

УДК 621.391

КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕОТРАЖЕНИЙ ОТ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АВТОСОПРОВОЖДЕНИИ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ ПОД КРУТЫМИ УГЛАМИ ВИЗИРОВАНИЯ

О. В. Свешников,

канд. техн. наук, доцент

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

Рассматриваются особенности пеленгации кораблей и других объектов, в том числе выполненных по глубокой технологии «Stealth», пеленгуемых под большими углами места. За счет переотражений от морской поверхности отраженный радиолокационный сигнал объекта подвергается дополнительной амплитудно-фазовой модуляции, значительно увеличивая дисперсию флуктуаций эхо-сигнала. Предложен алгоритм компенсации влияния переотражения для улучшения точности автосопровождения надводного объекта по угловым координатам и дистанции.

Ключевые слова — глубокая технология «Stealth», угловой шум, низкочастотная модуляция, локальный отражатель, фантомные рассеиватели, автокаталитическая реакция.

Архитектура современных объектов, выполненных по глубокой технологии «Stealth», формируется с учетом минимизации энергии эхо-сигнала на всем множестве углов видимости объекта в верхней полусфере [1–3]. В этих условиях необходимо учитывать более слабые поля, формируемые за счет взаимодействия пространственно удаленных вторичных рассеивателей. Вторичные поля этих рассеивателей могут оказаться корреляционно связанными, а эхо-сигнал может подвергаться дополнительной трансформации, аналогичной автокаталитической (АК) реакции. Реакции подобного типа лежат в основе структурно неустойчивых систем в химии и биологии, например реакция Белоусова. В результате эхо-сигнал подвергается дополнительной низкочастотной модуляции. Параметры модуляции зависят как от архитектуры, так и от условий облучения объекта.

Главной особенностью пеленгования объекта под большим углом места является резкое увеличение числа N фантомных рассеивателей, отраженных от морской поверхности, например [1, 4] $N_{|0,3^\circ} = 50$ и $N_{|30^\circ} = 365$, и размеров «светящейся» дорожки длиной $L_{x|0,3^\circ} = 800$ м и $L_{x|30^\circ} = 300$ м и шириной $L_{z|0,3^\circ} = 50$ м и $L_{z|30^\circ} = 125$ м при волнении моря $v = 3$ балла. Морская поверхность

представляется множеством фацет, расположенных на гребнях волн в соответствии с характером волнения. Фацеты вращаются и поступательно перемещаются. В каждый момент времени для определенной группы фацет выполняются условия отражения, формирующие вторичное поле. Профиль волны представим

$$h(t) = A(t)\sin(w(t)t + \varphi(t)),$$

где A , w , φ — медленно меняющиеся функции времени [1]. Наклон фацеты определяется положением местной нормали φ и связан с глубиной погружения h фантома-антипода. В формировании сигнала принимает участие группа волн с разными высотами. Фаза отраженного сигнала определяется высотой волны и движением фацеты в вертикальной плоскости $L = \Delta L + h't = \Delta L + \varphi t$.

При малых наклонах фацеты $\varphi = 0$ начальная фаза фантомных сигналов в основном формируется за счет распределения высот волн. При определении смещения расстояния ΔL распространения эхо-сигнала необходимо учесть воздействие на него трех случайных факторов:

1) флуктуаций ординаты волнения по пространству

$$L_1 = N(h, D_h); \quad (1)$$

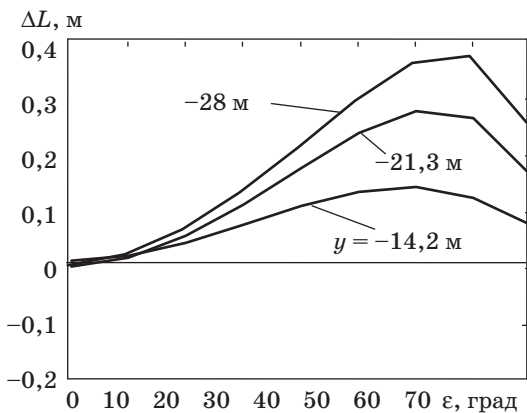
2) изменения ординаты волнения на наклонно-ориентированных фацетах L_2 ;

3) изменения фазы сигнала за счет движения наклонно-ориентированных фацет L_3 .

