

УДК 681.883.77

© А. Д. Консон, А. А. Волкова*, 2022

АО «Концерн «Океанприбор», Чкаловский пр., д. 46., Санкт-Петербург, 197376, Россия

*wolkova.aa@yandex.ru

МОДУЛЯЦИЯ ШУМОВОГО СИГНАЛА ПРИ КАЧКЕ КОРАБЛЯ ВСЛЕДСТВИЕ ФЛУКТУИРУЮЩЕЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ЛУЧЕЙ

Статья поступила в редакцию 03.09.2021, после доработки 27.10.2022, принята в печать 18.11.2022

Аннотация

Амплитудная модуляция шумового сигнала надводного корабля образуется как непосредственно в процессе шумоизлучения при вращении линии вала и винта, так и дополнительно — вследствие качки корабля, обусловленной волнением моря. При этом дополнительную низкочастотную (не более 0,2 Гц) амплитудную модуляцию шумоизлучения можно наблюдать в виде процесса временных вариаций мощности принимаемого сигнала. В связи с этим, представляет интерес установить связь спектра амплитудно-фазовой модуляции широкополосного сигнала корабля при его качке со спектром процесса качки.

В качестве механизма образования модуляции шумового сигнала при качке корабля рассмотрено явление флуктуирующей интерференции лучей, распространяющихся от вертикально качающегося точечного подводного источника вблизи поверхности воды. Получены аналитические соотношения, связывающие спектр амплитудно-фазовой модуляции широкополосного сигнала корабля при его качке со спектром процесса качки. В результате установлен параметр, описывающий совокупные условия, по которому можно определить спектральные свойства модуляции. Вид спектра вариации мощности может быть различным существенно в зависимости от значений параметра $K = 2k\sigma_H \sin \alpha$, где k — волновое число, σ_H — среднеквадратичное значение вертикальной составляющей (смещения источника) вследствие качки, α — угол скольжения луча у поверхности. При значении $K < 1$ результаты наблюдения процесса модуляции сигнала можно отождествлять с процессом качки корабля. При значении $K > 1$ спектр модуляции сигнала не будет соответствовать спектру процесса качки. С ростом значения параметра K спектр модуляции расширяется, выходит за пределы спектра процесса качки. Появляются существенно более низкие и высокие гармоники. Результаты компьютерного моделирования и натурных экспериментов подтвердили зависимость вида спектра модуляции от параметра K . Таким образом, установлено наличие дополнительного механизма образования модуляции шумового сигнала при качке корабля, обусловленного явлением флуктуирующей интерференции лучей, распространяющихся от вертикально качающегося точечного подводного источника вблизи поверхности воды.

Ключевые слова: гидроакустика, шумопеленгование, качка, модуляция, флуктуация, спектр

© А. Д. Консон, А. А. Волкова*, 2022

JSC “Concern “Oceanpribor”, Chkalovsky pr., 46, St. Petersburg, 197376, Russia

*wolkova.aa@yandex.ru

NOISE SIGNAL MODULATION AT THE SHIP ROLLING AND PITCHING DUE TO FLUCTUATING INTERFERENCE OF BEAMS

Received 03.09.2021, Revised 27.10.2022, Accepted 18.11.2022

Abstract

Amplitude modulation of a noise signal of the surface ship is formed both directly at noise emission, when the line of the shaft and the propeller is rotating, and in addition due to the ship rolling and pitching caused by the rough sea. At the same time additional low-frequency (no more than 0,2 Hz) amplitude modulation of the noise emission can be observed as a process of temporary variations of the received signal power. In this regard, it is interesting to find relation of the amplitude-phase modulation spectrum of the ship broadband signal at its rolling and pitching with the spectrum of rolling and pitching process.

