

Обработка координат, полученных по USBL

Ч. 1 – Типы ошибок позиционирования,
обнаружение систематических ошибок, обработка
случайных ошибок, оценка допустимой длины
«вылета» USBL

Rev. 1.1

R.V. Geo Ranger
08.04.2024

Содержание

Введение	4
1. Ошибки при позиционировании с помощью USBL	5
1.1 Типы ошибок при позиционировании.....	5
1.2 Анализ причин вылетов USBL (пример съемки ScanFish).....	8
2. Терминология и краткое описание графа обработки координат	12
3. Контроль качества позиционирования по уровню случайного шума.....	14
4. Контроль качества позиционирования по длине вылетов	14
4.1 Влияние систематической ошибки на оценку допустимой длины вылета	16
4.2 Влияние активных элементов управления буксируемого устройства на оценку допустимой длины вылета	16
4.3 Влияние работы лебедки на оценку допустимой длины вылета	17
5. Пример оценки допустимой длины вылета USBL.....	18
5.1 Вычисления.....	18
5.2 Код MatLab и алгоритм вычислений	22
Заключение.....	24
Приложение 1. Код MatLab	25

История изменений

Версия	Дата	Описание изменений
1.0	2023-12-03	Документ создан // Иван Д.
1.1	2024-04-08	Документ отредактирован // Иван Д.

Список рисунков

Рисунок 1.1	Посадочное место для установки USBL-транспондера на корпусе ScanFish	8
Рисунок 1.2	Вылеты при «подъеме» ScanFish на песчаную волну	9
Рисунок 1.3	Сопоставление положения вылетов при «подъеме» ScanFish на песчаную волну (синие вертикальные линии), Pitch (оранжевый) и Roll (желтый)	9
Рисунок 1.4	Вылеты при «соскальзывании» ScanFish с песчаной волны.....	10
Рисунок 1.5	Сопоставление положения вылетов при «соскальзывании» ScanFish с песчаной волны (синие вертикальные линии), Pitch (фиолетовый) и Roll (зеленый)	10
Рисунок 1.6	«Отскок ScanFish» назад при движении над ровным дном (отскок примерно на 10 метров, альтитуда ScanFish 3.5 метра).....	11
Рисунок 5.1	Сырые координаты (красный цвет) и «обработанные координаты приближенные к истинным значениям» (синий цвет)	18
Рисунок 5.2	Расстояние между сырыми и обработанными координатами – контроль качества по уровню случайного шума (графики для 8-ми магнитометров показаны разным цветом)	19
Рисунок 5.3	Расстояние между сырыми и обработанными координатами (синий цвет); то же расстояние с предварительно внесенным вылетом 25м (красный цвет)	20
Рисунок 5.4	Расстояние между сырыми и обработанными координатами (синий цвет); то же расстояние с предварительно внесенным вылетом 50м (красный цвет)	20
Рисунок 5.5	Расстояние между сырыми и обработанными координатами (синий цвет); то же расстояние с предварительно внесенным вылетом 150м (красный цвет)	20
Рисунок 5.6	Расстояние между сырыми и обработанными координатами (синий цвет); то же расстояние с многократно внесенным вылетом 50м (красный цвет).....	21

Введение

Исходные условия. При помощи ScanFish, на которой установлены два ряда магнитометров G-882, выполняется магнитная съемка. Позиционирование ScanFish выполняется при помощи USBL (Kongsberg HiPAP 502) с отключенным осреднением, фильтрами Калмана и предсказыванием.

Описание проблемы. Часть координат, выдаваемых USBL, содержит вылеты – значения, резко отличающиеся от других координат, или не вписывающиеся в «закономерное изменение» координат. Такие значения считаются браком, они удаляются из измерений координат, а на месте вылетов образуется «дырка» – измерения с неопределенными координатами. Далее по тексту будет использован термин вылет, при этом будет подразумеваться, что измеренные координаты, относящиеся к вылету, являются ложными и должны быть удалены; как правило вместо удаленных координат подставляются координаты, полученные путем вычислений. Далее такие вычисления будут называться «интерполяция»; этот термин необходимо понимать в широком смысле, например, интерполяция может быть линейной или может быть выполнена путем математического моделирования, с использованием предсказывающих математических методов.

Решаемая задача – оценить максимально допустимую длину вылета, при которой допустима интерполяция значений внутри вылета. Интерполяция должна быть выполнена с условием, что бы погрешность позиционирования не превышала допустимого отклонения (в нашем случае – 2 метра) от истинных координат буксируемого устройства. Если длина вылета превышает допустимое отклонение, то измерения внутри вылета «забраковываются» (полностью исключаются из результатов измерений).

Метод решения. Трек ScanFish осложняется смоделированным вылетом заданной длины, который последовательно перемещается вдоль всего трека. Каждый раз, когда выполняется обработка трека, трек внутри вылета интерполируется. Рассчитывается разность между измеренными координатами внутри вылета и обработанными (интерполированными) координатами. Если разность не превышает допустимого отклонения, то длина вылета считается допустимой для анализируемого трека; в том числе, допустимой и для «реальных» (не смоделированных) вылетов, присутствующих на нем.

1. Ошибки при позиционировании с помощью USBL

1.1 Типы ошибок при позиционировании

Для координат, получаемых при помощи USBL, можно выделить несколько типов ошибок.

Систематические ошибки, которые связаны, например, с установочными углами USBL (такая ошибка может появиться при изменении угла поворота штанги USBL, произошедшее уже после выполнения калибровки и определения установочных углов) или иными неправильными настройками. Систематические ошибки чаще всего проявляются как смещение координат, выдаваемых USBL, на некоторый угол и/или расстояние.

При позиционировании SSS систематические ошибки USBL могут быть обнаружены при помощи сопоставления сонограмм с данными MBES (который установлен на борту и для его позиционирования USBL не используется). Также систематические ошибки могут быть выявлены при сопоставлении координат целей на соседних сонограммах. Именно для определения стабильности положения целей используется прием «встречные курсы на соседних линиях» – предполагается, что систематическая ошибка, которая привязана к системе координат судна, на встречных курсах «изменит свой знак» в системе координат площади съемки, что приведет к смещению цели.

На данных магнитной съемки систематические ошибки также могут быть обнаружены по сопоставлению с положением локальных объектов или кабелей на данных SSS и MBES. В большинстве случаев такие объекты относительно редки, а магнитные аномалии являются интегральными: (1) площадь аномалии в несколько раз превышает площадь объекта; (2) соотнести положение объекта и его «положение внутри аномалии» не очень просто; (3) возможно имеет место погребенная часть объекта, которая не видна на данных SSS и MBES, но также создает часть магнитной аномалии. Поэтому, при магнитной съемке, в основном используется прием «встречные курсы на соседних линиях» – совпадение очертаний аномалий на встречных курсах позволяет предположить отсутствие систематических ошибок позиционирования по USBL.

Отметим, что причиной систематической погрешности в определении позиции буксируемого устройства по USBL может быть не «присутствие ошибки непосредственно в системе USBL», а присутствие ошибки во вспомогательной системе, данные которой используются при вычислении позиции. Например, ошибка в установочных углах MRU приведет к ошибке определения угла пеленга по USBL, а неправильная скорость звука приведет к ошибке определения дистанции до буксируемого объекта.

Одним из часто встречающихся типов систематических ошибок USBL, обусловленных вспомогательной системой, является неполная компенсация качки судна. В этом случае, на треке буксируемого устройства присутствуют осцилляции, которые коррелируют с Roll, Pitch или Yaw. При длине буксировочного кабеля порядка 200 метров и положении точки буксировки на диаметральной плоскости судна, Roll судна механически не может передаваться на буксируемое устройство и не может приводить к появлению Yaw у буксируемого устройства (с последующим

появлением осцилляций на треке буксируемого устройства). Наличие таких «осцилляций» косвенно свидетельствует о необходимости проверки настроек системы USBL.

Перечислим основные возможные источники систематической ошибки: некорректная скорость звука; установочные углы USBL; установочные углы MRU / Гуго; ошибки в выносах-оффсетах (GPS, MRU, USBL head); отличие координат метацентра судна от координат CoG судна, а также изменение координат метацентра в зависимости от заполненности танков и погрешности модели для очень сильной качки.

