

В. Н. Горобец*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины**12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*E-mail: gorobets777@mail.ru**ДОПЛЕРОВСКИЕ СПЕКТРЫ УЗКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ,
ОТРАЖЕННЫХ КОРАБЛЯМИ РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ**

Приведены результаты экспериментальных исследований обратного рассеяния радиоволн от кораблей. Основное внимание уделено анализу доплеровских спектров сигналов, отраженных от кораблей. Показано, что форма огибающей спектра несет в себе информацию о пространственной структуре корабля. Ил. 6. Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: радиолокационные сигналы, корабли, спектры.

Успешность решения задач при радиолокации протяженных надводных объектов во многом зависит от правильности построения математической модели объекта, адекватной по рассеивающим свойствам реальному объекту. Существует множество математических моделей [1–6], однако практически невозможно найти универсальную модель, описывающую рассеивающие свойства всех надводных объектов для различных условий.

Одним из путей, позволяющим обойти указанные трудности, является разработка частных моделей, адекватных по рассеивающим свойствам реальным объектам в определенных условиях, например, математическая модель, предложенная в работе [7]. Суть предложенной модели заключается в следующем: в наиболее простом случае протяженный объект (корабль) может быть представлен в виде геометрически жестко связанного ансамбля из N локальных центров рассеяния (ЛЦР), размещенных в границах объекта и совершающих поступательное и колебательное движение совместно с ним в соответствии с законами кинематики твердого тела. При этом каждый i -й ЛЦР ансамбля рассматривается как независимая точечная цель, имеющая определенную величину эффективной площади рассеяния σ_i . Для узкополосной радиолокационной станции (РЛС), зондирующей сигнал которой $u_{\text{изл}}(t) = u_0 \xi(t) = u_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$, выражение для входного сигнала приемника РЛС можно записать в виде

$$u_{\text{пр}}(t) = \sum_{i=1}^N u_i^\gamma(t) \xi[t - \tau_i(t)],$$

где $\tau_i(t) = \frac{2r_i(t)}{c}$ – временная задержка сигнала,

рассеиваемого i -м ЛЦР; $u_i^\gamma(t) = \frac{u_0 \sqrt{GA}}{4\pi c^2(t)} \sqrt{\sigma_i^\gamma}$ – мед-

ленно меняющаяся амплитуда входного сигнала РЛС; G и A – коэффициент усиления и эффективная площадь антенны РЛС соответственно; r – расстояние между целью и антенной РЛС.

Как следует из работы, предложенная математическая модель корабля и сигнала, описывающего его рассеивающие свойства, в отличие от известных моделей, позволяет выявлять особенности пространственной структуры корабля. В радиолокационном сигнале от корабля содержится информация о распределении интенсивностей ЛЦР по высоте объекта, связанных с его архитектурой. Носителем этой информации является доплеровский спектр радиолокационного сигнала, а именно ширина спектра и его огибающая.

Результатом исследований особенностей экспериментальных доплеровских спектров сигналов, рассеянных протяженными надводными объектами (кораблями), проведенных в настоящей работе, является подтверждение выводов работы [7] о том, что доплеровские спектры позволяют выявить особенности пространственной структуры кораблей различных типов.

1. Аппаратура и методика проведения экспериментальных исследований. Натурные исследования обратного рассеяния радиоволн протяженными надводными объектами проводились сотрудниками 32-го отдела Института радиофизики и электроники НАН Украины на морском полигоне Юго-Восточного побережья Крымского полуострова и охватывали практически все сезонные изменения состояния моря, характерные для этой акватории Черного моря. В качестве объектов исследований использовались надводные суда, отличающиеся размерами, водоизмещением, палубными надстройками и ходовыми качествами (таблица).

Тактико-технические характеристики кораблей

Класс корабля	Водоизмещение, т	Длина, м	Ширина, м	Высота, м
Класс 1	1500	73	11	17
Класс 2	1200	100	10	16
Класс 3	760	51	8,4	16
Класс 4	290	40	7,7	13,7
Класс 5	80	29,5	5,98	7
Класс 6	7	12	3,5	3,0

В соответствии с методикой эксперимента все суда двигались в определенном азимутальном секторе по траектории, которая позволяла проводить длительное наблюдение (до 5 мин) за судном, под заранее заданным фиксированным ракурсным углом γ (γ – угол между векторной линией визирования объект – РЛС и векторной линией курса объекта, $\gamma = 0, 90$ и 180°). Суда на этих участках двигались прямолинейно и равномерно с постоянной скоростью.

