

О ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ДОПЛЕРОВСКОГО ЛАГА С АНТЕННОЙ НА ОСНОВЕ ФАЗИРОВАННОЙ РЕШЕТКИ

Приводятся результаты математического и физического моделирования характеристик направленности фазированных антенных решеток. Рассматривается механизм формирования одной из составляющих погрешности измерения скорости, связанный с полевыми характеристиками применяемых антенн. Дается оценка погрешности.

Введение

Гидроакустические лаги (ГАЛ) продолжают оставаться одним из основных средств навигации подводных объектов. Важнейшими характеристиками ГАЛ являются погрешность измерения скорости и диапазон рабочих глубин. Обеспечение необходимых показателей по точности в диапазоне рабочих глубин требует более детального рассмотрения причин и механизмов формирования составляющих результирующей погрешности. В зависимости от глубины и условий плавания доминируют различные составляющие погрешности измерения [1, 2]. Как известно, параметры гидроакустических антенн в значительной степени определяют структуру, алгоритмы функционирования и пользовательские характеристики лагов. Наряду с синфазными антеннами в гидроакустических лагах широкое применение нашли антенны на основе фазированных антенных решеток (ФАР) [1], что объясняется их преимуществом: меньшие габариты; не требуется обтекатель, так как антенна имеет плоскую форму и может размещаться заподлицо с корпусом судна; независимость доплеровской частоты от скорости звука.

Цель настоящей статьи – рассмотрение механизма формирования одной из составляющих погрешности измерения скорости ГАЛ, связанной с полевыми характеристиками применяемых антенн на основе фазированных антенных решеток, оценка погрешности измерения скорости и выработка рекомендаций по ее снижению.

Расчет характеристик направленности антенны

Важным требованием, предъявляемым к антеннам, является низкий уровень боковых лепестков и ореола. Для более полного анализа параметров ФАР были проведены расчеты, уточняющие полевые характеристики антенн. Моделированию подвергалась многоэлементная антенна, в которой для получения четырехлучевой характеристики направленности (ХН) типа Янус имеются две решетки. Структура и фазовое распределение антенны для формирования одной пары лучей представлены на рис. 1. Для удобства расчета ХН топология ФАР была дополнена до прямоугольной решетки элементами с амплитудами возбуждения, равными нулю [3]. Физически существующие элементы антенны охва-

Мартынюк Анатолий Петрович. Начальник комплексной научно-исследовательской лаборатории АО НИИ «RIF-ACVAAPARAT», г. Бельцы, Молдавия.

чены окружностью. Антенная решетка имеет периодическую структуру. В целях минимизации количества отводов элементы каждой ФАР объединены в четыре группы, на которые подаются возбуждающие сигналы с фазовым распределением -270° , -180° , -90° , 0° для прямого направления и 0° , -90° , -180° , -270° для противоположного направления в режиме приема.

Фазы возбуждения элементов ФАР в режиме излучения одинаковы в пределах каждой группы элементов и принимают значения: $-180, -180, 0, 0^\circ$.

Характеристика направленности прямоугольной решетки из N горизонтальных рядов и M вертикальных столбцов рассчитывается по формуле

$$R(\theta, \varphi) = \frac{2J_1 \left(\frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta \right)}{\frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta} \sum_{n=1}^{n=N} \sum_{m=1}^{m=M} A_{nm} e^{-j\psi_{nm}} e^{-jk[(n-1)d_x \sin \theta \cos \varphi + (m-1)d_y \sin \theta \sin \varphi]}, \quad (1)$$

где J_1 – цилиндрическая функция Бесселя первого порядка; D – диаметр элемента; λ – длина волны; A_{nm} – амплитуда возбуждения элемента с координатами n, m ; ψ_{nm} – фаза возбуждения элемента с координатами n, m ; k – волновое число; d_x, d_y – расстояния между центрами элементов в столбцах и рядах соответственно. В анализируемой антенне $d_x/\lambda = d_y/\lambda = 0,637$.

