

*Министерство транспорта России
Морской государственный университет
имени адмирала Г.И. Невельского*

Кафедра технических средств судовождения

Судовые измерители скорости

*Методические указания
для индивидуальных занятий
по курсу «технических средств судовождения»
Специальность 24.02.01*

Составил: Б.Г. Абрамович

*Владивосток
2005*

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, целью навигации является обеспечение безопасного и в то же время экономичного по затратам времени и топлива приведения судна в заданную точку пространства в определенный момент времени с установленной точностью.

При этом для обеспечения безопасности мореплавания приходится решать такие задачи, как:

- определение местоположения судна;
- обеспечение счисления при плавании;
- обеспечение прибрежного плавания;
- обеспечение плавания во льдах;
- обеспечение расхождения со встречными судами;
- обеспечение подхода судна к гавани, узкости;
- обеспечение проходов судна по каналу, фарватеру;
- обеспечение постановки судна на якорь;
- обеспечение швартовки судна.

Ни одна из этих задач практически не решается без информации о текущем значении скорости судна. Так, при сближении судна с причалом точность измерения скорости должна быть 0,02 узла, что соответствует 0,01 м/с.

Актуальность измерения скорости подчеркивается и таким фактом, что простейшие методы, приемы и устройства для решения этой задачи существовали еще в римском флоте, когда с бортов судна опускались колеса большого диаметра и подсчитывались их обороты за фиксированное время. На смену этому методу пришел так называемый способ "голландского лага", при котором с носа (бака) судна бросали в воду какой-нибудь плавающий яркий предмет (например, яблоки или цитрусовые). Затем фиксировалось время, за которое этот яркий предмет проходил расстояние между двумя наблюдателями, находящимися на судне на известном между ними расстоянии. Измеренное время и известное расстояние позволяло определить скорость судна.

К началу XII столетия отмечаются первые попытки создать измеритель скорости, в основу которого был бы положен принцип вертушки или винта, вращающегося на ходу судна от набегающего потока воды. Практическое применение получил вращающийся, или винтовой лаг, изобретенный Э. Массеем в 1802 г. Конструктивно он состоял из вертушки с лаглинем и коробки с часовым механизмом и циферблатом, показывающим число пройденных миль и кабельтовых.

С 1933 г. на судах нашего флота получил применение механический лаг типа "ГО марки 3", использующий также принцип вертушки. С 1940 г. на судах стали устанавливаться гидродинамические лаги, в разработку которых внес большой вклад русский ученый Даниил Бернулли. В середине XX века был разработан индукционный лаг, позволяющий измерить скорость судна как на переднем, так и на заднем ходах.

Рассмотренные измерители скорости судна, обладая общим недостатком - измерением скорости относительно воды, с 70-х г. стали заменяться гидроакустическими абсолютными лагами, реализующими различные физические принципы обработки отраженных сигналов. Первый доплеровский гидроакустический лаг (ДГАЛ) для судов ММФ был разработан отечественной промышленностью в 1976 г. как составная часть автоматизированного комплекса "Бриз". При этом были разработаны два варианта ДГАЛ:

- измерительная система с одной антенной, позволяющая определять продольную и поперечную составляющие путевой скорости судна и пройденного им по этим направлениям расстояния;

- измерительная система имеет две антенны, установленные в носовой и кормовой оконечностях судна, что позволяет дополнительно к вектору абсолютной скорости иметь информацию о линейных скоростях оконечностей судна. Эта дополнительная информация необходима при швартовке, при маневрировании в узкостях и т.д.

- Отечественная модель ДГАЛ обеспечивает точность измерения скорости + 0,1 узла при глубинах до 200 м и + 0,15 узла при глубинах до 400 м.

Учитывая тенденции развития флота, можно отметить, что современный измеритель скорости должен отвечать следующим основным требованиям:

- высокая надежность и удобство эксплуатации;
- соответствующая точность с учетом решаемых задач;
- унифицированность и информативность;
- автономность;
- сопряжение с ЦВМ для работы в судовом автоматизированном навигационном комплексе;
- невысокая стоимость и массо-габаритные характеристики;
- эстетичность исполнения;
- конкурентноспособность по отношению к лучшим образцам приборов.

Глава 1. ИЗМЕРИТЕЛИ АБСОЛЮТНОЙ СКОРОСТИ СУДНА

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ

Существующее многообразие измерителей скорости судна требует введения единой терминологии и соответствующих определений, поясняющих физический смысл принципа их работы.

Лаг - судовое навигационное устройство, предназначенное для измерения скорости и выработки пройденного расстояния.

Абсолютный лаг - лаг, производящий измерение скорости относительно дна.

Относительный лаг - лаг, производящий измерение скорости относительно воды.

Трехмерный лаг - лаг, предназначенный для измерения скорости судна в трехмерном пространстве.

Верхушечный лаг (ВЛ) - лаг, определяющий скорость судна в зависимости от частоты вращения вертушки в воде.

Гидродинамический лаг (ГЛ) - лаг, определяющий скорость судна в зависимости от динамического давления воды, обтекающей судно при его движении.

Индукционный лаг (ЛИ) - лаг, определяющий скорость судна в зависимости от электродвижущей силы, индуцируемой в потоке воды, обтекающем судно при его движении.

Доплеровский лаг (ДЛ) - лаг, основанный на использовании эффекта Доплера.

Геоманнитный лаг - лаг, основанный на использовании свойств магнитного поля Земли.

Корреляционный лаг (КЛ) - лаг, определяющий скорость судна путем анализа корреляционной связи между двумя сигналами, принятыми на движущемся судне на разнесенные в направлении движения первичные преобразователи скорости.

Геоэлектромагнитный лаг - геомагнитный лаг, основанный на использовании явления наведения электродвижущей силы в проводнике при его движении в магнитном поле Земли.

Гидроакустический лаг (ТАЛ) - лаг, основанный на использовании законов распространения акустических волн в воде.

Радиолаг (РЛ) - лаг, основанный на использовании законов распространения радиоволн.

Доплеровский гидроакустический лаг (ДГАЛ) – гидроакустический лаг, основанный на использовании эффекта Доплера.

Доплеровский радиолаг (ДРЛ) - радиолаг, основанный на использовании эффекта Доплера.

Швартовый лаг (ШЛ) - лаг, предназначенный для измерения скорости движения носа и кормы судна при его швартовке.

Приведенный выше перечень измерителей скорости может быть объединен и классифицирован по следующим признакам.

1. В зависимости от выбранной опорной системы координат, относительно которой происходит измерение скорости:

- абсолютные лаги;
- относительные лаги.

2. В зависимости от числа измеряемых составляющих скорости:

- однокомпонентные, служащие для измерения составляющей скорости в диаметральной плоскости судна v_x ($v_{\partial n}$);

- двухкомпонентные, служащие для измерения составляющей скорости в диаметральной плоскости судна (v_x) и составляющей скорости в плоскости, перпендикулярной диаметральной плоскости судна (v_y).

Таблица 1.1

Точность выработки скорости

Тип лага		Измеряемая скорость	Разрешающая способность, относительная погрешность, % узлы,
По точности	по физическому принципу		
Повышенной точности	ДГАЛ (в системе швартовки)	Вектор скорости перемещения отдельных частей судна (носа, кормы) относительно грунта	<u>0,01-0,02</u> 0,5-1,0
Точный	ДГАЛ КГ АЛ с интерполяционным блоком обработки	Вектор скорости относительно грунта. Скорость судна относительно грунта и воды	<u>0,05-0,10</u> 1,0-2,0
Средней точности	Индукционный лаг Гидродинамический лаг Радиодоплеровский	Вектор скорости судна (или продольная составляющая) относительно воды Вектор скорости судна относительно поверхности воды	<u>0,15-0,30</u> 1,0-5,0
Пониженной точности	Вертушечный	Продольная составляющая скорости судна относительно воды	<u>Более 0,30</u> Более 3,0

3. В зависимости от точности измерения скорости:

- повышенной точности для обеспечения швартовки судна и выполнения специальных работ на научно-исследовательских судах;
- точные для обеспечения плавания в узкостях, каналах, акватории порта и прибрежных районах;
- средней точности для обеспечения плавания в открытом море и океанском плавании;

- пониженной точности для обеспечения плавания маломерных судов, катеров, яхт и т.д. Сказанное можно представить в виде табл. 1.1.

1.2. ДОПЛЕРОВСКИЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ ЛАГ

1.2.1. Принцип работы лага

В данной системе в качестве отражающей поверхности выступает грунт (для режима абсолютного лага) или слой воды (для режима относительного лага). Учитывая, что за время измерения T смещение антенной систем V_T при условии, что $v \ll c$, незначительно, можно с достаточной степенью точности принять $\theta \approx \theta_1$. Тогда частота принятого элементарного сигнала, вследствие эффекта Доплера, будет отличаться, как было показано выше, на величину доплеровского сдвига частоты. Недостатком рассмотренной системы измерения скорости судна можно считать ее невысокую точность, т.к. в реальных условиях эксплуатации лага на его показания в сильной степени будут влиять качка, испытываемая судном, крен и дифферент. Для уменьшения этой погрешности используют двухлучевую систему, в которой один луч направлен так, как показано на рис. 1.1, а второй луч под таким же углом θ направлен в корму.