Ссылка для цитирования: Консон А.Д., Волкова А.А. Модуляция шумового сигнала при качке корабля вследствие флуктуирующей интерференции лучей // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 4. С. 74–81. doi:10.48612/fpg/xgkz-naer-b78u

For citation: Konson A.D., Volkova A.A. Noise Signal Modulation at the Ship Rolling and Pitching due to Fluctuating Interference of Beams. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 4, 74–81. doi:10.48612/fpg/xgkz-naer-b78u

As a mechanism of formation of the noise signal modulation at the ship rolling and pitching the fluctuating interference of the beams, propagating from vertically dipping underwater point source near the water surface, is considered. The analytical ratios connecting the amplitude-phase modulation spectrum of the ship broadband signal at its rolling and pitching with the spectrum of rolling and pitching process are received. As a result, the parameter describing cumulative conditions by which it is possible to determine spectral properties of modulation is determined. The type of the power variation spectrum can be substantially different depending on values of parameter $K = 2k\sigma_H \sin\alpha \leq 1$ where k — the wave number, σ_H — root mean square value of the vertical component (source shift) due to rolling and pitching, α — the beam grazing angle at the surface. At value $2k\sigma_H \sin\alpha < 1$ results of observation of the signal modulation process can be identified with process of the ship rolling and pitching. At value $2k\sigma_H \sin\alpha > 1$ the signal modulation spectrum will not correspond to the spectrum of rolling and pitching process. With the increase of parameter K value the modulation spectrum extends, goes beyond the spectrum of rolling and pitching process. Significantly lower and high harmonics emerge. Results of computer modeling and natural experiments confirmed dependence of the type of the modulation spectrum on parameter K . Thus, presence of the additional mechanism of noise signal modulation formation at the ship rolling and pitching, caused by the phenomenon of fluctuating interference of the beams propagating from vertically dipping underwater point source near the water surface is found.

Keywords: hydroacoustics, passive listening, rolling and pitching, modulation, fluctuation, spectrum

1. Введение

Амплитудная модуляция шумового сигнала надводного корабля образуется как непосредственно в процессе шумоизлучения при вращении линии вала и винта, так и дополнительно — вследствие качки корабля, обусловленной волнением моря. При этом дополнительную амплитудную модуляцию шумоизлучения можно наблюдать в виде процесса периодического изменения мощности принимаемого сигнала [1–3].

Различают бортовую, килевую и вертикальную качку. При бортовой качке колебания совершаются вокруг продольной оси корабля, при килевой — вокруг поперечной. Вертикальная качка вызывается изменением сил поддержания при прохождении волны под кораблем [4, 5]. Поскольку основным источником шумового сигнала является винт корабля, следовательно, дополнительная модуляция излучаемого шума связана с килевой и вертикальной качкой, определяющей периодическое изменение отстояния винта от поверхности (глубины погружения винта). Как результат, имеет место явление дополнительной модуляции излучаемого шума за счет флуктуирующей интерференции лучей.

Так как наблюдаемый процесс временных вариаций мощности принимаемого сигнала при соответствующей обработке (или даже просто на слух оператором) позволяет установить (измерить) период качки, то это может быть полезно в практике судовождения, а также для более точной классификации наблюдаемого (в режиме шумопеленгования) надводного объекта [5].

В связи с этим, представляет интерес установить связь спектра амплитудно-фазовой модуляции широкополосного сигнала корабля при его качке со спектром процесса качки.

2. Механизм образования дополнительной модуляции сигнала при качке

В ряде работ [6, 7] при исследовании флуктуационных явлений в акустике отмечалась необходимость учета явлений, связанных с качанием платформы, на которой закреплен излучатель. При этом установлено, что колебания платформы могут приводить к амплитудно-фазовой модуляции сигнала аналогично тому, как это происходит в условиях интерференции флуктуирующей многолучёвости [8].

Рассмотрим модель образования амплитудной модуляции сигнала надводного корабля как процесс флуктуирующей интерференции сигнала от вертикально качающегося точечного источника, находящегося вблизи поверхности моря. Такая модель упрощает реальную картину шумообразования, но выделяет основной процесс движения корабля как источника сигнала — вертикальную составляющую его колебания, которая присутствует при всех видах качки. Этого достаточно, чтобы установить важные закономерности акустических процессов и выразить их в аналитической форме [9–11].

Примем как условие задачи, что вертикальная координата эквивалентного источника звука, принадлежащего надводному кораблю, меняется во времени с учетом всех видов качки корабля, в общем случае, по некоторому случайному закону.

Для источника, находящегося вблизи поверхности, дальнейшее акустическое поле формируется в результате интерференции прямого $\overline{P_1(t)}$ и отраженного от поверхности $\overline{P_2(t)}$ сигналов (рис. 1).

Поскольку граница вода-воздух является свободной, то на ней должно выполняться условие для давления акустического поля $\overline{P(t)} = 0$, поэтому коэффициент отражения от границы равен -1 [12].

