

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА «АЭРОКОСМОС»

АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

под редакцией академика В.Г. БОНДУРА

Москва
«Научный мир»
2012

УДК 504.05/064/55/553.98
ББК 26.0



А 99

*Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 11-05-07084-д*

Рецензенты:

академик Н.С. Касимов,
член-корреспондент РАН В.П. Савиных

А 99 Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса. Под редакцией академика В. Г. Бондура — М.: Научный мир, 2012. 558 с.: ил. + 52 с. цв. ил. ISBN 978-5-91522-316-4

В данной книге проведены анализ и систематизация современных методов и технологий аэрокосмического мониторинга для исследования геологического строения нефтегазоносных территорий, поиска, разведки и освоения месторождений нефти и газа, оценки воздействий нефтегазового комплекса на окружающую среду, а также методов обработки аэрокосмических данных, новых типов аппаратуры и систем дистанционного зондирования, используемых для такого мониторинга. Подробно изложены задачи, решаемые с использованием методов и технических средств дистанционного зондирования при мониторинге нефтегазоносных территорий, а также объектов нефтегазового комплекса.

Рассмотрены научные проблемы, связанные с разработкой новых и развитием существующих аэрокосмических методов, аппаратуры и систем дистанционного зондирования для решения задач нефтегазового комплекса. Большое внимание уделяется решению проблем обработки больших потоков аэрокосмической информации, получаемой при мониторинге объектов нефтегазового комплекса, создании цифровых карт, трехмерных моделей местности, ГИС различной тематической направленности для нефтегазовой отрасли. Приведены примеры применения аэрокосмических данных для: изучения геологического строения различных нефтегазоносных регионов; поиска и разведки месторождений углеводородного сырья на суше и в морских акваториях; экологического мониторинга при разработке месторождений, а также при транспортировке нефти, газа и нефтепродуктов.

Материалы книги написаны ведущими учеными России и других стран, специализирующимися в областях дистанционного зондирования Земли, геологии нефти и газа, геоэкологии, геоинформатики и др. Книга будет полезна специалистам в области аэрокосмического мониторинга, поиска и разведки месторождений нефти и газа, геологии, экологии, а также преподавателям, аспирантам и студентам старших курсов. Она представит особый интерес для разработчиков и пользователей информационных технологий в сфере аэрокосмического мониторинга нефтегазового комплекса.

In this book, state-of-the-art aerospace monitoring methods and technologies for studying geological structures of oil and gas areas, search, exploration, and development of oil and gas fields, assessing the impact of oil and gas industry on the environment, as well as aerospace data processing methods, new types of equipment and remote sensing systems used for such monitoring are analyzed and systemized. Tasks solved using remote sensing methods and hardware for oil and gas area monitoring are given in details.

Scientific problems related with developing new aerospace methods and improving the existing ones, remote sensing instruments and systems for solving oil and gas facility tasks are considered. Considerable attention is paid to the problem of processing large flows of aerospace data obtained during monitoring of oil and gas facilities; creation of digital maps and 3D terrain models, various thematic GIS for oil and gas industry. There are described exemplary applications of aerospace data for studying geological structures of various oil and gas areas; search and exploration of crude hydrocarbons on land and in marine water areas; environmental monitoring during oil and gas field development, as well as during oil, gas, and oil product transportation.

The materials of the book have been written by prominent scientists from Russia and other countries, specializing in the fields of the Earth remote sensing, oil and gas geology, environmental geology, geoinformatics, etc. The book will be useful for specialists in the areas of aerospace monitoring, prospecting and exploration of oil and gas fields, geology, ecology, as well as for teachers, post-graduates, and senior students. The book will be of special interest to developers and users of information technologies in the field of aerospace monitoring of oil and gas industry.

УДК 504.05/064/55/553.98
ББК 26.0

ISBN 978-5-91522-316-4

© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Научно-исследовательский институт аэрокосмического
мониторинга «АЭРОКОСМОС», 2012
© Научный мир, 2012

В.Г. Бондур, А.Д. Доброзраков, А.С. Курекин, А.П. Пичугин

7.2. Метод бистатической радиолокации для контроля состояния морской поверхности и объектов нефтегазового комплекса в районах добычи и транспортировки углеводородов

Введение

Одним из эффективных методов мониторинга нефтяных загрязнений и естественных нефтегазовых проявлений на морской поверхности, объектов нефтегазового комплекса в районах добычи углеводородов в морских акваториях (нефтегазодобывающие платформы, нефтеналивные суда, прибрежные нефтехранилища), а также айсбергов, угрожающих нефтегазодобывающим платформам, является бистатическая (разнесенная) радиолокация (Анюхин, Горшков, 2006; Бондур и др., 2009; Черняк, 1993; Кондратьев и др., 1986; Соколов, 2003; Hartnet, Davis, 2001; Brahman, James, 2001). При разнесенной радиолокации передатчик и приемники радиолокатора занимают разные позиции в пространстве.

