

В.П. Коровин, А.В. Никифоров

ИНТЕРКАЛИБРАЦИЯ СТД-СИСТЕМ

V.P. Korovin, A.V. Nikiforov

INTERCALIBRATION OF CTD SYSTEMS

В работе рассматриваются возможности учёта методологических погрешностей, возникающих при использовании СТД-систем в экспедиционных исследованиях, выполненных на основе проведённых в РГГМУ экспериментов в натуральных условиях.

Ключевые слова: метод, измерение, СТД-система, гидростатическое давление, температура, солёность, функция, погрешность, фильтрация, дисперсия.

In this paper, possibilities of the account of the methodological errors arising at use of CTD systems in expedition researches, executed on the basis of spent in RSHU experiments in natural conditions are considered.

Keywords: method, measurement, CTD system, hydrostatic pressure, temperature, salinity, function, error, filtration, dispersion.

При проведении океанографических исследований в экспедиционных условиях возникает необходимость обеспечения единства измерений, выполняемых различными измерительными средствами, что обусловлено следующими причинами:

- различие существующих методов лабораторной градуировки и используемого при этом оборудования приводит к систематическим расхождениям в показаниях различных приборов;
- при длительных экспедициях возникает необходимость повторных контрольных градуировок приборов непосредственно в экспедиционных условиях;
- флуктуационный характер изменчивости большинства океанографических параметров, с одной стороны, и различие динамических параметров измерительных средств с другой, приводят к появлению различного рода расхождений в показаниях, которые невозможно аттестовать в лабораторных условиях.

В настоящее время океанографические измерения претерпели существенные изменения, вызванные использованием новой автоматической многофункциональной аппаратуры. Ее применение позволяет в значительной степени повысить точность и массовость сбора океанографической информации, но, в свою очередь, поставило на повестку дня существенный вопрос о репрезентативности наблюдений. Это связано с тем, что пока не существует единой методики ни тарировки, ни использования автоматической океанографической аппаратуры, особенно в натуральных условиях.

Учитывая, что в настоящее время в океанологической практике наиболее широкое применение нашли различного типа СТД-системы, целью данной работы является разработка методики проведения интеркалибрации СТД-систем в судовых экспедиционных условиях.

Анализ результатов СТД-измерений, выполненных в экспедициях РГГМУ, показал необходимость более строгого учета ошибок, связанных с методикой производства наблюдений и динамическими факторами исследуемой среды, таких как волнение, турбулентность, внутренние волны и т.п. Влияние подобных факторов проявляется в увеличении дисперсии измеренных характеристик и, особенно, в высокочастотной части спектра, где периоды колебаний измеряемых характеристик, вызванных ими, могут находиться вблизи констант инерционности датчиков и даже превышать их.

Так, например, были выявлены высокочастотные пилообразные искажения на профилях температуры и солености, возникшие за счет нежесткого крепления блок-счетчиков для кабель-троса СТД-системы «Полнос-ГМ» к кран-балке судна, что привело при измерениях к раскачиванию блока и, соответственно, к вертикальным колебаниям самого троса. Амплитуда этих колебаний не превышала 10 см, а период – 1 с. При подобных колебаниях датчик давления зонда «не успевает» реагировать на столь высокочастотные изменения гидростатического давления, но датчики температуры и электропроводности, обладающие меньшими константами инерционности, в состоянии регистрировать эти изменения. Так, по показаниям датчика электропроводности, явно прослеживались колебания с частотой $\sim 1\text{--}2$ с и амплитудой $\sim 0,01\text{--}0,03$ ‰. Так как периодичность колебаний солености достаточно хорошо выражена, то их нельзя отнести на счет влияния турбулентности или нестабильности работы зонда, а из-за высокой частоты и к влиянию поверхностного волнения, и уж, конечно, не на счёт влияния внутренних волн.

Необходимо отметить, что влияние, оказываемое поверхностными волнами, практически аналогично отражается на вертикальном профиле исследуемой характеристики, однако оба вида колебаний можно отфильтровать при проведении серий измерений на фиксированных горизонтах.

В экспедиции РГГМУ в Балтийском море был проведен эксперимент по интеркалибрации СТД-систем SBE 19 Seacat и Mark III. Работы проводились на глубине 143 м и при волнении 1 балл. На корпусе зонда Mark III был жестко закреплен зонд SBE 19, чтобы датчики обоих зондов находились на одном уровне по вертикали, а расстояние между датчиками по горизонтали составляло 10–15 см. Данную систему опускали до глубины 100 м с выдержкой по 30 с на горизонтах 0, 5, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 50, 60, 80, 90, 100 м. Подобная методика позволила получить ряды данных для каждого из указанных горизонтов по 60 и 480 значений (соответственно для SBE 19 и Mark III). Подъем системы с глубины 100 м производился непрерывно с целью получения синхронных профилей измеряемых характеристик по обоим зондам.