Все исследования проводились с помощью измерительного комплекса, который состоял из импульсно-доплеровской РЛС с длиной волны $\lambda = 35$ см, доплеровской РЛС непрерывного излучения ($\lambda = 3,2$ см), телевизора «Карат» и аппаратуры контроля и регистрации. Оси диаграмм направленности ведущей и ведомой РЛС совмещены с оптической осью телевизионной установки. В процессе сопровождения, при выполнении судами движения по заданной траектории, ведущей РЛС производились измерения координат фактической траектории движения – азимута и дальности.

2. Результаты экспериментальных исследований. В процессе экспериментальных исследований получен массив реализаций временных сигналов с выходов фазовых детекторов РЛС с $\lambda = 35$ см и $\lambda = 3,2$ см для каждого из исследуемых классов объектов. Полученные реализации группировались в массивы данных по следующим признакам: номер класса объекта, длина волны РЛС, ракурс объекта γ , скорость хода (в узлах), состояние поверхности моря (в баллах), диапазон дальности (18 диапазонов по 1 км в пределах 2...20 км). Эти массивы являлись исходными для получения следующих характеристик для каждого из классов объектов:

- текущих и усредненных доплеровских спектров сигналов;
- пространственных портретов объектов.

Частотный диапазон спектрального анализа сигналов для РЛС $\lambda = 35$ см составляет величину 0...5 Гц, а для сигналов РЛС $\lambda = 3,2$ см – 0...20 Гц. Частотное разрешение анализатора спектра при этом в соответствующих диапазонах составляет 0,025 и 0,1 Гц, а время формирования текущих спектров сигналов 40 и 10 с соответственно. Для формирования усредненных спектров приняты пятикратные времена формирования текущих спектров, что составило 200 и 50 с соответственно. Такое соотношение интервалов формирования усредненных спектров фактически означает, что спектр, который формируется в результате воздействия на объект бортовой и килевой качки, для сигналов с $\lambda = 3,2$ см и $\lambda = 35$ см будет сформирован за различное количество колебаний корабля. Для создания идентичности

условий формирования спектров, т. е. за одинаковое число колебаний, время формирования текущих спектров принято равным 50 с, а усредненных спектров – 200 с для обоих диапазонов.

3. Анализ результатов. Оценка свойств экспериментальных доплеровских спектров сигналов производилась путем сравнения ширины усредненных спектров, нормированных на их максимальное значение.

Анализ полученных экспериментальных данных для объектов различных классов в каждом радиолокационном диапазоне показал, что ширины усредненных спектров при ракурсных углах $\gamma \pm 90^\circ$ имеют большие значения по сравнению с ширинами спектров, соответствующих радиальным ракурсам ($\gamma = 0, 180^\circ$).

Влияние степени морского волнения на ширину усредненных спектров проявляется во всех диапазонах длин волн РЛС в виде расширения спектров и, как показал сравнительный анализ экспериментальных усредненных спектров, полученных для различных классов и ракурсных углов, степень расширения спектров каждого из классов объектов коррелирует с величинами, обратными значениям величин водоизмещения объекта.

При равномерном движении объектов для неизменных ракурсных углов и условий морского волнения наблюдается малая зависимость (в пределах статистического разброса) ширины полос усредненных спектров от скорости хода судов. Исключение составляют малые суда, для которых увеличение скорости хода от 2 до 6 узлов приводит к небольшому расширению спектра (порядка 10 %). При маневрировании объектов на интервалах времени, соизмеримых со временем формирования усредненных спектров, спектры «разваливаются» вдоль частотной оси и деформация огибающей спектров приобретает случайный характер.

Описанные свойства экспериментальных спектров характерны для всех классов объектов.