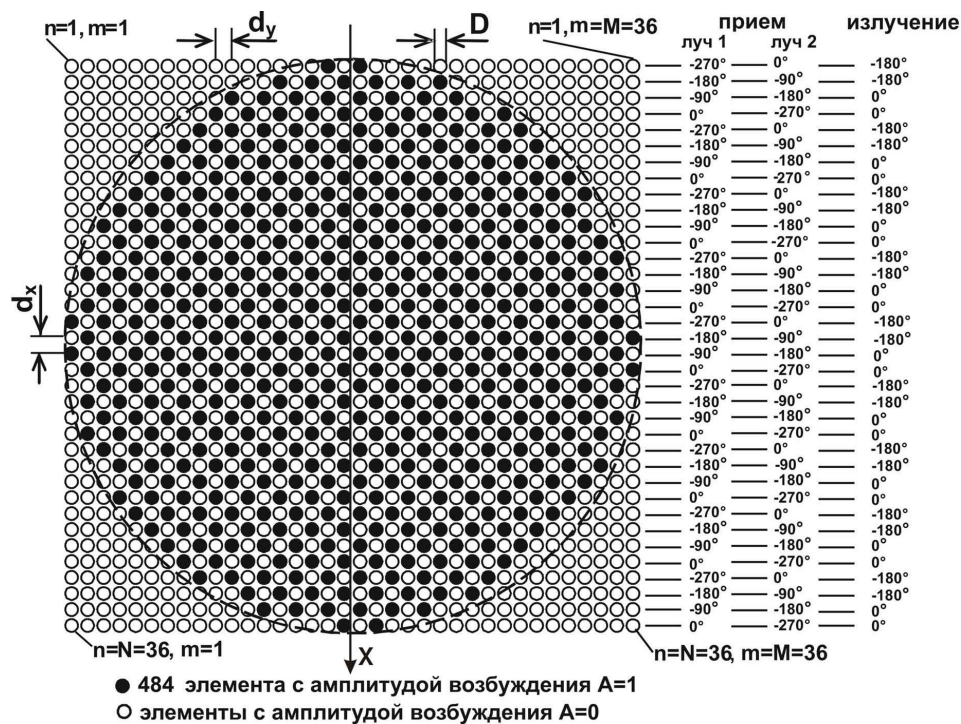


Рис. 1. Фазированная антенная решетка. Для каждого ряда элементов указаны фазы возбуждения в режиме приема и излучения

Типичные ХН в декартовой системе координат, где по оси абсцисс откладываются значения угла θ в угломестной плоскости, а по оси ординат значения ХН ФАР $R(\theta)$ представлены на рис. 2: *а*) расчетная ХН, пунктиром показана характеристика направленности одного круглого элемента; *б*) ХН, экспериментально снятая в плоскости основных максимумов для $\varphi=0^\circ$.

