

УМЕНЬШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ОШИБКИ РАСЧЕТА СОЛЕНОСТИ ПРИ ПОМОЩИ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

O.E. Кульша, A.E. Погребной

Московский гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская 2
E-mail: oaoi@alpha.mhi.net

Предлагается методика получения коэффициентов нерекурсивных фильтров для рядов температуры и электропроводности CTD-зондирований с целью уменьшения динамических ошибок расчета солености. Она основана на использовании участков профилей натурных измерений с ярко выраженной ступенчатой структурой. Эффективность метода демонстрируется примером.

Для исследований тонкой термохалинной структуры океана необходимо получение с помощью зондирующих приборов данных о вертикальном распределении температуры, солености и других гидрофизических параметров с пространственным разрешением порядка 10 см.

Имеющиеся CTD-зонды для тонкоструктурных измерений, в частности, зонды фирмы

NBIS [5,7], в принципе позволяют получать надежную информацию о неоднородностях температуры T и удельной электропроводности K указанного масштаба. Проблема, однако, заключается в том, что рассчитанные значения солености (напомним, что соленость S вычисляется по T , K и давлению P , измеренным *in situ*) могут оказаться весьма далекими от истинных из-за динамических ошибок их определения [1,2]. Это особенно сильно проявляется в зонах резкого изменения вертикальных градиентов T и K , например, на границах между квазиоднородными слоями и прослойками в ступенчатых структурах океана, где рассчитанные профили солености и плотности имеют ложные пики (см. рис.1).

Суть появления динамических ошибок расчета солености, плотности и других параметров, использующих одновременно данные обоих первичных параметров, заключается в том, что датчики температуры (ДТ) и электропроводности (ДЭ) воспроизводят исследуемый параметр с искажениями, при этом искажения, вносимые каждым из датчиков, вследствие различия физических принципов измерений имеют различный характер.

Для уменьшения динамических ошибок расчета солености можно использовать методы цифровой фильтрации исходных данных по

