

УДК 621.391, 621.384.3

## АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ РЕВЕРБЕРАЦИЙ НА ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ДНА В ГИДРОЛОКАТОРЕ С СИНТЕЗОМ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ

С.Р. ГЕЙСТЕР, ЧАН ТАЙ ЧОНГ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 17 июля 2014

Рассматривается модель реверберации в приложении к синтезу апертуры антенны в гидролокаторе. Путем математического моделирования с использованием модели реверберационного пространства выполняется оценка воздействия реверберации на качество формирования изображения дна в гидролокаторах с синтезом апертуры антенны.

*Ключевые слова:* гидролокатор, математическая модель реверберации, синтез апертуры антенны.

### Введение

При разработке гидролокаторов мониторинга морского дна наряду с обеспечением высокой разрешающей способности на большой дальности особое внимание необходимо уделять и обеспечению высокой контрастности изображения, то есть обеспечению высокого отношения сигнал/помеха в элементе разрешения.

В основе наиболее распространенного способа получения гидролокационных изображений дна лежит использование физических антенн с большими акустическими размерами, обеспечивающими малые размеры главного лепестка диаграммы направленности антенны (ДНА). Однако особенностью гидроакустических антенн является высокий уровень боковых лепестков ДНА, имеющий значение  $(-20...-10$  дБ). Эта особенность проявляется в приеме реверберационных помех по боковым лепесткам ДНА [1, 2], приводящих к снижению контрастности и, соответственно, качества изображения. В гидролокаторах (ГЛ), использующих этот способ, отсутствует междупериодное когерентное накопление.

В движущемся ГЛ с синтезом апертуры антенны (САА) защита от реверберационных помех осуществляется естественным образом в ходе когерентного междупериодного накопления полезных сигналов, соответствующих отражениям от центров анализируемых элементов 3-мерного пространства. Междупериодное когерентное накопление в ходе движения гидролокатора (ГЛ) осуществляется на длительном интервале (единицы секунд) в соответствии с индивидуальными законами изменения фаз полезных сигналов [3], которые отличаются от законов изменения фаз помеховых сигналов ревербераций [4, 5].

Оценка воздействия ревербераций на формирование изображения в ГЛ может быть проведена путем математического моделирования. Моделирование воздействия ревербераций на ГЛ с большой физической апертурой не имеет сложностей, однако в приложении к САА такое моделирование требует разработки отдельной модели ревербераций.

### Математическая модель ревербераций в гидролокаторе с САА

*Статья I.* В прямоугольной системе координат  $X, Y, Z$  зона обзора, в которой будет формироваться изображение, разбивается на трехмерные блоки, соответствующие одному интервалу САА. Произвольный разрешаемый объем в блоке обозначим номером  $(j, g, h)$ ,

причем  $j = \overline{1; N_x}$ ,  $g = \overline{1; N_y}$ ,  $h = \overline{1; N_z}$ , где  $N_x, N_y, N_z$  – количество элементов разрешения в блоке по соответствующим осям координат.

Полагаем, что САА выполняется за время  $T_{SAA}$  при движении ГЛ со скоростью  $V_N$  параллельно координате  $X$  (см. рис. 1) в интервале  $[x_{j_a, g_a, h_a} - x_0; x_{j_a, g_a, h_a} + x_0]$ . Модель ревербераций рассмотрим на основе сигналов от отражателя в точке  $P$ , находящейся в центре  $(j_a, g_a, h_a)$ -го разрешаемого объема с координатами  $(x_{j_a, g_a, h_a}, y_{j_a, g_a, h_a}, z_{j_a, g_a, h_a})$ . При этом переменная  $x_0 = V_N T_{SAA} / 2$  представляет собой половину пространственного интервала САА, а количество зондирующих сигналов (ЗС), формируемых в ГЛ с периодом повторения  $T_r$  за время САА, составляет  $N_T = T_{SAA} / T_r$ .

Задержка  $t_z(j_a, g_a, h_a)$  сигнала, отраженного от мешающего отражателя в точке  $P$ , соответствует задержке от центра  $(j_a, g_a, h_a)$ -го разрешаемого объема.

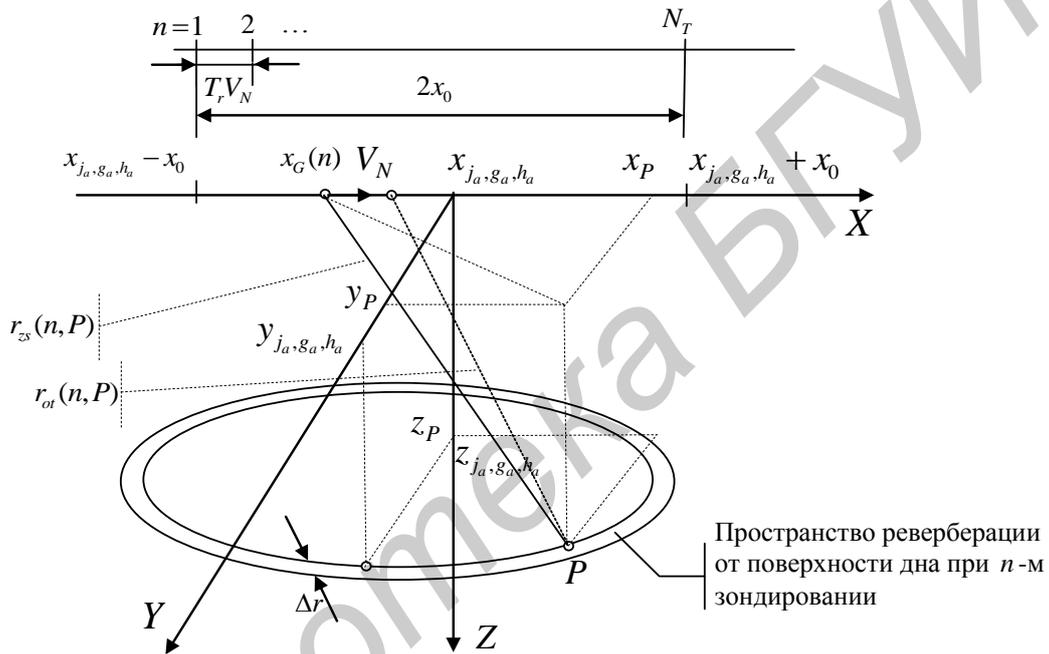


Рис. 1. Пояснение к определению пространства реверберации в  $n$ -ом зондировании

В момент излучения  $n$ -го ЗС фазовый центр антенны ГЛ находится в точке с координатой  $x_G(n) = (x_{j_a, g_a, h_a} - x_0 + (n-1)V_N T_r)$ , а расстояние между ГЛ и точкой  $P$  описывается выражением:

$$r_{zs}(n, P) = \sqrt{z_P^2 + y_P^2 + (x_{j_a, g_a, h_a} - x_0 + (n-1)V_N T_r - x_P)^2}. \quad (1)$$

Соответствующий этому зондированию сигнал будет принят через интервал времени  $t_z(n, j_a, g_a, h_a)$ . Расстояние между ГЛ и точкой  $P$  в момент приема описывается выражением:

$$r_{ot}(n, P) = \sqrt{z_P^2 + y_P^2 + (x_{j_a, g_a, h_a} - x_0 + (n-1)V_N T_r + V_N t_z(n, j_a, g_a, h_a) - x_P)^2}. \quad (2)$$

На основе выражений (1) и (2), а также равенства  $r_{zs}(n, P) + r_{ot}(n, P) = c_v t_z(n, j_a, g_a, h_a)$ , получим уравнение, описывающее ближнюю границу пространства, на которой находятся отражатели, для которых отраженные сигналы в  $n$ -ом зондировании имеют одинаковую задержку  $t_z(n, j_a, g_a, h_a)$ :

$$\left(1 - \left(\frac{V_N}{c_v}\right)^2\right) \left(x_{j_a, g_a, h_a} - x_0 + (n-1)V_N T_r - x\right)^2 + y^2 + z^2 - \left(\frac{V_N (c_v^2 - V_N^2) t_z(n, j_a, g_a, h_a)}{c_v^2}\right) \times$$

$$\times \left(x_{j_a, g_a, h_a} - x_0 + (n-1)V_N T_r - x\right) - \left(\frac{(c_v^2 - V_N^2)}{2c_v}\right)^2 (t_z(n, j_a, g_a, h_a))^2 = 0, \quad (3)$$

где  $c_v$  — скорость распространения акустической волны в воде.

