

УДК 621.391.812.62

Д.В. Карлов

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННОГО МЕХАНИЗМА РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН НАД МОРЕМ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ЛОКАЦИИ МАЛОВЫСОТНЫХ ЦЕЛЕЙ

*В статье рассматривается дифракция как один из механизмов распространения радиоволн над морем. Теоретически обобщена методология оценки дальности обнаружения целей применительно к конкретным РЛС метрового, дециметрового и сантиметрового диапазона радиоволн с учетом специфики тропосферы над морской поверхностью. В рамках разработанной методологии проведены оценки максимальных дальностей обнаружения маловысотных целей над морем для существующего парка РЛС с учетом дифракционного механизма распространения радиоволн.*

**Ключевые слова:** дальность обнаружения, дифракция, дальность прямой видимости.

### Введение

**Постановка проблемы.** Как известно, особенности побережья Азовского и Черного морей, примыкающему к морской границе Украины, является ее низменность. Подобная конфигурация побережья усложняет, в случае размещения на ней радиотехнических систем, обнаружение низколетящих целей на необходимых для решения их гарантированного перехвата дальностях. Это обусловлено тем, что при использовании традиционных методов локации дальность обнаружения цели обусловлена дальностью прямой видимости [1]. При этом, учитывая конфигурацию побережья, использование традиционных методов увеличения дальности обнаружения низколетящих целей за счет увеличения высоты подъема антенны не позволяет кардинально решить рассматриваемую задачу [2]. Вместе с тем, как показывают результаты экспериментальных исследований [3], при использовании специальным образом размещенные РЛС на побережье моря, удается обнаруживать цели за пределами дальности прямой видимости, на мой взгляд за счет использования явления дифракционного распространения радиоволн (РРВ) [4]. В свою очередь, применительно к этому случаю полезным для радиолокационной практики является оценка возможностей дальности обнаружения маловысотных целей в рамках дифракционного механизма РРВ применительно к существующему парку РЛС. Учитывая, что в известной литературе этому вопросу уделено мало внимания, данная статья и посвящена восполнению этого пробела.

**Анализ литературы.** Особенности РРВ за пределами дальности прямой видимости достаточно подробно рассмотрены в литературе, библиография которой отражена в [4]. Однако, в известных работах [5, 6] рассмотрена общая теория РРВ в тропосфере и недостаточно уделено внимание разработке

методологии оценки дальности локации маловысотных целей применительно к конкретным образцам РЛС. В данной статье в рамках теоретических обобщений теории, разработанной в [4 – 6] развита методология и проведена оценка дальности обнаружения маловысотных целей применительно к РЛС метрового, дециметрового и сантиметрового диапазонов радиоволн с учетом специфики РРВ в рамках дифракционного механизма над морем.

**Цель статьи:** развитие методологии оценки дальности обнаружения целей РЛС приморского базирования в рамках дифракционного РРВ над морем.

### Основная часть

В соответствии с [5, 6] в сферической системе координат  $r, \vartheta, \varphi$  составляющие напряженностей электрического  $E_{r, \vartheta, \varphi}$  и магнитного  $H_{r, \vartheta, \varphi}$  поля пропорциональны множителю ослабления  $V(x, y_1, y_2, q)$  напряженности поля в тропосфере при РРВ над морем по сравнению со свободным пространством. При этом, как показано в [5, 6] этот множитель зависит от трех безразмерных координат  $x, y_1, y_2$  и от безразмерного комплексного параметра  $q$ . В свою очередь эти параметры связаны с высотами точки излучения  $h_1$  и точки расположения цели  $h_2$ , расстоянием между этими точками по поверхности Земли  $R$ , длиной излучаемой волны  $\lambda$ , проводимостью  $\delta$  и диэлектрической постоянной подстилающей поверхности  $\varepsilon$  соотношениями:

$$x = \frac{R}{R_0(\lambda)}, \quad y_i = \frac{h_i}{h_0(\lambda)}, \quad i = 1, 2, \quad \omega = \lambda / (2\pi c),$$

$$q = \text{im} \left( \sqrt{\varepsilon - 1 + i \cdot 4\pi\delta/\omega} / (\varepsilon + i \cdot 4\pi\delta/\omega) \right),$$

$$m = \sqrt[3]{\pi a_3^* / \lambda},$$

где  $c$  – скорость распространения электромагнитных волн в вакууме;  $a^*$  – эквивалентный радиус Земли.

