АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2008, том 54, № 1, с. 62–68

АКУСТИКА ОКЕАНА, ГИДРОАКУСТИКА

УДК 534+54.231.2

ИЗЛУЧЕНИЕ ОДНОЙ НОРМАЛЬНОЙ ВОЛНЫ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ДИСКРЕТНОЙ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННОЙ В ВОДНОМ СЛОЕ

© 2008 г. Е. В. Голубева, В. А. Елисеевнин

St. John's university, 8000 Utopia Parkway Queens, NY 11439

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника 4

E-mail bvp@akin.ru

Поступила в редакцию 24.10.06 г.

Рассматривается возможность излучения звуковой энергии в одну нормальную волну вертикальной дискретной линейной антенной в однородном водном слое в случае, когда ее апертура меньше толщины слоя.

Pacs: 43.30.Bp, 43.30.Vh

При распространении звука в мелком море поглощение звуковой энергии в толще дна возрастает с увеличением номера нормальной волны [1], поэтому желательна концентрация всей излучаемой энергии в одну из нормальных волн первых номеров (чаще всего в первую). В акустической томографии океана [2] необходима концентрация излучаемой энергии одновременно уже в несколько нормальных волн. В морском эксперименте эти проблемы пытаются решить, путем использования протяженных вертикальных линейных антенн [3, 4] с помощью метода пространственной фильтрации [5, 6]. Однако, здесь возникают трудности, связанные с конечностью размеров антенны. Создание стационарных или переносных антенных систем с вертикальной апертурой, равной толщине водного слоя для всех акваторий, является технически трудной задачей, поэтому чаще всего антенная решетка перекрывает только часть водного слоя. Также невозможно размещение элементов антенны в толще дна, где имеет место звуковое поле. Ниже решается задача излучения одной нормальной волны в идеальном волноводе вертикальной дискретной линейной антенной в случае, когда ее апертура меньше толщины водного слоя.

Метод пространственной фильтрации использует свойство ортогональности нормальных волн, как собственных функций волновода, то есть, равенство интеграла по вертикальной координате от произведения двух нормальных волн постоянной величине, если нормальные волны одинаковые, или нулю, если они различные [1, 7]. Для реализации этого метода в морском эксперименте на апертуре вертикальной линейной антенны задается распределение излучаемого сигнала пропорционально амплитуде и фазе нормальной волны, которую необходимо излучить. Антенна "настраивается" на излучение этой нормальной волны. Если непрерывная вертикальная линейная антенна перекрывает водный слой с абсолютно отражающими границами по его толщине и настроена на излучение одной нормальной волны, то вся звуковая энергия излучается только в одну эту нормальную волну и метод пространственной фильтрации в этом случае реализуется полностью. В морском эксперименте непрерывная антенна заменяется дискретной антенной решеткой, апертуру которой стремятся сделать равной толщине водного слоя. Шаг антенны обычно выбирается в пол длины волны с целью избежать взаимодействия между ее соседними элементами [8, 9]. Поскольку антенна дискретна, то при реализации метода интегрирование по вертикали заменяется суммированием. В идеальном волноводе при равенстве апертуры толщине водного слоя это приводит наряду с излучением большей части энергии в одну нормальную волну к очень слабому равномерному излучению звуковой энергии во все нормальные волны других номеров [10]. Уменьшение апертуры антенны по сравнению с толщиной водного слоя при прежнем шаге в пол длины волны приводит к сильному излучению нормальных волн соседних номеров.

Введем параметр SF, характеризующий степень пространственной фильтрации, реализуемую антенной. Определим его, как отношение мощности, излучаемой антенной в одну q-ую нормальную волну W_q, к мощности, излучаемой во все распространяющиеся в слое нормальные волны, W, и назовем степенью фильтрации антенны