Анализ свойств экспериментальных доплеровских спектров сигналов, характеризующих межклассовые и структурные свойства объектов, приводит к ряду важных и принципиальных выводов, которые могут быть проиллюстрированы на следующих примерах.

На рис. 1 приведены нормированные усредненные спектры сигналов, полученные на длине волны $\lambda = 3,2$ см и $\lambda = 35$ см от объектов классов 1 и 3 в одном диапазоне дальности (9 км), а на рис. 2 – от объекта класса 3 для двух диапазонов дальности (5 и 9 км) на длине волны $\lambda = 3,2$ см при одинаковых ракурсах ($\gamma = 180^\circ$).

Нормирование спектров, приведенных на рис. 1 и 2, как и на всех последующих рисунках, производилось по двум параметрам – амплитуде и доплеровской частоте. Как показал анализ, со-

отношение ширин спектров двух классов объектов сохраняется практически неизменным в приведенных диапазонах длин волн РЛС ($\lambda = 3,2 \dots 35$ см) и это свойство является общим для всех пар классов объектов при одинаковых γ и условиях морского волнения во всех исследованных диапазонах длин волн.

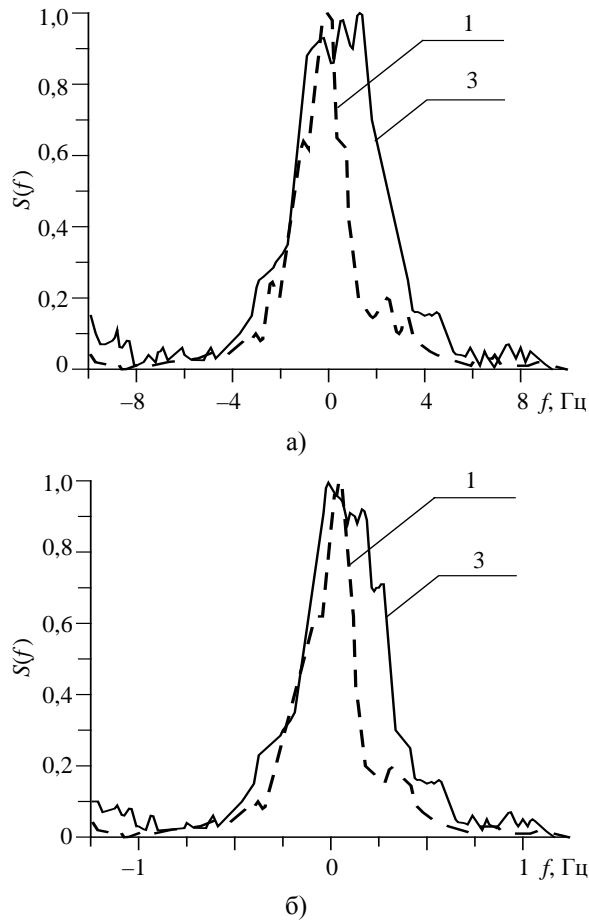


Рис. 1. Спектры сигналов, рассеянных надводными судами 1 и 3 классов: а) – $\lambda = 3,2$ см; б) – $\lambda = 35$ см

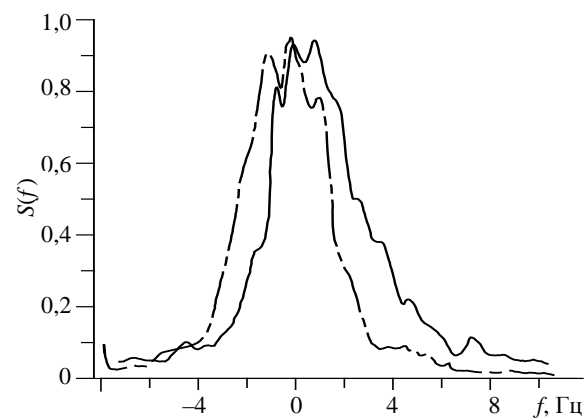


Рис. 2. Спектры сигналов, рассеянных надводными судами 3 класса на дальности 5 и 9 км (пунктир – 5 км, сплошная линия – 9 км)

На рис. 2 приведены графики, которые иллюстрируют независимость ширины спектра от дальности при одинаковых условиях морского волнения, что подтверждается анализом аналогичных спектров всех исследованных классов объектов.

