УДК 681.883.482

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ДОППЛЕРОВСКИМ ЛАГОМ НА МАЛЫХ ГЛУБИНАХ

© А.П. Мартынюк, 2006

АО НИИ «RIF-ACVAAPARAT», г. Бэлць (Республика Молдова)

Розглянуто особливості виміру частоти в доплерівському лазі при роботі на малих глибинах, проводиться аналіз та уточнюються процедури вимірювання частоти доплерівського ехо-сигналу.

Рассматриваются особенности измерения частоты в доплеровском лаге при работе на малых глубинах, производится анализ и уточняются процедуры измерения частоты доплеровского эхо-сигнала.

The features of frequency measurement in dopler log are examined when operating at small depths, an analysis of dopler echo-signal frequency measurement is made and procedures are specified.

Основной характеристикой доплеровских лагов является погрешность измерения скорости.

Как известно, в доплеровском лаге автоматизируется решение следующей формулы $V = f_д/K_v$, где V – скорость носителя, K_v=const, а $f_д$ – доплеровское приращение частоты, поэтому точность определения V в отсутствие дестабилизирующих факторов определяется, в частности, точностью измерения fд.

В общем случае погрешности разделяются на систематические и случайные (флюктуационные) и их характеристики достаточно полно представлены в [1].

Общепринятый способ компенсации систематических погрешностей – калибровка лага в условиях полигона.

Для доплеровских лагов, использующих импульсный режим излучения, флюктуационная погрешность измерения при отсутствии дестабилизирующих факторов определяется как

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_f^2 + \sigma_\tau^2}\ , \qquad (1)$$

где σ_f – флюктуационная погрешность за счет стохастического характера доплеровского эхо-сигнала;

σ_τ – погрешность за счет импульсного режима излучения.

Эффективным способом снижения флюктуационной погрешности является их сглаживание путем временного осреднения.

Степень уменьшения флюктуационной погрешности за счет стохастического характера доплеровского спектра эхо-сигнала определяется следующим выражением

$$\overline{\sigma_f} = \sigma_f \cdot \sqrt{\frac{\tau_к}{T_0}}\ , \qquad (2)$$

где $\overline{\sigma_f}$ – значение погрешности, осредненное на интервале T_0;

σ_f – погрешность единичного измерения, чаще всего $\sigma_f = \frac{\Delta f}{2}$ (Δf – ширина доплеровского спектра по уровню минус 3 дБ);

$\tau_к$ – временной интервал корреляции доплеровской частоты;

T_0 – время осреднения.

Флюктуационная погрешность за счет импульсного режима излучения определяется следующим выражением

$$\overline{\sigma}_\tau = \sigma_\tau \cdot \sqrt{\frac{\tau_e}{T_0}}\,, \qquad (3)$$

где $\overline{\sigma}$ – значение погрешности, осредненное на интервале T_0;

σ_τ– погрешность единичного измерения частоты;

τ_e – длительность единичного измерения частоты, чаще всего $\tau_e \le \tau_и$;

T_0 – время осреднения.

Известно, что спектр прямоугольного радиоимпульса с длительностью $\tau_и$ и частотой f может, без учета доплеровского расширения, быть записан в виде [1,2]

$$S(f)=\frac{\sin(\pi\tau_и(f_и-f_п))}{\pi\tau_и(f_и-f_п)}, \qquad (4)$$

где $f_и$ – несущая частота излучаемого радиоимпульса;

$f_п$ – частота принятого эхо-сигнала.

Делая допущение, что плотность вероятности погрешности измерения доплеровской частоты пропорциональна спектральной плотности излученной энергии, средняя квадратичная (с доверительной вероятностью 0,68) погрешность измерения частоты равна [1]

$$\sigma_\tau = \frac{1}{4\tau_и}. \qquad (5)$$

Поскольку в лагах $\tau_и = f(H) = K_{проп} \cdot H$, где $K_{проп}$ – коэффициент пропорциональности, то начиная с некоторых глубин в выражении (1) погрешность σ_τ начнет доминировать.