Согласно [6] величины  $x, y_1, y_2$  получили название:  $x$  – приведенное расстояние;  $y_1$  и  $y_2$  – приведенные высоты передатчика и приемника соответственно.

Условия изменения значения величины дифракции учтены в [5] через эквивалентный радиус Земли ( $a^*$ ), в рамках линейной зависимости показателя преломления от высоты. Такое упрощение не приводит к значительным искажениям результата вычисления поля дифракции при малых высотах расположения лоцируемой цели, так как сравнительный анализ аппроксимации зависимости показателя преломления от высоты, проведенный в [7], показывает применимость линейности модели тропосферы в пределах до двух километров.

Величины  $R_0(\lambda)$  и  $h_0(\lambda)$  – стандартное расстояние и высота, зависящие от длины волны  $\lambda$ . Функция  $F(t, y_1, y_2, q)$  согласно [5] определяется как:

$$F(t, y_1, y_2, q) = \omega(t - y_2) \Phi(t, y_1, q), \quad (1)$$

где  $\Phi(t, y_1, q) = v(t - y_1) - \frac{v'(t) - qv(t)}{\omega'(t) - q\omega(t)} \omega(t - y_1)$ ,

$\omega(t)$  – комплексная функция Эйри, определенная Фоком [5] по формуле:

$$\omega(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\Gamma} e^{tz - \frac{1}{3}z^3} dz,$$

где  $\Gamma$  – контур интегрирования.

Для практического определения напряженности поля в зоне дифракции необходимо получить значение  $V(x, y_1, y_2, q)$ . В общем случае методы численного решения рассмотрены в [6]. Однако нас интересует случай малых значений  $y$  (т.е. низколетящие цели и малые высоты возвышения РЛС). Особенностью вычисления напряженности поля в области за пределами ДПВ при малых значениях  $y$ , как показано в [6], является очень медленно сходящиеся ряды вычетов. В свою очередь, ряд вычетов вида [5, 6]:

$$V(x, y_1, y_2, q) = e^{i\frac{\pi}{4}} 2\sqrt{\pi x} \sum_{S=1}^{\infty} \frac{e^{ixt_S}}{t_S - q^2} \frac{\omega(t_S - y_1)}{\omega(t_S)} \frac{\omega(t_S - y_2)}{\omega(t_S)},$$

где  $t_S$  –  $S$ -й корень уравнения  $\omega'(t) - q\omega(t) = 0$ , может использоваться для вычислений в случае малых значений  $x$  и  $y$ . Для случая  $y_1 \ll 1$  и  $y_2 \ll 1$  можно использовать следующие формулы:

$$V(x, y_1, y_2, \infty) = y_1 y_2 \frac{\partial^2 V(x, 0, 0, \infty)}{\partial y_1 \partial y_2}, \quad (2)$$

$$V(x, y_1, y_2, 0) = V(x, 0, 0, 0),$$

где  $\frac{\partial^2 V(x, 0, 0, \infty)}{\partial y_1 \partial y_2} = e^{-i\frac{3\pi}{4}} 2\sqrt{\pi x} \sum_{S=1}^{\infty} e^{ixt_S^0}$ ,

$$t_S^0 = \left[ \frac{3}{2} \left( S - \frac{1}{4} \right) \pi \right]^{2/3} e^{i\frac{\pi}{3}}.$$