Случайные ошибки, которые связаны со случайным шумом при работе USBL; на полевом материале это выглядит как «разброс» точек трека буксируемого устройства относительно прямой линии, при прямолинейном движении буксируемого устройства. Случайный шум можно охарактеризовать при помощи статистических параметров (модальные значения, среднее арифметическое, среднеквадратическое отклонение). Как правило случайный шум предполагается результатом суммы множества небольших и независимых ошибок, за счет чего шум рассматривается как нормально распределенный с точки зрения математической статистики. Причинами случайного шума на USBL является аппаратная погрешность, и, возможно, постоянная сильная высокочастотная вибрация в области приемника или передатчика (вызванная, например, работой двигателей судна). Так же, как и для систематической ошибки, причиной шума в определении позиции буксируемого устройства по USBL может быть не «шум системы USBL», а шум вспомогательной системы, данные которой используются при вычислении позиции (например, MRU).

Вылеты и единичные выбросы, которые связаны с воздействием на систему USBL сторонних факторов, ограниченных по времени. Как правило такое воздействие является достаточно сильным и приводит к получению измерения, выбивающегося из общей закономерности. К вылету на данных USBL может привести кратковременное «экранирование» транспондера USBL. Такое экранирование может осуществляться:

- (1) частями буксируемого устройства при его движении – поворот ROV или движение ScanFish, при которых один из элементов конструкции находится на линии голова-транспондер USBL;
- (2) особенностями рельефа дна – транспондер USBL, установленный на ScanFish, оказывается «закрыт» песчаной волной при огибании рельефа;
- (3) взаимным положением нескольких буксируемых устройств – «ближнее» устройство находится на линии голова-транспондер USBL для «дальнего» устройства.

Как правило в описанных ситуациях происходит воздействие на акустическую посылку USBL (дифракция, переотражение, экранирование), которое приводит к неправильному определению координат буксируемого устройства.

Так же, как и для систематической ошибки, причиной вылета может быть не «система USBL», а данные вспомогательной системы, например, – вылет позиции GPS, при потере коррекции со спутника или базовой станции.

Пример анализа причин вылетов рассмотрен в следующем разделе.

Реже встречаются два других вида ошибок, которые являются «пограничными» для перечисленных выше.

Протяженное воздействие связано с многократным (или протяженным во времени) воздействием сторонних факторов. В этом случае грань между единичными выбросами и случайными ошибками размывается. Примеры «протяженного воздействия»:

- (1) Пусть для DP-судна при включении определенного подруливающего устройства вибрация начинает влиять на голову USBL, тогда в моменты включения «уровень случайных ошибок» будет резко возрастать. Мы получим участок записи, который в зависимости от длительности и силы воздействия подруливающего устройства, можно рассматривать и как «участок сплошных вылетов» и как «участок с большой случайной ошибкой»;
- (2) Пусть позиционируется устройство, находящееся в близости от DP-судна, при этом «одна из кильватерных струй» судна периодически оказывается на линии голова-транспондер USBL, в эти моменты «уровень случайных ошибок» будет возрастать. Мы получим участок записи, который в зависимости от длительности и силы воздействия турбулентности кильватерной струи, можно рассматривать и как «участок сплошных вылетов» и как «участок с высоким уровнем случайных ошибок».

В какой-то мере, к «протяженному воздействию» можно отнести работу в слепых акустических зонах трансдюсера USBL или рядом со слепыми зонами.

Изменяющиеся систематические ошибки. Если «протяженное воздействие» связано с появлением и исчезновением сторонних факторов, то изменяющиеся систематические ошибки связаны с относительно плавным изменением условий. Примером могут быть изменения локальной гидрологии – аномалии в водной толще, связанные с изменениями скорости звука (термоклин, области впадения рек). При плавном изменении свойств водной толщи вдоль линии геофизической съемки мы получим плавное увеличение и уменьшение ошибки позиционирования буксируемого устройства. При многократном резком изменении получим аналог «протяженного воздействия» (в пределе – с вылетами и изменением уровня шума). Описанный тип ошибок связан с аномальным состоянием водной среды в районе работ и встречается довольно редко.

Фактически, каждый из рассмотренных типов ошибок требует применения собственного метода обработки. Ниже приводится методика оценки вылетов, когда происходит временная потеря позиции USBL, связанная с воздействием сторонних факторов. А именно – методика вычисления длины «участка потери позиции USBL», для которого допустима интерполяция позиции буксируемого устройства внутри вылета (за критерий допустимости интерполяции принимается заданная точность позиционирования буксируемого устройства для выполнения магнитной съемки).

1.2 Анализ причин вылетов USBL (пример съемки ScanFish)

Исходные условия: при помощи ScanFish, на которой установлены два ряда магнитометров G-882, выполняется магнитная съемка. Позиционирование ScanFish выполняется при помощи USBL (Kongsberg HiPAP 502) с отключенным осреднением, фильтрами Калмана и предсказыванием.

Пусть из анализа треков буксируемых устройств, позиционируемых по USBL, на них отсутствуют помехи типа «протяженное воздействие» и «изменяющиеся систематические ошибки». Также на треках в явном виде отсутствуют систематические ошибки (что можно проверить при сравнении результатов магнитной съемки на соседних линиях на встречных курсах). Трек ScanFish включает только случайные ошибки и вылеты. При этом случайные ошибки обусловлены в основном аппаратным шумом и близки к статистическому нормальному распределению.

При работе со ScanFish возможны два места крепления транспондера USBL: (1) на специальном посадочном месте на корпусе ScanFish, (2) на буксировочном кабеле перед ScanFish (обычно на дистанции 2–2.5 метра от COG ScanFish). На рассмотренном ниже примере транспондер был закреплен на корпусе ScanFish (Рисунок 1.1).

При анализе координат однозначная причина вылетов не выявлена:

- Вылеты присутствуют как в областях с песчаными волнами, так и в областях с ровным морским дном. Это исключает «экранирование рельефом дна», хотя на некоторых профилях прослеживается прямая корреляция между присутствием песчаных волн и вылетами;
- Вылеты присутствуют как при двух, так и при одной буксируемой ScanFish, что исключает акустические помехи от транспондера второй ScanFish;
- При двух буксируемых ScanFish вылеты могут проявляться как на ближней к судну, так и на дальней от судна ScanFish, то есть механизм «ближнее устройство находится на линии голова-транспондер USBL для дальнего устройства» не работает;
- Вылеты не зависят от сноса ScanFish течением относительно судна; также вылеты не зависят от скорости судна относительно дна. Это может служить косвенным признаком, что вылеты не зависят от скорости течения и угла наклона корпуса ScanFish на котором закреплен транспондер USBL;



Рисунок 1.1 Посадочное место для установки USBL-транспондера на корпусе ScanFish

Вероятно, причиной вылетов является не какой-либо отдельный из перечисленных факторов, а сочетание нескольких факторов; поэтому соотнести вылеты напрямую с какой-либо из описанных ситуаций сложно. Из общего анализа можно предположить, что вылеты связаны с креном-тангажом ScanFish. Можно выделить следующие ситуации появления вылетов:

- 1) Пусть передняя часть корпуса ScanFish поднимается вверх, тогда транспондер USBL оказывается направлен вверх и экранирован корпусом ScanFish от головы USBL, его акустическая посылка для USBL «теряется» (Рисунок 1.2, Рисунок 1.3);