$$\mathrm{SF} = \frac{W_q}{W}, \qquad (1)$$

Рассмотрим мощность, излучаемую вертикальной дискретной линейной антенной, настроенной на излучение одной нормальной волны, в водном слое. (Мощность, излучаемая той же антенной в водном слое при использовании обычного линейного компенсатора, сфазированного к ее центру, рассматривалась в работе [11].) Пусть в однородном водном слое толщины H с мягкой поверхностью и жестким дном располагается вертикальная дискретная линейная антенна с шагом d, состоящая из N точечных ненаправленных излучателей (монополей) и излучающая монохроматический сигнал круговой частоты ω. Создаваемое антенной звуковое поле в слое представляется в виде суммы нормальных волн [1]. Будем считать, что число элементов антенны N нечетно и ее центральный элемент находится на горизонте Z_0. Начало системы координат (r, z) располагается на дне и координата z направлена вертикально вверх перпендикулярно границам слоя. С целью излучения одной q-ой нормальной волны введем на элементах антенны распределение производительности (объемной скорости) в виде $V_0\cos[b_q(Z_0 + id)]$ пропорциональное распределению по амплитуде и фазе q-ой нормальной волны на тех же глубинах. Здесь $b_q = (q - 0.5)\pi/H$ – вертикальная компонента волнового вектора q-ой нормальной волны, V_0 – производительность монополя в свободном пространстве [9, 12], $i = -(N - 1)/2, \ldots, 0, \ldots, (N - 1)/2$ – номер элемента антенны. Согласно [10], мощность, излучаемая такой антенной в волновод, определяется выражением

$$W = W_0\frac{\pi}{k}\frac{2}{H}\frac{N^2}{4}\sum_{i=1}^{m}\left\{\frac{\sin\left[N\frac{d}{2}(b_l - b_q)\right]}{N\sin\left[\frac{d}{2}(b_l - b_q)\right]}\times\right.$$

$$\times\cos[(b_l - b_q)Z_0] + \frac{\sin\left[N\frac{d}{2}(b_l + b_q)\right]}{N\sin\left[\frac{d}{2}(b_l + b_q)\right]}\times \qquad (2)$$

$$\left.\times\cos[(b_l + b_q)Z_0]\right\}^2,$$

$$W_0 = \frac{\rho\omega^2 V_0^2}{8\pi C}. \qquad (3)$$

Здесь ρ и C – плотность и скорость звука в водной толще; $k = \omega/C$ – волновое число; l – номер нормальной волны; m – число нормальных волн, распространяющихся в слое без затухания; W_0 – мощность, излучаемая монополем с производительностью V_0 в свободном пространстве [9, 12]. Далее мощности, излучаемые антенной в одну l-ую нормальную волну W_l и во все распространяющиеся нормальные волны W, нормируются на мощность монополя в свободном пространстве W_0. В качестве иллюстраций ниже приводятся результаты расчетов, выполненные в предположении настройки антенны на первую нормальную волну $q = 1$, как представляющую наибольший практический интерес.

Применение рассматриваемой выше нелинейной по апертуре антенны компенсации при шаге в пол длины волны $d = 0.5\lambda$ и равенстве ее апертуры толщине водного слоя обеспечивает преимущественное излучение одной q-ой нормальной волны. Уменьшение апертуры при сохранении шага антенны приводит к неравномерному излучению энергии в нормальные волны других номеров. В качестве примера рассмотрим водный слой толщиной $H = 5\lambda$ ($m = 10$). Антенна с шагом $d = 0.5\lambda$ и центром на горизонте $Z_0 = 0.5H$ настроена на излучение первой нормальной волны $q = 1$. На рис. 1 представлены зависимости мощности, излучаемой антенной в одну нормальную волну W_l, от ее номера l. Если антенна перекрывает весь водный слой по его толщине ($N = 11$), то практически вся энергия излучается в одну первую нормальную волну $W_1 = 6.05W_0$ (рис. 1a) и степень фильтрации SF = 0.93. Мощность, равномерно излучаемая во все остальные девять нормальных волн, составляет $W_{2-10} = 0.45W_0$ по $0.05W_0$ в каждую. Этот "ореол", сопровождающий преимущественное излучение антенны в одну нормальную волну, объясняется дискретностью антенны [10]. Возьмем теперь значительно меньшее число элементов в антенне, например, $N = 5$. Тогда мощность, излучаемая в первую нормальную волну (при прежнем шаге d/λ и глубине Z_0), составит $W_1 = 1.25W_0$ и при этом значительная часть энергии излучается неравномерно в нормальные волны других номеров (в значительной степени, в соседние вторую и третью), так что $W_{2-10} = 1.25W_0$ и ее фильтрующие свойства оказываются очень низкими SF = 0.5 (рис. 1b). При $l = q = 1$ первое и второе слагаемые в фигурных скобках в выражении (2) оказываются равными единице и нулю соответственно. При $l \neq 1$ эти слагаемые будут иметь или нулевые или малые значения. Поэтому при $Z_0 = 0.5H$ мощность, излучаемая в первую нормальную волну W_1, равна величине коэффициента перед знаком суммы в правой части выражения (2) при подстановке значений параметров задачи. Объяснению таких энергетических свойств антенны может помочь рассмотрение ее

