АППАРАТУРНЫЙ И АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ ДИФРАКЦИОННЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ СКОРОСТИ ЗВУКА

В.И. Бабий

Морской гидрофизический институт
НАН Украины,
99011 г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail:ocean@alpha.mhi.iuf.net

Рассмотрены способы компенсации систематических погрешностей гидроакустических измерителей скорости звука аппаратурным методом путем изменения геометрической длины базы, счетного интервала, предустановки счетчиков частотомера и введением поправок программно-алгоритмическим методом. Показано преимущество алгоритмического метода.

Функция преобразования и измерительное уравнение импульсно-циклических гидроакустических измерителей скорости звука (ГИСЗ) с распространением звука в прямом и обратном направлениях записываются в общепринятом виде [1,2] соответственно

$$f_g = [L(T,P)/C + \Delta\tau]^{-1}, \qquad (1)$$

$$\widetilde{C} = L(T,P)\cdot f_g\cdot(1 - \Delta\tau\cdot f_g)^{-1} \approx L(T,P)\cdot f_g\cdot(1 + \Delta\tau\cdot f_g), \qquad (2)$$

где C - измеряемая (действительная) скорость звука; $\widetilde{C}$ - измеренная (восстановленная) скорость звука; $L(T,P)$ - действующая длина акустической базы, являющаяся функцией двух основных внешних влияющих факторов: температуры T среды и гидростатического давления P; $\Delta\tau$ - время паразитной задержки импульса в электроакустическом тракте; f_g - частота следования импульсов в синхрокольце (информативный параметр выходного сигнала).

Выражение (2) часто линеаризуют аппаратурным методом, приводя его к виду

$$\widetilde{C} \approx [L(T,P) + \Delta L]\cdot f_g = L_1(T,P)\cdot f_g \qquad (3)$$

посредством изменения геометрической длины акустической базы на фиксированную величину ΔL, например, перемещением отражателя так, чтобы в одной точке, как правило, в середине диапазона C обеспечивалось равенство значений вычисленной $\widetilde{C}$ и действительной C скорости звука [1]. При этом систематическая погрешность ΔC во всех других точках диапазона остается конечной.

При повышении требований к точности измерений C уравнения (1) - (3) становятся неадекватны реальным ГИСЗ. Главный их недостаток заключается в отсутствии учета дифракционных явлений. Модифицированную функцию преобразования, учитывающую эффект дифракции согласно [3], запишем так

$$f_g = \left[\frac{L(T,P)}{C + d\cdot C^3} + \Delta\tau\right]^{-1}, \qquad (4)$$

где d - индивидуальный дифракционный параметр конкретного ГИСЗ, определяемый экспериментально в процессе его метрологической аттестации (МА). Здесь $d = (31{,}5\ f_c^2\ r^2)^{-1}$, f_c - частота звука, r- эффективный радиус ультразвукового преобразователя.

Выражение (4) можно представить в виде кубического уравнения

$$C^3 + \frac{1}{d}C - \frac{L(T,P)}{d}\left(\frac{1}{f_g} - \Delta\tau\right)^{-1} = 0,$$

решая которое аналитически, находим искомую скорость звука C, например, по формуле Кардано. Однако этот путь не очень эффективен, поскольку связан с большим объемом вычислений.

Учитывая хорошо выполняющиеся на практике неравенства $\Delta\tau \ll 1/f_g$, $\Delta C_n \ll C$ и полагая $\Delta\tau = \mathrm{const}$, $d = \mathrm{const}$, выразим из (4) приближенно искомую (измеренную) скорость звука в явном виде [3]:

$$\widetilde{C} \approx L(T,P)\cdot f_g + L(T,P)\cdot\Delta\tau\cdot f_g^2 - d\cdot L^3(T,P)\cdot f_g^3. \qquad (5)$$

Физический смысл слагаемых здесь прост: первое характеризует измеряемую величину C, второе (квадратичный член) есть поправка на влияние задержки $\Delta\tau$, а кубичный член - это дифракционная поправка $\Delta C_n = d\cdot C^3$.

Найдем разность между значениями скорости звука, восстановленными алгоритмически по уравнению (5) и приближенному выражению (3):

$$\delta\widetilde{C}(C) \approx -\Delta L\cdot f_g + L\cdot\Delta\tau\cdot f_g^2 - d\cdot L^3\cdot f_g^3 \approx$$

$$\approx -(\Delta L/L)\cdot C + (\Delta\tau/L)\cdot C^2 - d\cdot C^3. \qquad (6)$$

Здесь первый член есть вносимая аппаратурно поправка за счет изменения длины базы. Суть регулировки ΔL состоит в минимизации $\delta\widetilde{C}(C)$ в заданном диапазоне С. Как следует из (6), если $\Delta\tau \neq 0$ или $d \neq 0$, то полная компенсация погрешности возможна только в одной точке шкалы С, а в других точках шкалы она будет неполной. Величину ΔL находим из условия $\delta\widetilde{C}(C_k) = 0$, где $C_к$ - значение скорости звука в точке компенсации.

