

УДК 621.391, 621.384.3

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ВРЕМЯ ЗАДЕРЖКИ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА ПРИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОМ СИНТЕЗЕ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ

С.Р. ГЕЙСТЕР, ЧАН ТАЙ ЧОНГ

Научно-исследовательский институт Вооруженных Сил Республики Беларусь
Калиновского 4, Минск 220103, Беларусь

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

Поступила в редакцию 29 января 2014

Рассматривается математическая модель временной структуры отражений в приложении к гидроакустическому синтезу апертуры антенны. Модель обеспечивает разработку алгоритмов прямого синтеза апертуры антенны, позволяющих получить изображение поверхности дна с высоким разрешением в условиях ревербераций. Приведены оценки времени задержки, фазового сдвига и доплеровской частоты для различных точек на поверхности дна.

Ключевые слова: гидроакустика, временная структура, синтез апертуры антенны.

Введение

Повышение качества изображения дна и предметов на нем основано на повышении разрешающих способностей и, в первую очередь, в азимутальной плоскости. Наиболее распространенные подходы к повышению разрешающей способности в азимутальной плоскости связаны с увеличением размеров антенны и уменьшением длины волны зондирующего сигнала. Однако на практике размеры гидроакустических антенн ограничены, а уменьшение длины волны сопровождается существенным затуханием акустических волн при распространении [1]. Поэтому отмеченные подходы обеспечивают получение изображения дна (объектов) с высоким разрешением лишь на малых расстояниях (глубинах), ограниченных значением 300–500 метров. Ограничение дальности действия является не единственной проблемой гидролокаторов (ГЛ) построения изображения дна. Другой проблемой является защита от ревербераций, принимаемых по боковым лепесткам диаграммы направленности гидроакустической антенны в ходе перемещения ГЛ. Заметим, что уровень боковых лепестков гидроакустических антенн велик ($-20...-10$ дБ) по сравнению с антеннами радиолокационного диапазона, что, соответственно, выводит проблему защиты от ревербераций в ГЛ построения изображения дна на первое место.

Обозначенные проблемы сравнительно успешно могут быть решены [2] в ГЛ с синтезом апертуры антенны (САА). Основой успешной разработки алгоритмов САА в ГЛ является математическая модель отраженного сигнала, учитывающая особенности распространения гидроакустических волн, излучаемых и принимаемых антенной движущегося ГЛ.

Модель зондирующего сигнала

В ГЛ с синтезом апертуры антенны, обеспечивающем повышение углового разрешения за счет формирования большой апертуры вдоль линии перемещения, возникает возможность использования сравнительно невысоких несущих частот (например, $f_0 = 75$ кГц). Это

позволяет увеличить дальность действия ГЛ благодаря снижению потерь на трассе распространения.

Кроме того, увеличение дальности действия ГЛ традиционно связано с увеличением длительности импульса T_0 зондирующего сигнала (ЗС), что в совокупности с необходимостью обеспечения требуемой разрешающей способности по радиальной дальности $\Delta r = c_v / 2\Delta f_0$ диктует применение сложных законов внутриимпульсной модуляции, где c_v – скорость распространения звука в воде, а Δf_0 – ширина спектра закона модуляции ЗС.

Заметим, что в рассматриваемых ГЛ построения изображения дна значение Δf_0 определяет не только разрешающую способность по дальности Δr , но и разрешающую способность по прямоугольной координате на горизонтальной поверхности дна (координата Y), перпендикулярной линии движения носителя ГЛ. Эта разрешающая способность поясняется рисунком и определяется выражением:

$$\Delta y = \frac{\Delta r}{\sin \varepsilon}. \quad (1)$$

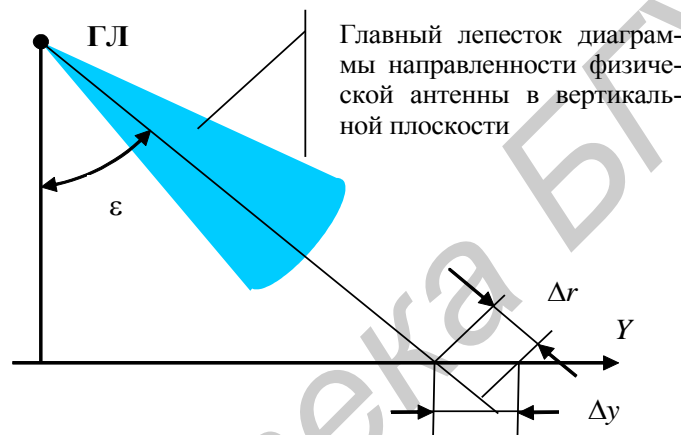


Рис. 1. Пояснения разрешающей способности

Размер синтезированной апертуры L_{SAA} напрямую определяется скоростью носителя ГЛ V_N и длительностью T_{KN} когерентной пачки сигналов, принятых в ходе синтеза апертуры, или временем синтеза апертуры антенны T_{SAA} :

$$L_{SAA} = V_N T_{SAA}. \quad (2)$$

Поэтому в ГЛ с САА необходимо использовать когерентные последовательности ЗС, временная модель которой на входе гидроакустической антенны описывается выражением

$$u_0(t) = \begin{cases} E_0 \sum_{n=1}^{N_T} U_0 [t - (n-1)T_r] e^{i(\omega_0 t + \varphi_0)}, & 0 \leq t \leq N_T T_r; \\ 0, & (t < 0) \vee (t > N_T T_r), \end{cases} \quad (3)$$

где E_0 , ω_0 , φ_0 – амплитуда, круговая частота и начальная фаза несущего колебания; $U_0(t)$ – закон модуляции одиночного ЗС; N_T – число одиночных ЗС в последовательности; T_r – период повторения ЗС.

Модель гидроакустического сигнала, отраженного от точечного объекта, при синтезе апертуры антенны

В основе сверхразрешения по азимуту (по прямоугольной координате, ориентированной вдоль линии перемещения ГЛ) при САА лежат различия в изменениях

радиальных дальностей элементов поверхности дна относительно фазового центра физической антенны движущегося ГЛ.

В приложении к САА зона обзора (зона построения изображения) разбивается на трехмерные блоки в прямоугольной системе координат X, Y, Z , причем ось OX ориентирована вдоль прямой линии перемещения фазового центра физической антенны ГЛ, а ось OZ ориентирована вертикально. В ходе интервала САА длительностью $T_{САА}$ строится один блок (см. рис. 2), имеющий размеры $X_{ОБЗ}, Y_{ОБЗ}, Z_{ОБЗ}$ и состоящий из разрешаемых объемов с размерами, соответствующими разрешающим способностям $\Delta x, \Delta y, \Delta z$. Количество элементов разрешения в блоке по соответствующим осям координат обозначим N_x, N_y, N_z . Произвольный разрешаемый объем в блоке обозначим номером (j, g, h) , причем $j = \overline{1; N_x}$, $g = \overline{1; N_y}$, $h = \overline{1; N_z}$. Носитель ГЛ перемещается прямолинейно со скоростью V_N , причем $x_N(t) = x_{0N} + V_N t$, а остальные его координаты неизменны ($y_N = 0, z_N = 0$).