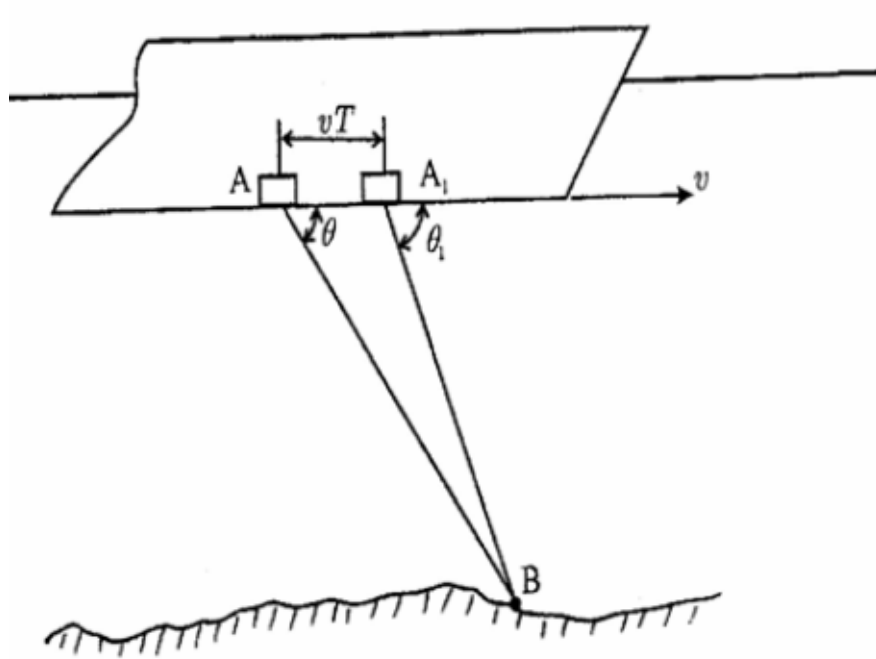


Рисунок 1

Рис. 1.1.

При таком измерении определяется скорость судна по линии ориентации лучей, т.е. продольная составляющая скорости. Так как для целей навигации необходимо иметь информацию о векторе абсолютной скорости судна, то, как правило, в таких системах применяют четырехлучевую антенную систему (может быть и трехлучевая), в которой два луча предназначены для измерения продольной составляющей скорости судна, а два - для определения поперечной составляющей скорости судна. Ориентация лучей может быть ортогональной, причем, одна пара лучей ориентирована в диаметральной плоскости судна, а вторая пара - в плоскости, перпендикулярной диаметральной (см. рис.1.2). Но такая ориентация лучей обладает тем недостатком, что в случае выхода из строя одной из пар невозможно определить вектор абсолютной скорости судна. Для устранения этого недостатка применяют X-образное ориентирование лучей (см. рис. 1.3).

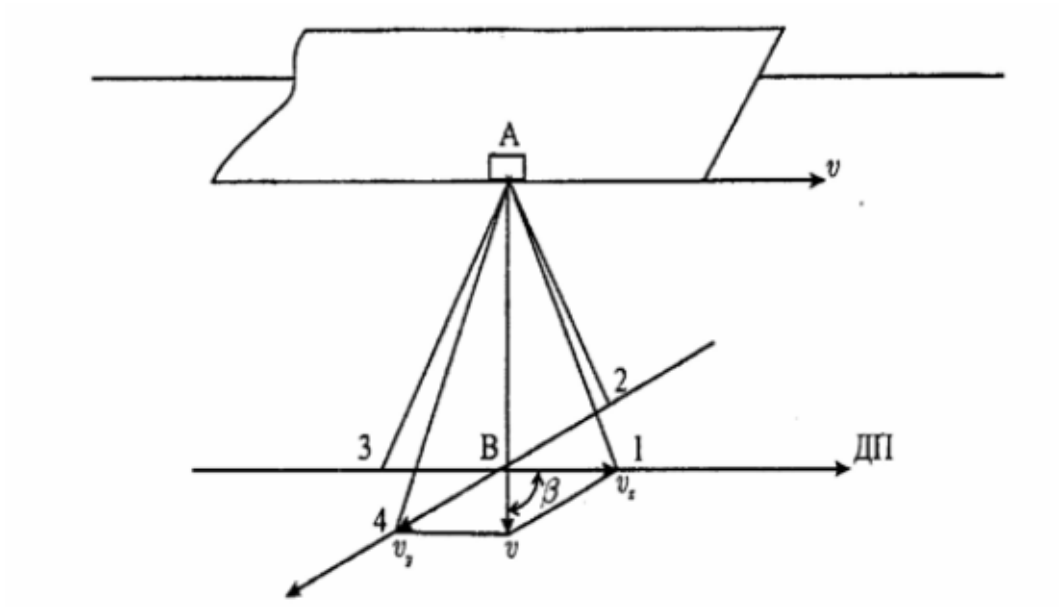


Рис.1.2.

Как было отмечено выше, для обеспечения швартовки в ДГАЛ предусмотрено измерение линейной скорости оконечностей судна. С этой целью при швартовке в дополнение к носовой четырехлучевой системе в кормовой части подключается к измерениям дополнительно двухлучевая система, ориентированная перпендикулярно к диаметральной плоскости судна. В этом случае измерительная система рассматривается как шестилучевой доплеровский гидроакустический лаг.

Таким образом измерение абсолютной скорости судна может быть осуществлено гидроакустическим лагом, имеющим следующую блок-схему (см. рис.1.4).

1. Акустическая система лага обеспечивает излучение под определенным углом к грунту мощного, сильно направленного акустического сигнала и прием отраженного от грунта сигнала. Она состоит из вибраторов, число которых соответствует числу лучей системы.

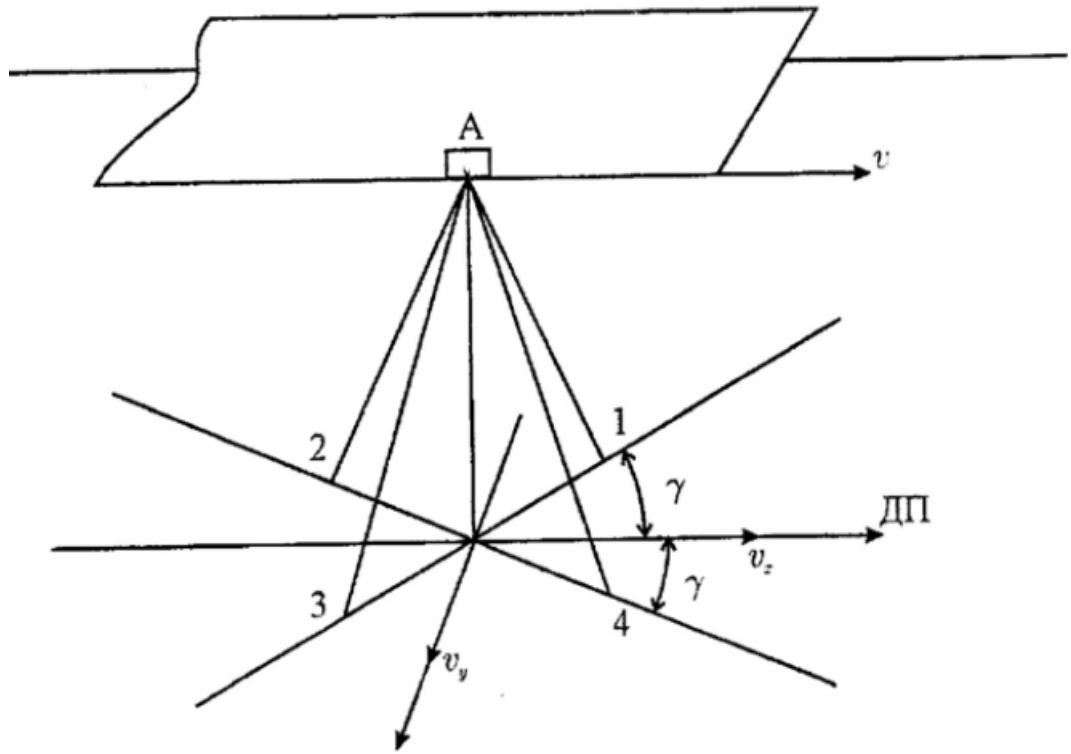


Рис.1.3.

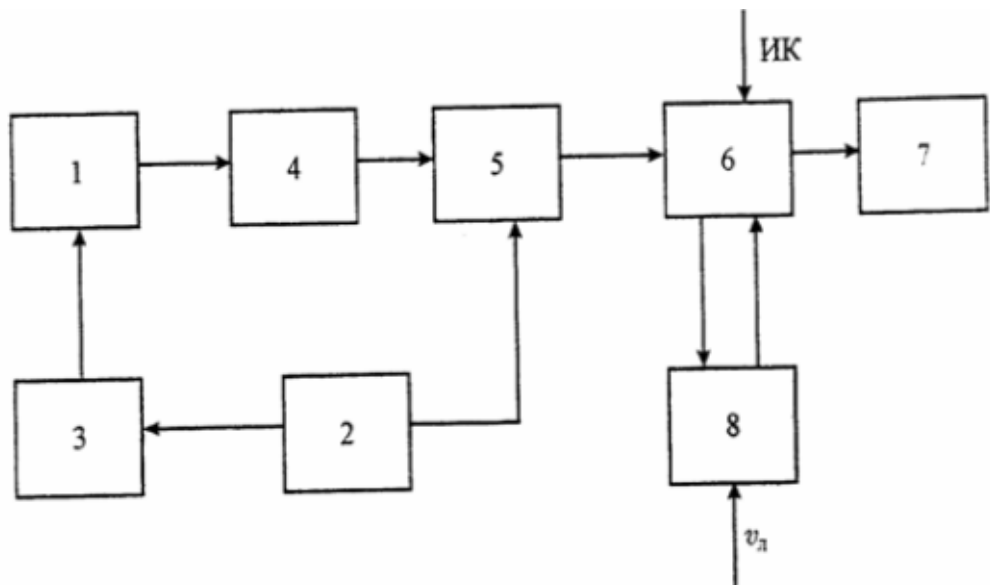


Рис.1.4.