Соотношение (5), казалось бы, и определяет потенциальную точность лага при работе на малых глубинах. Однако данный вывод справедлив для случая, когда измерение основывается на спектральном анализе и оценка ведется в частотной области.

Достаточно эффективно решить задачу снижения погрешности за счет малой длительности $\tau_и$ на малых глубинах позволяют методы измерения, основанные на измерении частоты эхо-сигнала во временной области. Перед рассмотрением необходимо отметить, что в доплеровских лагах $\Delta f \ll f_п$.

А. Метод счета нулей

Метод широко известен. Используется в благоприятных энергетических условиях. Основан на измерении несущей частоты путем счета количества переходов через ноль напряжения доплеровского эхо-сигнала на мерном интервале измерения.

Несмотря на то, что всякий счетчик нулей определяет не среднее, а среднеквадратичное значение частоты, которое всегда выше среднего значения $F_{ср.д}$, для строго узкополосных сигналов, каковым является эхо-сигнал в доплеровском лаге, это отличие незначительно, а с учетом использования в лаге антенны с янусной характеристикой направленности, алгоритмически смещение в оценке частоты и вовсе компенсируется.

На практике, с целью минимизации инструментальной погрешности, используется измерение периода несущего колебания с последующим пересчетом периода в частоту. Частоту определяют по формуле

$$F_{изм} = \frac{N_и}{N_0 \pm 1} \times F_0\,, \qquad (6)$$

где $N_и$, N_0 – количество переходов через ноль измеряемого и эталонного сигнала на измерительном интервале;

F_0 – тактовая частота эталонного сигнала.

Погрешность в определении частоты определяется единицей счета, которая эффективно снижается путем повышения тактовой частоты F_0.

Б. Метод производной

Известно, что эхо-сигнал с учетом узкополосности может рассматриваться как квазигармонический случайный процесс.

Во временной области реализация эхо-сигнала в пределах $\tau_и$ может быть представлена следующим выражением

$$S(t) = U(t)\cdot \cos(\omega t+\varphi(t)), \qquad (7)$$

где $U(t)$, $\varphi(t)$ – функции, медленно меняющиеся во времени.

По определению [2], полная фаза реализации эхо-сигнала определяется как

$$\Phi = \omega t+\varphi(t), \qquad (8)$$

в тоже время полную фазу можно представить как арктангенс отношения квадратурной (синусной) к синфазной (косинусной) составляющих огибающей реализации $S(t)$ эхо-сигнала.

Проведя преобразование Гильберта с реализацией эхо-сигнала $S(t)$, определим мгновенную частоту как производную полной фазы по времени

$$\Omega = \frac{d\Phi(t)}{dt} = \frac{d\left(\operatorname{arctg}\frac{A_s(t)}{A_c(t)}\right)}{dt}, \tag{9}$$

где $A_c(t)$, $A_s(t)$ – соответственно, синфазная и квадратурная составляющие огибающей реализации S(t) эхо-сигнала.

Перейдя к дискретному времени с учетом дискретизации с интервалом времени Δt и заменив дифференцирование отношением разности $\Delta\Phi$ (t) к Δt (при $\Delta t \to 0$), получим

$$\Omega_i(\Delta t) = \frac{\Delta\Phi_i(t)}{\Delta t} = \frac{\operatorname{arctg}\frac{A_{si+1}}{A_{ci+1}} - \operatorname{arctg}\frac{A_{si}}{A_{ci}}}{\Delta t}, \tag{10}$$

$$F_i = \frac{\operatorname{arctg}\frac{A_{si+1}}{A_{ci+1}} - \operatorname{arctg}\frac{A_{si}}{A_{ci}}}{\Delta t \cdot 2\pi}, \tag{11}$$

где A_{ci}, A_{si} – i–е дискретные выборки синфазной и квадратурной составляющих огибающей реализации S(t) эхо-сигнала;

F_i – значение мгновенной частоты i-го единичного измерения.

За длительность импульса среднее значение частоты определяется как

$$\overline{F} = \frac{\sum_{i=1}^{m} F_i}{m}, \tag{12}$$

где m – количество измерений, принятых к обработке (обычно $m \leq n-1$, n – количество выборок).