Расчет дальности действия любой РЛС является основополагающим при ее проектировании. Такой расчет обязательно предполагает наличие данных о характеристиках вторичного излучения (рассеяния) зондируемых объектов и подстилающих поверхностей, на которых они расположены. В связи с этим при теоретических и экспериментальных исследованиях рассеивающих свойств различных объектов основное внимание уделяется определению характеристик эффективной площади рассеяния целей (ЭПР) σ и удельной эффективной площади рассеяния поверхностей (УЭПР) σ^0 .

Известны несколько способов определения УЭПР и ЭПР в абсолютных единицах. Во-первых, это прямые измерения мощности излучения и мощности принятого сигнала, использование эталонных отражателей (радиолокационные уголки, линзы Люнеберга и др.). Во-вторых – использование активных ответчиков, встроенных в РЛС (сигнал-генераторы, эхобоксы и др.) (Радиолокационные методы..., 1980; Бычков и др., 2005). Основным недостатком этих методов является необходимость проведения абсолютных измерений энергетических параметров РЛС или ЭПР эталонов, что не всегда можно обеспечить с достаточной точностью.

На дальность действия РЛС, предназначенных для обнаружения объектов, расположенных над поверхностью, большое влияние оказывают множители ослабления. Для точечных объектов их расчет не представляет трудностей, если известны параметры поверхности (степень шероховатости, диэлектрическая проницаемость, наличие сликов, сулоев, естественных и техногенных загрязнений и др.) (Голев, 1962).

При морской радиолокации корабли, нефтегазодобывающие платформы, айсберги и другие аналогичные объекты нельзя считать точечными, что накладывает дополнительные условия на расчет множителей распространения, величины которых зависят от степени волнения, химического состава воды и формы эквивалента исследуемых объектов.

В настоящем разделе книги рассмотрены особенности расчета дальности действия разнесенных РЛС по морским объектам, включающие методику измерения ЭПР, определение величин множителей ослабления и определение формы исследуемого объекта.

Методика определения ЭПР

В литературе имеются многочисленные данные о вторичном излучении надводными объектами и морской поверхностью в прилегающих участках для совмещенной радиолокации, например, (Барсков, 1962; Койфман, Осис, 1967; Bass et. al., 1968; Blyakbman, Runova, 2001). В то же время такие данные для разнесенной (бистатической) радиолокации практически отсутствуют. В связи с этим для изучения характеристик вторичного излучения для бистатических РЛС предлагается метод определения ЭПР морских объектов в абсолютных единицах и УЭПР морской поверхности. Преимущества метода связаны с тем, что при его использовании не требуется проведение абсолютных измерений. Следует отметить, что предлагаемый метод применим и для наземных объектов.

Как известно, ЭПР объекта разнесенная (σ_d) или совмещенная (σ_c) определяется через измеренную величину мощности сигнала $P_{пр}$, рассеянного им в направлении приемника. Для бистатической (двухпозиционной) системы имеем (Бондур и др., 2009)

$$P_{пр} = \frac{P_n G_n G_{пр} \lambda^2 \sigma_d V_1^2 V_2^2}{64\pi^3 R_1^2 R_2^2}, \quad (1)$$

где $P_{пр}$ – импульсная мощность излучения передатчика;

G_n – усиление передающей антенны в направлении объекта;

$G_{пр}$ – усиление приемной антенны в направлении объекта;

R_1 – расстояние передатчик – объект;

R_2 – расстояние приемник – объект;

V_1, V_2 – множители распространения на трассах передатчик – объект и приемник – объект соответственно;

λ – длина радиоволны.

Определение характеристик вторичного излучения объектов при разнесенной радиолокации можно значительно упростить, если дополнительно измерить мощность прямого сигнала передатчика $P_{прям}$ приемником РЛС. В этом случае величина принятой мощности запишется как

$$P_{прям} = \frac{P_n G_n' G_{пр}' \lambda^2 V_3^2}{16\pi^2 R_3^2}, \quad (2)$$

где G_n' – усиление антенны передатчика в направлении приемника;

$G_{пр}'$ – усиление приемной антенны в направлении передатчика;

R_3 – расстояние передатчик – приемник;

V_3 – множитель распространения на трассе R_3 .

В случае, когда объект находится в максимуме диаграммы направленности передающей антенны, из (1) и (2) имеем

$$\sigma_d = 4\pi \frac{P_{пр}}{P_{прям}} \frac{R_1^2 R_2^2}{R_3^2} \frac{V_3^2}{V_1^2 V_2^2} \frac{\Phi_n^2 \Phi_{пр}'^2}{\Phi_{пр}^2}, \quad (3)$$

где $\Phi_n^2 = G_n' / G_n$ – множитель диаграммы направленности антенны передатчика в направлении приемника, учитывающий отклонение направления максимума излучения от направления на приемник при измерении $P_{прям}$;

$\Phi_{\text{пр}}^2 = G_{\text{пр}} / G_{\text{пр макс}}$, $\Phi_{\text{пр}}^2 = G'_{\text{пр}} / G_{\text{пр макс}}$ – множители диаграммы направленности приемной антенны в направлении объекта и передатчика соответственно;
 $G_{\text{пр макс}}$ – усиление антенны приемника в направлении ее максимума.

