

## Минимизация погрешности измерений малых расстояний дальномером с частотной модуляцией зондирующего сигнала

В.С. Паршин, Т.А. Ермолина

Рязанская государственная радиотехническая академия  
390024, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1. E-mail [vsparshin@gmail.com](mailto:vsparshin@gmail.com).

*Предложен следящий измеритель малых расстояний, основанный на особенностях функции правдоподобия сигнала, снимаемого с выхода смесителя радиолокационного дальномера с частотной модуляцией зондирующего сигнала. Измеритель позволяет уменьшить погрешность измерения, вызываемую мешающими отражениями, примерно на два порядка.*

*We propose a tracking rangefinder for small distances that relies on particular properties of likelihood function for the signal measured at the output of the mixer of frequency-modulated radar. The proposed rangefinder allows to reduce the error caused by spurious reflections by approximately two orders of magnitude.*

В современных системах контроля и управления технологическими процессами актуальной является задача точного измерения дальности до уровня жидкой среды, находящейся в замкнутом объеме. Высокая точность измерения дальности обеспечивается с помощью современных радиоволновых дальномеров с непрерывным частотно-модулированным излучением (ЧМ дальномеров) и определением дальности по разности частот между излучаемым и отраженным сигналом. В отсутствие помех многие способы обработки сигнала разностной частоты позволяют достаточно точно измерять частоту биений и, соответственно, точно измерять дальность (с погрешностью, не превышающей долей мм). На практике в сигнале разностной частоты присутствует помеховая составляющая, которая вызвана мешающими отражениями от элементов конструкции резервуара, его стенок и от дна. В этом случае сигнал биений (СБ), снимаемый с выхода смесителя дальномера (без учета высокочастотных составляющих, которые подавляются фильтром низких частот) может быть представлен на интервале времени  $0 \leq t \leq T/2$  в виде

$$s(t) = s_c(t) + s_m(t) + \xi(t) = S_c \cos[\omega_0 \tau_{zc} + 2\Delta\omega_\delta \tau_{zc} t / T_{mod} + \varphi_0(\tau_{zc})] + \sum_{m=1}^M S_m \cos[\omega_0 \tau_{zm} + 2\Delta\omega_\delta \tau_{zm} t / T_{mod} + \varphi(\tau_{zm})] + \xi(t), \quad (1)$$

где  $\omega_0$  – минимальное значение частоты передатчика;

$\Delta\omega_\delta$  – диапазон перестройки частоты передатчика;

$T_{mod}$  – период модуляции;

$S_c$  и  $S_m$  – амплитуды полезного и помеховых сигналов;

$\tau_{zc}$  – задержка сигнала, соответствующая расстоянию до измеряемого уровня;

$\tau_{zm}$  – задержка сигнала, соответствующая расстоянию до m-го мешающего отражателя;

$M$  – число мешающих отражателей;

$\xi(t)$  – белый нормальный шум;

$\varphi_0(\tau_{zc})$  и  $\varphi(\tau_{zm})$  – фазы полезного и помехового сигналов, обусловленные фазочастотной характеристикой и диэлектрическими свойствами отражающей поверхности.

Согласно (1) измерение частоты  $\omega_\delta$  СБ, связанной с измеряемым расстоянием

$R$  соотношением  $R = T_{mod} c \omega_{\delta} / 4 \Delta \omega_{\delta}$ , производится на фоне имитирующих помех с неизвестными частотами, амплитудами и начальными фазами. В современных дальномерах частота СБ измеряется в спектральной области. Обычно за частоту СБ принимается та частота, на которой находится максимальная спектральная составляющая амплитудного спектра в базисе Фурье, то есть используется алгоритм  $G(\omega) = \max_{\omega}$ . При примене-

нии этого алгоритма максимальное значение погрешности измерения дальности, вызванной влиянием мешающих отражений, можно приближенно оценить (в мм) как  $\Delta R \approx 2\pi 10^{11} / \Delta \omega_{\delta} \sqrt{q_{cn}}$ , где отношение сигнал/помеха  $q_{cn} = S_c^2 / S_m^2$ . Можно указать, что при отношении сигнал/помеха  $q_{\text{нн}} \approx 2$  дБ максимальная погрешность измерения равна примерно 180 мм, что явно недопустимо.

