

УДК 629.12.053:681.883.482

ДОПЛЕРОВСКИЙ ЛАГ ДЛЯ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

© Б.В. Карпухин, А.П. Мартынюк, В.И. Простомолотов, 2007

ООО «MARPRO-GRUP», г.Бэлць, Республика Молдова

Наведено основні характеристики лагу універсального доплерівського ЛДУ – 160, призначеного для встановлення на підводних апаратах (ПА), розглядаються складові похибки виміру швидкості, що зв'язані з особливістю експлуатації лагу на ПА. Дана порівняльна оцінка ЛДУ-160 з лагами, що серійно випускаються для ПА.

Приводятся основные характеристики лага универсального доплеровского ЛДУ-160, предназначенного для установки на подводных аппаратах (ПА), рассматриваются составляющие погрешности измерения скорости, связанные с особенностью эксплуатации лага на ПА. Дана сравнительная оценка ЛДУ-160 с серийно выпускаемыми лагами для ПА.

The basic characteristics of universal doppler log, intended for installation on underwater devices, are given, components of speeds measurement error connected with feature of log operation on underwater devices are examined. A comparative appreciation of LDU-160 with serial produced logs for underwater devices is given.

ПОДВОДНЫЕ АППАРАТЫ, ДОПЛЕРОВСКИЙ ЛАГ, ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ХАРАКТЕРИСТИКА НАПРАВЛЕННОСТИ, АВТОНОМНОСТЬ

Научные исследования океана, его дна, промышленная разработка шельфа и более глубоких районов океана, прокладка трубопроводов, выполнение спасательных работ не могут обойтись без использования глубоководных обитаемых и необитаемых подводных аппаратов (ПА).

Современные ПА оснащаются навигационными комплексами, в которых информация отдельных подсистем интегрируется с целью повышения надежности и точности навигации.

Одним из важных средств навигации ПА является доплеровский лаг.

К аппаратуре, размещаемой на ПА, предъявляются, как правило, следующие требования:

- автономность функционирования;
- способность адаптироваться к непрерывно меняющимся внешним условиям;
- сопрягаемость с другими подсистемами, а также малые массогабаритные характеристики, энергопотребление и рассеиваемая мощность.

Всем перечисленным требованиям удовлетворяет лаг доплеровский универсальный ЛДУ-160 (рис. 1), который является адаптивной системой, осуществляющей в изменяющихся внешних условиях автоматический поиск, обнаружение и сопровождение сигнала [1].

Лаг работает в импульсном режиме и обеспечивает выполнение следующих функций:

- измерение продольной и поперечной составляющей вектора абсолютной скорости в корабельной системе координат при глубинах от 3 до 160 м;
- измерение составляющих вектора относительной скорости при глубинах более 160 м;
- вычисление и отображение составляющих вектора пройденного расстояния;
- определение глубины моря под антенной путем пересчета наклонных дальностей по лучам характеристики направленности (ХН) антенны;

– інформаційна зв'язь з потребителем здійснюється по інтерфейсу RS-422, по якому передається інформація про складові вектора швидкості та її достовірності, інформація про пройденому відстані, глибині та стані пристрою.