В результате для суммарного поля можно записать:

$$\overline{P(t)} = \overline{P_1(t)} - \overline{P_2(t)}, \quad (1)$$

где $\overline{P_1(t)}$ — вектор прямого сигнала; $\overline{P_2(t)}$ — вектор отраженного сигнала.

Для упрощения примем шумоизлучение узкополосным (или тональным). Не останавливаясь на обоснованности такого допущения относительно реального шумоизлучения, отметим, что решение задачи в такой постановке может дать ряд практически важных результатов.

Для тонального сигнала запишем:

$$\begin{aligned} \overline{P_1(t)} &= E \cdot \exp[i(\omega t + \varphi)], \\ \overline{P_2(t)} &= E \cdot \exp[i(\omega t + \varphi + \Delta\varphi)], \end{aligned}$$

где E , ω , φ — амплитуда, круговая частота и фаза сигнала; $\Delta\varphi$ — набег фазы отраженного сигнала; t — время.

На рис. 2 приведена векторная диаграмма взаимодействия двух акустических волн, одна из которых распространяется непосредственно к приемнику, а другая приходит к нему после отражения от поверхности (рис. 1). Результирующее поле двух лучей, вектор $\overline{P(t)}$, получаем согласно (1).

На практике нас интересует процесс, который пропорционален квадрату модуля вектора сигнала $|\overline{P(t)}|^2$, то есть квадрату его амплитудной огибающей, которую обозначим $U(t) = |\overline{P(t)}|^2$. На основании теоремы косинусов [13] из рис. 2 для квадрата модуля вектора $\overline{P(t)}$ можно записать:

$$U(t) = 2E^2(1 - \cos \Delta\varphi). \quad (2)$$

При этом набег фазы отраженного сигнала $\Delta\varphi = \omega\Delta t$, где Δt — время запаздывания отраженного сигнала, определяется геометрией распространения. Если принять приемник бесконечно удаленным от источника, то, как видно из рис. 1, для фазовой задержки получим:

$$\Delta\varphi = \omega \frac{\Delta S}{C} = 2kH \sin \alpha, \quad (3)$$

где $\Delta S = 2H \sin \alpha$, H — глубина погружения источника звука, α — угол скольжения луча у поверхности, C — скорость звука, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, λ — длина волны.

По условиям рассматриваемой задачи глубина погружения источника меняется во времени относительно среднего значения H_0 , поэтому, обозначив $H(t) = H_0 + \delta_H(t)$, где $\delta_H(t)$ — случайный процесс, характеризующийся значением среднеквадратического отклонения σ_H , и нулевым средним значением $\mu_H = 0$, получим для набег фазы (3):

$$\Delta\varphi(t) = 2kH_0 \sin \alpha + 2k\delta_H \sin \alpha. \quad (4)$$

Тогда для выражения огибающей (2) с учетом (4) имеем:

$$U(t) = 2E^2 [1 - \cos(2kH_0 \sin \alpha + 2k\delta_H(t) \sin \alpha)]. \quad (5)$$

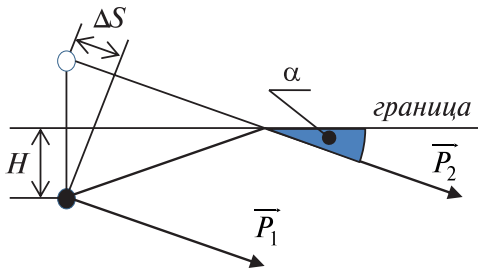


Рис. 1. Распространение лучей вблизи границы сред вода-воздух

Fig. 1. Beams propagation near the water — air interface

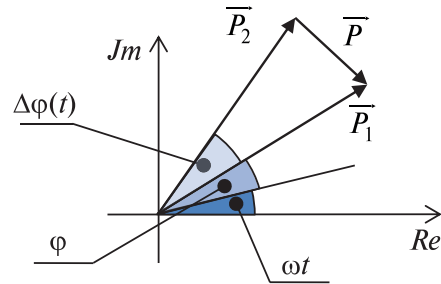


Рис. 2. Векторная диаграмма взаимодействия полей прямого и отраженного сигналов

Fig. 2. Vector diagram of interaction of the direct and reflected signals fields

Обозначим: $\Delta_\phi = 2kH_0 \sin \alpha$ — среднее значение набега фазы; $\delta_\phi = 2k\delta_H(t) \sin \alpha$ — флуктуации набега фазы.

