

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ТРОПОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ НИЗКООРБИТНЫХ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

к.т.н. А.И. Горб, О.А. Ксенофонтов

В работе рассмотрена методика восстановления вертикального профиля показателя преломления тропосферы по данным низкоорбитальных спутниковых радионавигационных систем. Эффективность предложенной методики исследована на данных натурального эксперимента.

Используемые в настоящее время методы и алгоритмы дистанционного зондирования атмосферы не могут обеспечить приемлемый компромисс между необходимостью обеспечения высокой точности компенсации атмосферных погрешностей в радионавигационных и радиодальномерных системах в любой точке земного шара в режиме реального времени с одной стороны, и минимизацией затрат на проведение дополнительных измерений с другой стороны. В данной статье предложена методика восстановления вертикального профиля показателя преломления тропосферы по данным низкоорбитальных спутниковых радионавигационных систем (СРНС) типа «TRANSIT» и «ЦИКАДА», позволяющая с высокой точностью оценить условия распространения радиоволн в нижних слоях атмосферы.

В СРНС «TRANSIT» и «ЦИКАДА» реализован интегральный доплеровский метод навигационных определений, аналогичный разностно-дальномерному методу, при котором база равна расстоянию, пролетаемому навигационным спутником за фиксированный промежуток времени. При этом база определяется в результате обработки эфемеридной информации, принимаемой навигационным приемником, а разность дальностей - в результате измерений доплеровского сдвига частоты принимаемого сигнала.

Навигационное уравнение, полученное на основе измерений интегральной доплеровской частоты, накапливаемой приемником за фиксированный промежуток времени (интервал накопления t), определяется выражением [1]:

$$\Delta R_i = R_i - R_{i-1} = \lambda_n \int_{t_{i-1} + R_{i-1}/c}^{t_i + R_i/c} (f_n - f_{\Pi}) dt, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

где f_n , f_{Π} - частоты излучаемого и принимаемого сигналов; $t_{i-1} + R_{i-1}/c$, $t_i + R_i/c$ - время приема навигационным приемником временных меток, излучаемых спутником в моменты времени t_{i-1} , t_i ; λ_n - длина волны навигационного сигнала; ΔR_i - измеренная разность расстояний.

Знание эфемеридной информации спутника и положение приемника на поверхности Земли позволяет рассчитать геометрическую разность расстояний $\Delta R_{\bar{a}}$. Таким образом, ошибка измерения разности расстояний ΔQ равна: $\Delta Q = \Delta R_i - \Delta R_{\bar{a}}$. При углах места 1 - 10 градусов поведение погрешности ΔQ будет в значительной степени определяться тропосферными погрешностями.

Выражение для тропосферной погрешности в измерениях разности расстояний было получено на основе слоисто - сферической модели тропосферы для случая, когда интегрирование ведется по прямолинейной траектории, соединяющей спутник и навигационный приемник [2]

$$\Delta Q(\beta_{\tau}) = R_3 \sin 2\beta_{\tau} \Delta\beta_{\tau} \int_{z_a}^{z_0} \frac{N(z)zdz}{(z^2 - z_a^2 \cos^2 \beta_{\tau})^{3/2}}, \quad (2)$$

где $N(z) = n(z) - 1$ - приведенный показатель преломления тропосферы Земли; R_3 - радиус Земли; β_t - средний угол места спутника в течении интервала накопления; $z = 1 + h/R_3$, $z_a = 1 + H_a/R_3$, $z_0 = 1 + H_0/R_3$; H_a , H_0 - соответственно высота расположения антенны навигационного приемника и высота верхней границы тропосферы; $\Delta\beta_t$ - диапазон изменения угла места спутника в течении интервала накопления. Таким образом, навигационные сигналы СРНС (1) являются входными данными для уравнения дистанционного зондирования (2).

Предложенная модель влияния тропосферы на точность измерения разности расстояний представляет собой линеаризованное относительно вертикального профиля показателя преломления $N(z)$ интегральное уравнение Фредгольма первого рода с неточно известной левой частью (входными данными). Следовательно, обращение данных ДЗ с целью определения характеристик тропосферы является типично некорректно поставленной задачей в смысле Адамара [3], когда погрешности входных данных могут вызвать значительные искажения решения. Поэтому, при решении уравнения (2) следует использовать

специальные устойчивые методы обращения.

Численный анализ применимости различных устойчивых методов решения обратных задач показал, что наилучший результат удается получить при использовании регуляризации А.Н. Тихонова [4]. При этом значения оптимальных коэффициентов регуляризации находятся в диапазоне $\alpha = 10^{-2} \div 10^{-3}$.

Для практического исследования предложенной методики дистанционного зондирования был проведен натурный эксперимент по наблюдению навигационных сигналов СРНС «ЦИКАДА». В таблицах 1 - 2 приведены результаты восстановления высотного профиля показателя тропосферы по экспериментальным данным (N_T - показатель преломления, рассчитанный по измеренному приземному значению на основании экспоненциальной модели тропосферы; N_s - показатель преломления, рассчитанный по экспериментальным данным). Анализ полученных результатов показал, что предложенная методика ДЗ позволяет восстанавливать

Таблица 1

Результаты восстановления вертикального профиля показателя преломления (04.36 04.07.90, $N_0 = 358$ N ед.)

h (км)	N_T (N ед.)	N_s (N ед.)
0	358.0	358.0
2	273.4	262.0
4	208.8	195.8
6	159.5	139.5
8	121.8	95.8
10	93.0	70.8

Таблица 2

Результаты восстановления вертикального профиля показателя преломления (19.28 03.07.90, $N_0 = 344$ N ед.)

h (км)	N_T (N ед.)	N_s (N ед.)
0	344.0	344.0
2	264.8	262.1
4	203.9	187.4
6	156.9	134.3
8	120.9	95.7

10	93.0	64.8
----	------	------

высотный профиль регулярной составляющей показателя преломления с с точностью не хуже 10% и проводить измерения в любой точке Земли с использованием стандартных навигационных приемников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волосов П.С., Волынкин А.И., Мищенко И.Н. Спутниковая радионавигационная система "TRANSIT"//Зарубежная радиоэлектроника. - 1979. - №1. - С. 3 - 43.
 2. Ponomarev V.I., Gorb A.I., Ksenofontov O.A. Tropospheric remote sensing by radiodata//Proc. 22 European Conf. on Radiodata, Helsinki, Finland, 1992. -P. 121 - 124.
 3. Павельев А.Г. К решению обратной задачи рефракции // Радиотехника и электроника. - 1982. - т.27, №12. - С. 24 - 31.
 4. Тихонов А.Г., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. - М.: Наука, 1979. - 273 с.
-