2. Генератор служит для создания электрических колебаний вибратора заданной частоты и мощности. Вибраторы акустической системы подключены к генератору с помощью коммутационного устройства 3, переключающего вибраторы с режима "Излучение" на режим "Прием". Принятый сигнал, отличающийся от частоты генератора, поступает в усилитель 4, а затем в измеритель частоты 5 (блок выделения доплеровской частоты), куда поступает также частота генератора. Доплеровская частота преобразуется в электрическое напряжение, пропорциональное продольной и поперечной составляющими скорости судна. Для получения полной скорости судна сигнал поступает в векторный построитель 6, где осуществляется геометрическое суммирование указанных составляющих скорости. Для получения полной скорости судна в горизонтной системе координат в векторный построитель вводятся данные о курсе от гирокомпаса. Выработанное векторным построителем значение скорости поступает в указатель скорости 7.

В гидроакустическом лаге целесообразно иметь и автоматическое запоминающее устройство 8 (ЗУ), служащее для запоминания скорости течения. Для этого в запоминающее устройство поступают значения абсолютной скорости от гидроакустического лага и относительной скорости от измерителя относительной скорости. Если ДГАЛ выходит из строя, ЗУ, работая по "памяти", выдает значение скорости течения в векторный построитель, который, геометрически сложив эту скорость со скоростью относительного лага, выдает абсолютное значение скорости судна.

1.2.2. Элементы теории лага

Как уже отмечалось, для однолучевого ДГАЛ при движении источника и приемника колебаний относительно отражающей поверхности (грунта) частота принятого сигнала будет иметь вид:

$$f_{np} = f_0 \cdot \frac{c + v \cos \theta}{c - v \cos \theta} = f_0 \cdot \frac{1 + v \cos \theta / c}{1 - v \cos \theta / c}$$

Или разложим это выражение в ряд:

$$f_{np} = f_0 \cdot \left(1 + \frac{2v \cos \theta}{c} + \frac{2v^2 \cos^2 \theta}{c^2} + \dots \right)$$

Находя доплеровский сдвиг частоты, как $f_{g1} = f_{np} - f_0$, убеждаемся, что для однолучевого лага этот сдвиг в зависимости от скорости носит нелинейный характер, т.е.

$$f_{g1} = f_0 \cdot \left(\frac{2v \cos \theta}{c} + \frac{2v^2 \cos^2 \theta}{c^2} + \dots \right)$$

Для доплеровского радиолага допущение $v \ll c$ было допустимым и зависимость доплеровского сдвига от скорости принималась линейной, а для доплеровского гидроакустического лага это допущение неправомерно. В современных ДГАЛ устранение нелинейности достигается за счет использования двухлучевой антенной системы (схема «Янус»). При этом доплеровский сдвиг частоты определяется как разность частот, принятых по носовому 1 и кормовому 3 лучам, имеющим следующие формы записи:

$$f_1 = f_0 \cdot \left(1 + \frac{2v \cos \theta}{c} + \frac{2v^2 \cos^2 \theta}{c^2} + \dots \right),$$

$$f_3 = f_0 \cdot \left(1 - \frac{2v \cos \theta}{c} + \frac{2v^2 \cos^2 \theta}{c^2} + \dots \right)$$

откуда

$$f_{g13} = f_1 - f_3 = 4f_0 v \cos \theta / c = k \cdot v$$

где $k = 4f_0 \cos \theta / c$ - скоростная чувствительность лага, характеризующая приращение доплеровской частоты при изменении скорости на один узел.

Отсюда получаем выражение для скорости:

$$v = \frac{f_{g13}}{4f_0} \cdot \frac{c}{\cos \theta}$$

Использование двухлучевых симметричных антенных систем позволяет по сравнению с однолучевой системой повысить в 2 раза «К» и значительно уменьшить погрешности, вызываемые креном, дифферентом и качкой. При ориентации лучей в нос и корму судна можно измерять только продольную составляющую скорости в горизонтальной плоскости.

Для измерения двух составляющих скорости используются, как уже отмечалось многолучевые доплеровские системы.

При диаметрально-гравезном (ортогональном) расположении с помощью пары лучей нос – корма определяется продольная составляющая скорости, а с помощью лучей правый борт – левый борт – поперечная составляющая скорости:

$$v_x = \frac{f_{g13}}{4f_0} \cdot \frac{c}{\cos \theta}$$

$$v_y = \frac{f_{g42}}{4f_0} \cdot \frac{c}{\cos \theta}$$

где

$$f_{g13} = f_1 - f_3 \quad ; \quad f_{g42} = f_4 - f_2$$

При этом путевая скорость и угол сноса могут быть найдены из выражений:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

$$\beta = \arctg \frac{v_y}{v_x} = \arctg \frac{f_{g42}}{f_{g13}}$$

Для случая X-образного расположения лучей разность частот по соответствующим каналам определяется из следующих выражений:

$$f_{g13} = f_1 - f_3 = \frac{4f_0}{c} \cdot (v_x \cos \theta \cos \gamma - v_y \cos \theta \sin \gamma)$$

$$f_{g42} = f_4 - f_2 = \frac{4f_0}{c} \cdot (v_x \cos \theta \cos \gamma + v_y \cos \theta \sin \gamma)$$

Решая совместно эти уравнения, можно найти:

$$v = \frac{c \cdot (f_{g13} + f_{g42})}{8 \cdot f_0 \cos \theta \cos \gamma \cos \beta}$$

$$\beta = \arctg \left[\frac{f_{g42} - f_{g13}}{f_{g42} + f_{g13}} \cdot c \cdot \operatorname{tg} \gamma \right]$$

В реальных доплеровских лагах антенный луч имеет конечную ширину и облучает участок отражающей поверхности, содержащий большое количество случайно распределенных элементарных отражателей.

Элементарные сигналы, отраженные от каждого из них, имеют случайные начальные фазы. Амплитуда каждого элементарного сигнала меняется при

движении судна вследствие изменения положения отражателя относительно оси диаграммы направленности антенны. Углы, под которыми с борта судна визируются отдельные отражатели, отличаются друг от друга в пределах лепестка диаграммы направленности, что приводит к различию доплеровских сдвигов отдельных элементарных сигналов. Величина доплеровского сдвига каждого элементарного сигнала при движении судна монотонно изменяется вследствие изменения проекции скорости судна на направление отражателя (см. рис.1.5). В результате принятый антенной сигнал, формируемый как сумма независимых элементарных отраженных сигналов, определяется не одной фиксированной частотой, а непрерывным спектром частот (доплеровским спектром). Положение этого спектра на оси частот относительно частоты излучения характеризуется средней доплеровской частотой $f_{g,cp}$, определяемой как разность центральной частоты f_y спектра и частоты излучения f_0 (см.рис.1.6).

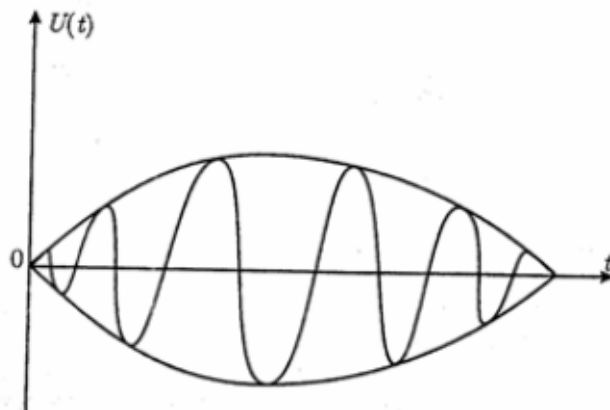


Рис. 1.5

Центральная частота спектра соответствует доплеровскому сдвигу для угла наклона оси диаграммы направленности антенны.

$$\Delta f_g = f_{g1} - f_{g3} = \frac{2v}{c} \cdot f_0 \cdot \cos\left(\theta - \frac{\Delta\theta}{2}\right) - \frac{2v}{c} \cdot f_0 \cdot \cos\left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right) = 4 \cdot \frac{v}{c} \cdot f_0 \cdot \sin\theta \sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right)$$

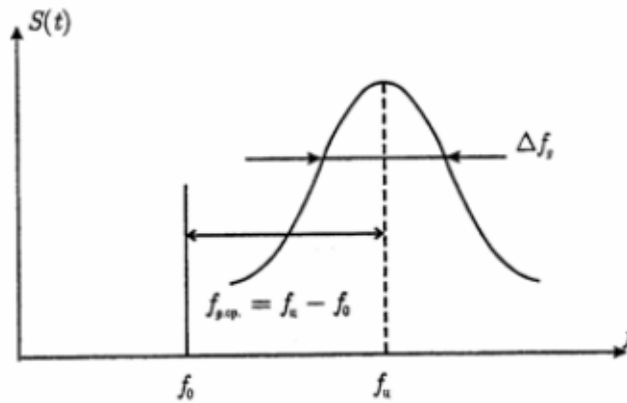


Рис.1.6

Ширину доплеровского спектра приближенно находят как разность доплеровских сдвигов частот для крайних направлений, ограничивающих антенный луч,

где Δf_g - ширина доплеровского спектра частот на уровне половинной мощности;

$\Delta\theta$ - ширина диаграммы направленности антенны на уровне 0,7.