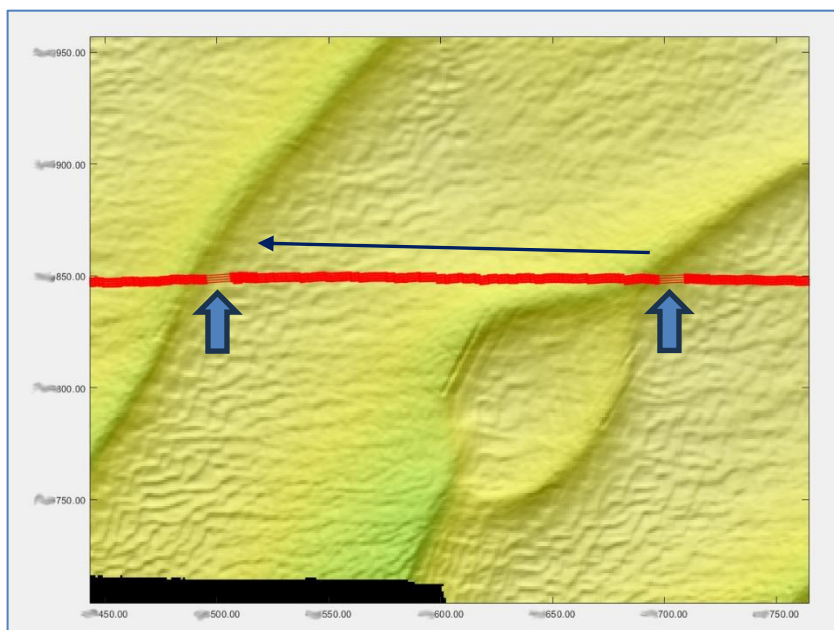


Рисунок 1.2 Вылеты при «подъеме» ScanFish на песчаную волну

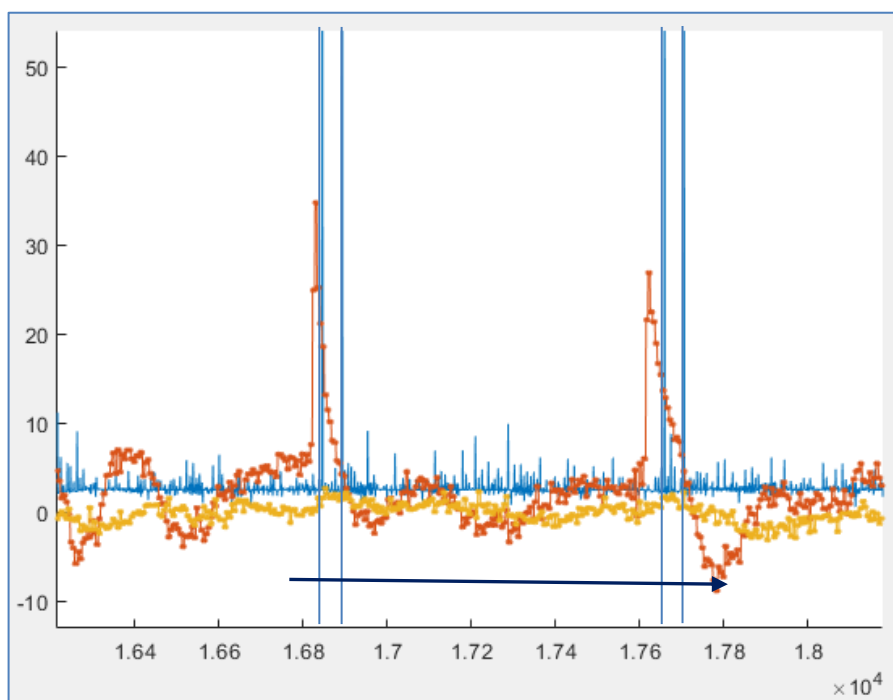


Рисунок 1.3 Сопоставление положения вылетов при «подъеме» ScanFish на песчаную волну (синие вертикальные линии), Pitch (оранжевый) и Roll (желтый)

2) Пусть передняя часть корпуса ScanFish опускается вниз, тогда транспондер USBL оказывается направлен вниз в сторону дна. Сигнал транспондера USBL «поглощается» дном, что приводит к появлению вылета в координатах. Пример показан на Рисунке 1.4 и Рисунке 1.5 – после прохода песчаной волны передняя часть корпуса ScanFish опускается вниз (для заглубления ScanFish), транспондер оказывается направлен в сторону дна, и его акустическая посылка для USBL «теряется»;

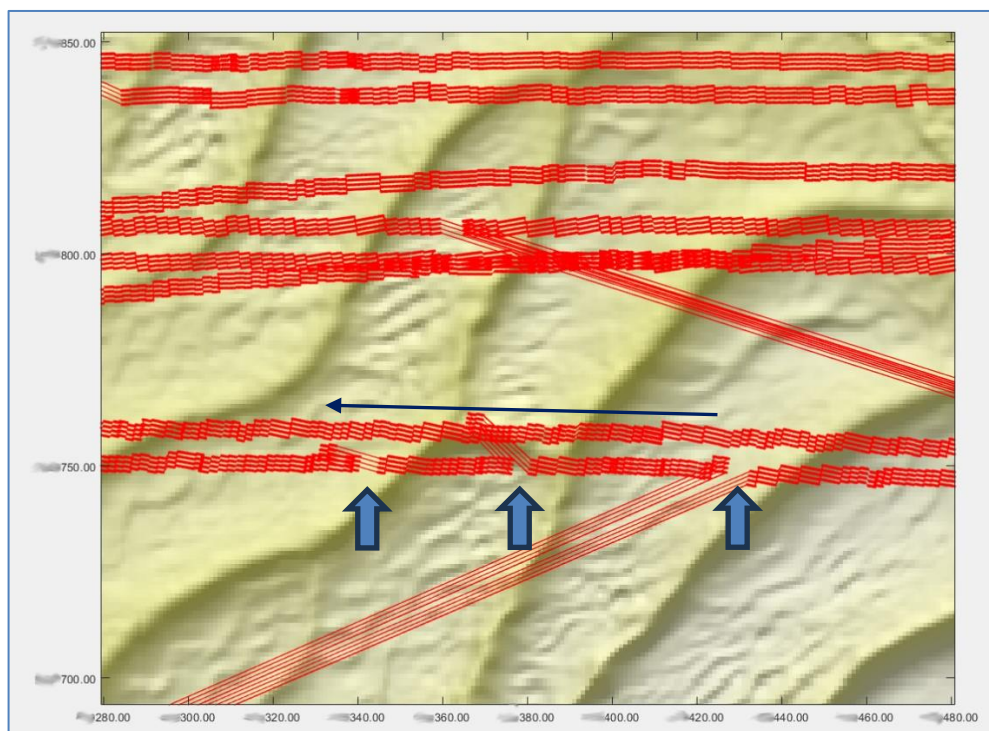


Рисунок 1.4 Вылеты при «соскальзывании» ScanFish с песчаной волны

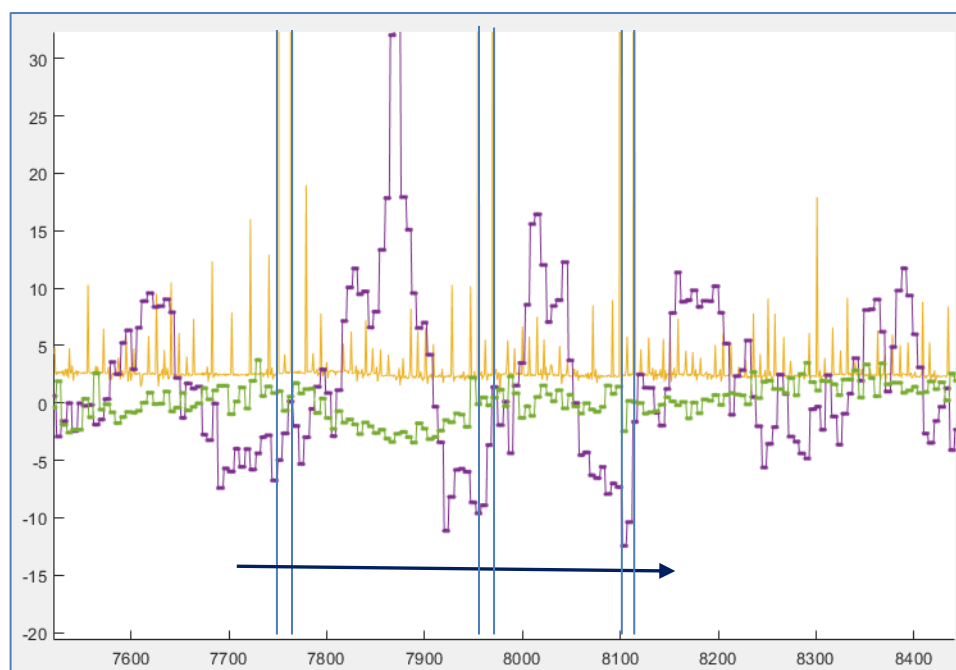


Рисунок 1.5 Сопоставление положения вылетов при «соскальзывании» ScanFish с песчаной волны (синие вертикальные линии), Pitch (фиолетовый) и Roll (зеленый)

3) Пусть передняя часть корпуса ScanFish немного опускается вниз, транспондер USBL оказывается направлен вниз в сторону дна под небольшим наклоном. За счет особенностей дна, сигнал транспондера USBL «отражается» от него, и голова USBL «распознает» именно отраженную часть свип-сигнала. При этом удлиняется путь, пройденный (отраженным) сигналом до головы USBL, что приводит к «отскоку назад» координат ScanFish. Пример показан на Рисунке 1.6.

