УДК 621.378

С. В. ТЮРИН, канд. техн. наук, М. М. БЫКОВ, канд. техн. наук,
В. А. РОМАНЮК, С. В. ШУРЫГИН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЗМУЩЕННОЙ СРЕДЫ ЛИДАРНЫМИ СРЕДСТВАМИ

Тенденции снижения заметности аэродинамических объектов как в радио, так и в оптическом диапазоне длин волн обусловливают необходимость разработки новых эффективных методов их обнаружения.

Одним из направлений решения данной задачи является использование способности лидарных средств регистрировать возмущения атмосферы, вызванные пролетом исследуемой области пространства любым летательным аппаратом [1]. Такая возможность обусловлена существенным отличием параметров газоаэрозольного следа аэродинамического объекта от характеристик окружающего воздуха. При этом наиболее информативными признаками для обнаружения являются изменения концентрации и химического состава компонентов атмосферы, образующиеся в результате сгорания авиационных или ракетных топлив.

Построение аналитической модели процесса регистрации таких изменений базируется на методе дифференциального поглощения и рассеяния (ДПР), как наиболее чувствительном методе измерения малых концентраций газов. Данный метод предполагает зондирование выбранного объема пространства на двух длинах волн, одна из которых сответствует центру линии поглощения исследуемого газа, а другая находится вне контура.При сравнении рассеянных сигналов на этих длинах волн оценивают концентрацию поглощающих компонент. При этом учитываются все специфические для условий локации на протяженной трассе и параметров следа объекта факторы, которые обусловливают точность лидарных измерений.

Процесс обнаружения заключается в принятии решения о наличии объекта в зондируемом объеме пространства на основе результатов лидарного измерения концентрации выбранной компоненты выхлопных газов $N_{изм}$ и сравнения полученного значения концентрации с некоторой пороговой величиной $N_{пор}$. Решение об обнаружении принимается в случае превышения измеренного значения концентрации газа над ее пороговым значением.

Такой алгоритм процесса обнаружения аэродинамических объектов по их следам в атмосфере предусматривает выполнение определенного перечня и последовательности операций:

1. Измерение текущего значения концентрации $N_{изм}$ выбранной компоненты выхлопных газов аэродинамического объекта на основе сравнения принятых сигналов на длинах волн λ_0 и λ_ω (в центре и вне линии контура поглощения).

2. Вычисление порогового значения концентрации $N_{пор}$ на основе анализа результатов измерения принятого сигнала на длине волны λ_0.

3. Сравнение измеренного ($N_{изм}$) и порогового ($N_{пор}$) значений концентрации и принятие решения о наличии (отсутствии) объекта в зондируемом объеме пространства.

Исходной посылкой при разработке модели явился тот факт, что дифференциальное уменьшение наблюдаемого сигнала на центральной длине волны λ_0 фактически определяется лишь протяженностью ΔR области зондирования следа, который находится на расстоянии R от лидарной системы. В соответствии с алгоритмом метода ДПР регистрация суммарного уменьшения сигнала позволяет измерить текущее значение концентрации газовой компоненты, которое описывается известным выражением [2]:

$$N_{изм}(R)=\frac{1}{2\cdot\sigma(\lambda_0)\cdot\Delta R}\left\{\left[ln\frac{E(\lambda_0,R)E(\lambda_\omega,R+\Delta R)}{E(\lambda_0,R+\Delta R)E(\lambda_\omega,R)}\right]+\right.$$
$$\left.+ln\left[\frac{\beta(\lambda_0,R+\Delta R)\beta(\lambda_\omega,R)}{\beta(\lambda_0,R)\beta(\lambda_\omega,R+\Delta R)}\right]\right\}-2[K(\lambda_0,R+\Delta R)-K(\lambda_\omega,R+\Delta R)], \quad (1)$$

где ΔR – длина взаимодействия лазерного излучения со следом объекта; $\sigma(\lambda_0)$ – сечение поглощения молекул исследуемого газа; $E(\lambda,R)$ – энергия принятых сигналов на λ_0 и λ_ω; $\beta(\lambda,R)$ – объемный коэффициент обратного рассеяния для λ_0 и λ_ω; $K(\lambda,R)$ – коэффициент ослабления излучения на λ_0 и λ_ω.

Данная модель расчета текущего значения концентрации исследуемого газа не учитывает специфические особенности условий локации на протяженных трассах и влияния газодинамических характеристик следа аэродинамического объекта на достоверность получаемой информации. В первую очередь это касается правильного выбора протяженности ΔR анализируемого объема пространства, поскольку он характеризует длину области взаимодействия лазерного излучения с поглощающей средой. В натурных экспериментах этот параметр обычно задается априорно, однако в условиях зондирования удаленных на значительное расстояние локальных объемов пространства по наклонным трассам его значение будет зависеть от угла подсвета θ. В этом случае

$$\Delta R = \frac{L}{\cos\theta}, \tag{2}$$

где L – поперечный размер следа летательного аппарата.

Вторым важным фактором является учет зависимости формы контура линий поглощения исследуемых молекул и величины сечения поглощения от параметров выхлопных газов авиационных и ракетных двигателей. Известно, что контур линии поглощения молекулы является функцией от давления P и температуры T среды и описывается известным выражением[2]:

$$\gamma(P,T) = \gamma(P_0,T_0)\left(\frac{P}{P_0}\right)\left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/2}, \tag{3}$$

где γ(P,T) – полуширина контура линии поглощения; $\gamma(P_0,T_0)$ – полуширина контура линии поглощения при P_0 = 1 атм и T_0 = 300 К.

Когда уширение давлением доминирует, контур линии поглощения является лоренцевским и сечение поглощения описывается формулой

$$\sigma(P,T,\nu) = \frac{\sigma_0}{\pi}\frac{\gamma(P,T)}{(\nu-\nu_0)^2+\gamma^2(P,T)}, \tag{4}$$

где $\sigma_0 = \int_{-\infty}^{\infty}\sigma(\nu)d\nu$ – интегральная интенсивность поглощательного перехода; σ(ν) – спектральное сечение поглощения молекулой; ν_0 – частота, соответствующая центру линии поглощения молекулы.

С учетом реальных значений давления P и температуры T в выхлопных газах двигателей аэродинамических объектов были оценены характер и величина изменения сечения поглощения молекул исследуемого газа. Результаты оценки, представленные на рис. 1 и 2, показали,что для типичных параметров выхлопных газов контур линии поглощения в достаточной степени уширяется, что приводит к соответствующему уменьшению сечения поглощения.

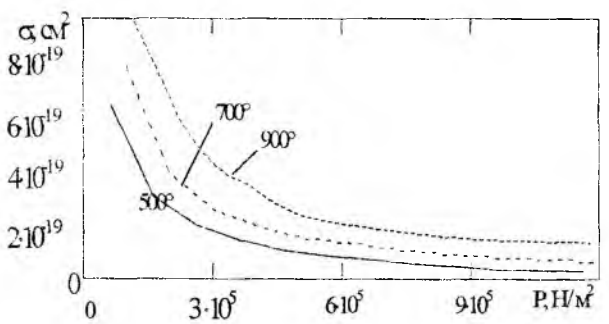

Рис. 1

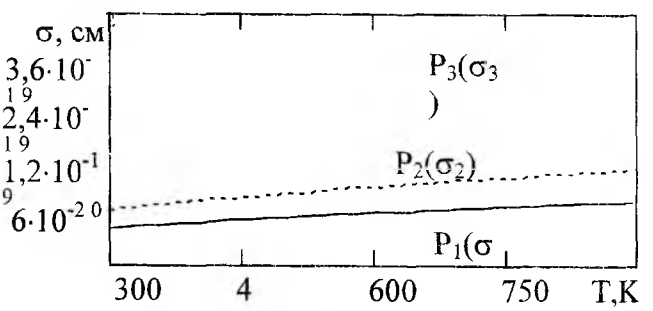

Рис. 2

При реализации метода ДПР уровни сигналов $E(\lambda_0,R)$ и $E(\lambda_\omega,R)$ на двух разных длинах волн, принятых с расстояния R, фактически не зависят от процесса поглощения излучения в пределах следа объекта. Поэтому, при незначительном отличии длин волн λ_0 и λ_ω, что обычно имеет место в ДПР-

лидарах, отношение $E(\lambda_0,R)$ / $E(\lambda_\omega,R)$ будет приближаться к 1, если отсутствует поглощение на трассе. В случае, когда значения фоновой концентрации поглощающих компонент достаточно большие (например, для CO, CH_4, CO_2), следует учитывать поглощение по всей протяженности трассы. Тогда указанное отношение можно заменить множителем

$$\frac{E(\lambda_0,R)}{E(\lambda_\omega,R)} = \exp\left(-2\int_0^R N_{ФОН}(R)\sigma(\lambda)dR\right), \qquad (5)$$

где $N_{фон}(R)$ – фоновая концентрация исследуемого газа на лоцируемой трассе.

Результаты моделирования в соответствии с выражением (5) для различных газов (NO, CH_4, CO_2) и типичных атмосферных условий представлены на рис. 3.

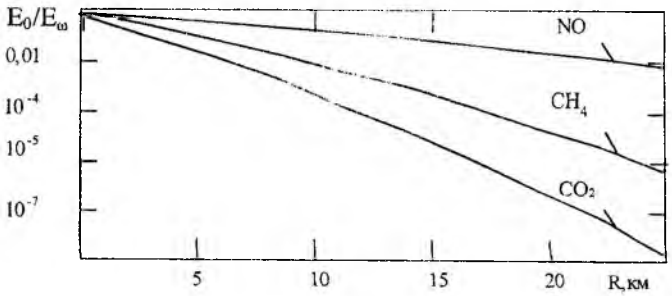

Рис. 3

Анализ зависимости показал, что наличие фоновых концентраций исследуемого газа на протяженных локационных трассах приводит к значительному ослаблению зондирующего излучения.

Таким образом, подставляя соотношения (2), (3), (4), (5) в (1), получим окончательное выражение, описывающее процедуру измерения текущей концентрации выбранного газа в следе аэродинамического объекта:

$$N_{ИЗМ} = \frac{\cos\theta\left\{(\nu-\nu_0)^2 + \left[\gamma(P_0,T_0)\left(\frac{P}{P_0}\right)\left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{2}}\right]^2\right\}}{2L\sigma_0\gamma(P_0,T_0)\left(\frac{P}{P_0}\right)\left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{2}}} \times$$

$$\times\left\{\ln\frac{E(\lambda_\omega,R+\Delta R)}{E(\lambda_0,R+\Delta R)}\cdot e^{-2\int_0^R N_{ФОН}(R)\tau(\lambda)dR} + \ln\frac{\beta(\lambda_0,R+\Delta R)\cdot\beta(\lambda_\omega,R)}{\beta(\lambda_0,R)\cdot\beta(\lambda_\omega,R+\Delta R)}\right\} - \qquad (6)$$

$$-2\left[K(\lambda_0,R+\Delta R) - K(\lambda_\omega,R+\Delta R)\right]$$

Зависимости измеренных значений концентрации выхлопных газов ЛА от отношения принятых сигналов для разных значений сечения поглощения представлены на рис. 4.

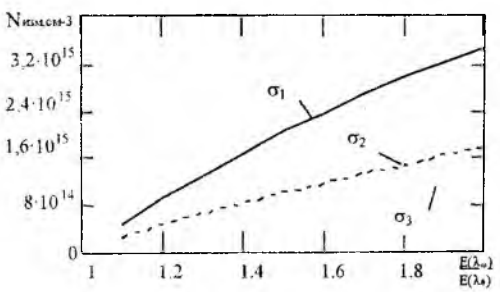

Рис. 4

Анализ графиков показывает, что изменения параметров следа ЛА и условий его локации приводят к существенным вариациям значений измеряемой концентрации исследуемого газа. Это обусловливает необходимость точного определения модельных профилей исходных величин, наиболее адекватно отражающих условия зондирования выхлопных газов аэродинамических объектов, и оптимального выбора методики лидарных измерений, позволяющей снизить систематические ошибки.

Для организации процесса обнаружения ЛА алгоритм функционирования лидарной системы должен также обеспечить вычисление порогового значения концентрации исследуемого газа. Для метода ДПР эта процедура заключается в механизме расчета предельного (минимального) значения концентрации выбранной газовой компоненты, которое может быть зарегистрировано данной лидарной системой с заданными характеристиками обнаружения (D и F). При этих условиях для обнару-

жения дифференциального уменьшения энергии сигнала, рассеянного в обратном направлении с длиной волны λ_0, требуется соблюдение неравенства:

$$E(\lambda_0,R)-E(\lambda_0,R+\Delta R)>\frac{E(\lambda_0,R+\Delta R)}{q}, \tag{7}$$

где q – отношение сигнал/шум на выходе детектора.

Тогда с учетом (2), (3), (4), (5), (8) и лидарного уравнения можно получить выражение для расчета порогового объемного числа молекул, определяемого с заданными характеристиками обнаружения:

$$N_{пор}=\frac{\cos\theta\left\{(\nu-\nu_0)^2+\left[\gamma(P_0,T_0)\left(\frac{P}{P_0}\right)\left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{1}{2}}\right]^2\right\}}{2\sigma_0\gamma(P_0,T_0)\left(\frac{P}{P_0}\right)\left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{1}{2}}L}\cdot\ln\left[\left\{1+\frac{1}{q}\right\}\left(\frac{R}{R+\Delta R}\right)^2\right]. \tag{8}$$

Обнаружение аэродинамического объекта по результатам измерения концентрации газовых компонент будет осуществлено в случае, когда :

$$\Delta N=N_{изм}-N_{пор}>0. \tag{9}$$

Тогда окончательно модель обнаружения будет описываться выражением :

$$\Delta N=\frac{\cdot\cos\theta\left\{(\nu-\nu_0)^2+\left[\gamma(P_0,T_0)\left(\frac{P}{P_0}\right)\left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{1}{2}}\right]^2\right\}}{2\sigma_0\gamma(P_0,T_0)\left(\frac{P}{P_0}\right)\left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{1}{2}}L}\times$$

$$\left[\ln\frac{E(\lambda_\omega,R+\Delta R)}{E(\lambda_0,R+\Delta R)}\cdot e^{-2\int_0^R N_{ФОН}(R)\tau(\lambda)dR}+\ln\frac{\beta(\lambda_0,R+\Delta R)\cdot\beta(\lambda_\omega,R)}{\beta(\lambda_0,R)\cdot\beta(\lambda_\omega,R+\Delta R)}\right]- \tag{10}$$

$$2\left[K(\lambda_0,R+\Delta R)-K(\lambda_\omega,R+\Delta R)\right]-\ln\left[\left\{1+\frac{1}{q}\right\}\left(\frac{R}{R+\Delta R}\right)\right]>0$$

Данная модель описывает процесс сравнения измеренной концентрации молекул газовой компоненты с ее пороговым значением, которое зависит от характеристик обнаружения D и F, параметров приемника и условий локации и определяет факт превышения измеренной концентрации над пороговой. При этом, если ΔN – положительное число, принимается решение об обнаружении летательного аппарата.

Результаты моделирования в соответствии с выражением (11) для типичных параметров лидара представлены на рис. 5.

Анализ полученных результатов показал, что для заданных характеристик обнаружения (D,F), известных параметрах лидарной системы и условиях локации процесс обнаружения аэродинамических целей по результатам измерений концентрации выбранной компоненты выхлопных газов будет осуществляться при определенном соотношении уровней принятых сигналов на длинах волн λ_0 и λ_w. При этом уровни сигналов должны быть не менее пороговой чувствительности приемного устройства лидара, а дифференциальное изменение их соотношения должно быть заметным по сравнению с шумами системы.

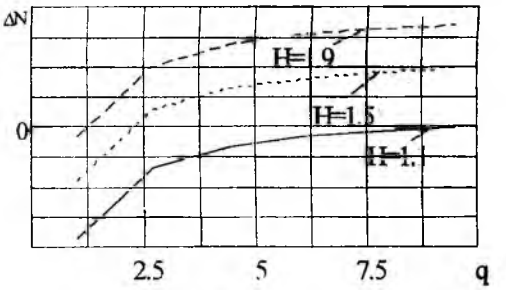

Рис. 5

Список литературы 1. *Быков М.М., Тюрин С.В., Глиняный А.В., Романч[illegible] А.* /.Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2001. Вып. 117. С.17-20. 2. *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.

Харьковский военный университет
Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Поступила в редакцию 7.11.2001