Или после несложных преобразований получим:

$$\Delta f_g = f_0 \cdot \operatorname{tg}\theta \cdot \Delta\theta;$$

$$\frac{\Delta f_g}{f_g} = \operatorname{tg}\theta \cdot \Delta\theta$$

Так для $\theta = 60^\circ$ и $\Delta\theta = 3^\circ$ относительная ширина спектра составляет около 10%.

Таким образом, отраженный сигнал представляет собой шумоподобный сигнал со сравнительно узкополосным спектром. Для определения скорости судна необходимо с заданной точностью измерить среднюю доплеровскую частоту. В дальнейшем под доплеровской частотой (или доплеровским сдвигом частот) понимается именно средняя доплеровская частота.

1.2.3. Погрешности доплеровских лагов

Для того, чтобы определить скорость судна с помощью ДГАЛ, необходимо с высокой точностью измерить среднюю частоту доплеровского спектра. Однако

абсолютно точно измерить среднюю частоту спектра невозможно, она имеет погрешности.

Флюктуационная погрешность

Этот вид погрешности обусловлен следующими основными причинами:

1. Не когерентность принятого эхо-сигнала (флюктуации амплитуды, фазы и частоты), определяемая шириной спектра доплеровских частот. Эта погрешность имеет место при любом отношении сигнал/шум. При большом отношении данная погрешность определяет инструментальную погрешность лага. Кроме того, ее значение зависит от параметров антенной системы и от времени усреднения принятых эхо-сигналов.

При оценке погрешности измерения средней доплеровской частоты предполагается, что мгновенные значения частоты доплеровского сигнала распределены по нормальному закону, а СКП единичного измерения частоты σ равна половине ширины доплеровского спектра $\sigma = \Delta f_g / 2$.

Если производится усреднение результатов измерений за время T , то согласно правилам статистической обработки результатов измерений СКП уменьшается в \sqrt{N} раз:

$$\sigma_{f_g} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = \frac{\Delta f_g}{2\sqrt{N}}$$

где N - число статистических независимых измерений частоты за время T .

Это число можно найти, если известен интервал корреляции мгновенных значений частоты доплеровского сигнала:

$$N = \frac{T}{\tau}$$

Интервал корреляции в данном случае описывается приближенным выражением:

$$\tau = \frac{1}{2\Delta f_g}$$

и число независимых измерений составляет:

$$N = 2\Delta f_g T$$

С учетом последнего выражения формула СКП примет вид:

$$\sigma_{f_g} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta f_g}{T}}$$

Переходя к относительным погрешностям, можно записать:

$$\frac{\sigma_{f_g}}{f_g} = \frac{\sigma v}{v} = \frac{1}{2\sqrt{2} \cdot f_g} \cdot \sqrt{\frac{\Delta f_g}{T}}$$

или в частном случае, когда антенный луч ориентирован в ДП судна

$$\frac{\sigma_{f_g}}{f_g} = \frac{\sigma v}{v} = \sqrt{\frac{\lambda \sin \theta \cdot \Delta \theta}{4 \cos \theta \cdot \sqrt{vT}}}$$

В общем случае среднюю квадратическую флюктуационную погрешность измерения средней доплеровской частоты можно представить в виде

$$\frac{\sigma_{f_g}}{f_g} = \frac{\sigma v}{v} = \frac{k}{2\sqrt{2} \cdot f_g} \cdot \sqrt{\frac{\Delta f_g}{T}}$$

где $k > 1$ — параметр, зависящий от отношения сигнал/шум и схемы построения измерителя частоты.

Для современных ДГАЛ значение этой погрешности находится в пределах 0,1-0,3%. Если использовать, допустим, СВЧ колебания, то при $f_0 = 1$ мГц и $T=1$ с относительная погрешность составляет 0,028%, а при $f_0=2$ мГц-0,014%.

При работе лага в импульсном режиме, а это основной режим работы лага, происходит расширение спектра излученного сигнала, что вызывает появление дополнительной погрешности вида:

$$\Delta f_u = \frac{1}{4} T_u,$$

где T_u - длительность импульса.

2. Помехи на входе приемника, обусловленные гидродинамическим шумом и собственным шумом приемника. При этом, оценка влияния этих факторов на точность лага имеет смысл только в том случае, когда отношение сигнал/шум не менее единицы. Величина этой погрешности помимо параметров антенной системы и скорости судна определяется постоянной времени фильтра и частотой

излучения. Так при $T_\phi = 1$ с и $f_0 = 1$ мГц погрешность составляет 0,12%, а при $f_0 = 2$ мГц - 0,06%. С учетом постоянной времени фильтра время усреднения определяется как $T = T_\phi \cdot n$, где n -скважность принятого сигнала. В этом случае при скважности, равной 3, флюктуационная погрешность измерения увеличивается в \sqrt{n} раз и на частотах 1 и 2 мГц составляет соответственно 0,048% и 0,024%.

С уменьшением скорости движения относительная погрешность увеличивается, но при этом будет уменьшаться абсолютная погрешность, пропорциональная \sqrt{v} .

Погрешность за отклонение скорости звука в среде

В расчетных формулах ДГАЛ присутствует значение скорости звука в среде, которое принимается равным $c = 1500$ м/с. Как известно, фактическое значение скорости звука в реальных условиях изменяется в зависимости от температуры воды, ее солености и плотности, достигая наибольшего отклонения до $\pm 4-5\%$. Следовательно, и погрешность измерения скорости судна доходит до 4-5%. Величина погрешности может быть рассчитана по формуле:

$$\delta v_c = \frac{\Delta c}{c},$$

где Δc - отклонение реальной скорости звука относительно расчетной. Так как величина этой погрешности существенно влияет на точность измеряемой информации, то эксплуатируемые ДГАЛ имеют специальные корректирующие устройства. Коррекция может вводиться с помощью расчета действительной скорости звука по специальным эмпирическим формулам с учетом информации от датчиков температуры, солености и т.д. Погрешность коррекции при этом составляет примерно 0,1%.

Кроме того, эффективной считается коррекция за счет применения частотно-независимых антенн.

Такие антенны представляют собой линейные решетки, состоящие из отдельных преобразователей, обладающих слабой направленностью. Питание каждого преобразователя осуществляется с небольшим сдвигом по фазе $\Delta\psi$.

Как известно, регулировать направленность линейной решетки можно не только числом и рациональным размещением элементов, но и с помощью так называемых задерживающих цепей. В этом случае решетка называется компенсированной.

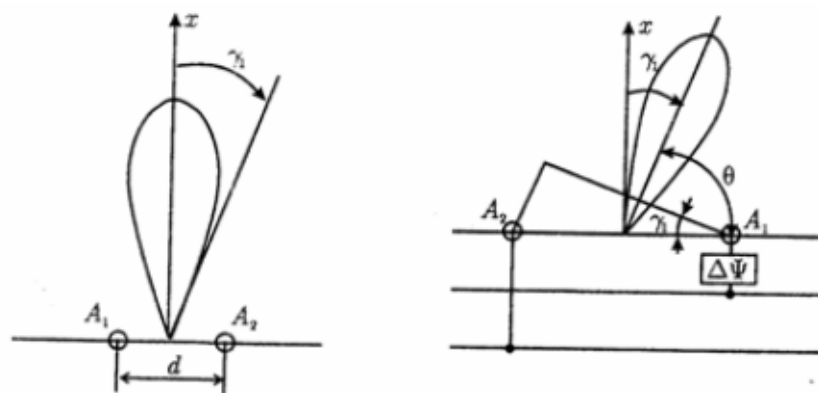


Рис.1.7.

Предположим (см. рис.1.7), что на выходе элемента А включена электрическая задержка $\Delta\psi$. При наличии угла γ_1 между электрическими сигналами возникает сдвиг по фазе вида:

$$\psi_1 = \frac{2\pi d}{\lambda} \cdot \sin \gamma_1$$

($\sin \gamma_1 = \frac{\lambda}{d}$; γ_1 - направление на первый минимум звуковой энергии).

Фаза любого гармонического колебания определяется выражением:

$$\psi_0 = \omega t = \frac{2\pi c t}{\lambda}$$

Если время t электрической задержки рассчитать по формуле:

$$t = \frac{\alpha \sin \gamma_1}{c},$$

то сдвиг фазы выходного сигнала будет иметь вид:

$$\Delta\psi = \frac{2\pi d \sin \gamma_1}{\lambda}$$

Сравнивая выражения $\Delta\psi$ и ψ_1 убеждаемся, что наличие электрической задержки $\Delta\psi$ обеспечивает полную компенсацию разности фаз между сигналами $\Delta\psi$ равносильно повороту антенны на угол γ_1 . При работе элементов A_1 и A_2 в режиме излучения фазовая задержка обеспечивает подключение элемента A_1 с некоторым запаздыванием по времени. В этом случае направление максимума излучаемой энергии определяется следующим выражением:

$$\cos \theta = \frac{\Delta\psi \cdot \lambda}{2\pi \cdot a} ; \quad \lambda = \frac{c}{f_0}$$

Если выбрать $\Delta\psi = \pi$, $a = \lambda_0 = \frac{c_0}{f_0}$, то в случае когда $c = c_0$, угол $\theta = \theta_0$ - определяется выражением:

$$\cos \theta_0 = \frac{\pi a}{2\pi \cdot a} = \frac{1}{2} ; \quad \theta_0 = 60^\circ$$

При отклонении скорости звука от расчетной ($c \neq c_0$), имеем $\cos \theta = \frac{c}{2f_0} ; \quad a = c/2 \cdot c_0$.