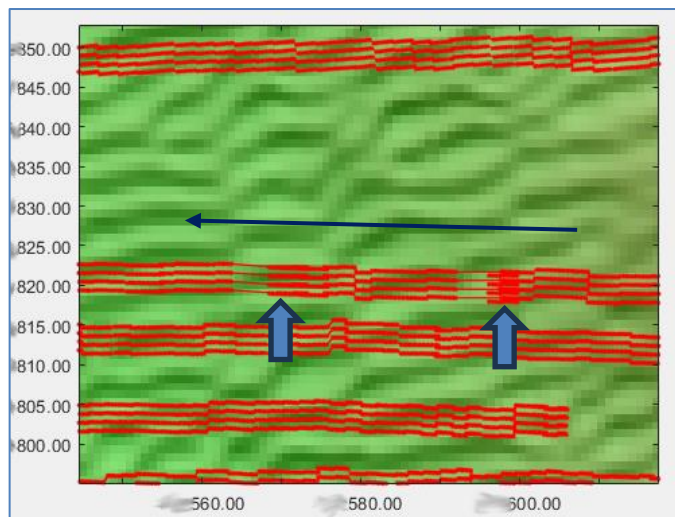


Рисунок 1.6 «Отскок ScanFish» назад при движении над ровным дном (отскок примерно на 10 метров, альтитуда ScanFish 3.5 метра)

Таким образом, для рассматриваемого случая (транспондер закреплен на корпусе ScanFish), наличие вылетов вероятно связано с комплексом причин (течение, рельеф), приводящих к крену-тангажу корпуса ScanFish. На это накладывается частота акустических посылок USBL (QINSy экстраполирует координаты транспондера USBL после приема посылки USBL, или до момента получения новых данных от системы USBL, или до момента time-out) и, возможно, экстраполяция одного отсчета или USBL или QINSy (Рисунок 1.3 – вылет координат USBL происходит уже после прохождения гребня волны и выхода Pitch ближе к десяти градусам). Также, вероятно, причиной «отскока ScanFish» является характер поверхности дна, приводящий к отражению от него свип-сигнала транспондера USBL.

Для рассмотренного примера, за счет влияния большого «комплекса причин»:

- 1) появление вылета невозможно однозначно «связать» с измерениями какого-либо одного датчика (соответственно нельзя найти тривиальную причину и «простое и однозначное решение» для ее устранения);
- 2) появление вылета в первом приближении можно рассматривать как «случайное» (результат совместного воздействия множества независимых причин).

Устранение вылетов, в таком случае, лежит в плоскости «сильного изменения условий измерений», например, в перемещении транспондера USBL с корпуса ScanFish на буксировочный кабель.

2. Терминология и краткое описание графа обработки координат

Перед обсуждением методики контроля качества необходимо определиться со значением некоторых терминов, которые будут использоваться далее:

- **Истинными значениями** будем называть значения физической величины как бы измеренные «идеальными» приборами с нулевой погрешностью в «идеальных условиях» (в отсутствии сторонних мешающих факторов и помех);
- **Измеренными значениями** будем называть значения физической величины, измеренные реальными приборами, обладающими погрешностью измерений; кроме того, измерения могут быть подвержены влиянию различных сторонних факторов, которые снижают их точность;
- **Сырыми данными** будем называть некоторую совокупность результатов измерений, которые не были подвергнуты какой-либо дополнительной обработке. Отчасти «сырые данные» являются синонимом «измеренных значений», за исключением двух отличий (1) в первом случае акцент сделан на отсутствии дополнительной обработки, а во втором – на «физическом» выполнении измерений; (2) термин «данные» (например, координаты, полученные по данным USBL) не является прямым аналогом термина «измерения». Так, для координат, полученных по USBL, измерениями являются время ответа транспондера и углы пеленга от головы USBL на транспондер, которые с использованием измерений MRU и иных дополнительных систем, пересчитываются в «сырые данные» – координаты буксируемого устройства. В общем случае данные остаются «сырыми», если для пересчетов используются простые математические формулы, которые комбинируют измеренные значения для нескольких измерительных систем; если данные подвергаются обработке с элементами интегрирования, интерполяции или предсказания (например, фильтры Калмана), то они рассматриваются как «обработанные данные»;
- **Обработанными данными** будем называть сырые данные, дополнительно подвергнутые процедурам математической обработки;
- **Реальными вылетами** будем называть отсутствие измерений в ряду измерений на протяжении некоторого времени (отсутствие означает выполнение измерений с очень большой погрешностью, которая не позволяет получить информацию об измеряемой величине). Расстояние, соответствующее вылету в координатах, будем называть **длиной вылета**;
- **Модельными вылетами** будем называть искусственно созданный вылет в ряду измерений;
- **Интерполяцией или процедурами интерполяции** будем называть процедуры математической обработки, которые заполняют вылеты (в нашем случае – координаты буксируемого устройства на месте вылета) результатами математической обработки (линейная интерполяция, интерполяция при помощи сплайнов или регрессионных методов, интерполяция при помощи математического моделирования);
- **Обработанными данными приближенными к истинным значениям** будем называть сырые данные, подвергнутые процедурам математической обработки, которые снижают погрешность измерений и приближают сырые данные к истинным значениям. Например, сырые координаты

трека ScanFish обязательно включают случайный нормально распределенный шум; тогда к истинным значениям будут ближе не сырые измерения, осложненные случайным шумом (разбросом), а обработанные координаты с уменьшенным уровнем случайного шума (например, при помощи осреднения). Собственно, эти обработанные значения координат и будут использоваться нами при картопостроении и интерпретации магнитного поля как «более приближенные к истинным значениям». Отчасти «обработанные данные» и «данные приближенные к истинным значениям» являются синонимами, однако не все процедуры обработки направлены на «уменьшение погрешности измерений» (в узком смысле); например, процедуры обработки, осуществляющие интерполяцию внутри вылета направлены на «восстановление отсутствующих сырых данных»;

- **Процедурами уменьшения погрешности измерений** будем называть такие процедуры математической обработки, с помощью которых из сырых данных получаются данные приближенные к истинным значениям;
- **Отклонениями** (дистанцией, разностью) будем называть разность между данными приближенными к истинным значениям и сырыми данными. Максимальное отклонение, определяемое для съемки техническим заданием, будем называть **максимально допустимым отклонением** или **допустимым отклонением**.

В первом приближении процесс обработки координат можно представить состоящим из следующих шагов:

- снижение уровня случайного шума,
- удаление вылетов (ложных значений),
- интерполяция значений на месте вылетов.

Подробное описание графа обработки координат можно найти в Части 5: «Обработка координат, полученных по USBL Ч. 2 – Программная реализация: функции gMapPickHandleNan2, gFieldsDespike1D, gFieldsDespike2D». Для обработки координат и измерений вспомогательных систем используются функции библиотеки ge0mlib.

Удобным будет рассматривать контроль качества позиционирования «для случайного шума» и «для вылетов» отдельно.

3. Контроль качества позиционирования по уровню случайного шума

Согласно статистике, если случайная величина распределена нормально, то ее стандартное отклонение уменьшается с количеством измерений пропорционально корню из количества измерений. То есть, если внутри скользящего окна координаты USBL изменяются очень слабо (на величину, много меньшую величины стандартного отклонения), то при осреднении в скользящем окне, произойдет уменьшение случайного разброса для координат USBL. На практике этот случай не встречается, поскольку он означает близкое к остановке состояние буксируемого устройства. ***Однако, это же правило можно распространить на величину, изменяющуюся линейно внутри скользящего окна*** – при этом «приращения в левой части окна» как бы компенсируют «приращения в правой части окна»; в результате осреднения линейной функции получается значение равное значению в центре окна. При этом стандартное отклонение для случайного разброса также уменьшается пропорционально корню из количества отсчетов внутри окна.