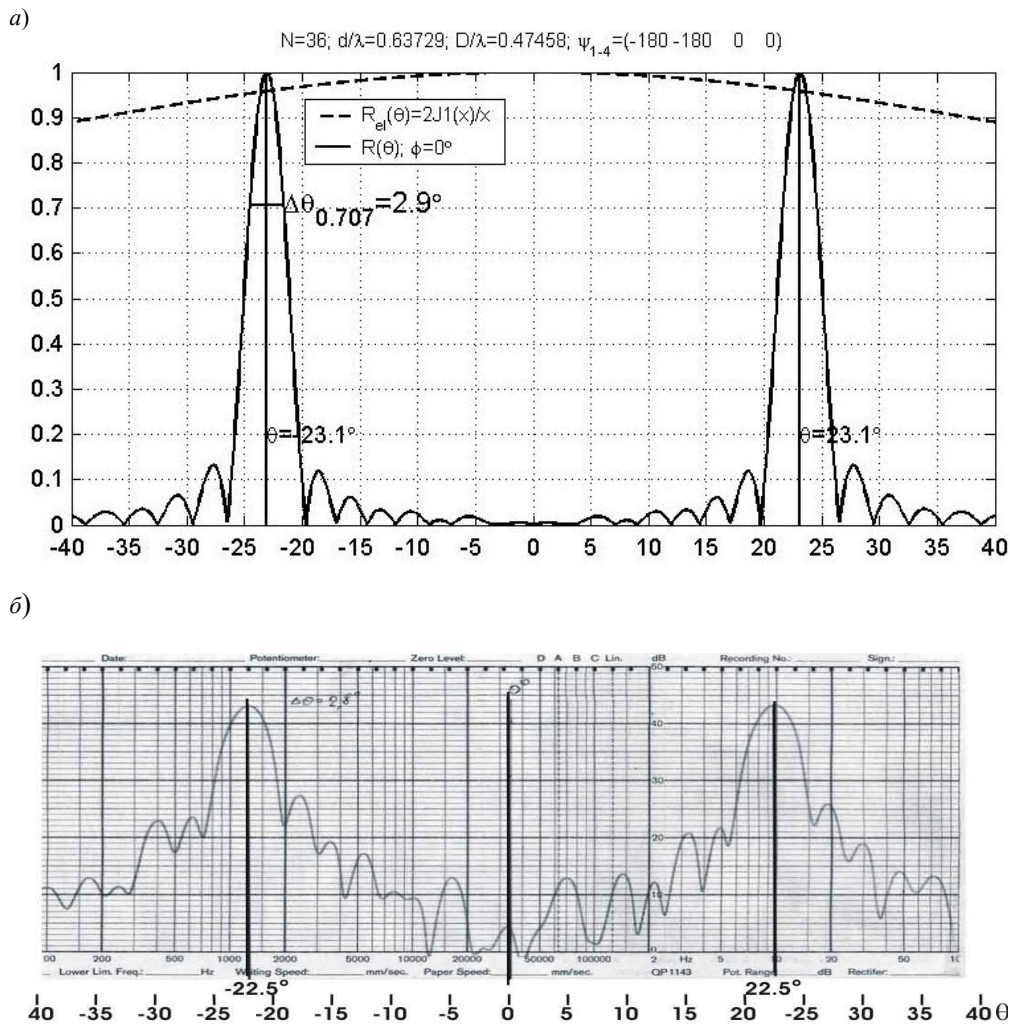


Рис. 2. Вид ХН в плоскости основных максимумов

Традиционно оценка уровня дополнительных максимумов (ДМ), уровня ореола ХН производится в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях, в которых лежат основные максимумы (ОМ) янусной ХН. Из рис. 2 а, б видно, что в таком случае уровень дополнительных максимумов не превышает -14 дБ. В данном случае расчет ХН одной ФАР с возбуждением сигналами с фазовым распределением и $0, -90, -180, -270^\circ$ производился во всем активном полупространстве.

Для получения трехмерных графиков ХН по оси X откладывались значения $\sin\theta\cos\varphi$, по оси Y откладывались значения $\sin\theta\sin\varphi$, по оси Z откладывались соответствующие нормированные значения характеристики направленности $R(\theta, \varphi)$. Результаты расчетов ХН для ОМ прямого направления одной ФАР представлены на рис. 3. Оценка ХН во всем активном полупространстве выявила наличие дополнительных максимумов в плоскостях под углом $\varphi = 63,43^\circ$ и $\varphi = -63,43^\circ$ к плоскости основного максимума и под углом $\theta = 61^\circ$ к нормали к активной поверхности антенны. Из рисунка видно, что уровень каждого ДМ составляет $0,8$ от ОМ.

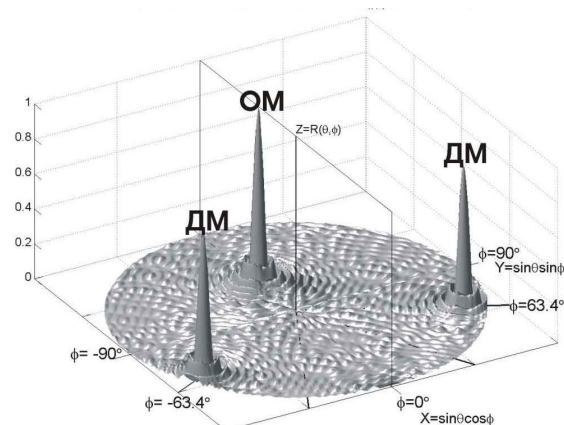


Рис. 3. РН для одного ОМ прямого направления одной ФАР

На рис. 4, а представлен результат расчета РН для двух лучей янусной РН, на рис. 4, б представлен результат расчета двух ФАР, формирующих характеристики направленности в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Из рис. 4, б видно, что помимо четырех лепестков ОМ антенна формирует еще восемь лепестков ДМ, каждый из которых по уровню составляет 0,8 от любого из основных максимумов.

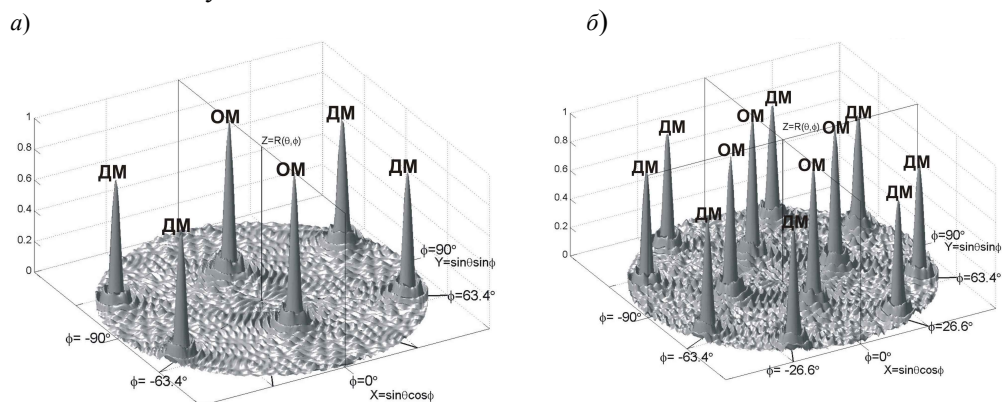


Рис. 4. РН одной ФАР (а) и РН двух ФАР (б) в режиме излучения

Экспериментально снятая РН реальной антенны в одной из плоскостей выявленных ДМ представлена на рис. 5.

