должно соответствовать наблюдаемым пространственно-временным вариациям параметров.

Наличие экспериментальных рядов измерений радиофизических параметров позволяет, в принципе, рассматривать и обратные задачи – определение плотностей вероятности (в общем случае нестационарных) ионосферных и атмосферных параметров, таких, что найденные при моделировании законы распределения радиофизических параметров будут согласованы с экспериментально измеренными. Полученная информация позволит попробовать построить описание ионосферы как открытой статистической системы, переведя все описание ее эволюции во взаимодействии с Солнцем на язык вероятностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ Р-25645.157-94 Ионосфера Земли нижняя. Модель глобального распределения концентрации и эффективной частоты соударений электронов для прогнозирования низкочастотных радиополей. М.: Госстандарт России, 1994.
- Егошин А.А., Ермак В.М., Зецер Ю.И. и др. Влияние метеорологических и волновых процессов на нижнюю ионосферу в условиях минимума солнечной активности по экспериментальным данным о распространении СДВ–ДВ в средних широтах // Физика Земли. 2012. № 3. С. 101-112.
- Зецер Ю.И., Ляхов А.Н., Перунов Ю.М., Козлов С.И. Геофизические воздействия на системы управления, связи и навигации // Труды II Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния среды». СПб., 2012. Т. 2. С. 336.
- Козлов С.И., Бикинцев Б.Ф., Новикович В.М. Статистическая модель основных параметров невозмущенной ионосферы для расчета распространения КВ на протяженных трассах // Тезисы докладов 4 Межвед. семинара по моделированию ионосферы. Томск, 1978. С. 38–40.
- Кринберг И.А., Выборов В.И., Кошелев В.В. и др. Адаптивная модель ионосферы. М.: Наука, 1986. 132 с.

Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 1984. 189 с.

Нестерова И.И., Гинзбург Э.И. Каталог профилей электронной концентрации области D ионосферы. Новосибирск: Изд-во ИГиГ, 1985. 210 с.

Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 // Radio Sci. 2001. V. 36, N 2. P. 261–276.

Ching B.K., Chin Y.I. A phenomenological model of global ionospheric electron density in the E-, F1- and F2-regions // J. Atmos. Terr. Phys. 1973. V. 35. P. 1615–1630.

Fergusson J.A. A Review of the Ionospheric Model for the Long Wave Prediction Capability / Naval Command, Control and Ocean Surveillance Center. Technical Document 2393. November 1992.

Fergusson J.A. Ionospheric model validation at VLF and LF // Radio Sci. 1995. V. 30, N 3. P. 775–782.

Schunk R.W. Solar-Terrestrial Energy Program: Handbook of Ionospheric Models. 1996. 296 p.

Shim J.S., Kuznetsova M., Rastätter L., et al. CEDAR Electrodynamics Thermosphere Ionosphere (ETI) Challenge for systematic assessment of ionosphere/thermosphere models: Electron density, neutral density, N_mF2 , and h_mF2 using space based observations // Space Weather. 2012. V. 10, iss. 10. S10004, doi:10.1029/2012SW000851.

Toth G., Sokolov I.V., Gombosi T.I., et al. Space Weather Modeling Framework: A new tool for the space science community // J. Geophys. Res. 2005. V. 110, A12226. doi:10.1029/2005JA011126.

Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия