

ОБНАРУЖЕНИЕ И РАСПОЗНАВАНИЕ МАЛОЗАМЕТНЫХ ЦЕЛЕЙ ЛИДАРНЫМИ МЕТОДАМИ

Применение технологий «Стелс» в современных средствах воздушного нападения приводит к заметному ухудшению возможностей систем обнаружения в радио- и оптическом диапазонах длин волн.

Одним из направлений повышения эффективности таких систем является использование лидарных средств, позволяющих путём зондирования выбранных объёмов пространства обнаруживать и распознавать малозаметные воздушные цели по их следам в атмосфере. В этом случае наиболее информативными признаками обнаружения и распознавания целей являются аномалии плотности воздуха в виде существенного изменения концентрации и состава компонент следа и турбулентные (вихревые) потоки, оставляющие след пролетающих в атмосфере летательных аппаратов.

В отличие от радиолокационных и квантово-оптических систем, работающих по отраженному от целей сигналу, лидарные средства анализируют рассеянное атмосферой лазерное излучение. В этом случае эффективность решения задач обнаружения и распознавания не зависит от параметров и характера покрытий воздушных целей, а определяется лишь чувствительностью и пространственным разрешением выбранного метода лидарных измерений, что, в конечном счете, обуславливает малоэффективность мероприятий, реализуемых по программе "Стелс".

Основным достоинством лидарных средств является то, что обработка результатов зондирования следа воздушной цели в реальном масштабе времени позволяет с высокой достоверностью установить факт пролета исследуемой области пространства любым летательным аппаратом. Причем, в зависимости от типа двигательной установки, высоты и режима его полета в определенных пределах будут изменяться состав следа, концентрация частиц и их пространственное распределение, что, в свою очередь, может служить дополнительным информационным признаком селекции и распознавания целей.

Возможность обнаружения воздушных объектов по их следам в атмосфере основана на существенном отличии оптико-атмосферных характеристик возмущённой полётом летательного аппарата области пространства относительно окружающего след воздуха. Эта область характеризуется наличием значительного количества различного рода газообразных соединений, аэрозольных образований и частиц, представляющих собой продукты сгорания авиационных (ракетных) топлив, а также формированием интенсивных турбулентных потоков, вызванных движением объекта в плотных слоях атмосферы.

Таким образом, след летательного аппарата, как объект локации, представляет собой протяжённую цель, определённым образом ориентированную в пространстве относительно направления полёта. Кроме того, след каждой аэродинамической цели имеет специфическую пространственную (в поперечном и продольном направлениях) структуру и химический состав. Это позволяет при достаточной чувствительности лидарных средств не только обнаруживать цели со слабоотражающими (поглощающими) покрытиями, но и осуществлять их идентификацию по характерному для каждого типа летательного аппарата составу компонент следа.

Для протяжённого объекта (угловой размер которого больше ширины диаграммы направленности, т.е. для следа цели) лидарное уравнение с учётом однократного рассеяния от атмосферного аэрозоля можно представить в виде:

$$P_r(\omega, L) = P_0(\omega_0) K_0 K_r T(\omega_0) T(\omega_r) Y(L) \beta(L) \Delta R \frac{S_{eff}}{L^2} \quad (1)$$

где $P_r(\omega, L)$ и $P_0(\omega_0)$ – мощности принимаемого (с круговой частотой ω_r) и излучаемого (с частотой ω_0) лазерных сигналов соответственно; K_r и K_0 – пропускание приемного и передающего оптических трактов соответственно; $T(\omega_r)$ и $T(\omega_0)$ – прозрачность атмосферы для принимаемого и излучаемого сигналов соответственно; $Y(L)$ – геометрический фактор, учитывающий перекрытие лазерного луча и угла поля зрения приемного устройства; $\beta(L)$ – объёмный коэффициент обратного рассеяния; $\Delta R = C \tau_d / 2$ – пространственное разрешение, где τ_d – время детектирования оптического сигнала;

S_{eff}/L^2 – телесный угол, в котором осуществляется прием сигналов оптической системы, где S – эффективная площадь приемной апертуры, а L – дальность до исследуемого объема пространства (следа цели) [1].

Как видно из приведенного выражения мощность принимаемого сигнала при заданных параметрах лидарной системы и известном расстоянии до цели существенно зависит от значений объемного коэффициента обратного рассеяния. В общем случае этот коэффициент определяется суммой вкладов от газовой фазы атмосферы β_r и от содержащихся в ней частиц β_q :

$$\beta = \beta_r + \beta_q \quad (2)$$

В зависимости от состояния атмосферы и высоты исследуемых объемов доминирующим может быть тот или иной тип рассеяния.

