Д.А. Кравчук (Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения ЮФУ; e-mail: denik545@ya.ru)

МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА МЕЛКОГО МОРЯ

Разработана математическая трёхмерная модель распространения акустических волн параметрического излучателя вдоль трассы волновода для системы дистанционного мониторинга состояния гидросферы мелкого моря.

Ключевые слова: мониторинг, параметрическая антенна, волноводное распространение, акустическая волна.

D.A. Kravchuk DISTRIBUTION MODEL OF ACOUSTIC WAVE OF PARAMETRIC RADIATOR FOR MONITORING OF SHALLOW SEA

A mathematical three-dimensional distribution model of acoustic wave of parametric radiator along the route of the waveguide for system of remote monitoring of the hydrosphere state of shallow sea was developed.

Key words: monitoring, parametric antenna, waveguide distribution, acoustic wave.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 15 сентября 2016 г.

Среди множества задач дистанционного зондирования морской среды незаслуженно малое внимание уделяется распространению акустических волн в мелком море. Актуальность проблемы заключается в том, что большинство прикладных исследований направлены на исследование океана, но большинство техногенных катастроф, добыча нефтепродуктов, сбросы предприятий происходят *на мелководье, вблизи прибрежных городов*, где мониторинг и прогнозирование состояния водной среды является жизненно важным. Поэтому данную задачу, именно в таких условиях, целесообразно решать с использованием акустических методов в мелком море.

Новизна исследований заключается в необходимости оптимизировать и корректировать в режиме реального времени параметры гидроакустической системы мониторинга состояния гидросферы, позволяющие дать информацию о донных отложениях, состоянии поверхности моря, изменениях гидрофизических параметров морской среды (плотности, солености). Полученная информация может свидетельствовать о разливе нефтепродуктов, скоплении рыб и о наличии других неоднородностей гидросферы. Данные исследования являются продолжением работ [1, 2, 4], в которых была доказана возможность селективного возбуждения низких мод в мелком море, наклоном параметрического излучателя в сторону дна или поверхности моря.

Для интересующего нас случая мелкого моря близкой к реальности моделью является волновод с акустически мягкими границами. В отличие от жёсткой, такая граница при отражении волны вносит сдвиг фазы на π , что существенно меняет условия нелинейного взаимодействия. Чтобы не ограничивать общность рассмотрения, считаем, что собственные функции волновода $\psi \sim \sin(\sigma_m z)$, где σ_m определяются свойствами дна. Например, для низших мод часто свойства дна близки к характеристикам идеально мягкой границы [1], $\sigma_m = \pi m/H$. Для более высоких номеров мод структура собственных функций может быть практически такой же, как и при идеально жёстком дне.

Кроме того, если для поля разностной частоты дно можно считать практически идеально отражающей границей, то для более высокочастотной волны накачки коэффициент отражения по модулю может быть заметно меньше единицы. Поскольку частоты волн накачки близки, будем считать коэффициенты отражения одинаковыми $V_1 = V_2 = V$. Это позволяет характеризовать свойства дна для пучка накачки одним коэффициентом V отражения по интенсивности (на частоте ω). С учётом сделанных замечаний, можно получить:

$$p_{s} = \frac{i\varepsilon F_{2}^{2}}{4c^{3}} \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \exp\{i \pi/4\} \frac{W}{H} \sum_{m} \psi_{m}(z) \frac{\exp\{-i\chi_{m}x\}}{\delta_{m}(\chi_{m}x)^{1/2}} N_{m}(\theta,\beta),$$
(1)

где $N_m(\theta,\beta)$ – диаграммный множитель, описывающий угловое распределение (по углу θ в горизонтальной плоскости) параметрического излучения на различных модах в зависимости от угла наклона β оси *параметрического* излучателя (ПИ) в вертикальной плоскости и имеет следующий вид:

$$N_m = \tilde{N}_m + F_1(\sigma_m)F_2(\sigma_m) - F_1(-\sigma_m)F_2(-\sigma_m).$$
⁽²⁾

Структура входящих в выражение (2) членов несколько различается в зависимости от того, в сторону дна или поверхности наклонена ось излучателя (в приведенных ниже выражениях значение угла β берётся по модулю). При ориентации оси ПИ в сторону поверхности получаем следующие выражения:

$$\widetilde{N}_{m} = \frac{\exp\{-i\Delta(-\sigma_{m})x_{1} - 2\alpha x_{1}/\cos(\beta)\}^{-1}}{-i\Delta(-\sigma_{m}) - 2\alpha/\cos(\beta)} - \exp(-i\sigma_{m}z_{0})\frac{\exp\{-i\Delta(\sigma_{m})x_{1} - 2\alpha x_{1}/\cos(\beta)\}^{-1}}{-i\Delta(\sigma_{m}) - 2\alpha/\cos(\beta)};$$

$$F_{1}(\sigma_{m}) = \frac{\exp\{-i\Delta(\sigma_{m})x_{0} - 2\alpha x_{0}/\cos(\beta)\}^{-1}}{-i\Delta(\sigma_{m}) - 2\alpha \delta_{m}/\cos(\beta)}.$$
(3)