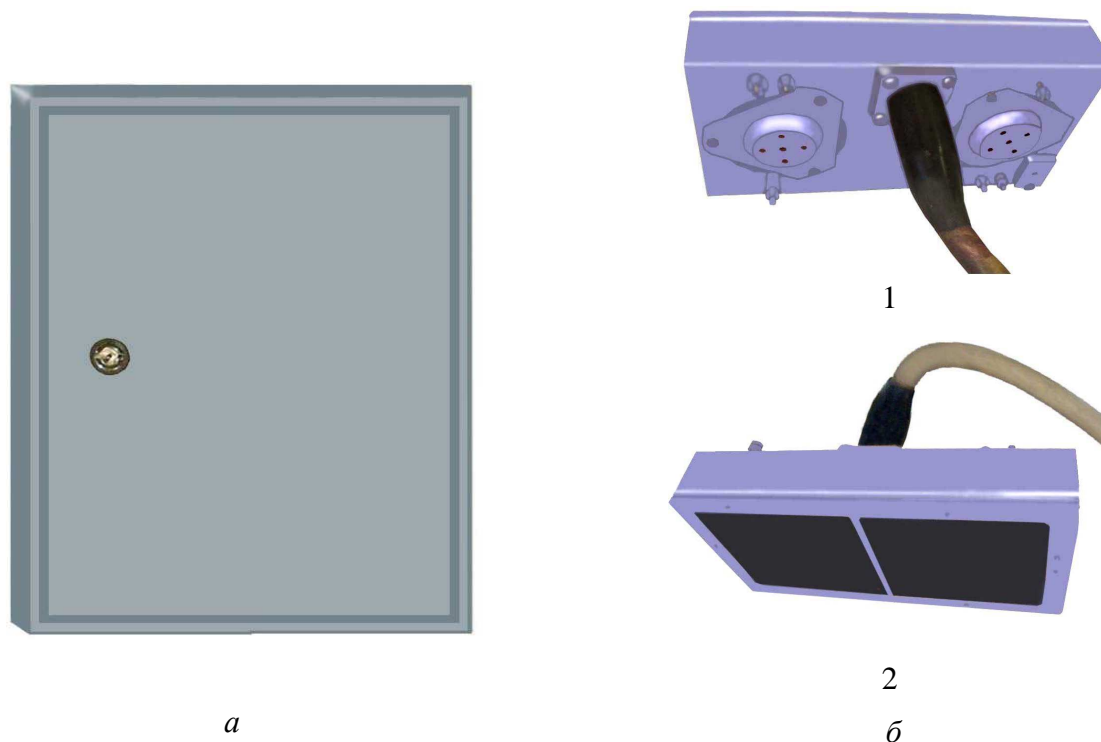


Рис. 1 – Лаг доплеровський універсальний ЛДУ-160 для глибоководних апаратів, підводних лодок і надводних судів: а – пристрій 16, б – пристрій 1А (1 – вид зверху, 2 – вид знизу)

Основні технічні характеристики лага ЛДУ-160:

Діапазон вимірюваних швидкостей, уз.:

– продольна $-5 \div 35$;

– поперечна $-5 \div +5$;

Середньоквадратична погрешність (СКП) вимірювання абсолютної та відносної швидкостей (в умовах качки менше 3° , вертикальної складової вектора швидкості менше 0,3 м/с, часу осереднення 64 с):

$\pm 0,03$ уз. при швидкості до 10 уз.;

$\pm 0,3\%$ при швидкості більше 10 уз.

Напруга електроживлення 27 ± 3 В

Максимальна споживана потужність не більше 65 ВА

Базовий склад пристрою:

– пристрій 16 (комбінований пристрій), 1 шт., габарити (240x150x320) мм, маса 9,5 кг;

– пристрій 1А (гідроакустична антена), 1 шт., габарити (290x200x102,5) мм, маса 22,0 кг (з урахуванням маси кабелю).

Автономність лага забезпечується алгоритмами функціонування, в яких тривалість, період слідування імпульсів випромінювання та тривалість вимірюваної частини ехо-сигналів є функціями глибини, а рівень випромінюваного сигналу та коефіцієнт

усиления приемного тракта являются функциями уровня эхо-сигнала, при этом диапазон регулирования мощности излучения составляет 40 дБ, коэффициента усиления – 60 дБ.

Применение современной элементной базы (многофункциональный контроллер, программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), элементы силовой электроники) позволило реализовать названные функции лага только тремя электронными модулями, повысить надежность лага и реализовать высокоэффективные методы управления и обработки сигналов при значительном снижении массогабаритных характеристик и потребляемой мощности.

Импульсный режим излучения позволил применить одну приемо-излучающую гидроакустическую антенну и снизить массу и габариты аппаратуры.

Измерение частоты производится во временной области, с набором статистики и последующей селекцией аномальных измерений.

Это позволило снизить требования по ограничению минимальной длительности излучаемых сигналов и производить измерения с указанными погрешностями при глубинах три и менее метров.

Выбор режима "относительно дна" или "относительно воды" осуществляется автоматически или вручную, управляющие команды поступают по интерфейсу RS-422 от потребителя.

В структуре погрешности измерения скорости доплеровских лагов, как известно, присутствуют три типа составляющих погрешности:

- флуктуационные (уменьшаются путем осреднения на интервале времени T_0);
- систематические (уменьшаются путем ввода поправочных коэффициентов);
- квазисистематические.