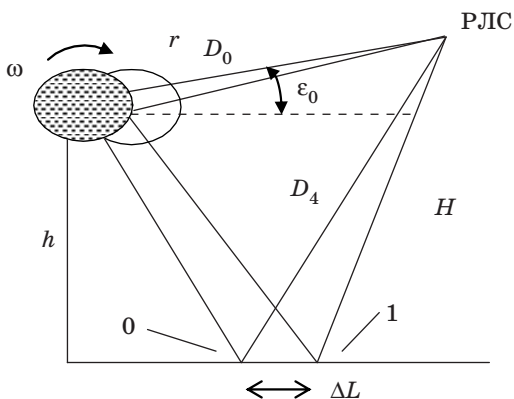
Относительное увеличение дистанции распространения радиоволн, однократно отраженных от морской поверхности, из-за перемещений фацет, при разных углах визирования (места) ε и глубине погружения антипода Y (отражатель расположен на высоте $h = 15$ м) показано на рис. 1. Например, если объект наблюдается под углом 40° и фантомный отражатель находится на глубине 28 м, то при перемещении фацеты на 1 м длина трассы увеличивается на 0,2 м.

Влияние этих процессов на изменение фазы сигнала различно, например: флуктуации L_1 зависят от размеров «светящейся» дорожки, L_2 и L_3 — от угла места и наклона фацеты φ .

В качестве примера отражения от локального отражателя (ЛЮ) рассмотрим отражение от шара, находящегося на высоте h над поверхностью моря (рис. 2). Радиолокационная станция РЛС находится на высоте H . Истинное расстояние шара до РЛС равно D_0 . За счет отражения от морской поверхности измеряемая дистанция



■ Рис. 1. Относительное увеличение длины трассы ΔL как функции угла ε и координат фантома y



■ Рис. 2. Отражение от шара

$$D_4 = D_0 + 2hH/D_0 + \Delta L,$$

где $2hH/D_0$ — увеличение расстояния из-за глубины погружения фантома; ΔL — увеличение расстояния из-за движения морской волны.

В момент времени t точка отражения находится на расстоянии $D_1^{(0)}$, за время $t + \tau$ (τ — доли секунды) фацета сместится в точку $D_1^{(1)}$, и в ней будут выполнены условия отражения. Анализ геометрических соотношений рис. 2 позволяет найти расстояние L_2 как функцию перемещения фацеты:

$$\varepsilon_0 < 45^\circ : L_2 = v_1 \varepsilon_0 \varphi \tau = v_1 \varepsilon_0^2 \tau h / H; \quad (2a)$$

$$\varepsilon_0 > 45^\circ : L_2 = v_1 \varepsilon_0^{-2} \varphi \tau = v_1 \varepsilon_0^{-1} \tau h / H. \quad (2b)$$

Движение фацет в вертикальной плоскости определяет

$$L_3 = 2v_b \varepsilon_0 \tau = 2\varphi \varepsilon_0 \tau = 2\varepsilon_0^2 \tau h / H. \quad (3)$$

Анализ формул показывает сильную зависимость приращения ΔL от положения наблюдателя. При малых углах места влияние движущейся поверхности моря на характеристики сигнала ослаблено из-за малости угла ε_0 и тем фактом, что отраженный от объекта сигнал в основном формируется горизонтально ориентированными фацетами.

За время τ расстояние D_0 изменится на $h\omega\tau$ (ω — угловая скорость вращения шара), а фаза сигнала изменится на $\frac{2\pi}{\lambda}h\omega\tau$. Скорость движе-

ния волны определяет набег фазы морской компоненты сигнала. Этот же набег фазы будет иметь ЛЮ, если объект дополнительно будет вращаться с угловой скоростью $\omega_\varphi = \frac{v_1 \varepsilon_0^2}{H}$, где v_1 — скорость

волны, а море является неподвижным. Также необходимо учитывать кратность рассеяния радиоволн от моря [1]. При определении временных характеристик важно учитывать линейную зависимость ω и скорость изменения v_r расстояния ЛЮ—РЛС, а также то, что v_1 является случайной величиной, что определяет случайный характер L_i .