Упругое рассеяние в направлении назад на молекулах газов описывается (за исключением линии поглощения) приближением рэлеевского рассеяния:

$$\beta_r = N \frac{d\sigma}{d\Omega} \quad (3)$$

где N – число молекул газа в единице объема (концентрация); $d\sigma/d\Omega$ – дифференциальное сечение рассеяния.

Рассеяние света полидисперсным ансамблем однородных сферических частиц описывается выражением (1):

$$\beta_q = \int_{a_1}^{a_2} \frac{d\sigma}{d\Omega} N_0(a) da \quad (4)$$

где $d\sigma/d\Omega = \pi a^2 Q(a, h)$ – дифференциальное сечение рассеяния назад частицы радиусом a и коэффициентом преломления n ; $Q(a, h)$ – фактор эффективности обратного рассеяния; $N_0(a)$ – концентрация частиц радиусом a .

Для известного механизма рассеяния и заданных характеристик лидарной системы дифференциальное сечение рассеяния является детерминированной величиной. В этом случае по измеренной концентрации компонент зондируемой области пространства можно судить о наличии или отсутствии в ней аэродинамической цели.

Важным информативным признаком для распознавания объектов являются состав и распределение в пределах следа продуктов сгорания топлива, характерных для каждого типа летательного аппарата и режимов работы его двигательной установки. В состав продуктов сгорания входит большое количество газовых компонентов, представляющих результаты термического разложения топлива: тяжёлые углеводороды (CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2), углекислый газ (CO_2), водород (H_2), угарный газ (CO), водяной пар (H_2O) и др. Благодаря наличию характерных для каждого газового компонента линий (или полос) поглощения можно осуществить идентификацию и измерение его концентрации в исследуемом объёме путём реализации эффекта резонансного рассеяния. Такой механизм рассеяния обеспечивается за счёт настройки частоты (или комбинации частот) зондирующего излучения ω в резонанс с наиболее активным молекулярным переходом ω отдельной газовой составляющей. При этом селективное возбуждение молекулярных колебаний в зондируемом объёме обуславливает резкое возрастание (от 3 до 6 порядков [2]) дифференциального сечения рассеяния, что позволяет зафиксировать в составе следа компоненты даже с незначительной концентрацией:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\omega_0 \omega_r^3}{(4\pi\epsilon_0 hc^2)^2} \frac{[\epsilon_r \hat{d}_{fi}] [\epsilon_i \hat{d}_{ig}]}{(\omega_r - \omega_0)^2 + \Gamma^2} \quad (5)$$

где g, i, f – соответственно начальное, промежуточное и конечное квантовые состояния; $\epsilon_r \hat{d}_{fi}$, $\epsilon_i \hat{d}_{ig}$ – составляющие дипольных моментов для переходов $f-i$ и $g-i$ в направлении поляризации рассеянного и падающего излучения; Γ – полуширина линии спонтанного перехода.

Как известно, влияние турбулентной атмосферы на распространяющееся оптическое излучение заключается в существенном искажении его пространственно-временных характеристик. Эти искажения проявляются в амплитудно-фазовых флуктуациях принимаемого сигнала, нарушении пространственной когерентности оптической волны, уширении и дрожании лазерного пучка. При этом характер и диапазон таких изменений определяется главным образом интенсивностью турбулентных пульсаций, описываемых структурной характеристикой показателя преломления среды C_n^2 . Лидарные способы определения структурной характеристики C_n^2 основаны на рассеянии света естественным атмосферным аэрозолем. В этом случае аэрозоль выполняет роль диффузно рассеивающего экрана и определяет энергетiku локационного сигнала, а турбулентные неоднородности обуславливают искажения отраженной оптической волны. Таким образом, фиксируя степень флуктуаций (искажений) параметров принимаемого сигнала можно судить о характере турбулентности лоцируемой трассы и, тем самым, об источнике формирования такого следа.

Одним из эффектов, свидетельствующих об изменении параметров турбулентности, является нарушение пространственной когерентности поля рассеянной исследуемым объектом волны. Для среднего размера пятна R_n в фокальной плоскости приёмной апертуры с гауссовской аппроксимацией коэффициента пропускания выполняется соотношение

$$R_n = \frac{2F_0}{K} \left[\frac{1}{\rho_0^2} + \frac{1}{a_0^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

где F_0 – фокусное расстояние объектива; a_0 – радиус объектива; K – волновое число;

$$\rho = \left[1,45 K^2 \int_0^L C_n^2(\eta) (\eta/L)^5 d\eta \right]^{\frac{-3}{5}}, \quad (7)$$

где ρ – радиус когерентности поля сферической волны, η – переменная интегрирования, отсчитываемая от рассеивающего объёма к приёмной системе лидара.

