

Г. И. Макаров, В. В. Новиков, А. Б. Орлов. О распространении километровых и более длинных радиоволн. В докладе кратко рассмотрены вопросы прогноза распространения радиоволн в диапазоне сверхдлинных волн (СДВ). Экспериментальным и теоретическим исследованиям закономерностей распространения радиоволн СДВ-диапазона посвящено большое количество работ, ссылки на которые можно найти в обзорных статьях¹⁻³ и докладах^{4,5}.

Для повышения надежности и точности работы радиотехнических систем рассматриваемого диапазона необходим глобальный прогноз электромагнитных полей с учетом как регулярных изменений свойств ионосферы (суточных, сезонных, широтных при различной солнечной активности), так и крупномасштабных ионосферных возмущений типа ВИВ и ППШ. Прогнозирование электромагнитных полей может быть осуществлено на основе численного решения прямой задачи о поле в волноводном канале при заданных его свойствах.

К настоящему времени разработана теория распространения низкочастотных радиоволн в сферическом волноводном канале с анизотропной ионосферой, свойства которой меняются по высоте и в направлении распространения (в продольном направлении), а также с неоднородной по глубине и в продольном направлении землей. Для анализа и численных расчетов электромагнитного поля на расстояниях от источника более 500—1000 км используется представление решения в виде ряда нормальных волн (НВ), которое получается в результате применения к решению уравнений Максвелла метода поперечных сечений. Ряд НВ является, по существу, разложением решения по собственным функциям радиального (высотного) оператора задачи, коэффициенты которого (комплексные амплитуды НВ) подчиняются системе волноводных уравнений, представляющей собой бесконечную систему связанных обыкновенных дифференциальных уравнений по продольной координате. В случае слабонерегулярного волновода, относительное изменение свойств которого на длине волны мало, при отсутствии явления вырождения (совпадения собственных значений НВ в некоторой точке трассы распространения) локальные коэффициенты трансформации НВ, обусловленные нерегулярностью волновода, оказываются малыми, и с достаточной точностью при решении волноводных уравнений можно ограничиться хорошо известным приближением ВКБ, соответствующим пренебрежению трансформацией НВ. Однако в некоторых ситуациях (на переходе день—ночь при частотах порядка 5 кГц, в ночных условиях распространения в окрестности геомагнитного экватора на частотах около 10 кГц и т. п.) возникает явление вырождения, приводящее к сильной трансформации вырождаю-

шихся НВ, и нарушаются условия применимости приближения ВКБ. Для случая локального вырождения на трассе распространения при учете взаимодействия вырождающихся НВ построено единое приближенное решение волноводных уравнений, справедливое в окрестности точки вырождения и переходящее в приближение ВКБ вне ее. Найдены матрицы трансформации НВ при прохождении области вырождения, показывающие, что за областью вырождения имеет место расщепление основной падающей НВ на две, которое приводит к возникновению интерференционных эффектов.

Основной вычислительной трудностью метода поперечных сечений является нахождение собственных значений радиального оператора. В этом направлении были выполнены аналитические исследования динамики собственных значений с привлечением асимптотических и прямых вариационных методов и разработаны автоматизированные алгоритмы для расчета собственных значений, собственных функций и электромагнитных полей, обладающие сравнительно высоким быстродействием (5–10 с на одно собственное число, 4–8 мин на одну типовую неоднородную трассу при применении ЭВМ типа ЕС-1060).

Развитая теория волноводного распространения низкочастотных радиоволн не учитывает изменения свойств волноводного канала в поперечном к трассе распространения направлении, влияние которого на электромагнитное поле может оказаться существенным при близком к касательному падении НВ на неоднородность типа перехода день—ночь или границы раздела море—суша. Дальнейшего развития и создания соответствующих алгоритмов требует также задача расчета поля при наличии нескольких точек вырождения.

На малых расстояниях от источника для расчета поля целесообразно использовать представление решения в виде ряда волн, отраженных от Земли и ионосферы. Следует только отметить, что этот ряд нуждается в дополнении волнами иных типов (в частности, волной типа «шепчущая галерея»), и необходимы дальнейшие аналитические и численные исследования роли этих волн на низких частотах.

При решении прямой задачи распространения радиоволн необходимо задавать свойства волноводного канала, т. е. карты геоэлектрических разрезов Земли и высотных профилей электронной концентрации и эффективной частоты соударений электронов в нижней ионосфере. Для большей части районов СССР имеются карты электрических свойств Земли, опирающиеся в основном на геофизические данные. Сложнее обстоит дело с построением карты ионосферы. На отражение радиоволн рассматриваемых частот существенно влияют области ионосферы с небольшой электронной концентрацией порядка $10\text{--}200\text{ эл/см}^3$, для измерения которой существующие локальные радиофизические методы малопригодны. Построенные по данным этих методов эмпирические модели электронной концентрации, как правило, не определяют значения концентрации на высотах ниже 65–70 км и поэтому фактически не могут быть использованы для прогнозирования полей. Поэтому была разработана гибридная модель, в которой электронная концентрация выше 70–75 км днем и 95–100 км ночью находилась по данным локальных методов и обобщающих их моделей, а ниже (до 50 км) — на основании решения обратной задачи по данным об электромагнитных полях, измеренных в ряде пунктов⁶. Модель описывает все основные регулярные пространственно-временные изменения, включая восходно-заходную асимметрию в регулярных суточных вариациях на высотах ниже 75 км, а также авроральные эффекты для некоторой фиксированной средней возмущенности.

Проведенное всестороннее сравнение рассчитанных по модели полей СДВ с экспериментальными данными в основном для частот 10–30 кГц для различных геофизических условий (солнечная активность, время года и суток, географическое положение и протяженность трасс) показало, что,

как правило, имеющиеся расхождения не превышают точности экспериментальных данных (0,3—0,5 рад по фазе и 10—20 % по амплитуде).

При крупномасштабных ионосферных возмущениях типа ВИВ и ППШ наиболее простым, оперативным и перспективным методом прогноза СДВ-полей следует считать метод, основанный на анализе текущих СДВ-данных, полученных по сигналам радиостанций в ряде контрольных пунктов и риометрическим данным. Основой такого прогноза служат пространственно-временные модели нижней возмущенной ионосферы⁵, позволяющие пересчитывать эффекты возмущений в СДВ-поле с трассы на трассу и с частоты на частоту. Осуществленная таким образом текущая коррекция уменьшает эффекты проявления возмущений в 3—5 раз.

Материалы доклада опубликованы в работах^{1,4}.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ¹ Макаров Г. И., Новиков В. В., Орлов А. Б.//Изв. вузов СССР. Сер. «Радиофизика». 1970. Т. 13. С. 321.
- ² Орлов А. Б., Азарнин Г. В.//Проблемы дифракции и распространения волн.— Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1970.— Вып. 10. С. 3.
- ³ Ременец Г. Ф.//Ibidem.—1974.—Вып. 13. С. 3.
- ⁴ Макаров Г. И., Новиков В. В.//Тезисы докладов Всесоюзной конференции по распространению радиоволн.—М.: Наука, 1984.—Ч. 1. С. 279.
- ⁵ Макаров Г. И., Новиков В. В., Орлов А. Б.//Тезисы докладов XV Всесоюзной конференции по распространению радиоволн.—М.: Наука, 1987.— С. 205.
- ⁶ Азарнин Г. В., Колсанов В. А., Орлов А. Б.//Проблемы дифракции и распространения волн.— Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987.— Вып. 21. С. 112.