Подставляя этот $\cos \theta$ в формулу ДГАЛ $f_g = 2vf_0 \cos(\frac{\theta}{2})$,

имеем $v = af_g$,

где $a = \frac{c_0}{f_0}$ - расстояние между элементами антенны.

Это выражение показывает, что применение частотно-независимых антенн позволяет исключить влияние скорости звука в среде на показания доплеровского лага.

Физическая сущность этого способа заключается в следующем. Как следует из выражения $\cos \theta$, при изменении c автоматически изменяется угол θ , под которым происходит излучение сигнала. Это приводит к изменению значения f_g , т.е. в показания лага вводится некоторая поправка, компенсирующая погрешность, возникшую вследствие изменения скорости звука.

Погрешность за изменение угла наклона луча

Из формулы ДГАЛ (однолучевого) следует, что его относительная погрешность при изменении угла θ (дифферент, килевая качка) определяется выражением:

$$\delta v_{\theta 1} = \operatorname{tg} \theta \cdot \Delta \theta$$

где $\Delta \theta$ - изменение угла θ . Для угла $\theta = 60^\circ$ и изменении $\Delta \theta$, допустим на 1° , 2° , 3° , погрешность измерения скорости, соответственно составит примерно 3%, 6% и 9,1%. Это еще раз подчеркивает неэффективность использования однолучевого ДГАЛ. Для двухлучевого ДГАЛ значение относительной погрешности при изменении угла θ имеет вид:

$$\delta v_{g2} = \sec \Delta \theta - 1$$

Расчет по этой формуле для тех же значений $\Delta \theta$ соответственно дает значения погрешностей 0,2%; 0,06% и 0,1%. Аналогично установка двух лучей в плоскости миделя значительно уменьшает погрешность измерения скорости на бортовой качке.

Помимо рассмотренного фактора на точность измерения скорости влияет и неточная ориентация акустических антенн в судовой системе координат. Это приводит к тому, что фактические значения углов ориентации лучей, отличаются от расчетных, что приводит к отличию масштабных коэффициентов, используемых при вычислении скорости, от их истинных значений. Как правило, эти причины приводят к появлению систематических погрешностей, которые определяются при испытаниях лага на меркой линии и учитываются затем в блоке коррекции.

1.3. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ ЛАГ

1.3.1. Общие замечания

В настоящее время большое внимание уделяется так называемым обзорно-сравнительным методам навигации (картосчислительный метод навигации),

который может быть реализован с помощью корреляционноэкстремальных навигационных систем (КЭНС). Эти системы позволяют автономно, с высокой точностью, независимо от времени функционирования определять практически все параметры движения судна.

Впервые этот метод был применен в 1944 г. в США для целей авиации. Совмещение текущей карты местности и эталонной карты местности, где мерой совпадения являлось значение взаимной корреляционной функции сигналов от этих карт, служило основой для определения параметров движения объекта (корреляция - вероятностная или статистическая зависимость между случайными величинами). Для этих целей используется физическое поле Земли (радиолокационное, оптическое, инфракрасное, глубино-высотометрическое, радиометрическое, геомагнитное, гравитационное, астронометрическое).

Одним из практических приложений этого метода является корреляционно-экстремальный метод измерения скорости. Значительный вклад в создание корреляционного лага был сделан в 70-е годы. Достаточно детальные исследования по оценке перспектив использования корреляционного метода для измерения скорости морских объектов были выполнены в США компанией "Дженерал электрик". Координацию исследований и техническую помощь осуществляла корпорация "Сперри". В 1975 г. были успешно проведены океанские испытания.

К 1973 г. относятся первые сообщения о разработке шведской фирмой "Юнгер инструмент" первого промышленного образца корреляционного лага "SAL-ACCOR" для морских судов.

В 1977 г. группой научных сотрудников Акустического Института АН СССР был предложен, а затем и испытан в океанских условиях корреляционный лаг, обеспечивающий повышенную точность измерения скорости судна в условиях его движения с боковым сносом.

В 1979 г. появились рекламные сообщения компании "Дженерал электрик" о разработке промышленного образца корреляционного лага "Quo Vadis" (торговая марка компании) для морских объектов различного назначения. Рекламуемому

лагу приписываются высокие технические характеристики, в том числе возможности измерения v_x, v_y и v_z при любых глубинах под килем по сигналам от дна и в условиях качки. В этот же период появилось сообщение о модели корреляционного лага MX-810 (США), имеющей дальность действия по глубине 5100 м.

Таблица 1.2

Параметр	Лаг (фирма, страна)		
	SAL-ACCOR Юнгер- инструмент Швеция	Quo- Vadis Дженерал электрик США	MX-810 США
Частота излучаемых сигналов, кГц	150	12	18
Возможность работы по сигналам объемной ревербера- ции (режим относительного лага)	Предусмотрена по горизонтам 8-12 и 20-60 м	Предусмотрена	Предусмотрена
Измеряемые величины	v_x, H	v_x, v_y, v_z, H	v_x, v_y, H
Диапазон измерения скорости	-8 до + 40 уз	—	—
Точность измерения скорости	$\pm 0,1$ уз	0,02% при $v < 10$ уз 0,2% при $v > 10$ уз	погр. опред. расст. 0,4%
Время сглаживания данных о скорости	1,8с		
Рабочая глубина по килем, м	до 200	до 6 000	До 5 000

Учет изменения скорости звука в среде	не требуется	не требуется	не требуется
Диаметр антенны, мм	82 x 378		305
База, мм	35	-	-
Масса комплекта	30,8-42 кг	-	-
Стоимость, тыс. долл.	10,6	-	-

Данный тип измерителя абсолютной скорости, к сожалению, до сих пор не нашел практического воплощения в нашей стране в виде отечественного прибора для судов ММФ. Это направление исследований не нашло отражения и в плане НИР ММФ, хотя рассматриваемый измерительный комплекс позволяет определить не только абсолютную скорость, но и одновременно получать информацию о глубине. При глубинах свыше расчетных лаг автоматически переводится в режим измерения относительной скорости.

Основные тактико-технические данные этих лагов приведены в таблице 1.2.

1.3.2. Автокорреляционный метод определения скорости

В автокорреляционных измерителях параметров движения скорость объекта определяется по информации от одного приемника, для чего используется автокорреляционная функция входного сигнала. При этом существует однозначная зависимость между скоростью движения и ординатой автокорреляционной функции при некотором фиксированном значении запаздывания. Может быть использована и зависимость от скорости абсциссы точки пересечения заданного уровня автокорреляционной функции (см.рис.1.8., где $r_{11}(\tau)$ - значение автокорреляционной функции, τ - временное запаздывание).

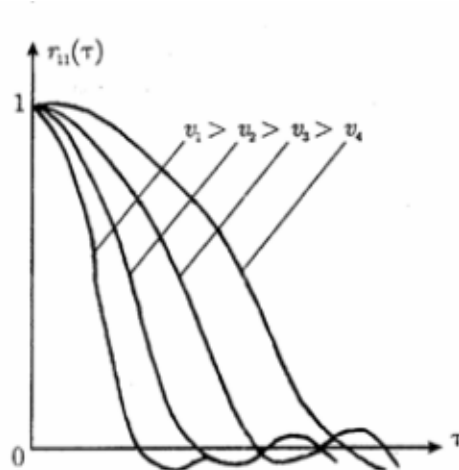


Рис.1.8.

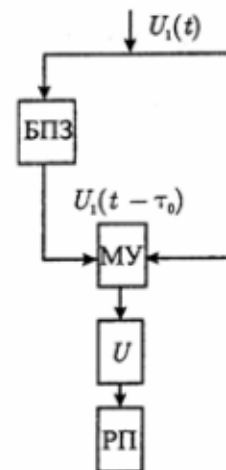


Рис.1.9.

Аналитические зависимости с учетом ряда ограничений наглядно иллюстрируют сказанное выше. Так, например, если слабо расчлененный шельф,

мелкомасштабные неровности, то коэффициент автокорреляций огибающей эхосигналов имеет вид:

$$r_{11}(\tau) = \exp[-2(ktg\delta)^2 v^2 \tau^2]$$

где $k = 2\pi/\lambda$ - волновое число излучаемой звуковой волны;

δ - средний квадратичный угол наклона неровностей дна;

v - скорость движения объекта;

τ - время запаздывания.

Для измерения скорости судна относительно дна служит специальное устройство, вычисляющее коэффициент автокорреляции. Принципиальная блок-схема такого устройства показана на рис. 1.9, где приняты следующие обозначения:

БПЗ - блок постоянной задержки на величину; МУ - множительное устройство, формирующее сигнал, пропорциональный $r_{11}(\tau_0)$;

И- интегратор, выполняющий роль сглаживающего звена;

РП - регистрирующий прибор, шкала которого отградуирована в единицах скорости.

Из принципа работы рассмотренного метода измерения скорости движения судна следует, что информация о модуле как абсолютной, так и относительной скорости может быть получена с помощью одной приемно-излучающей антенной системы (одновибраторный эхолот). Но при этом данная измерительная система требует стационарности сигнала, предварительной тарировки лага за грунт и постоянной коррекции за изменение характеристик грунта.

