

Пономарев В.И., Горб А.И., Ксенофонтов О.А.

• МЕТОД ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ

Введение

За последние десятилетия значительно возросло практическое использование радиочастот, превышающих 30 МГц. Это в свою очередь привлекло внимание к механизмам распространения радиоволн указанного диапазона. Поскольку в обычных условиях ультракороткие волны не отражаются ионосферой, изменчивость характеристик принятого поля объясняют изменчивостью условий их распространения в нижней атмосфере, в частности вариациями показателя преломления воздуха.

Целью проводимых исследований была разработка метода дистанционного зондирования атмосферы по сигналам спутниковой радионавигационной системы (СРНС) ЦИКАДА и оценка получаемых результатов с точки зрения оперативного использования в радиосистемах, траектория распространения сигналов которых проходит по трассам Земля - космос.

Выбор методов оперативного определения параметров тропосферы является многофакторной оптимизационной задачей, основными факторами которой являются точность и стоимость прогнозов. Проведенный обширный тематический поиск и детальный анализ достижения в этой области позволяют сделать следующие общие выводы.

В группе контактных методов предпочтительнее других представляются методы, основанные на созданных в последнее время адап-

тивных моделях тропосферы. Точность оценки тропосферных задержек в зените при данных моделях не превышает 2 - 4 см. Широкое применение моделей ограничивает необходимость создания большого банка данных о высотном распределении метеопараметров в точке проведения радиотехнических измерений. Радиорефрактометры, обладающие наилучшими точностными характеристиками в группе контактных методов, так и радиозонды не позволяют организовать оперативный контроль состояния тропосферы вдоль трассы распространения радиоволны, однако могут быть рекомендованы как вспомогательное средство для реализации адаптивных моделей, а также для аттестации точности других методов оценки состояния тропосферы.

Высокими потенциальными характеристиками отмечены радиометрические методы. Среднеквадратичная ошибка восстановления высотного профиля показателя преломления при безоблачной и малооблачной атмосфере по данным СВЧ-радиометров составляет $\sim 1 - 2$ N-ед. в СВЧ диапазоне и $\sim 0.3 - 1.1$ N-ед. в оптическом диапазоне. При мощных кучевых облаках, дожде ухудшается точность, а следовательно, требуется учет этого влияния. В GPS NAVSTAR нашли применение радиометрические методы контроля состояния тропосферы.

Возможность оперативного сбора данных в глобальном масштабе с высокими пространственным, спектральным и временным разрешением обеспечивает применение активных методов ДЗ для определения параметров тропосферы. Размещенные на космических аппаратах излучатели СВЧ-диапазона с известными характеристиками и соответствующие приемники на поверхности Земли являются характерной схемой ДЗ тропосферы. Такая схема ДЗ реализована по сигналам геодезического спутника ГЕО-ИК [62, 63], навигационных спутников системы ЦИКАДА.

Информационными параметрами ДЗ были зависимости рефракционного искажения времени запаздывания (дальности), доплеровской частоты (радиальной скорости) или углов рефракции от углов места. Точность восстановленных характеристик тропосферы существенно зависит от величины погрешностей входных данных ДЗ и метода их обращения. Степень знания априорной информации сказывается на выбор устойчивого метода обращения данных ДЗ. Хотя активные методы ДЗ тропосферы на данном этапе уступают по точности радиометрическим методам, но их значительные преимущества могут быть реализованы, например, при использовании более точной эфемеридной информации (координатные погрешности менее 1 м) о спутниках, на которых установлены излучатели.

На основании полученных выводов проведены теоретические и экспериментальные исследования возможности ДЗ высотного профиля показателя преломления тропосферы по сигналам СРНС. С этой целью в теоретической части проведено математическое моделирование входных данных ДЗ, формируемых при соответствующей обработке навигационных параметров СРНС. В качестве входных данных ДЗ могут быть использованы регулярные тропосферные эффекты в навигационных параметрах таких как дальность, разность дальностей или интегральная доплеровская частота, радиальная скорость (доплеровская частота). Выбор вида входных данных ДЗ зависит от схемы наблюдения сигналов и типа СРНС. Проведен также анализ искажающих факторов ДЗ: тропосферных флуктуационных эффектов, неполной компенсации ионосферного влияния двухчастотным методом, погрешностей эфемеридной информации и геодезических определений местоположения точек приема, погрешности модели входных данных. Численный анализ

входных данных ДЗ и факторов их искажающих проведен для орбит спутников близких к орбитам низковысотных СРНС TRANSIT, ЦИКАДА.