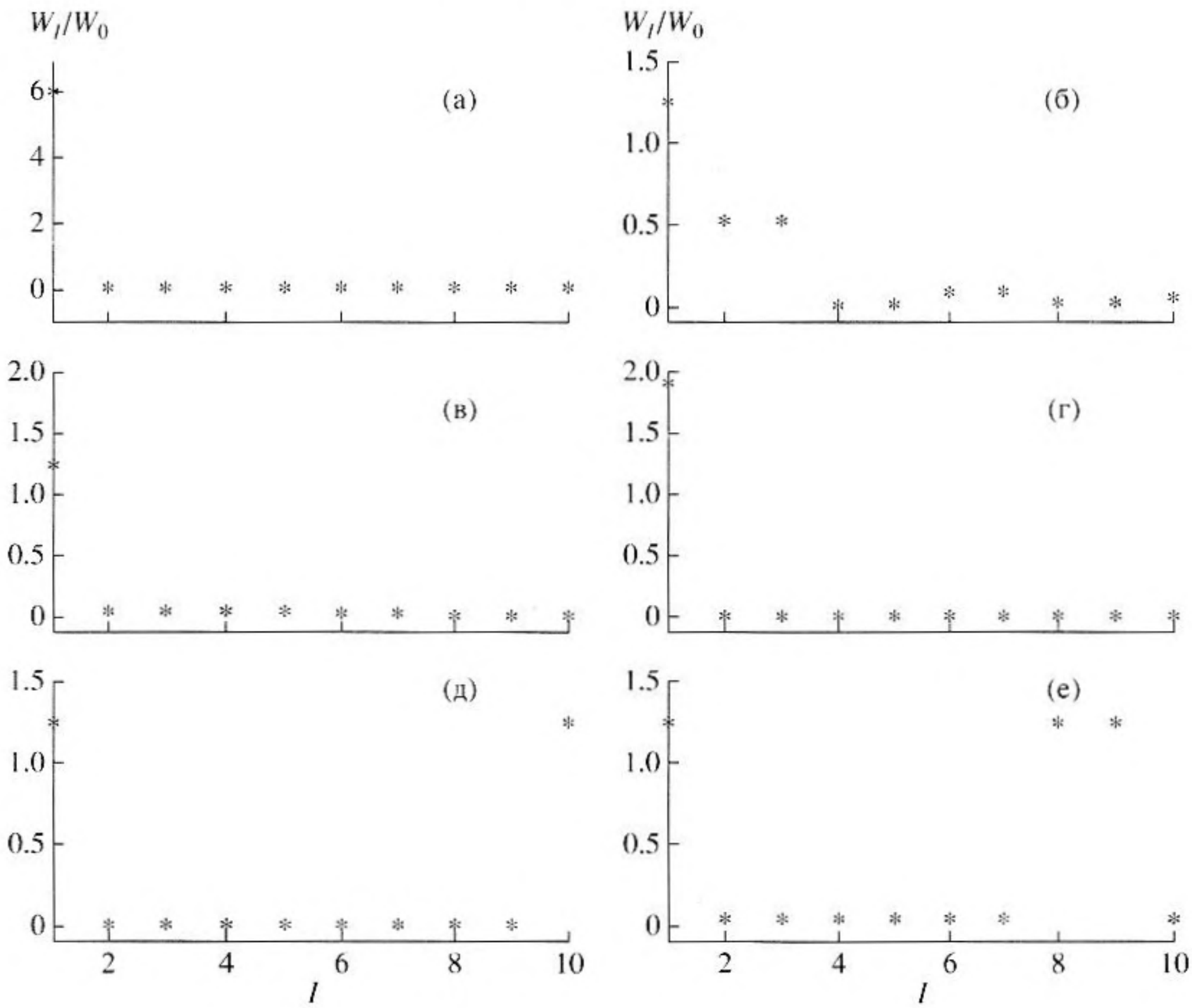

Рис. 1. Зависимость мощности W_l/W_0 от номера нормальной волны l. $H = 5\lambda$, $m = 10$, $q = 1$. a. $N = 11$, $d = 0.5\lambda$, $Z_0 = 0.5H$. b. $N = 5$, $d = 0.5\lambda$, $Z_0 = 0.5H$. c. $N = 5$, $d = 0.8\lambda$, $Z_0 = 0.5H$. d. $N = 5$, $d = 0.8\lambda$, $Z_0 = 0.4H$. e. $N = 5$, $d = \lambda$, $Z_0 = 0.5H$. f. $N = 5$, $d = 1.25\lambda$, $Z_0 = 0.5H$.

сканограмм направленности излучаемой мощности в отдельные нормальные волны.