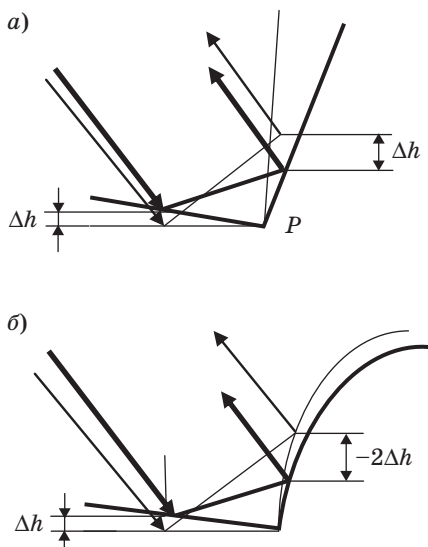
Отражение от протяженного объекта является суперпозицией сигналов групп ЛЮ [5]. В этом случае возможно когерентное суммирование полей источников с разными координатами. Пространственные координаты ЛЮ определяют временную частоту ω_i :

$$\omega_i = \omega + k\varphi_i \eta_{\varphi_i},$$

где k — коэффициент пропорциональности; φ_i — средний наклон фацет (2), (3); η_{φ_i} — координаты

фантома. В общем случае частоты ω_i разных фантомов близки, поэтому при сложении их полей происходят биения с низкой разностной частотой. Дополнительная модуляция фазы морской компоненты эхо-сигнала происходит на фацетах, находящихся на краях «светящейся» дорожки. При положительных значениях угла качки объекта когерентно взаимодействуют эхо-сигналы на одном краю дорожки, а при отрицательных — на другом. В результате резко увеличивается флуктуация углового шума.

Подобные низкочастотные модуляции эхо-сигнала наблюдаются и при пеленговании объекта, выполненного по глубокой технологии «S». При ее реализации используется компромиссное решение — часть поверхностей объекта первого рода заменяется на поверхности второго рода [2, 3]. Этим достигается эффект уменьшения эффективной площади рассеяния (ЭПР) на всем множестве углов видимости. В результате замены поверхностей формируются пространственные образования, фазовый центр отражения (используется метод стационарной фазы) движется в противоположном направлении, чем центр исходной поверхности. Отражение от подобных образований отличается от отражения углового отражателя. Эквивалентом уголка является эквивалентная плоскость, а эквивалентом нового образования — изотропный рассеиватель (эллипсоид). В этом случае когерентно взаимодействуют пространственно удаленные ЛО и появляется фантомный ЛО вблизи центра объекта. При отражении от углового отражателя центр отражения смещен на Δh (рис. 3, а); отражение от сложной поверхности смещено на $-\Delta h$ (рис. 3, б). Такое же смещение имеет и противоположно располо-



■ Рис. 3. Отражение от уголка (а) и составного уголка плоскость — эллипсоид (б)

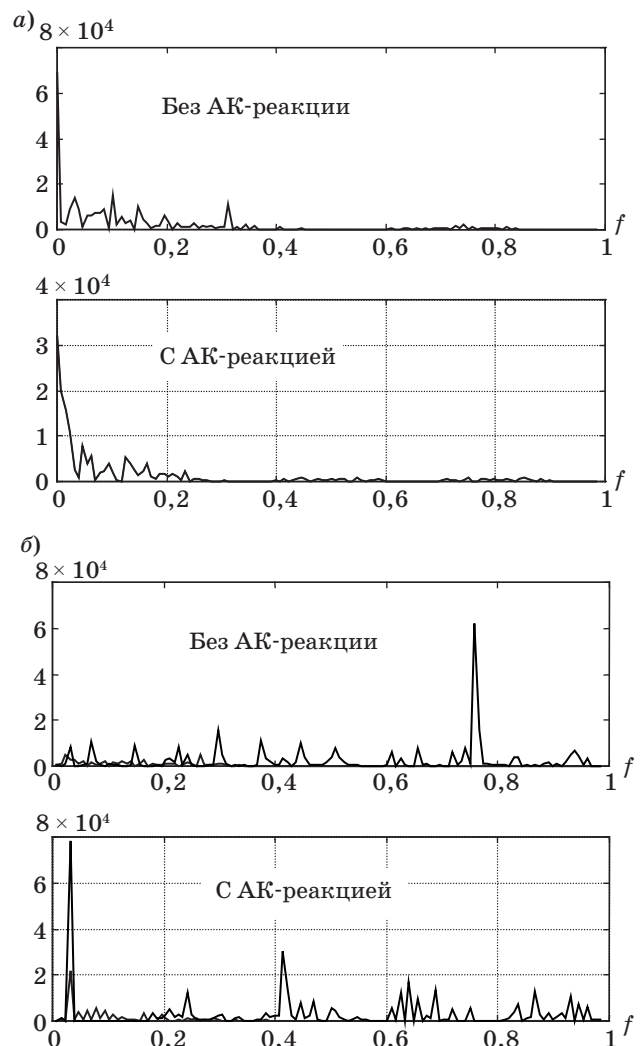
женный ЛО. Как результат их взаимодействия наблюдается дополнительная амплитудно-фазовая модуляция поля рассеяния.