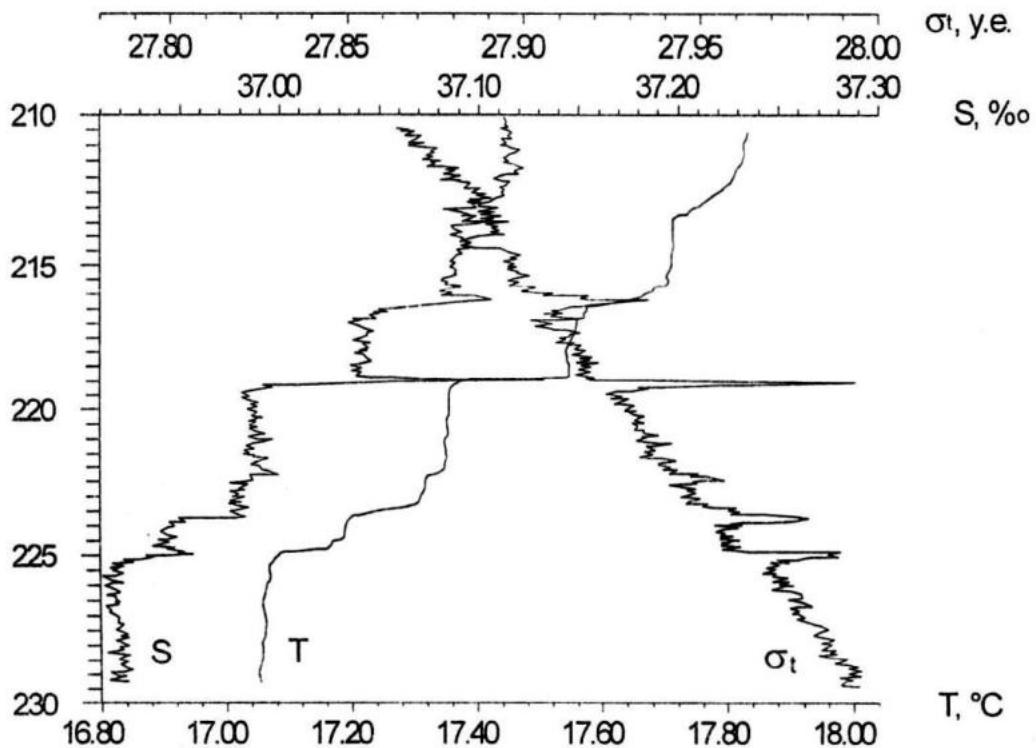


Рисунок 1. - Фрагмент вертикальных профилей температуры T , солености S и плотности σ_t морской воды без коррекции динамической погрешности. 43-й рейс НИС «Академик Вернадский» лето 1991г., 31°С.Ш., 23°30' З.Д.

температуре и электропроводности. Этому вопросу посвящено немало работ [1,2,3,4,8]. Однако до сегодняшнего дня не существует универсальной процедуры коррекции динамической ошибки. Т. к. последняя обусловлена отличием передаточных характеристик датчиков температуры и электропроводности, то для каждой пары вновь применяемых датчиков приходится заново искать оптимальную процедуру коррекции.

В [3,4] предлагается способ, при котором характеристики датчиков приближаются к «идеальным», тогда как в отчете рабочей группы № 51 SCOR [8] рекомендуется процедура сближения передаточных функций измерительных каналов путем приведения характеристик «более идеального» датчика к характеристикам «менее идеального». Существование альтернативных методов коррекции динамической ошибки, а также зависимость функций отклика датчиков от характера обтекания их потоком, свидетельствуют о целесообразности разработки наиболее приемлемого алгоритма коррекции эмпирическим путем для каждого конкретного зонда, либо конкретного режима работы зонда. При этом может оказаться, что в искомом алгоритме удачно сочетаются оба упомянутых выше подхода.

Коэффициенты цифровых фильтров можно

находить непосредственно по измеренным функциям отклика ДГ и ДС [5-7]. Но такие измерения требуют наличия специализированных стендов. Решение проблемы усложняется при отсутствии данных о передаточных характеристиках датчиков. В этом случае можно попытаться обратиться к информации о некоторых хорошо известных особенностях реальных распределений температуры и солености (электропроводности), заставляя таким образом саму морскую среду выступить в роли своеобразного стенда. В русле осуществления этой идеи далее предлагается методика поиска оптимальных коэффициентов, основывающаяся на обработке лишь данных натурных измерений (зондирований): соленость рассчитывается по предварительно отфильтрованным рядам температуры и электропроводности, а критерием качества использованных фильтров служит безразмерное число P с областью значений [-1,1]

$$P = \frac{\sum_i (T_{i+1} - T_i)(\tilde{S}_{i+1} - \tilde{S}_i)}{\sum_i |(T_{i+1} - T_i)(\tilde{S}_{i+1} - \tilde{S}_i)|}, \quad (1)$$

где T_i - последовательные значения ряда температуры, \tilde{S}_i - последовательные значения ряда солености, полученные по откорректирован-

