

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ВЛАЖНОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Радиоакустическое зондирование (РАЗ) атмосферы – это информационная технология получения данных о метеорологических элементах в пределах нижнего слоя тропосферы. Физической основой РАЗ является дифракция Брэгга, т.е. эффект резонансного рассеяния электромагнитной волны на акустическом импульсе при определённом соотношении длин электромагнитной и акустической волн. Акустический импульс будем называть метеоцелью.

Для восстановления профиля влажности могут быть использованы следующие физические эффекты:

а) поглощение звуковой волны, обусловленное механизмами трения, теплопроводности (стоксово поглощение), а также релаксационными процессами (сверхстоксово поглощение). В реальных условиях атмосферы сверхстоксово поглощение доминирует над стоксовым и сильно зависит от концентрации водяного пара, присутствующего в атмосфере;

б) дисперсия звуковой волны во влажном воздухе, т.е. наличие функциональной зависимости между фазовой скоростью звуковой волны и частотой волны:

$$v(\omega_s) = v_0 \cdot \left( 1 + \frac{v_\infty^2 - v_0^2}{2 \cdot v_0^2} \cdot \frac{\omega_s^2 \cdot \tau_p^2}{1 + \omega_s^2 \cdot \tau_p^2} \right), \quad (1)$$

где  $\omega_s$  – частота звуковой волны;

$\tau_p = 1/2 \cdot \pi \cdot f_p$  – время релаксации;

$f_p$  – релаксационная частота;

$v_0$  – фазовая скорость звуковой волны при низких частотах ( $f_s \ll f_p$ );

$v_\infty$  – фазовая скорость звуковой волны при высоких частотах ( $f_s \gg f_p$ ).

В формуле (1) от количества молекул водяного пара зависят фазовые скорости  $v_0$ ,  $v_\infty$  и релаксационная частота  $f_p$ .

Предлагаемый метод восстановления профиля влажности состоит в измерении фазовых скоростей звуковых волн, имеющих разные частоты. Информационным параметром в данном методе является разность фазовых скоростей  $\Delta v$ . Метод требует знания профиля температуры  $T(z)$  и атмосферного давления на поверхности Земли  $p(0)$ . Величина атмосферного давления в районе метеоцели  $p(z)$  может быть найдена по известной дальности и температуре метеоцели с помощью барометрических формул.

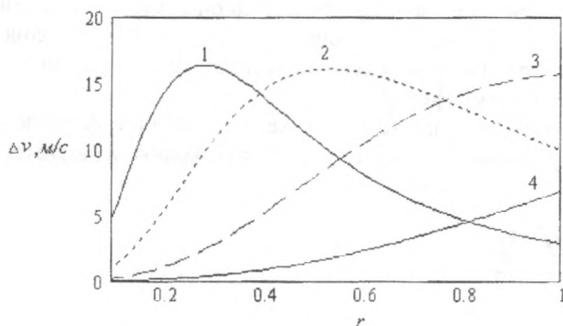
Теоретическое исследование эффекта дисперсии звуковой волны в воздухе показало существенное влияние температуры на характер зависимости  $v(\omega_s)$ . Так, с повышением температуры воздуха область дисперсии смещается в район

ультразвуковых частот и уже при температурах выше  $(15 \div 20)^\circ\text{C}$  дисперсия звуковой волны для частот слышимого диапазона не существенна.

Естественным является стремление построить комплекс, позволяющий измерять относительную влажность  $r$  при различных температурах воздуха. В рамках этой задачи предлагается два решения:

а). Первое решение заключается в оптимизации выбора акустических частот для определённого диапазона температур. Например, при температурах  $(-10 \div +20)^\circ\text{C}$  для исследования эффекта дисперсии могут успешно применяться звуковые импульсы с частотами  $f_{s1} = 4$  кГц,  $f_{s2} = 8$  кГц. Для измерения влажности при температурах воздуха выше  $20^\circ\text{C}$  может быть использован другой метод, например, амплитудный.

б). Второе решение задачи связано с выбором высоких акустических частот. На рисунке приведены графики зависимости разности фазовых скоростей  $\Delta v$  от относительной влажности  $r$  для волн, имеющих частоты  $f_{s1} = 10$  кГц,  $f_{s2} = 30$  кГц:



Зависимость разности звуковых скоростей от относительной влажности при  $f_{s1} = 10$  кГц,  $f_{s2} = 30$  кГц,  $p = 1013$  мб,  
 1) температура  $T = 20^\circ\text{C}$ ; 2) температура  $T = 10^\circ\text{C}$ ;  
 3) температура  $T = 0^\circ\text{C}$ ; 4) температура  $T = -10^\circ\text{C}$ .

Волна с частотой  $f_{s2} = 30$  кГц сильно затухает в атмосфере, зато можно построить комплекс, восстанавливающий профиль влажности в большом температурном диапазоне.

В литературе указывается, что для конвективного и турбулентного слоя атмосферы абсолютная погрешность измерения относительной влажности должна быть равна 3%. Исходя из этого, по графикам рисунка можно оценить допустимую абсолютную погрешность измерения скорости звука. Для характеристики 4 в районе  $r = 0.5$  имеем  $\Delta v = 0.214/2 = 0.107$  м/с.

В процессе выполнения работы была обнаружена необходимость детальной проработки теории рассеяния электромагнитной волны на звуковом импульсе. Вопрос о спектре рассеянного радиосигнала остаётся открытым, а следовательно, остаётся открытым вопрос о методической погрешности.