



УДК 551.579:656.61.052.5

**THE INFLUENCE OF VARIOUS FACTORS ON THE WIDTH OF THE EXPOSURE OF THE CREST OF A WAVE IN A RADAR IMAGE OF A WAVE FIELD**
**ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ШИРИНУ ЗАСВЕТКИ ГРЕБНЯ ВОЛНЫ В РАДИОЛОКАЦИОННОМ ИЗОБРАЖЕНИИ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ**

Shishkarev V.I. / Сичкарев В.И.

Ph. D. Professor / Д.т.н. профессор

Сибирский государственный университет водного транспорта

*Аннотация.* Важной предпосылкой для правильного принятия решения при плавании на значительном волнении является достаточно точное знание его параметров. Однако, до сих пор судоводителям доступен в основном глазомерный способ его определения. В статье рассматривается предложенный ранее автором метод определения высот волн по радиолокационному изображению волнового поля вокруг судна. Обсуждаются причины, влияющие на точность расчётной оценки высот волн. Предложен практический приём устранения влияния дифракции радиоволн.

*Ключевые слова:* волновое поле, радиолокационное изображение, высоты волн, дифракция радиоволн на профиле морской волны.

**Вступление**

Исследования последних лет позволяют с приемлемой точностью прогнозировать параметры качки конкретного судна с его конкретной загрузкой при следовании определённым курсом и скоростью относительно генерального направления распространения волн. При этом с достаточной точностью необходимо знать и спектр фактического волнения. Уникальную возможность получения спектра предоставляет судовой навигационный радиолокатор (РЛС), дающий изображение фактического волнового поля. Однако, предложенному методу присущи некоторые недостатки, которые необходимо оценивать и иметь возможность устранять.

**Основной текст**

В [1] показано, что наблюдаемая на экране судовой РЛС упорядоченная засветка волнового поля может быть использована не только для определения длин волн, но и для расчёта высот волн. Для этого необходимо измерять ширину светлой полосы в пределах достаточно чётко выделяемой длины волн между одноимёнными сторонами засветки. Ширина световой полосы  $x$  функционально связана с высотой  $h$  предшествующей и измеряемой волны, с высотой  $e$  расположения антенны РЛС, с расстоянием  $D$  от антенны РЛС до измеряемой волны, с длиной  $\lambda$  волны. В [1] для измеряемой высоты волны получено выражение

$$\frac{h}{e} = \frac{2(1 - \frac{x}{\lambda})}{(\frac{D}{\lambda} - 1)(1 - \cos 2\pi \frac{x}{\lambda}) + (1 - \frac{x}{\lambda})} \quad (1)$$



При этом были приняты следующие допущения: волна гармоническая; радиолокационный луч распространяется прямолинейно; точка отсчёта ширины засветки  $x$  взята в вершине измеряемой волны, а не в точке касания радиолокационного луча измеряемой волны.

По (1) были проведены расчёты высот волн в различных морях при разной интенсивности волнения с независимым контролем параметров волн визуально, по факсимильным картам анализа волнения, расчётом по ветровой обстановке с карт приземного анализа. Во всех случаях расчёт по (1) показал заниженное значение высот волн, что свидетельствует о завышенном значении ширины полосы засветки  $x$ , снимаемой с экрана РЛС.

Для уравнивания рассчитанных и фактических параметров волнения к высотам волн по (1) введён поправочный коэффициент  $K$ , экспериментальное значение которого оказалось около 2,5, [2].

В [1] выявлена одна из причин завышения ширины засветки: недостаточная фокусировка точечной отметки на экране РЛС при варьировании яркости изображения. Представляется целесообразным проверить другие возможные причины изменения ширины полосы засветки  $x$  на экране РЛС.

Принятое допущение о замене точки касания луча на вершину волны занижает ширину полосы засветки  $x$  и величину этого занижения необходимо оценить.

Некоторое влияние на ширину  $x$  оказывает форма профиля волны: профиль ветровых волн лучше аппроксимируется трохойдой, чем гармоникой. Влияние формы волны также необходимо оценить.

Наиболее сложным физическим процессом при облучении волны радиолокационным лучом является взаимодействие достаточно коротких радиоволн (принятая длина волны в судовых навигационных РЛС составляет 3,2 см) с формой волны из токопроводящей морской воды, зачастую имеющей пенистые гребни (водо-воздушная смесь), срываемые и уносимые ветром. На границе воздушной и водной среды со сложной трёхмерной поверхностью происходит дифракция радиолокационного луча. Влияние дифракции на ширину полосы засветки  $x$  также необходимо исследовать.

Рассмотрим вначале влияние геометрических факторов.

Метод, применённый в [1] к гармонической волне, может быть сведён к следующим аналитическим действиям.