Множитель F_1 характеризует поле излучения одного участка длиной x_0 до первого отражения от поверхности.

$$F_{2}(\sigma_{m}) = \frac{1 - V \exp\{-i\Delta(\sigma_{m})x_{0} - 2\alpha x_{0}/\cos(\beta) - i\sigma_{m}2H\}}{1 - V \exp\{-i\Delta(\sigma_{m})2x_{0} - 4\alpha x_{0}/\cos(\beta) - i\sigma_{m}2H\}} \times \exp\{-i\sigma_{m}z_{0} - i\Delta(\sigma_{m})x_{1} - 2\alpha\delta_{m}x_{1}/\cos(\beta)\};$$

$$\Delta_{m}(\sigma_{m}) = K\cos(\beta) - \chi_{m}\cos(\theta) + (K\sin(\beta) - \sigma_{m})tg(\beta);$$

$$x_{1} = (H - z_{0})/tg\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right);$$

$$x_{0} = H/tg(\beta).$$

$$(4)$$

Результаты расчёта вертикальной структуры поля волны разностной частоты вдоль трассы распространения в акустическом волноводе приведены на рис. 1-4.



Рис. 1. Распределение звукового давления по глубине на расстоянии 505 *м* от излучателя ($F = 13 \kappa \Gamma u$, $f_{01} = 160 \kappa \Gamma u$, $f_{02} = 147 \kappa \Gamma u$, ширина $XH \theta = 2^\circ$), расположенного на глубине 2,5 *м*, при наклоне излучателя *в сторону поверхности* $\beta = 7,5^\circ$



Рис. 2. Распределение звукового давления по глубине на расстоянии до 505 *м* от излучателя ($F = 13 \kappa \Gamma u$, $f_{01} = 160 \kappa \Gamma u$, $f_{02} = 147 \kappa \Gamma u$, ширина $XH \theta = 2^{\circ}$), расположенного на глубине 1,5 *м*, при наклоне излучателя *в сторону дна* $\beta = -7,5^{\circ}$

Аналогичные расчёты при разностной частоте 20 кГц.



Рис. 3. Распределение звукового давления по глубине на расстоянии до 505 *м* от излучателя ($F = 20 \ \kappa \Gamma u$, $f_{01} = 160 \ \kappa \Gamma u$, $f_{02} = 140 \ \kappa \Gamma u$, ширина XH $\theta = 2^{\circ}$), расположенного на глубине 1,5 *м*, при наклоне излучателя в сторону поверхности $\beta = 7,5^{\circ}$



Рис. 4. Распределение звукового давления по глубине на расстоянии до 505 *м* от излучателя ($F = 20 \kappa \Gamma \mu$, $f_{01} = 160 \kappa \Gamma \mu$, $f_{02} = 140 \kappa \Gamma \mu$, ширина $XH \theta = 2^{\circ}$), расположенного на глубине 1,5 *м*, при наклоне излучателя в сторону дна $\beta = -5^{\circ}$

Результаты, представленные на рис. 1-4 показывают, что при распространении акустических волн в мелком море вертикальное распределение звукового давления по глубине сохраняет структуру, присущую возбужденной моде при распространении на всем участке анализируемой длины акустического волновода. Амплитуда звукового давления волны разностной частоты при этом спадает обратно пропорционально расстоянию, что характерно для случая распространения вторичных акустических волн при их нелинейном взаимодействии, что подтверждается рядом экспериментов [1, 2].

Применение параметрических антенн для работы на мелководье позволит за счёт их высокой направленности, низкого уровня бокового поля, малогабаритности, широкополосности добиться наиболее однородного озвучивания по глубине толщи звукового канала и обеспечит селективное возбуждение мод в волноводе, путём изменения угла наклона излучателя к поверхности воды или дна, в результате которого можно повысить дальность и разрешающую способность обнаружения неоднородностей гидросферы на мелководье при минимальном уровне энергозатрат [3, 4].

Дистанционное зондирование водной экосистемы представляется важным направлением решения задачи экологического мониторинга и параметрические антенны в этой области являются незаменимым и уникальным инструментом для исследовательских целей. На основании полученных результатов можно сделать заключение о возможности возбуждения в акустическом волноводе в условиях мелкого моря низших мод в широкой полосе частот при соответствующем наклоне акустической оси параметрической излучающей антенны.

Литература

1. *Кравчук Д.А.* Экспериментальные исследования параметрических антенн для экологического мониторинга мелководных районов моря // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2009. Т. 95. № 6. С. 106-109.

2. *Кравчук Д.А., Куценко А.Н.* Экспериментальное исследование модового распространения сигнала в мелком море // XVIII сессия Российского акустического общества. 2006. Т. 2. С. 214-217.

3. *Исследования* структуры акустического поля параметрического излучателя в изоскоростном волноводе // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 9 (122). С. 72-77.

4. *Кравчук Д.А.* Повышение эффективности гидроакустических систем. Результаты экспериментальных исследований электроакустических характеристик пьезоэлементов антенны // Научные труды SWorld. 2015. Т. 5. № 2 (39). С. 63-66.