Формально эти типы рассеяния доминируют при замираниях эхо-сигнала, однако уровень сигнала не является достаточным признаком при пеленгации объектов, выполненных по глубокой технологии «S». В этом случае необходимо разработать алгоритм выделения и подавления участков со сложным типом модуляции.

Спектральные характеристики эхо-сигнала получены на математической модели [6, 7] (рис. 4, а, б). Угловая скорость вращения объекта $\omega = 2\pi$ рад/с.

Спектры флуктуаций углового шума (УШ) практически неразличимы. Спектры флуктуаций ЭПР объекта узкополосные, но положение максимума ЭПР априорно неизвестно, что делает невозможным различение процессов.

Поскольку эффект проявляется в дополнительной низкочастотной амплитудной модуля-



■ Рис. 4. Спектр флуктуаций УШ (а) и ЭПР (б)

ции эхо-сигнала, оценим флуктуации амплитуды углового шума $x(t) = A(t)\cos(\varphi(t))$.

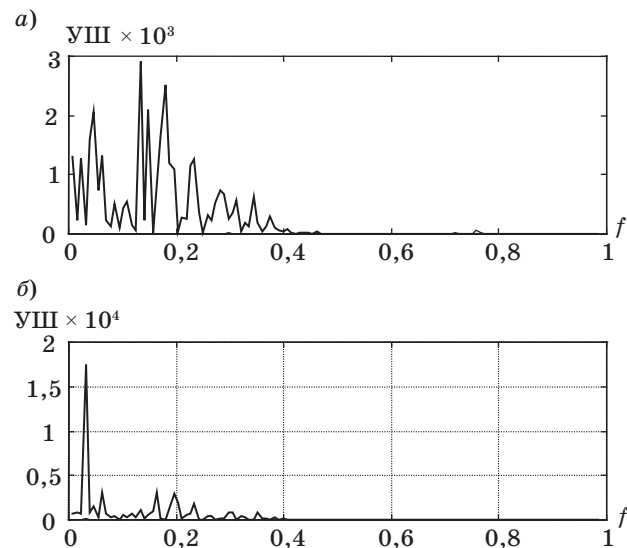
Используя свойство независимости случайного процесса и его производной, выделяем значения координат УШ в точках, где производная процесса равна нулю. Спектр последовательности амплитуд $x(t_i) = A(t_i)$ в отсутствие АК-реакции и при АК-реакции показан на рис. 5.

Спектр флуктуаций УШ в отсутствие АК-реакции широкополосный из-за амплитудно-фазовой модуляции вторичного поля рассеяния независимыми случайными процессами [8].

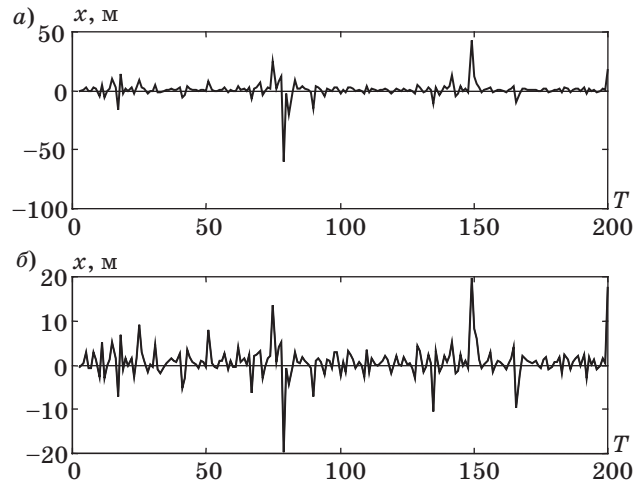
Спектр флуктуаций УШ при АК-реакции узкополосный из-за когерентного взаимодействия ЛО с близкими доплеровскими частотами.

Производится обработка текущего спектра окном длительностью $T_{ок}$. Определяются квантили K порядка 0,1 и 0,5. Так как положение максимума спектра неизвестно, используется относительная оценка интегральной суммы $x = (K_{0,5} - K_{0,1}) / K_{0,5}$. Значение x существует в пределах от 0 до 1. Предлагается установить пороговое значение $x_{пор} = 0,5$. При этом если $x < x_{пор} = 0,5$, АК-реакция есть, иначе ($0,5 < x < 1$) АК-реакция отсутствует.

