

**ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЯ УРОВНЕМЕРОМ С ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ИЗЛУЧАЕМОГО СИГНАЛА ПРИ НАЛИЧИИ МЕШАЮЩИХ ОТРАЖЕНИЙ МАЛОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ**

Давыдочкин В.М., Паршин В.С.

ООО «Предприятие Контакт-1»

Заметной тенденцией в технологии измерения дальности до уровня жидких сред в замкнутых резервуарах являются сегодня бесконтактные методы измерения, основанные на использовании радиолокационных средств. Радиолокационные измерители уровня заполнения различных технологических резервуаров, несмотря на относительно высокую стоимость, находят все большее применение. Это обусловлено рядом преимуществ перед уровнемерами, которые основаны на других физических принципах измерений. Отсутствие механического контакта с зондируемой средой и относительно стабильная скорость распространения радиоволн потенциально могут обеспечить достаточно низкую погрешность измерений. С другой стороны, развитие методов и средств цифровой обработки сигналов позволяет практически реализовать алгоритмы обработки отраженных сигналов, по своим возможностям приближающимся к оптимальным, а современная элементная база открывает возможности синтеза высокостабильных сверхвысокочастотных узлов.

Как показывает практика, кроме воздействия шумовой помехи (отметим, что для современных радиодальномеров с частотной модуляцией зондирующего сигнала на дальностях в десятки метров отношение сигнал/шум не хуже 40-50 дБ), наиболее существенным препятствием получения высокой точности (доли миллиметра) измерений являются паразитные эхо – сигналы. Основная причина их появления – отражения от конструктивных элементов резервуара (или конструктивов безэховой камеры, в которой проводится калибровка дальномера), неоднородностей антенно – волноводного тракта, взаимодействие эхо – сигналов в смесителе приемника с образованием “виртуальных отражателей” и др. Снижение негативного влияния паразитных эхо – сигналов на точность измерения обычно добиваются рациональным размещением дальномера. Однако полностью исключить влияние помеховых сигналов практически не удаётся.

При модуляции частоты зондирующего сигнала по симметричному пилообразному закону с периодом  $T$  сигнал разностной частоты (СРЧ) достаточно адекватно описывается суммой

$$u(t) = U_c \cos[\Phi_c(t)] + \sum_{i=1}^M U_i \cos[\Phi_i(t)] + \xi(t) \quad (1)$$

где  $\Phi_c(t) = k_0 2r_c + \Delta k 4r_c \frac{t}{T} - \varphi_c = \omega_0 \tau_c + 2\Delta\omega \tau_c \frac{t}{T} - \varphi_c$  - полная фаза полезного сигнала;

$\Phi_i(t) = k_0 2r_i + \Delta k 4r_i \frac{t}{T} - \varphi_i = \omega_0 \tau_i + 2\Delta\omega \tau_i \frac{t}{T} - \varphi_i$  - полная фаза сигнала мешающего отражения (помехи);

$U_c$  и  $U_i$  - амплитуды полезного сигнала и  $i$ -й помехи;  $\omega_0$  и  $\Delta\omega$  - минимальное значение частоты зондирующего сигнала и диапазон модуляции;  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  и  $\Delta k = k_{\min} - k_0$ ;  $\lambda_0$  - максимальная длина зондирующей волны;  $r_c$  и  $\tau_c$  - расстояние до измеряемого уровня и соответствующая этому расстоянию задержка эхо сигнала;  $r_i$  и  $\tau_i$  - расстояние до мешающего отражателя и соответствующая этому расстоянию задержка эхо сигнала;  $\varphi_c$  и  $\varphi_i$  - фазы коэффициентов отражения от зондируемого материала и мешающего отражателя;  $\xi(t)$  - белый нормальный шум.

Сразу сделаем оговорку. В работе рассматриваются только такие мешающие отражения, интенсивность которых не превышает единиц процента от интенсивности полезного сигнала. Такой уровень мешающих отражений характерен, как сказано выше, при рациональном размещении уровнемера. Способы снижения влияния мощных мешающих отражений, соизмеримых по интенсивности с полезным сигналом, здесь не рассматриваются.