Используя модель входных данных ДЗ — интегральное уравнение Фредгольма первого рода, проведен сравнительный анализ применимости известных устойчивых методов решения обратных задач (методов регуляризации по А.Н.Тихонову, сингулярной и статистической регуляризации, квазирешения, статистических ортогональных разложений, аналитических преобразований, восстановления спектральных компонент профиля) для восстановления высотного профиля показателя преломления тропосферы по радиоданным. Для оценки потенциальных возможностей практически всех указанных методов проведен численный анализ на тестовых высотных профилях. При этом исследовалась зависимость качества обращения от вида входных данных ДЗ, от области наблюдения (диапазона углов места), от уровня систематических и случайных искажающих факторов, от вида априорной информации, от параметров регуляризирующих алгоритмов. По результатам анализа предпочтение при восстановлении высотного профиля тропосферы по радиоданным отводится квазирешению и сингулярной регуляризации, а при восстановлении тропосферных эффектов — методу восстановления спектральных компонент.

Для практической реализации идеи ДЗ высотного профиля тропосферы проведен эксперимент, включающий единичные (в течение апреля-мая 1990г.) и суточные (3 июля 1990г.) наблюдения сигналов СРНС ЦИКАДА двумя приемниками с разнесом приблизительно 60 км, измерение метеоданных (температуры, давления, влажности) в точках приема сигналов, эксперсс-анализ экспериментальных данных. По интегральной доплеровской частоте и по эфемеридной

информации и значениям координат точек приема формировались тропосферные эффекты, используемые в качестве входных данных ДЗ. По обработанным реализациям (40 пролетов при суточных наблюдениях) установлено существенное отличие эмпирических тропосферных эффектов от ожидаемых (модельных) эффектов, что может быть объяснено высоким уровнем систематических погрешностей в измерениях и эфемеридных данных. Не согласуется также с модельными расчетами уровень флуктуационных эффектов. Разброс значений координат АП по результатам решения навигационной задачи достигает сотни метров.

По метеоданным рассчитаны приземные значения приведенного показателя преломления, которые использованы для сравнительного анализа эмпирических и модельных тропосферных эффектов, а также для аттестации качества обращения данных ДЗ.

Дальнейшее направление исследований представляется следующим.

1. Исследование качества формирования входных данных ДЗ при использовании высокоточных геодезических измерений местоположения точек приема сигналов СРНС и уточненной эфемеридной информации.

2. Разработка методик и алгоритмов уменьшения систематических и случайных погрешностей и исключения аномальных измерений во входных данных ДЗ, формируемых по сигналам СРНС.

3. Разработка методик и алгоритмов совместной обработки данных от двух разнесенных точек приема сигналов СРНС.

4. Разработка методики и алгоритмов решения основной навигационной задачи, использующих избыточность измерений, про-

вести анализ влияния на решение геометрического фактора.

5. Исследование по адаптации устойчивых методов обращения применительно к задаче ДЗ тропосферы по сигналам СРНС, в частности, исследование применимости метода сингулярной регуляризации для оптимизации области наблюдения.

6. Разработка методики аттестации входных данных ДЗ.

Литература:

1. Пономарев В.И., Безлюдько Г.Я. О восстановлении регулярного показателя преломления среды по радиоданным // Радиозлектроника летательных аппаратов. - Харьков, 1976. - №8. - С. 9-14.
2. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах, т.2. - М.: Мир, 1981.
3. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация / Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягода А.Г. - М.: Наука, 1983.
4. Горб А.И., Пономарев В.И. Высотный профиль показателя преломления тропосферы: устойчивый метод дистанционного зондирования // Труды 18 Европейской конференции по микроволнам. - Стокгольм, 1988.
5. Горб А.И., Кот П.А. Анализ точности вычисления тропосферных поправок // Радиозлектроника летательных аппаратов. - Харьков, 1986.