Как следствие – наилучшей шириной скользящего окна будет то значение, в котором содержится достаточное количество измерений для уменьшения случайной ошибки и, одновременно, ***изменение осредняемой величины близко к линейному***. При значительном увеличении размера окна статистическая компонента погрешности позиционирования начинает снижаться медленнее, однако ошибка, вызванная нелинейностью осредняемой величины, возрастает и начинает превышать случайную ошибку. Таким образом, оптимальный размер осредняющего скользящего окна также будет зависеть от **режима прохождения линии съемки** (близости изменения координат к линейному-равномерному на небольшом расстоянии).

На основе обработанных данных приближенных к истинным значениям (с уменьшенным уровнем случайного шума) и сырых данных, мы можем, в первом приближении, выполнить ***контроль качества позиционирования по уровню случайного шума***. Вычисления будут выглядеть следующим образом:

- выполняем обработку сырых координат для получения обработанных координат приближенных к истинным значениям (например, с удаленным случайным нормально-распределенным шумом);
- выполняем сравнение сырых координат с координатами приближенными к истинным – расстояние между ними не должно превышать допустимое отклонение.

Если расстояние превышает допустимое отклонение, то уровень случайного шума вдоль профиля считается неприемлемо большим, и для продолжения съемки необходимо уменьшить влияние причин, приводящих к появлению шума.

4. Контроль качества позиционирования по длине вылетов

Буксируемое устройство, не имеющее активных элементов управления, будет изменять свое положение очень плавно. В отсутствии локальных течений-струй и при достаточно большой длине буксировочного кабеля перемещение устройства очень стабильно (сглаженно и равномерно) из-за инертности, вызванной динамикой буксируемого устройства и динамикой буксировочного

кабеля в водной толще. Кратковременное смещение точки буксировки от линии буксировки (roll, смещение кормы судна при небольшом изменении курса судна) слабо влияет на положение буксируемого устройства. При значительном смещении точки буксировки смещение буксируемого устройства будет происходить очень плавно. Влияние на трек буксируемого устройства изменения скорости судна, силы и неоднородностей течения будет вызывать отклонения в движении буксируемого устройства от прямолинейного; назовем влияние таких особенностей режимом прохождения линии съемки.

По сути, задача определения максимальной длины вылета, который может быть интерполирован, сводится к определению того, насколько *режим прохождения линии съемки* позволяет выполнять интерполяцию. Критерием допустимости интерполяции будет отклонение интерполированных значений от измеренных значений на величину, не превышающую пороговую.

С учетом введенных выше понятий, оценить допустимый размер вылета USBL для режима прохождения линии съемки можно по следующей методике:

- на треке ScanFish для сырых координат формируем искусственный (смоделированный) вылет («дырку») заданной длины;
- выполняем обработку сырых координат, осложненных вылетом; обработка включает процедуры уменьшения погрешности измерений (например, процедуры осреднения как способа уменьшить уровень случайного шума) и процедуры интерполяции значений на месте вылета;
- на месте вылета находим разность между обработанными интерполированными значениями координат и значениями сырых координат;
- если рассчитанная разность не превышает допустимого отклонения, то длина вылета считается допустимой;
- повторяем описанные действия, перемещая искусственный вылет вдоль трека ScanFish, чтобы проверить допустимость вылета на любом из участков линии съемки.

Повторяя процедуру для разной длины вылета, можно найти ту длину, при которой погрешность интерполяции начинает превышать допустимое отклонение. На практике, в качестве допустимого размера вылета, желательно принять значение заведомо меньшее, чем то, при котором превышает допустимое отклонение.

В приведенной методике вычисляется «отклонение интерполированных значений координат на месте модельного вылета от сырых координат». Однако, в этом случае погрешность является суммой случайной погрешности и погрешности интерполяции вылета. Для получения оценки именно погрешности интерполяции вылета, необходимо вычислять «отклонение интерполированных значений координат на месте модельного вылета от координат приближенных к истинным».

4.1 Влияние систематической ошибки на оценку допустимой длины вылета

Наличие систематической ошибки или медленно меняющихся систематических ошибок не будет оказывать влияния на результаты расчетов для допустимой длины вылета и уровня случайного шума. Для описанной процедуры, в присутствии систематической ошибки обработанные координаты приближенные к истинным значениям будут соответствовать не физическому треку буксируемого устройства, а «физическому треку буксируемого устройства, осложненному систематической ошибкой». Проверить присутствие систематической ошибки будет можно будет с помощью описанного выше приема – при помощи сравнения положения аномалий магнитного поля, полученных для встречных курсов на соседних линиях съемки ScanFish.

4.2 Влияние активных элементов управления буксируемого устройства на оценку допустимой длины вылета

Описанная выше процедура оценки допустимого размера вылетов USBL хорошо работает для пассивного буксируемого устройства. Однако, для 3D-ScanFish, оснащенной активными элементами управления, будет нарушаться неизменность условий буксировки (в любой момент оператор может «вмешаться» и нарушить «закономерности буксировки» изменив характер управления ScanFish):

- Для искусственных вылетов сырые координаты 3D-ScanFish будут получены при управляемом удержании буксируемого устройства на линии съемки (имеется в виду смещение поперек линии буксировки);
- Для реальных вылетов сырые координаты 3D-ScanFish будут получены при неуправляемом (или «неправильно управляемом») перемещении буксируемого устройства. Имеется в виду, что органы управления, задающие смещение поперек линии буксировки, будут зафиксированы после потери сигнала USBL. 3D-ScanFish продолжит «смещение», заданное до потери сигнала USBL, а после восстановления работы USBL алгоритмы 3D-ScanFish начнут корректировать «накопленное отклонение от линии движения, заданной автопилоту».
- В целом, закономерности движения 3D-ScanFish более сложные для анализа. Например, при «вылете с малым смещением для координат USBL», органы управления 3D-ScanFish будут переведены в «неправильное положение» для устранения «ложного смещения, задаваемого вылетом».

Для возможности использования описанной методики смещения, выполняемые органами управления 3D-ScanFish в горизонтальной плоскости, должны быть «относительно медленными», чтобы не привести к значительному смещению за время вылета (время потери сигнала USBL или малого сбоя в координатах USBL). Оценить выполнение данного условия можно с помощью проверки величины отклонения 3D-ScanFish от запланированного трека (линии движения заданной автопилоту) в начале реального вылета и в конце реального вылета. Если это отклонение изменилось не сильно, то погрешностью, которая «вносится потерей управления» можно пренебречь.

4.3 Влияние работы лебедки на оценку допустимой длины вылета

Для пассивно-буксируемого устройства происходит изменение позиции, при подтягивании/вытравливании буксировочного кабеля при помощи лебедки, осуществляемого оператором (если для ScanFish и 3D-ScanFish во время съемки обычно используется постоянная длина кабеля, то для SSS, например, контроль альтитуды буксировки над дном осуществляется именно путем подтягивания/вытравливания буксировочного кабеля).

Для получения координат, приближенных к истинным, **при осреднении координат в скользящем окне**, величина окна должна быть достаточно малой, поскольку будет происходить «размазывание» координат для участков в области начала и завершения работы лебедки. То есть, с одной стороны, при помощи осреднения мы убираем случайный шум, но с другой стороны – мы вносим погрешность за счет «смещения координат» (погрешности, создаваемой неравномерным движением буксируемого устройства на участке, попадающем внутрь скользящего окна), если внутрь скользящего окна попадает участок с работой лебедки. Действительно, если для «пассивного перемещения» изменение трека будет происходить достаточно медленно, и изменение позиции внутри скользящего окна можно принять «происходящим по линейному закону», то воздействие работы лебедки будет вносить изменения в трек относительно быстро.

При интерполяции внутри вылета, если начало или окончание работы лебедки будет находиться внутри вылета, также будет иметь место «размазывание» координат по всей длине вылета. В результате этого, интерполированные координаты внутри вылета будут иметь большие отклонения от истинных значений.

В отличие от влияния активных элементов управления, работу лебедки в большей степени можно рассматривать как «часть режима прохождения профиля». Если в моменты работы лебедки отклонение между сырыми и обработанными координатами будет велико, то это значит, что в процедуру интерполяции значений внутри вылета необходимо ввести длину вытравленного кабеля для уменьшения модельной погрешности этой процедуры.