Для уменьшения погрешности  $\Delta R$  предложены различные способы. Это компенсация помех, использование методов многопараметрической оптимизации и параметрического спектрального анализа [1-3]. Все эти методы имеют два общих недостатка – требуют значительных вычислительных затрат и чувствительны к таким специфичным для ЧМ – дальномерам искажениям СБ, как паразитная амплитудная модуляция и нелинейные искажения.

Погрешность  $\Delta R$  возможно уменьшить, используя для оценки частоты  $\omega_{\delta}$  алгоритм, основанный на методе максимального правдоподобия [4,5]. Ограничиваясь случаем одного мешающего отражателя, запишем по аналогии с логарифмом функции отношения правдоподобия следующую функцию

$$\ln l_M(\tau) = \frac{1}{N_0} \int_0^{T_{mod}} [2\xi(t)S(t, \tau) - S^2(t, \tau)] dt, \quad (2)$$

где  $\xi(t) = S_c(t) + S_m(t) + \xi(t)$ ;

$S(t)$  - опорный сигнал функции отношения правдоподобия при  $S_m(t) = 0$ ;

$N_0$  - спектральная плотность шума  $\xi(t)$ .

Функция

$$q_M(\tau) = \frac{2}{N_0} \int_0^{T_{mod}/2} \left\{ S_c \cos \left[ \tau_{zc} + \frac{\Delta \omega_{\delta} \tau_{3t}}{T_m} + \varphi_o(\tau_{zc}) \right] + S_m \cos \left[ \omega \tau_{3m} + \frac{\Delta \omega_{\delta} \tau_{3m} t}{T_{mod}} + \varphi(\tau_{3m}) \right] \right\} S_{on} \cos \left[ \omega \tau_{3on} + \frac{\Delta \omega_{\delta} \tau_{3on} t}{T_{mod}} + \varphi_{on}(\tau_{3on}) \right] dt \quad (3)$$

где  $\varphi_{on}(\tau_{3on})$ ,  $\tau_{3on}$ ,  $S_{on}$  - фаза, время задержки и амплитуда опорного сигнала; при  $\omega_{\delta} T_{mod} \gg 1$  будет полностью определять точность измерения частоты  $\omega_{\delta} = 2 \Delta \omega_{\delta} \tau_{zc} / T_{mod}$  СБ на фоне имитирующих помех.

Вычисляя интеграл в (3), пренебрегая слагаемыми с удвоенной частотой, получим, что

$$q_M(\tau_{3on}) = \frac{T_{mod}}{2N_0} \left\{ S_c S_{on} \cos[\omega(\tau_{zc} - \tau_{3on}) + \varphi_o(\tau_{zc}) - \varphi_{on}(\tau_{3on})] \frac{\sin[\Delta \omega_{\delta}(\tau_{zc} - \tau_{3on})/2]}{\Delta \omega_{\delta}(\tau_{zc} - \tau_{3on})/2} + S_{mo} S \cos[\omega(\tau_{3m} - \tau_{3on}) + \varphi(\tau_{3m}) - \varphi_{on}(\tau_{3on})] \frac{\sin[\Delta \omega_{\delta}(\tau_{3m} - \tau_{3on})/2]}{\Delta \omega_{\delta}(\tau_{3m} - \tau_{3on})/2} \right\}. \quad (4)$$

Функция  $q_m(\tau)$  является осциллирующей функцией с периодом  $\lambda/2$  ( $\lambda$  - длина волны на частоте  $\omega_0$ ). При отсутствии мешающих отражений ее главный экстремум соответствует задержке  $\tau_{3c}$ , соответствующей частоте  $\omega_0$ .