1.3.3. Взаимокорреляционный метод измерения скорости

Примером корреляционно-экстремальной навигационной системы без памяти могут служить корреляционные измерители скорости движения, в которых установлены в антенной системе, как минимум, два приемных элемента, разнесенных на величину базы S . Принцип работы такой системы основан на измерении временного запаздывания между случайными сигналами, принятыми

антеннами, установленными по линии движения судна. Суть этого метода наглядно иллюстрируется на рис. 1.10 и 1.11.

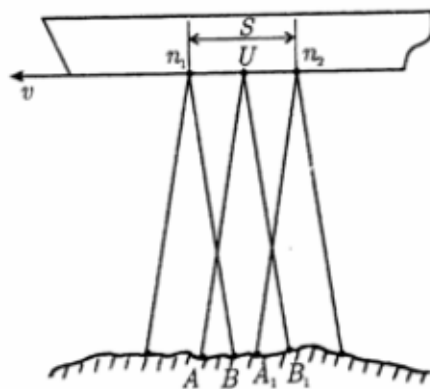


Рис.1.10.

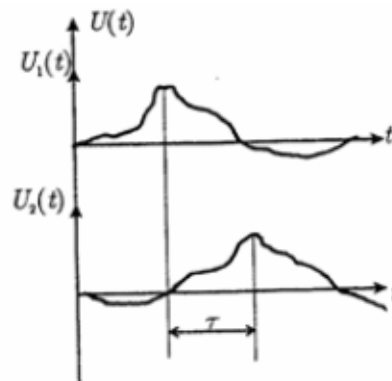


Рис.1.11.

На судне установлена излучающая антенна (I) и две приемные антенны (Π_1 , Π_2), ориентированные по продольной оси судна (в реальных конструкциях, как правило, используют две антенны, работающие одновременно на излучение и отдельно на прием). В момент начала измерений первая (носовая) приемная антенна Π_1 воспринимает эхо-сигнал (огибающая $(U_1(t))$) от элементарных рассеивающих площадок дна, ограниченных областью перекрытия диаграммы излучающей и приемной антенн (участок AB), а на второй (кормовой) приемной антенне Π_2 в этот момент воспринимаются эхо-сигналы (огибающая $(U_2(t))$) от участка $A_1 B_1$. Нетрудно заметить, что отражающая поверхность AB будет воспроизведена практически без искажений (при отсутствии сноса) на антенне Π только тогда, когда судно пройдет путь, равный половине базы, т.е. сместится на величину $S/2$. В динамике (см. рис.1.11) закон изменения эхо-сигнала во времени на выходе второй приемной антенны $U_2(t)$ будет подобен закону изменения эхо-сигнала на выходе первой приемной антенны $U_1(t)$, но сдвинут по времени на величину временного запаздывания τ . Измеряя временное запаздывание (временную задержку), можно определить скорость движения судна по линии ориентации приемных антенн, используя зависимость вида $v = S/2\tau$. Процесс измерения может быть ручной при соответствующей обработке эхограмм $U_1(t)$ и

$U_2(t)$ или автоматический с помощью специального устройства-коррелятора. Существующее многообразие конструктивных решений корреляторов позволяет с достаточно высокой степенью точности измерять τ , т.е. определять положение максимума коэффициента взаимной корреляции между сигналами $U_1(t)$ и $U_2(t)$ на оси временной задержки.

Принципиальная схема коррелятора приведена на рис. 1.12.

Из этой схемы следует, что сигналы $U_1(t)$ и $U_2(t - \tau_{T12})$ после усилителей У-1, У-2 поступают на усилители-ограничители УО-1, УО-2. С выходов этих усилителей клипированные сигналы $U_1(t)$ и $U_2(t - r_{T12})$ (см. рис. 1.13) поступают на первые входы схем совпадения СС-1, СС-2, вторые входы которых подключены к генератору тактовых импульсов (ГТИ). ГТИ формирует непрерывно короткие импульсы $\delta(t)$ длительностью τ_U и периодом следования $T_U \gg \tau_U$. На выходах схем совпадения импульсы $\delta_1(t)$ и $\delta_2(t - \tau_{T12})$ будут только в те отрезки времени, когда $U_1(t) > 0$ и $U_2(t - r_{T12}) > 0$. Последовательность импульсов (t) подается на последовательный регистр сдвига (РС), выполняющий роль блока регулируемой задержки (БРЗ). Регистр сдвига имеет два выхода, с которых снимаются две последовательности импульсов. Величина задержки $\pm \Delta\tau$, вносимая РС, определяется произведением периода тактовых импульсов T_u на число $N \pm n$ ячеек сдвига:

$$\tau - \Delta\tau = T_u \cdot (N - n) \text{ и } \tau + \Delta\tau = T_u \cdot (N + n).$$

Схемы совпадения СС-3 и СС-4 выполняют роль множительного устройства, с выходов которых последовательности импульсов, содержащих общее количество импульсов за определенный промежуток времени, поступают на счетчики импульсов СЧ-1 и СЧ-2. Это общее количество импульсов будет тем больше, чем ближе величина задержки соответствующего канала к τ_{T12} . Если $\tau = \tau_{T12}$, то число импульсов в обоих каналах будет одинаковым, если же $\tau \neq \tau_{T12}$, то и число импульсов в каналах будет разным. СЧ-1 и СЧ-2 со взаимным сбросом выполняют функции интегрирования и сравнения и ведут подсчет импульсов одновременно. После переполнения каждый счетчик выдает импульс сброса на

свою схему и на схему другого счетчика, а также на схему управления двигателем ДВ отработки значения τ_{T12} . После сброса работа счетчика возобновляется. При $\tau \neq \tau_{T12}$ счетчик канала, где задержка ближе к τ_{T12} , будет заполняться быстрее и выдавать импульсы на соответствующий вход схемы управления двигателем ДВ. Двигатель срабатывает, изменяя частоту ГТИ и управляя, тем самым, величиной задержки m регистра сдвига.

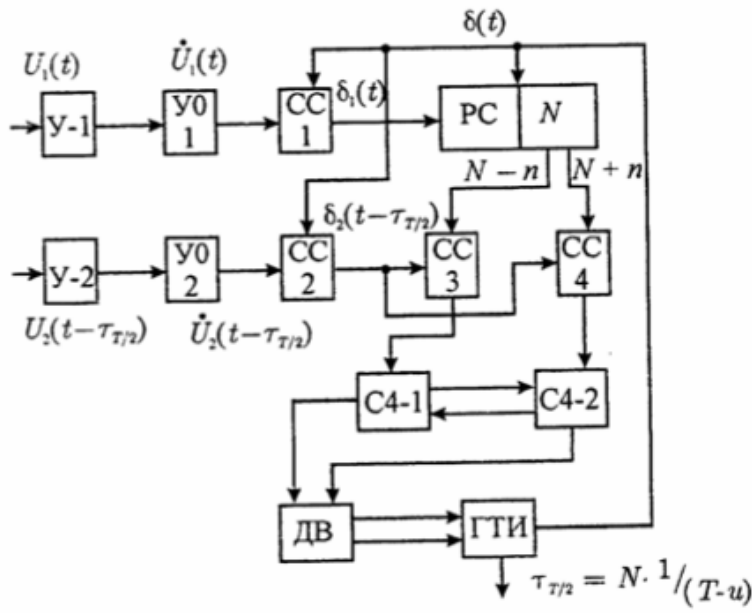


Рис.1.12

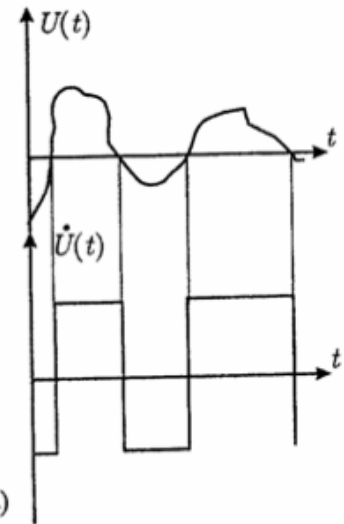


Рис.1.13.

Направление вращения ДВ зависит от того, с какого СЧ поступили импульсы на вход системы управления двигателем. При $\tau = \tau_{T/2}$ количество импульсов с

выходов обеих систем совпадения будет одинаковым, сигнал ошибки в этом случае равен 0, оба счетчика будут переполняться одновременно, в силу чего положение двигателя отработки в среднем будет неизменным. Тогда транспортное запаздывание τ_{T12} в рассматриваемой системе будет определяться из равенства

$$\tau_{T12} = NT_u = \frac{N}{f_u},$$

т.е. будет обратно пропорционально частоте F_u следования тактовых импульсов. Так как τ_{T12} обратно пропорционально скорости судна, следовательно, скорость судна будет пропорциональна частоте тактовых импульсов, которая в дискретном виде индицируется на цифровом индикаторе.

Рассмотренный метод определения скорости при движении судна со сносом будет измерять не путевую скорость, а скорость по линии ориентации приемных антенн. При этом, измеряемое значение скорости будет завышенным, так как в измерениях участвует не база, а ее проекция на линию движения. Это в какой-то степени является недостатком приведенной измерительной системы, реализующей взаимокорреляционный метод определения скорости судна.

1.3.4. Авто-взаимокорреляционный метод измерения скорости

Как уже отмечалось выше для нахождения вектора абсолютной скорости судна необходимо иметь информацию о продольной и поперечной составляющих скорости. Для этого обычно используют две пары приемных антенн (в доплеровском лаге) или три приемных антенны. Аналогичным путем можно пойти и в корреляционных измерителях скорости.