Выражение (3) дает абсолютные значения величины эффективной площади двухпозиционного рассеяния. При этом измерения мощности сигнала $P_{\text{пр}}$, рассеянного целью, и мощности прямого сигнала передатчика $P_{\text{прям}}$ не обязательно должны быть абсолютными. Достаточно выполнить эти измерения одним и тем же приемником с неизменными параметрами. Это значительно облегчает проведение опытов, поскольку не требуется абсолютная калибровка приемного устройства. Для получения надежных результатов необходимо лишь измерить форму диаграмм направленности приемной и передающей антенн и прокалибровать в относительных единицах амплитудную характеристику приемника.

Множители V_1, V_2, V_3 в (3) определяются условиями распространения на соответствующих трассах, геометрией разнесения, формой эквивалента цели по высоте h и зависят от степени шероховатости подстилающей поверхности и ее диэлектрической проницаемости ϵ , определяемой химическим составом воды. Как правило, множитель распространения $V_3 \approx 1$ (на трассе приемник – передатчик) не влияет на условия распространения сигнала от передатчика к приемнику.

Таким образом, применение описанной методики позволяет получить абсолютные значения эффективной площади двухпозиционного рассеяния целей из относительных измерений двух величин $P_{\text{пр}}$ и $P_{\text{прям}}$ без определения энергетических характеристик разнесенной системы.

При определении эффективной площади двухпозиционного рассеяния σ_d необходимо с достаточной точностью знать величину множителей распространения V_1 и V_2 на соответствующих трассах (3). Для точечных объектов их расчет не представляет затруднений и может быть произведен по формулам, полученным в работе (Голев, 1962).

Множители распространения на трассах передатчик – объект и приемник – объект определяются как:

$$V_1 = \sqrt{(1 - M_1)^2 + 4M_1 \sin^2 \frac{\Omega_1}{2}}, \quad (4)$$

$$V_2 = \sqrt{(1 - M_2)^2 + 4M_2 \sin^2 \frac{\Omega_2}{2}},$$

где $M_1 = \gamma_1 D$, $M_2 = \gamma_2 D$; γ_1, γ_2 – модули коэффициентов падающей и отраженной радиоволн, зависящие в свою очередь от h_m и h_1 (где h_m и h_1 – высота морских волн и высота элемента сооружения над морской поверхностью океана соответственно);

D – коэффициент расходимости, учитывающий уменьшение плотности потока энергии луча, отраженного от поверхности Земли;

Ω_1, Ω_2 – разности фаз между прямым и отраженным лучами соответственно.

Для расчета разнесенных ЭПР σ_d элементов целей, распределенных по высоте h , к которым относятся корабли, платформы и др. объекты на поверхности океана, необходимо учитывать среднеквадратические значения \bar{V}_1^2 и \bar{V}_2^2 , которые могут быть опре-

делены из выражений (4), если задаться, например, прямоугольной формой эквивалента корабля или другого сооружения над поверхностью океана, и если известны зависимости $M(h_M)$ и $\Omega_{1,2}(h)$.

При этом для каждого элемента надводного объекта, расположенного на конкретной высоте h_i (см. рис. 7.2.1), имеем:

$$V_1 = \sqrt{[1 - M_1(h_M, h_i)]^2 + 4M_1(h_M, h_i) \sin^2 \frac{\Omega_1(h_i)}{2}}, \quad (5)$$

$$V_2 = \sqrt{[1 - M_2(h_M, h_i)]^2 + 4M_2(h_M, h_i) \sin^2 \frac{\Omega_2(h_i)}{2}}.$$

Если принять форму эквивалента исследуемого объекта в виде прямоугольника, то

$$\overline{V_1^2 V_2^2} = \frac{1}{h_{\max}} \int_0^{h_{\max}} V_1^2 V_2^2 dh, \quad (6)$$

где h_{\max} — максимальная высота эквивалента объекта.

Для плоской Земли ($D = 1$) и малых углов места передатчика и приемника

$$\overline{V_1^2 V_2^2} = \frac{1}{h_{\max}} \int_0^{h_{\max}} \left[(1 - v_1)^2 + 4v_1 \sin^2 \frac{\Theta_1}{2} \right] \left[(1 - v_2)^2 + 4v_2 \sin^2 \frac{\Theta_2}{2} \right] dh, \quad (7)$$

где $\Theta_1 = \frac{4\pi H_1 h}{\lambda R_1}$;

$$\Theta_2 = \frac{4\pi H_2 h}{\lambda R_2};$$

h — текущая высота наблюдаемого объекта;

$$v_1 = e^{-2 \left(\frac{2\pi h_M \sin \psi_{1c}}{\lambda} \right)^2};$$

$$v_2 = e^{-2 \left(\frac{2\pi h_M \sin \psi_{2c}}{\lambda} \right)^2}.$$

Угол скольжения зеркально отраженного поверхностью облучающего сигнала равен (Голев, 1962):

$$\psi_{1c} \approx \frac{H_1 + h}{\sqrt{R_1^2 + 4H_1 h}}$$

H_1 — высота антенны передатчика.