Смещение экстремумов функции  $q_m(\tau_{3on})$ , включая главный, под воздействием МО при  $S_m < S_c$  определяется по формуле

$$\Delta\tau(\tau_x) = \tau_{c\tilde{n}} - \arctg \left\{ \frac{S_c \sin[\omega\tau_{3c} + \varphi_0(\tau_{3c}) - \varphi_{on}(\tau_{3on})] + A \sin[\omega\tau_{3m} + \varphi(\tau_{3m}) - \varphi_{on}(\tau_{3on})]}{S_c \cos[\omega\tau_{3c} + \varphi_0(\tau_{3c}) - \varphi_{on}(\tau_{3on})] + A \cos[\omega\tau_{3m} + \varphi(\tau_{3m}) - \varphi_{on}(\tau_{3on})]} \right\} \frac{1}{\omega_0}, \quad (5)$$

где  $A = S_m \frac{\sin[\Delta\omega(\tau_{3m} - \tau_x)/2]}{\Delta\omega(\tau_{3m} - \tau_x)/2}$ ;

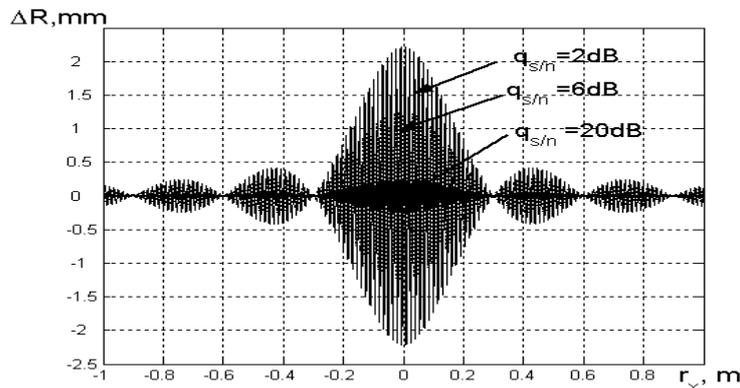
$$\tau_{\tilde{o}} = 2R_{\tilde{o}}/\tilde{n};$$

$R_x$  - расстояние, на котором находится мешающий отражатель относительно полезного;

$c$  - скорость света.

Результаты расчетов по формуле (5) для отношений сигнал/помеха 2, 6, 20 дБ при одинаковых значениях фаз полезного и опорного сигнала приведены на рис. 1. При расчетах задержка  $\Delta\tau$  пересчитана в расстояние. Из рисунка следует, что влияние мешающих отражений приводит к смещению положения экстремумов функции  $q_m(\tau)$ , но это смещение невелико, оно примерно на два порядка меньше, чем смещение максимальной спектральной составляющей спектра сигнала биений. Различие в значениях фаз  $\varphi_0(\tau_{3c})$  и  $\varphi_{on}(\tau_{3on})$  приводит к появлению дополнительной погрешности измерения  $\Delta r_{\tilde{o}on} = [\varphi_0(\tau_{3c}) - \varphi_{on}(\tau_{3on})]/\omega_0$ . Различие в значениях фаз  $\varphi(\tau_{3m})$  и  $\varphi_{on}(\tau_{3on})$  приводит к изменению начальной фазы быстрых колебаний кривой смещения положения экстремумов (рис. 1), но не приводит к изменению их огибающей.

