

## Проблема шумов и нелинейности модуляционной характеристики передатчика в прецизионных промышленных системах ближней частотной радиолокации

Б.А. Атаянц, В.В. Езерский, С.М. Смольский, Б.И. Шахтарин

Рассмотрены особенности работы прецизионных частотных дальномеров на фоне шумов и нелинейности модуляционной характеристики передатчика. Выполнена оценка шумовой составляющей погрешности измерения малых и сверхмалых расстояний в приборах, предназначенных для промышленных систем автоматического управления технологическими процессами. Анализ проведен для трех групп таких приборов, различающихся по точности измерения расстояния и сложности реализации. Показана возможность выполнения минимизации погрешности измерения при наличии шума, позволяющая существенно повысить точность измерения. Проведен анализ ухудшения точности измерения при нелинейной модуляционной характеристике для простых приборов малой точности. Рассмотрены методы снижения погрешности путем компенсации нелинейности введением адаптивных предискажений в модулирующее напряжение для приборов средней точности. Показана возможность устранения влияния нелинейности в приборах высокой точности.

### Введение

В [1] рассмотрены принципы построения прецизионных частотно-модулированных (ЧМ) дальномеров малых и сверхмалых расстояний и выделены три группы таких дальномеров, представленные соответственно традиционным счетным методом оценки разностной частоты со сшиванием фазы сигнала разностной частоты (СРЧ) для приборов малой точности, весового усреднения разностной частоты для приборов средней точности и спектральной оценкой разностной частоты для приборов высокой точности. Приведены выражения для методической погрешности измерения расстояния у приборов всех трех групп и изложены методы минимизации этой составляющей погрешности измерения.

Подобные измерительные системы строят, исходя из требований достижения наивысшей точности измерения. Поэтому отношение сигнал/шум при проектировании стараются обеспечить достаточно большим. Однако именно уровень шума во многих случаях является фактором, ограничивающим достижимую погрешность измерения расстояния, поэтому в данной работе рассмотрим влияние шума на погрешность трех указанных групп приборов.

Другой существенной причиной возникновения погрешности измерения расстояния является нелинейность модуляционной характеристики генератора. В данной работе рассмотрим влияние этого фактора на погрешность и методы снижения погрешности измерения. При этом учтем, что приборы первой группы с малой точностью измерения реализуют, исходя из требования наибольшей простоты и дешевизны. В них нецелесообразно

использовать сложные методы обработки, позволяющие устранить нелинейность или учесть ее при обработке сигнала разностной частоты (СРЧ). Вследствие этого для них имеет смысл просто оценить ухудшение точности при реально существующих видах нелинейности. Для двух других групп приборов целесообразно рассмотреть методы снижения погрешности измерения.

### 1. Работа прецизионного частотного дальномера на фоне шума

#### 1.1. Приборы на основе счетного метода оценки разностной частоты

Прежде чем оценить влияние шума, необходимо оговорить процедуру обработки сигнала. Считаем, что используется описанный в [1] адаптивный алгоритм управления частотной модуляцией со «сшиванием» фазы СРЧ. Этот алгоритм заключается в таком управлении моментами изменения знака производной модулирующего пилообразного напряжения, при котором они совпадали бы с ближайшими экстремумами СРЧ, находящимися за пределами заданного минимального диапазона перестройки несущей частоты. При этом СРЧ приобретает вид непрерывной синусоиды без разрыва фазы. В соответствии с изложенным в [1] будем считать, что на первом этапе обработки с помощью узкополосного следящего фильтра производится фильтрация смеси сигнала  $u(t)$  с нормальным белым шумом  $\xi(t)$ , имеющим нулевое математическое ожидание и энергетический спектр  $F(\omega) = 2N_0$ :



$$s(t) = u(t) + \xi(t). \quad (1)$$

Затем для нахождения нулей СРЧ производится усиление с ограничением. Моменты пересечения фронтов полученных при этом почти прямоугольных импульсов с нулевым уровнем принимаем за положение нулей СРЧ. Для нахождения положения экстремумов СРЧ, определяющих момент «сшивания» фазы, производится дифференцирование смеси сигнала с шумом на выходе узкополосного следящего фильтра и усиление с ограничением. Моменты пересечения фронтов полученных при этом почти прямоугольных импульсов с нулевым уровнем принимаем за положение экстремумов СРЧ. Эти импульсы управляют генератором модулирующего напряжения.

В результате такой обработки характеристики входного шума изменятся.

### 1.1.1. Параметры шума после предварительной обработки СРЧ

Считаем, что частотная характеристика  $H(\omega)$  узкополосного следящего фильтра, настроенного на частоту сигнала  $\omega_r$ , приближается к гауссовой кривой [2]:

$$H(\omega) = \exp\left[-(\omega - \omega_r)^2 / (2\beta^2)\right], \quad (2)$$

где параметр  $\beta$  связан с полосой пропускания  $\Pi_\Phi$  фильтра:  $\beta = \Pi_\Phi / \sqrt{\pi}$ .