Угол скольжения зеркально отраженного поверхностью сигнала, рассеянного кораблем (или другим изучаемым объектом), равен:

$$\psi_{2c} \approx \frac{H_2 + h}{\sqrt{R_2^2 + 4H_2 h}}$$

H_2 — высота антенны приемника.

Анализ выражения (7) в общем виде является очень громоздким, поэтому рассмотрим некоторые типичные частные случаи.

Поскольку $v_1(h)$ и $v_2(h)$ являются медленно изменяющимися функциями по сравнению с

$$\sin^2 \frac{\Theta_1}{2} \text{ и } \sin^2 \frac{\Theta_2}{2} \text{ на участке } h \text{ от } 0 \text{ до } h_{\text{макс}}, \text{ то}$$

$$\overline{V_1^2 V_2^2} = \left(1 + \overline{v_1^2}\right) \left(1 + \overline{v_2^2}\right) - 2\overline{v_1} \left(1 + \overline{v_2^2}\right) \frac{\sin \Theta'_1}{\Theta'_1} - 2\overline{v_2} \left(1 + \overline{v_1^2}\right) \frac{\sin \Theta'_2}{\Theta'_2} +$$

$$+ 2\overline{v_1} \left[\frac{\sin(\Theta'_1 + \Theta'_2)}{\Theta'_1 + \Theta'_2} + \frac{\sin(\Theta'_1 - \Theta'_2)}{\Theta'_1 - \Theta'_2} \right] \quad , \quad (8)$$

где $\overline{v_1}$ и $\overline{v_2}$ – средние значения коэффициентов отражения по высоте эквивалента наблюдаемого объекта h от 0 до $h_{\text{макс}}$;

$$\Theta_1 = \frac{4\pi H_1 h_{\text{макс}}}{\lambda R_1} \quad ;$$

$$\Theta_2 = \frac{4\pi H_2 h}{\lambda R_2} \quad .$$

Если надводный объект находится в многолепестковой зоне облучающего поля ($\Theta'_1 > 2\pi$) и приемник расположен в многолепестковой зоне рассеянного объектом поля ($\Theta'_2 > 2\pi$), то

$$\overline{V_1^2 V_2^2} = \left(1 + \overline{v_1^2}\right) \left(1 + \overline{v_2^2}\right) + 2\overline{v_1 v_2} \quad .$$

Тогда для случая $v_1 = v_2 = 1$ имеем $\overline{V_1^2 V_2^2} = 6$. Это равносильно одинаковым условиям распространения на трассах R_1, R_2 . Эта величина совпадает с величиной среднего значения множителя распространения для совмещенного радиолокатора при таких же условиях ($\overline{V^4} = 6$) (Голев, 1962).

Если выполняется условие $\Theta'_2 > 2\pi$ и $\Theta'_1 \leq 2\pi$, то имеем

$$\overline{V_1^2 V_2^2} = \left(1 + \overline{v_1^2}\right) \left(1 + \overline{v_2^2}\right) - 2\overline{v_1} \left(1 + \overline{v_2^2}\right) \frac{\sin \Theta'_1}{\Theta'_1} \quad .$$

Следует отметить, что для объектов, распределенных по высоте, каковыми являются корабли, платформы и другие надводные сооружения, значения $\overline{V_1^2}$ и $\overline{V_2^2}$ отдельно не существуют, а ослабление на трассах R_1, R_2 определяется средним по высоте сооружения произведением $\overline{V_1^2 V_2^2}$.

При расчете $\overline{V_1^2 V_2^2}$ необходимо принимать во внимание условия, налагающие ограничения на расстояния R_1 и R_2 :

$$R_1 < \frac{2H_1 h_{\text{макс}}}{\lambda}, \text{ т.е. } \Theta'_1 > 2\pi \quad , \quad (9)$$

$$R_2 < \frac{2H_2 h_{\text{макс}}}{\lambda}, \text{ т.е. } \Theta'_2 > 2\pi \quad (10)$$

при возможных вариациях высотного распределения рассеянного поля (Койфман, Осис, 1967).

Если не выполняется условие (9), наблюдаемый объект освещается скатом интерференционного лепестка, а при нарушении (10) приемник расположен ниже максимума первого интерференционного лепестка рассеянного поля, и расчет множителей ослабления следует вести по иным правилам (Голев, 1962).

Расчет дальности действия бистатической РЛС

Для определения эффективности применения двухпозиционных РЛС на море проведем расчет дальности действия таких систем и сравним ее с дальностью действия совмещенных РЛС.