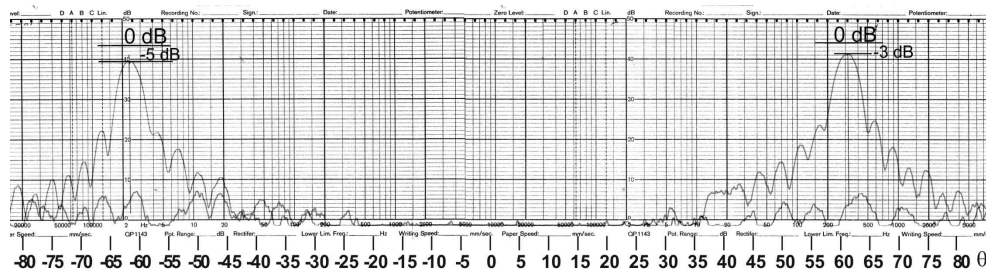


Рис. 5. Экспериментально снятая РН в одной из плоскостей выявленных ДМ

Наличие дополнительных максимумов в режиме излучения приводит к существенной потере акустической энергии. В направлении ДМ излучается, точнее сказать «утекает», большая часть акустической энергии, что уменьшает дальность действия лага, а их пространственная ориентация может являться причиной ухудшения акустической совместимости и снижения скрытности функционирования.

Нужно сказать, что без изменения структуры антенны и фазового распределения сигналов возбуждения антенны побороть проблему потери акустической энергии за счет ДМ не удастся.

Дополнительные максимумы в режиме приема ухудшают помехозащищенность, что в итоге приводит к повышению погрешности измерения скорости. Эти обстоятельства необходимо учитывать при построении аппаратуры и алгоритма функционирования гидроакустического лага.

Оценка погрешности измерения скорости за счет ДМ

Наличие ДМ в режиме приема может приводить к дополнительной погрешности в измерении скорости. Рассмотрим механизм ее формирования на примере лага с импульсным режимом излучения. При наклоне лучей ХН антенны время распространения сигнала, отсчитанное от излучения до приема, определяется как

$$t_p = \frac{2h}{c \cdot \cos(\theta \pm \alpha_k \pm \psi)}, \quad (2)$$

где h – расстояние до дна; c – скорость звука в воде; θ – угол наклона к нормали; α_k – угол качки (крен, дифферент); ψ – угол наклона грунта.

В современных лагах в основном используется импульсный режим излучения, длительность излучения и период следования в котором являются функциями глубины и определяются временем распространения сигнала. В аппаратуре реализуется зависимость

$$\tau_{\text{изл}} = f(H) = k \cdot t_{\text{рОМ}}.$$

Для анализируемой антенны углы наклона для ОМ $\theta = 23^\circ$; для ДМ $\theta = 61^\circ$, и в отсутствии качки и уклонов грунта время распространения сигналов по лучам ОМ и ДМ отличается значительно (рис. 6, а). В условиях, когда период следования излучения определяется в основном временем распространения, стремление к более полному использованию общего времени работы лага путем увеличения длительности излучения в условиях качки и уклонах грунта приводит к перекрытию эхосигналов по лучам ОМ и ДМ.

При статическом крене $\alpha_k = 3^\circ$, уклоне грунта $\psi = 10^\circ$ время распространения сигнала отличается не столь значительно. В такой ситуации временная селекция сигналов становится менее эффективной (рис. 6, б). Несмотря на то что эхосигнал ДМ ниже по уровню из-за прохождения большей дистанции и большего затухания, а также меньшего коэффициента обратного донного рассеивания, наличие зоны взаимодействия приводит к смещению оценки частоты и увеличению погрешности в измерении скорости.