Как видно из (11), (12), результат вычисления частоты не зависит от длительности импульса, а зависит от количества выборок реализации, погрешности дискрета времени, точностью выборки при квантовании.

Для косвенных измерений среднеквадратичную погрешность результата единичного измерения определим с использованием частных производных выражения (11) по формуле

$$\delta F_e = \sqrt{\left(\frac{d(F)}{dA_c}\cdot\sigma_{Aci}\right)^2 + \left(\frac{d(F)}{dA_{si}}\cdot\sigma_{Asi}\right)^2 + \left(\frac{d(F)}{dA_{ci+1}}\cdot\sigma_{Aci+1}\right)^2 + \left(\frac{d(F)}{dA_{si+1}}\cdot\sigma_{Asi+1}\right)^2 + \left(\frac{d(F)}{d\Delta t}\cdot\sigma_{\Delta t}\right)^2}, \tag{13}$$

где σ_{Aji} – погрешности определения составляющих при квантовании;

$\sigma_{\Delta t}$ – погрешность временного дискрета.

Проведя дифференцирование и считая, что $\sigma_{Aci} = \sigma_{Asi} = \sigma_{Aci+1} = \sigma_{Asi+1} = \sigma A$, получим

$$\delta F_e = \frac{1}{2\pi\cdot\Delta t}\sqrt{\sigma_A^2\left[\frac{1}{A_{ci+1}^2+A_{si+1}^2}\right]+\frac{\sigma_{\Delta t}^2}{(\Delta t)^2}\left[\operatorname{arctg}\frac{A_{si+1}}{A_{ci+1}}-\operatorname{arctg}\frac{A_{si}}{A_{ci}}\right]^2} \quad . \tag{14}$$

Погрешность при слабом шумовом воздействии (обычно при соотношении с/ш не менее 20 дБ) определятся, в основном, точностью вычисления A_{ci} и A_{si}, что определяется разрядностью АЦП, а также погрешностью определения Δt.

Формула (14) выражает важную особенность. Погрешность измерения мгновенной частоты, определенной через аналитический сигнал, как отмечено в [3], не зависит от формы измеряемого колебания и длительности импульса. Увеличивая количество выборок за длительность импульса, значение средней мгновенной частоты, после исключения аномальных порциальных измерений, результат измерения не выйдет за пределы ширины доплеровского спектра непрерывного эхо-сигнала.

Отличие метода Б от известных, например метода, изложенного в [4], в том, что:

– за малую длительность $\tau_и$ производится n выборок и получается n–1 единичных измерений частоты эхо-сигнала;

– результат измерения мгновенной частоты не зависит от длительности эхо-сигнала;

– для измерения не требуется вычисление комплексной корреляционной функции.

Вопрос соотношения средней частоты спектра эхо-сигнала и среднего значения мгновенной частоты подробно рассмотрен в [5].

Необходимо отметить, что повышение достоверности измерения частоты заполнения радиоимпульса по методу А или среднего значения мгновенной частоты по методу Б в гидроакустическом доплеровском лаге может быть достигнуто за счет измерения частоты в средней части импульсного эхо-сигнала [6].

Литература

1. Бородин В.И., Смирнов Г.Е., Толстякова Н.А., Яковлев Г.В. Гидроакустические навигационные средства. – Л.: Судостроение, 1983. - 264 с.

2. Гоноровский В.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1986.

3. Вакман Д.Е. Измерение частоты аналитического сигнала // Радиотехника и электроника. - том XXIV, №5. - Издательство «Наука», 1979.

4. Львов К.П. Оценка спектрального момента. // Труды международной конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики ГА-2006». - С-Петербург. - 2006.

5. Финк Л.М. Соотношение между спектром и мгновенной частотой сигнала. // Проблемы передачи информации. – 1966. - т.2, вып.4. - С.26-38.

6. А.с. СССР №1700492 кл. G01. Измеритель частоты гидроакустического доплеровского лага /С.Т.Барась, В.А.Мельник, А.П.Мартынюк, А.П.Кушнир. - 1991.