Достижимая (максимальная) дальность обнаружения объекта $R_{\text{макс}}$ с использованием совмещенной РЛС определяется как

$$R_{\text{макс}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{п}}^c (G_{\text{п}}^c)^2 \lambda^2 \sigma_c \bar{V}_c^4}{64\pi^3 P_{\text{пр. мин}}^c}}, \quad (11)$$

где $P_{\text{пр. мин}}^c$ – мощность порогового сигнала, которая зависит от выбранного порога обнаружения;

$P_{\text{п}}^c$ – импульсная мощность излучения передатчика;

$G_{\text{п}}^c$ – коэффициент усиления антенны РЛС;

\bar{V}_c – средний множитель распространения на трассе $R_{\text{макс}}$ для совмещенной РЛС.

В этом случае произведение двух расстояний на трассе наблюдения объекта запишется следующим образом

$$(R_1 R_2)_{\text{макс}} = \sqrt{\frac{P_{\text{п}}^d G_{\text{п}}^d G_{\text{пр}}^d \lambda^2 \sigma_d V_1^2 V_2^2}{64\pi^3 P_{\text{пр. мин}}^c}}, \quad (12)$$

где $P_{\text{п}}^d$ – импульсная мощность излучения, $G_{\text{п}}^d$ – коэффициент усиления антенны передатчика, $G_{\text{пр}}^d$ – коэффициент усиления антенны приемника.

При равенстве эффективных площадей рассеяния $\sigma_d = \sigma_c$, что в среднем имеет место для надводных объектов, и $G_{\text{пр}}^c = G_{\text{пр}}^d$

$$\left(\frac{R_1 R_2}{R^2}\right)_{\text{макс}} = \sqrt{\frac{P_{\text{п}}^d G_{\text{п}}^d P_{\text{пр. мин}}^c \bar{V}_1^2 \bar{V}_2^2}{P_{\text{п}}^c G_{\text{п}}^c P_{\text{пр. мин}}^d \bar{V}_c^4}}. \quad (13)$$

Для расчетов по соотношению (13) необходимо определить среднюю величину совместного множителя ослабления $\bar{V}_1^2 \bar{V}_2^2$. Такой расчет не представляет затруднений при известных характеристиках сигнала, облучающего цель, и распределении эффективной площади рассеяния цели σ_d по высоте h .

Учитывая, что значение $\bar{V}_1^2 \bar{V}_2^2$ существенно зависит от $\Delta h = h_{\text{макс}} - h_{\text{мин}}$ ($h_{\text{макс}}$ и $h_{\text{мин}}$ – максимальная и минимальная высоты отражателей наблюдаемого объекта), то представляет интерес экспериментально определить местоположение основных отражателей по высоте h для случая разнесения в пространстве передатчика и приемника.

С этой целью был проведен эксперимент по измерению характеристик вторичного излучения корабля при его удалении от передатчиков разнесенной РЛС.

В этом случае по изменению величины принимаемой мощности рассеянного сигнала можно оценить высоту расположения его основных отражателей. В проведенных экспериментах были измерены диаграммы рассеяния в угломестной плоскости нефтеналивного танкера на различных дальностях R_1 (передатчик – корабль) и двух длинах волн $\lambda = 3,2$ см и $\lambda = 10$ см.

Эксперимент проводился следующим образом. Антенны передатчиков, работающих поочередно на длинах волн $\lambda = 3,2$ см и $\lambda = 10$ см, располагались на высоте $H_1 = 30$ м от поверхности воды и наводились на корабль. Он удалялся от передатчиков, находясь постоянно в максимуме их диаграмм направленности. Расстояние R_1 определялось корабельными навигационными приборами и контролировалось береговым локатором, совмещенным с передатчиками.

Приемники разнесенного измерительного комплекса были расположены на самолете, который совершал полеты на высоте $H_2 = 250$ м либо по линии передатчик – корабль, либо по ходу корабля, либо навстречу с максимальным удалением от корабля, равным 10 км в направлении передатчиков. Это обеспечивало изменение угла скольжения приемников ψ_2 от $1,5$ до 90° .

Местоположение самолета определялось по текущему времени от момента пролета самолета над кораблем. При этом предполагалось, что во время записи рассеянного сигнала расстояние передатчик – корабль R_1 мало изменяется вследствие значительной разности в скоростях движения корабля и самолета. Скорость движения корабля учитывалась лишь при определении угла скольжения ψ_2 (угол скольжения в направлении приемников).

Для нахождения абсолютного значения ЭПР записывался уровень прямого сигнала передатчиков при пролете самолета на высоте $H_2 = 20$ м на расстояниях от передатчиков от 5 до 35 км. Записи велись непрерывно, что позволило определять среднюю величину $P_{\text{прям}}/\sqrt{V_3^2}$ на любой дальности от передатчиков в указанных пределах. Поскольку мощность прямого сигнала определялась непосредственно в месте расположения цели ($R_1 = R_3$), то выражение для σ_d в абсолютных единицах принимает вид

$$\sigma_d = 4\pi \frac{P_{\text{пр}}}{V_1^2 V_2^2} \frac{\overline{V_3^2}}{P_{\text{прям}}} R_2^2 \frac{1}{\Phi_{\text{пр}}^2}, \quad (14)$$

где R_2 – расстояние корабль – самолет;

$\Phi_{\text{пр}}$ – множитель диаграммы направленности антенны приемника.