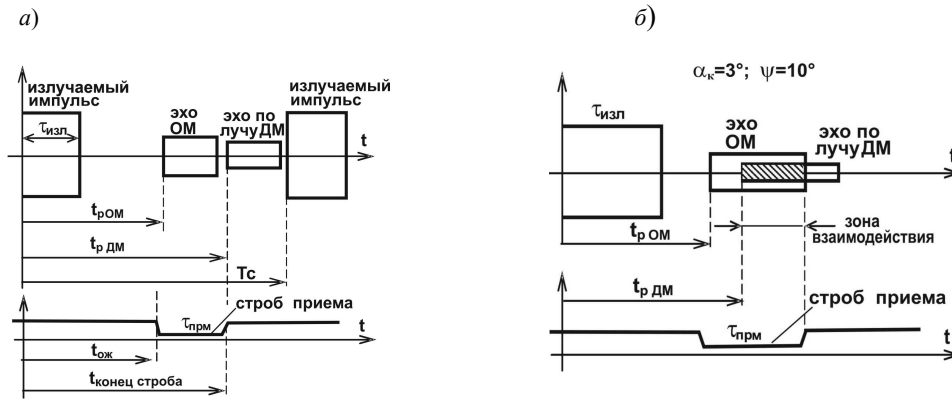


Рис. 6. Временная диаграмма: $\tau_{изл} = 0,375t_p$ (а), $\tau_{изл} = 0,6t_p$ (б)

Величина этой погрешности определяется соотношением уровней полезного сигнала по ОМ и помехи в виде эхосигнала по ДМ, а также их взаимной расстройкой по частоте. Используя методику оценки влияния сигналов прямого прохождения и объемной реверберации на результат измерения, изложенную в [4], погрешность для однолучевой системы будет определяться следующим выражением [5]:

$$\Delta V = \frac{d^2}{1 + d^2} \cdot \Delta f \cdot K^{-1}, \quad (3)$$

где d^2 – отношение интенсивностей эхосигнала ДМ и ОМ; Δf – разность частот по ОМ и ДМ; K – скоростная чувствительность по лучу ОМ, заложенная в аппаратуру лага.

Для учета влияния величины зоны взаимодействия эхосигналов по ОМ и ДМ на погрешность измерения скорости введем в формулу (3) коэффициент перекрытия K_{Π} как отношение времени перекрытия t_{Π} к длительности импульса излучения $\tau_{изл}$

$$K_{\Pi} = \frac{t_{\Pi}}{\tau_{изл}} = \frac{\tau_{изл} - (t_{рДМ} - t_{рОМ})}{\tau_{изл}} = \frac{k + 1 - \frac{t_{рДМ}}{t_{рОМ}}}{k}, \quad (4)$$

где k определяется из выражения $k = \tau_{изл} / t_{рОМ}$.

Формула (3) примет вид

$$\Delta V = \frac{d^2}{1 + d^2} \cdot \Delta f \cdot K^{-1} \cdot K_{\Pi}. \quad (5)$$

Интенсивность эхосигнала от дна для ОМ и ДМ имеет вид [1]

$$I_{эОМ} = \frac{P_{ак}}{4\pi r_{ОМ}^2} \cdot \mu(\theta_{inc ОМ}) \cdot 10^{-0,2\beta r_{ОМ}}, \quad (6)$$

$$I_{эДМ} = \frac{P_{ак}}{4\pi r_{ДМ}^2} \cdot \mu(\theta_{inc ДМ}) \cdot 10^{-0,2\beta r_{ДМ}}, \quad (7)$$

где $P_{ак}$ – акустическая мощность излучаемых сигналов; $\mu(\theta_{inc})$ – коэффициент обратного рассеяния звука дном, θ_{inc} – угол падения энергии на дно, β – коэффициент пространственного затухания звука в воде, рассчитываемый как

$$\beta (\text{д Б/м}) = (0,214 f_{кГц} + 0,00016 f_{кГц}^2) 10^{-3}. \quad (8)$$

По закону Ламберта для углов падения θ_{incOM} и θ_{incDM} коэффициент обратного рассеяния звука дном будет:

$$\mu(\theta_{incOM}) = \mu_0 \cos^2(\theta_{incOM}); \quad \mu(\theta_{incDM}) = \mu_0 \cos^2(\theta_{incDM}). \quad (9)$$

Если расстояние из точки излучения до дна по нормали к дну равно L_n , то наклонная дальность до дна для ОМ и ДМ для углов падения θ_{incOM} и θ_{incDM} равна:

$$r_{OM} = L_n / \cos \theta_{incOM}; \quad r_{DM} = L_n / \cos \theta_{incDM}, \quad (10)$$

и выражение для отношения эхосигналов $I_{эOM}$ и $I_{эDM}$ примет вид

$$d^2 = \frac{I_{эDM}}{I_{эOM}} = \frac{\cos^4 \theta_{incDM}}{\cos^4 \theta_{incOM}} \cdot n^2 \cdot 10^{-0,2\beta(r_{DM}-r_{OM})}, \quad (11)$$

где n – отношение уровней ДМ и ОМ характеристики направленности.