В то же время интерес представляет рассмотрение вопроса определения параметров треугольника скоростей при использовании только двух приемных антенн, ориентированных, допустим, в диаметральной плоскости судна. Эта задача может быть решена с помощью авто-взаимокорреляционного метода обработки огибающей эхо-сигналов с выходов приемных антенн.

Как известно, коэффициент взаимной корреляции при движении судна со сносом имеет вид:

$$K_{xy} = \exp\{-a[(x_0 \sin \beta)^2 + (x_0 \cos \beta - v\tau)^2]\} \quad (1.1.)$$

$$\text{где } a = 2\pi(\Delta\lambda)^2 \frac{K}{\lambda^2};$$

$\Delta\lambda$ - эффективная ширина диаграмм направленности антенн в направлении движения;

$x_0 = S/2$ - половина расстояния между приемными антеннами;

K - параметр, характеризующий характеристики грунта;

λ - длина волны излучения;

τ - временная задержка;

v - скорость судна;

β - угол сноса.

Из приведенной зависимости может быть получено выражение для коэффициента автокорреляции (K_{xx}), если x_0 принять равным нулю (одна антенна). Рассмотрим ряд условий, воспользовавшись зависимостями для K_{xx} и K_{xy} .

1. При движении судна без сноса ($\beta = 0$) максимум коэффициента взаимной корреляции наступает, в соответствии с выражением (1.1), при выполнении условия $x_0 = v\tau$, откуда значение измеренной скорости принимает вид:

$v_u = x_0 / \tau_0$, где $\tau = \tau_0$ - значение временной задержки, при которой наступает максимум K_{xy} . (см.рис.1.14).

2. Запишем условие равенства K_{xx} значению K_{xy} при нулевом временном сдвиге ($\tau = 0$), т.е. $K_{xy}(\tau = 0) = K_{xx}$

$$\exp[-a(v\tau)^2] = \exp[-a(x_0)^2]$$

откуда $v = x_0 / \tau_1$, где v - модуль абсолютной (путевой) скорости, а $\tau_1 = \tau$ - значение временной задержки, при которой выполняется поставленное условие.

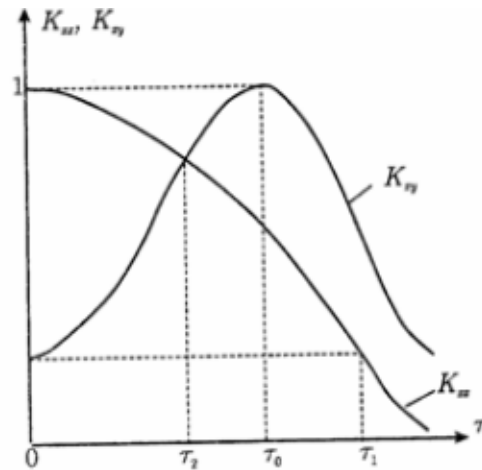


Рис.1.14.

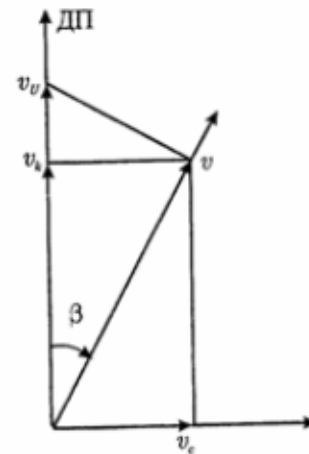


Рис.1.15.

3. Из условия равенства K_{xx} и K_{xy} можно записать, что:

$$(v\tau)^2 = x_0^2 - 2x_0v \cos \beta\tau + (v\tau)^2,$$

откуда

$$v_K = v \cos \beta = \frac{x_0}{2\tau_2},$$

где v_K - продольная (курсовая) составляющая скорости, а $\tau = \tau_2$ - значение временной задержки, при которой $K_{xx} = K_{xy}$.

Измеренные значения элементов треугольника скоростей (V_U, V, V_K) могут служить исходными данными (см. рис. 1.15) для расчета поперечной составляющей скорости судна (скорости сноса v_c) и угла сноса (β). Таким образом, приведенные аналитические зависимости подтверждают возможность решения задачи определения всех параметров треугольника скоростей с помощью двух приемных антенн.

1.3.5 Погрешности корреляционного лага

Структура погрешностей корреляционного лага имеет довольно сложный характер. Эта сложность определяется главным образом принципом измерения, т.е. обоснованием корреляционного способа определения скорости и особенностями проверки и регулировки лага.

Как известно, основную группу погрешностей составляют следующие погрешности:

1. Методические погрешности, к которым относятся погрешности, связанные с методом измерения скорости и определения угла сноса, а также с применением упрощенных формул для их определения (допущения, принятые при выводе формул). Методические погрешности возникают вне корреляционного измерителя скорости и обусловлены физической сущностью образования эхо-сигналов и принятым способом обработки информации.

2. Инструментальные погрешности, к которым относятся погрешности, возникающие при прохождении эхо-сигналов через передающий, антенный, приемный и измерительно-вычислительный тракты устройства, а также погрешности, обусловленные самим излучаемым сигналом (нестабильность излучаемой частоты и т.д.).

Следует отметить, что разделение погрешностей на методические и инструментальные несколько условно, так как величины методических погрешностей также зависят и от характеристик аппаратуры. Так, например, флюктуационные погрешности измерителя скорости обусловлены как физической сущностью образования эхо-сигналов, так и свойствами аппаратуры, и поэтому они относятся как к методическим, так и инструментальным.

Рассмотрим несколько подробнее эти погрешности.

Методические погрешности

1. Флюктуационная погрешность

Флюктуационная погрешность, как уже отмечалось, обусловлена случайным характером входного сигнала лага, а также случайным характером влияния помехи. В корреляционном измерителе мерой скорости является задержка

$\tau_0 = \frac{S}{2v}$ между двумя случайными сигналами. При этом сама задержка не является случайной величиной. Измерение этой задержки осуществляется путем слежения за положением на шкале времени максимума функции взаимной

корреляции принимаемых сигналов. Время, за которое вычисляется значение функции корреляции, ограничено. Это приводит к флуктуациям значений корреляционной функции, а, следовательно, к флуктуациям значений $\tau_{зад} = \tau_0$. Таким образом, флуктуационная погрешность ограничивает точность корреляционного лага и может быть оценена по формуле

$$\frac{\sigma_v}{v} = 0,3 \cdot \frac{(\lambda / \Delta\lambda)^{3/2}}{x_0 \sqrt{vT}}$$

где $x_0 = S/2$, λ - длина волны, $\Delta\alpha$ - ширина диаграммы направленности, v - скорость судна, T - время осреднения. Так при $\Delta\alpha = 20^\circ$, $f_0 = 2$ МГц, $x_0 = 9$ мм, $\tau_0 = 25$ мс, $T = 1$ с получим $\frac{\sigma_v}{v} = 0,07\%$. При скважности 3 эта погрешность увеличивается в 1,7 раза и составит 0,12% (при использовании импульсного режима работы). Эта погрешность может быть уменьшена выбором оптимального разноса антенн (x_0).

2. Погрешность ориентации антенной системы

Как уже отмечалось ранее, при несовпадении линии базы антенной системы и диаметральной плоскости судна, максимум корреляционной функции наблюдается при смещении судна не на расчетное расстояние $x_0 = S/2$, а на величину проекции этого расстояния на диаметральную плоскость, т.е. x_0^1 . Так как в вычислительное устройство введена величина x_0 , то для данной ситуации возникает погрешность в измерении скорости. При этом относительная погрешность лага всегда отрицательная, т.е. лаг показывает завышенную скорость. С учетом сказанного можно записать $x_0^1 = x_0 \cos\alpha$, где α - угол несовпадения осей ориентации. Тогда истинное значение скорости имеет вид $v_{И} = x_0^1 / \tau = x_0 \cos\alpha / \tau$, а лаговое (измеряемое) значение скорости $-v_{л} = x_0 / \tau$. Следовательно, относительная погрешность может быть определена из следующей зависимости $\Delta v / v = -(1 - \cos\alpha) \cdot 100\%$.

Нетрудно, по аналогии с рассмотренным случаем, сделать заключение и о том, что при движении судна с дифферентом за счет несовпадения линии базы с

горизонтальной плоскостью, будет возникать погрешность вида $\Delta v/v = -(1 - \cos\psi) \cdot 100\%$, где ψ - угол дифферента.

Если судно движется со сносом, то данная ситуация аналогична предыдущим рассуждениям, т.е. показания лага также будут завышены и погрешность измерения скорости может быть определена по формуле $\Delta v/v = -(1 - \cos\beta) \cdot 100\%$, где β - угол сноса.

При движении судна со сносом, имея одновременно дифферент, формула для расчета погрешности измерения скорости примет вид, $\Delta v/v = -(1 - \cos\beta \cos\psi) \cdot 100\%$. Кроме того, на точность показаний лага будут влиять и такие факторы, как изменение скорости судна, рыскание и циркуляция судна, качка и т.д. за счет изменения конструктивного значения базы, отличающейся под действием этих факторов от своего реального значения.