Видно, что процесс флуктуации набега фазы δ_ϕ является производным от процесса флуктуации глубины $\delta_H(t)$, следовательно, он характеризуется нулевым средним значением $\mu_\phi = 0$ и значением среднеквадратического отклонения фазы $\sigma_\phi = 2k\sigma_H \sin \alpha$.

Тогда выражение (5) можно переписать с новыми переменными:

$$U(t) = 2E^2 \left[1 - \cos(\Delta_\phi + \delta_\phi) \right]. \quad (6)$$

Или, используя формулу для косинуса суммы:

$$U(t) = 2E^2 \left[1 - \cos \Delta_\phi \cos \delta_\phi + \sin \Delta_\phi \sin \delta_\phi \right]. \quad (7)$$

Фазовые изменения можно считать незначительными, когда $\delta_\phi \ll \pi/3$. Переходя к среднеквадратичным значениям, это условие примет вид:

$$\sigma_\phi = 2k\sigma_H \sin \alpha \ll 1, \quad (8)$$

где σ_H — значение среднеквадратического отклонения вертикальной составляющей движения эквивалентного источника, которое по условиям рассматриваемой задачи можно назвать акустической величиной качки.

Выражение (7) для рассматриваемых условий можно упростить, если принять $\sin \delta_\phi \approx \delta_\phi$, $\cos \delta_\phi \approx 1$, тогда получим

$$U(t) \approx 2E^2 \left[1 - \cos \Delta_\phi + \delta_\phi \sin \Delta_\phi \right]. \quad (9)$$

Из выражения (9) видно, что огибающая имеет переменную составляющую $\delta_\phi = 2k\delta_H(t) \sin \alpha$, которая повторяет процесс качки $\delta_H(t)$.

При широкополосном сигнале для разных его гармоник, в общем случае, можно иметь различные значения $\Delta_\phi = 2kH_0 \sin \alpha$, которые дадут в результате разные количественные значения по формуле (9).

Можно выделить два крайних случая $\Delta_\phi = n\pi$ и $\Delta_\phi = n\pi - \pi/2$, где n — целое число. На гармониках, удовлетворяющих первому условию, когда $\sin \Delta_\phi \rightarrow 0$, влияние качки не проявляется. Для гармоник, соответствующих второму условию, можно записать:

$$U(t) \approx 2E^2 \left[1 \pm 2k\delta_H(t) \sin \alpha \right]. \quad (10)$$

Таким образом, во всем частотном диапазоне гармоник широкополосного сигнала влияние качки происходит с переменным проявлением, что позволяет считать, что интегрально эффект воздействия качки на сигнал сохраняется.

Рассмотренные условия интерференции акустического сигнала (8) можно определить как акустические условия «малой качки». В этих условиях результаты наблюдения процесса флуктуаций сигнала (10) можно отождествлять с процессом качки корабля. При этом, соотношение (8) характеризует такие совокупные условия по углу α , частоте сигнала и вертикальной составляющей процесса корабельной качки, когда изменения интерференционной картины поля вследствие качки незначительны. Происходит явление, которое можно рассматривать как незначительное «дрожание» интерференционной картины поля в вертикальной плоскости.

Иную картину можно наблюдать, когда значение $\sigma_\phi = 2k\sigma_H \sin \alpha \gg 1$. Эти условия в противоположность предыдущим можно назвать акустическими условиями «большой качки». С увеличением корабельной качки (или с увеличением частоты сигнала, угла скольжения луча) флуктуации уровня сигнала все в большей мере будут определяться пространственными перемещениями интерференционных максимумов, происходящими в процессе качки, которые в итоге приводят к нелинейному процессу. Механизм образования вариаций уровня сигнала в последнем случае достаточно хорошо изучен [14]. Анализ происходящих при этом процессов на качественном уровне показывает, что амплитуда вариаций уровня сигнала не будет зависеть от амплитуды качки. Вторым важным моментом, вытекающим из общего рассмотрения, является то, что спектр вариаций уровня сигнала в этих условиях будет зависеть не только от частоты качки, но и от ее амплитуды. Основываясь на выводах из работы [14], можно записать для спектра огибающей флуктуирующего сигнала в предельном случае:

$$F(\Omega) = \frac{E^2}{2} \frac{2\pi}{\sigma_\phi \Omega_H} \exp \left[-\frac{\Omega^2}{2\sigma_\phi^2 \Omega_H^2} \right],$$

где Ω — частота в спектре флуктуаций (огибающей) сигнала, Ω_H — характерная частота процесса корабельной качки.