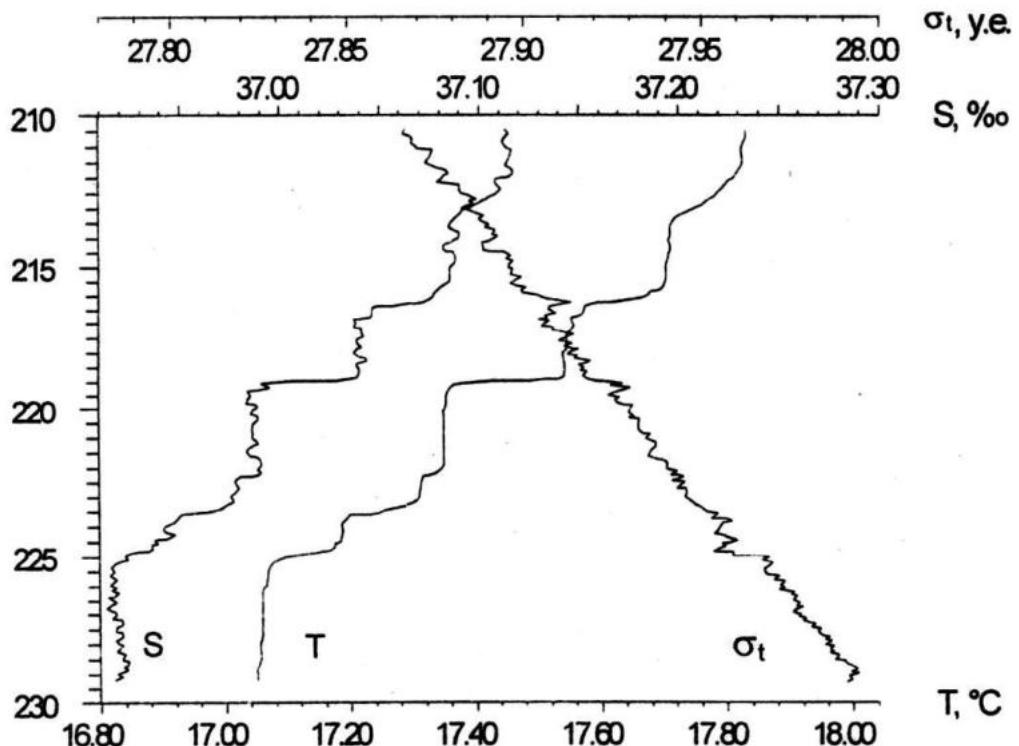


Рисунок 2. - То же, что и на рисунке 1, но с коррекцией динамической погрешности. Плотность σ_t , рассчитана по откорректированной солености и исходной температуре.

ным рядам температуры \tilde{T}_i и электропроводности $\tilde{\kappa}_i$.

Поясним, в чем состоит смысл использования этого критерия. Как правило, в океане встречаются два случая. Либо знаки вертикальных приращений температуры и солености совпадают (оба отрицательны при стратификации типа «солевых пальцев» или оба положительны в условиях послойной конвекции), либо противоположны (соленость растет с глубиной, а температура убывает) для чисто устойчивой стратификации.

В первом случае (для стратификации дифференциально-диффузационного типа) значение P должно быть положительным и при отсутствии искажений прибора приближаться к +1, а во втором (чисто устойчивая стратификация) P отрицательно и должно быть близким к -1. Возможны, конечно, и варианты, когда на профиле даже при отсутствии динамических ошибок встречаются участки со значениями P различных знаков (например, развитие интрузий на фоне устойчивой стратификации).

Как отмечалось выше, динамическая ошибка расчета солености (и плотности) наиболее ярко проявляется в местах с резкими изменениями вертикальных градиентов температуры и электропроводности. Поэтому для поиска коэффициентов фильтров наиболее удобно использовать участки со ступенчатой стратификацией дифференциально-диффузационного происхождения. В этом случае значение P для неискаженного профиля должно быть положительным и близким к +1.

Рассмотрим, каким образом в этом случае искажения, вносимые прибором, сказываются на значениях P . Первый фактор, ответственный за это - динамическая ошибка в расчетах солености. Она приводит к существенному уменьшению величины P из-за наличия в профиле солености приращений с разными знаками. На рис. 1 представлены профили температуры, солености и плотности, рассчитанные по неоткорректированным данным зондирования прибором «Комплекс-1М». Обращают на себя внимание ложные пики солености по краям высокоградиентных прослоек, знаки которых указывают на отставание сигнала электропроводности от сигнала температуры. Вычисленное для данного примера значение P оказывается даже отрицательным ($P = -0,76$), несмотря на дифференциально-диффузационный характер стратификации.