Таким образом, сигнал ревербераций в ходе  $n$ -го зондирования является суммой сигналов, отраженных от всех отражателей, находящихся в объеме, ограниченном двумя поверхностями, вне главного лепестка. Граница ближайшей поверхности описывается выражением (3), а граница второй сдвинута на величину разрешающей способности по дальности  $\Delta r$ .

### Сопоставительный анализ влияния ревербераций на качество формирования изображения дна в типовом ГЛ и в ГЛ с САА

Сопоставительный анализ проведен путем математического моделирования для типового ГЛ, в котором высокое разрешение обеспечивается за счет узкой диаграммы направленности антенны (ДНА) с большой физической апертурой, и для ГЛ с САА при одинаковых значениях длины волны и ширины спектра ЗС. Основное требование к обоим ГЛ — одинаковые линейные размеры разрешающих способностей по азимуту на дальности анализа  $r_a$  в ГЛ с большой физической апертурой  $\Delta L_{Ph} = 2r_a \sin\left(\frac{\Delta\beta_{Ph}}{2}\right)$  при ширине ДНА  $\Delta\beta_{Ph}$  и в ГЛ с САА  $\Delta L_{CAA} = 2r_a \sin\left(\frac{\Delta\beta_{CAA}}{2}\right)$  при ширине ДНА  $\Delta\beta_{CAA}$ , т.е.  $\Delta L_{Ph} = \Delta L_{CAA}$ .

Анализ проведен путем сопоставления гидролокационных изображений набора отражателей (см. рис. 2) при отсутствии и наличии ревербераций. Пространство анализа по азимуту ограничено значением  $\Delta\theta_{an} = 180$  град.

На первом этапе при отсутствии ревербераций формировались изображения 17 разрешаемых объемов, в центрах 5-ти из которых установлены отражатели с одинаковой эффективной отражающей поверхностью (ЭОП). Отражатели располагались на линии, параллельной по оси  $X$ , в разрешаемых объемах с номерами  $j = 3, 6, 9, 12$  и  $15$ .

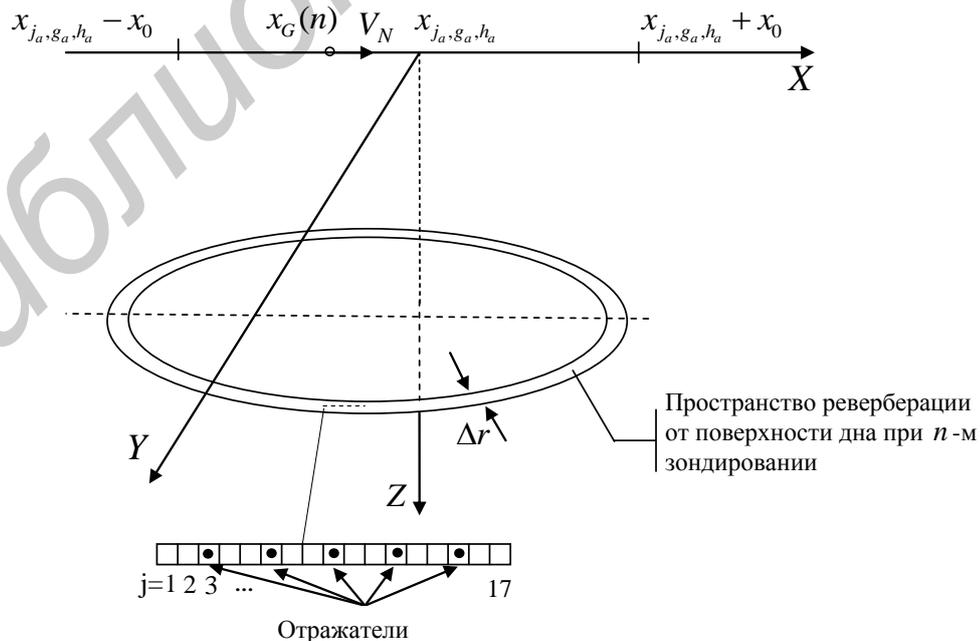


Рис. 2. Пояснение к расположению анализируемых объемов

На втором этапе анализировались изображения для набора тех же отражателей при наличии реверберации.