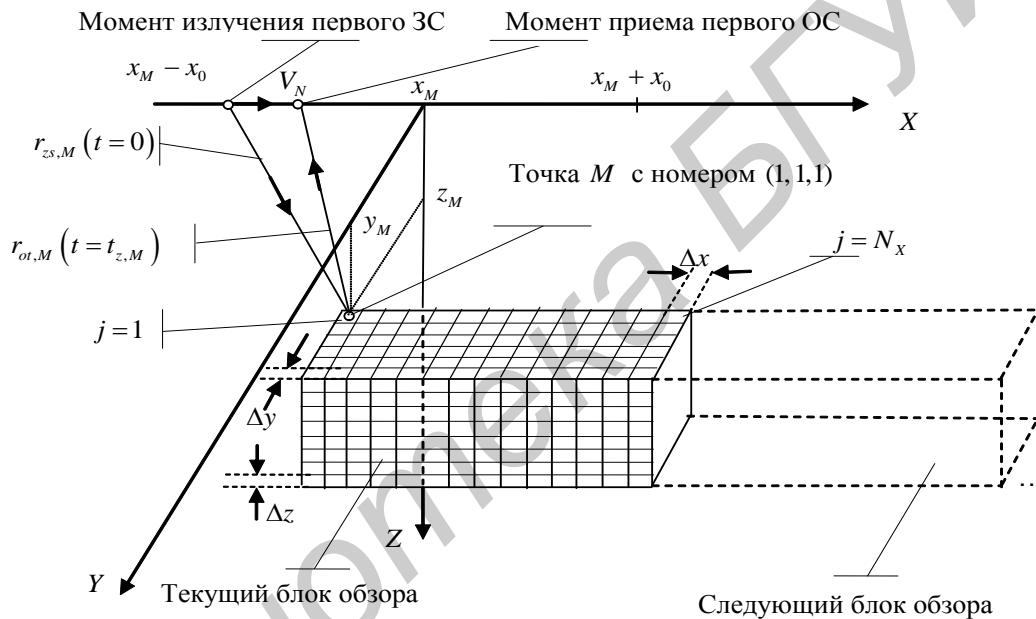


Рис. 2. Геометрическое представление САА в ГЛ

В качестве примера на рис. 2 обозначен разрешаемый объем с центром в точке M и номером $(1,1,1)$. Для этой точки САА выполняется при движении ГЛ в интервале $[x_M - x_0; x_M + x_0]$ по координате X с центром в точке с координатами (x_M, y_M, z_M) . Первый ЗС в начале САА для точки M излучается в момент времени $t=0$. При этом радиальное расстояние между ГЛ и точкой M равно $r_{zs,M}(t=0)$. Соответствующий отраженный сигнал проходит расстояние $r_{ot,M}(t=t_{z,M})$ от точки M до ГЛ и принимается в момент времени

$$t = t_{z,M} = \frac{r_{zs,M}(0) + r_{ot,M}(t_{z,M})}{c_v}.$$

Математическая модель сигнала, отраженного от (j, g, h) -го разрешаемого объема в текущем блоке обзора, описывается [3, 4] выражением:

$$u_{s,(j,g,h)}(t) = \sum_{n=1}^{N_r} E_{s,(j,g,h)}(t) U_0(t - t_{z,(j,g,h)}(t) - (n-1)T_r) e^{i[2\pi f_0(t - t_{z,(j,g,h)}(t) - (n-1)T_r) + \varphi_{0,(j,g,h)}]}, \quad (4)$$

где $t_{z,(j,g,h)}(t)$ – задержка сигнала, отраженного от (j, g, h) -го разрешаемого объема, относительно ЗС; n – номер периода повторения ЗС; $E_{s,(j,g,h)}$, $\Phi_{0,(j,g,h)}$ – амплитуда и случайная начальная фаза сигнала, отраженного от (j, g, h) -го разрешаемого объема.

При использовании ЗС с линейной частотной модуляцией в n -м зондировании задержанный закон модуляции в выражении (4) имеет вид:

$$U_0\left(t-t_{z,(j,g,h)}(t)-(n-1)T_r\right)=\begin{cases} \exp\left(i\frac{\pi\Delta f_m\left(t-t_{z,(j,g,h)}(t)-(n-1)T_r\right)^2}{T_0}\right), & 0\leq t-t_{z,(j,g,h)}(t)-(n-1)T_r\leq T_0, \\ 0, & \left(t-t_{z,(j,g,h)}(t)-(n-1)T_r < 0\right)\vee\left(t-t_{z,(j,g,h)}(t)-(n-1)T_r > T_0\right). \end{cases}$$

Определение времени задержки и фазового сдвига отраженного сигнала в каждом периоде зондирования

Носитель ГЛ движется прямолинейно со скоростью V_N , которая является вещественной положительной константой.

Вначале рассмотрим отражения от реперной точки M , находящейся в центре первого разрешаемого объема с номером $(1, 1, 1)$ в блоке (см. рис. 2). Будем полагать, что в момент начала САА переменная $t=0$, а фазовый центр антенны ГЛ находится в точке с координатой $x_G(0)=(x_M-x_0)$, где $x_0=\frac{V_N T_{SAA}}{2}$ – половина пространственного интервала САА. После начала САА в произвольный момент t , когда излучается ЗС, расстояние между ГЛ и точкой M описывается выражением

$$r_{zs,M}(t)=\sqrt{z_M^2+y_M^2+(x_G(t)-x_M)^2}. \quad (5)$$

Так как $x_G(t)=x_G(0)+V_N t$, а $x_G(0)=(x_M-x_0)$, выражение (5) преобразуется к виду

$$r_{zs,M}(t)=\sqrt{z_M^2+y_M^2+(-x_0+V_N t)^2}, \quad 0\leq t\leq T_{SAA}. \quad (6)$$

Установим, что произвольный по счету ЗС в последовательности излучен в момент времени t , когда ГЛ находился в точке $x_G(t)=(x_M-x_0+V_N t)$. Отраженный от точки M сигнал, соответствующий этому ЗС, будет принят через интервал времени $t_{z,M}(t)$ после момента начала излучения ЗС. Тогда соответствующее этому ЗС расстояние $r_{ot,M}(t)$, которое проходит отраженный сигнал от точки M до ГЛ, можно описать выражением:

$$r_{ot,M}(t)=\sqrt{z_M^2+y_M^2+(x_G(t)+V_N t_{z,M}(t)-x_M)^2}, \quad 0\leq t\leq T_{SAA}. \quad (7)$$

С учетом того, что $x_G(t)=(x_M-x_0+V_N t)$, выражение (7) преобразуется к виду

$$r_{ot,M}(t)=\sqrt{z_M^2+y_M^2+(-x_0+V_N t+V_N t_{z,M}(t))^2}, \quad 0\leq t\leq T_{SAA}. \quad (8)$$

Связь между радиальными расстояниями $r_{zs,M}(t)$, $r_{ot,M}(t)$ и временем запаздывания отраженного сигнала $t_{z,M}(t)$ от точки M относительно момента начала излучения ЗС определяется выражением:

$$r_{zs,M}(t)+r_{ot,M}(t)=c_v t_{z,M}(t). \quad (9)$$

С использованием (6), (8) и (9) получим выражение для искомой задержки $t_{z,M}(t)$

отраженного от точки M сигнала, соответствующей моменту t начала излучения ЗС:

$$t_{z,M}(t) = \frac{2}{c_v^2 - V_N^2} (c_v r_{zs,M}(t) + V_N^2 t) - \frac{2V_N x_0}{c_v^2 - V_N^2}, [\text{с}]. \quad (10)$$

Рассмотрим произвольный разрешаемый объем с номером (j, g, h) . Для (j, g, h) -го разрешаемого объема с координатами центра $(x_{(j,g,h)}, y_{(j,g,h)}, z_{(j,g,h)})$ САА выполняется при движении ГЛ в интервале $[x_{(j,g,h)} - x_0; x_{(j,g,h)} + x_0]$ по координате X . Выполним описание задержек сигналов относительно координат реперной точки M , что позволит уменьшить количество новых переменных. С учетом этого координаты центра (j, g, h) -го объема определяются в виде:

$$x_{(j,g,h)} = x_M + (j-1)\Delta x; \quad y_{(j,g,h)} = y_M + (g-1)\Delta y; \quad z_{(j,g,h)} = z_M + (h-1)\Delta z. \quad (11)$$