Подавление АК-реакции производится путем умножения исходного процесса на нестационарный множитель. Параметр α определяется максимальным значением $A(t_i)$: $\alpha = \ln(A(t_i))$, значения $\cos(\omega_0 t)$ определяются отношением переменной части флуктуаций ЭПР к текущему среднему значению. Дополнительно учитывается, что резкое увеличение флуктуаций УШ происходит при замираниях сигнала, поэтому подавление осуществляется при значениях сигнала, меньших среднего. Результат подавления АК-реакции показан на рис. 6, а, б.



■ Рис. 5. Спектры амплитуд УШ в отсутствие (а) и с АК-реакцией (б)

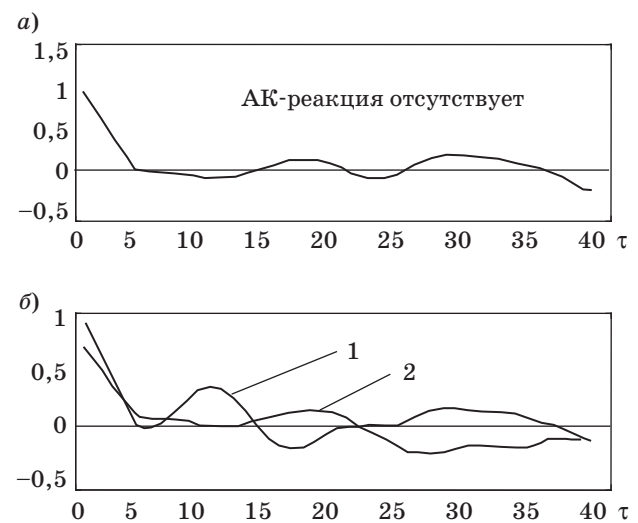


■ Рис. 6. Компенсация дополнительной амплитудной модуляции УШ: а — есть АК-реакция; б — АК-реакция подавлена

Эффективность алгоритма подавления оценивается изменением автокорреляционной функции. Автокорреляционная функция флуктуаций УШ в отсутствие АК-реакции показана на рис. 7, а. Влияние АК-реакции приводит к дополнительной модуляции (рис. 7, б, кривая 1), результат подавления — кривая 2. Автокорреляционные функции в отсутствие АК-реакции и с учетом ее подавления практически совпадают.

В результате подавления АК-реакции точность измерения повышается, так как традиционный измеритель становится оптимальным для данного типа отражений [8].

Таким образом, расширение видов объектов радиолокационного наблюдения и условий наблюдения за ними (мониторинг при крутых углах



■ Рис. 7. Функции автокорреляции случайных процессов: а — АК-реакция отсутствует; б — АК-реакция подавлена

визирования) приводит к необходимости учитывать дополнительные особенности формирования эхо-сигналов. В результате подавления паразитной модуляции эхо-сигнала, вызванной переот-

ражением фона, традиционная структура контура сопровождения объекта по угловым координатам и дистанции не изменяется и точность автосопровождения объекта не ухудшается.

Литература

1. Штагер Е. А. Отражение радиоволн от кораблей и других морских объектов. — СПб.: СПбГУ, 2004. — 418 с.
2. Свешников О. В. Особенности радиолокационного пеленгования кораблей, построенных по технологии «Stealth»: Юбилейный сб. СПб.: БГТУ, 2007. С. 46–52.
3. Жаркой М. Ф., Свешников О. В. Кризис технологии «Stealth» и возможные пути его преодоления: Сб. науч. тр. / НИЦ. РВиА. СПб., 2008. С. 67–70.
4. Свешников О. В. Повышение точности автосопровождения морских объектов, наблюдаемых под большими углами визирования // НТК, посвященная Дню радио: Тез. докл. / СПбЭУ «ЛЭТИ». СПб., 1997. С. 64.
5. Свешников О. В., Свешников В. В. Оценка нестационарной составляющей эхо-сигнала протяженного объекта сложной формы // Радиолокационное исследование природных сред: Тез. докл. XXIV Всерос. симп. СПб., 2006. С. 294.
6. Свешников О. В. Особенности пеленгования объектов, выполненных по глубокой технологии «Stealth» // Вестник БГТУ. 2008. Вып. 2. С. 60–64.
7. Смирнов В. В., Николаев С. В. Пассивные помехи. — СПб.: БГТУ, 2008. — 400 с.
8. Шелухин О. И. Радиосистемы ближнего действия. — М.: Радио и связь, 1987. — 240 с.

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (80x@mail.ru).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несет рекламодатели.