Вертикальная компонента волнового вектора l-ой нормальной волны $b_l = k\sin\beta_l$, где $\pm\beta_l$ есть угол наклона в вертикальной плоскости от горизонтали двух плоских волн, распространяющихся вдоль водного слоя и составляющих l-ую нормальную волну (волн Бриллюэна) [1]. Применяемая выше компенсация при настройке антенны на излучение q-ой нормальной волны равнозначна одновременному использованию двух линейных компенсаторов с фазовыми центрами на поверхности и на дне и с фазовыми фронтами, параллельными плоским волнам Бриллюэна этой q-ой нормальной волны. При повороте этих фронтов на произвольный угол компенсации β, то есть применяя компенсацию в виде $V_0\cos[k(Z_0 + id)\sin\beta]$, можно получить выражение мощности, излучаемой такой антенной в слое, в зависимости от угла компенсации β

$$W = W_0\frac{\pi}{k}\frac{2}{H}\frac{N^2}{4}\sum_{l=1}^{m}\left\{\frac{\sin\left[N\frac{d}{2}(b_l - k\sin\beta)\right]}{N\sin\left[\frac{d}{2}(b_l - k\sin\beta)\right]}\times\right.$$

$$\times\cos[(b_l - k\sin\beta)Z_0] + \frac{\sin\left[N\frac{d}{2}(b_l + k\sin\beta)\right]}{N\sin\left[\frac{d}{2}(b_l + k\sin\beta)\right]}\times \quad (4)$$

$$\left.\times\cos[(b_l + k\sin\beta)Z_0]\right\}^2.$$

Это выражение представляет собой сканограмму по мощности излучающей вертикальной дискретной линейной антенны в водном слое при использовании определенного выше способа нелиней-

