

Layback

Позиционирование буксируемого
устройства по Layback

Rev.202106

Ivan V. Dmitriev

06.06.2020

Оглавление

Обзор	3
1 Положение буксируемого устройства по вертикали	5
2 Положение буксируемого устройства в горизонтальной плоскости	8
3 Положение буксируемого устройства в горизонтальной плоскости, с учетом течения	10
4 Определение составляющих вектора скорости течения.....	12
4.1 Определение вектора скорости течения на основе заглубления буксируемого устройства 12	
4.2 Определение вектора скорости течения при постоянстве направления скорости V_{SoG}	12
4.3 Определение вектора скорости течения при постоянстве модуля скорости V_{SoW}	14
4.4 Определение вектора скорости течения для произвольного случая	16
4.5 Общая методика определения вектора скорости течения	18
5 Процедура расчета позиции буксируемого устройства.....	19
Приложение 1. Сопоставление предложенного метода позиционирования, с методами, используемыми в навигационном программном обеспечении.....	21
Список литературы	25

Обзор

Пакет функций применяется для расчета положения устройства, буксируемого на гибком кабеле (layback). Для вычислений используется Dragging algorithm с добавлением «сегментов» для буксировочного кабеля и дополнительного учета скорости течения.

Метод расчета положения буксируемого устройства по layback, применяется, когда более точные системы позиционирования (USBL, lead/tail buoy with GPS) отсутствуют или работают недостаточно стабильно. В значительной части программного обеспечения, реализующего расчет позиции буксируемого устройства на основе длины вытравленного кабеля, используются «упрощенные модели», которые не требуют решения систем дифференциальных уравнений, не учитывают силы гидродинамического сопротивления и силы инерции присоединенных водных масс. Использование упрощенных моделей основано на положении, что более сложные физико-математические модели не дают улучшения точности позиционирования буксируемого устройства из-за модельной погрешности – различия между реальной водной толщей и ее модельным представлением. Например, изменение направления и скорости течения на разных глубинах может внести в расчеты погрешность, значительно превышающую погрешность, связанную с упрощением модели.

В пакете функций, за основу принят Dragging algorithm [1] – волочение груза на стержне, присоединенном к грузу шарниром. В алгоритм расчета введены две дополнительные возможности:

- 1) Возможность разделения стержня на несколько «стержней с грузом», соединенных шарнирами. При этом предполагается, что масса грузов одинакова и сосредоточена на конце каждого стержня. Данная модель позволяет на качественном уровне описывать положение сейсмической косы (или «тяжелого» буксировочного кабеля) при повороте судна.
- 2) Возможность ввода скорости течения. При этом предполагается, что водная масса движется как единое целое, с постоянной скоростью и направлением. Данная модель позволяет на качественном уровне учитывать снос кабеля и буксируемого устройства течением.

Исходными данными, при расчетах внутри пакета функций, являются:

- 1) Координаты точки буксировки (X_{tp} , Y_{tp} , Z_{tp}), определяемые по данным навигационной системы;
- 2) Длина вытравленного кабеля, измеряемая при помощи счетчика кабеля. Обычно, измерение длины вытравленного кабеля осуществляется с квантованием 1 метр;
- 3) Заглубление буксируемого устройства под поверхностью воды, измеряемое при помощи датчика давления/глубины. Обычно измерение заглубления осуществляется с квантованием 0.5 метра. Точность определения заглубления зависит от точности оценки плотности морской воды (ее температуры и солености). Также, на измерения влияют высота волн и «инерционность» датчика глубины (при изменении глубины буксируемого устройства, показания датчика глубины

изменяются с задержкой и «плавно»; при этом показания на спуске устройства зачастую разнятся с показаниями при его подъеме на ту же глубину).

В качестве дополнительных данных, могут использоваться:

- Азимут диаметральной плоскости судна, определяемый по данным навигационной системы;
- Направление и скорость движения точки буксировки относительно земли (SoG), оцениваемые по координатам движения точки буксировки;
- Информация (эмпирическая или расчетная) о соотношении скорости точки буксировки относительно воды (SoW) с длиной вытравленного кабеля, изгибом вытравленного кабеля, заглублением буксируемого устройства.

На основе исходных данных пакет функций позволяет получить следующие **результаты вычислений**:

- 1) Оценить координаты и заглубление буксируемого устройства;
- 2) Дополнительно могут быть оценены скорость и направление течения, с учетом принятого ранее приближения – «водная масса движется как единое целое, с постоянной скоростью и направлением».

1 Положение буксируемого устройства по вертикали

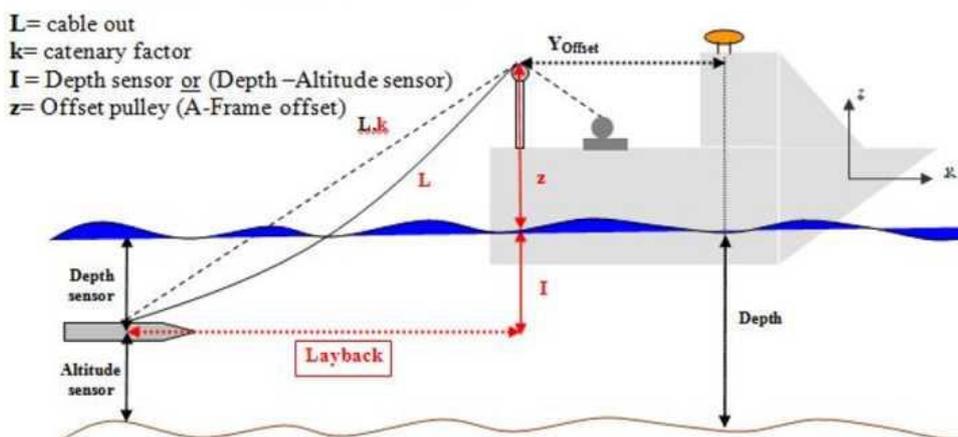
При расчетах по «упрощенным моделям» положение тела в вертикальной и горизонтальной плоскости рассчитываются как независимые величины.

Для расчета положения тела в вертикальной плоскости, в библиотеке применяется метод сходный с SHOM. Используемые физические величины и формулы расчета показаны на [Figure 1](#). В качестве исходных данных используются:

- высота счетчика кабеля над поверхностью моря (z),
- заглубление буксируемого устройства, определяемое по датчику давления, расположенному на борту устройства (I),
- длина вытравленного кабеля (L),
- коэффициент изгиба кабеля (k , catenary factor).

При расчетах для SHOM Zero Surface, предполагается, что значение счетчика кабеля (L) обнуляется на поверхности воды; соответственно, длина физически вытравленного кабеля будет рассчитываться как $L+z$.

Расчеты для SHOM производятся по теореме Пифагора, при этом, в результате изгиба кабеля, величина гипотенузы принимается за $L \cdot k$. Для оценки величины k , можно воспользоваться графиками, которые подготавливаются производителем для конкретных буксируемых устройств, оснащенных конкретной маркой буксировочного кабеля (также, возможно, – дополнительными весами и депрессорным крылом). Пример таких графиков для ГБО Edge Tech 4125 приведен на [Figure 2](#). Пример для магнитометра G882, показан на [Figure 3](#).