Таким образом, энергетический спектр флуктуаций, получающийся в результате качки, является непрерывным и имеет форму гауссовой кривой с вершиной на частоте, равной $\Omega \rightarrow 0$. Заметим, что гауссова форма спектра получается в рассматриваемом случае $\sigma_\varphi = 2k\sigma_H \sin \alpha \gg 1$ при любом спектре процесса качки $H(t)$, а зависимость $F(\Omega)$ от энергетических характеристик процесса качки проявляется только через величины Ω_H и $\sigma_\varphi = 2k\sigma_H \sin \alpha$. Это видно по ширине спектра огибающей флуктуирующего сигнала.

Спектр флуктуаций существует в широком диапазоне частот с максимумом при $\Omega \rightarrow 0$, поэтому определим ширину спектра как

$$\Delta_\Omega = \frac{1}{F(0)} \int_0^\infty F(\Omega) d\Omega = \sigma_\varphi \Omega_H \sqrt{\frac{\pi}{2}}.$$

Таким образом, аналитические исследования спектрально-энергетических характеристик модуляции сигнала дают важные соотношения, определяющие основные закономерности изменения мощности, вида и ширины спектра модулирующего процесса в зависимости от параметра $\sigma_\varphi = 2k\sigma_H \sin \alpha$, характеризующего модулирующую значимость процесса корабельной качки, и от частотных параметров несущей. В частности, получаем, что в случае $\sigma_\varphi = 2k\sigma_H \sin \alpha \gg 1$ спектр флуктуаций огибающей сигнала (вследствие флуктуирующей интерференции многолучевости) не будет соответствовать спектру процесса качки.

3. Результаты компьютерного моделирования и натурного эксперимента

Справедливость представленных аналитических исследований и сделанных на их основе выводов подтверждают результаты компьютерного моделирования, а также результаты известных экспериментальных исследований [3].

При моделировании использовался процесс модуляции сигнала $U(t)$ в виде (6), нормированный к величине $2E^2$:

$$\frac{U(t)}{2E^2} = 1 - \cos[\Delta_\varphi + \delta_\varphi(t)]. \quad (11)$$

Здесь переменная $\delta_\varphi(t) = 2k\delta_H(t)\sin \alpha$, где $\delta_H(t)$ — процесс качки, который непосредственно моделировался как случайный процесс, характеризуемый средним квадратичным значением σ_H и нулевым средним.

Для моделирования качки, описываемой гауссовым распределением, генерировался случайный процесс $\Phi(t)$ с заданным спектром и мощностью, равной единице. Форма спектра процесса качки $\Phi(t)$ для моделирования была взята в виде нормального распределения с фиксированным положением на частотной оси. Результирующий процесс флуктуаций моделировался по формуле (11), где $\delta_\varphi(t) = K\Phi(t)$. Здесь коэффициент $K = 2k\sigma_H \sin \alpha$ задает совокупные условия по частоте (через волновое число k), углу скольжения луча (α) и глубине качки (σ_H), которые определяют спектральные характеристики модуляции сигнала при заданном спектре качки.

Используемый в моделировании вид спектра качки показан на рис. 3. На рис. 4, 5 представлены результаты моделирования спектра модуляции при $K \leq 1$ и $K \geq 1$, соответственно. На всех графиках по оси частот отложены значения спектральных отсчетов, по вертикальной — значения амплитуды спектра мощности.

Видно, что при $K \leq 1$ спектр флуктуаций сигнала (рис. 4) повторяет заданную форму спектра процесса качки (рис. 3), и при этом мощность флуктуаций сигнала увеличивается при увеличении значения K . Максимум мощности флуктуации достигается при $K = 1$. Далее, при увеличении значения K совокупная мощность флуктуаций (мощность в полном диапазоне частот) остается постоянной, но форма спектра флуктуаций меняется (рис. 5). Дополнительно к основному максимуму, повторяющему форму спектра качки, появляется и увеличивается по амплитуде добавочный максимум. При значении K более четырех форма спектра флуктуаций полностью перестает соответствовать форме спектра качки.