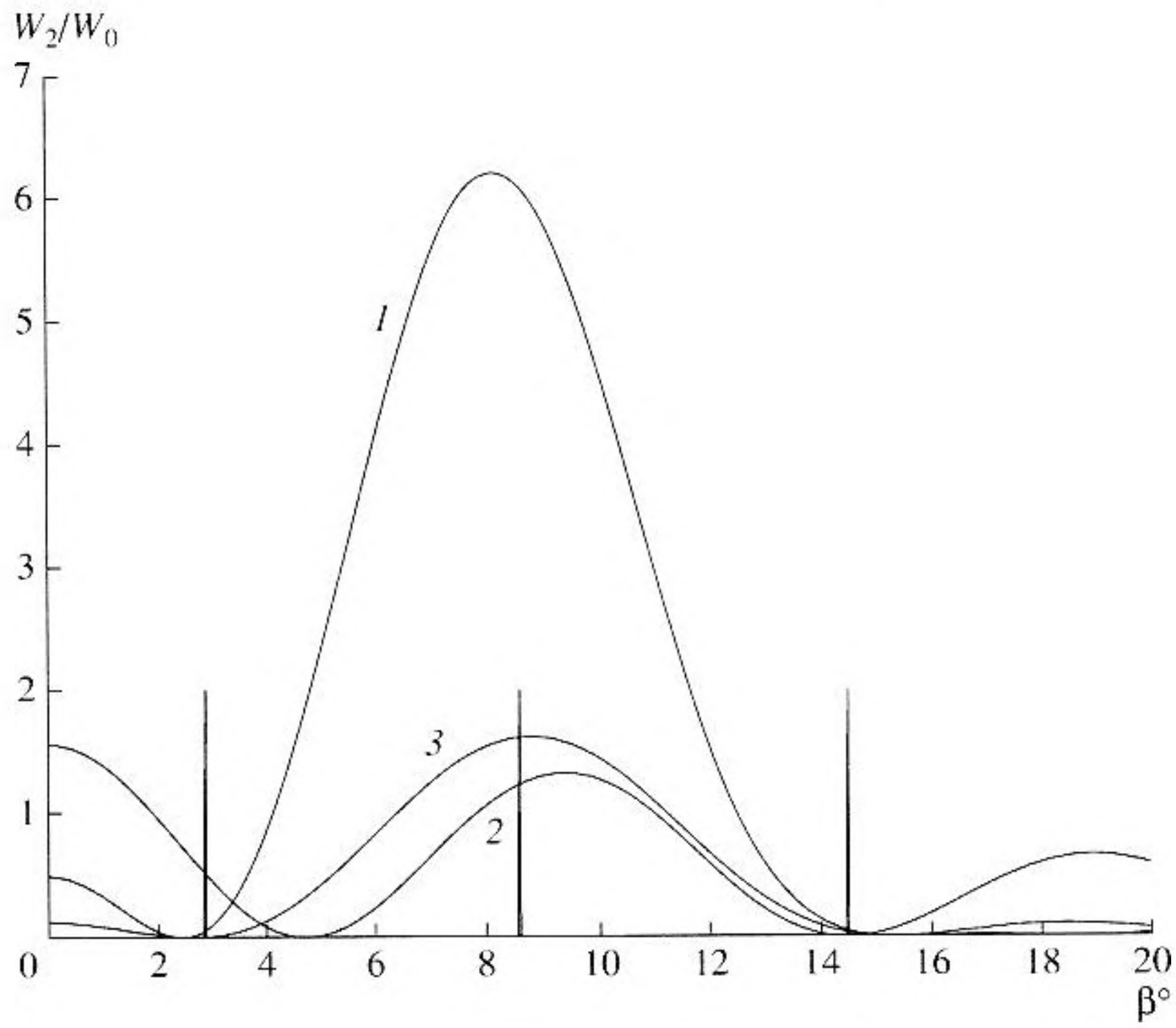

Рис. 2. Зависимость мощности W_2/W_0 от угла компенсации β. $H = 5\lambda$. 1. $N = 11$, $d = 0.5\lambda$, $Z_0 = 0.5H$. 2. $N = 5$, $d = 0.5\lambda$, $Z_0 = 0.5H$. 3. $N = 5$, $d = 0.8\lambda$, $Z_0 = 0.4H$.

ной компенсации и состоит из суммы сканограмм излучения антенны в каждую из распространяющихся в слое нормальных волн.

Неравномерное амплитудное возбуждение элементов линейной антенны в свободном пространстве приводит к изменению ширины главного максимума и уровня боковых максимумов ее сканограммы направленности [8]. Используемый выше способ компенсации определяет более сложные закономерности в поведении ее сканограммы направленности в зависимости от величин ее параметров N, Z_0 и d/λ, поскольку возбуждение элементов меняется, как по амплитуде, так и по фазе и различным образом для каждой нормальной волны.

Для непрерывной линейной антенны, перекрывающей водный слой по его толщине, кривые сканограмм для нормальных волн номеров $l \neq q$ при $\beta = \beta_q$ имеют нулевые значения, то есть нормальные волны этих номеров при настройке антенны на излучение q-ой нормальной волны не излучаются совсем [14]. При замене непрерывной антенны на дискретную с шагом $d = 0.5\lambda$ и апертурой, равной толщине слоя, все кривые сканограмм номеров $l \neq q$ при $\beta = \beta_q$ имеют значения, близкие к нулю. Таким образом, антенна, настроенная на излучение q-ой нормальной волны ($\beta = \beta_q$) практически излучает только одну эту q-ую нормальную волну при слабом равномерном излучении в нормальные волны других номеров $l \neq q$. В случае, когда апертура дискретной антенны меньше толщины слоя при прежнем шаге $d = 0.5\lambda$, при угле компенсации $\beta = \beta_q$ кроме q-ой нормальной волны будут излучаться нормальные волны других номеров и тем сильнее, чем меньше апертура антенны по сравнению с толщиной слоя [10]. Так, при рассматриваемой нелинейной компенсации уменьшение числа элементов в антенне, а следовательно, и ее апертуры, при прежнем шаге $d = 0.5\lambda$, приводит к уменьшению ширины ее сканограммы, а так же уменьшению излучаемой антенной мощности. Это иллюстрирует рис. 2, на котором представлены сканограммы второй нормальной волны $l = 2$ для числа элементов в антенне $N = 11$ (кривая *1*) и $N = 5$ (кривая *2*). Центр антенны находится в середине слоя $Z_0 = 0.5H$. Вид сканограмм нормальных волн других номеров аналогичен представленному на рис. 2. На последнем представлены графики в диапазоне углов компенсации $\beta = 0°–20°$. Картина, симметричная относительно оси ординат, будет иметь место для значений углов компенсации $\beta = 0°–20°$, которая опускается. Вертикальными прямыми на рис. 2 отмечены углы скольжения волн Бриллюэна β_l для $l = 1$, 2 и 3. В свою очередь, увеличение шага антенны при неизменном числе элементов N приводит к уширению сканограммы.