- **SHOM Options:** These are three custom calculation methods. The values are represented in Figure 1-3 .
 - **SHOM Basic:** $Layback = k \cdot L$
 - **SHOM Classic:** $Layback = \sqrt{(k \cdot L)^2 - (I + z)^2}$
 - **SHOM Zero Surface:** $Layback = \sqrt{(k(L + z))^2 - (I + z)^2}$

[Figure 1](#) SHOM Layback calculation [2]

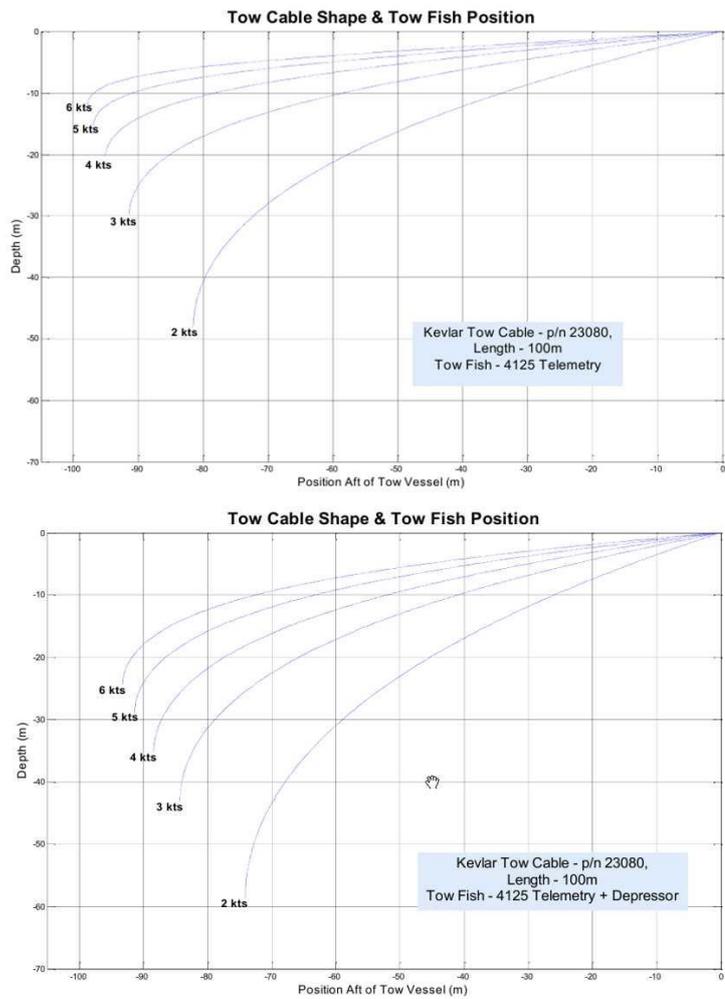


Figure 2 ET4125 SSS fish Depth-Towing_speed-Cable_length dependance [5]

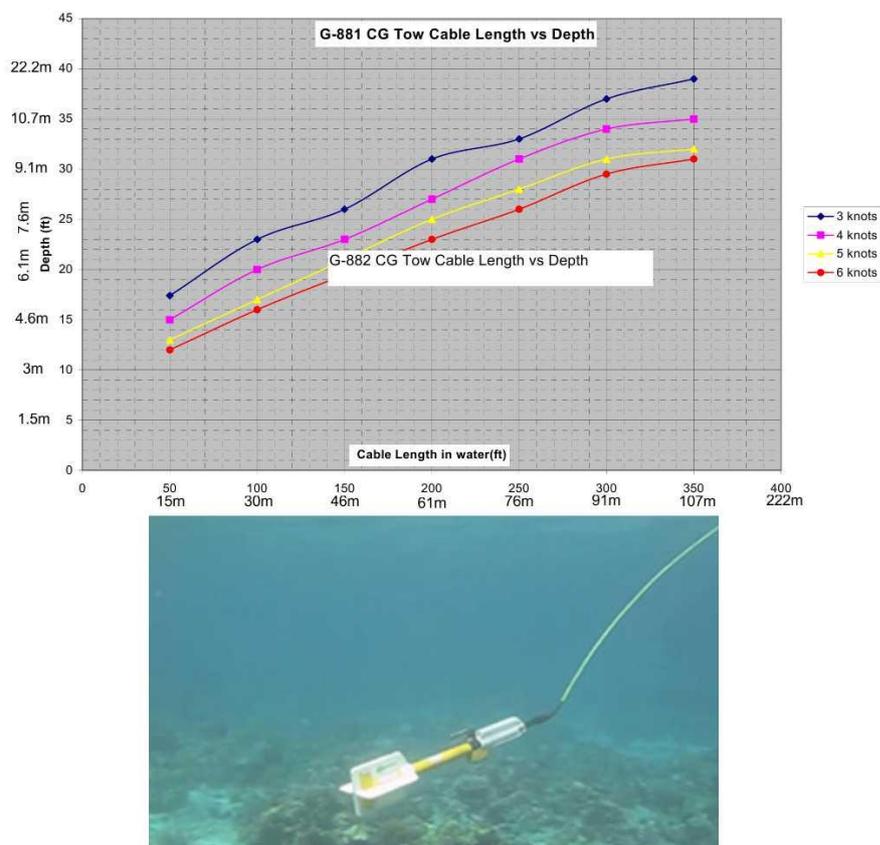


Figure 3 G-882 magnetic fish Depth-Towing_speed-Cable_length dependance [1]

Как видно из *Figure 2*, изгиб кабеля изменяет свое значение в зависимости от скорости перемещения относительно воды и вытравленной длины. С учетом этой зависимости, *расчетная формула, используемая в библиотеке*, получается аналогичной SHOM Classic:

$$\text{Layback} = \sqrt{(k(V_{\text{SoW}}, L) \cdot L)^2 - (I + z)^2}$$

здесь

V_{SoW} – скорость точки буксировки кабеля относительно водной толщи,

L – длина вытравленного кабеля,

$k(V_{\text{SoW}}, L)$ – значение catenary factor, определенное для текущей скорости и длины кабеля.

Результатом расчетов для «положения буксируемого устройства по вертикали» является величина проекции буксировочного кабеля на горизонтальную плоскость (Layback).

2 Положение буксируемого устройства в горизонтальной плоскости

Положение устройства в горизонтальной плоскости рассчитывается на основе Dragging algorithm – волочение груза на стержне, присоединенном к грузу шарниром (или натянутой веревке). Доступны две модификации алгоритма расчета: с единичным стержнем с грузом, с набором нескольких стержней с грузами; оба алгоритма адаптированы для «учета скорости течения» – расчетов в перемещающейся водной толще.

Положение буксируемого устройства в горизонтальной плоскости – стержень с грузом на шарнире

Схема, реализуемая Dragging algorithm, – волочение единичного стержня с грузом, присоединенным к грузу шарниром (или натянутой веревки с грузом), показана на *Figure 4*. Начальными данными является положение точки буксировки (Tow Point 1) и буксируемого устройства (Tow Fish 1); при этом расстояние между данными точками равно текущему значению Layback_1. После перемещения точки буксировки в новую позицию (Tow Point 2) проводится луч, в направлении предыдущей позиции буксируемого устройства (Tow Fish 1), и на луче откладывается новое значение Layback (Layback_2); таким образом, определяется новая позиция буксируемого устройства Tow Fish 2.

Если предыдущая позиция Tow Fish находится к Tow Point на меньшем расстоянии, чем значение Layback, то позиция Tow Fish не изменяется. Предполагается, что буксируемое устройство и буксировочный кабель «подвешены» в водном слое.

Начальная позиция Tow Fish 0 (при запуске алгоритма) откладывается в направлении противоположном первому перемещению Tow Point.