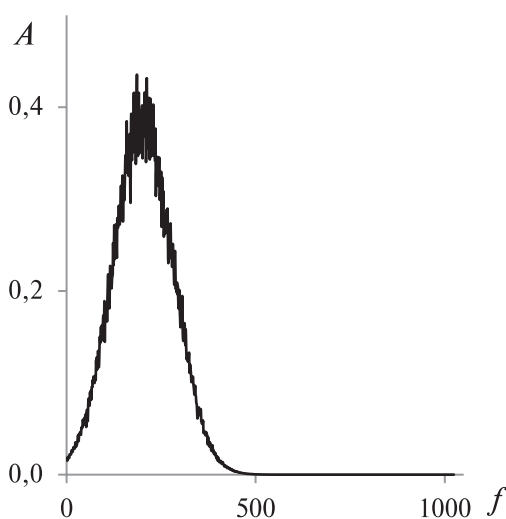


Рис. 3. Моделируемый спектр процесса качки $\Phi(t)$

Fig. 3. modelled spectrum of rolling and pitching process

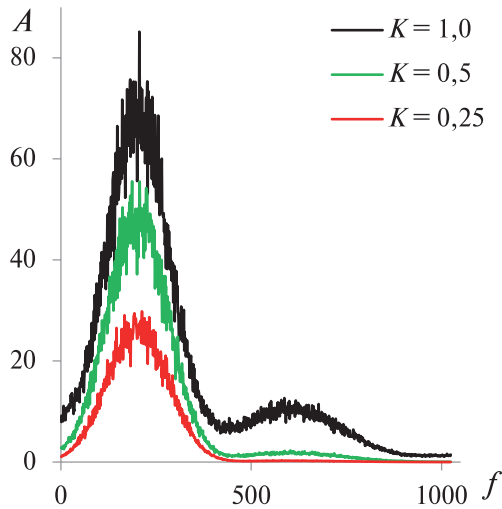


Рис. 4. Спектр флуктуаций при $K \leq 1$

Fig. 4. Fluctuations spectrum at $K \leq 1$

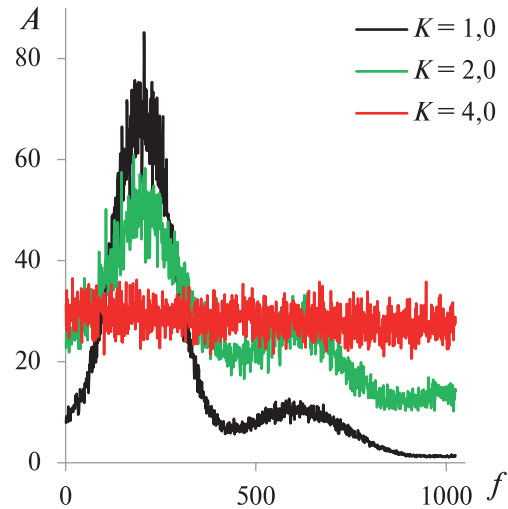


Рис. 5. Спектр флуктуаций при $K \geq 1$

Fig. 5. Fluctuations spectrum at $K \geq 1$

Полученный результат компьютерного моделирования подтверждается результатами анализа реальных записей шумовых сигналов, полученных в натурных условиях, ранее приведенными в работе [3]. На рис. 6 приведены примеры спектров амплитудной модуляции принимаемого сигнала при наличии качки корабля-источника шума вследствие волнения моря. По оси абсцисс отложена частота модуляции (f , Гц), по оси ординат — варьируемая средняя частота полосового фильтра спектроанализатора (Fsr , кГц). Амплитудные спектры приведены в яркостном виде (максимум соответствует желтому цвету, минимум — черному). На рис. 6, а приведен спектр модуляции для корабля среднего водоизмещения в условиях сплошной освещенности, на рис. 6, б и в приведены спектры модуляции для корабля большого водоизмещения в условиях наличия подводного звукового канала для различных расстояний между источником и приемником, соответственно.

Из приведенных примеров видно, что спектр модуляции в зависимости от частотной гармонике сигнала имеет разный характер.