Из выражения (6) видно, что уменьшение радиуса когерентности ρ приводит к увеличению среднего размера изображения объёма и, соответственно, к уменьшению средней интенсивности в центре дифракционной картины, что может быть зарегистрировано приёмным устройством лидарной системы.

Другим известным эффектом, вызванным случайными искажениями фазы волны с масштабами, сравнимыми с радиусом приёмной линзы, является дрожание изображений источников. Положение изображения принято характеризовать вектором положения энергетического центра тяжести распределения интенсивности в фокальной плоскости линзы:

$$\rho_c = \frac{\iint J_F(\rho) d^2\rho}{\iint J_F(\rho) d^2\rho}, \quad (8)$$

где $J_F(\rho)$ – распределение интенсивности в фокальной плоскости приёмной линзы.

В пренебрежении флуктуациями потока через объектив дисперсия случайных смещений σ_c^2 вектора ρ_c описывается известным соотношением:

$$\sigma_c^2 = \langle \rho_c^2 \rangle = 2,84 (2a_c)^{-1} \sec^2 \theta \int_0^\infty C_n^2(z) dz, \quad (9)$$

где θ – зенитный угол.

Поскольку величина σ_c^2 однозначно обусловлена значением C_n^2 , то полученные данные о дрожании изображений можно использовать для дистанционного контроля турбулентного состояния исследуемого объёма пространства.

Таким образом, оба метода позволяют осуществить обнаружение летательных аппаратов по их турбулентным следам в атмосфере.

Для оценки дальности действия лидарных систем, решающих локационные задачи, рассматривался наиболее чувствительный метод дифференциального поглощения и рассеяния в качестве механизма обнаружения характерных для следа аэродинамической цели газовых компонент. В этом случае исследуемые компоненты можно обнаружить только тогда, когда дифференциальное изменение сигнала становится заметным по сравнению с шумами. При этом энергия лазерного излучения E , рассеянная с расстояния $L + \Delta L$ в обратном направлении, должна превышать минимально детектируемую энергию фотодетектора (1):

$$E(\lambda_L, L + \Delta L) \geq \frac{1}{D^*} \left(\frac{FA_0 B}{4B\xi_e} \right)^2 q_{\min}, \quad (10)$$

где D^* – обнаружительная способность детектора, $F/\xi_e \approx 1$ (для твердотельных фотодетекторов), A_0 – площадь фотокатода, B – ширина полосы фотодетектирования, q – минимальное отношение сигнал/шум.

Оценка дальности обнаружения компонент CO, CH₄, NO следа проводилась по соотношению (1) с учетом (10). Результаты моделирования представлены на рисунке.

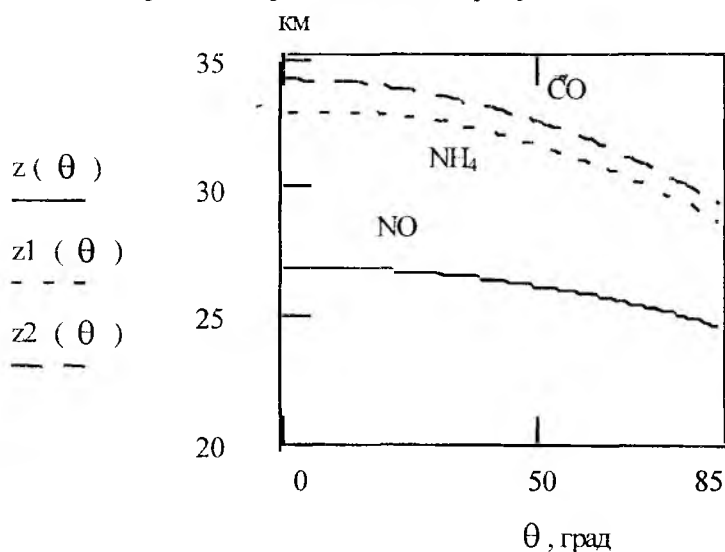


Рис. Дальность действия системы обнаружения.

Рассмотренные способы использования лидарных средств могут послужить основой для создания систем обнаружения малой дальности.

Список литературы: 1. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 2. Бункин А.Ф. Четырехфотонная спектроскопия комбинационного рассеяния света в дистанционной диагностике атмосферы и океана // Оптика атмосферы. 1988. Т.1. №1.

Харьковский военный университет
Харьковский государственный технический
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 25.10.2000