

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ДАТЧИКА РАССТОЯНИЯ НА БАЗЕ ЧМ-ДАЛЬНОМЕРА С ВЕСОВЫМ СГЛАЖИВАНИЕМ ДИСКРЕТНОЙ ОШИБКИ

ANALYSIS OF ACCURACY OF SENSOR OF DISTANCE ON BASE FM-RADAR WITH WEIGHT BY SMOOTHING OF DISCRETE MISTAKE

Рязань, ООО Контакт-1
Ryazan, LTd Kontakt-1

They are considered the sources to inaccuracy of weighted method of smoothing of discrete mistake FM range finder. They are received correlations, allowing estimate the value of inaccuracy of measurement in general event. These correlations are presented in the manner enough forgiven mold, allowing do the important findings for choice to weighted functions.

Во многих отраслях промышленности для организации нормального протекания производственного процесса требуется проводить бесконтактное измерение малых расстояний R (1-30 м.) с высокой точностью и оперативностью. Для этих целей широко используются частотно модулированные (ЧМ) дальномеры с изменением частоты зондирующего сигнала в диапазоне ΔF . Достижение высокой точности измерения Δ_R (единицы мм) в таких приборах предполагает использование какого-либо метода сглаживания дискретной ошибки (МСДО) ($\delta_R = c/4\Delta F$, где c - скорость света), присущей ЧМ дальномеру вследствие периодичности закона частотной модуляции. Каждый из известных МСДО приводит к усложнению схемы обработки сигнала и обеспечивает некоторую величину предельно достижимой ошибки измерения. Выбор того или иного метода определяется соотношением обеспечиваемой точности измерения, надёжности прибора и его стоимости. В данной работе приводится анализ точности МСДО, заключающегося в весовой оценке частоты разностного сигнала, пропорциональной измеряемому расстоянию [1]:

$$S = \frac{2}{T_m} \int_0^{T_m/2} \alpha(t) f_p(t) dt, \quad (1)$$

где: T_m - период модуляции частоты; $\alpha(t)$ - весовая функция; $f_p(t)$ - частота разностного сигнала, определяемая как $f_p(t) = f'(t)\tau$; $f(t)$ - закон частотной модуляции; $f'(t)$ - первая производная от закона частотной модуляции; $\tau = 2R/c$.

Измеряемое расстояние при этом определяется по соотношению:

$$R = \frac{cS}{4K_{\text{эм}} \Delta F}, \quad (2)$$

где: $K_{\text{эм}}$ - коэффициент, зависящий от формы весовой функции и модулирующей функции. При практической реализации метода оценка величины $\hat{S}$ находится приближённо путём численного вычисления интеграла (1) по формуле прямоугольников [3], в которой шаг интерполяции принимается равным половине мгновенного значения периода разностного сигнала:

$\Delta_i = 0,5T_{pi} = \frac{1}{2} f_p(t_i)$, что приводит к расчётному соотношению:

$$\hat{S} = \sum_{i=1}^N \alpha(t_i), \quad (3)$$

где: t_i - i -й момент перехода сигнала через ноль, N - число переходов разностного сигнала через ноль на половине периода модуляции.

Как видно из этих выражений, метод весового сглаживания допускает достаточно простую реализацию. Целесообразно оценить его предельные возможности и источники погрешностей. В данной работе произведён такой анализ на основе теоретических выражений и компьютерной модели.

Источниками погрешности измерения в методе весового сглаживания, кроме нестабильности девиации частоты, общей для всех методов, являются:

- оценка величины $\hat{S}$ по приближенному выражению (3), т.е. методическая погрешность;
- погрешность оценки моментов t_i перехода разностного сигнала через ноль;
- отличие реального закона модуляции частоты от заданного;
- погрешность определения отсчетов весовой функции $\alpha(t)$.

Рассмотрим первую составляющую погрешности $\Delta 1_R$, которая фактически является погрешностью численного вычисления интеграла (1). В связи с тем, что, в общем случае, разностная частота зависит от времени из-за нелинейного изменения частоты зондирующего сигнала, шаг интерполяции, определяемый по положению нулей разностного сигнала $\Delta_i = t_{i+1} - t_i$, не равен половине мгновенного периода разностного сигнала $0,5T_{pi}$. В итоге погрешность, возникающая при замене площади под интегрируемой функцией площадью прямоугольника $\alpha(t_i) f_p(t_i) \Delta_i$ на каждом шаге интерполяции, отличается от обычно получаемой в литературе по вычислительной математике [3] и может быть записана в виде:

$$D_i = \frac{[F(t_{i+1}) - F(t_i)]\Delta_i}{2} - \frac{\Delta_i^3}{12} F''(\varepsilon_i) - \left[\frac{1}{2f_p(t_i)} - \Delta_i \right] F(t_i), \quad (4)$$

где: $F(t_i) = \alpha(t_i) f_p(t_i)$, ε_i - в соответствии с теоремой о среднем [3], некоторая точка внутри шага интерполяции (t_i, t_{i+1}) .