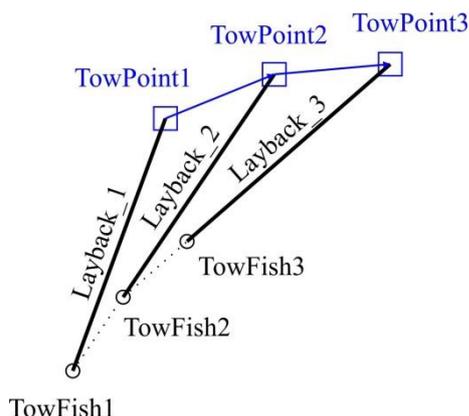


Figure 4 Layback calculations – Dragging algorithm

В силу заложенной математики Dragging algorithm в чем-то подобен действию фильтра низких частот – он сглаживает высокочастотные «колебания» Tow Point, нормальные к основному направлению перемещения. При этом величина Layback выступает аналогом «частоты среза» – чем длиннее проекция буксировочного кабеля, тем более «гладкой» будет траектория

буксируемого устройства. При малой величине Layback, буксировочный кабель идет вертикально и буксируемое устройство, если глубина буксировки не изменяется, повторяет перемещения точки буксировки.

Положение буксируемого устройства в горизонтальной плоскости – несколько стержней с грузами на шарнирах

Для учета изгиба буксировочного кабеля (или сейсмической косы) в горизонтальной плоскости, Layback разделяется на несколько частей – отдельных «стержней с грузами». При этом, перемещение каждого «груза» производится вдоль луча, определяемого новой позицией предыдущего груза (*Figure 5*). Количество сегментов остается постоянным, поэтому, при каждом новом значении Layback, длина сегментов изменяется (величина Layback делится на количество сегментов).

Введением множества сегментов сделана попытка на качественном уровне воспроизвести воздействие бокового сопротивления водной толщи на буксировочный кабель. Для одного сегмента такое сопротивление отсутствует – буксировочный кабель свободно перемещается в водной толще как прямолинейный отрезок. Если количество сегментов достаточно велико, так что размер сегмента сопоставим с дистанцией перемещения точки буксировки, то в частном случае (кратность) буксировочный кабель будет в точности повторять траекторию перемещения Tow Point; буксируемое устройство (Tow Fish) также будет повторять эту траекторию, с запаздыванием, зависящим от величины Layback.

Еще раз подчеркнем, что в основу расчета «изгиба кабеля» положена модель, не связанная с гидродинамикой или свойствами буксировочного кабеля; модель отражает процесс исключительно на качественном уровне. Для корректной работы алгоритма, необходимо осуществить подбор количества/размера сегментов на основе более точных данных о позиции буксируемого устройства (например, при позиционировании по USBL).

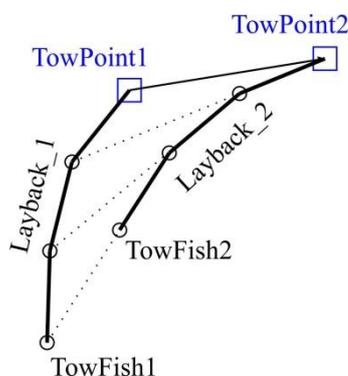


Figure 5 Layback calculations – Dragging algorithm with segments

3 Положение буксируемого устройства в горизонтальной плоскости, с учетом течения

Для учета влияния течения примем следующие *допущения о свойствах водной среды и буксируемой системы*:

- Водная толща рассматривается как однородный движущийся слой, с которым, относительно дна моря, перемещается система судно – буксировочный кабель – буксируемое устройство. Изменение скорости течения в горизонтальной плоскости происходит достаточно медленно; в предельном случае, скорость и направление течения одинаковы во всей водной толще на протяжении всей линии съемки;
- Собственная скорость судна достаточно велика (сопоставима со скоростью течения или превышает ее), что бы при постоянстве условий буксировки, буксировочный кабель вытягивался в линию в горизонтальной плоскости (например, при буксировке сейсмической косы, носовой и концевой буи выстраиваются в параллельную линию, относительно диаметральной плоскости судна).

При выполнении данных допущений, рабочей оказывается схема, показанная на *Figure 6*. Для данной схемы, скорость судна относительно воды постоянна и определяется вектором V_{SoW} ; скорость течения на профиле постоянна и определяется вектором $V_{current}$; скорость движения судна относительно дна рассчитывается как векторная сумма и определяется вектором V_{SoG} , направленным вдоль линии профиля. Направление диаметральной плоскости судна соответствует направлению вектора V_{SoW} . Буксировочный кабель стремится вытянуться в прямую линию, в направлении противоположном V_{SoW} . Угол между вектором V_{SoW} и направлением профиля (Survey Line) определяется соотношением скоростей $V_{current}$ и V_{SoW} ; если $V_{current} \ll V_{SoW}$ или их направления совпадают, то буксировочный кабель вытягивается вдоль линии профиля.

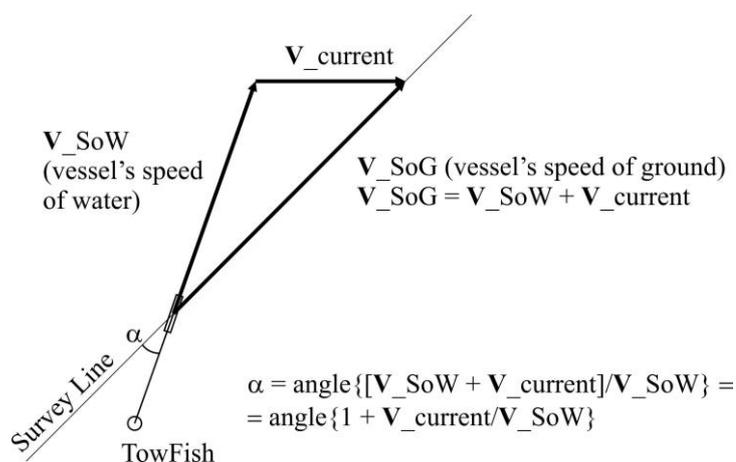


Figure 6 Current influence

Для модификации Dragging algorithm необходимо знать скорость течения и определить вектор-расстояние, на которое происходит перемещение Tow Fish за интервал времени, между определением позиции точек буксировки (Tow Point 1, Tow Point 2, ...).

Схема, реализуемая алгоритмом, показана на *Figure 7*. Перемещение в каждую из точек Tow Point, раскладывается на две составляющие – перемещение относительно водной толщи (S_{water}) и перемещение, вызванное движением самой водной толщи ($S_{current}$). Для перемещения S_{water} позиция Tow Fish рассчитывается согласно Dragging algorithm; перемещение $S_{current}$ вводится при помощи параллельного переноса.

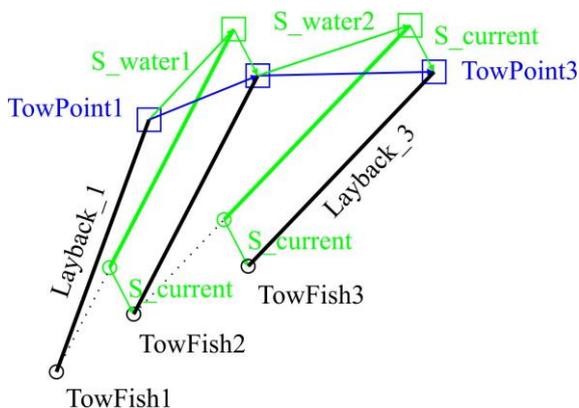


Figure 7 Layback calculations – “Dragging” algorithm with current

Схема, реализуемая алгоритмом для нескольких стержней, показана на *Figure 8*. Также производится расчет перемещения буксируемой системы относительно водной толщи, с последующим параллельным переносом, который вызывается перемещением самой водной толщи и задается вектором $S_{current}$.