Необходимо обратить внимание на частотный диапазон шумового сигнала, в котором заметны проявления модуляции. Для одних условий — это частоты от 0,5 до 2 кГц (рис. 6, а). Для других условий модуляция особенно ярко проявляется на частотах сигнала от 1,0 до 3 кГц (рис. 6, б) и от 3,0 до 5,0 кГц (рис. 6, в). Это хорошо согласуется с результатами компьютерного моделирования (рис. 4, 5). Как видно на рис. 6, при увеличении коэффициента K (при $K \gg 1$), что может происходить при увеличении частоты сигнала более

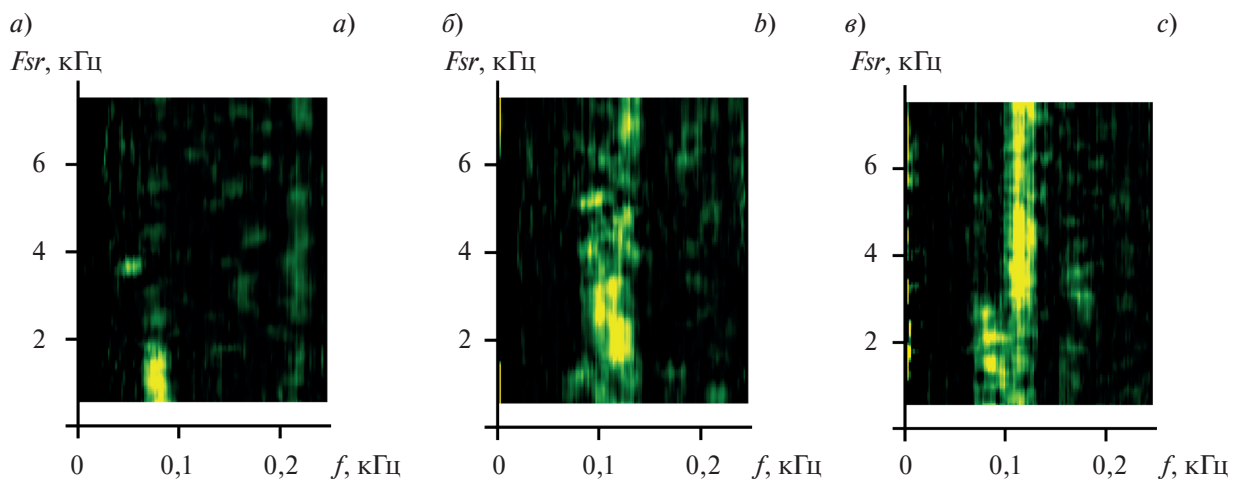


Рис. 6. Примеры яркостного спектра модуляции в диапазоне качки

Fig. 6. Examples of the brightness modulation spectrum within the rolling and pitching spectrum

3 кГц (рис. 6, б) и более 5,0 кГц (рис. 6, в), амплитуда модуляции уменьшается (рис. 5). На малых частотах, когда значение параметра K (при $K \ll 1$) падает, менее 1 кГц (рис. 6, б) и менее 3 кГц (рис. 6, в) амплитуда модуляции также падает, что согласуется с результатами моделирования на рис. 4.

4. Заключение

Аналитические выкладки, компьютерное моделирование и экспериментальные исследования показали, что явление дополнительной модуляции сигнала при качке корабля может быть объяснено образованием флуктуирующей интерференции лучей, распространяющихся от вертикально качающегося источника. При этом спектрально-энергетические характеристики модуляции зависят от совокупных условий, которые характеризуются значением параметра $K = 2k\sigma_H \sin \alpha$, где k — волновое число, σ_H — среднеквадратичное значение вертикальной составляющей качки, α — угол скольжения луча у поверхности, разделяющих физический процесс образования модуляции на два типа. При значении $K < 1$ результаты наблюдения процесса модуляции сигнала можно отождествлять с процессом качки корабля. При значении $K > 1$ спектр модуляции сигнала не будет соответствовать спектру процесса качки.