Одной из главных причин квазисистематической погрешности является деформация огибающей спектра эхо-сигнала, возникающая на трассе распространения сигнала до дна и обратно. Физическая сущность погрешности заключается в том, что из-за конечной ширины ХН антенны лага энергия эхо-сигнала оказывается распределенной в пределах доплеровского спектра частот. Поскольку потери энергии сигналов, распространяющихся в пределах луча ХН до дна и обратно под разными углами, различны в силу различия в протяженности трассы распространения сигнала, угловой зависимости коэффициента обратного донного рассеивания, огибающая доплеровского спектра деформируется и смещается в область низких частот.

Выражение, характеризующее взаимосвязь относительной погрешности измерения скорости $\delta_{см}$, обусловленной деформацией доплеровского спектра, с параметрами аппаратуры гидроакустического лага и параметрами морской среды имеет вид [2]:

$$\delta_{см} = \frac{\Delta V_{см}}{V} = - \left(\frac{\varepsilon \Delta \alpha^2}{11,2 \operatorname{tg} \theta} + \frac{\beta H \Delta \alpha^2}{2,8 \cos \theta} + \frac{\Delta \alpha^2}{5,6} \right), \quad (1)$$

где V – скорость судна;

ε – параметр, определяющий угловую зависимость рассеяния от дна в обратном направлении $\mu(\theta)$, заданную в пределах раствора ХН в виде экспоненты;

$\Delta \alpha$ – ширина раствора ХН на уровне – 3 дБ;

θ – угол наклона оси ХН к вертикали, $\theta = \theta_0 \pm \alpha_k$, θ_0 – номинальный угол наклона, α_k – угол статического крена;
 β – коэффициент пространственного затухания;
 H – глубина под килем судна.

На рис. 2 приведена зависимость погрешности $\delta_{см}$ от глубины под килем, рабочей частоты лага, угла наклона ХН и угла статического крена α_k .

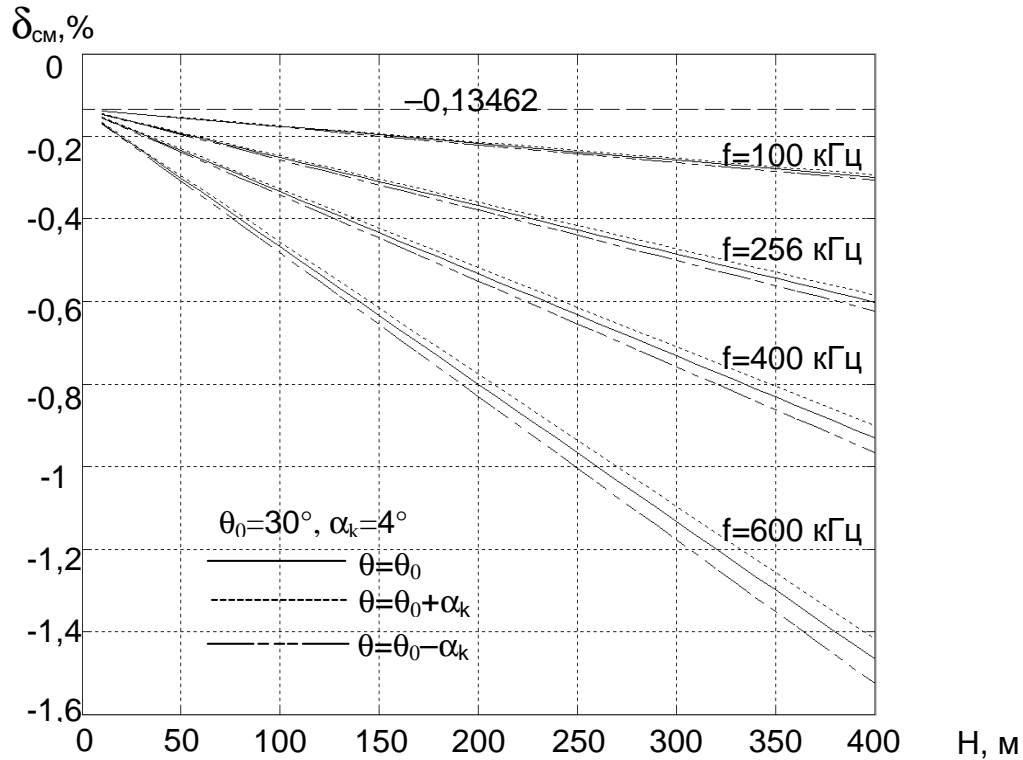


Рис. 2

Поскольку на ПА чаще всего используются лаги с малогабаритными антеннами с рабочими частотами более 100 кГц, то, как видно из графика, погрешность на глубине 160 м будет составлять более 0,28 %.

