

М. Л. Белов, А. М. Белов,
В. И. Козинцев, Б. В. Стрелков

МОНОИМПУЛЬСНЫЙ ЛОКАЦИОННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Исследованы возможности моноимпульсного локационного лазерного метода обнаружения аномалий коэффициента отражения на земной поверхности. Показано, что использование метода регуляризации позволяет уверенно обнаруживать аномалии на фоне однородного (постоянного или слабо меняющегося) пространственного распределения коэффициента отражения в большом секторе обзора лазерного локатора даже в случае, когда пространственная протяженность импульса лазера в десятки раз превышает размер аномалии.

E-mail: ekomonit@bmstu.ru

Ключевые слова: лазерная локация, земная поверхность, аномалии коэффициента отражения, обнаружение.

В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений прикладной лазерной локации является авиационное зондирование, когда лазерный локатор устанавливают на авиационный носитель и используют для решения широкого круга прикладных задач (мониторинга земной поверхности, обнаружении объектов и др.). В большинстве случаев применяются лазерные локационные системы с пространственным сканированием и моноимпульсные лазерные системы без сканирования с импульсным излучением различной длительности (см., например, [1–3]).

В сканирующих лазерных системах продольная (вдоль направления полета) развертка обеспечивается вследствие движения носителя, а поперечная — в результате сканирования лазерного луча (применения качающегося зеркала, вращающейся призмы, акустооптических дефлекторов и т.п.).

Для сокращения времени обзора (и упрощения аппаратурной реализации, особенно при большой скорости носителя) предпочтительно использовать моноимпульсные лазерные системы, основанные на излучении локатором лазерного импульса и приеме лазерного сигнала, отраженного от сектора обзора на зондируемой поверхности.

Далее исследуются возможности моноимпульсного локационного лазерного метода обнаружения аномалий коэффициента отражения на земной поверхности.

На рис. 1 показана одна из схем моноимпульсного лазерного зондирования (в плоскости XOZ , перпендикулярной направлению полета

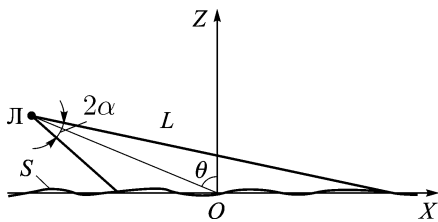


Рис. 1. Схема зондирования

зерного пучка; θ — угол между нормалью к плоскости и оптической осью локатора.

Здесь продольная развертка обеспечивается за счет движения носителя (как для лазерной системы с пространственным сканированием), а поперечная — вследствие регистрации лазерного импульса, отраженного от сектора обзора (протяженного участка земной поверхности, ориентированного перпендикулярно направлению полета носителя).

При проведении энергетических расчетов для задач лазерной локации в качестве модели земной поверхности в большинстве случаев [3] используется модель либо плоской ламбертовской поверхности, либо трехмерной случайно неровной локально-ламбертовской поверхности (с ламбертовской индикатрисой локальных участков). В работе [3] приведены интегральные уравнения локации в общей схеме бистатической локации для модели земной поверхности в виде неровной локально-ламбертовской поверхности.

Для слабо неровной ($R_{ox} \operatorname{ctg} \theta \geq \zeta$, $\gamma_x, \gamma_y \ll 1$, где ζ — высоты поверхности; γ_x, γ_y — компоненты вектора наклонов поверхности) поверхности S интегральное выражение для принимаемой мощности эхо-сигнала $P(t)$ в случае коаксиальной моностатической наклонной локации (источник, приемник и их оптические оси совмещены и лежат в одной плоскости XOZ , перпендикулярной направлению полета носителя) имеет вид [3]

$$P(t) \cong \int_S d\vec{R}_o \frac{A(\vec{R}_o)}{\pi} E_n(\vec{R}'_o) E_n(\vec{R}'_o) f\left(t - \frac{2L}{c} - \frac{2R_{ox} \sin \theta}{c}\right), \quad (1)$$