Важным является установленный факт наличия в форме огибающей экспериментальных спектров пространственной информации об объекте. На рис. 3 приведены текущие спектры сигналов одного и того же объекта (класс 1), полученные на одной и той же дальности (7 км) в одинаковых условиях морского волнения (2 балла), но при ракурсных углах γ , отличающихся на 180° (рис. 3, а – $\gamma = 180^\circ$, рис. 3, б – 0°). Сопоставление спектров показывает характерные отличия в их огибающей, наиболее вероятной причиной которых могут быть видимые под определенным ракурсом различия в архитектуре объекта при различных ракурсах.

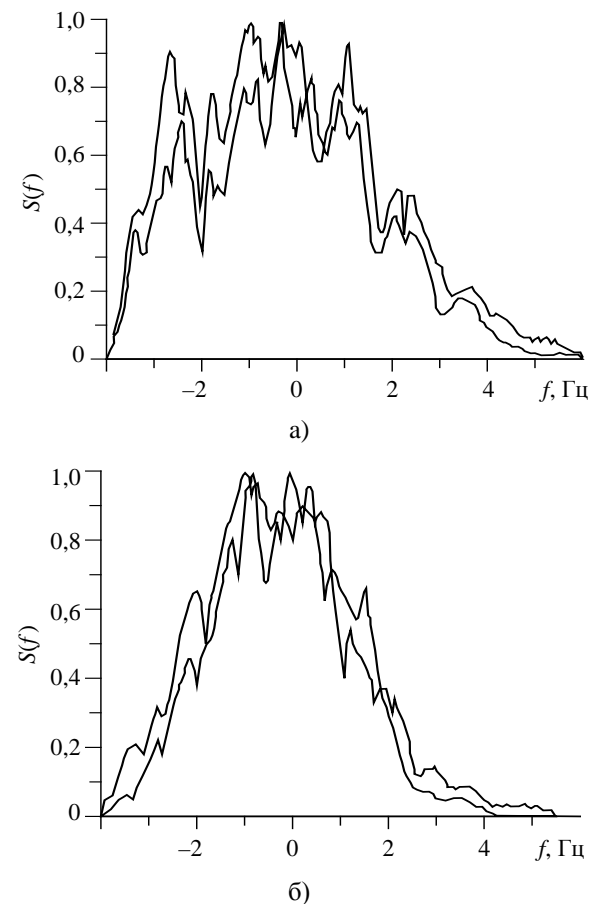


Рис. 3. Текущие спектры сигналов от надводного объекта класса 1 на дальности 7 км

С целью оценки разделительных свойств ширины доплеровских спектров сигналов от объектов различных классов для двух диапазонов волн РЛС $\lambda = 3,2$ см и $\lambda = 35$ см из всех серий прове-

денных экспериментов были отобраны записи сигналов, отраженных от объектов, движущихся под радиальными ракурсными углами при одинаковых условиях морского волнения (1,5...2 балла). Плотности распределения вероятностей ширин полос полученных спектров сигналов для всех классов объектов были аппроксимированы гауссовыми законами с параметрами-оценками средних значений и дисперсий, рассчитанными по выборкам значений ширин полос текущих спектров сигналов каждого класса в соответствующих радиолокационных диапазонах. Полученные распределения, построенные для некоторых классов объектов в указанных радиолокационных диапазонах, приведены на рис. 4.