Чтобы достичь ширины прежней сканограммы (рис. 2, кривая *1*) необходимо увеличить апертуру, что при малом числе элементов возможно

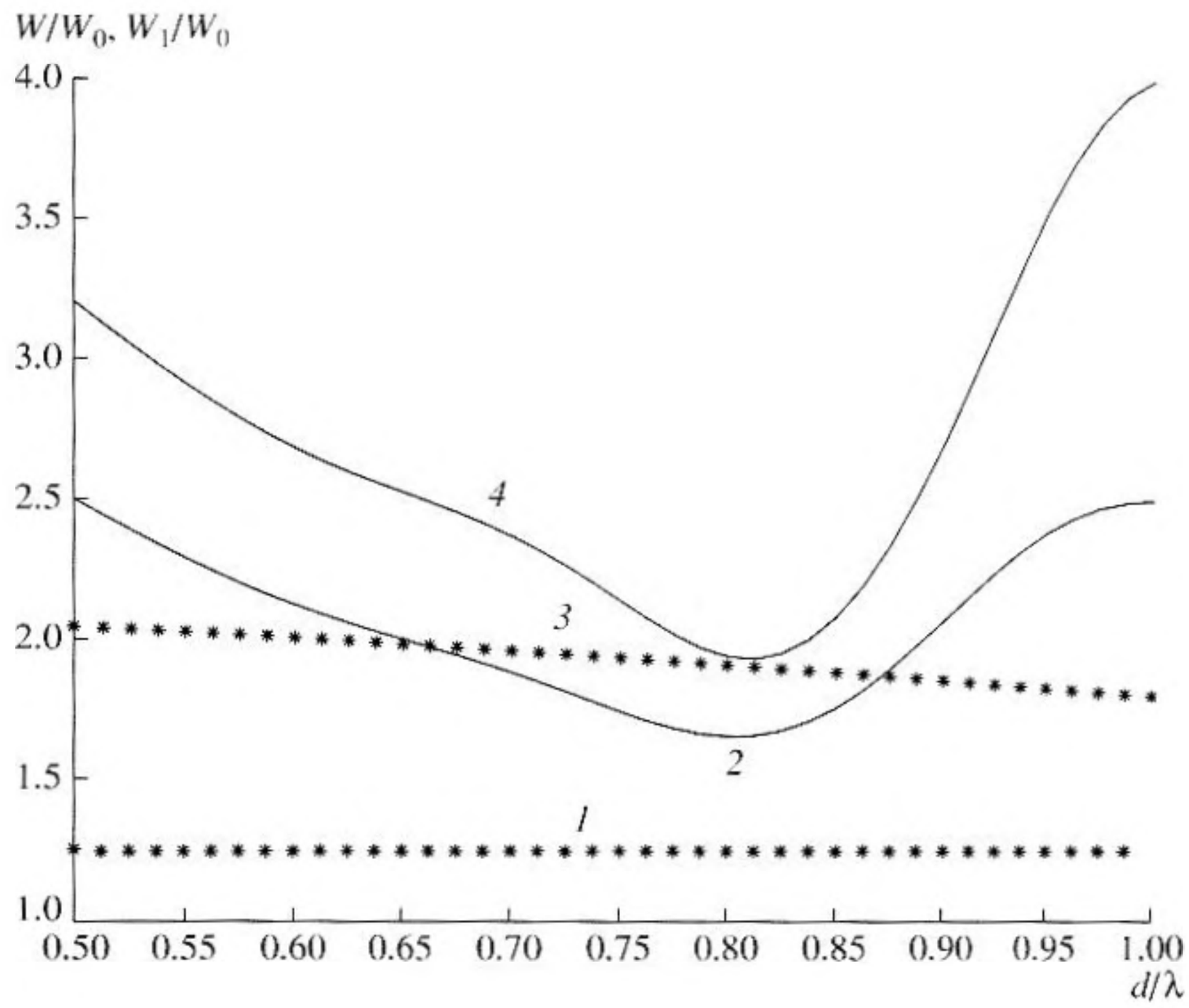

Рис. 3. Зависимость мощности W_1/W_0 (кривые *1* и *3*) и W/W_0 (кривые *2* и *4*) от шага антенны d/λ. $H = 5\lambda$, $m = 10$, $q = 1$, $N = 5$, $Z_0 = 0.5H$ (кривые *1* и *2*), $Z_0 = 0.4H$ (кривые *3* и *4*).