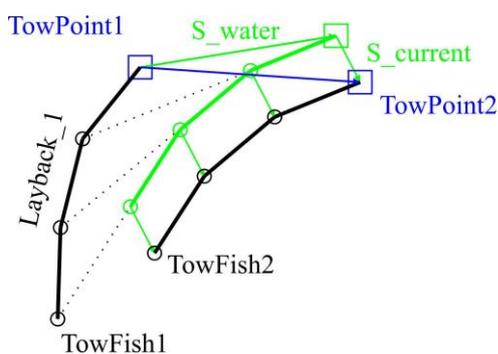


Figure 8 Layback calculations – “Dragging” algorithm with current and “segments”

Величину и направление вектора V_{SoG} мы можем вычислить из последовательных позиций точки буксировки. Направление вектора V_{SoW} совпадает с направлением диаметральной плоскости судна. Для расчета позиции буксируемого устройства необходимо определить величину и направление вектора $V_{current}$.

4 Определение составляющих вектора скорости течения

Скорость и направление движения буксируемого устройства относительно воды, можно измерить экспериментально, при помощи измерителей скорости течения или скорости потока (механические, электромагнитные на принципе Фарадея, акустические на эффекте Доплера). В этом случае, зная V_{SoW} и V_{SoG} , можно рассчитать $V_{current}$ (*Figure 6*). Предположим, что такой датчик отсутствует; скорость водной толщи будем оценивать по косвенным данным. Для схемы, показанной на *Figure 6*, одной паре значений V_{SoG} и α может соответствовать множество модулей вектора V_{SoG} и векторов $V_{current}$.

4.1 Определение вектора скорости течения на основе заглубления буксируемого устройства

Приближенно, модуль вектора V_{SoW} , можно оценить, зная заглубление буксируемого устройства и длину вытравленного кабеля. Оценка проводится по графикам, которые аналогичны показанным на *Figure 2*. Зная величину скорости движения судна (из графиков) и направление движения относительно воды (из данных GPS), мы можем вычислить скорость течения через разность векторов:

$$V_{current} = V_{g1} - V_{w1} ,$$

$$V_{current} = V_{g2} - V_{w2} .$$

Другой способ оценки модуля V_{SoW} , состоит в изменении некоторой компоненты для векторов, показанных на *Figure 6*, при сохранении значений всех остальных компонент. Для получения такого результата, наиболее приемлемыми представляются два действия:

- изменение скорости движения судна, при сохранении направления движения, при этом происходит изменения угла α ;
- изменение направления движения судна, при сохранении модуля его скорости V_{SoW} (в первом приближении – мощности двигателя).

4.2 Определение вектора скорости течения при постоянстве направления скорости V_{SoG}

Пусть судно, идущее в направлении Survey Line, движется относительно земли со скоростью, определяемой вектором V_{g1} . Сила течения определяется вектором $V_{current}$, соответственно, скорость судна относительно воды задается вектором V_{w1} ; при этом, можно записать: $V_{g1} = V_{w1} + V_{current}$. Линия движения судна (Survey Line) проложена с азимутом α , диаметральной плоскость судна имеет направление β_1 .

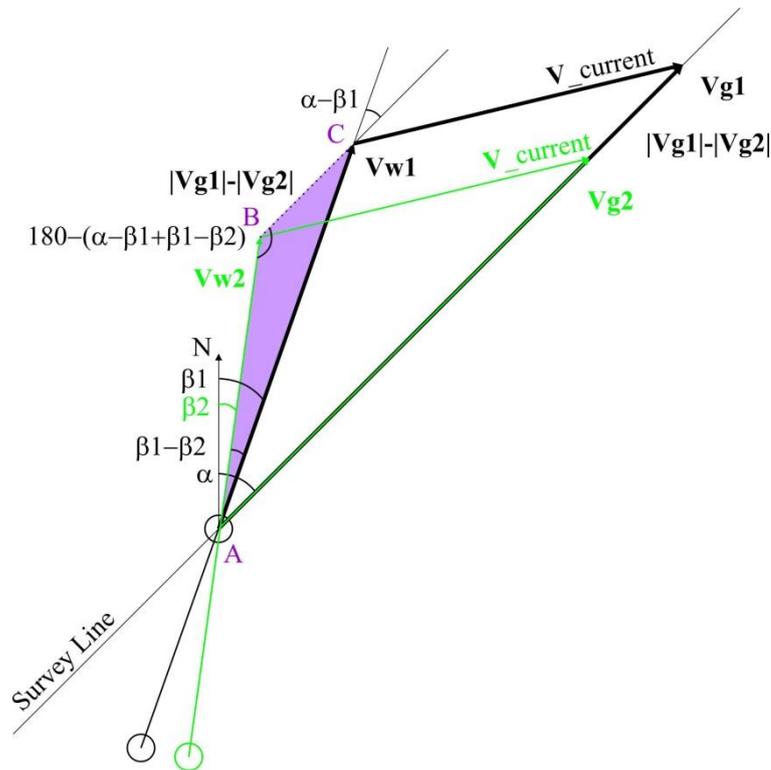


Figure 9 Velocity calculations for SoG changes

Пусть судно уменьшило скорость движения, сохраняя направление движения α ; при этом, диаметральной плоскости судна развернулась в направлении $\beta 2$. Соответственно, скорость относительно земли описывается вектором V_{g2} , скорость относительно воды – V_{w2} , скорость течения $V_{current}$ осталась неизменной.

Предположим, что выполняются описанные выше допущения о свойствах водной среды и буксируемой системы. Тогда мы сможем рассчитать неизвестные значения модулей векторов V_{w1} и V_{w2} . Для этого рассмотрим треугольник ABC. Поскольку скорость течения осталась неизменной, то длину стороны BC можно рассчитать как

$$BC = |V_{g1}| - |V_{g2}|.$$

Угол при стороне A будет равен $\beta 1 - \beta 2$; угол при стороне C будет равен $\alpha - \beta 1$; угол при стороне B, рассчитаем через сумму углов в 180 градусов

$$180 - (\alpha - \beta 1 + \beta 1 - \beta 2) = 180 - (\alpha - \beta 2).$$

Запишем теорему синусов, для сторон треугольника:

$$\frac{|V_{g1}| - |V_{g2}|}{\sin(\beta 1 - \beta 2)} = \frac{|V_{w1}|}{\sin(180 - \alpha + \beta 2)} = \frac{|V_{w2}|}{\sin(\alpha - \beta 1)}.$$

Вычислим значения модулей V_{w1} и V_{w2} как

$$|V_{w1}| = \frac{|V_{g1}| - |V_{g2}|}{\sin(\beta 1 - \beta 2)} \cdot \sin(180 - \alpha + \beta 2),$$

$$|V_{w2}| = \frac{|V_{g1}| - |V_{g2}|}{\sin(\beta 1 - \beta 2)} \cdot \sin(\alpha - \beta 1).$$

Зная величину и направление векторов скорости движения судна относительно воды, можем вычислить скорость течения через разность векторов:

$$\mathbf{V}_{\text{current}} = \mathbf{V}_{g1} - \mathbf{V}_{w1} ,$$

$$\mathbf{V}_{\text{current}} = \mathbf{V}_{g2} - \mathbf{V}_{w2} .$$

Таким образом, изменив скорость движения судна, при сохранении направления движения относительно земли, и получив, для участков «установившегося перемещения» запись следующих параметров:

-- координат GPS-антенны, для расчета разности скоростей движения и угла α ,

-- направлений диаметральной плоскости по гироскопу, для определения углов β_1 и β_2 ,

мы можем приближенно оценить скорость течения (при условии ее неизменности на рассмотренных участках).