Предварительные результаты сверки СТД-систем показывают незначительные расхождения в их показаниях по каналам измерения температуры и электропроводности. Так, среднее расхождение по температуре составило 0,039 °С, по электропроводности в переводе на солёность – 0,042 psu, среднеквадратичские отклонения составили 0,047 °С и 0,076 psu соответственно. Переводные функции между показаниями зондов по температуре и солёности хорошо описываются линейной аппроксимацией (рис. 1, 2). Среднее расхождение по каналам давления между СТД-системами составило 2.43 дбар, среднеквадратичское отклонение – 1,68 дбар. При этом наблюдалось систематическое занижение давления системой Магк Ш, что было отмечено и при сверке показаний зондов с показаниями счётчика кабельной лебёдки. Переводная функция по давлению также хорошо описывается линейной аппроксимацией (рис. 3).

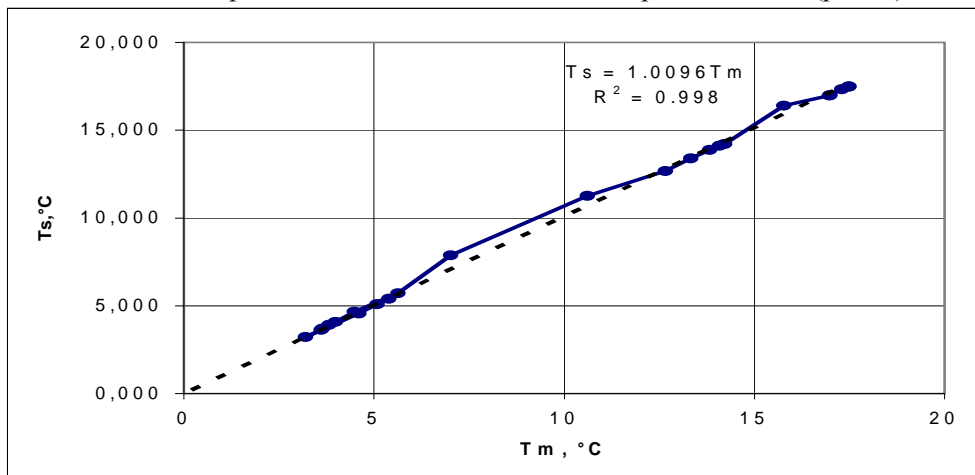


Рис. 1. Переводная функция по температуре

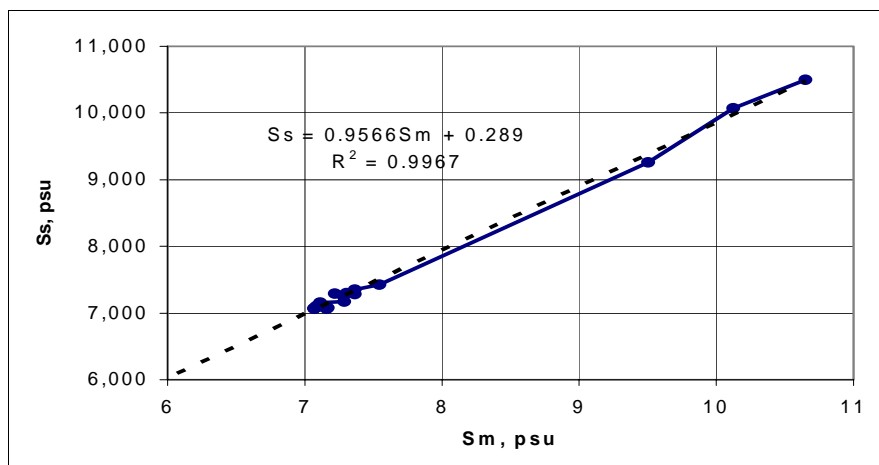


Рис. 2. Переводная функция по солёности

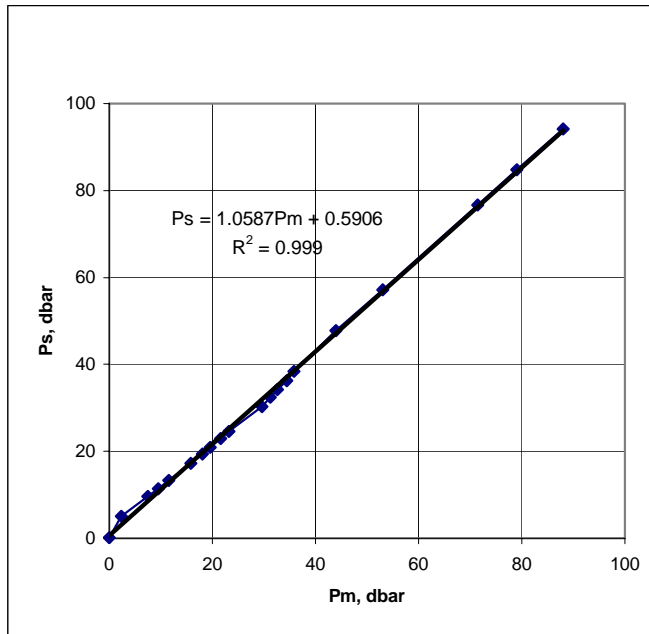


Рис. 3. Переводная функция по давлению

Учитывая уровень инструментальных погрешностей зондов, с точки зрения статистического анализа можно утверждать, что их показания по каналам температуры и электропроводности адекватны. Также адекватны показания счётчика кабельной лебёдки и СТД-системы SBE 19 по каналу давления в пересчёте на глубину. К показаниям СТД-системы Магк Ш, по каналу давления для устранения систематической погрешности необходимо ввести поправку в виде линейной функции $y = ax + b$. При этом целесообразно определять коэффициенты аппроксимации этой функции по счётчику кабельной лебёдки при отсутствии волнения.

При последующем анализе данных параллельных измерений на горизонтах были выявлены зоны с короткопериодными внутренними волнами. Наибольшее влияние на расхождения между показаниями зондов оказали волновые процессы на горизонтах 16, 28 и 30 м с квазипериодом около 4 с и амплитудой (по температуре) 0,2–0,9 °С. Для исключения влияния короткопериодных внутренних волн данные эксперимента с горизонтов 16, 28 и 30 м были подвергнуты фильтрации, после чего они были приняты в рассмотрение при дальнейшем анализе расхождений, методика проведения которого приведена в [Коровин В.П., 2000].

После установления характерных частот описанных выше внешних процессов можно провести по ним фильтрацию исходных рядов, что позволит устранить вклад дисперсии этих процессов в данные интеркалибрации. Возникающей при этом проблемой является потеря и искажение данных: они неизбежны