путем увеличения шага антенны. Это приводит к увеличению ее апертуры и расширению сканограмм отдельных нормальных волн. При меньшем числе элементов можно достичь той же ширины сканограмм, как и в случае, когда антенна перекрывает весь водный слой. С другой стороны, уменьшение числа элементов приводит к ослаблению излучаемой антенной мощности. Распределение производительности элементов антенны по толщине слоя задается пропорциональным собственной функции поля излучаемой нормальной волны, в нашем случае первой, чья собственная функция имеет вид косинусоиды с максимумом на дне и нулем на поверхности. Поэтому центр антенны желательно смещать вниз, чтобы по возможности увеличить излучаемую антенной мощность. Возможность получения высокой степени фильтрации при уменьшении числа элементов можно реализовать, рассчитав зависимость мощности, излучаемой антенной в одну первую нормальную волну W_1 и во все m нормальных волн W, от шага антенны d/λ. При тех значениях d/λ, при которых обе кривые будут близки друг к другу, следует ожидать преимущественного излучения первой нормальной волны и высоких значений степени фильтрации SF. На рис. 3 представлены графики этих зависимостей для числа элементов в антенне $N = 5$ и двух горизонтов ее центра $Z_0 = 0.5H$ (кривые *1* и *2*) и $Z_0 = 0.4H$ (кривые *3* и *4*). Наиболее близко кривые W_1 и W подходят в последнем случае при шаге антенны $d = 0.8\lambda$. На рис. 1c и рис. 1d представлены зависимости излучаемой антенной мощности в отдельные нормальные волны W_l от их номера l для шага антенны $d = 0.8\lambda$. Рис. 1c соответствует горизонту $Z_0 = 0.5H$ и степени фильтрации SF = 0.754, а рис. 1d – горизонту $Z_0 = 0.4H$ и степени фильтрации SF = 0.983. В первом случае в первую нормальную волну излучается мощность $W_1 = 1.2W_0$, во втором – $W_1 = 1.91W_0$. Если при $Z_0 = 0.5H$ в фигурной скобке правой части выражения (1) при $l = q = 1$ величина $\cos[(b_l + b_q)Z_0]$ равна нулю, то при $Z_0 < 0.5H$ эта величина отлична от нуля и второе слагаемое в фигурной скобке имеет некоторое положительное значение. При этом выражение в фигурных скобках будет больше единицы, что и дает увеличение мощности, излучаемой в первую нормальную волну. При таком шаге антенны ее апертура составляет $0.64H$. На рис. 2 (кривая *3*) представлена сканограмма по мощности второй нормальной волны при шаге $d = 0.8\lambda$ антенны из пяти элементов $N = 5$ с центром на горизонте $Z_0 = 0.4H$. При угле компенсации β_1 значение W_2 близко к нулю и преобладает мощность первой нормальной волны W_1. Таким образом, даже уменьшая число элементов в антенне более чем в два раза ($N = 11$ и $N = 5$), можно получить достаточно большую степень фильтрации, разумеется теряя при этом в мощности излучения.

Увеличение шага антенны d возможно лишь до значения, меньшего длины волны λ. В свободном пространстве при шаге $d \geq \lambda$ в диаграмме направленности линейной антенны возникают дополнительные (дифракционные) максимумы, по величине равные главному максимуму диаграммы при $d < \lambda$ [8]. Для той же антенны, располагающейся в волноводе вертикально, кроме излучения нормальной волны q, на которую настроена антенна, может иметь место излучение нормальных волн других номеров [10]. Согласно (2) этот эффект возможен при выполнении условия

$$\frac{d}{2}(b_l \mp b_q) = n\pi, \quad n = 1, 2, \ldots \tag{5}$$

(При $n = 0$ излучается одна q-ая нормальная волна, на которую настроена антенна.) В рассматриваемом случае ($H = 5\lambda$, $m = 10$, $N = 5$, $q = 1$, $Z_0 = 0.5H$) при шаге $d = \lambda$ кроме 1-ой нормальной волны излучается также 10-ая нормальная волна (рис. 1e), а при шаге $d = 1.25\lambda$ кроме 1-ой нормальной волны излучаются 8-ая и 9-ая нормальные волны (рис. 1f). Мощности, излучаемые антенной в эти нормальные волны, в общем случае, будут различны, и только, когда центр антенны расположен в середине водного слоя (как на рис. 1e и 1f), одинаковыми. Это определяется величиной сомножителей $\cos[(b_l \mp b_q)Z_0]$ в фигурных скобках правой части выражения (1). Следует отметить, что общая излучаемая антенной мощность будет приблизительно в два и в три раза больше, чем в случае, когда шаг антенны $d = 0.5\lambda$ (рис. 1c). При этом в обоих случаях имеет место слабое равномерное излучение в нормальные волны номеров $l = 2$–9 (рис. 1e) и $l = 2$–7 и 10 (рис. 1f).