Известные способы борьбы с ошибкой смещения, заключающиеся, например, в сопровождении доплеровского спектра эхо-сигнала в нуле разностной ХН, в силу сложности не нашли применение на практике. Синтез устойчивых оценок положения спектра сигнала, инвариантных по отношению к форме огибающей спектра, затруднителен в силу отсутствия репрезентативной информации о спектральных характеристиках эхо-сигналов от различных грунтов и условий плавания.

Важно отметить, что указанная погрешность в серийно выпускаемых лагах не компенсируется, а поскольку погрешность носит квазисистематический характер, то ее влияние на счисление навигационных параметров значительно.

Поскольку в ЛДУ-160 реализован алгоритм определения глубины путем пересчета наклонных дальностей по четырем лучам ХН, то, принимая во внимание (1), снижение погрешности $\delta_{см}$ производится с использованием корректировки скорости по следующей формуле:

$$V_{ист} = V_{изм} \left(1 + \frac{\beta H_u \Delta \alpha^2}{2,8 \cos \theta} \right), \quad (2)$$

где $V_{ист}$, $V_{изм}$ – истинное и измеренное значение скорости соответственно;

H_u – значение глубины, определяемое лагом.

Погрешность измерения скорости при использовании (2) при прочих равных условиях снижается до значений 0,14 % (на рис. 2 пунктирная линия).

При функционировании лагов на ПА, с учетом траектории их движения, влияние вертикальной составляющей вектора скорости V_z на счисление горизонтальных составляющих скорости значительно.

В реальных условиях плавания ПА может обладать статическим креном и (или) дифферентом. Погрешность в определении горизонтальных составляющих скорости, если не принимаются специальные меры, определяется следующей формулой [3]:

$$\delta V_{x(y)} = \frac{V_z}{V_{x(y)}} \cdot \sin \alpha_k \cdot 100\%, \quad (3)$$

где V_z , $V_{x(y)}$ – вертикальная, продольная или поперечная горизонтальные составляющие вектора скорости соответственно;

α_k – угол статического крена (дифферента).

Поскольку движение ПА осуществляется на малых скоростях, то при $V_{x(y)} = 1$ м/с, $V_z = 0,2$ м/с и $\alpha_k = 4^\circ$ погрешность составит 1,4 %, а при равных значениях $V_{x(y)} = V_z$, при $\alpha_k = 4^\circ$ погрешность может достигать 7 %.

Благодаря применению алгоритма компенсации вертикальной составляющей вектора скорости при обработке данных [4] в ЛДУ-160 погрешность за счет V_z значительно снижена и при получении информации об углах качки от внешних датчиков определяется по формуле:

$$\delta V_x = (1 - K) \left[\frac{V_z}{V_x} \cos \alpha_k - \sin \alpha_k \right] \cdot \sin \alpha_k \cdot 100\%, \quad (4)$$

$$K = \frac{c_0}{c} \frac{\sin \left(\arccos \left(\frac{c}{c_0} \cos \alpha_0 \right) \right)}{\sin \alpha_0}, \quad (5)$$

где c_0 – значение скорости звука, заложенное в аппаратуру лага и равное 1475 м/с ;

c – истинное значение скорости звука в воде;

α_0 – угол наклона оси ХН к горизонту при скорости звука в воде $c_0 = 1475$ м/с;

α_k – угол статического крена (дифферента).

На рис. 3 представлена залежність погрешности измерения δV_x продольной составляющей скорости от значения истинной скорости звука и соотношения V_z/V_x , полученная по формуле (4).