Измерения проводились при волнении моря около 4 баллов. Высота полета ($H_2 = 250$ м) обеспечивала прямую видимость цели со стороны приемников в указанных пределах изменения ψ_2 . В этих условиях коэффициент отражения морской поверхности $\gamma_2 \rightarrow 1$ и $\overline{V_2^2 V_2^2} \approx \overline{V_1^2}$.

Из записи сигнала, рассеянного кораблем с использованием (14) определялась величина $\overline{V_1^2} \sigma_d$ в зависимости от угла места приемников ψ_2 при различных дальностях передатчик – корабль R_1 .

На рис. 7.2.2 приведены угломестные диаграммы рассеяния нефтеналивного танкера на длине волны $\lambda = 3,2$ см, полученные при трех значениях дальности R_1 : 10, 19 и 34 км. По вертикальной оси отложены значения $\overline{V_1^2} \sigma_d$, усредненные в пределах от 3 до 10° .



Рис. 7.2.1. К определению высоты расположения основных отражателей исследуемых объектов

Сравнивая зависимости $\bar{V}_1^2 \sigma_d(\psi_2)$, полученные при различных дальностях R_1 , можно заметить, что величина $\bar{V}_1^2 \sigma_d$ практически не отличается для $R_1 = 10$ км и $R_1 = 19$ км, а при $R_1 = 34$ км значения $\bar{V}_1^2 \sigma_d$ на 5–7 дБ ниже, чем при $R_1 = 10, 19$ км.

Для объяснения полученных результатов разделим условно корабль (по которому проводились измерения) по высоте h на две характерные части (рис. 7.2.1): от $h = 0$ на уровне поверхности моря до высоты палубы $h_1 = 3,6$ м и до высоты мачт, достигающей 30 м (h_2).

Расчетные значения $\bar{V}_1^2 \sigma_d(R_1)$ для стандартной рефракции и высоты антенн передатчика $H_1 = 30$ м представлены на рис. 7.2.3. Здесь же значками нанесены измерен-

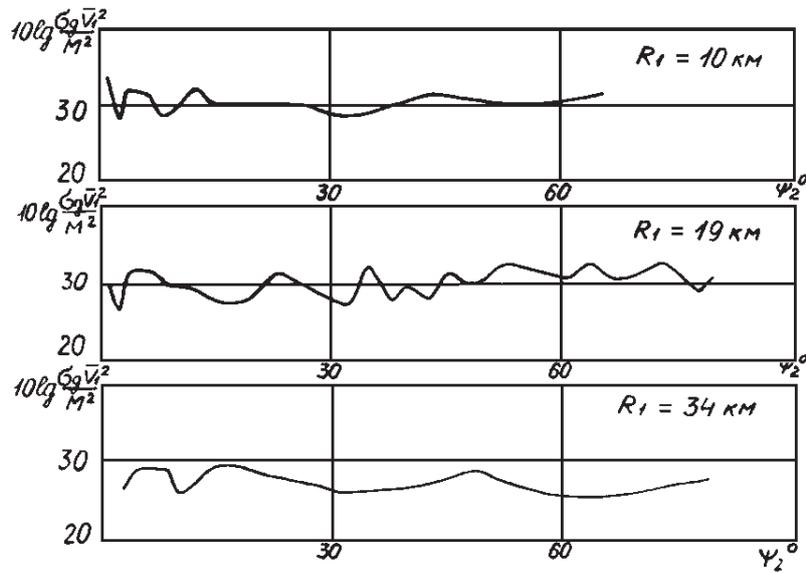


Рис. 7.2.2. Угловые диаграммы вторичного излучения большого ракетного корабля на волне 3,2 см при различных его удалениях от передатчика

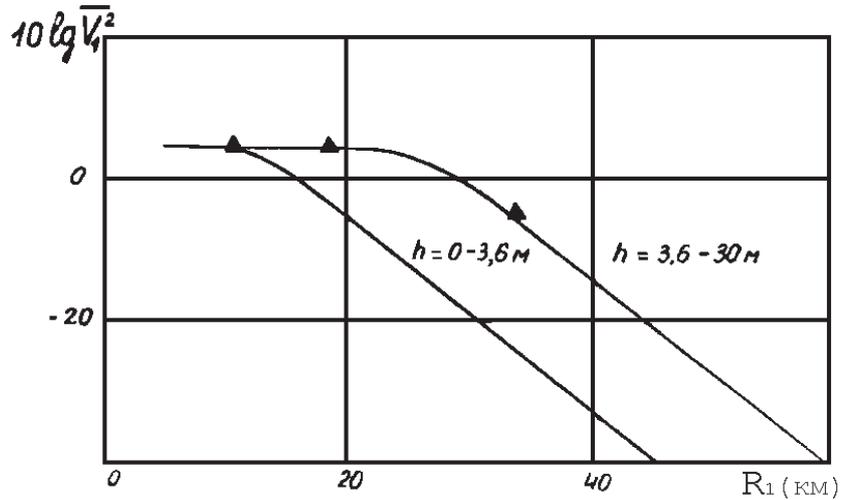


Рис. 7.2.3. Расчетные зависимости \bar{V}_1^2 от дальности передатчик – корабль. Значками показаны экспериментальные значения \bar{V}_1^2