где $\vec{R}_o = \{R_{ox}, R_{oy}\}$ — вектор в плоскости $z = 0$; $\vec{R}'_o = \{R_{ox} \cos \theta, R_{oy}\}$; $A(\vec{R})$ — пространственное распределение коэффициента отражения (альbedo) поверхности; $E_n(\vec{R})$, $E_n(\vec{R})$ — освещенности локального участка поверхности, создаваемые излучением, падающим от действительного и фиктивного (с параметрами приемника) источников [3]; $f(t)$ — форма импульса лазерного источника.

Аргумент функции $f\left(t - \frac{2L}{c} - \frac{2R_{ox} \sin \theta}{c}\right)$ описывает задержку эхо-импульса на трассе лазерный локатор — текущая точка (на лоцируемой поверхности) — лазерный локатор.

носителя) и введены следующие обозначения: Π — носитель с лазерным локатором; S — лоцируемая земная поверхность (считаем ее в среднем плоской); L — наклонное расстояние от лазерного локатора до центра сектора обзора на поверхности; 2α — полный угол расходимости лазерного пучка;

При локации земной поверхности моноимпульсным методом приемник регистрирует протяженный отраженный сигнал, представляющий собой последовательность элементарных сигналов, каждый из которых соответствует определенному участку местности.

Локация однородных поверхностей приводит к тому, что отраженный сигнал будет состоять из подобных или плавно изменяющихся элементарных сигналов.

При локации поверхности с аномалиями коэффициента отражения отраженный сигнал будет содержать неоднородности (особенности), обусловленные аномалиями коэффициента отражения лоцируемой поверхности (подынтегральной функции $A(\vec{R})$). Таким образом, анализ временной реализации $P(t)$ отраженного сигнала потенциально позволяет обнаруживать аномалии коэффициента отражения $A(\vec{R})$ на земной поверхности.

Упростим формулу (1). Положим для простоты, что лазерный пучок и поле зрения приемника имеют вид одинаковых конусов ($E_n(\vec{R}) = E_{н.о} \cos \theta$ в пределах освещенного лазерного пятна на поверхности S , $E_{н.о}$ — освещенность от источника в плоскости, перпендикулярной оптической оси локатора; $E_n(\vec{R}) = 0$ вне освещенного лазерного пятна; $E_n(\vec{R}) = E_{п.о} \cos \theta$ в пределах поля зрения приемника на поверхности S ; $E_{п.о}$ — освещенность от фиктивного источника (с параметрами приемника) в плоскости перпендикулярной оптической оси локатора; $E_n(\vec{R}) = 0$ вне поля зрения приемника):

$$P(t') \cong \frac{E_{н.о} E_{п.о} \cos^2 \theta}{\pi} \int_{S_o} dR_{oy} dR_{ox} A(R_{ox}, R_{oy}) f\left(t' - \frac{2R_{ox} \sin \theta}{c}\right) = \\ = \frac{E_{н.о} E_{п.о} \cos^2 \theta}{\pi} \int_{S_{ox}} dR_{ox} \tilde{A}(R_{ox}) f\left(t' - \frac{2R_{ox} \sin \theta}{c}\right), \quad (2)$$

где $t' = t - \frac{2L}{c}$; $\tilde{A}(R_{ox}) = \int_{S_{oy}} A(\vec{R}_o) dR_{oy}$.

При небольшом размере ΔR_y лазерного пятна подсвета вдоль оси OY (таком, что альbedo поверхности практически не меняется в пределах ΔR_y) имеем

$$\tilde{A}(R_{ox}) = A(R_{ox}) \Delta R_y;$$

S_o — часть поверхности S , освещенная лазерным источником.