В [8] предлагается вычисление  $V(x, y_1, y_2, q)$  методом вычетов в полюсах подынтегрального выражения. При этом функции ослабления  $V$  выражается рядом нормальных волн (или мод) вида:

$$V(x, y_1, y_2, q) = 2\sqrt{\pi x} e^{i\pi/4} \times$$

$$\begin{cases} \sum_{S=1}^{\infty} e^{ixt_S} \frac{dt_S}{dq} \frac{\omega(y_1, t_S) \omega(y_2, t_S)}{\omega^2(0, t_S)}, & \text{при } q \neq \infty, \\ \sum_{S=1}^{\infty} e^{ixt_S} \frac{\omega(y_1, t_S) \omega(y_2, t_S)}{\int_0^{\infty} e^{i\frac{\pi}{3} \omega^2(y_1, t_S) dy}}, & \text{при } q = \infty, \end{cases} \quad (3)$$

где  $t_S$  – корень решения уравнения Эйри вида:

$$\omega'(0, t_S) + q\omega(0, t_S) = 0.$$

Представление множителя ослабления в виде (3) имеет преимущество перед (2) в том, что в области за пределами ДПВ этот ряд является быстроходящимся [8]. При наличии приподнятых слоев, высота которых в акватории Черного моря может достигать [3] до 900 м, удобным является гибридное представление функции  $V$ , при котором подынтегральное выражение (3) разбивается на ряд слагаемых, одни из которых имеет физический смысл вкладов лучей, а другие – нормальных волн [8].

Максимальная дальность обнаружения радиолокатора с учетом дифракционного РРВ, как показано в [1, 5], может быть определена как:

$$\Gamma_{\max} = \Gamma_{\max 0} |V|^2, \quad (4)$$

где  $\Gamma_{\max 0}$  – максимальная дальность обнаружения РЛС в свободном пространстве.

Соотношение (4) можно представить в виде [1]:

$$\Gamma_{\max} = \sqrt[4]{\frac{PG^2 \lambda^2 \sigma}{P_{\text{пр min}} 64\pi}} |V|^2, \quad (5)$$

где  $P$  – средняя мощность передатчика РЛС;  $P_{\text{пр min}}$  – предельная чувствительность приемника РЛС;  $G$  – коэффициент усиления приёмно-передающей антенны РЛС (в рассматриваемом случае  $G$  учитывает различия в коэффициентах усиления антенны РЛС, работающей на передачу  $G_{\text{прд}}$  и приём  $G_{\text{прм}}$ , т.е.  $G = \sqrt{G_{\text{прд}} G_{\text{прм}}}$ );  $\sigma$  – эффективная площадь рассеяния цели.

Значения  $\Gamma_{\max}$  для РЛС метрового, дециметрового и сантиметрового диапазонов радиоволн приведена в табл. 1, расчеты проведены для ЭПР цели  $\sigma = 1 \text{ м}^2$ . Анализируя выражение (1) и (5) можно прийти к выводу, что максимальная дальность обнаружения радиолокатора  $\Gamma_{\max}$  с учетом дифракционного РРВ зависит от длины излучаемой волны. Чем короче волна, тем быстрее убывает напряженность дифракционного поля и, следовательно, тем меньше  $\Gamma_{\max}$ .

Таблица 1  
Максимальная дальность обнаружения  
РЛС с учетом дифракционного РРВ

№ п/п	Тип РЛС	$f_{\text{раб}}$ , МГц	$P_{\text{прд}}$ , кВт	G	$r_{\text{max}}$ , км
1	П-18	150	3	1000	322
2	55Ж6	170-190	5	800	110
3	5Н84А	170-190	1,7	700	214
4	35Н6	824-885	6	340	72
5	П-19	950 ± 30	5	340	84
6	35Д6	3000	3	6000-7000	42

Как следует из (4) дальность обнаружения  $r_{\text{max}}$  зависит от свойств подстилающей поверхности (солёности воды), что обусловлено тем, что чем больше величина проводимости и диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности, тем больше напряженность дифракционного поля, т.е. больше  $r_{\text{max}}$ . Сопоставляя полученные данные о дальности обнаружения цели с учетом дифракционного механизма РРВ, приведенные в табл. 1, с дальностями, обеспечивающими необходимый рубеж выдачи РЛИ по маловысотным целям, приведенными в [2], мы видим, что даже в рамках дифракционного механизма существующий парк РЛС способен выдать РЛИ, позволяющую обеспечить выполнение боевой задачи истребительной авиации по уничтожению маловысотной цели над морем.