ные величины $\bar{V}_1^2 \sigma_d$, усредненные по углу ψ_2 . Взаимная привязка рассчитанных \bar{V}_1^2 и экспериментальных $\bar{V}_1^2 \sigma_d$ значений произведена при $R_1 = 10$ км.

Поскольку в среднем величина $\bar{V}_1^2 \sigma_d$ (рис. 7.2.2) на дальности $R_1 = 10$ км такая же, как и при $R_1 = 19$ км, можно предположить, что отражатели на корабле расположены

выше уровня палубы $h > 3,6$ м и находятся в области надстроек, так как \bar{V}_1^2 по высоте от $h = 3,6$ м до $h = 25$ м не изменяется с ростом R_1 от 10 км до 19 км. При $R_1 > 30$ км величина $\bar{V}_1^2 \sigma_d$ согласно расчетам должна уменьшаться (рис. 7.2.3).

Этот вывод подтверждается результатами экспериментальных исследований при $R_1 = 34$ км. На этой дальности $\bar{V}_1^2 \sigma_d$ снижается на 5–7 дБ, что является следствием уменьшения \bar{V}_1^2 на высотах $h > 3,6$ м. Полученные значения $\bar{V}_1^2 \sigma_d$ на длине волны $\lambda = 3,2$ см оказались выше, чем $\bar{V}_1^2 \sigma_d$ на длине волны $\lambda = 10$ см (6–8 дБ) при дальности $R_1 = 34$ км. Это обуславливается разными значениями множителей распространения на длинах волн $\lambda = 3,2$ см и $\lambda = 10$ см.

Согласно расчету при указанных выше условиях

$$10 \lg \frac{\overline{(V_{1\lambda=3,2}^2)}}{\overline{(V_{1\lambda=10}^2)}} \approx 7.$$

Таким образом, хорошее совпадение с расчетом экспериментальных данных говорит о незначительном вкладе в рассеянный сигнал отражений от элементов корабля (или других надводных объектов), расположенных ниже палубы корабля или основания платформы.

Полученные данные о месторасположении рассеивающих элементов и их физическом состоянии при разнесении в пространстве приемника и передатчика совпадают с данными, приведенными в статье (Хляп, 1967) для совмещенных РЛС.

При дальнейшей оценке отношения (13) необходимо определить значения мощности пороговых сигналов $P_{\text{пр.мин}}^d$ и $P_{\text{пр.мин}}^d$. Полагая, что мощность этих сигналов для надводных морских систем в большинстве случаев ограничена не внутренними шумами приемного устройства, а интенсивностью помех от морской поверхности, проведем учет влияния взволнованной поверхности моря на дальность действия совмещенной и двухпозиционной систем в различных ситуациях их применения.

В случае, когда

$$\frac{\overline{V_1^2 V_2^2}}{\overline{V^4}} \approx 1,$$

(что имеет место при расположении объекта в зоне прямой видимости разнесенной и совмещенной систем, и при одинаковых параметрах этих РЛС) отношение (13) будет зависеть от отношения совмещенной и двухпозиционной УЭПР (σ_c^0 / σ_d^0). Величина этого отношения может быть много больше единицы (Горобец и др., 1998).

В некоторых ситуациях интенсивность помех от морской поверхности сравнима с мощностью внутренних шумов приемных устройств. В этом случае на зависимость (13) оказывает влияние отношение множителей распространения

$$\frac{\overline{V_1^2 V_2^2}}{\overline{V^4}}.$$

Иногда, например, при вынесении приемника разнесенной РЛС в зону прямой видимости, это отношение может превышать значение 1.

Поскольку на летательном аппарате невозможно применить антенну больших размеров, а локатор корабля имеет значительный потенциал излучения, то можно принять

$$\frac{P_{\Pi}^d G_{\Pi}^d}{P_{\Pi}^c G_{\Pi}^c} \approx 10^2 \quad .$$

Полагая одинаковыми ширины диаграмм приемных антенн $\Theta_2 = \Theta$ сравниваемых систем и $\Theta_2 > \Theta_1$ в разнесенной системе, из (13) получим

$$\frac{R_1^2 R_2^2}{R^4} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_c^0}{\sigma_1^0} \frac{\Theta}{\Theta_1} \frac{R_1 R_2^2}{R^3} \frac{V_1^2 V_2^2}{V^4} \quad . \quad (15)$$

Из проведенного анализа следует, что при $\Theta / \Theta_1 \approx 4$ отношение $R_1 / R \approx 220$.