Однако влияние мешающих отражений приводит не только к смещению положения экстремумов функции  $q_m(\tau)$ , но и к изменению их значений



**Рис.1. Смещения положения главного экстремума в зависимости от расстояния между полезным и мешающим отражателями**

Уже при отношении  $q_{cn} < 30$  дБ экстремум, соответствующий задержке  $\tau_{3c}$ , может не быть глобальным. Поэтому в процессе измерения задержки (или частоты  $\omega_0$ ) на основе (4) должно быть реализовано слежение за экстремумом, в окрестностях которого находится искомая величина  $\tau_{3c}$  (или частота  $\omega_0$ ). Захват глобального экстремума функции  $q_m(\tau)$  осуществляется перед входом полезного отражателя в интер-

вал дальностей с повышенной погрешностью, то есть в тот интервал, в котором влияние мешающих отражений несущественно. Для минимизации погрешности  $\Delta r_{дон}$  необходимо определить значения фазочастотной характеристики  $\hat{\varphi}_0(\tau_{3c}) = \hat{\varphi}_H - \omega_0 \hat{\tau}_{3c}$  ( $\hat{\varphi}_H$  – оценка начальной фазы СБ) на границе интервала дальности с повышенной погрешностью). Оценка  $\hat{\tau}_{3c}$  осуществляется на основе поиска максимальной спектральной спектра СБ  $G(\omega)$ . На основе последнего оцененного значения  $\hat{\tau}_{3c}$  перед входом в зону повышенной погрешности формируется интервал задержек  $\varepsilon$ , внутри которого ищется экстремум функции  $q_M(\tau)$ . Оптимальное значение  $\varepsilon$ , пересчитанная в расстояние, составляет  $\lambda/2$ . Смещение интервала задержек, обеспечивающее слежение за полезным экстремумом, реализуется либо смещением интервала  $\varepsilon$ , используя  $n-1$  измеренное значение  $\tau_{3c}$ , либо на основе вычисления приращения  $\tau_{3c}$  при двух последовательных измерений с помощью алгоритма (4). Поиск экстремума функции  $q_M(\tau)$  в узком диапазоне задержек позволяет исключить появление аномальных ошибок.

Результаты моделирования показали полное совпадение с результатами расчетов по (5). Экспериментальные исследования, выполненные на уровнемерах серии БАРС-351, выпускаемых Рязанским предприятием «Контакт-1», показали результаты, практически совпадающие с результатами расчетов.

К недостаткам следящего измерителя можно отнести следующие.

1. Изменения положения полезной отражающей поверхности не должны превышать 3-7 мм при двух последовательных измерениях в зависимости от выбранного способа слежения и отношения сигнал/помеха.

2. Включение режима слежения внутри зоны повышенной погрешности может привести к захвату локального максимума, что приводит к появлению ошибки, кратной величине  $n\lambda/2$  ( $n$  – номер захваченного локального максимума, отсчитываемый относительно глобального). Поэтому использование следящего алгоритма предполагает наличия априорных сведений о местоположении мешающих отражателей. При отношении сигнал/помеха, большем 14 дБ для исключения упомянутого недостатка возможно использовать аппроксимацию измеренного расстояния алгоритмом  $G(\omega) = \max_{\omega_0}$  полиномом первого порядка и результаты аппроксимации использовать в качестве предварительной  $q_M(\tau)$  оценки измеренного расстояния для следящего алгоритма.

### Литература

1. Brumbi D. Fundamentals of Radar Technology for Level Gauging. 3-rd Revision. – Krohne Messtechnik, Duisburg, 1999.
2. Марпл С.П.-мл. Цифровой спектральный анализ и его приложения. / Пер. с англ. под ред. О.И. Хабарова и Г.А. Сидоровой. – М.: Мир, 1990. –584 с.
3. Паршин В.С., Езерский В.В., Багдадюлян А.А. Улучшение характеристик ЧМ дальномера при наличии мешающих отражений с помощью параметрического спектрального анализа / Труды Российского НТО радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение. Выпуск 6, т. 1. М., 2004.
4. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
5. Атаянц Б.А., Давыдочкин В.М., Езерский В.В., Паршин В.С., Смольский С.М. Прецизионные системы ближней частотной радиолокации промышленного применения. – М.: Радиотехника, 2012. –414 с.