Полная погрешность вычисления интеграла (1) может быть получена суммированием по всем интервалам с учётом части площадей за пределами крайних узлов интерполяции, т.к. они не всегда совпадают с границами интервала интегрирования. Если ввести обозначения: $t_{-1} = 0$,

$t_N = 0,5T_m$ и учесть равенство нулю весовой функции на границах интервала интегрирования, то можно полную погрешность представить в виде:

$$D = \sum_{i=-1}^{N-1} [F(t_i) + F(t_{i+1})] \Delta_i - \sum_0^{N-1} \alpha(t_i) - \sum_{i=-1}^{N-1} \tau \Delta_i^3 [\alpha''(\varepsilon_i) f'(\varepsilon_i) + 2\alpha'(\varepsilon_i) f''(\varepsilon_i) + \alpha(\varepsilon_i) f'''(\varepsilon_i)] / 6 \quad (5)$$

Погрешность оценки расстояния при этом равна:

$$\Delta 1_R = \frac{D \delta_R}{K_{\text{вм}}} \quad (6)$$

Очевидно, что с увеличением измеряемого расстояния эта составляющая погрешности уменьшается, т.к. увеличивается число точек в формуле оценки интеграла. Выражения (5) и (6) позволяют анализировать влияние различных факторов на величину погрешности весового метода сглаживания дискретной ошибки, конкретизируя эти формулы для возможных ситуаций.

Рассмотрим применение полученных соотношений на примере наиболее важного случая линейного изменения частоты зондирующего сигнала. Это наилучший вариант, к которому всегда стремятся при проектировании датчиков расстояния и который обеспечивает минимальную погрешность измерения. При этом $f'(t) = \frac{2\Delta F}{T_m}$, $f''(t) = 0$, $f'''(t) = 0$, $f'(t_i) \tau \Delta_i = 0,5$ и выражение (6) после некоторых преобразований можно привести к виду:

$$\Delta 1_R = \frac{\delta_R}{K_{\text{вм}}} \left[\frac{T_m - 2t_{N-1} - T_p}{2T_p} \alpha(t_{N-1}) + \frac{2t_0 - T_p}{2T_p} \alpha(t_0) \right] - \frac{T_m}{48} \frac{\delta_R^2}{K_{\text{вм}} R} [\alpha'(\varepsilon_{N-1}) - \alpha'(\varepsilon_{-1})]. \quad (7)$$

Погрешность измерения определяется значениями крайних отсчетов весовой функции и крайних отсчетов её первой производной. Уточним, что здесь $0 < \varepsilon_{-1} < t_0$ и $t_{N-1} < \varepsilon_{N-1} < 0,5T_m$.

Погрешность выражения (7) уменьшается с увеличением числа точек интерполяции N . Его анализ позволяет делать самые общие выводы о характере зависимости ошибки от расстояния.

Дальнейший анализ возможен для конкретной формы весовой функции. Рассмотрим функции, использованные в [2]:

$$\alpha(t) = \left[1 - \cos\left(\frac{4\pi t}{T_m}\right) \right]^n. \quad (8)$$

Нас интересует максимальное значение ошибки. Это значение можно получить, определив экстремум выражения (7). Приняв $n=1$, и считая, что точки вычисления производной весовой функции ε_{-1} и ε_{N-1} выбраны в центре отрезков от t_0 и t_{N-1} до краёв интервала интегрирования, получим:

$$\Delta 1_{R_{\max}}(n=1) = \frac{5\pi^2 \delta_R^3}{48R^2} = 1,04 \frac{\delta_R^3}{R^2}, \quad (9)$$

что близко к полученному в [1] точному значению для данной весовой функции.