4.3 Определение вектора скорости течения при постоянстве модуля скорости \mathbf{V}_{SoW}

Пусть судно, идущее в направлении Survey Line1, движется относительно земли со скоростью, определяемой вектором \mathbf{V}_{g1} . Сила течения определяется вектором $\mathbf{V}_{\text{current}}$, соответственно, скорость судна относительно воды задается вектором \mathbf{V}_{w1} ; при этом, можно записать: $\mathbf{V}_{g1} = \mathbf{V}_{w1} + \mathbf{V}_{\text{current}}$.

Линия движения судна (Survey Line1) проложена с азимутом α_1 , диаметральной плоскость судна имеет направление β_1 .

Пусть судно не изменяя скорость движения относительно воды, поворотом руля изменило направление движения на α_2 ; при этом, диаметральной плоскость судна развернулась в направлении β_2 . Соответственно, скорость относительно земли описывается вектором \mathbf{V}_{g2} , скорость относительно воды – \mathbf{V}_{w2} , скорость течения $\mathbf{V}_{\text{current}}$ осталась неизменной.

Предположим, что выполняются описанные выше допущения о свойствах водной среды и буксируемой системы. Тогда мы сможем рассчитать неизвестные значения модулей векторов $\mathbf{V}_{w1}=\mathbf{V}_{w2}$. Для этого рассмотрим треугольник $ABOC_0$. Длину стороны BC можно рассчитать по теореме косинусов

$$BOC_0 = |\mathbf{V}_{g1}|^2 + |\mathbf{V}_{g2}|^2 + 2|\mathbf{V}_{g1}| \cdot |\mathbf{V}_{g2}| \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_2).$$

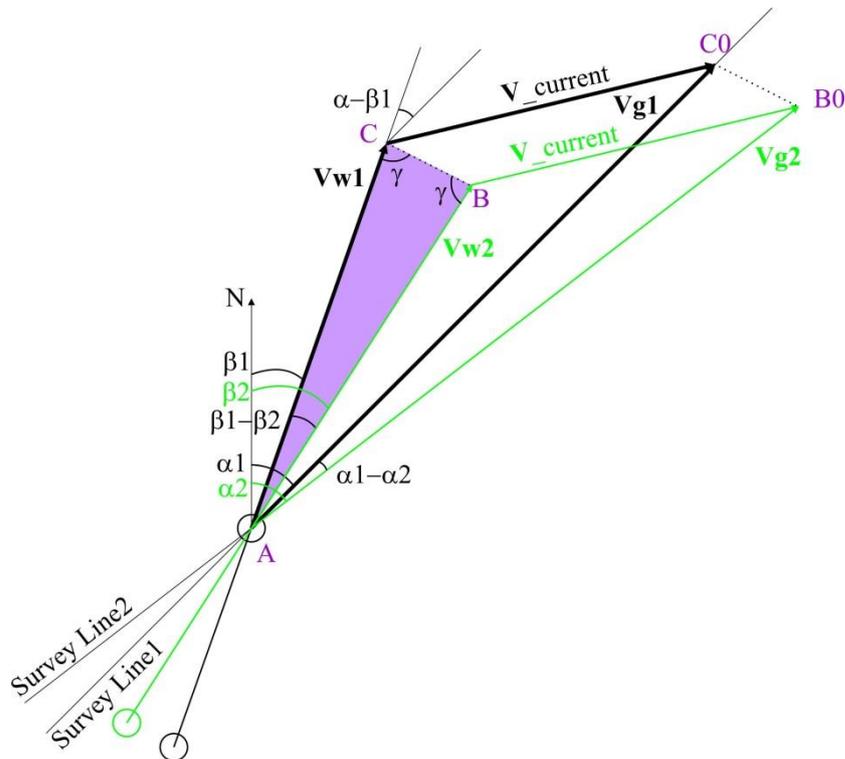


Figure 10 Velocity calculations for Survey Line direction changes

Рассмотрим треугольник ABC: сторона CB равна C0B0, треугольник равнобедренный. Опустив высоту из угла A, мы сможем найти гипотенузу AC через функцию синуса

$$|Vw2| = |Vw1| = \frac{|Vg1|^2 + |Vg2|^2 + 2|Vg1| \cdot |Vg2| \cdot \cos(\alpha1 - \alpha2)}{2} \cdot \frac{1}{\sin [(\beta1 - \beta2) / 2]}$$

Зная величину и направление векторов скорости движения судна относительно воды, можем вычислить скорость течения через разность векторов:

$$V_current = Vg1 - Vw1 ,$$

$$V_current = Vg2 - Vw2 .$$

Таким образом, не изменяя скорость движения судна, изменив направление движения, и получив, для участков «установившегося перемещения» запись следующих параметров:

- координат GPS-антенны, для расчета величин и направлений ($\alpha1$, $\alpha2$) скоростей движения,
- направлений диаметральной плоскости по гироскопу, для определения углов $\beta1$ и $\beta2$,

мы можем приблизительно оценить скорость течения (при условии ее неизменности на рассмотренных участках).

4.4 Определение вектора скорости течения для произвольного случая

Пусть судно, идущее в направлении Survey Line1, движется относительно земли со скоростью, определяемой вектором V_{g1} (азимут Survey Line1 соответствует $\angle V_{g1}$). Сила течения определяется вектором $V_{current}$, соответственно, скорость судна относительно воды задается вектором V_{w1} ; при этом, можно записать: $V_{g1} = V_{w1} + V_{current}$ (Figure 11). Диаметральная плоскость судна (курс судна), движущегося относительно воды, имеет направление $\angle V_{w1}$.

Пусть судно изменило скорость движения относительно воды на $|V_{w2}|$, а также поворотом руля изменило направление движения относительно земли на азимут $\angle V_{g2}$; при этом, диаметральной плоскость судна развернулась в направлении $\angle V_{w2}$. Тогда, скорость судна относительно земли описывается вектором V_{g2} , скорость относительно воды – V_{w2} , скорость течения $V_{current}$ осталась неизменной (Figure 11).

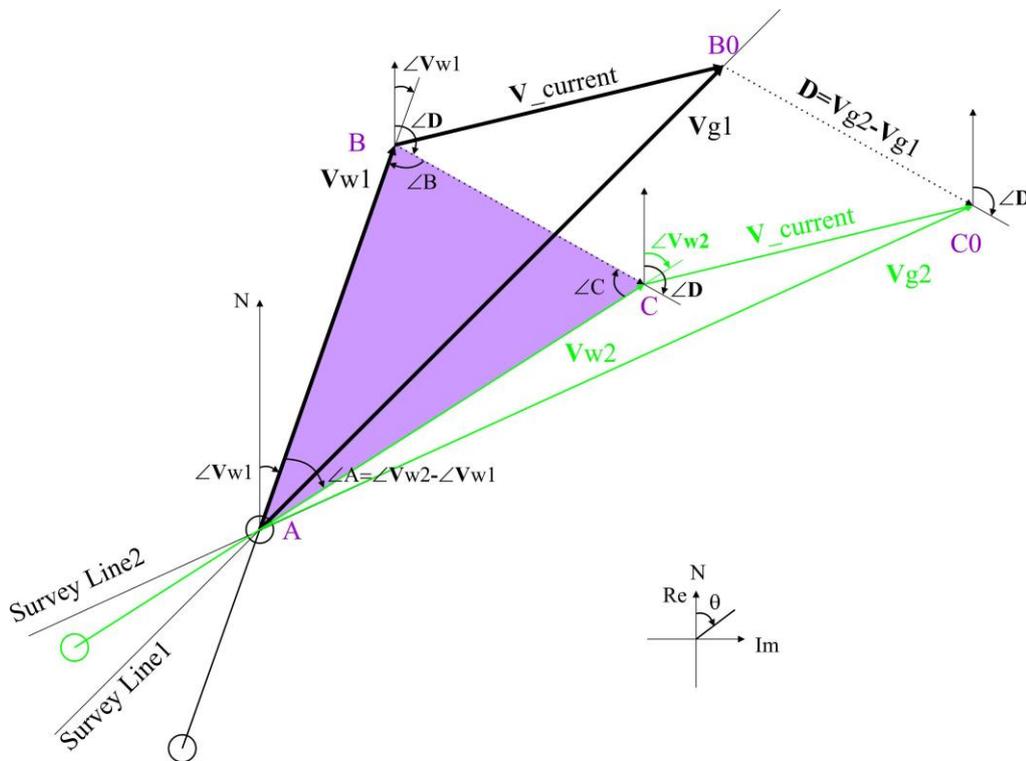


Figure 11 Velocity calculations for Survey Line direction and V_g changes

Определяя по данным GPS направление и модуль скорости движения, для случаев 1 и 2, можем вычислить составляющие вектора D (Figure 11):