Поскольку время распространения и наклонная дальность связаны соотношениями

$$t_{pOM} = \frac{2r_{OM}}{c}; \quad t_{pDM} = \frac{2r_{DM}}{c}, \quad (12)$$

то коэффициент перекрытия K_n можно выразить через углы падения θ_{incOM} и θ_{incDM}

$$K_n = \frac{k+1 - \frac{t_{pDM}}{t_{pOM}}}{k} = \frac{k+1 - \frac{\cos \theta_{incOM}}{\cos \theta_{incDM}}}{k}. \quad (13)$$

Доплеровское приращение частоты эхосигнала однолучевой системы для ОМ и ДМ [1]:

$$\Delta F_{OM} = \frac{2V_x f_u}{c} \sin \theta''_{OM} \cos \varphi''_{OM} + \frac{2V_y f_u}{c} \sin \theta''_{OM} \sin \varphi''_{OM}, \quad (14)$$

$$\Delta F_{DM} = \frac{2V_x f_u}{c} \sin \theta''_{DM} \cos \varphi''_{DM} + \frac{2V_y f_u}{c} \sin \theta''_{DM} \sin \varphi''_{DM}, \quad (15)$$

где φ''_{OM} и φ''_{DM} – азимутальный угол после отклонения луча ОМ и ДМ из начального положения на угол дифферента α , а затем на угол крена β ; θ''_{OM} и θ''_{DM} – угломестный угол между лучом ОМ, ДМ и вертикалью после отклонения из начального положения на угол α , а затем на угол β .

Результирующее доплеровское приращение частоты для ОМ и ДМ определяется как

$$\Delta f = \Delta F_{DM} - \Delta F_{OM}. \quad (16)$$

Используя формулу (5), погрешность измерения скорости для лага с двухлучевой антенной системой типа Янус будет определяться:

$$\Delta V = \left(\frac{d_1^2}{1+d_1^2} \cdot \Delta f_1 \cdot K_{n1} - \frac{d_2^2}{1+d_2^2} \cdot \Delta f_2 \cdot K_{n2} \right) \cdot K_{12}^{-1}, \quad (17)$$

где индексы в переменных указывают на принадлежность к соотношениям первого – ориентированного например вперед и второго, ориентированного назад пары лучей ОМ ХН, а именно d_1^2 – отношение интенсивностей эхосигнала ДМ1

и $OM1$; d_2^2 – отношение интенсивностей эхосигнала ДМ2 и $OM2$; Δf_1 – разность частот по $OM1$ и ДМ1; Δf_2 – разность частот по $OM2$ и ДМ2; K_{12}^{-1} – скоростная чувствительность двухлучевой системы.

Результаты расчета среднеквадратической погрешности измерения скорости $\Delta V/V$ в зависимости от глубины h и уклона грунта ψ для случая $\theta_{OM}=23,1^\circ$; $\theta_{DM1}=\theta_{DM2}=61,25^\circ$; $\varphi_{OM}=0^\circ$; $\varphi_{DM1}=180+63,4^\circ$; $\varphi_{DM2}=180-63,4^\circ$; угол дифферента $\alpha=3^\circ$; угол крена $\beta=-3^\circ$; $K=54$ Гц/уз; $f=100000$ Гц, $n=0,8$ приведены на рис. 7.

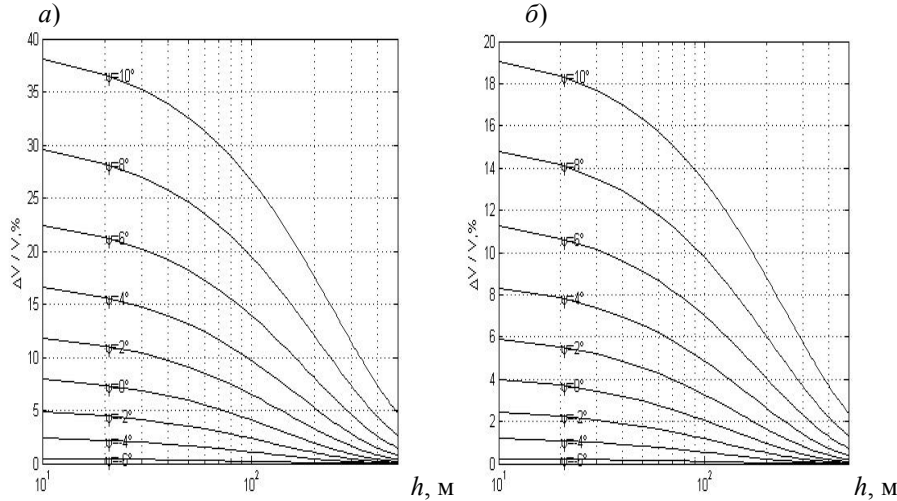


Рис. 7. Погрешности измерения при $\tau_{изл}=0,9t_{рОМ}$, $n=0,8$: $V_x=V_y=1$ уз (а) и $V_x=1$ уз, $V_y=0$ уз (б)