Расстояние между ГЛ и центром (j, g, h) -го объема в момент начала излучения произвольного ЗС описывается выражением:

$$r_{zs,(j,g,h)}(t) = \sqrt{z_{(j,g,h)}^2 + y_{(j,g,h)}^2 + (x_G(t) - x_{(j,g,h)})^2}. \quad (12)$$

Так как $x_G(t) = (x_M + (j-1)\Delta x - x_0 + V_N t)$, то выражение (11) с учетом (12) в интервале САА ($0 \leq t \leq T_{\text{САА}}$) можно представить в виде:

$$r_{zs,(j,g,h)}(t) = \sqrt{(z_M + (h-1)\Delta z)^2 + (y_M + (g-1)\Delta y)^2 + (-x_0 + V_N t)^2}, \quad 0 \leq t \leq T_{\text{САА}}.$$

Расстояние $r_{ot,(j,g,h)}(t)$ и задержка $t_{z,(j,g,h)}(t)$ описываются выражениями:

$$r_{ot,(j,g,h)}(t) = \sqrt{(z_M + (h-1)\Delta z)^2 + (y_M + (g-1)\Delta y)^2 + (V_N t + V_N t_{z,(j,g,h)}(t) - x_0)^2}, \quad 0 \leq t \leq T_{\text{САА}},$$

$$t_{z,(j,g,h)}(t) = \frac{2}{c_v^2 - V_N^2} (c_v r_{zs,(j,g,h)}(t) + V_N^2 t) - \frac{2V_N x_0}{c_v^2 - V_N^2}.$$

Выражение для фазового сдвига $\varphi_{(j,g,h)}(t) = \frac{2\pi}{\lambda} (r_{zs,(j,g,h)}(t) + r_{ot,(j,g,h)}(t))$, соответствующего задержке отраженного сигнала, для (j, g, h) -го объема при длине волны λ имеет вид

$$\varphi_{(j,g,h)}(t) = \frac{2\pi}{\lambda} c_v t_{z,(j,g,h)}(t) = \frac{4\pi c_v}{\lambda (c_v^2 - V_N^2)} \left[(c_v r_{zs,(j,g,h)}(t) + V_N^2 t) - V_N x_0 \right].$$

Соответствующее выражение для линейной доплеровской частоты

$$f_{d,(j,g,h)}(t) = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial \varphi_{(j,g,h)}(t)}{\partial t} \text{ имеет вид}$$

$$f_{d,(j,g,h)}(t) = \frac{2c_v}{\lambda (c_v^2 - V_N^2)} \left[c_v \frac{V_N (x_0 - V_N t)}{\sqrt{(z_M + (h-1)\Delta z)^2 + (y_M + (g-1)\Delta y)^2 + (V_N t - x_0)^2}} - V_N^2 \right].$$

На рис. 3 представлены законы изменения задержки, фазового сдвига и доплеровской частоты сигналов, отраженных от точки M , для следующих исходных условий: $\lambda = 0,02$ м, $V_N = 5$ м/с, $c_v = 1500$ м/с, $x_0 = 15$ м, $y_M = 600$ м, $z_M = 1375$ м, $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0,5$ м. На рис. 4 приведены графики временных зависимостей задержки и фазового сдвига для разрешаемых

объемов, у которых имеются различия только по координате X . Результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, характерные точки законов изменения времени задержки, фазового сдвига и доплеровской частоты отраженных сигналов сдвинуты относительно анализируемой точки. Это объясняется тем, что скорость распространения волн сопоставима со скоростью движения носителя ГЛ, и, соответственно, расстояния между фазовым центром антенны ГЛ и анализируемой точкой в момент передачи ЗС и приема отраженного сигнала неодинаковы. Во-вторых, закон изменения доплеровской частоты $f_{d(j,g,h)}(t)$ является нелинейным. В момент $t=0$ начала САА для (j,g,h) -го разрешаемого объема (ГЛ находится в точке $x_N = (x_{(j,g,h)} - x_0)$) доплеровская частота $f_{d(j,g,h)}(0)$ имеет наибольшее значение

$$f_{d(j,g,h)}(0) = f_{d\max(j,g,h)} = \frac{2c_v}{\lambda(c_v^2 - V_N^2)} \left[c_v \frac{V_N x_0}{\sqrt{(z_M + (h-1)\Delta z)^2 + (y_M + (g-1)\Delta y)^2 + (x_0)^2}} - V_N^2 \right]$$