$$V_{g1} = |V_{g1}| \cdot \exp(\angle V_{g1} \cdot i);$$

$$V_{g2} = |V_{g2}| \cdot \exp(\angle V_{g2} \cdot i);$$

$$D = V_{g2} - V_{g1};$$

$$\angle D = \text{angle}(D);$$

$$|D| = \text{abs}(D).$$

Поскольку V_{current} не изменяется, то $BCO = BC$, тогда, величину углов треугольника ABC (с потерей направления вращения) можем рассчитать как

$$\angle A = |\angle Vw2 - \angle Vw1|;$$

$$\angle B = 180 - |\angle D - \angle Vw1|;$$

$$\angle C = |\angle D - \angle Vw2|.$$

По теореме синусов можем записать:

$$\frac{BC}{\sin(\angle A)} = \frac{CA}{\sin(\angle B)} = \frac{AB}{\sin(\angle C)};$$

или

$$\frac{|D|}{\sin(|\angle Vw2 - \angle Vw1|)} = \frac{|Vw2|}{\sin(180 - |\angle D - \angle Vw1|)} = \frac{|Vw1|}{\sin(|\angle D - \angle Vw2|)}.$$

тогда, с учетом $\sin(180 - \alpha) = \sin(\alpha)$,

$$|Vw1| = |D| \cdot \frac{\sin(|\angle D - \angle Vw2|)}{\sin(|\angle Vw2 - \angle Vw1|)};$$

$$|Vw2| = |D| \cdot \frac{\sin(|\angle D - \angle Vw1|)}{\sin(|\angle Vw2 - \angle Vw1|)};$$

Конечные формулы для расчетов имеют вид:

$$D = |Vg2| \cdot \exp(\angle Vg2 \cdot i) - |Vg1| \cdot \exp(\angle Vg1 \cdot i);$$

$$V_{\text{current}} = |Vg1| \cdot \exp(\angle Vg1 \cdot i) - |D| \cdot \frac{\sin(|\angle D - \angle Vw2|)}{\sin(|\angle Vw2 - \angle Vw1|)} \cdot \exp(\angle Vw1 \cdot i);$$

$$V_{\text{current}} = |Vg2| \cdot \exp(\angle Vg2 \cdot i) - |D| \cdot \frac{\sin(|\angle D - \angle Vw1|)}{\sin(|\angle Vw2 - \angle Vw1|)} \cdot \exp(\angle Vw2 \cdot i);$$

при этом,

$|Vg1|$, $|Vg2|$ – модуль скорости судна относительно земли, определяется по данным GPS;

$\angle Vg1$, $\angle Vg2$ – направление движения судна относительно земли, определяется по данным GPS;

$\angle Vw1$, $\angle Vw2$ – направление движения судна относительно воды, определяется по курсу судна (азимуту диаметральной плоскости).

4.5 Общая методика определения вектора скорости течения

Скорость течения изменяется со временем. Поэтому, при выполнении съемки с буксируемым устройством и позиционированием по Layback, желательно выполнять ее определение периодически. Наиболее просто реализуемым, при относительно малой длине профилей съемки, представляется способ описанный ниже.

- 1) Мостик не изменяет скорость движения судна относительно воды на протяжении всего профиля (не изменяет скорость вращения винта или угол наклона лопастей винта при ВРШ); удержание судна на профиле выполняется исключительно за счет отработки пером руля. В результате, модуль скорости $|\mathbf{V}_w|$ можно принять постоянным для всего профиля.
- 2) При завершении геофизического профиля мостик осуществляет смену направления движения судна; при этом, не меняя скорости хода, производит поворот пера руля и продолжает движение необходимое количество времени. На основе расчетов по «определению вектора скорости течения при постоянстве модуля скорости \mathbf{V}_{SoW} », производится оценка значения $|\mathbf{V}_w|$.
- 3) Анализируется направление диаметральной плоскости при движении судна по профилю. Выделяются «участки устойчивого движения», которые соответствуют участкам с постоянной скоростью течения. Для данных участков вычисляется скорость течения из разности векторов:

$$\mathbf{V}_{current_i} = \mathbf{V}_{g_i} - \mathbf{V}_{w_i},$$

при этом направление и модуль \mathbf{V}_{g_i} оцениваются по GPS, направление \mathbf{V}_{w_i} – по показаниям гироскопа (направление диаметральной плоскости судна), а модуль \mathbf{V}_{w_i} рассчитывается на основе смены направления движения в конце профиля.

- 4) При движении в обратном направлении (по соседнему профилю на площади исследования) производятся такие же расчеты 1-3. Далее (при условии, что профили расположены близко), для соседних «участков устойчивого движения» выполняются расчеты на основе «определение вектора скорости течения при постоянстве направления скорости \mathbf{V}_{SoG} ». Данные расчеты позволяют заверить предыдущие вычисления скорости течения. Однако, при этом следует учитывать время между прохождением соседних «участков устойчивого движения» (скорость течения может измениться).
- 5) При наличии графиков, аналогичных показанным на *Figure 2* (связь заглубления буксируемого устройства с длиной вытравленного кабеля и скоростью \mathbf{V}_{SoW}) производим проверку соответствия расчетных значений $|\mathbf{V}_{SoW}|$ измеренным значениям глубины буксируемого устройства и длины вытравленного кабеля. При значительных различиях, можем говорить что «допущения о свойствах водной среды и буксируемой системы», введенные выше не соблюдаются (например, скорость течения сильно различается на разных глубинах). Следовательно, приведенные алгоритмы неприемлемы для позиционирования буксируемого устройства.

б) В результате вычислений, выполненных для всех профилей, получаем массив значений, со скоростями течения во времени и пространстве. Следует учитывать, что полученные значения отражают течение в приповерхностном слое; кроме того, значения содержат погрешности, обусловленные ветровой помехой, гидродинамикой судна и множеством иных факторов (например, влиянием ветрового волнения, воздействующего на корпус судна).

С использованием полученного массива значений, со скоростями течения, производим расчет положения буксируемого устройства.

5 Процедура расчета позиции буксируемого устройства

Расчет позиции буксируемого устройства выполняется во время предварительной обработки, после завершения сбора навигационных и геофизических данных.

1) С помощью бортовой навигационной системы или gLog регистрируются следующие потоки данных:

- координаты точки буксировки;
- длина вытравленного кабеля;
- заглубление буксируемого устройства под поверхностью воды (датчик давления/глубины);
- курс судна (азимут диаметральной плоскости).

2) При значительном «квантовании» данных в каком-либо потоке (например, если при определении координат имеет место изломанный трек), необходимо провести предварительное сглаживание, для получения «плавного изменения» данных в потоке.

3) Потоки данных интерполируются к единому времени. Это или время прихода данных с буксируемого устройства (которое связано с потоком «заглубление буксируемого устройства») или время прихода данных «координаты точки буксировки». Шаг времени, к которому осуществляется интерполяция, имеет постоянный период; время привязывается к UTC.