практически при любом методе фильтрации. Таким образом, необходимо подобрать такой метод, чтобы потери интересующих нас данных о ряде были минимальными. Например, многие фильтры имеют фазовый сдвиг относительно исходного ряда – для нашей задачи это не является значительным недостатком, так как наибольшее внимание уделяется амплитудно-частотным характеристикам ряда, а не фазовым. Другим условием фильтрации может быть продление ряда вправо или влево от исходной выборки, как это проделывается при применении фильтров Баттерворта. И это, к сожалению, служит веской причиной не использовать данный фильтр (замечательный по своим АЧХ) в нашей задаче, так как для продления ряд должен быть как минимум стационарен, что совсем не обязательно для полученных рядов данных и в большинстве случаев невыполнимо.

Исходя из всего вышесказанного, для фильтрации рядов данных интеркалляции был выбран метод фильтрации скользящим осреднением. Этот метод отличается простотой реализации и нетребовательностью к стационарности исходной выборки. Недостатками его являются фазовый сдвиг отфильтрованного ряда (что как уже было отмечено не является ограничением для данной задачи) и уменьшение длины отфильтрованного ряда пропорционально порядку фильтра, что при грамотном выполнении фильтрации не оказывает значительного влияния на исходные данные. Для уменьшения последнего недостатка необходимо использовать как полосовой, так и высоко- и низкочастотные фильтры.

низкочастотный фильтр:
$$X^i = X_i - \frac{1}{2M+1} \sum_{j=-M}^M X_{i+j} \quad (1)$$

высокочастотный фильтр:
$$X^i = \frac{1}{2M+1} \sum_{j=-M}^M X_{i+j}, \quad (2)$$

где $(2M+1)$ – интервал сглаживания.

Полосовой фильтр:

$$X^i = \frac{1}{2M_1+1} \sum_{j=-M_1}^{M_1} X_{i+j} - \frac{1}{2M_2+1} \sum_{j=-M_2}^{M_2} X_{i+j}, \quad (3)$$

где $M_1 < M_2$.

При этом число значений отфильтрованного ряда сокращается на $2M$ ординат, что должно быть учтено при дальнейшем спектральном анализе:

$$\frac{1}{2(N-M)} < \omega \leq \frac{1}{2} \quad (4)$$

или для периодов:

$$2 < p < 2(K-M), \quad (5)$$

где p – единица дискретности ряда.

Если фильтрация рядов с целью устранения влияния вышеописанных процессов выполнена правильно, можно с объективно оцениваемой степенью вероятности предположить, что отфильтрованные данные содержат в своей структуре только инструментальные и случайные расхождения измерений, где к случайным расхождениям будет относиться не исключённое влияние пространственно-временной изменчивости на измерения и случайная составляющая погрешности измерений. Критерием наличия у ряда такой структуры может служить его принадлежность к нормальному закону распределения. Естественно, что данное положение можно применить только к рядам наблюдений на горизонтах.