Столь значительные величины погрешности измерения скорости за счет наличия паразитных ДМ ХН фазированных антенных решеток объясняется тем, что доплеровские приращения частоты по OM и ДМ ХН имеют разные величины, и что важно – разные знаки. Сравнивая графики на рис. 7, видим, что ортогональная составляющая вектора скорости в значительной степени влияет на результат измерения. Уменьшение параметра k приводит к снижению погрешности в измерении. На рис. 8 приведены результаты расчетов погрешности измерения скорости при $k=0,5$ и $k=0,375$ соответственно.

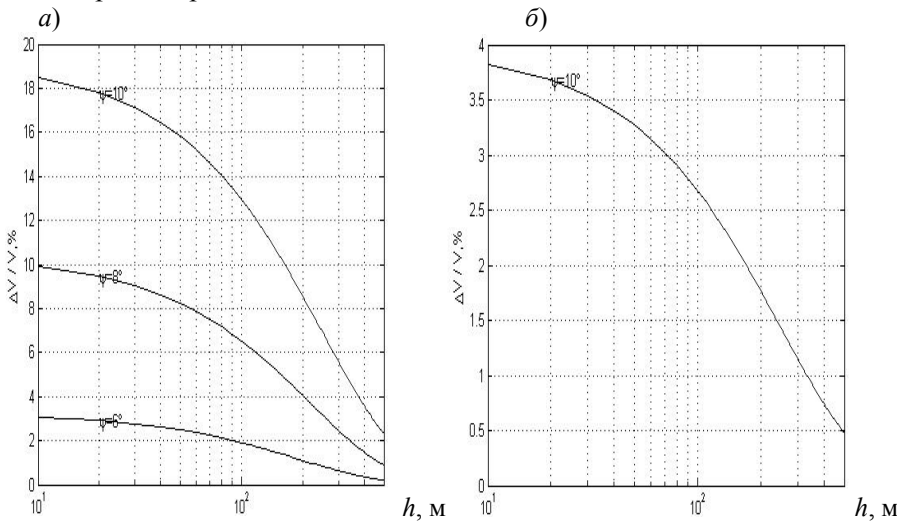


Рис. 8. Погрешности измерения при $V_x=V_y=1$ уз, $n=0,8$: $\tau_{изл}=0,5t_{рОМ}$ (а), $\tau_{изл}=0,375t_{рОМ}$ (б)

Из графиков видно, что уменьшение длительности излучаемого импульса по отношению к времени распространения сигнала позволяет в большинстве случаев снизить погрешность до малых величин. Уже при уклонах грунта менее 10° погрешность за счет перекрытия эхосигналов по ОМ и ДМ будет равняться нулю. Если принимаются специальные меры по снижению уровня ДМ и ореола ХН, например путем введения специального согласующего слоя в конструкцию антенны, то уровень ДМ можно снизить до 0,2 от уровня ОМ. Погрешность измерения значительно снижается. Расчет погрешности для $n=0,2$ представлен на рис 9.

Из (5) понятно, что для исключения погрешности необходимо обеспечить равенство нулю K_n . Приравняв числитель в выражении (13) нулю и решив уравнение относительно k , получим условие отсутствия погрешности за счет перекрытия эхосигналов по ОМ и ДМ.

$$k \leq \frac{\cos \theta_{inc \text{ ОМ}}}{\cos \theta_{inc \text{ ДМ}}} - 1 \quad (18)$$

где $\theta_{inc \text{ ОМ}}$ и $\theta_{inc \text{ ДМ}}$ – углы падения, учитывающие уклон грунта, статические крен и дифферент судна.

В условиях, когда обеспечить выполнение неравенства (18) невозможно эффективное снижение погрешности измерения за счет ДМ ХН фазированной антенной решетки достигается дополнением к временной селекции узкополосной частотной. В основу частотной селекции положен тот факт, что доплеровское приращение частоты по ОМ и ДМ имеет разные знаки, поскольку ДМ ориентированы в противоположную сторону от ОМ.