Выше рассматривался случай распространения малого числа нормальных волн ($m = 10$). Аналогичные результаты имеют место и при большом числе нормальных волн. Например, в водном слое толщиной $H = 25\lambda$ ($m = 50$) вертикальная дискретная линейная антенна из $N = 51$ элемента с центром на горизонте $Z_0 = 0.5H$ и шагом $d = 0.5\lambda$, настроенная также на излучение первой нормальной волны $q = 1$, перекрывает весь водный слой по его толщине. Почти вся энергия излучается в одну первую нормальную волну $W_1 = 26W_0$ и степень фильтрации SF = 0.98. Мощность, равномерно излучаемая во все остальные сорок девять нормальных волн, составляет $W_{2\text{–}50} = 0.5W_0$. Если число элементов в антенне сократить до $N = 25$, то в первую нормальную волну излучается мощность $W_1 = 6.25W_0$ и степень фильтрации SF = 0.5. Мощность, неравномерно излучаемая в остальные нормальные волны, составляет $W_{2\text{–}50} = 6.25W_0$. Если теперь взять шаг антенны $d = 0.8\lambda$ и горизонт центра антенны $Z_0 = 0.4H$, то в первую нормальную волну в этом случае излучается мощность $W_1 = 9.52W_0$ и ее степень фильтрации SF = 0.986. Апертура антенны составляет $0.77H$.

Таким образом, излучение акустической энергии в одну нормальную волну вертикальной дискретной линейной антенной с шагом $d = 0.5\lambda$, перекрывающей волновод по его толщине и настроенной на излучение этой нормальной волны, является оптимальным с энергетической точки зрения. Но можно добиться преимущественного излучения той же нормальной волны и при меньшем числе элементов (часто значительном), увеличивая шаг антенны, однако, с потерей излучаемой мощности. При этом апертура антенны может быть меньше толщины волновода. Выше рассматривался случай идеального волновода. Решение аналогичной задачи для волновода Пекериса [7] представляется весьма актуальным и, в принципе, возможным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П.* Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1982.
2. *Гончаров В.В., Зайцев В.Ю., Куртепов В.М., Нечаев А.Г., Хилько А.И.* Акустическая томография океана. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1997.
3. *Коржаков Б.Г., Кулинич В.В., Кошкин А.В., Хилько А.И.* Исследование эффективности излучения низкочастотного звука вертикальной антенной решеткой в мелком море // Препринт ИПФ РАН, № 658. Нижний Новгород, 2004.
4. *Лучинин А.Г., Хилько А.И.* Низкочастотная акустическая томография мелкого моря с использованием маломодовых импульсов // Акуст журн. 2005. Т. 51. № 2. С. 228–241.
5. *Gazanhes C., Garnier J.L.* Experiments on signal mode excitation in shallow water // J. Acoust. Soc. Amer. 1981. V. 69. № 4. P. 963–969.
6. *Shang E.C., Clay C.S., Wang J.Y.* Passive source ranging in waveguides by using mode filter // J. Acoust. Soc. Amer. 1985. V. 78. № 1. P. 172–175.
7. *Пекерис К.* Теория распространения звука взрыва в мелкой воде. В кн.: Распространение звука в океане. М.: Издательство иностранной литературы, 1951.
8. *Смарышев М.Д.* Направленность гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1973.
9. *Вдовичева Н.К., Фикс И.Ш.* Расчет мощности антенны, расположенной в плоскослоистом волноводе // Препринт ИПФ АН СССР, № 256. Горький, 1990.
10. *Елисеевнин В.А.* Концентрация энергии в одну нормальную волну, излучаемую в водном слое вертикальной линейной антенной // Акуст. журн. 2006. Т. 52. № 2. С.
11. *Голубева В.Н., Елисеевнин В.А.* Мощность излучения вертикальной компенсированной линейной ан-

тенны в водном слое // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 1. С. 117–120.

12. *Исакович М.А.* Общая акустика. М.: Наука, 1973.
13. *Журавлев В.А., Кобозев И.К., Кравцов Ю.А.* О мощности, излучаемой акустическим источником, в океаническом волноводе // Акуст. журн. 1987. Т. 33. Вып. 6. С. 1051–1056.
14. *Елисеевнин В.А.* О работе вертикальной линейной антенны в водном слое // Акуст. журн. 1981. Т. 27. № 2. С. 228–233.

Generation of a Single Normal Wave by a Vertical Linear Array in the Water Layer

E. V. Golubeva[a] and V. A. Eliseevnin[b]

[a] *St. John's University, 8000 Utopia Parkway Queens, NY 11439 USA*

[b] *Andreev Acoustics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Shvernika 4, Moscow, 117036 Russia*

e-mail: bvp@akin.ru

Abstract—The possibility of the acoustic energy emission into a single normal wave by a vertical linear array in a homogeneous water layer is considered for the case of the array aperture being smaller than the layer thickness.