Как следует из (15), при любых расстояниях R_2 (приемник – объект), R_1 (передатчик – объект) дальность действия такой двухпозиционной системы намного больше, чем при работе совмещенной РЛС (даже для случая $V_1^2 V_2^2 \ll 1$). Результат $R_1 \gg R$ обусловлен низким уровнем помех от подстилающей поверхности для разнесенной системы ($\sigma_c^0 / \sigma_d^0 \gg 1$) (Blyakbman, Runova, 2001) и говорит о том, что ее дальность действия ограничивается не помехами от рассеяния подстилающей поверхностью, что имеет место для совмещенной системы, а лишь тепловыми шумами входного устройства приемного тракта РЛС.

Выводы

Анализ результатов проведенных исследований позволил выявить особенности расчета дальности действия систем бистатической радиолокации при мониторинге объектов нефтегазового комплекса на море, которые необходимо учитывать при проектировании таких РЛС.

Получены выражения для расчета множителей ослабления (распространения) в случае применения бистатической радиолокации на море по объектам, распределенным по высоте. Это может быть применимо для оценки физического состояния отдельных элементов надводных, а также и наземных сооружений нефтегазового комплекса, с использованием не только амплитудных, но и фазовых характеристик рассеянных сигналов, что повышает достоверность получаемой информации.

При расчете дальности действия бистатических РЛС необходимо учитывать тот факт, что основная доля энергии радиоволн, рассеянных объектами, создается элементами объектов нефтегазового комплекса (нефтеналивные суда, нефтегазодобывающие платформы и т.п.), расположенными выше уровня моря, над которым находятся исследуемые объекты.

Во многих случаях использование бистатической радиолокации на море и на суше может быть более эффективным, чем совмещенной, в частности, по дальности действия и детализации физического состояния отдельных элементов наблюдаемых объектов.

Литература

1. Анохин И.Г., Горшков А.А. Вариант реализации обзора Земли с двухпозиционным синтезированием // Фазотрон. Информационно–аналитический журнал. 2006. № 3–4 (7). С. 34–35.
2. Барсков В.В. Экспериментальное исследование эффективной площади рассеяния крейсера // Военная радиоэлектроника. 1962. № 21/22. С. 41–46.

3. *Бондур В.Г., Доброзраков А.Д., Курекин А.С., Курекин А.А., Пичугин А.П., Яцевич С.Е.* Рассеяние радиоволн морской поверхностью при бистатической локации // Исследование Земли из космоса. 2009. № 6. С. 3–15.
4. *Бычков Д.М., Гавриленко А.С., Гананольский Е.М.* и др. Комбинированная калибровка радиолокаторов бокового обзора с реальной и синтезированной апертурой // Успехи современной радиоэлектроники. 2005. № 6. С. 31–41.
5. *Голев К.В.* Расчет дальности действия радиолокационных станций. М.: Сов. Радио. 1962. 204 с.
6. *Горобец В.Н., Картунов В.А., Кивва Ф.В.* О возможности определения дифракционного горизонта с использованием высотного профиля поля // Радиофизика и электроника. 1998. № 5. С. 65–68.
7. *Койфман И.Д., Осис И.Л.* Результаты исследований вторичного излучения радиоволн морскими целями // Военная радиоэлектроника. 1967. № 10. С. 13–17.
8. *Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н.* и др. Многопозиционные радиотехнические системы. М.: Радио и связь. 1986. 164 с.
9. Радиолокационные методы исследования Земли / Под ред. *Ю.А. Мельника*. М.: Сов. Радио. 1980. 220 с.
10. *Соколов А.В.* Вопросы перспективной радиолокации. М.: Радиотехника. 2003. 512 с.
11. *Хляп Б.Н.* Экспериментальное исследование дифференциальных отражающих характеристик кораблей на волне 3,2 см // Военная радиоэлектроника. 1967. № 10 (227). С. 25–29.
12. *Черняк В.С.* Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь. 1993. 240 с.
13. *Bass F.G., Fuks I.M., Kalmykov A.I.* et. al. Very high frequency radiowave scattering by a disturbed sea surface // IEEE Trans. Antennas Propag. 1968. V. 16. № 5. P. 554–559.
14. *Blyakbman A.B., Runova I.A.* Bistatic radar cross section and the detection of objects from their forward scatter // J. Commun. Technol. Electron. 2001. № 46 (4). P. 393–401.
15. *Brahman H., James H.M., Yuhong Z.* Bistatic STAP Performance Analysis in Radar Applications // IEEE Radar Conference. 2001. P. 198–203.
16. *Hartnet M.P., Davis M.E.* Bistatic Surveillance of Operations // IEEE Radar Conference. 2001. P. 75–80.