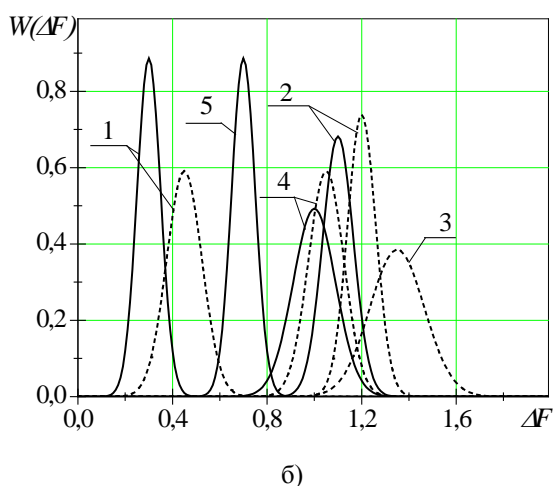
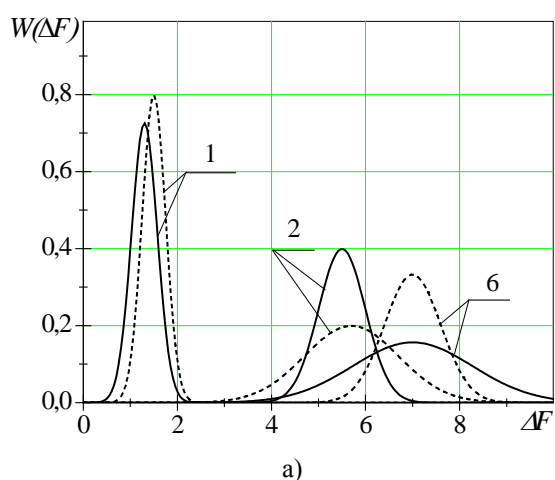


Рис. 4. Плотности распределения ширин спектров: а) – $\lambda = 3,2$ см; б) – $\lambda = 35$ см, 1–6 – классы объектов; сплошные линии соответствуют распределениям при значениях ракурсных углов $\gamma = 0^\circ$, пунктирные – $\gamma = 180^\circ$

Как можно видеть из приведенных графиков распределений, средние значения ширин полос спектров сигналов от исследуемых объектов в обоих диапазонах длин волн практически не перекрываются, однако существенный разброс их

величин не гарантирует эффективного распознавания объектов по ширине полосы спектра, поскольку параметры законов распределений, как показал анализ экспериментальных данных, в значительной степени зависят от условий морского волнения.

Как было показано [7], нормирование ширин полос спектров приводит к инвариантизации по отношению к амплитудам и частотам качки, величины которых в значительной степени определяются условиями морского волнения. В то же время структурная информация, содержащаяся в нормированных спектрах, тоже может быть искажена за счет изменения условий приема сигналов при увеличении дальности до объекта и за счет рысканья объекта, характер которого различен для объектов разных классов. Изменения условий приема сигналов при увеличении дальности до объекта могут происходить за счет трассовых шумов, вызванных переотражением радиоволн взволнованной морской поверхностью, степень влияния которых с увеличением дальности может возрастать при относительном уменьшении уровня полезного сигнала. Такие изменения вызовут усиление флуктуаций принятого сигнала и, как следствие, искажение формы огибающей спектров. Помимо этого с увеличением расстояния до объекта в пределах радиогоризонта возможно затенение волнами конструкций объекта, расположенных на малых высотах, – корпуса и нижних надпалубных надстроек.

Изменение характера рысканья при сильном волнении может приводить к изменению характера качки (скатывания судна с волны и т. д.), что приведет к появлению существенно нестационарных свойств спектра.

Оценка влияния этих факторов на характер искажений структурной информации была произведена путем анализа пространственных портретов кораблей, полученных из усредненных нормированных доплеровских спектров сигналов.

Понятие пространственного портрета корабля в первую очередь необходимо для визуализации пространственной структуры кораблей различных классов, что особенно важно при синтезе модели корабля с использованием физического моделирования, осуществляемого путем подбора в качестве ЛЦР совокупности простых тел с известными характеристиками рассеяния. В этом случае желательно представление образа корабля не в виде доплеровского спектра, а в виде распределения интенсивностей ЛЦР вдоль высотной оси корабля.