После узкополосной фильтрации шум остается нормальным [2] с корреляционной функцией

$$B_\xi(\tau) = N_0\beta \exp\left[-0,25\beta^2\tau^2\right] \cos(\omega_r\tau) / \sqrt{\pi}. \quad (3)$$

В результате дифференцирования полученного узкополосного процесса он по-прежнему остается нормальным с нулевым математическим ожиданием и корреляционной функцией, определяемой выражением [2]:

$$B_{\xi^{(k)}\xi^{(l)}}(\tau) = (-1)^k B_\xi^{(k+l)}(\tau). \quad (4)$$

Отсюда получим

$$B_{\xi'}(\tau) = N_0\beta \sqrt{(\beta^2 + 2\omega_r^2 - 0,5\tau^2\beta^4)^2 + (2\tau\omega_r\beta^2)^2} \times \exp(-0,25\tau^2\beta^2) \cos[\tau\omega_r + \arctg(4\tau\omega_r\beta^2 / (4\omega_r^2 + 2\beta^2 - \tau^2\beta^4))] / \sqrt{2\pi}. \quad (5)$$

Подставляя в (5)  $\tau = 0$ , получим дисперсию шума на выходе дифференцирующего блока:

$$B_{\xi'}(0) = B_\xi(0)(\omega_r^2 + 0,5\beta^2). \quad (6)$$

Влияние шумов на погрешность измерения расстояния методом «сшивания» фазы СРЧ проявляется в виде двух эффектов. Первый заключается в возникновении погрешности счета периодов СРЧ. Этот эффект в литературе исследован достаточно подробно [3], и возникающая при этом погрешность, выражающаяся в изменении числа подсчитанных нулей смеси сигнала с шумом, связана с отношением сигнал/шум и длительностью интервала обработки сигнала. При достаточно большом отношении сигнал/шум (более 30 – 40 дБ), характерном для рассматриваемого случая, эта составляющая погрешности становится пренебрежимо малой по сравнению с методической погрешностью.

Второй эффект специфичен для данного случая и связан с погрешностью в определении момента появления экстремума СРЧ, что приводит к погрешности «сшивания» фазы СРЧ. Поэтому рассмотрим его подробнее.

### 1.1.2. Погрешность сшивания фазы СРЧ

Неточность  $\Delta\varphi$  «сшивания» фазы  $u_p(t)$  возникает в том случае, когда момент экстремума СРЧ определен с погрешностью  $\Delta t$  (рис. 1). Причем возможно запаздывание или опережение по фазе в точке «сшивания». Погрешность «сшивания» возникает в устройстве нахождения экстремума СРЧ.

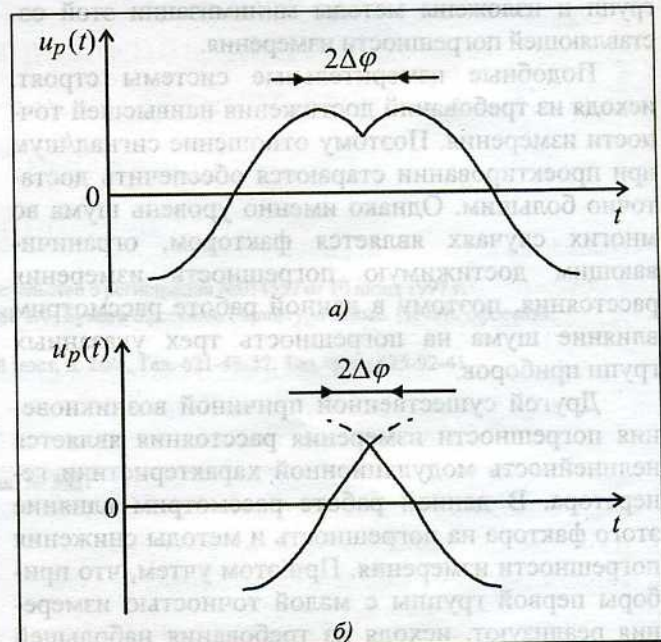


Рис. 1. Погрешности «сшивания» фазы СРЧ



Причинами неточности «сшивания» могут быть фазовые сдвиги СРЧ, возникающие в процессе его предварительной обработки или влияние шума.

