

УДК 621.396+681.322

В. В. Леонтьев, А. А. Пименов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Новая парадигма решения задачи радиолокационного обнаружения пленок нефти при скользящих углах облучения поверхности моря

Показана низкая эффективность использования серийно выпускаемых судовых навигационных радиолокационных станций (РЛС) для обнаружения пленок нефти на поверхности моря. Обсужден новый подход к постановке проблемы обнаружения пленок нефти на поверхности моря с помощью РЛС при скользящих углах облучения. Предложено разработать специализированные РЛС; сформулирован перечень задач, решение которых необходимо для создания таких РЛС.

Радиолокация, моделирование, рассеяние радиоволн, морская поверхность, эффективная площадь рассеяния, нефтяная пленка

При экологическом мониторинге загрязненности морской поверхности нефтепродуктами используют различные радиолокационные станции (РЛС). В зависимости от угла, под которым электромагнитное поле облучает морскую поверхность, РЛС принято объединять в две большие группы. К первой группе относят береговые и судовые навигационные РЛС, облучающие море при малых углах скольжения, ко второй группе – РЛС космических и летательных аппаратов, угол облучения моря которых обычно лежит в диапазоне от 30 до 60°. В то время как космические и самолетные РЛС осуществляют периодический контроль больших площадей, береговые и судовые – непрерывный контроль локальных областей.

В настоящей статье обоснована необходимость изменения подхода к решению задачи радиолокационного обнаружения пленок нефти на поверхности моря, при котором используются стандартные береговые или судовые навигационные РЛС.

Радиолокационное обнаружение пленок нефти на поверхности моря базируется на отличии эффективной площади рассеяния (ЭПР) моря с загрязнением от ЭПР чистого моря.

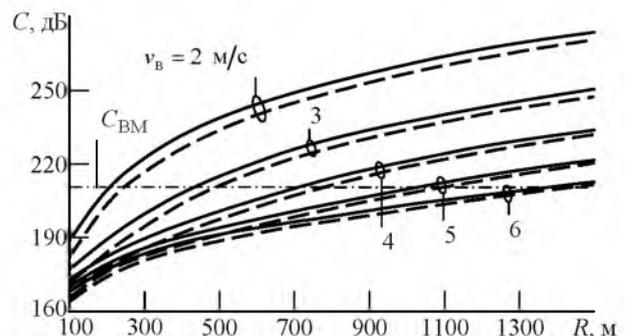
ЭПР чистой морской поверхности зависит от длины волны и поляризации РЛС, угла скольжения электромагнитного поля, угла между линией визирования антенны РЛС в горизонтальной

плоскости и направлением ветра, скорости ветра, шероховатости поверхности и ее электрических характеристик (в частности, комплексной диэлектрической проницаемости).

Стандарты на разработку береговых и судовых навигационных РЛС создавались с учетом обнаружения конкретных целей (судов, береговой черты, знаков навигационного ограждения, льда и т. д.) с конкретной ЭПР на заданных дальностях. Для таких РЛС отраженный от моря сигнал (если он приходил) представлял собой помеху.

Для обнаружения отражений от морской поверхности на заданной дальности РЛС должна иметь определенный энергетический потенциал.

На рисунке представлены зависимости потенциала РЛС, необходимого для обнаружения в элементе разрешения РЛС сигнала, отраженного от чистой морской поверхности, от дальности обнару-



© Леонтьев В. В., Пименов А. А., 2015

Таблица 1

$v_B, \text{ м/с}$	$\sigma_z, \text{ м}$	$h_c, \text{ м}$	$h_{3\%}, \text{ м}$
2	0.0102	0.0256	0.0540
3	0.0281	0.0704	0.1486
4	0.0577	0.1446	0.3052
5	0.1008	0.2527	0.5332
6	0.1589	0.3983	0.8406

жения R . Сплошные линии соответствуют горизонтальной поляризации РЛС, штриховые – вертикальной поляризации. Потенциал рассчитан для различных значений скорости ветра (v_B) с учетом характерных для этих скоростей параметров волнения, указанных в табл. 1, где σ_z – среднеквадратическое отклонение ординат морской поверхности; h_c – средняя высота морских волн; $h_{3\%}$ – высота морских волн 3-процентной обеспеченности.

Расчет выполнен при следующих условиях:

- высота антенны РЛС над уровнем моря $h = 15 \text{ м}$;
- длина волны РЛС $\lambda = 0.03 \text{ м}$;
- ширина диаграммы направленности антенны РЛС в горизонтальной плоскости на уровне половинной мощности $\psi = 1.2^\circ$;
- длительность зондирующего импульса РЛС $t_{\text{и}} = 40 \text{ нс}$;
- коэффициент ослабления электромагнитных волн в тропосфере (в кислороде и парах воды) $\delta = 10^{-2} \text{ дБ/км}$.

Обнаружение отраженного сигнала на некоторой дальности R от РЛС происходит, если требуемый для этого потенциал не превосходит фактический потенциал РЛС. Таким образом, условие $C = C_{\text{РЛС}}$ определяет максимальную дальность R_{max} обнаружения. Например, РЛС "Bridge Master", характеризующаяся следующими параметрами:

- мощность передатчика $P_{\text{пер}} = 25 \text{ кВт}$;
- чувствительность приемника $P_{\text{пр}} = -120 \text{ дБВт}$;
- коэффициент усиления антенны $G_a = 25 \text{ дБ}$;
- коэффициент полезного действия тракта антенны $\eta_a = 0.95$;
- отношение "сигнал/шум" $q = 3 \text{ дБ}$,

обладает потенциалом $C_{\text{ВМ}} = 210.5 \text{ дБ}$ (штрихпунктирная линия на рисунке) и при горизонтальной поляризации и скорости ветра $v_B = 6 \text{ м/с}$ обеспечивает $R_{\text{max}} = 1385 \text{ м}$, а при $v_B = 2 \text{ м/с}$ – $R_{\text{max}} = 206 \text{ м}$. Минимальная дальность обнару-

Таблица 2

Тип РЛС	$v_B, \text{ м/с}$				
	2	3	4	5	6
	$R_{\text{max}}, \text{ м}$				
"Bridge Master"	206	430	711	1036	1385
"Furuno"	293	610	1015	1496	2038
"Наяда"	313	652	1085	1600	2183

жения обусловлена мертвой зоной РЛС. Зона обнаружения отражений от чистого моря простирается от минимальной дальности до максимальной.