Рассматривается плоская (двумерная) гармоническая волна с амплитудой  $h/2$  и длиной  $\lambda$ , движущаяся в положительном направлении оси  $x$ , в момент времени  $t = 0$  (момент фотографирования экрана РЛС). На расстоянии  $x = D$  на высоте  $e$  от уровня моря расположена антенна РЛС в точке  $A(D, e)$ . Пучок прямых, проходящих через точку  $A$

$$y - e = k(x - D) \quad . \quad (2)$$

Если один из лучей проходит через следующую вершину  $B(\lambda, h/2)$ , то его уравнение

$$\frac{h}{2} - e = k(\lambda - D), \quad (3)$$



откуда

$$k = \frac{e - \frac{h}{2}}{D - \lambda}. \quad (4)$$

С (4) уравнение луча, проходящего через вершину следующей волны

$$y = e + \frac{e - \frac{h}{2}}{D - \lambda} (x - D). \quad (5)$$

Найдём точку пересечения луча (5) с профилем волны, т.е. крайнюю правую точку засветки волны  $Z(x_{zc}, y_{zc})$ , решая совместно (5) и уравнение профиля волны:

$$y = e + \frac{e - \frac{h}{2}}{D - \lambda} (x - D);$$

$$y = \frac{h}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right). \quad (6)$$

Приравнявая правые части (5) и (6), получаем уравнение для определения  $x_{zc}$ :

$$\frac{h}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) = e + \frac{e - \frac{h}{2}}{D - \lambda} (x - D). \quad (7)$$

В то же время, полагая, что величину  $x_{zc}$  как ширину полосы засветки можно определить измерением на экране РЛС (или на фотографии экрана), Э из (7) можно найти высоту волны  $h$ :

$$h = \frac{2e(\lambda - x)}{(D - x) - (D - \lambda) \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)}. \quad (8)$$

Последнее выражение удобно представить в безразмерном виде

$$\frac{h}{e} = \frac{2(1 - \frac{x}{\lambda})}{\left(\frac{D}{\lambda} - \frac{x}{\lambda}\right) - \left(\frac{D}{\lambda} - 1\right) \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)}. \quad (9)$$

Расчёты по (9) и по (1) дают одинаковый результат.

Найдём абсциссу точки касания луча к профилю измеряемой волны в точке  $K(x_k, y_k)$ . В этой точке угол наклона луча  $\alpha_l$  определяется выражением

$$\operatorname{tg} \alpha_l = (e - y_k) / (D + x_k), \quad (10)$$

а уклон волны  $\alpha_b$  выражением

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{\pi h}{\lambda} \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) = \operatorname{tg} \alpha_b. \quad (11)$$

В точке касания  $\alpha_l = \alpha_b$ , а сама эта точка принадлежит профилю волны. Приравнявая (10) и (11) с учётом (6) получаем уравнение для определения  $x_k$ :



$$e - \frac{h}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) = -\frac{\pi h}{\lambda} \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \cdot (D + x_k). \quad (12)$$

Поскольку  $x \ll \lambda$ , для упрощения можно полагать

$$\cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \approx 1; \quad (13)$$

$$\sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \approx \frac{2\pi x}{\lambda}. \quad (14)$$

Тогда из (12)

$$e - \frac{h}{2} = -x_k \cdot (D - x_k) \cdot (2\pi^2 h / \lambda^2);$$

$$x^2 + D \cdot x + a = 0, \quad (15)$$

$$\text{где } a = \lambda^2(2e - h) / (4\pi^2 h). \quad (16)$$

Принимая такое решение  $x_k$ , при котором  $y_k > 0$ , а также учитывая, что  $4a / D^2 \ll 1$  и заменяя на этом основании  $\sqrt{1 - x} \approx 1 - x/2$ , получим

$$x_k = -\lambda^2(2e - h) / (4\pi^2 h D). \quad (17)$$

Применим изложенный метод к трохоидальному профилю волны, описываемому в параметрической форме через параметр  $\theta$  выражениями

$$x = \frac{\lambda\theta}{2\pi} + r_0 \sin \theta; \quad (18)$$

$$y = r_0 \cos \theta, \quad (19)$$

где  $r_0 = h/2$  – амплитуда трохоидаальной волны.