Второй фактор - это наличие электронных шумов прибора. Оценить влияние этого фактора на P сложно, однако, на профилях с ярко выраженной ступенчатой структурой влияние этого шума гораздо слабее эффекта динамической ошибки.

Итак, исходя из вышеизложенного, предлагаются следующая методика уменьшения динамической ошибки. До расчета солености (и плотности) производится фильтрация рядов температуры и электропроводности:

$$\tilde{T}_i = \sum_{j=N_1}^{N_2} A_j T_{i+j}, \quad \tilde{\kappa}_i = \sum_{j=N_1}^{N_2} B_j \kappa_{i+j}, \quad (2)$$

причем коэффициенты A_j и B_j подбираются таким образом, чтобы обеспечить максимум величине P на участках профилей T и S с дифференциально-диффузационной стратификацией. Соленость \tilde{S}_i при этом рассчитывается по откорректированным рядам \tilde{T}_i и $\tilde{\kappa}_i$.

Для проверки работоспособности предлагаемой методики коррекции использовались данные CTD-зонда "Комплекс-1М". Этот прибор представляет собой зонд, использующийся в режиме свободного падения вдоль нагруженного кабель троса. Скорость падения $\sim 1\text{ м/сек}$, частота циклов измерений 50 Гц; таким образом, дискретность отсчетов по вертикали температуры T , относительной электропроводности κ и давления P составляет приблизительно 2 см. Инерционность датчика температуры не превышает 0,01 сек. Чувствительности датчика температуры $1 \cdot 10^{-3}^{\circ}\text{C}$, датчика относительной проводимости $2,5 \cdot 10^{-5}$, датчика давления $5 \cdot 10^{-4}$ МПа. Среднеквадратичные отклонения случайных составляющих основной погрешности с вероятностью 0,95 не превышают $1 \cdot 10^{-3}^{\circ}\text{C}$, $3 \cdot 10^{-5}$, $5 \cdot 10^{-4}$ МПа соответственно. Систематические составляющие погрешности каналов с той же вероятностью не превышают $0,025^{\circ}\text{C}$, $6 \cdot 10^{-4}$, $5 \cdot 10^{-2}$ МПа.

Исходя из того, что для исследуемого прибора «Комплекс-1М» датчик температуры имеет очень малую постоянную времени и размер, а также того, что, по предварительным оценкам, сигнал электропроводности отстает на 2-4 отсчета от сигнала температуры, были выбраны следующие значения параметров: $N_1 = -4$, $N_2 = 4$, $N_3 = -4$, $N_4 = -1$. Оптимальные значения коэффициентов фильтров A_j , B_j определялись по максимуму числа P при соблюдении условий

$$\sum_{j=N_1}^{N_2} A_j = 1, \quad \sum_{j=N_1}^{N_2} B_j = 1 \quad (3)$$

для отрезка зондирования длиной 26 метров со стратификацией дифференциально-диффузационного типа. Использовались зондирования, выполненные в 43 рейсе НИС "Академик Вернадский".

Анализ (как визуальный, так и по параметру P) показывает, что найденная пара фильтров хорошо работает на любых других участках профилей тонкой термохалинной структуры, измеренной применявшимся зондом.

На рис.2 представлены откорректированные профили солености и плотности для тех же данных, по которым строился рисунок 1. Как видно, почти полностью исчезли ложные выбросы вокруг высокоградиентных прослоек, а значение P стало равным +0,81 вместо исходного -0,76. При построении рис.2 и расчете для данного участка зондирования № 73 откорректированного значения P использовались коэффициенты фильтров A_j и B_j , найденные для другого участка профиля другого зондирования (зондирование № 56, интервал глубин 130м-156м). Сделано это специально, чтобы продемонстрировать работоспособность предложенного алгоритма поиска унифицированных коэффициентов фильтров для уменьшения динамических ошибок.