Литература

1. Кудрявцев А.А., Лугинец К.П., Машошин А.И. Об амплитудной модуляции подводного шума морских объектов // Акустический журнал. 2003. Т. 49, № 2. С. 224–228.
2. Машошин А.И. Оптимизация устройства обнаружения и измерения параметров амплитудной модуляции подводного шумоизлучения морских судов // Акустический журнал. 2013. Т. 59, № 3. С. 347–353. doi:10.7868/S0320791913030106
3. Консон А.Д., Волкова А.А. Обнаружение амплитудной модуляции подводного шумоизлучения морских судов при качке на фоне сверхнизкочастотных флуктуаций // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12, № 2. С. 12–19. doi:10.7868/S2073667319020023
4. Ремез Ю.В. Качка корабля. Л.: Судостроение, 1983. 328 с.
5. Войткунский Я.И. и др. Справочник по теории корабля: В трех томах. Т. 2. Статика судов. Качка судов. Л.: Судостроение, 1985. 440 с.
6. Акустика океана / Под ред. акад. Л.М. Бреховских. М.: Наука, 1974. 694 с.
7. Лаваль Р., Лабаск И. Влияние неоднородностей и неустойчивости среды на пространственную и временную обработку сигналов // Подводная акустика и обработка сигналов / Под ред. Л. Бьёрнэ. М.: Мир, 1985. 488 с.
8. Долуханов М.П. Флуктуационные процессы при распространении радиоволн. М.: Связь, 1971. 185 с.
9. Консон А.Д. Спектр флуктуации мощности сигнала, излучаемого кораблем при качке // Судостроение. 1997. Вып. 6. С. 46–48.
10. Консон А.Д. Синтез амплитудно-частотных характеристик фильтра для приема шумовых гидроакустических сигналов // Судостроение. 1998. Вып. 2. С. 41–42.
11. Консон А.Д. О корреляционных характеристиках флуктуации мощности шумового сигнала, излучаемого надводным кораблем // Акустический журнал. 1999. Т. 45, № 4. С. 523–527.
12. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 344 с.
13. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: Изд-во технико-теоретической литературы, 1957. 608 с.
14. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1975.

References

1. Kudryavtsev A.A., Luginets K.P., Mashoshin A.I. Amplitude modulation of underwater noise produced by seagoing vessels. *Acoustical Physics*. 2003, 49, 2, 184–188. doi:10.1134/1.1560380
2. Mashoshin A.I. Optimization of a device for detecting and measuring parameters of amplitude modulation of underwater noise emission of seagoing vessels. *Acoustical Physics*. 2013, 59, 3, 347–353. doi:10.1134/S106377101303010X
3. Konson A.D., Volkova A.A. Detection of amplitude modulation of underwater noise emission of sea vessels at rolling and pitching against ultralow frequency fluctuations. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2019, 12, 2, 12–19 (in Russian). doi:10.7868/S2073667319020023
4. Remise Yu.V. Rolling and pitching of the ship. *Leningrad, Sudostroyeniye*, 1983, 328 p. (in Russian).
5. Voytkunsky Ya.I. et al. Handbook on the theory of the ship: In three volumes. Volume 2. Statics of vessels. Rolling and pitching of vessels. *Leningrad, Sudostroyeniye*, 1985, 440 p. (in Russian).

6. Acoustics of the ocean / Ed. L.M. Brekhovsky. *Moscow, Nauka*, 1974. (in Russian).
7. Laval R., Labask I. Influence of nonuniformity and instability of the environment on spatial and time signal processing. *Underwater Acoustics and Signal Processing*, ed. L. Byornyo. *Moscow, Mir*, 1985, 488 p. (in Russian).
8. Dolukhanov M.P. Fluctuation Processes at Radio Wave Propagation. *Moscow, Svyaz'*, 1971. 185 p. (in Russian)
9. Konson A.D. The spectrum of power fluctuation of signal, radiated by ship at rolling and pitching. *Sudostroyeniye*. 1997, 6, 46–48 (in Russian).
10. Konson A.D. Synthesis of amplitude-frequency characteristics of the filter for noise hydroacoustic signal reception. *Shipbuilding*. 1998, 2, 41–42 (in Russian).
11. Konson A.D. Correlation of power fluctuations in the noise signal emitted by a surface ship. *Acoustical Physics*. 1999, 45, 4, 462–466.
12. Brekhovsky L.M. Waves in stratified media. *Moscow, Nauka*, 1973, 344 p. (in Russian).
13. Bronstein I.N., Semendyaev K.A. Handbook on mathematics. *Moscow, Publishing house of technical and theoretical literature*, 1957, 608 p. (in Russian).
14. Levin B.R. Theoretical bases of statistical radio engineering. *Moscow, Soviet Radio*, 1975. (in Russian).

Об авторах

КОНСОН Александр Давидович, РИНЦ AuthorID: 735464, e-mail: wolkova.aa@yandex.ru
ВОЛКОВА Анна Александровна, РИНЦ AuthorID: 706716, e-mail: adkonson@gmail.com