В явном виде профиль трохоидаальной волны

$$y = \frac{x}{\text{tg } \theta} - \frac{\lambda\theta}{2\pi \text{tg } \theta}, \quad (20)$$

а уклон волновой поверхности

$$\text{tg } \alpha_{\text{в}} = \frac{dy}{dx} = \text{ctg } \theta = \text{tg} \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right). \quad (21)$$

Полагая, что в точках касания луча его наклон должен быть равен уклону волны, запишем уравнение касательной к волне в виде

$$y - e = \text{tg} \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) (x - D). \quad (22)$$

Координаты точки пересечения касательной с профилем волны найдём совместным решением (20) и (22), откуда получаем уравнение для параметра  $\theta$  в точке пересечения

$$\frac{D}{e} - \frac{\lambda\theta}{2\pi e} = \text{tg } \theta. \quad (23)$$

Найдя из (23)  $\theta$ , из (18) формируем выражение для  $x_{\text{зс}}$ , из которого, полагая  $x_{\text{зс}}$  измеряемым на экране РЛС, получаем выражение для определения высоты трохоидаальной волны



$$h = \frac{\lambda}{\sin \theta} \left( \frac{2x}{\lambda} - \frac{\theta}{\pi} \right). \quad (24)$$

Проверочные расчёты при значениях  $D = 1000$  м;  $\lambda = 100$  м;  $h = 4$  м дают следующие результаты:

- для гармонической волны  $x_{zc} = 21,545$  м; по (17)  $x_k = - 2,280$  м с относительной погрешностью в сравнении с вычислением по (12) 0,2%;

- для трохoidalной волны  $\theta = 1,550$  радиана;  $x_{zc} = 26,673$  м.

Числовой пример показывает, что у трохoidalной волны ширина зоны засветки больше, чем у гармонической волны. Это привело бы к уменьшению расчётной высоты волны.

У гармонической волны отстояние точки касания лучом измеряемой волны от начала координат составляет около 10% ширины зоны засветки. Поэтому положение точки касания необходимо учитывать в ширине зоны засветки.

Дифракция радиоволн на гребнях морских волн – малоисследованный процесс. Общие сведения о дифракции радиоволн, [3], по отношению характерного размера препятствия (высоты волны) к длине радиоволны значительно большего единицы позволяют отнести рассматриваемый случай к квазиоптической области частот. В этой области на первый план выступают локальные свойства тела и электромагнитного поля, когда формируются различные типы рассеянных полей. Среди них значимыми для рассматриваемого процесса могут быть волны соскальзывания вдоль гладкой вершины морской волны; волны «шепчущей» галерей на ребристых вершинах морской волны, а также краевые волны. В рекомендациях Международного союза электросвязи МСЭ-R P.526.10 требуется учитывать влияние электрических характеристик подстилающей поверхности. Радиус эллипсоидов Френеля, по которым распространяется электромагнитная волна, вблизи точек касания радиолуча профиля волны может иметь размер порядка дециметров, что вполне соответствует условиям дифракции радиолокационной волны. Однако, точных расчётов дифракционного поля для рассматриваемой задачи пока нет.

### **Заключение**

В связи с тем, что дифракционное поле имеет существенно меньшую напряжённость по сравнению с полем радиолокационного освещения, практическим методом устранения его влияния может оказаться регулировка усиления радиолокационного приёмника, а также подбор необходимой яркости изображения на экране РЛС. Вполне возможно, что обсуждавшаяся в [1] задача фокусировки изображения может быть идентифицирована как задача устранения последствий дифракции радиоволн на морской волне.

### **Литература**

1. Сичкарев, В.И. Способ определения высот волн по радиолокационной картине волнового поля [текст] / В.И.Сичкарев // Судовождение – 2010: сб. науч. трудов. – Новосибирск: НГАВТ, 2010. – С. 3 – 19.
2. Зинченко, К.И. Разработка метода полуавтоматической обработки радиолокационного снимка волнения [текст] / К.И.Зинченко // Судовождение –



2012: сб. науч. трудов. – Новосибирск: НГАВТ, 2012. – С. 73 – 86.

3. Физическая энциклопедия [текст] / Гл. ред. А.М.Прохоров. Т.1. – М.: Сов. Энциклопедия, 1988. – 704 с.

#### **Abstract**

*An important prerequisite for the correct decision when sailing on a significant wave is a fairly accurate knowledge of its parameters. However, until now, navigators are available mainly visual method of its determination. In the article the method of determination of heights of waves on the radar image of a wave field around the vessel offered earlier by the author is considered. The reasons affecting the accuracy of the calculated wave height estimation are discussed. The practical method of eliminating the influence of radio wave diffraction is proposed.*

**Key words:** *wave field, radar image, wave heights, radio waves diffraction on the sea wave profile.*

#### **References**

1. Sichkarev, V. I. Method of determining wave heights at the radar picture of the wave field [text] / V. I. Sichkarev // Navigation – 2010: scientific collection. labours'. – Novosibirsk: NSAWT, 2010. – P. 3 – 19.

2. Zinchenko, K. I. Development of the method of semi-automatic processing of radar images of excitement [text] / K. I. Zinchenko // Navigation – 2012: scientific collection. labours'. – Novosibirsk: NSAWT, 2012. – P. 73 – 86.

3. Physical encyclopedia [text] / CH. edited by A. M. Prokhorov. Vol.1. - M.: Sov. Encyclopedia, 1988. - 704 p.