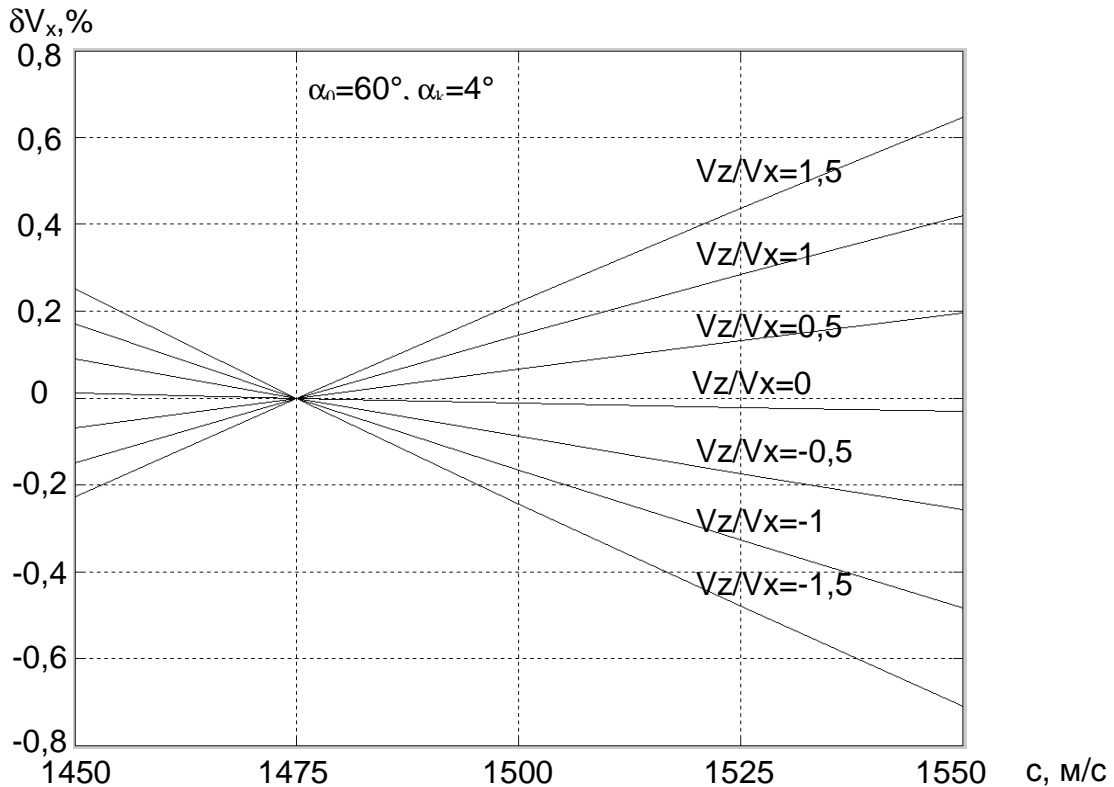


Рис. 3

При указанных выше исходных условиях погрешность за счет V_z не превышает 0,5 %.

Применение доплеровского лага ЛДУ-160 в навигационных комплексах, в которых точность и надежность обеспечиваются путем интегральной обработки информации различных систем, позволит в значительной степени повысить точность и надежность выработки навигационных параметров.

Испытания ЛДУ-160 проводились с использованием программно-аппаратного комплекса имитации сигналов (ПАКИС) [5], обладающего возможностью имитации эхосигнала, у которого уровень является функцией имитируемой глубины, а частота - функцией скорости имитируемого движения, килевой и бортовой качек, скорости вертикального перемещения, статического крена и дифферента.

Лабораторные и натурные испытания полностью подтвердили правильность принятых схемотехнических решений, заложенных алгоритмов и устойчивость функционирования.

Автономность функционирования, малые массогабаритные характеристики, высокие точностные показатели и устойчивость функционирования лага соответствуют современным требованиям и обеспечат его эффективное применение на глубоководных обитаемых и

необитаемых ПА, подводных лодках, а также на катерах, малых, средних и крупнотоннажных судах и кораблях.

Литература

1. Лаг доплеровский универсальный ЛДУ-160. Руководство по эксплуатации МР.365354.001 РЭ. -2005.
2. Гидроакустические навигационные средства /В.И.Бородин, Г.Е.Смирнов, Н.А.Толстякова, Г.В.Яковлев – Л.: Судостроение, 1983. - 264 с.
3. Абсолютные и относительные лаги /К.А.Виноградов, В.Н.Кошкарев, Б.А.Осюхин, А.А.Хребтов – Л.: Судостроение, 1990. - 264 с.
5. Мартынюк А.П. Компенсация влияния вертикальной составляющей вектора скорости носителя в доплеровском лаге// Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень світового океану). - 2006, №3, - С. 78-83. - ISSN 1815-8277.
6. А.П.Мартынюк, В.А.Казаков, Ю.И.Гусин, В.Д.Лихтецкий, В.И.Простомолотов. Программно-аппаратный комплекс имитации сигналов гидроакустических средств навигации ПАКИС// Известия ТРТУ. Тематический выпуск "Экология 2006 – море и человек".– Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006, № 12. - 204 с.