Для отфильтрованных рядов данных измерений СТД-систем имеет смысл провести оценку средних значений и дисперсий для всего массива данных по каждой СТД-системе (отдельно для температуры, солёности и давления). Используя затем метод статистической проверки гипотез, можно определить наличие и величину расхождений в показаниях СТД-систем по каждому измеряемому параметру.

Для определения расхождений между средними значениями A_i -го элемента можно использовать нормированную разность средних выборочных значений:

$$Z^* = \frac{|\overline{A_i1} - \overline{A_i2}|}{\sigma(\overline{A_i1} - \overline{A_i2})}, \quad (6)$$

где

$$\sigma(\overline{A_i1} - \overline{A_i2}) = \sqrt{\frac{\sigma_{A1}^2}{n} + \frac{\sigma_{A2}^2}{n}}, \quad (7)$$

n – длина выборки.

Для этого выдвигается нулевая гипотеза о равенстве математических ожиданий:

$$H_0 : M(A_i1) = M(A_i2), \quad (8)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют первой и второй СТД-системам. Альтернативная гипотеза имеет вид:

$$H_0 : M(A_i1) \neq M(A_i2). \quad (9)$$

По уровню значимости $\alpha = 5\%$, из таблиц функции Лапласа находится критическое значение $Z_{кр}$. Если $|Z^*| > Z_{кр}$, то нулевая гипотеза отвергается как несостоятельная, что в данном случае означает наличие систематического расхождения в измерениях одного зонда относительно другого.

Оценка расхождения между дисперсиями по каждому из параметров проводится по аналогичному алгоритму. Наиболее часто для проверки используется критерий Фишера:

$$F^* = D(A_i1)/D(A_i2), \quad \text{где } D(A_i1) > D(A_i2) \quad (10)$$

при нулевой и альтернативной гипотезах:

$$H_0 : D(A_1) = D(A_2); \quad (11)$$

$$H_1 : D(A_1) \neq D(A_2).$$

По заданному уровню значимости $\alpha = 5\%$ и числу степеней свободы $\nu_{A1} = \nu_{A2} - 1$ из таблиц Фишера определяется $F_{кр}$. Если $F^* > F_{кр}$, то расхождение существенно и гипотеза о равенстве дисперсий должна быть отвергнута. Анализ дисперсий также позволяет судить о мере расхождения в показаниях зондов.

Аналогичная процедура оценки расхождений между средними и дисперсиями показаний зондов применяется на каждом отдельно взятом горизонте, что позволит выявить динамику расхождений между показаниями каналов СТД-систем в различных диапазонах.

Конечной задачей интеркалибрации является получение аналитической зависимости между результатами измерений СТД-систем. Для этой цели можно воспользоваться методикой построения переводных функций. Графическим аналогом таких функций будут графики связи между различными параметрами зондов. Например (рис. 1, 2), связь между значениями температуры в первой и второй СТД-системах.

В идеальном случае облако точек связи будет соответствовать прямой, уравнение которой можно легко получить с помощью метода наименьших квадратов, что позволяет вычислить переводную функцию, которую можно использовать в графическом или аналитическом виде для приведения данных к единой системе, а в качестве эталона берутся показания СТД-системы, прошедшей перед экспериментом метрологическую аттестацию и имеющую большую точность. В случае нелинейной функции переводную функцию можно получить методами нелинейной регрессии или МНК.

Литература

1. *Вайновский П.А., Малинин В.Н.* Методы обработки и анализа океанологической информации (одновременный анализ). – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 136 с.
2. *Коровин В.П., Никифоров А.В.* Возможности интеркалибрации СТД-систем. – Депонир. ВИНТИ № 2483-В99. – 12 с.
3. *Коровин В.П., Никифоров А.В.* Методика интеркалибрации СТД-систем // Океанологическому факультету 30 лет, РГГМУ, 2000, с. 119–132.
4. *Кушнир В.М., Журавлев В.Ф., Смирнов Г.В., Андриюшенко Е.Г.* Демпфирование колебаний прибора при измерении гидрофизических параметров с борта дрейфующего судна // Морские гидрофизические исследования, 1975, № 2, с. 160–165.
5. *Поддубный В.И., Шамарин Ю.Е., Черненко Д.А., Астахов Л.С.* Динамика подводных буксируемых систем. – СПб.: Судостроение, 1995. – 200 с.
6. *Пузырев Г.В.* Основы динамики буксировки подводных аппаратов. – Л.: Судостроение, 1982. – 113 с.
7. *Филлипс О.М.* Динамика верхнего слоя океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 318 с.