

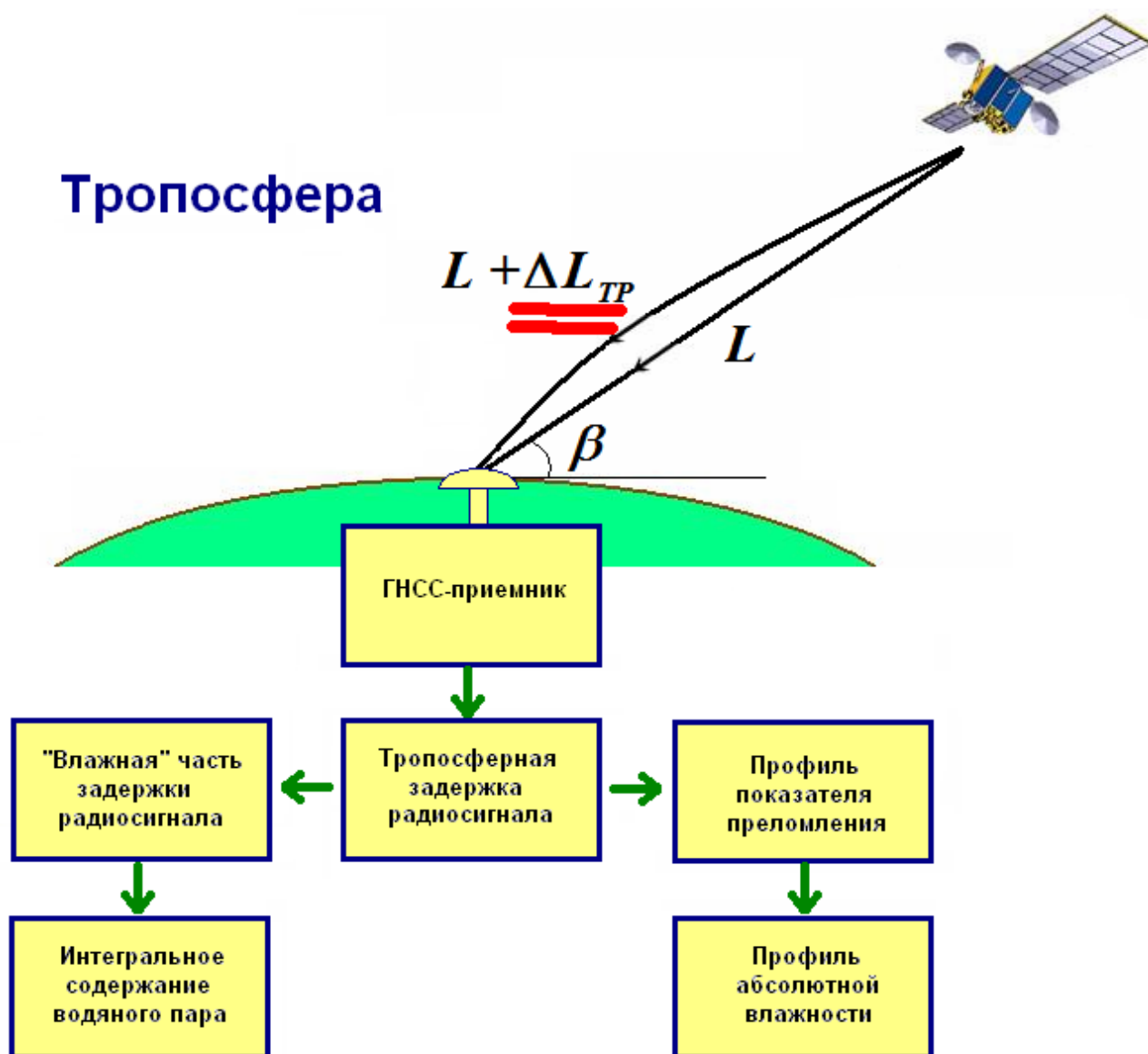
МОНИТОРИНГ СОДЕРЖАНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА В АТМОСФЕРЕ С ПОМОЩЬЮ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

Чукин В.В., Алдошкина Е.С., Богомолов И.В., Вахнин А.В., Григорьев Г.В.,

Кононова Е.А., Мельникова О.А., Моцаков М.А.

Российский государственный гидрометеорологический университет

chukin@rshu.ru



ВВЕДЕНИЕ

В докладе рассматриваются вопросы использования наземных приемных навигационных станций для дистанционного зондирования атмосферы методом радиопросвечивания сигналами навигационных спутников с целью определения содержания водяного пара в воздухе. Метод радиопросвечивания атмосферы предполагает определение параметров состояния атмосферы по результатам измерения пространственных задержек радиосигналов, распространяющихся через слой атмосферы в результате уменьшения фазовой скорости радиоволн за счет эффектов поляризации молекул азота, кислорода, углекислого газа и водяного пара.

ГЛОБАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА

В настоящее время существуют или находятся в стадии проектирования пять радионавигационных спутниковых систем: ГЛОНАСС (Россия), GPS (США), Galileo (Евросоюз), QZSS (Япония), COMPAS (Китай), образующих единую глобальную навигационную спутниковую систему (ГНСС).

ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ В ТРОПОСФЕРЕ

Показателя преломления в тропосфере можно представить как зависимость от плотности воздуха ρ и абсолютной влажности воздуха a :

$$n = 1 + k_1 \cdot R_C \cdot \rho + \left(k'_2 \cdot R_{II} + \frac{k_3 \cdot R_{II}}{T} \right) \cdot a, \quad (1)$$

где $R_C = 287.054$ Дж/(кг·К); $R_{II} = 461.526$ Дж/(кг·К); $k_1 = 7.760 \cdot 10^{-7}$ К/Па; $k_2 = 6.479 \cdot 10^{-7}$

К/Па; $k_3 = 3.776 \cdot 10^{-3}$ К²/Па; $k'_2 = k_2 - k_1 \frac{R_C}{R_{II}}$.

ЗАДЕРЖКА РАДИОСИГНАЛА В ТРОПОСФЕРЕ

Дополнительная задержка радиосигнала, связанная с прохождением через тропосферный слой, может быть определена по формуле:

$$\Delta L_{TP} = \int_0^L (n - 1) dl, \quad (2)$$

где ΔL_{TP} – пространственная задержка сигнала в тропосфере, м; L – расстояние, проходимое радиосигналом в тропосфере, м; n – показатель преломления радиоволн; l – путь вдоль траектории радиолуча, м.

ИНТЕГРАЛЬНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ВОДЯНОГО ПАРА В АТМОСФЕРЕ

Задержку сигнала в тропосфере можно представить в виде суммы гидростатической задержки ΔL_C , связанной с прохождением радиосигнала сквозь тропосферу, где давление с высотой убывает в соответствии с гидростатическим законом, и задержки за счет распространения в водяном паре ΔL_{Π} :

$$\Delta L_{TP} = \Delta L_C + \Delta L_{\Pi}. \quad (3)$$

Гидростатическая часть задержки в тропосфере может быть численно рассчитана по значению атмосферного давления у земной поверхности:

$$\Delta L_C(\beta) = \frac{2.2768 \cdot 10^{-5} \cdot P_0 \cdot m_C(\beta)}{[1 - 0.00266 \cdot \cos(2\varphi) - 0.00028 \cdot 10^{-3} \cdot h]}, \quad (4)$$

где φ – широта места; h – высота над уровнем моря, м; P_0 – атмосферное давление у поверхности Земли, Па; $m_C(\beta)$ – отображающая функция, показывающая зависимость гидростатической задержки сигнала от угла места спутника.

В результате, «влажная» часть задержки радиосигнала определяется из данных измерений полной задержки радиосигнала в тропосфере и результатов расчетов гидростатической части этой задержки. Значения «влажной» задержки радиосигнала могут быть использованы для определения интегрального содержания водяного пара в атмосфере:

$$v = \left(k'_2 \cdot R_{\Pi} + \frac{k_3 \cdot R_{\Pi}}{T_m} \right)^{-1} \cdot \frac{\Delta L_{\Pi}(\beta)}{m_{\Pi}(\beta)}, \quad (5)$$

где v – содержание водяного пара в вертикальном столбе атмосферы, кг/м² или мм; $m_{\Pi}(\beta)$ – отображающая функция, показывающая зависимость задержки сигнала во влажном воздухе от угла места спутника.

На основе статистической обработки данных радиозондирования нами получена зависимость параметра T_m от приземных значений температуры воздуха:

$$T_m = A + B \cdot T_0, \quad (6)$$

где A и B – эмпирические коэффициенты, для региона Санкт-Петербурга равные 161.63 ± 36.96 и 0.39 ± 0.13 , соответственно; T_0 – приземная температура воздуха, К.

Для достижения точности измерения интегрального содержания водяного пара равной 2.0 кг/м² необходимо использовать данные измерений со спутников, находящихся выше 20° над горизонтом.

ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ ПЛОТНОСТИ ВОДЯНОГО ПАРА

Прямая задача дистанционного зондирования водяного пара в атмосфере может быть записана в предположении сферически-слоистой атмосферы в следующем виде:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}. \quad (7)$$

Здесь \mathbf{y} – вектор результатов измерений задержек сигнала $\Delta L_{TP}(\beta)$; \mathbf{A} – матрица преобразования (ядро уравнения); \mathbf{x} – вектор значений показателя преломления атмосферы.

Обратная задача дистанционного зондирования решается в два этапа. На первом этапе определяется вертикальный профиль показателя преломления:

$$\mathbf{x} = [\mathbf{A}^T \mathbf{K}_y^{-1} \mathbf{A} + \mathbf{K}_x^{-1}]^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{K}_y^{-1} \mathbf{y}, \quad (8)$$

где $\mathbf{K}_y = \sigma_y^2 \mathbf{I}$; σ_y^2 – дисперсия ошибок измерений ΔL_{TP} ; \mathbf{I} – единичная матрица. Вид матрицы \mathbf{K}_x зависит от используемого метода регуляризации. На втором этапе рассчитывается вертикальный профиль абсолютной влажности воздуха в предположении, что вертикальный профиль температуры воздуха получается из задаваемого профиля относительной влажности воздуха, а атмосферное давление убывает с высотой по барометрическому закону.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данный метод позволяет с достаточной для практики точностью определять весьма важную информацию о содержании водяного пара в атмосфере. Оперативность данного метода, полная автоматизация и отсутствие расходных материалов при осуществлении дистанционного зондирования открывают возможности к широкому внедрению в практику оперативного контроля за состоянием атмосферы. К достоинствам данного метода можно также отнести "всепогодность" (независимость от наличия облаков), которая выгодно отличает его от методов, основанных на регистрации собственного электромагнитного излучения атмосферы.

Сайт в сети Интернет: <http://gnss.su>