4) Вычисляются модуль и направление вектора скорости судна (V_{SoG}) для каждой отметки времени. Направление вычисляется из азимута диаметральной плоскости, скорость – из значения координат текущей и последующей точки. Возможно использование среднего значения в скользящем окне заданного размера.

5) В интерактивном режиме выделяются участки с постоянным значением V_{SoG} : выводятся два графика «модуль» и «угол», на которых интерактивно выставляются метки «начало» и «конец» для каждого участка; дополнительно рассчитывается величина среднеквадратического отклонения модуля и угла, для оценки погрешности при расчетах скорости.

б) Между

- 1) Оценить координаты и заглублиение буксируемого устройства;
- 2) Дополнительно могут быть оценены скорость и направление течения, с учетом принятого ранее приближения – «водная масса движется как единое целое, с постоянной скоростью и направлением».

Методика оценки корректности работы алгоритмов

По сопоставлению ГБО и МЛЭ

Приложение 1. Сопоставление предложенного метода позиционирования, с методами, используемыми в навигационном программном обеспечении

Методика расчета положения буксируемого устройства, известная как «Dragging algorithm», реализована в программе MagLog фирмы Geometrics, используемой для регистрации данных с магнитометров. На *Figure 12* показана схема иллюстрирующая методику расчета. В текущей версии программы не реализована возможность учета изменения длины кабеля, заглубления магнитометра или учета сноса магнитометра течением.

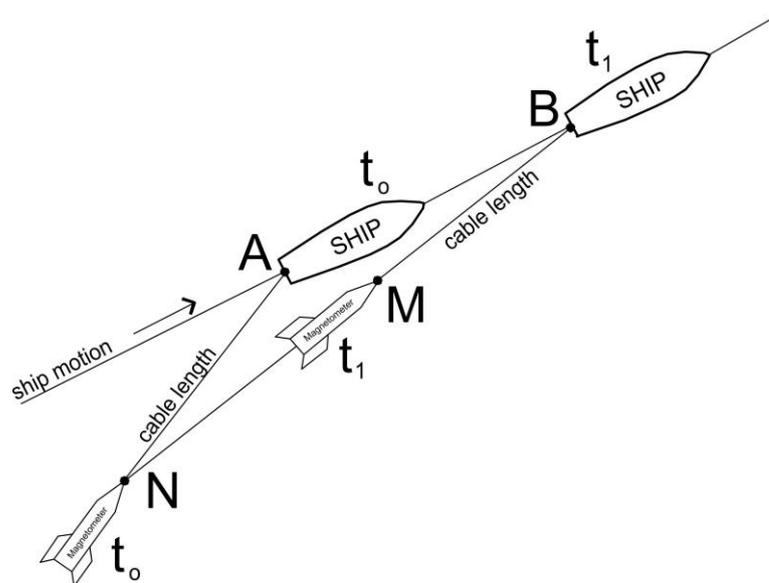
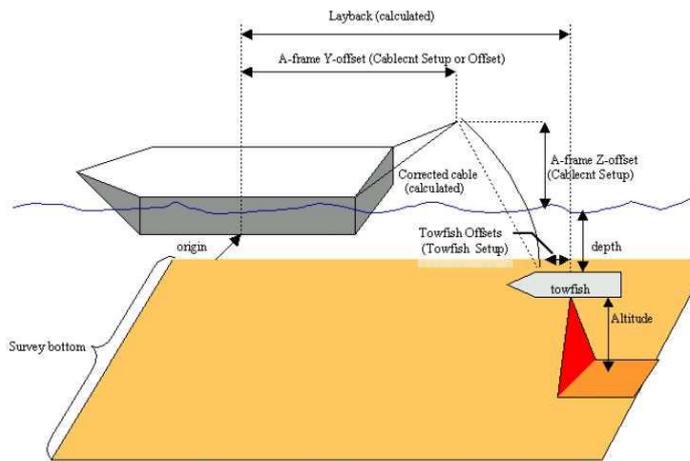


Figure 12 Dragging algorithm description [1]

В навигационном программном обеспечении НУРАСК (*Figure 13*), предположительно, также реализован Dragging algorithm. Предлагается несколько методов расчета положения буксируемого устройства в вертикальной плоскости; кроме того, реализован учет заглубления буксируемого устройства. Программа позволяет ввести «catenary factor», и «device factor» (рассчитывается производителем для конкретного буксируемого устройства и учитывает его гидродинамику). Программа позволяет представить буксировочный кабель в виде нескольких сегментов; алгоритм расчета перемещения сегментов в «Driver Interface Document» не представлен. Настройки, для учета сноса течением, отсутствуют.



- **Catenary Factor:** A multiplier that accounts for the slack in the tow cable. For Shallow Fish, the default is 0.81; for Deep Fish, the default is 0.63; for Altitude Fish, the catenary factor changes with the fish altitude.
 - **Device Factor** is enabled only if you have selected the Redlion or Remontec Input option. The driver multiplies the layback value read from the device by this factor before recording the final value.
- Number of Segments:** More segments in the length of the cable enables smoother curves.

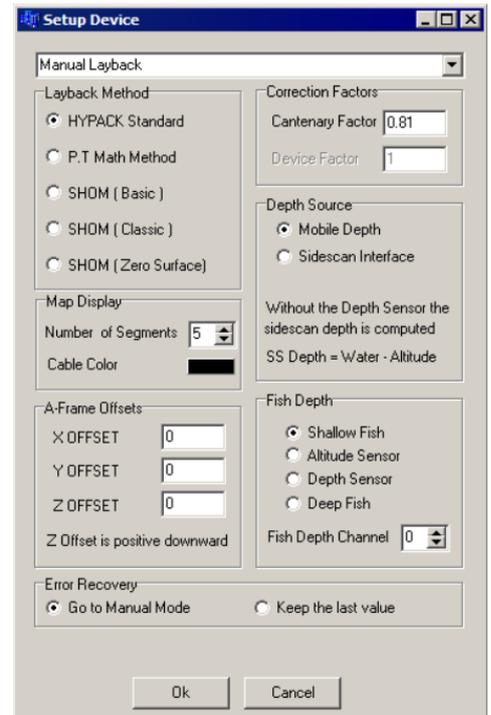


Figure 13 HYPACK Layback calculation [2]

В навигационном программном обеспечении QINSy (Figure 14), при расчете положения буксируемого устройства в вертикальной плоскости, возможно использование данных с датчика глубины буксируемого устройства. Положение в горизонтальной плоскости рассчитывается при помощи его выноса из точки буксировки, на заданное расстояние и заданный угол (параметр rotation на Figure 14). Возможен выбор из следующих углов выноса:

- курсовой угол судна (направление диаметральной плоскости),
- путевой угол судна (направление движения центра масс судна),
- курсовой угол буксируемого устройства,
- путевой угол буксируемого устройства.