Значения максимальной дальности обнаружения отражений от моря для РЛС "Bridge Master", а также РЛС "Furuno", имеющей потенциал $C_F = 221.5 \text{ дБ}$, и РЛС "Наяда" ($C_H = 223.6 \text{ дБ}$) при различной скорости ветра приведены в табл. 2.

Из приведенных данных следует, что использование в РЛС вертикальной поляризации позволяет (при прочих равных условиях) увеличить максимальную дальность обнаружения отражений от моря, но незначительно. Например, для РЛС с вертикальной поляризацией и таким же, как у РЛС "Bridge Master", потенциалом при скорости ветра $v_B = 2 \text{ м/с}$ R_{max} возрастет до 247 м , а при $v_B = 6 \text{ м/с}$ – до 1440 м .

Увеличение высоты антенны РЛС над уровнем моря также позволяет увеличить максимальную дальность обнаружения отражений от моря, но во многих случаях технически невозможно.

Очевидно, что при скользящем облучении с уменьшением скорости ветра зона обнаружения отражений от чистого моря резко уменьшается и во многих случаях не может удовлетворить потребности практики.

Толстая пленка нефти приводит как к сглаживанию морской поверхности, так и к изменению ее электрических характеристик. Оба эти фактора, действуя одновременно, уменьшают мощность сигнала, отраженного от покрытого нефтью участка поверхности. В результате между засветками от чистого моря и пятна нефти появляется достаточный для различения контраст на экране индикатора РЛС. Однако точное воспроизведение границ пятна возможно только в том случае, если оно полностью расположено в области до максимальной дальности обнаружения отражений от чистого моря.

Тонкая пленка почти не изменяет электрических характеристик и меньше сглаживает морскую поверхность, что приводит к меньшему (по сравнению с чистым морем) изменению мощности отраженного сигнала и почти полному исчезновению контраста между засветками от чистого

моря и пятна нефти. В этом случае даже увеличение числа градаций яркости (или числа цветов для цветного индикатора РЛС) оказывается малоэффективным. Таким образом, обход ограниченный, связанных с малым контрастом отметок, – отказ от использования амплитуды отраженного сигнала в качестве информативного признака и переход к анализу спектральных составляющих.

Расчеты, результаты которых приведены в настоящей статье, выполнены для полностью развитаго волнения. Если же длина разгона волнения ограничена (например, вблизи берегов), его характер (в частности, высота морской волны) изменится с изменением дальности. Это приводит к тому, что мощности отраженных сигналов в различных элементах дальности РЛС изменяются. Кроме того, на различных дальностях могут наблюдаться изменения скорости (порывы) ветра, также вызывающие изменения мощности отраженного от моря сигнала. Все отмеченное существенно усложняет задачу обнаружения пленок нефти на поверхности моря с помощью РЛС, работающих при скользких углах облучения. В особенности – обнаружения тонких (мономолекулярных) пленок.

Приведенный анализ позволяет заключить, что использование для обнаружения мономолекулярных пленок нефти серийно выпускаемых судовых навигационных РЛС несостоятельно. Необходима смена парадигмы: разработка специализированных РЛС, предназначенных для решения данной задачи. Эти РЛС должны иметь не только требуемый

энергетический потенциал, но и автоматизированную систему принятия решения о наличии или отсутствии загрязнения на поверхности моря. Для создания такой РЛС требуется решить ряд задач:

- разработать математические модели чистой морской поверхности и морской поверхности с мономолекулярными пленками для различных видов сырой нефти;

- решить задачи дифракции электромагнитных волн на указанных поверхностях при характерных для условий морской радиолокации скользких углах облучения, требующих учета эффектов переотражения и затенения;

- методами моделирования получить статистики флуктуаций отраженных сигналов от чистой морской поверхности и морской поверхности с мономолекулярными пленками при различных условиях зондирования;

- сформулировать обоснованные требования к потенциалу РЛС с учетом уменьшения энергии отраженного сигнала от морской поверхности при появлении загрязнения;

- разработать алгоритмы классификации ситуаций на море (чистая или загрязненная поверхность) на основе анализа отраженных сигналов при изменяющихся условиях наблюдения (например, априорно неизвестной скорости ветра над морской поверхностью в элементах разрешения РЛС, расположенных на различных от РЛС дальностях).

V. V. Leontev, A. A. Pimenov

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

A new paradigm for solution of problem oil spill detection by radar at grazing angles of the irradiation sea surface

Low efficiency of using of commercially available marine navigation radars to detect the oil slicks on the sea surface is showed. A new approach to the problem of oil films detection on the sea surface by radar at low grazing angles of irradiation is discussed. It's proposed to develop specialized radar, a list of tasks necessary for the creation such radar is formulated.

Radio location, modeling, wave scattering, sea surface, radar cross section, oil slick

Статья поступила в редакцию 9 ноября 2015 г.