Зависимости амплитудных передаточных характеристик используемых фильтров от частоты представлены на рис.3. Отметим, что в полосе частот 0-6 Гц воздействие фильтров обеспечивает задержку сигнала температуры по отношению к сигналу электропроводности на 3,16 отсчета, т. е. на ~0,63 милисекунды.

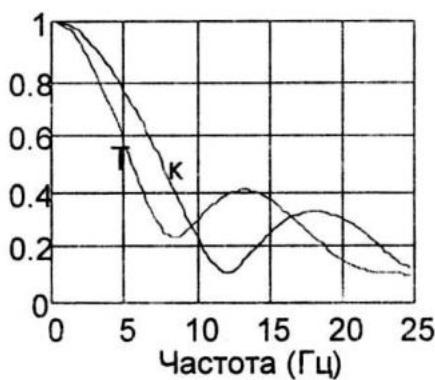


Рисунок 3. - Зависимости амплитудных передаточных характеристик используемых фильтров от частоты

Отметим следующие основные достоинства предложенной методики цифровой фильтрации:

- не требуется априорного точного знания передаточных характеристик: каналов, т.е. нет необходимости в проведении трудоемких и дорогостоящих стендовых исследований датчиков [5-7];

- процедура поиска нужных значений фильтров формализована и автоматизирована. Параметр P , по которому оценивается оптимальность коррекции, очень чувствителен к наличию динамических ошибок, что ускоряет и уточняет процедуру поиска, при этом расчет значений P очень прост, производится за один проход (не требует предварительного осреднен-

ния и т.п.), что также существенно сокращает время расчета;

- полученные фильтры позволяют существенно приблизить передаточные характеристики «каналов» солености и температуры. Поэтому при расчете параметров, зависящих одновременно от T и S (например, плотности) дополнительная фильтрация рядов не требуется, и могут использоваться откорректированный ряд солености и исходный профиль температуры. Об этом свидетельствует существенное уменьшение ложных пиков профиля плотности на рис. 2, который рассчитывался по откорректированным значениям солености и исходной температуре;

- анализ работоспособности фильтров показал обнадеживающие результаты для всех возможных типов стратификации;

- процедура поиска оптимальных коэффициентов фильтров для динамической коррекции может быть без труда воспроизведена в натурных условиях, что крайне важно при выходе из строя и замене одного из датчиков CTD - зонда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Забурдаев В.И., Иванов А.Ф., Кушнир В.М. и др. / Некоторые вопросы обработки автоматизированных гидрофизических измерений // Морские гидрофизические исследования, 1979, № 4, с. 163-194
2. Материалы океанологических исследований. Вып. 1. Формы тонкой термохалинной структуры океана. Каталог // М., 1987, 133 с.
3. Fofonoff N.P., Hayes S.P., Millard R.C. WHOI / Brown CTD microprofiler: methods of calibration and data handling // Woods Hole Oceanographic Institution. Tech. Rep. WHOI -74-89. 1974. P. 64.
4. Fosdar F.M., Parker G.J., Inberger J. Matching temperature and conductivity sensor response characteristics // J. Phys. Oceanogr. 1985. V. 15. N. 11. P. 1557 - 1569.
5. Gregg M.C., Meagher T.B. The dynamic response of glass rod thermistors // J. Geophys. Res., 1980, V. 85, N C5, P. 2779 - 2786.
6. Gregg M.C., Meagher T.B., Agaard E.E., Hess W.C. A salt-stratified tank for measuring the dynamic response of conductivity probes // IEEE J. Ocean. Engineer/ 1981, V. OE - 6, N. 4, P. 113 - 118.
7. Gregg M.C., Schedvin J.C., Hess W.C., Meagher T.B. Dynamic response calibration of the Neil Brown conductivity cell // J/ Phys. Oceanogr., 1982, V. 12, P. 720 - 742.
8. Grose P.L. CTD data processing // Draft report for SCOR Working group 51. 1981. P. 62 (Unpublished manuscript)