Как показано [7], мощность сигнала i -го ЛЦР, распределенная в полосе ΔF_i , пропорциональна $\Delta S_i^2 \Delta F_i$, где ΔS_i – усредненное значение амплитуд спектральных составляющих ус-

редненного спектра i -го ЛЦР. Поскольку мощность сигнала i -го ЛЦР пропорциональна u_i^2 , где u_i – амплитуда сигнала от i -го ЛЦР, тогда $\Delta S_i = \frac{u_i}{\sqrt{\Delta F_i}}$, а

выражение для спектра от N ЛЦР можно записать как

$$S(f) = \sum_{i=1}^N \frac{u_i}{\sqrt{\Delta F_i}}. \quad (1)$$

Ширина полосы ΔF_i зависит от ряда параметров, характеризующих качку: амплитуд и частот ($\alpha_{0Б}$, $\alpha_{0К}$, Ω_K , Ω_B) бортовой и килевой качек, курсового угла γ , высоты расположения h_i ЛЦР и длины волны зондирующего сигнала λ .

$$\Delta F_i = \frac{8\pi h_i}{\lambda} \left(\alpha_{0К} \Omega_K \cos \gamma + \frac{4\pi h_i}{\lambda} \alpha_{0Б} \Omega_B \cos \gamma \right). \quad (2)$$

Нормируя спектр $S(f)$ и ширину полосы ΔF_i , например, на соответствующие максимальные значения S_{\max} и ΔF_{\max} , получим

$$S_{kn}(f) = \frac{S_k(f)}{S_{\max}} = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{u_i}{\sqrt{\Delta F_i}}}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i}{\sqrt{\Delta F_i}}} = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{u_i}{\sqrt{h_i}}}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i}{\sqrt{h_i}}}, \quad (3)$$

$$\Delta F_n = \frac{\Delta F_i}{\Delta F_{\max}} = \frac{h_i}{h_{\max}}. \quad (4)$$

Как видно из (3) и (4), нормированный по ординате и ширине полосы спектр является функцией, которая определяется только структурными свойствами объекта, характеризуемыми u_i и h_i .

Путем несложных математически преобразований из (3) и (4) можно получить зависимость u_i от h_i , или от $\frac{h_i}{h_{\max}}$, что в дальнейшем будем называть пространственным портретом корабля.

На рис. 5 приведены пространственные портреты кораблей класса 2 на дальностях 4 и 18 км при ракурсном угле $\gamma = 0^\circ$ и волнении 2 балла.

На этом рисунке сплошная линия соответствует дальности 4 км, пунктирная – 18 км, соответственно. Каждый из представленных портретов получен из усредненных текущих спектров (усреднение проводилось по 10 реализациям суммарной длительностью 400 с).

Как можно видеть из приведенных пространственных портретов, наибольшие искажения в структуре проявляются в областях спектров, соответствующих нижней части судна (левее точки a), и в областях, соответствующих конструкциям надстроек, располагающихся на больших высотах (правее точки b). В промежуточной об-

ласти высот, между точками a и b , искажения не очень велики, хотя в этой области сохраняются неизменными вдоль оси высот положения точек максимумов и минимумов огибающих пространственных портретов.

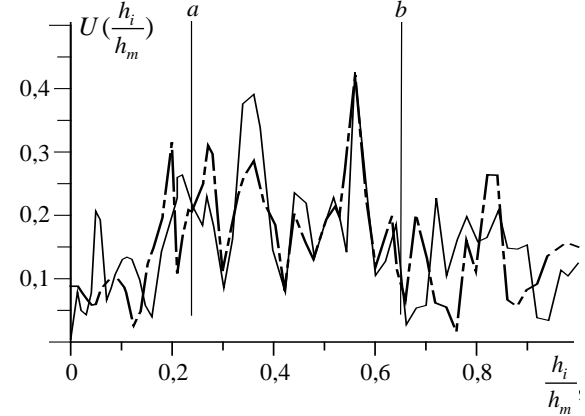


Рис. 5 Пространственные портреты корабля на различных дальностях

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что наиболее вероятной причиной искажения пространственных портретов является совокупность двух факторов – частичного затенения на больших дальностях нижней части объекта и негативное влияние на полезный сигнал шумов трассы.

Влияние условий морского волнения на информативность пространственных портретов иллюстрирует рис. 6, на котором представлены портреты, полученные в диапазоне $\lambda = 3,2$ см для объектов класса 1 при $\gamma = 0^\circ$ на дальности 17 км при существенно отличающихся условиях морского волнения (сплошная линия – волнение 1 балл, пунктирная – 4–4,5 балла).