Аналогичные выражения для $n=2$ и $n=4$ соответственно имеют вид:

$$\Delta 1_{R_{\max}}(n=2) = 4 \frac{\delta_R^5}{R^4}; \quad (10)$$

$$\Delta 1_{R_{\max}}(n=4) = 370 \frac{\delta_R^9}{R^8}. \quad (11)$$

На рис. 1 приведены для сравнения графики,

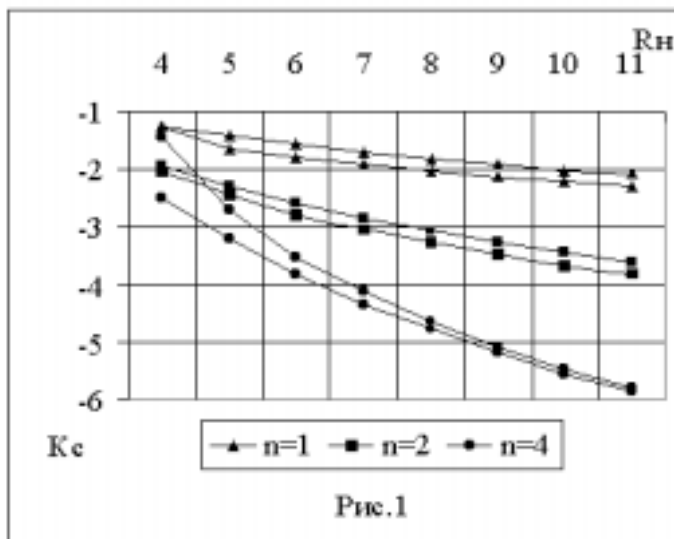


Рис.1

полученные в [2] методом численного моделирования обработки сигнала по формуле (3), и построенные по выражениям (9) – (11). На рисунке обозначены:

$$R_n = \frac{R}{\delta_R}, \quad K_c = \lg\left(\frac{\Delta 1_{R_{\max}}}{\delta_R}\right).$$

Полученные результаты достаточно близки к точным значениям и позволяют сформулировать некоторые выводы:

- погрешность измерения для выбранных весовых функций изменяется обратно пропорционально измеряемому расстоянию в степени $2n$;

- величина используемой девиации входит в полученные формулы в степени $2n+1$ (через величину δ_R), т.е. влияние изменения девиации на величину

погрешности очень велико;

- соотношения (9) – (11) позволяют обоснованно выбрать необходимую девиацию частоты и вид весовой функции исходя из заданных погрешности измерения и минимального измеряемого расстояния.

Вторая составляющая погрешности измерения $\Delta 2_R$ вызвана тремя причинами: наличие шумов ($\Delta 2_{R_{ш}}$), дискретность счёта интервалов времени ($\Delta 2_{R_{\partial}}$) и смещение порогового уровня устройства фиксации момента перехода через ноль ($\Delta 2_{R_c}$). Величина $\Delta 2_{R_{ш}}$ зависит от уровня шума, носит случайный характер и количественно оценивается среднеквадратическим отклонением $\sigma_{R_{ш}}$. Составляющую $\Delta 2_{R_{\partial}}$ фактически тоже можно свести к случайной компоненте, если использовать понятие шума квантования и считать случайным момент начала счёта по отношению к моменту появления нуля-пересечения. Смещение порогового уровня можно считать случайным и, тем самым, его влияние также можно оценить, задавая соответствующие вероятностные характеристики. Считая, что в каждый момент нуля-пересечения шумы независимы, можно влияние

этих шумов на результат накопления учесть как накопление независимых шумовых отсчётов, подвергнутых нелинейному преобразованию в соответствии с весовой функцией.

Погрешность ΔZ_R , вызванная отличием закона модуляции от заданного (в большинстве случаев от линейного), обусловлена нелинейностью модуляционной характеристики (МХ) передатчика. Оценить её можно с помощью разложения в ряд Фурье отклонения закона модуляции от заданного и вычисления значения интеграла (1) после подстановки в него указанного выражения. Слагаемые, порождаемые членами ряда Фурье с чётными номерами, при интегрировании дают нулевые значения. Вклад в погрешность измерения вносят только члены ряда Фурье с нечётными номерами.

Погрешность определения величины отсчёта весовой функции вызвана ограниченным числом разрядов при цифровом представлении отсчётов – это тоже шум квантования с независимыми значениями, который при накоплении приводит к погрешности $\Delta 4_R$. С увеличением расстояния увеличивается и дисперсия накопленного шума. Выбором необходимой разрядности процессора можно свести эту погрешность до допустимых величин. Оценочные расчёты показывают, что такие условия достигаются при числе разрядов не менее 15.

Литература

1. Заявка 30-1591 Японии, МКИ G01S 13/34. Способ измерения дальности при помощи частотно-модулированного сигнала и радиолокационная станция с частотной модуляцией // Изобретения стран мира. 1985 г. 15. с.29
2. Езерский В.В. Весовая обработка сигналов частотного дальномера повышенной точности // Межвуз. Сб. научн. Трудов "Обработка сложных сигналов с применением цифровых устройств и функциональной электроники". РГРТА, 1996. С.56
3. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. М.: Наука, 1966. 664 с.