Для проведения объективной оценки влияния ревербераций шумы приемных устройств не моделировались. При моделировании использовались следующие параметры ГЛ:

– параметры ЗС: пиковая мощность  $P_0 = 1$  Вт, длительность импульса  $T_0 = 0,02$  с, несущая частота  $f_0 = 75$  кГц; закон модуляции ЗС – ЛЧМ с девиацией  $\Delta f_M = 3,75$  кГц; длина волны  $\lambda = 0,02$  м; период повторения импульсов  $T_r = 0,05$  с;

– коэффициенты усиления антенн на передачу и прием  $G_{Tr} = G_{Rc} = 50$ ;

– коэффициенты преобразования мощности электрического сигнала в мощность акустического поля и коэффициент преобразования мощности акустического поля в мощность электрического сигнала:  $K_{P-Tr} = 0,5$ ;  $K_{P-Rc} = 0,5$ ;

– уровень боковых лепестков диаграмм направленности физических антенн  $\eta = -15$  дБ;

– разрешающие способности по X, Y, Z:  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0,5$  м.

Дополнительные параметры для ГЛ с САА: скорость движения носителя ГЛ  $V_N = 5$  м/с, время САА  $T_{САА} = 6$  с и длина физической апертуры антенны  $l_A = 1$  м.

Отражатели, создававшие полезные сигналы и реверберации по боковым лепесткам ДНА, характеризовались следующими параметрами:

– первый разрешаемый объем имел координаты  $x_{1,1,1} = 20$  м;  $y_{1,1,1} = 600$  м,  $z_{1,1,1} = 1375$  м;

– ЭОП каждого из пяти отражателей, создававших полезные сигналы,  $\sigma_r = 0,5$  м<sup>2</sup>;

– ЭОП каждого отражателя, создававшего реверберации,  $\sigma_r = 0,1$  м<sup>2</sup>, а количество этих отражателей в секторе анализа  $N_{ot} = 1260$ .

Скорость распространения акустической волны в воде выбрана равной  $c_v = 1495$  м/с.

Для случая отсутствия ревербераций на рис. 3 представлены изображения 17-ти разрешаемых объемов. Изображения представлены в виде нормированных к максимальному значению квадратов модулей комплексных амплитуд, относящихся к 17 разрешаемым объемам и полученных на выходах устройств обработки двух сопоставляемых ГЛ: на рисунке 3а для ГЛ с большой физической апертурой и на рис. 3, б для ГЛ с САА. Результаты аналогичного моделирования при наличии ревербераций представлены на рис. 4.

Результаты моделирования показывают следующее:

– при отсутствии ревербераций в обоих ГЛ формируются четкие и контрастные изображения, на которых видны все 5 полезных отражателей;

– при наличии ревербераций изображение, полученное в ГЛ с САА, практически не изменилось – отчетливо видны все полезные отражатели, однако изображение, полученное в ГЛ с большой физической апертурой, не соответствует желаемому результату – полезные отражатели не наблюдаются с высокой контрастностью на фоне принятых ревербераций.

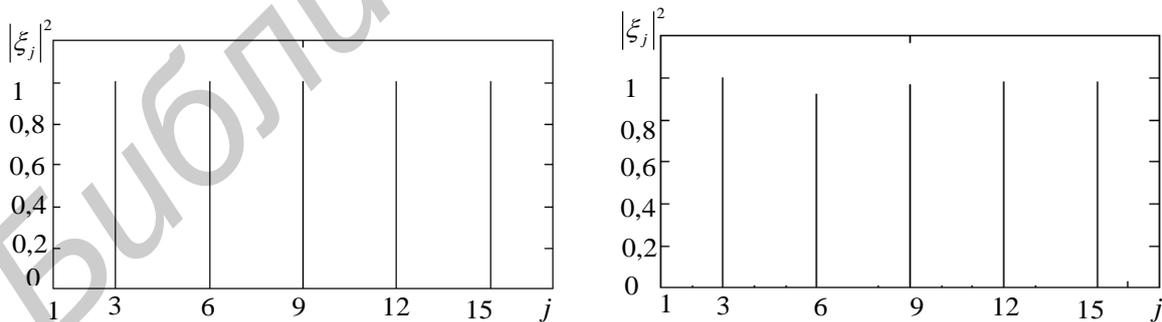


Рис. 3. Изображения на выходах устройств обработки при отсутствии реверберации:

а – в ГЛ с большой физической апертурой; б – в ГЛ с САА

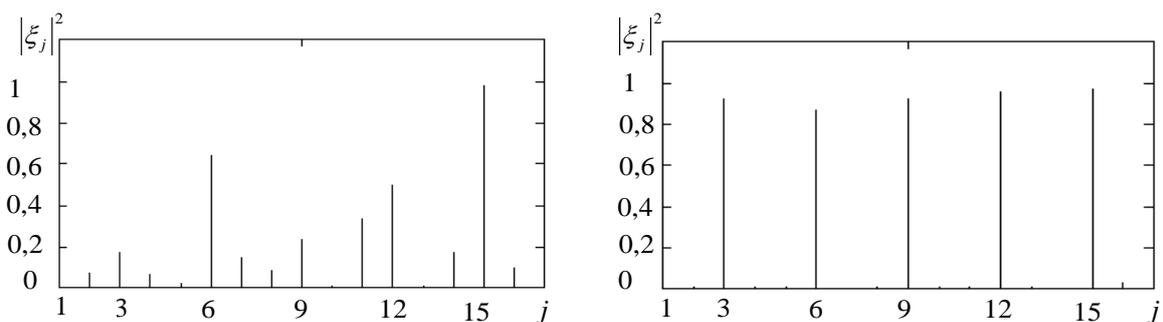


Рис. 4. Изображения на выходах устройств обработки при наличии ревербераций:  
*a* – в ГЛ с большой физической апертурой; *б* – в ГЛ с САА

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, реверберации негативно влияют на построение изображения поверхности дна в движущемся ГЛ с большой апертурой физической антенны, в котором не реализуется когерентное междупериодное накопление. Отсутствие когерентного накопления в движущемся ГЛ не позволяет выделить полезные сигналы на фоне сигналов ревербераций, что исключает получение в таком ГЛ изображений подводных объектов с низкой контрастностью относительно поверхности дна. Наиболее эффективно такие движущиеся ГЛ могут работать при отсутствии источников ревербераций, что гипотетически возможно при расположении ГЛ и наблюдаемых объектов на сравнительно большом удалении как от поверхности дна, так и от поверхности воды. Во-вторых, гидролокаторы с САА обладают наиболее высокой устойчивостью к воздействию ревербераций. Это обеспечивается использованием специального междупериодного накопления, позволяющего выполнить как сверхразрешение элементов поверхности дна, так и отделение полезных сигналов от сигналов ревербераций на основе учета индивидуальности законов изменения фаз полезных сигналов при движении ГЛ относительно анализируемой поверхности.

## ANALYSIS OF REVERBERATION EFFECT ON FORMATION OF SEABED IMAGE IN SYNTHETIC APERTURE SONAR

S.R. HEISTER, TRAN TAI TRONG

### Abstract

A model of reverberation in the synthetic aperture sonar is considered. A assessment of reverberation effect on quality formation of seabed image in synthetic aperture sonar is performed by mathematical simulation with model of reverberant space.

### Список литературы

1. *Ольшевский В.В.* Статистические свойства морской реверберации. М., 1966.
2. *Чан Тай Чонг.* // Матер. 49-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. Минск, 7 мая 2013. С. 26.
3. *Гейстер С.Р., Чан Тай Чонг.* // Докл. БГУИР. 2014. № 3 (81). С. 71–77.
4. *Чан Тай Чонг, Гейстер С.Р.* // Тез. докл. XI Белорусско-российская науч.-техн. конф «Технические средства защиты информации». Минск, 5–6 июня 2013 г. С. 27.
5. *Чан Тай Чонг.* // Матер. 50-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. Минск, 7 мая 2014 г. С. 10–11.