После ряда преобразований из (2) получим

$$B(\tau) \cong \int_{-\infty}^{\infty} A_o(R_{ox}) f(\tau - R_{ox}) dR_{ox}, \quad (3)$$

где

$$\tau = \frac{ct'}{2 \sin \theta}; \quad B(\tau) = \frac{\pi}{E_{и.о} E_{п.о} \Delta R_y \cos^2 \theta} P(\tau);$$

$A_o(R_{ox})$ — пространственное распределение альbedo поверхности вдоль оси OX .

Уравнение (3) представляет собой интегральное уравнение первого рода типа свертки [4].

Задача определения характеристик подынтегральной функции $A(R_{ox})$ по измеренной реализации $B(\tau)$ отраженного сигнала является обратной по своей постановке и в общем случае (при наличии шумов измерения) математически некорректной (см., например, [4]).

Для ее решения может быть эффективно использован подход, основанный на построении регуляризованного решения интегрального уравнения первого рода типа свертки [4].

В идеальном случае отсутствия шума измерения решение уравнения (3) имеет вид обратного преобразования Фурье [4]:

$$A(R_{ox}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{B(\omega) \exp(-i\omega\tau)}{f(\omega)} d\omega, \quad (4)$$

где $f(\omega)$, $B(\omega)$ — преобразование Фурье от функций $f(\tau)$, $B(\tau)$.

В реальном случае при наличии шума измерения задача определения характеристик подынтегральной функции $A(R_{ox})$ по временной реализации $B(\tau)$ отраженного сигнала является неустойчивой (небольшие изменения измеренной временной реализации $B(\tau)$ могут приводить к большим изменениям искомой функции $A(R_{ox})$). Во избежание этого нужно использовать (при приближенном решении искомой функции $A(R_{ox})$) метод регуляризации [4].

В этом случае решение уравнения (3) имеет вид [4]

$$A(R_{ox}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(-\omega)B(\omega) \exp(-i\omega\tau)}{L(\omega) + \alpha M(\omega)} d\omega, \quad (5)$$

где $L(\omega) = f(\omega)f(-\omega)$; $M(\omega)$ — заданная неотрицательная четная функция, кусочно-непрерывная на любом конечном отрезке; α — параметр регуляризации (при фиксированной заданной функции $M(\omega)$ его можно найти по методу невязки [4]).

Для исследования возможностей моноимпульсного локационного лазерного метода обнаружения аномалий на земной поверхности проводилось математическое моделирование.

Форма импульса лазерного источника полагалась гауссовой:

$f(t) \cong \exp\left\{-\frac{t^2}{\tau_n^2}\right\}$, где τ_n — длительность импульса лазера. Тогда

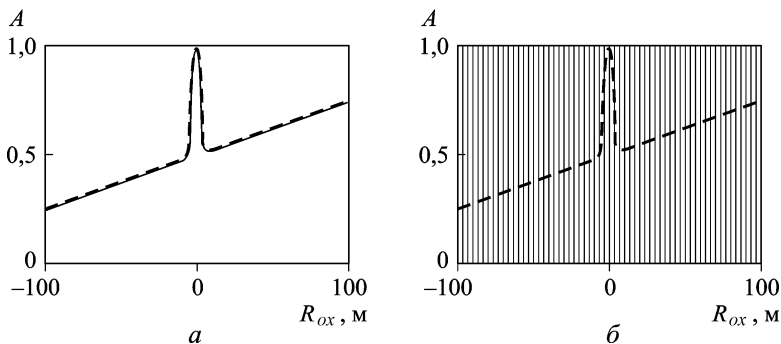


Рис. 2. Результат восстановления функции $A(R_{ox})$ без регуляризации в отсутствии шумов измерения (а) и для шумов измерения с $\sigma = 0,001 \%$ (б)

для функции $f(\tau)$ имеем

$$f(\tau) \cong \exp\left\{-\frac{\tau^2}{R_n^2}\right\},$$

где R_n — пространственная протяженность импульса лазера на лоцируемой поверхности, $R_n = \frac{c\tau_n}{2 \sin \theta}$.