5. Пример оценки допустимой длины вылета USBL

5.1 Вычисления

Рассмотрим описанные закономерности на примере полевых данных. На Рисунке 5.1 показан пример случайного шума на участке трека ScanFish – красной линией показан исходный трек, синей линией – обработанные координаты (данные с удаленным случайным шумом). Отклонения имеют вид «отрезков с примерно одинаковым смещением», которое потом относительно резко изменяется. Такая форма связана с экстраполяцией QINSy измерений от двух источников данных:

- данных, поступающих от USBL – координат транспондера USBL, который установлен на буксируемом устройстве (обновление примерно каждые 3 секунды, «большие смещения»);
- данных, поступающих от MRU, которое установлено на ScanFish – результат вычисления координат магнитометров, относительно транспондера USBL (обновление примерно каждую секунду, «малые смещения»).

[Примечание: для максимально корректного расчета координат магнитометров желательно иметь не экстраполированные QINSy координаты, а исходные данные USBL и MRU, тогда выполнять удаление выбросов и осреднение (для удаления случайного шума) можно на первичных измеренных значениях, которые не подвергались математической обработке. Также, при использовании экстраполированных QINSy координат осреднение в скользящем окне будет происходить «к середине отрезков», в то время как измеренные значения расположены «в начале отрезков».]

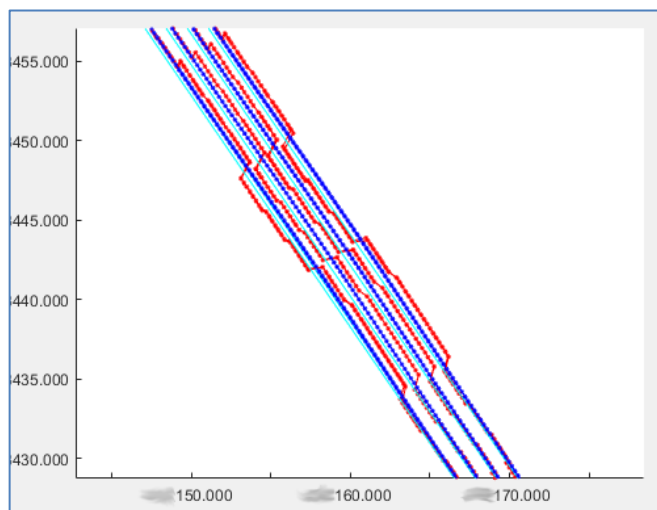


Рисунок 5.1 Сырые координаты (красный цвет) и «обработанные координаты приближенные к истинным значениям» (синий цвет)

На Рисунке 5.2 показана разность (дистанция) между координатами обработанного и сырого треков; далее будем называть эти значения отклонениями. В нашем случае отклонения формируются преимущественно за счет случайного шума, а величина отклонений на всем треке не превышает одного метра, за исключением трех участков, где отклонения немного превышают 1 метр.

На этом рисунке и рисунках ниже, отклонения представлены не точками, а отрезками, которые формируются за счет интерполяции QINSy, как описано для Рисунка 5.1.

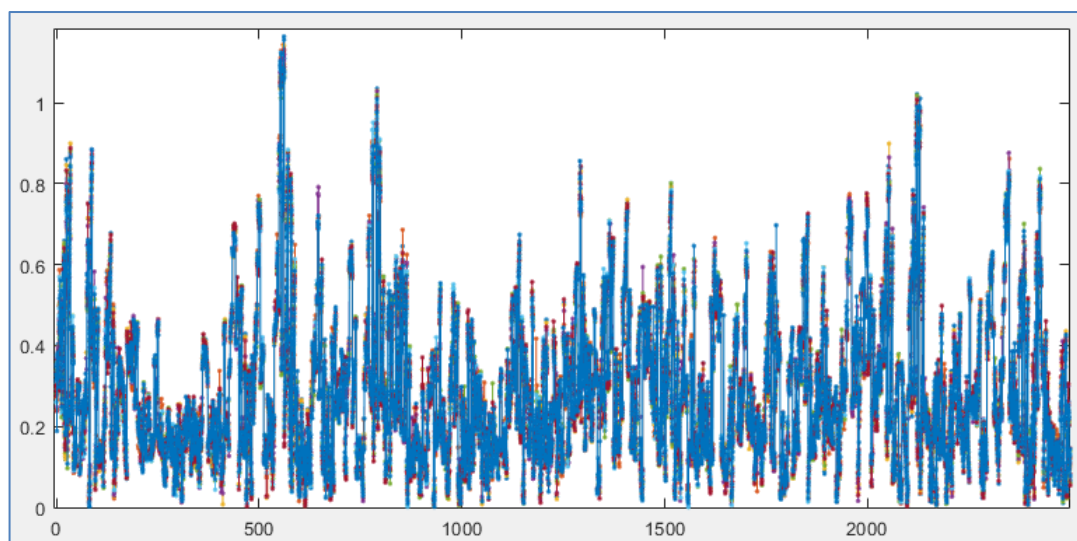


Рисунок 5.2 Расстояние между сырыми и обработанными координатами – контроль качества по уровню случайного шума (графики для 8-ми магнитометров показаны разным цветом)

Ниже приведены три рисунка (Рисунок 5.3, Рисунок 5.4, Рисунок 5.5) содержащие расчеты для модельных вылетов 25, 50 и 150 метров. Предварительно была рассчитана величина отклонений, возникающая за счет случайного шума (по аналогии с Рисунком 5.2); эта величина показана синими линиями для всех 8-ми магнитометров, установленных на ScanFish. После внесения модельных вылетов («дырок»), была выполнена повторная обработка трека и повторный расчет отклонений. Величина отклонений для треков с модельными вылетами показана красными линиями для всех 8-ми магнитометров. Границы модельных вылетов показаны вертикальными зелеными линиями.

Как видно из рисунков, для рассматриваемого участка трека вылет 25 метров создает лишь незначительные отклонения трека при интерполяции (Рисунок 5.3). Эти отклонения не превышают отклонения, связанные со случайным шумом. Отклонения остаются незначительными и при длине вылета 50 метров (Рисунок 5.4). Только когда длина вылета достигает 150 метров (Рисунок 5.5), вклад в отклонения, вносимый интерполяцией внутри вылета, начинает значительно превышать отклонения за счет случайного шума.

Последовательное смещение модельного вылета вдоль всего трека дает близкие результаты – только при длине вылета в 80 метров отклонение за счет интерполяции начинает превышать отклонения, связанные со случайным шумом. При этом величина отклонений нигде не превышает пороговое значение 2 метра. Следовательно, реальный вылет длиной 15 метров, присутствующий в координатах трека, допустимо интерполировать в процессе обработки трека (длина вылета заведомо мала для образования значительных отклонений, превышающих пороговые значения).

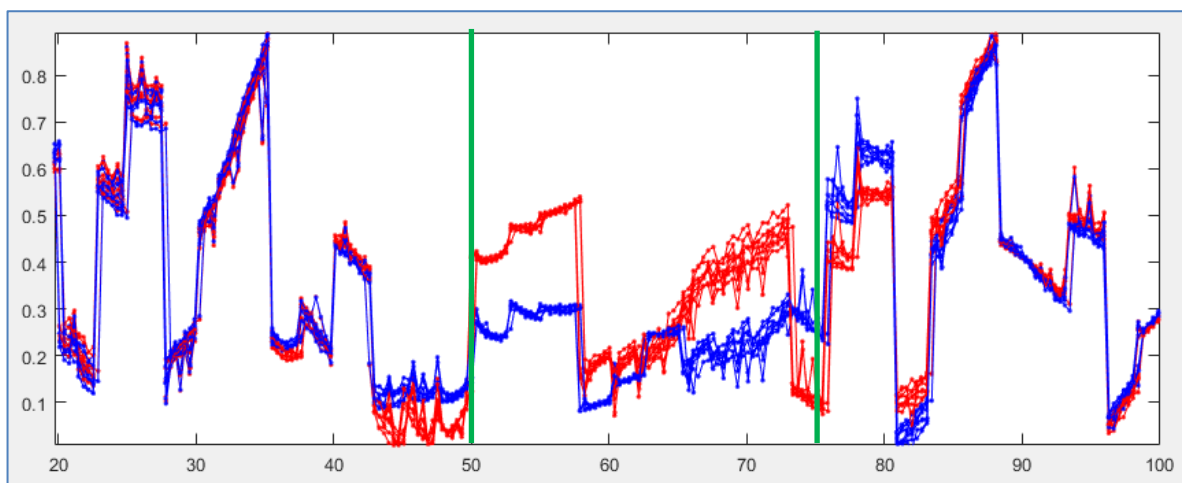


Рисунок 5.3 Расстояние между сырыми и обработанными координатами (синий цвет); то же расстояние с предварительно внесенным вылетом 25м (красный цвет)