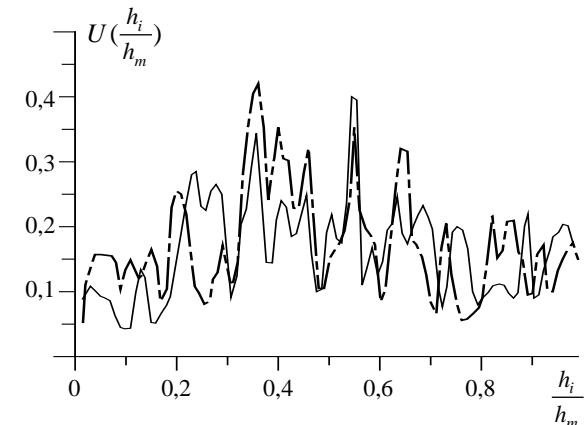


Рис. 6 Пространственные портреты корабля при различном волнении

Можно видеть, что и в этом случае изменения информативности происходит за счет более сильных искажений частей пространственного

портрета, соответствующих минимальным и максимальным высотам объекта, а в средней части искажения менее существенны.

Выводы. Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

– ширины спектров сигналов от исследуемых объектов в диапазонах длин волн $\lambda = 3,2$ см и $\lambda = 35$ см несут в себе информацию о технических параметрах кораблей, в частности, степень расширения спектров каждого из классов объектов коррелирует с величинами, обратными значениям величин водоизмещения объекта;

– пространственные портреты кораблей, полученные из усредненных нормированных доплеровских спектров сигналов, позволяют выявлять особенности их пространственной структуры, а именно распределение интенсивностей ЛЦР вдоль высотной оси корабля.

Автор благодарит сотрудников Института радиопрофики и электроники НАН Украины С. М. Зотова и С. И. Хоменко за активное участие в проведении натурных измерений и обработке данных.

Библиографический список

1. *Островитянов Р. В.* Статистическая теория радиолокации протяженных объектов / Р. В. Островитянов, Ф. А. Басалов. – М.: Радио и связь, 1982. – 232 с.
2. *Атаянц Э. К.* Статистическая модель групповой цели / Э. К. Атаянц, С. Н. Кириллов // Тр. Рязанского радиотехн. ин-та. – 1975. – Вып. 63. – С. 3–5.
3. *Mohanty N. C.* Modeling Radar Reflections from Randomly Moving Scatterers / N. C. Mohanty // Proc. IEEE. – 1978. – 66, № 1. – С. 86–88.

4. *Казаков Е. Л.* Статистическая модель радиолокационной цели в сантиметровом диапазоне волн с учетом поляризационных свойств цели на многих частотах / Е. Л. Казаков // Радиотехника. – 1976. – 31, № 4. – С. 1–4.
5. *Горелик А. Л.* Методы распознавания / А. Л. Горелик. – М.: Высш. школа, 1977. – 222 с.
6. *Обнаружение и распознавание объектов радиолокации* / под ред. А. В. Соколова. – М.: Радиотехника, 2007. – 176 с. – (Сер. «Радиолокация»).
7. *Математическая модель радиолокационного образа корабля на морском волнении* / В. Н. Горобец, В. Г. Гутник, С. М. Зотов и др. // Радиофизика и электрон. – 2011. – 2(16), № 4. – С. 60–65.

Рукопись поступила 23.05.2012.

V. N. Gorobets

THE DOPPLER SPECTRA OF MICROWAVE BACKSCATTERING BY SHIPS

New experimental results on the problem of microwave backscattering by ships, mainly in terms of Doppler spectra are considered. It is shown that the shape of the envelope of the spectra carries information about the spatial structure of the ship.

Key words: surface objects, radar signals, spectra.

В. М. Горобець

ДОПЛЕРІВСЬКІ СПЕКТРИ ВУЗЬКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ, ВІДБИТИХ КОРАБЛЯМИ РІЗНИХ КЛАСІВ

Приведено результати експериментальних досліджень зворотного розсіювання радіохвиль від кораблів. Основну увагу приділено аналізу доплерівських спектрів сигналів, відбитих від кораблів. Показано, що форма обвідної спектра несе в собі інформацію про просторову структуру корабля.

Ключові слова: надводні об'єкти, радіолокаційні сигнали, спектри.