Целью работы является анализ влияния мешающих сигналов малой интенсивности на поведение оценки максимального правдоподобия времени задержки  $\tau_c$ . В современных дальномерах оценка частоты сигнала биений производится, как правило, в спектральной области. Основываясь на статистических характеристиках оценки спектра стационарного белого шума [1], логарифм функции правдоподобия можно представить в виде [2]

$$\ln F(U_c, \tau_c, \varphi_m) = -\frac{I}{N_0} \sum_{i=1}^{i=i_2} \left\{ [\operatorname{Re} y(j\omega_i) - \operatorname{Re} S(j\omega_i, U_0, \tau_0, \varphi_0)]^2 + \right. \quad (2)$$

$$\left. + [\operatorname{Im} y(j\omega_i) - \operatorname{Im} S(j\omega_i, U_0, \tau_0, \varphi_0)]^2 \right\}$$

где индексы  $i1$  и  $i2$  определяют тот диапазон частот, в пределах которого ищется максимум функции  $\ln F(S_0, \tau_c, \varphi_m)$ ;  $\text{Re}(z), \text{Im}(z)$  - реальная и мнимая части преобразования Фурье наблюдаемого сигнала и «опорного» сигнала;  $U_0, \tau_0, \varphi_0$  - истинные значения параметров сигнала.

Неизвестным параметром, который требуется оценить, является задержка сигнала  $\tau_c$ . Будем считать, что фаза полезного сигнала  $\varphi_c$  известна. При выполнении калибровки приборов такое ограничение не является существенным. Кроме того, будем полагать, что амплитуды наблюдаемого и «опорного» сигналов одинаковы. Такое ограничение также не является существенным при наличии автоматической регулировке усиления.

Функция правдоподобия (2) является осциллирующей с периодом  $t_n$ , равным  $t_n = \lambda/2c$  ( $\lambda$  - длина волны передатчика). Огибающая функции (2) совпадает с точностью до постоянного множителя с формой спектра одиночного импульса длительностью  $T/2$ . Такой вид логарифма функции правдоподобия позволяет предположить, что смещение ее экстремумов, включая главный, будет при малых уровнях помехи будет достаточно мал.

В современных уровнемерах расстояние до измеряемого уровня обычно производится с помощью алгоритма, определяющего частоту, на которой находится максимальная спектральная составляющая, то есть алгоритм оценки частоты имеет вид [2]  $A(\omega) = \max_{\omega}$ , (3)

где  $A(\omega)$  - амплитудный спектр наблюдаемой реализации. Оценка частоты связана с оценкой времени задержки известным соотношением  $\hat{\tau}_c = \frac{\hat{\omega}T}{2\Delta\omega}$ .

Анализ влияния боковых лепестков спектра на точность измерения частоты с помощью алгоритма (3) исследован в работе [3]. Для анализа влияния мешающих отражений на погрешность измерения времени задержки с помощью алгоритма (2) воспользуемся аппаратом сигнальных функций [2]. Сразу отметим, что ниже приведенные результаты при использовании для измерения частоты логарифма функции отношения правдоподобия будут справедливы для случая, когда влиянием боковых лепестков спектра, вычисляемого на отрицательных частотах, можно пренебречь. Для функции правдоподобия (2) полученные результаты справедливы для всех частот. Воспользовавшись теоремой о адекватности представления сигналов во временной и частотной областях, сигнальную функцию представим в виде

$$C(\tau) = \int_0^T u(t, u_c, \tau_c, \varphi_c) u(t, u_c, \tau_0, \varphi_c) dt, \quad (4)$$

где  $\tau_0$  - истинное значение времени задержки.