Пространственное распределение $A(R_{ox})$ представлялось в виде комбинации постоянного значения, полинома и аномалии коэффициента отражения. Моделирование проводилось для разных функций, описывающих форму аномалий, в широком диапазоне шумов измерений, длительности импульса лазера, размера сектора обзора на поверхности и параметров аномалий.

На рис. 2 показан результат восстановления функции $A(R_{ox})$ по формуле (4) при отсутствии шумов (на рисунке пунктирная и сплошная линии соответствуют заданной и восстановленной функциям $A(R_{ox})$).

Расчеты проводились для пространственного распределения $A(R_{ox})$ в виде комбинации постоянного значения $a_0 = 0,5$, полинома первой степени $a_1 R_{ox}$ ($a_1 = 0,0025 \text{ м}^{-1}$) и аномалии коэффициента отражения в виде гауссовой функции:

$$A_a(R_{ox}) \cong a_a \exp\left\{-\frac{R_{ox}^2}{R_a^2}\right\},$$

где a_a — амплитуда аномалии ($a_a = 0,5$); R_a — пространственный размер аномалии ($R_a = 3,3 \text{ м}$).

Пространственная протяженность импульса лазера $R_n = 10 \text{ м}$ (например, при $\theta = 30^\circ$ это соответствует длительности импульса лазера $\tau_n \approx 33 \text{ нс}$). Размер освещенного участка поверхности (вдоль R_{ox}) равен $(-100 \text{ м}, 100 \text{ м})$.

Из рис. 2. а следует, что в отсутствии шумов функция $A(R_{ox})$ идеально восстанавливается. В этом случае диапазоны (в которых воз-

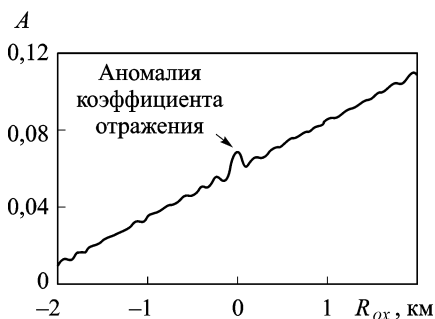


Рис. 3. Результат восстановления функции $A(R_{ox})$ с использованием метода регуляризации для шумов измерения с $\sigma = 4\%$

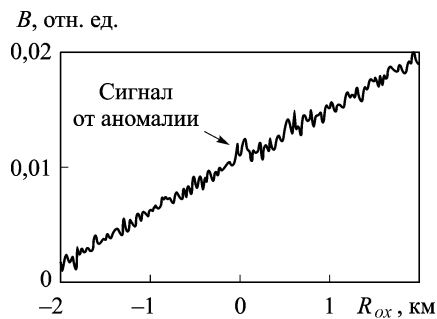


Рис. 4. Измеренная реализация отраженного сигнала

можно хорошее восстановление функции $A(R_{ox})$ пространственных размеров аномалий, освещенного участка поверхности и других параметров зависят только от возможностей используемых вычислительных средств.

При наличии даже незначительных шумов измерений восстановление функции $A(R_{ox})$ по формуле (4) становится невозможным. Для примера на рис. 2, б показан результат восстановления функции $A(R_{ox})$ по формуле (4) для шумов с относительным среднеквадратическим значением $\sigma = 0,001\%$ (при тех же значениях параметров, что и для рис. 2, а), восстановленная функция (тонкая сплошная линия) не имеет ничего общего с заданной функцией $A(R_{ox})$ (пунктирная кривая).

Использование метода регуляризации [4] позволяет найти приближенное решение для искомой функции $A(R_{ox})$.

На рис. 3 в реальных условиях шумов измерений приведены результаты восстановления пространственного распределения $A(R_{ox})$ по временной реализации $B(\tau)$ отраженного сигнала по формуле (5) (с использованием метода регуляризации решения). В качестве функции $M(\omega)$ использовалась функция $M(\omega) = \omega^2$. Расчеты проводились для $\sigma = 4\%$. Сама реализации $B(\tau)$ отраженного сигнала показана на рис. 4, где стрелкой отмечен сигнал от аномалии (сигнал от аномалии почти незаметен на реализации).