Ошибку измерения можно оценить уменьшением или увеличением длительности одного из периодов  $T_r$  до величины  $T_{r\text{ экв}}$  на интервале времени  $T_{\text{мод}}/2$ :

$$T_{r\text{ экв}} = T_r + 2\Delta t T_r / (0,5T_{\text{мод}} - 2\Delta t) = T_r T_{\text{мод}} / (T_{\text{мод}} - 4\Delta t). \quad (7)$$

В результате получим соотношение для относительной погрешности определения расстояния  $R$  при наличии погрешности «сшивания» фазы с помощью первого способа измерения частоты, заключающегося в подсчете нулей СРЧ за фиксированный интервал времени  $T_{\text{изм}}$  [1]:

$$\frac{\Delta R}{\delta_{R_3}} = \frac{1}{N_{\text{изм}}} \text{Int} \left\{ \frac{N_{\text{изм}}}{1/x + x / (2\Delta F_{\text{мин}} T_3 N_{T_{\text{мод}}})} - 2\Delta\phi / (\pi N_{T_{\text{мод}}}) + 0,5 \right\} - x, \quad (8)$$

где  $\delta_{R_3} = c / (4\Delta F_{\text{мин}})$  – величина ошибки дискретности (ОД);  $c$  – скорость распространения электромагнитных волн;  $\Delta F_{\text{мин}} = F_{\text{эв}} - F_{\text{эн}}$ ;  $F_{\text{эн}}$  и  $F_{\text{эв}}$  – соответственно нижняя и верхняя частотные метки, задаваемые с помощью эталонных диэлектрических резонаторов;  $x = R / \delta_{R_3}$  – нормированная дальность;  $N_{\text{изм}} = T_{\text{изм}} / (2T_3)$  – число обрабатываемых периодов модуляции;  $T_3$  – длительность эталонного интервала времени между частотными метками [1], поддерживаемая неизменной при изменении внешних условий;  $N_{T_{\text{мод}}}$  – число подсчитанных периодов СРЧ в одном периоде модуляции.

У второго способа измерения частоты, заключающегося в подсчете нулей СРЧ за фиксированное число периодов модуляции с оценкой длительности получающегося измерительного интервала, погрешность «сшивания» фазы влияет только на систематическую составляющую:

$$\Delta R / \delta_{R_3} = -(x)^2 / (\Delta F_{\text{мин}} T_{\text{мод}}) - \Delta\phi / \pi. \quad (9)$$

Из полученных выражений следует, что за счет погрешности «сшивания» в дискретной ошибке возникает систематическая постоянная составляющая, величина которой значительно превышает методическую погрешность. Очевидно,

что, зная заранее фазовую характеристику тракта предварительной обработки СРЧ, можно провести коррекцию результата расчета расстояния, аналогично описанной в [1] коррекции методической погрешности.

### 1.1.3. Шумовая составляющая погрешности измерения, вызванная неточностью сшивания фазы

Для оценки шумовой составляющей погрешности, вызванной неточностью «сшивания» фазы, достаточно рассмотреть характеристики погрешности определения момента «сшивания».

Смещение  $\Delta t_i$  момента пересечения нулевого уровня производной суммы СРЧ и шума относительно момента  $t_i$  пересечения этого уровня только одной производной СРЧ в предположении малости уровня шума по сравнению с амплитудой сигнала  $U_m$ , получим в виде

$$\Delta t_i = \xi_i T_3^2 / (U_m x^2 \pi^2). \quad (10)$$

Из (10) ясно, что закон распределения плотности вероятности смещения момента «сшивания» фазы СРЧ является нормальным с нулевым математическим ожиданием и корреляционной функцией

$$B_{\Delta t}(\tau) = B_{\xi}(0) T_3^4 \sqrt{(\beta^2 + 2\omega_r^2 - 0,5\tau^2\beta^4)^2 + (2\tau\omega_r\beta^2)^2} \times \exp(-0,25\tau^2\beta^2) \cos\{\tau\omega_r + \arctg[4\tau\omega_r\beta^2 / (4\omega_r^2 + 2\beta^2 - \tau^2\beta^4)]\} / (2U_m^2 x^4 \pi^4). \quad (11)$$

Отсюда при  $\tau = 0$ , получаем дисперсию смещения момента «сшивания» фазы СРЧ

$$\sigma_{\Delta t}^2 = T_3^2 [1 + 2 / (\pi x^2)] / [2(q\pi x)^2], \quad (12)$$

где  $q^2 = U_m^2 / [2B_{\xi}(0)]$ .

Теперь найдем дисперсию соответствующей фазовой ошибки:

$$\sigma_{1\Delta\phi}^2 = [1 + 2 / (\pi x^2)] / (2q^2). \quad (13)$$

Отметим, что наблюдается очень слабое влияние изменения расстояния на СКО фазового сдвига. Поэтому наибольшее значение имеет влияние отношения сигнал/шум. При этом важно знать превышает ли область существования  $\Delta\phi$  величину  $\pm\pi/2$ . В случае, если такое превышение наблюдается, происходит перескок момента «сшивания» фазы СРЧ на соседний экстремум, т.е. изменяется