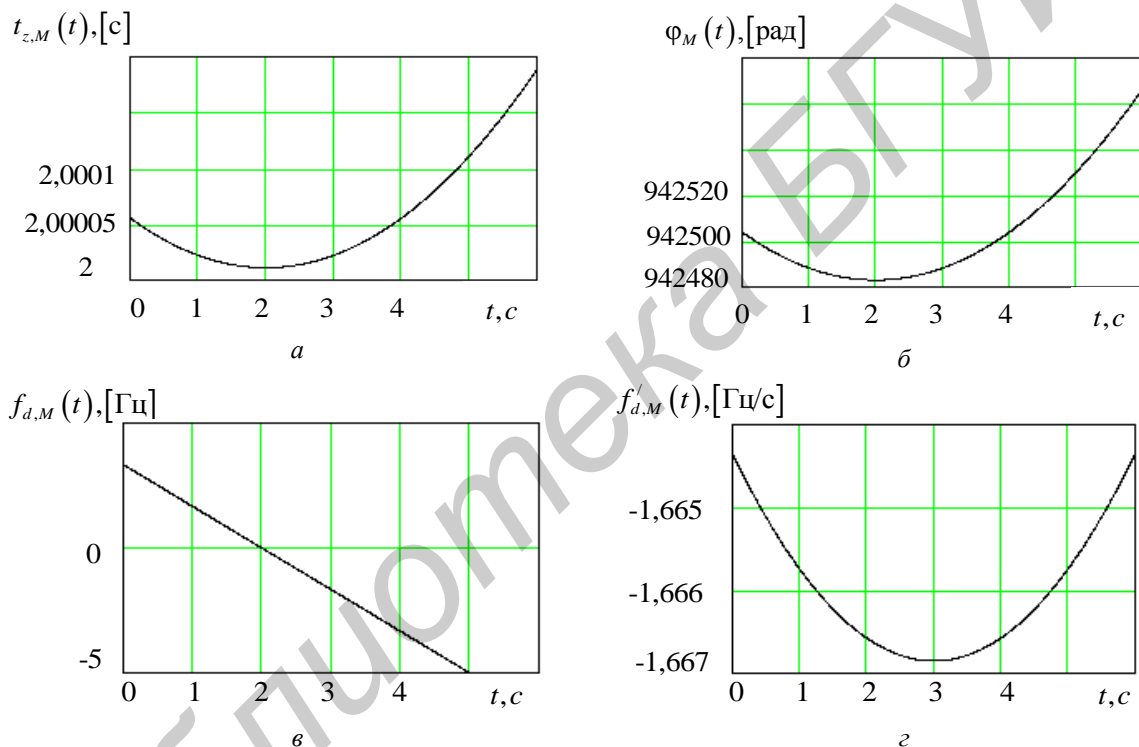


Рис. 3. Временные зависимости параметров отраженного сигнала для точки M : a – задержка; $б$ – фазовый сдвиг; $в$ – доплеровская частота; $г$ – первая производная доплеровской частоты