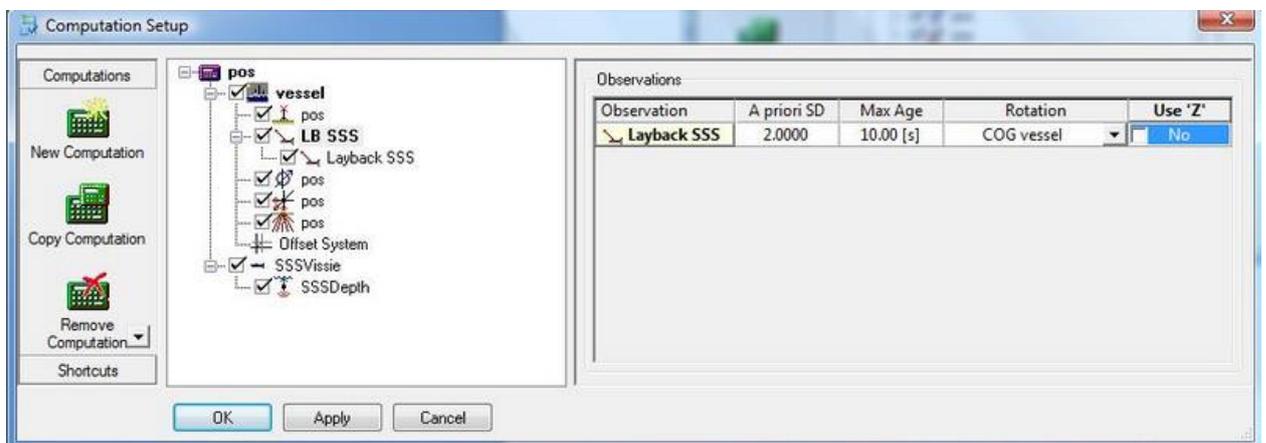


Figure 14 QINSy Layback calculation [3]

Дополнительной возможностью, предоставляемой QINSy, является сглаживание путевого угла (и курсового угла?) при помощи фильтров Кальмана (*Figure 15*).

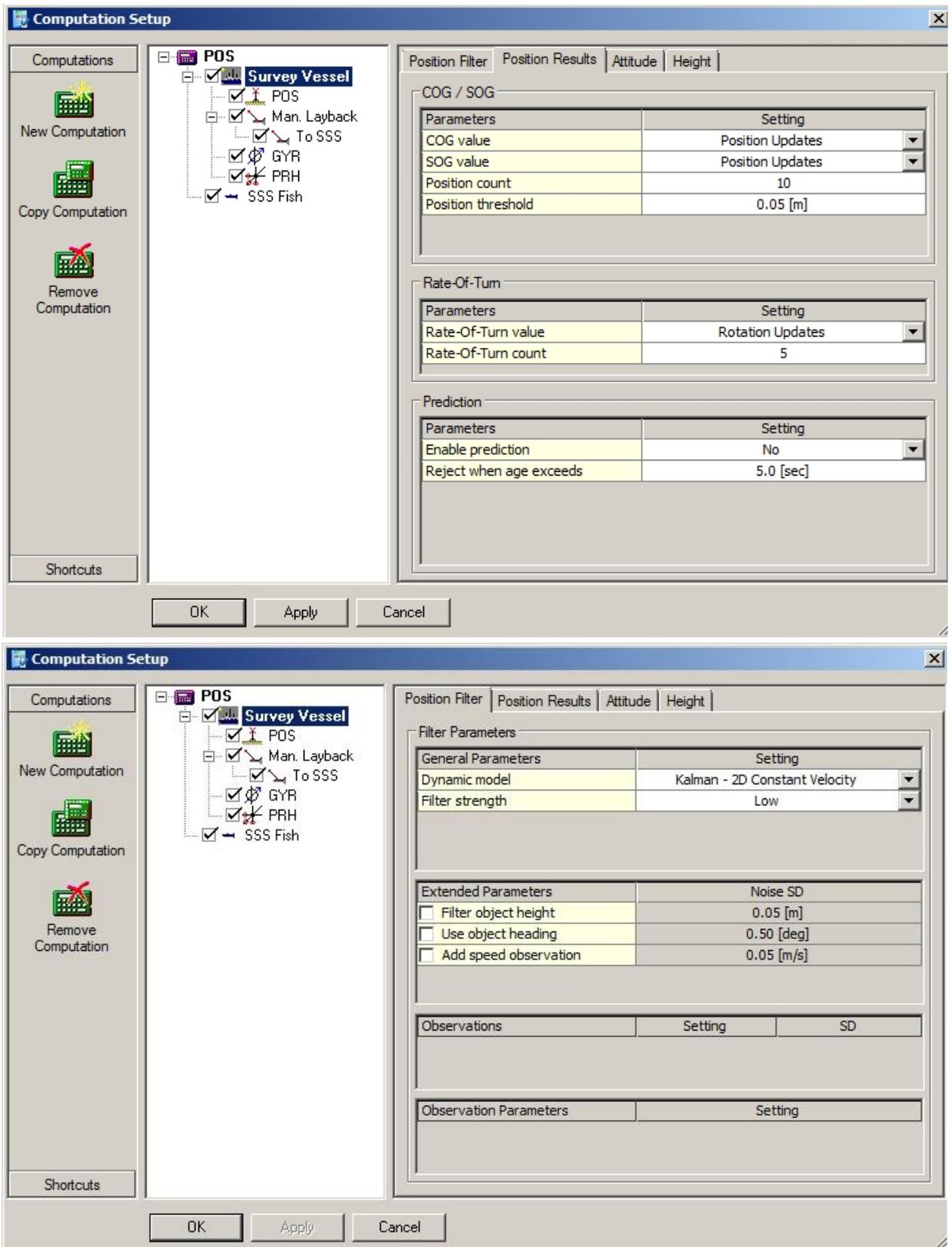


Figure 15 QINSy smooth vessel or ROV track [4]

В инструкции QINSy рекомендуется использовать путевой угол; однако, данная рекомендация применима исключительно при малом влиянии скорости течения. При значительной скорости течения и сносе буксируемого устройства, снос можно, до некоторой степени, учесть выносом буксируемого устройства в направлении курсового угла. При этом должны выполняться определенные выше «допущения о свойствах водной среды и буксируемой системы».

На практике, при движении судна происходят постоянные «малые» изменения курсового угла, вызванные множеством причин (например, постоянной небольшой коррекцией направления движения рулевым на мостике). Для «сглаживания» этих изменений QINSy предлагает использовать фильтр Кальмана. Предполагается, что при движении по профилю, будет приложен настолько сильный фильтр, что все «малые» изменения курсового угла судна будут «сглажены», а полученный «осредненный» курсовой угол будет соответствовать курсовому углу, определяемому силой течения. Такой подход позволяет избежать расчетов скорости течения для определения позиции буксируемого устройства.

Тем не менее, в методике «выноса на курсовой угол» присутствует противоречие, на качественном уровне:

-- при значительной длине вытравленного кабеля все изменения в положении судна и точки буксировки (например, изменение курсового угла), передаются на буксировочное устройство в «ослабленном» виде; причем, чем больше длина вытравленного кабеля, тем значительнее это «ослабление» (выше эта закономерность рассматривалась в приложении к Dragging algorithm),

-- при «выносе на курсовой угол» значительная длина вытравленного кабеля приводит, за счет увеличения плеча, к значительным перемещениям буксируемого устройства в ответ на малые изменения курсового или путевого угла; причем, чем больше длина вытравленного кабеля, тем значительнее «усиливаются» эти перемещения.

Данное противоречие, на практике, может вносить значительную погрешность в расчетную траекторию буксируемого устройства.

Список литературы

1. G-882 Cesium Marine Magnetometer. Operation Manual, 2005// 25919-OM REV. D
2. Common HYPACK® Drivers Interfacing Notes Updated January / 2017 // Towfish.dll, p.1-71 to 1-76
3. How to Layback // <https://confluence.gps.nl/qinsy/ru/kak-primenyat-raschetnuyu-pozitsiyu-buksiruemogo-ustrojstva-35587283.html>
4. How to Smooth Vessel or ROV Track // <https://confluence.gps.nl/qinsy/en/how-to-smooth-vessel-or-rov-track-35587317.html>
5. 4125 Side Scan Sonar System. User hardware manual // 0004823_rev_d, May 2016, C.0 – Towing characteristics