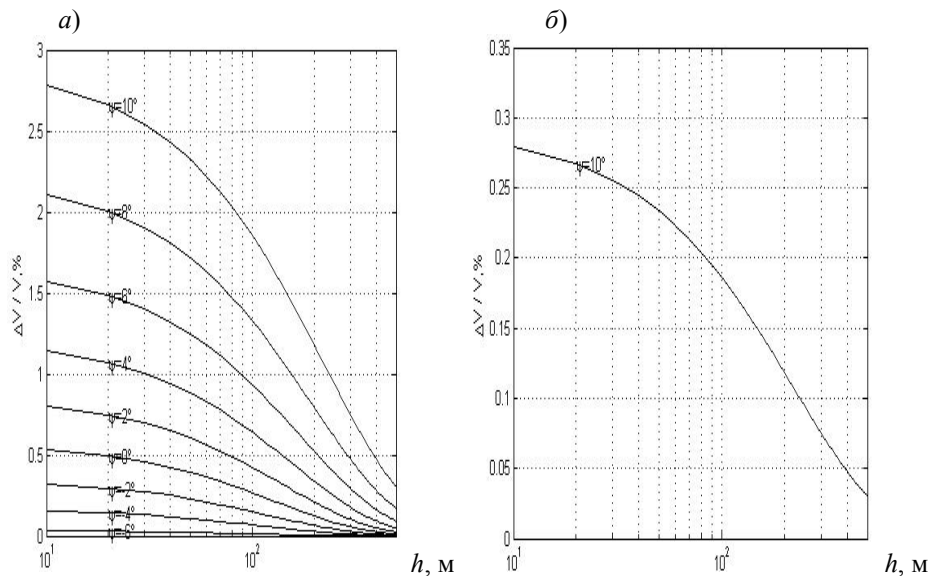


Рис. 9. Погрешности измерения при $V_x=V_y=1$ уз, $n=0,2$, $\tau_{изл}=0,9t_{рОМ}$ (а), $\tau_{изл}=0,375t_{рОМ}$ (б)

Выводы

1. Гидроакустические антенны лагов на основе эквидистантных с шагом $d=0,637\lambda$ ФАР формируют четырехлучевые янусные ХН и обладают еще восемью “паразитными” ДМ.

2. ДМ ориентированы в противоположном направлении ОМ под углом $\theta = 61^\circ$ к нормали к активной поверхности антенны и лежат в плоскостях под углом $\varphi = 63,4^\circ$ и $\varphi = -63,4^\circ$ к плоскости основного максимума.

3. Расчетная величина каждого ДМ составляет 0,8 от ОМ. Экспериментально снятые ХН дают величину ДМ 0,6 – 0,7 от ОМ.

4. В режиме излучения ДМ ХН являются каналами утечки акустической энергии и источниками демаскирования. В режиме приема ДМ являются каналами проникновения дополнительных помех и мешающих сигналов.

5. В процессе работы лага в условиях статических кренов, дифферентов и уклонах грунта ДМ могут явиться причиной дополнительной погрешности измерения скорости относительно дна. При не оптимально выбранных соотношениях временной диаграммы работы лага величина погрешности может достигать нескольких десятков процентов. С увеличением глубины погрешность снижается.

6. ДМ ФАР также могут являться причиной дополнительной погрешности при измерении относительной скорости, когда лаг использует сигналы, рассеянные неоднородностями водной среды.

7. При проектировании лагов с антеннами в виде ФАР, в которых не принимаются специальные меры, препятствующие формированию ДМ, соотношение между длительностью излучения и временем распространения сигналов по ОМ не должно превышать величину 0,375 в условиях качки и уклонах грунта.

8. Кардинальным способом решения проблемы ДМ ФАР является изменение структуры и фазового распределения сигналов возбуждения антенны, что позволит избежать формирования ДМ. Впрочем, это будет уже другая антенна.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Абсолютные** и относительные лаги / К.А.Виноградов [и др.]. – Л.: Судостроение, 1990. –264 с.
2. **Мартынюк, А.П.** Некоторые аспекты измерения скорости доплеровским лагом на малых глубинах // Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану): Зб. наук. пр. – Запоріжжя: НТЦ ПАС НАН України. № 3. 2006. С. 84–88.
3. **Жуков, В.Б.** Расчет гидроакустических антенн по диаграмме направленности. – Л.: Судостроение, 1977. –184 с.
4. **Гидроакустические** навигационные средства / В.И.Бородин [и др.] – Л.: Судостроение, 1983. –264 с.
5. **Мартынюк, А.П.** Особенности янусных характеристик направленности фазированных антенных решеток и их влияние на функционирование гидроакустического лага / А.П.Мартынюк, Е.В.Казакова // Тр. X Всерос. конф. “Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики”. – СПб.: Наука, 2010.- С. 102–105.

Abstract. Results of mathematical and physical simulation of directivity patterns of phased arrays are given. The mechanism of formation of one of components of velocity measurement error, connected with field characteristics of applied arrays is examined. The error estimation is given.

Материал поступил 16.06.10