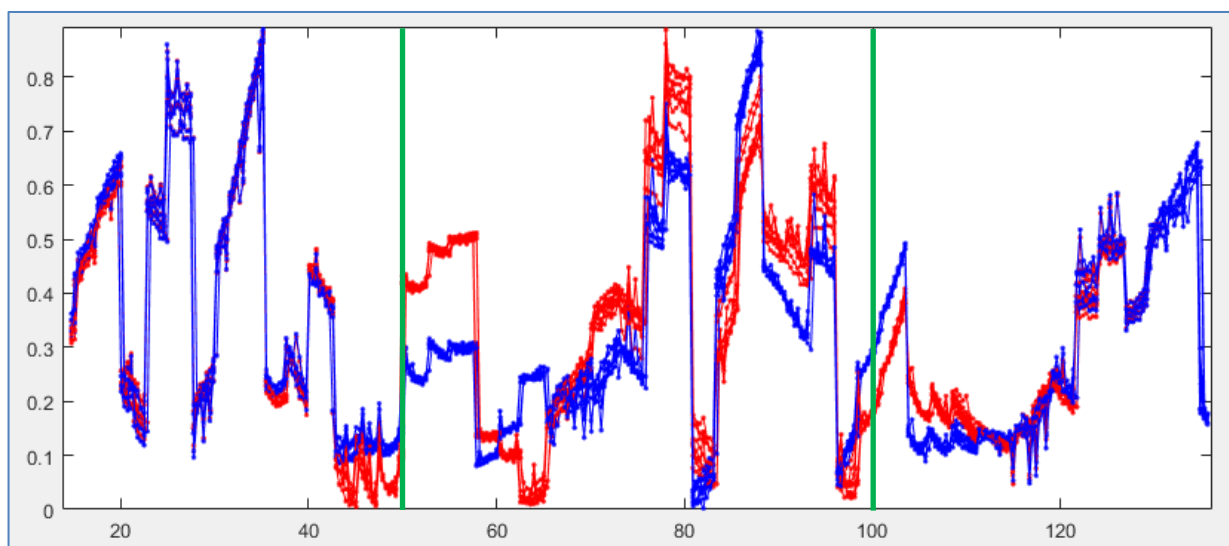


Рисунок 5.4 Расстояние между сырыми и обработанными координатами (синий цвет); то же расстояние с предварительно внесенным вылетом 50м (красный цвет)

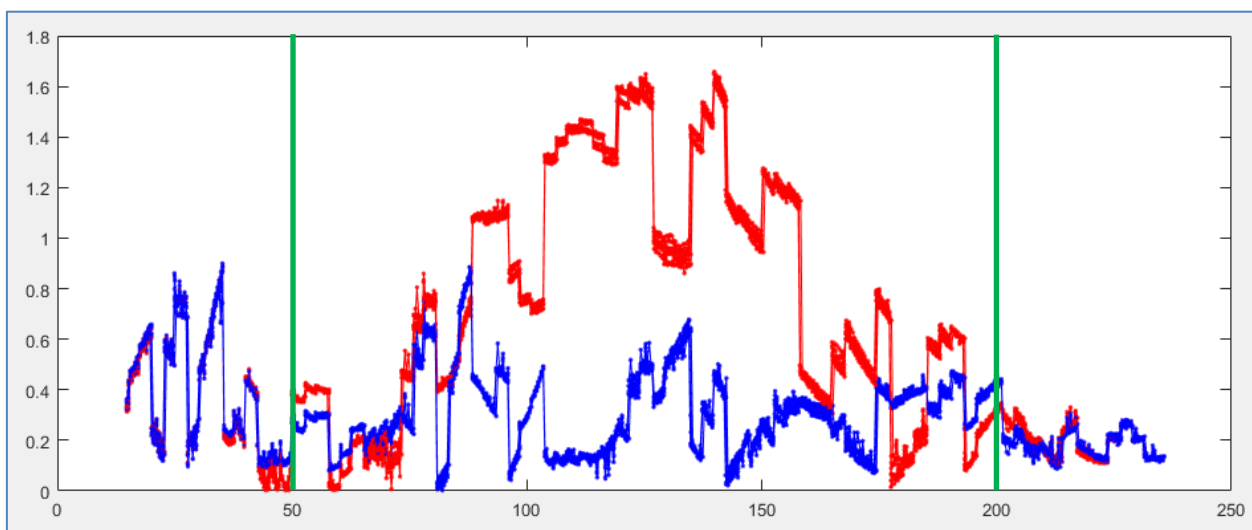


Рисунок 5.5 Расстояние между сырыми и обработанными координатами (синий цвет); то же расстояние с предварительно внесенным вылетом 150м (красный цвет)

На качественном уровне, построения, выполненные на Рисунке 5.3, Рисунке 5.4 и Рисунке 5.5, можно интерпретировать следующим образом:

- При прохождении линии съемки в треке буксируемого устройства присутствуют длиннопериодные смещения-осцилляции относительно прямолинейной линии съемки. Эти смещения будут характеризовать «режим прохождения линии съемки» (для пассивного устройства – смещение его с прямой линии съемки течением; для управляемой 3D-ScanFish – смещение ее с прямой линии съемки течением и отработку подруливающих закрылков-элеронов по возвращению ее назад);
- Создавая модельный вылет и заполняя его результатами интерполяции, мы получаем координаты, отличающиеся от измеренных отсутствием описанных «длиннопериодных смещений-осцилляций». Действительно, методы обработки и интерполяции позволяют сделать трек визуально гладким и равномерным, но в нем будут отсутствовать артефакты, создающиеся локальной гидрогеологией или работой подруливающих закрылков-элеронов;
- Вычисляя разность между «интерполированными значениями» внутри вылета и «измеренными значениями» мы определяем ту длину вылета, при которой длиннопериодные смещения-осцилляции влияют на координаты буксируемого устройства «не сильно». То есть, отклонение измеренных координат трека от интерполированных координат трека не превышает заданного порогового значения.

Для практических расчетов не обязательно перебирать множество разных длин модельного вылета. Достаточно провести вычисления с одной длиной, заведомо превышающей длину реальных вылетов присутствующих на треке, чтобы убедиться, что для данной длины не превышает допустимое отклонение. Также не обязательно перебирать координаты всех магнитометров, установленных на ScanFish, достаточно выполнить вычисления для одного из них. На Рисунке 5.6 показаны результаты вычислений для многократного смещения модельного вылета длиной 50м, шаг вдоль трека 25 метров, вычисления выполнены для 8-ми магнитометров. Участки, уходящие за границы рисунка, соответствуют вылетам длиной до 6- метров.