## Выводы

Развита методология оценки дальности обнаружения целей применительно к конкретным РЛС метрового, дециметрового и сантиметрового диапазона радиоволн с учетом специфики тропосферы над морской поверхностью применительно к дифракционному механизму РРВ. Предложенная методология позволяет рассчитывать максимальную дальность обнаружения маловысотных целей над морем, учитывая при этом

поляризацию, рабочую длину волны, мощность передатчика и приемника РЛС, а также электрические параметры подстилающей поверхности. Использование рассеянного дифракционного электромагнитного поля за пределами дальности прямой видимости позволяет увеличить дальность обнаружения РЛС маловысотных целей над морем и следовательно обеспечить необходимый рубеж выдачи РЛИ для зенитных ракетных войск и истребительной авиации.

## Список литературы

1. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн / Ф.Б. Черный. – М.: Сов. радио, 1972. – 463 с.
2. Петрушенко М.М. Розрахунок дальностей виявлення аеродинамічних засобів повітряного нападу на приморських напрямках / М.М. Петрушенко, В.Л. Мисайлов, Є.О. Меленті // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2011. – Вып. 1 (6). – С. 167-171.
3. Петрушенко Н.Н. Обнаружение маловысотных целей на загоризонтных дальностях над морским тропосферным волноводом. / Н.Н. Петрушенко, В.Л. Мисайлов // Радиотехника. – 2004. – Вып. 137. – С. 113-117.
4. Лобкова Л.М. Распространение радиоволн над морской поверхностью / Л.М. Лобкова. – М.: Радио и связь, 1991. – 255 с.
5. Фок В.А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн / В.А. Фок. – М.: Сов. радио, 1970. – 520 с.
6. Азрисянт П.А. Численные результаты теории дифракции радиоволн вокруг земной поверхности / П.А. Азрисянт, Н.Г. Белкина. – М.: Сов. радио, 1957. – 80 с.
7. Бин Б.Р. Радиометеорология / Б.Р. Бин, Е.Дж. Даттон. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 368 с.
8. Михайлов Н.Ф. Радиометеорологические исследования над морем / Н.Ф. Михайлов, А.В. Рыжков, Г.Г. Шукин. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 207 с.

Поступила в редколлегию 7.09.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## ВИКОРИСТАННЯ ДИФРАКЦІЙНОГО МЕХАНІЗМУ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ НАД МОРЕМ, ЩО ЗБІЛЬШУЄ ДАЛЬНІСТЬ ЛОКАЦІЇ МАЛОВИСОТНИХ ЦІЛЕЙ

Д.В. Карлов

У статті розглядається дифракція як один з механізмів поширення радіохвиль над морем. Теоретично узагальнена методологія оцінки дальності виявлення цілей стосовно конкретних РЛС метрового, дециметрового і сантиметрового діапазону радіохвиль з урахуванням специфіки тропосфери над морською поверхнею. У рамках розробленої методології проведені оцінки максимальної дальності виявлення маловисотних цілей над морем для існуючого парку РЛС з урахуванням дифракційного механізму поширення радіохвиль.

**Ключові слова:** дальність виявлення, дифракція, дальність прямої видимості.

## USE OF DIFFRACTION MECHANISM OF RADIO-WAVE PROPAGATION ABOVE SEA FOR INCREASE OF DISTANCE OF LOCATION OF SMALLHEIGHT TARGETS

D.V. Karlov

In the article diffraction is examined as one of mechanisms of radio-wave propagation above a sea. In theory methodology of estimation of distance of finding out targets is generalized as it applies to concrete radar station meter, decimeter and centimeter range of radio waves taking into account the specific of troposphere above a sea surface. Within the framework of the worked out methodology the estimations of maximal distances of finding out small height targets are conducted above a sea for an existent park radar station taking into account the diffraction mechanism of distribution of radio waves.

**Keywords:** distance of detection, diffraction, distance of line-of-sight.