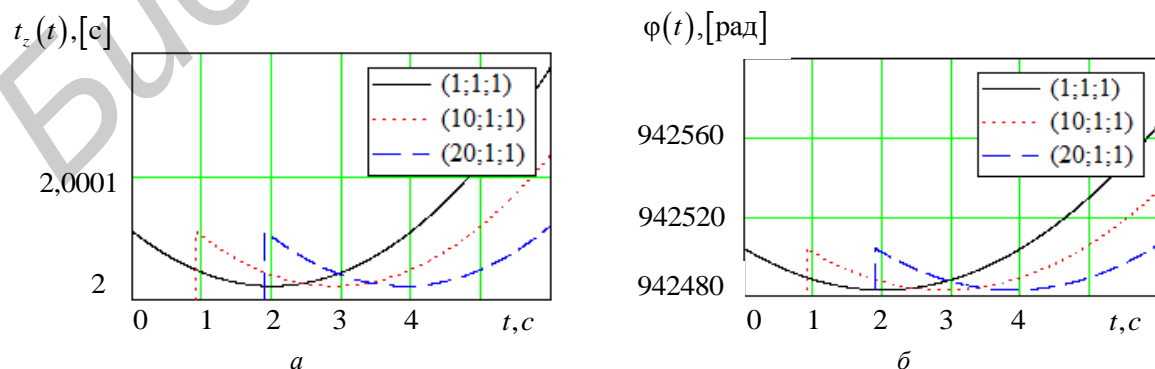


Рис. 4. Временные зависимости параметров отраженных сигналов для разрешаемых объемов с номерами $(1;1;1)$, $(10;1;1)$ и $(20;1;1)$: a – задержка; $б$ – фазовый сдвиг

Доплеровская частота отраженного сигнала в процессе САА убывает и принимает нулевое значение в момент времени $t = t_{\min}$, когда задержка $t_{z,(j,g,h)}(t)$ будет минимальной:

$$t_{z_{\min},(j,g,h)} = \frac{2}{c_v^2 - V_N^2} \left(c_v r_{zs,(j,g,h)}(t = t_{\min}) + V_N^2 t_{\min} \right) - \frac{2V_N x_0}{c_v^2 - V_N^2}.$$

Этот момент времени $t = t_{\min}$ описывается выражением:

$$t_{\min} = \frac{1}{V_N} \left[x_0 - \sqrt{\frac{V_N^4 \left((z_M + (h-1)\Delta z)^2 + (y_M + (g-1)\Delta y)^2 \right)}{c_v^2 V_N^2 - V_N^4}} \right].$$

Заключение

Отличия САА в гидролокации по сравнению с САА в радиолокации возникают из-за существенного снижения отношения скорости распространения используемой акустической волны к скорости движения носителя гидролокатора. Это привело в гидролокации к появлению существенных различий в расстояниях между фазовым центром антенны гидролокатора и анализируемой точкой в момент передачи зондирующего сигнала и в момент приема соответствующего отраженного сигнала. Выражение для суммарной задержки отраженного сигнала относительно момента зондирования позволило описать соответствующий нелинейно изменяющийся во времени фазовый сдвиг сигнала, отраженного от произвольного анализируемого разрешаемого объема. Полученное выражение для фазового сдвига является основой для разработки алгоритмов синтеза апертуры антенны, которые обеспечат построение изображения дна с высоким качеством на сравнительно больших дальностях (глубинах) при использовании относительно небольших значений длины волны и размера апертуры физической антенны.

MATHEMATICAL MODEL AND DELAY TIME OF REFLECTED SIGNAL IN SYNTHETIC APERTURE SONAR

S.R. HEISTER, TRAN TAI TRONG

Abstract

A mathematical model of time structure of the reflected signals in the synthetic aperture sonar is considered. The model provides the algorithm design of direct synthesis of antenna aperture, which allows to obtain high resolution image of seabed surface in reverberation conditions. The evaluation results of the delay time, the phase shift and the Doppler frequency for the different points of seabed surface are represented.

Список литературы

1. Гейстер С.Р., Чан Тай Чонг. // Докл. БГУИР. 2013. № 5 (75). С.72–78.
2. Золотарев В.В. // Подводные аппараты, робототехнические комплексы, их системы и технологии. 2007. № 1 (3). С. 21–26.
3. Чан Тай Чонг, Гейстер С.Р. // Матер. XVII междунар. науч.-тех. конф. «Современные средства связи». Минск, 16–18 октября 2012. С. 79.
4. Чан Тай Чонг, Гейстер С.Р. // Матер. XVII междунар. науч.-тех. конф. «Современные средства связи». Минск, 16–18 октября 2012. С. 80.