Инструментальные погрешности

К этому виду погрешностей можно отнести погрешности, обусловленные:

- неидентичностью амплитудных и фазовых характеристик каналов приемного тракта лага, в результате чего происходит смещение максимума корреляционной функции;

- нестабильностью частоты излучаемых колебаний;

- погрешностью самого коррелятора, осуществляющего автоматическое слежение за максимумом корреляционной функций. Так погрешность за отклонение фазовых характеристик приемного усилителя может быть представлена в виде

$$\frac{\Delta v_{\varphi}}{v} = \frac{\Delta\varphi \cdot \lambda}{2\pi l x} \cdot \cos\theta_{\min}$$

где $\Delta\varphi$ - различие в фазовых характеристиках каналов;

θ_{\min} - минимальный угол между направлением движения объекта и крайним углом характеристики направленности.

Следует отметить, что анализ точности корреляционных лагов представляет собой сложную задачу и суммарная погрешность обусловлена множеством

факторов. При этом необходимо учитывать характер рассмотренных выше погрешностей, их зависимость между собой, удельный вес каждой в зависимости от условий эксплуатации лага и др.

Так, например, для лага "Quo Vadis" на скоростях до 10 уз погрешность имеет абсолютный характер ($\Delta v = 0,02$ уз) и не зависит от скорости, а на скоростях выше 10 уз погрешность пропорциональна скорости ($\Delta v/v = 0,2\%$).

Следует отметить, что точность измерения пройденного судном расстояния, как правило, выше, чем точность измерения скорости.

1.4. Интерполяционный гидроакустический лаг

Рассмотренные корреляционные методы обработки эхо-сигналов обладают существенным недостатком - невозможностью определения скорости судна, стремящейся к нулю или равной нулю, так как измеряемая при этом временная задержка будет стремиться к бесконечности. Учитывая аппаратные возможности корреляционных измерителей скорости, в данных системах устанавливается минимально допустимое измеряемое значение скорости. В то же время в измерительном комплексе "SAL-ACCOR" приводится в технических характеристиках диапазон измеряемых скоростей от -8 до +40 узлов. В данной системе в интервале скоростей от -8 до +10 уз в диапазоне к взаимокорреляционному методу обработки эхо-сигналов использован интерполяционный метод. Суть этого метода заключается в следующем (см. рис.1.16).

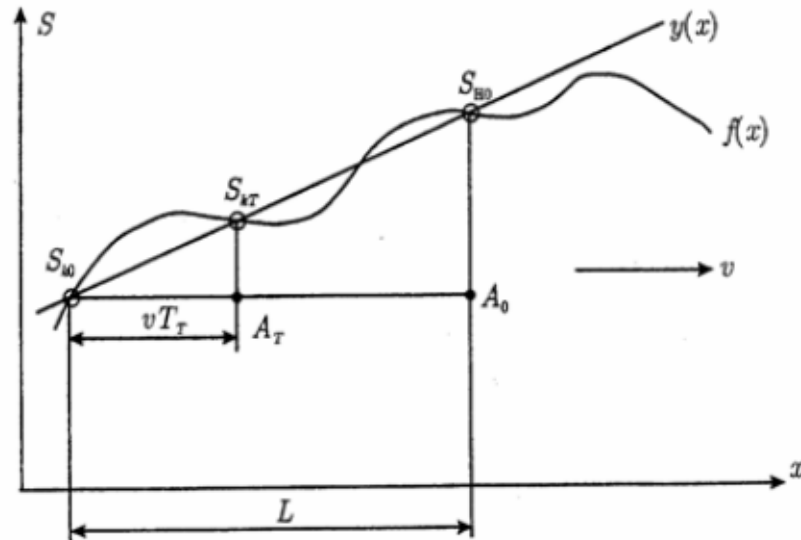


Рис. 1.1.6.

В начальный момент с помощью носового и кормового приемников, разнесенных на величину базы L , измеряются сигналы на пространственной функции $f(x)$ со значениями $S_{н0}$ и $S_{к0}$. По этим сигналам пространственная функция $f(x)$ воспроизводится в виде интерполяционной линии $y(x)$. Затем на кормовом приемнике с шагом по времени Δt_i измеряются текущие значения сигналов и, когда значение сигнала на пространственной функции $f(x)$ будет равно значению сигнала на интерполируемой линии, фиксируют время $T_T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$. За это время судно сместится на величину L . Из подобия треугольников $S_{н0} S_{к0} A_0$ и $S_{кТ} S_{к0} A_T$, следует, что:

$$\frac{S_{н0} - S_{к0}}{L} = \frac{S_{кТ} - S_{к0}}{T_T}, \text{ откуда } v = \frac{L}{T_T} \cdot \frac{S_{кТ} - S_{к0}}{S_{н0} - S_{к0}}$$

Приведенная формула лага показывает, что при скорости судна, равной нулю, $S_{кТ} = S_{к0}$, а при отрицательных скоростях (задний ход) $S_{кТ} < S_{к0}$. При аппаратурной реализации на скоростях, отличных от нуля, следящая система может реализовать условие измерения времени T_T , когда $S_{кТ} = S_{к0}$. В этом случае приведенная формула примет вид $v = L/T_T$. Но такой режим измерения применим для скоростей судна, отличающихся от нуля, так как этот режим аналогичен

корреляционному с присущим и ему недостатками. Дни алгоритма определения скорости, работающего при любых скоростях, характерна методическая погрешность, обусловленная тем, что в общем случае на момент времени T_T значение сигнала на пространственной функции $f(x)$ может не совпадать со значением сигнала на интерполируемой функции $y(x)$ на величину ошибки ε . Эта ошибка будет тем меньше, чем точнее $y(x)$ воспроизводит $f(x)$, т.е. чем выше порядок интерполирования.

1.5. Геоэлектромагнитный лаг

Геоэлектромагнитный измеритель скорости, как и индукционный лаг, по принципу работы основан на использовании явления электромагнитной индукции. Но в отличие от индукционного лага, в котором используется искусственно созданное с помощью источника, установленного на судне (ИППС), магнитное поле, в геоэлектромагнитном лаге индуцирование ЭДС происходит вследствие пересечения измерительным контуром силовых линий магнитного поля Земли. Измеряемая при этом скорость судна будет соответствовать скорости судна относительно Земли. Принцип работы такого измерительного устройства можно проиллюстрировать с помощью рисунка 1.17.

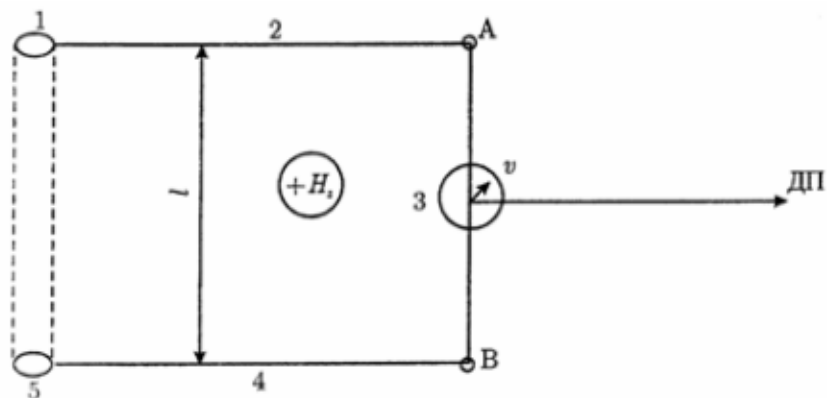


Рис.1.16

Допустим на судне в плоскости, перпендикулярной ДП судна, установлен измерительный проводник $AB = l$, с помощью которого измеряют ЭДС, возникающую при его движении относительно вертикальной составляющей

магнитного поля Земли (H_z). В этом случае скорость движения судна может быть определена из следующей зависимости:

$$v = \frac{E}{H_z \cdot l}$$

где E - ЭДС, индуцированная в проводнике АВ. Величина H_z (напряженность магнитного поля Земли) может быть получена с помощью соответствующих карт и пособий или с помощью специального устройства-магнитометра. Для измерения ЭДС необходимо, чтобы часть измерительного контура оставалась неподвижной относительно магнитного поля Земли. Таким участком измерительного контура является морская вода и грунт (дно моря). Контакт проводника АВ с морской водой обеспечивается с помощью электродов 1 и 5, удаленных от судна на длину буксируемых кабелей 2 и 4. Электроды 1 и 5 удаляются от корпуса судна с целью уменьшения влияния помех, обусловленных электрическими и магнитными полями судна. В такой системе измерительный прибор 3 покажет величину ЭДС, возникающую в проводнике АВ, которая пропорциональна абсолютной скорости судна. При этом измеряется только продольная составляющая вектора скорости судна. Действительно, если судно движется со сносом, то измерительный проводник будет пересекать силовые линии магнитного поля Земли под некоторым углом β . В этом случае измеряемая информация определяется из выражения:

$$E = vH_z L \cos \beta,$$

откуда

$$v_x = v \cos \beta = \frac{E}{H_z L}.$$

Принципиально такая измерительная система может быть использована и для определения поперечной составляющей вектора скорости судна. Для этого дополнительно устанавливаются еще два электрода с разной длиной буксируемых кабелей. В этом случае в дополнительном измерительном контуре определяется:

$$v_y = \frac{E_1}{H_z L_1}.$$

С учетом и определяется модуль вектора абсолютной скорости судна по формуле :

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

и его направление как :

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{v_y}{v_x}.$$

Из отечественных измерителей скорости известна модель ГМ-15, в которой расстояние между электродами 100 м, точность измерения скорости $\pm 10\%$, точность измерения направления течения $\pm 7^\circ$. Как правило, геоэлектромагнитные измерители используются в основном для определения скорости и направления течений.