Расчеты для рис. 3 и 4 проводились при $a_0 = 0,06$, $a_1 = 0,025 \text{ м}^{-1}$, $a_a = 0,2$, $R_a = 2,5 \text{ м}$, $R_{и} = 100 \text{ м}$ (пространственная протяженность импульса лазера в 40 раз превышает размер аномалии). Размер освещенного участка поверхности равен (-2 км , 2 км).

Из рис. 3 следует, что метод регуляризации позволяет по временной реализации отраженного лазерного сигнала уверенно обнаруживать аномалии коэффициента отражения (аномалии функции $A(R_{ox})$) на фоне однородного (постоянного или слабо меняющегося) простран-

ственного распределения коэффициента отражения. Обнаружение аномалии возможно в большом секторе обзора лазерного локатора (размер сектора обзора — 4 км) и в случае, если пространственная протяженность импульса лазера в десятки раз превышает размер аномалии.

Диапазоны (в которых возможно хорошее восстановление функции $A(R_{ox})$) пространственных размеров аномалий, освещенного участка поверхности и других параметров зависят от возможностей используемых вычислительных средств и уровня шума измерения.

Таким образом, исследованы возможности моноимпульсного локационного лазерного метода обнаружения аномалий коэффициента отражения на земной поверхности. Показано, что использование метода регуляризации позволяет уверенно обнаруживать аномалии на фоне однородного (постоянного или слабо меняющегося) пространственного распределения коэффициента отражения в большом секторе обзора лазерного локатора даже в том случае, когда пространственная протяженность импульса лазера в десятки раз превышает размер аномалии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С а з о н н и к о в а Н. А. Повышение эффективности обнаружения при лазерном зондировании поверхности // Вестник Самарского гос. аэрокосмического ун-та. – 2009. – № 3 (19). – С. 219–226.
2. М е д в е д е в Е. М., Д а н и л и н И. М., М е л ь н и к о в С. Р. Лазерная локация Земли и леса. – Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2005. – 182 с.
3. О с н о в ы импульсной лазерной локации / В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.М. Орлов и др. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 528 с.
4. Т и х о н о в А. Н., А р с е н и н В. Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 288 с.

Статья поступила в редакцию 12.05.2011

Михаил Леонидович Белов родился в 1950 г., окончил в 1973 г. Московский энергетический институт. Д-р. техн. наук, вед. науч. сотр. НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области лазерной локации и атмосферной оптики.

M.L. Belov (b. 1950) graduated from the Moscow Power Engineering Institute in 1973. D. Sc. (Eng.), leading researcher of the Research Institute for Radio-Electronics and Laser Technology of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of laser location and optics of atmosphere.

Алексей Михайлович Белов родился в 1974 г., окончил в 1997 г. Московский энергетический институт. Инженер НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана.

A.M. Belov (b. 1974) graduated from the Moscow Power Engineering Institute in 1997. Engineer of the Research Institute for Radio-Electronics and Laser Technology of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of laser location.

Валентин Иванович Козинцев родился в 1945 г., окончил в 1969 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р.техн.наук, зам. директора НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области лазерной техники.

V.I. Kozintsev (b. 1945) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. D. Sc. (Eng.), deputy director of the Research Institute for Radio-Electronics and Laser Technology of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of laser technology.

Борис Викторович Стрелков родился в 1947 г., окончил в 1971 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Канд.техн.наук, декан факультета “Радиоэлектроника и лазерная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 60 научных работ в области лазерной и измерительной техники.

B.V. Strelkov (b. 1947) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1971. Ph. D. (Eng.), dean of “Radio-Electronics and Laser Technology” faculty of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 60 publications in the field of the laser and measuring technology.