Наряду с линеаризацией градуировочной характеристики и частичной компенсацией систематических погрешностей изменением длины базы возможен еще аппаратурный метод изменения счетного интервала и предустановки счетчиков частотомера на заданное фиксированное число, как это сделано, например, в автоматизированном гидрофизическом измерительном комплексе [2]. Тогда формулу (3) запишем в виде

$$\widetilde{C} = (L+\Delta L)\cdot(f_g + \Delta f_g) \approx L\cdot f_g + \Delta L\cdot f_g + L\cdot\Delta f_g, \quad (7)$$

где Δf_g - заданный сдвиг частоты. Аналогично (6) выразим разность между восстановленными значениями $\widetilde{C}$ по алгоритму (5) и формуле (7) так

$$\delta\widetilde{C}(C) = -L\cdot\Delta f_g - \Delta L\cdot f_g + L\cdot\Delta\tau\cdot f_g^2 - d\cdot L^3\cdot f_g^3 \approx$$

$$\approx \Delta C_0 - (\Delta L/L)\cdot C + (\Delta\tau/L)\cdot C^2 - d\cdot C^3, \quad (8)$$

где $\Delta C_0 = -L\cdot\Delta f_g$. Здесь первый член определяет сдвиг, а второй - еще и наклон градуировочной характеристики ГИСЗ. В отличие от выражения (6) имеем уже два постоянных параметра ΔL и Δf_g, варьируя которые при МА можно более полно осуществить аппаратурным методом компенсацию квадратичного и кубичного членов. Заметим, что эта процедура довольно трудоемка. Однако, алгоритмический метод, использующий измерительное уравнение (5) делает ненужным регулировку длины базы и введение поправок аппаратурным методом. Более того, отсутствие узла перемещения и фиксации отражателя звука упрощает конструкцию датчика С, повышает его стабильность и надежность. Вместе с тем не исключается возможность комбинации аппаратурного и алгоритмического методов коррекции градуировочных характеристик ГИСЗ.

Обозначив символом δ приращения (т.е. отклонения от номинальных значений) параметров ГИСЗ, получим из (5) приближенную оценку предельной результирующей относительной инструментальной погрешности, выраженную через погрешности параметров модели,

$$\left|\frac{\Delta C}{C}\right| = \left|\frac{\delta L}{L}\right| + \left|\frac{\delta f_g}{f_g}\right| + \Delta\tau\cdot f_g\cdot\left|\frac{\delta(\Delta\tau)}{\Delta\tau}\right| + d\cdot L^2\cdot f_g^2\cdot\left|\frac{\delta d}{d}\right|, \quad (9)$$

где $|\ |$ - означает модуль величины. Полагая составляющие погрешности статистически независимыми, можно суммирование в (9) проводить геометрически. Тогда при заданном пределе результирующей погрешности $|\Delta C/C|$ и одинаковом вкладе составляющих, получим оценки допустимых погрешностей параметров ГИСЗ. В частности, условия допустимой нестабильности параметров $\Delta\tau$ и d будут такими:

$$\left|\frac{\delta(\Delta\tau)}{\Delta\tau}\right| \le \frac{1}{2\Delta\tau\cdot f_g}\cdot\left|\frac{\Delta C}{C}\right|$$

и $$\left|\frac{\delta d}{d}\right| \le \frac{1}{2d\cdot L^2\cdot f_g^2}\cdot\left|\frac{\Delta C}{C}\right|. \quad (10)$$

С другой стороны, имеем

$$\frac{\delta d}{d} = -2\cdot\left(\frac{\delta f_c}{f_c} + \frac{\delta r}{r}\right) \approx -2\cdot\frac{\delta f_c}{f_c}, \quad (11)$$

при $(\delta r/r) \ll (\delta f_c/f_c)$. Подставляя (11) в (10), получим условие, характеризующее требование к стабильности частоты зондирующего акустического излучения,

$$\left|\frac{\delta f_c}{f_c}\right| \le \frac{1}{4d\cdot L^2\cdot f_g^2}\cdot\left|\frac{\Delta C}{C}\right| \approx \frac{1}{4d\cdot C^2}\cdot\left|\frac{\Delta C}{C}\right| = \frac{1}{4}\cdot\left|\frac{\Delta C}{\Delta C_n}\right|,$$

выполнение которого обеспечивает допустимую погрешность дифракционного параметра d.

ЛИТЕРАТУРА

1. Серавин Г.Н. Измерение скорости звука в океане.-Л.: Гидрометеоиздат, 1979.-136 с.

2. Бабий В.И. Мелкомасштабная структура поля скорости звука в океане.- Л.:Гидрометеоиздат,1983.-200 с.

3. Бабий В.И. Измерение скорости звука в морской среде/ Акустика океана. Докл. IX научной школы-семинара акад. Л.М.Бреховских, совмещенной с XII сессией Российского Акустического Общества.- М.: ГЕОС, 2002. С. 409-413.