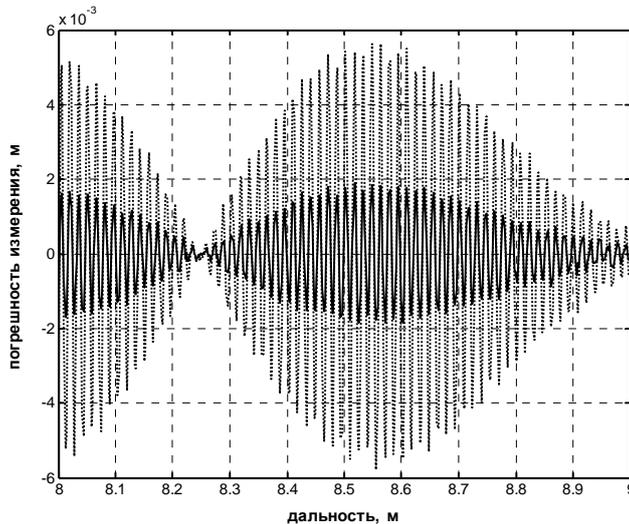


Рис.1. Погрешности измерения дальности при использовании алгоритма, основанного на поиске максимальной спектральной составляющей.

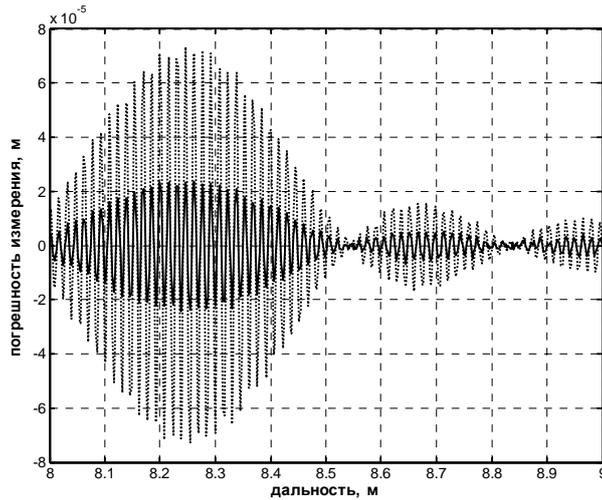


Рис.2. Погрешности измерения дальности при использовании алгоритма, реализующий метод максимального правдоподобия.

Используя результаты работы [3] и сигнальную функцию (4), пренебрегая потерями за счет дискретизации, нетрудно показать, что допустимый уровень помех для однозначного определения дальности не должен превышать для алгоритма (2) величины

$$A \leq \Delta x_{ms} \frac{-\pi^2/3}{S'(x_c - x_p) + \Delta x_{ms} S''(x_c - x_p)} \approx \Delta x_{ms} \frac{-\pi^2/3}{S'(x_c - x_p)}, \quad (5)$$

где  $\Delta x_{ms}$  - предельно допустимое смещение максимума спектральной плотности из-за влияния помех;

$$A = U_p / U_c; \quad S'(x_c - x_p) = \left. \frac{d \sin[\pi(x - x_p)]}{dx \pi(x - x_p)} \right|_{x=x_c}; \quad S''(x_c - x_p) = \left. \frac{d^2 \sin[\pi(x - x_p)]}{dx^2 \pi(x - x_p)} \right|_{x=x_c} \quad \Delta x_{ms} = \Delta\omega / 4\omega_{cp},$$

если анализируется модуль  $C(\tau)$  и  $\Delta x_{ms} = \Delta\omega / 2\omega_{cp}$  если учитывается знак  $C(\tau)$ . При выполнении условия

$$(6) \text{ и точном определении } \varphi_c, \omega_{cp} \text{ и } \Delta\omega \text{ максимальное значение погрешности } \Delta x_{mm} = \pm \frac{\Delta\omega}{2\pi\omega_0} \frac{A}{1-A}, \quad (6)$$

существенно меньше, чем при измерении времени задержки с помощью алгоритма (3). Характерной особенностью поведения ошибки является медленное её нарастание при выполнении условия (5). При невыполнении этого условия происходит скачкообразное увеличение погрешности на величину, кратную четверти длины волны передатчика. Заметим, что результаты моделирования, при уровне шумов менее -30 децибел практически совпадают с результатами расчетов по формуле (5).