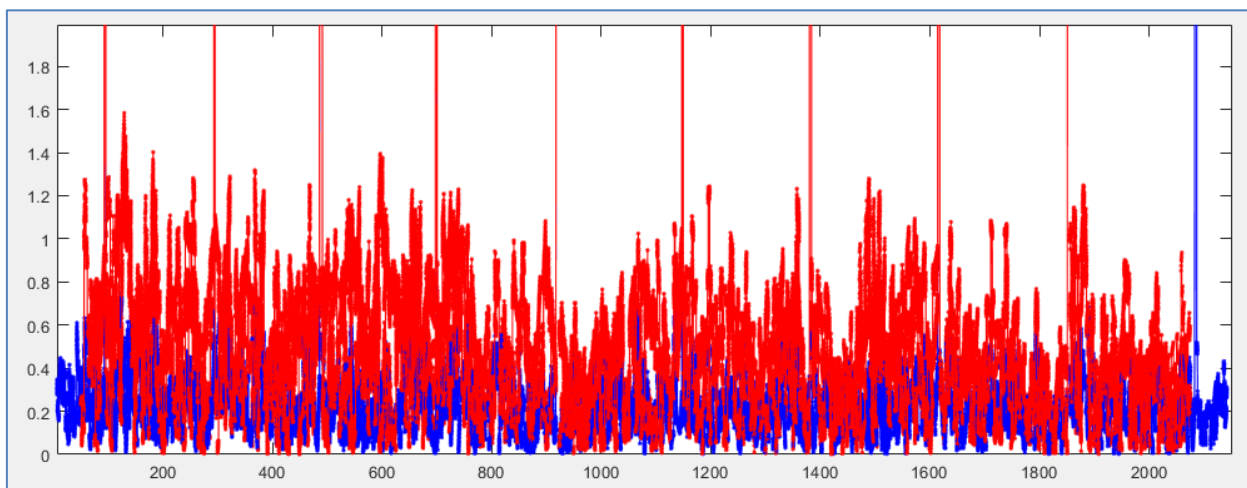


Рисунок 5.6 Расстояние между сырыми и обработанными координатами (синий цвет); то же расстояние с многократно внесенным вылетом 50м (красный цвет)

5.2 Код MatLab и алгоритм вычислений

Для проверки допустимой длины вылета целесообразным представляется выполнение следующей последовательности действий:

- Оценка длин вылетов на профиле съемки и выбор значения L , которое будет использоваться для оценки и вычислений. Данное значение должно превышать длину вылетов, для которых мы хотим проверить допустимость;
- Выполнение обработки данных с внесенным вылетом длиной L . Оценка расстояния между «сырыми данными без вылета» и «обработанными данными с внесенным модельным вылетом», построение графиков, аналогичных показанным на Рисунке 5.3, Рисунке 5.4 и Рисунке 5.5. Вычисленное отклонение не должно превышать допустимого отклонения (погрешности съемки) для позиционирования;
- Многократное внесение модельного вылета длиной L в исходные данные. Вероятно, приемлемым вариантом является смещение вылета не на один отсчет вдоль профиля, а на величину кратную размеру вылета ($1/2$, $1/4$ и т.д.);
- Результаты обработки, вероятно удобно представлять в графической форме, как показано на Рисунке 5.6. При этом, для расчетов по каждому из вылетов выполняется отрисовка *расстояния между сырыми и обработанными координатами* только внутри вылета (а не для всего профиля). В этом случае видно в какой части профиля отклонение для вылета данной длины будет превышать допустимое. Графическую информацию, вероятно, можно дополнить номером отсчета, который соответствует первой точке модельного вылета.
- Точки, соответствующие реальным (не модельным) вылетам, будут показывать значительную величину отклонения. На графиках данные участки желательно выделить отличающимся цветом.

Таким образом, в результате проверки допустимой длины вылета для профиля съемки мы будем иметь следующий набор данных:

- Значение длины вылета L , которое превышает длину вылетов, для которых мы проверяем «допустимость»;
- Графики расстояния между сырыми и обработанными координатами, построенные внутри модельного вылета для множества положений модельного вылета (со смещением вдоль профиля на величину кратную величине модельного вылета – $1/2$, $1/4$ и т.д.). Точки, соответствующие реальным вылетам, отмечаются отличающимся цветом (эти точки будут сильно отклоняться от обработанных координат) и не учитываются при вычислениях. Если расстояние между сырыми и обработанными координатами внутри модельного вылета превысит допустимую величину, то это будет отображено на графиках (подобных показанным на Рисунке 5.6);
- Графическая информация может дополняться текстовой, которая содержит номер первого измерения внутри модельного вылета, для которого расстояние между сырыми и обработанными координатами превысило допустимое отклонение и расстояние от начала

профиля до первого измерения модельного вылета (рассчитанное по обработанным данным без модельных вылетов).

Код функции MatLab, которая предназначена для выполнения расчетов по допустимой длине вылета приведен в Приложении 1.

Заключение

В документе рассмотрены следующие вопросы:

- 1) Описаны виды и источники погрешностей для координат буксируемого устройства позиционируемого по USBL:
 - систематические ошибки;
 - случайный шум;
 - единичные выбросы;а также относительно редко встречающиеся типы погрешностей «протяженное воздействие» и «изменяющиеся систематические ошибки».
- 2) Проведен анализ возможных причин вылетов для конкретной съемки. Сделано предположение, что появление вылетов связано с двумя условиями – креном-тангажом корпуса ScanFish (на котором закреплен транспондер USBL) и характером морского дна в области движения ScanFish.
- 3) Описаны методы практической оценки погрешностей разных типов:
 - Рассмотрен прием «встречные курсы на соседних линиях», применяемый для определения присутствия систематических ошибок;
 - Рассмотрен способ оценки уровня случайного шума через вычисление дистанции между «сырыми координатами» буксируемого устройства и «обработанными координатами приближенными к истинным значениям» (например, сглаженными для удаления случайного шума). Присутствие отклонений, превышающих пороговые значения, может являться индикатором недостаточной точности позиционирования буксируемого устройства;
 - Рассмотрен способ оценки допустимой протяженности вылета в координатах. Для этого вычисляется дистанция-отклонение между обработанными координатами буксируемого устройства (координатами, сглаженными для удаления случайного шума) и обработанными координатами с внесенным модельным вылетом определенной длины. Вычисления повторяются многократно, при последовательном перемещении модельного вылета вдоль трека буксируемого устройства. Если величина дистанции-отклонения превышает допустимую погрешность позиционирования, то это является индикатором, что выполнять интерполяцию координат внутри вылета данной длины нельзя. Вычисления выполняются для вылетов разной длины, с целью поиска максимально допустимой длины (при которой можно выполнять интерполяцию внутри вылета) для рассматриваемого трека.
- 4) Для устройства, имеющего элементы управления движением в горизонтальной плоскости (3D-ScanFish), оценить «степень влияния управления» можно с помощью оценки величины отклонения устройства от запланированного трека в начале вылета и в конце вылета. При смещении, превышающем допустимое отклонение, такое влияние можно рассматривать как «значительное».

Приложение 1. Код MatLab

```
if strcmp(gKey{1},'GapSize') %
    %{'GapSize',50};MagToolR06;
    try gS=gKey{2};catch,gS=input('Gap size=');end;
    for n=1:SU.MagN,
        a=[0 cumsum(sqrt(diff(M1{n}.Es).^2+diff(M1{n}.Ns).^2))];plot(a,sqrt((M1{n}.E-M1{n}.Es).^2+(M1{n}.N-M1{n}.Ns).^2),'-b');hold on;
        for nd=gS:round(gS./2):a(end)-gS*2,
            [~,x1]=min(abs(a-nd));[~,x2]=min(abs(a-nd-gS));
            %plot(a(x1-SU.sWin:x2+SU.sWin),sqrt((M1{n}.E(x1-SU.sWin:x2+SU.sWin)-M1{n}.Es(x1-SU.sWin:x2+SU.sWin)).^2+(M1{n}.N(x1-SU.sWin:x2+SU.sWin)-
M1{n}.Ns(x1-SU.sWin:x2+SU.sWin)).^2),'-b');hold on;
            M1m=M1;tmp=M1m{n}.QMask;tmp(x1:x2)=1;

[M1m{n}.Es,M1m{n}.Ns,M1m{n}.QMask]=gNavDespikes2D(M1m{n}.ti,M1m{n}.E,M1m{n}.N,tmp,SU.QBitEN,0,{ 'poly',2},{ 'linear','extrap'},{SU.sWin,'loess'},[],",",1,'%3f',0);
            %plot(a(x1-SU.sWin:x2+SU.sWin),sqrt((M1{n}.E(x1-SU.sWin:x2+SU.sWin)-M1m{n}.Es(x1-SU.sWin:x2+SU.sWin)).^2+(M1{n}.N(x1-SU.sWin:x2+SU.sWin)-
M1m{n}.Ns(x1-SU.sWin:x2+SU.sWin)).^2),'-r');hold on;
            plot(a(x1:x2),sqrt((M1{n}.E(x1:x2)-M1m{n}.Es(x1:x2)).^2+(M1{n}.N(x1:x2)-M1m{n}.Ns(x1:x2)).^2),'-r');hold on;
        end;
    end;
    hold off;
end;
```