Результаты моделирования алгоритмов 2 и 3 оценки времени задержки представлены на рисунках 1 и 2. Зависимости получены при отношении сигнал/шум 40 дБ. Мешающий отражатель находился на расстоянии 8,25 метра. Более густой линией показаны результаты вычисления расстояния при уровне мешающего сигнала, равном -10 дБ. Бледная линия соответствует уровню мешающего сигнала, равному -30 дБ. Оценка расстояния вычислялась по формуле  $\hat{r}_c = \hat{\tau}_c c / 2$ , где  $\hat{\tau}_c$  - оценка времени задержки.

Из рисунков видно, что погрешности измерения дальности увеличиваются пропорционально увеличению уровню мешающего сигнала как для алгоритма (2), так и для алгоритма (3). Однако при использовании алгоритма (2), основанного на методе максимального правдоподобия, его «чувствительность» к мешающим отражениям малого уровня существенно меньше из-за уже отмеченного быстро осциллирующей функции правдоподобия. Зависимости, показанные на рисунках 2и 3, сохраняют свой вид и на других дальностях.

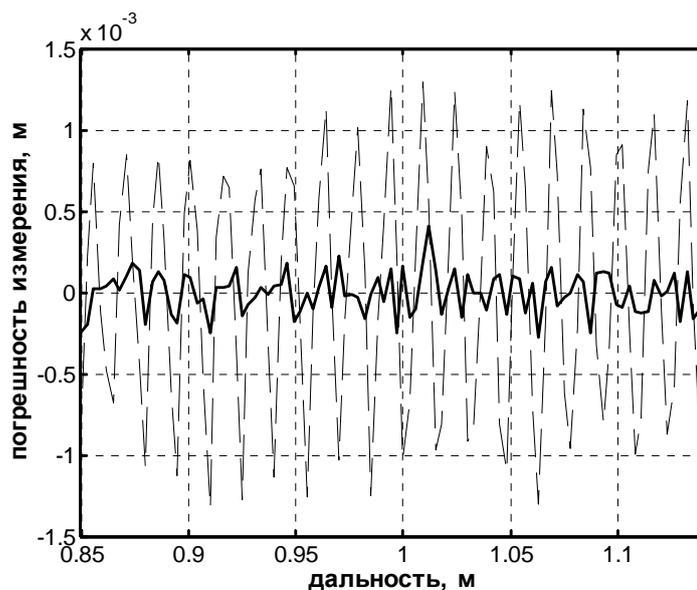


Рис. 3. Погрешности измерения дальности, полученные при проведении натурального эксперимента

На рис. 3 показана случайная составляющая погрешности измерения дальности, полученная при помощи радиоволнового дальномера БАРС-351 с частотной модуляцией излучаемого сигнала, который выпускается ООО «Контакт-1» (г. Рязань). График получен в диапазоне дальностей 0,85 м – 1,15 м. Отметим, что в диапазоне дальностей вблизи одного метра достаточно сильно сказываются переотражения между корпусом и антенной дальномера и имитатором отражающей поверхности, что приводит к существенному ухудшению точности при использовании алгоритма (3) (от долей мм на больших дальностях до примерно 1,25 мм). Алгоритм измерения дальности, основанный на методе максимального правдоподобия, позволил существенно снизить погрешность измерения. При проведении эксперимента имитатор уровня перемещался с шагом 3 мм и с погрешностью установки расстояния  $\pm 0,25$  мм.

#### Литература

1. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Т.1. – М.:Мир, 1972.
2. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Сов. радио, 1983г. 320 с.
3. Давыдошкин В.М., Езерский В.В. Минимизация погрешности измерения расстояния при цифровой обработке сигналов в ближней частотной радиолокации//Цифровая обработка сигналов, №6, 2005 г.

