

УДК 621.396.96

**В.В. Езерский****ВЛИЯНИЕ ШУМА НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЯ ДАЛЬНОМЕРОМ С АДАПТИВНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ**

*Рассматривается погрешность измерения расстояния дальномером с адаптивной частотной модуляцией, вызванная влиянием шума на процесс адаптации параметров модуляции. Приводятся выражения для относительной дисперсии погрешности измерения расстояния при двух возможных способах оценки разностной частоты. Выполнена количественная оценка погрешности измерения и приведены результаты компьютерного моделирования.*

**Введение**

В работе [1] предложен частотный дальномер с адаптивным управлением параметрами частотной модуляции, позволяющий эффективно сглаживать ошибку дискретности (ОД), присущую такому дальномеру при счётном методе оценки разностной частоты. Адаптация заключается в переключении знака производной закона частотной модуляции по симметричному треугольному закону в моменты времени, совпадающие с одним из экстремумов сигнала разностной частоты (СРЧ). В результате СРЧ принимает вид непрерывной синусоиды без разрыва фазы в центре “зоны обращения”, т.е. происходит “сшивание” фазы СРЧ. Это позволяет выбирать длительность интервала анализа СРЧ исходя из условия минимума ОД. В работах [2, 3] для такого дальмера проведён подробный анализ методической погрешности измерения расстояния и влияния на неё нелинейности модуляционной характеристики передатчика. Причём в работе [3] рассмотрены два способа оценки частоты разностного сигнала:

- при подсчёте числа периодов СРЧ в течение фиксированного интервала времени  $T_{изм} = const$ ;

- при подсчёте числа периодов СРЧ в течение фиксированного количества  $N_{мод}$  периодов модуляции  $T_{мод}$  так, что  $T_{изм} = N_{мод} T_{мод}$ , с оценкой длительности получаемого интервала времени  $T_{изм}$ .

На конкретных числовых примерах показано, что второй способ эффективнее первого.

Эти результаты доказывают, что, используя традиционный счётный метод оценки разност-

ной частоты, можно в частотных дальномерам достаточно простыми средствами получить приемлемую методическую погрешность измерения расстояния.

Представляет теоретический и практический интерес исследовать влияние шума на погрешность измерения расстояния частотным дальномером. Влияние шума проявляется в виде двух эффектов. Первый заключается в возникновении погрешности счёта периодов СРЧ. Этот эффект в литературе исследован достаточно подробно [4], 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 связан с погрешностью в определении момента появления экстремума СРЧ, что приводит к погрешности “сшивания” фазы СРЧ. В [2] показано, как погрешность сшивания фазы СРЧ связана с погрешностью измерения расстояния. Поэтому достаточно рассмотреть характеристики погрешности определения момента “сшивания” фазы.

Применяя подход, рассмотренный в [2], можно получить формулы относительной погрешности определения расстояния, вызванной неточностью сшивания фазы СРЧ  $\Delta\varphi$ , необходимые для дальнейшего анализа, на основе первого способа оценки частоты:

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

где  $\Delta R$  - абсолютная погрешность измерения расстояния;  $\text{Int}[*]$  - функция вычисления целой части;  $N_{изм} = T_{изм}/(2T_3)$ ;  $T_3 = const$  - интервал времени между частотными метками [1], задаваемый постоянным в данном методе измерения;  $N_{T_{мод}}$  - число периодов СРЧ, подсчитанное в течение одного периода модуляции;  $\Delta F_{мин}$  - минимальное значение девиации частоты, возможное при изменении расстояния;  $x = R/\delta_{R_3}$  - относительное значение измеряемого расстояния;  $R$  - измеряемое расстояние;  $\delta_{R_3} = c/(4\Delta F_{мин})$  - ОД;  $c$  - скорость распространения электромагнитной волны;

и второго способа оценки частоты:

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

Таким образом, целью данной работы является исследование влияния шума на одну составляющую погрешности измерения расстояния, вызванную погрешностью сшивания фазы.

Прежде чем оценить влияние шума, необходимо оговорить процедуру обработки СРЧ, позволяющую реализовать упомянутый выше алгоритм управления модуляцией со сшиванием фазы.

#### Анализ процедуры предварительной обработки СРЧ

В соответствии с [1] для реализации метода измерения необходимо определять и подсчитывать нули СРЧ (т.е. точки пересечения СРЧ с нулевым уровнем) и определять моменты экстремумов СРЧ для сшивания фазы. Будем считать, что на первом этапе обработки производится фильтрация с помощью узкополосного следящего фильтра смеси сигнала  $u(t)$  с нормальным белым шумом  $\xi(t)$ , имеющим нулевое математическое ожидание и энергетический спектр  $F(\omega) = 2N_0$ :

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

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 производятся 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.

В результате такой обработки характеристики входного шума изменятся. Считаем, что частотная характеристика  $H(\omega)$  узкополосного следящего фильтра, настроенного на частоту сигнала  $\omega_r$ , приближается к гауссовой кривой [5]:

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

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

После узкополосной фильтрации шум остаётся нормальным [5] с корреляционной функцией

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

и энергетическим спектром

$$F_\xi(\omega) = N_0 \left\{ \exp\left[-(\omega - \omega_r)^2/\beta^2\right] + \exp\left[-(\omega + \omega_r)^2/\beta^2\right] \right\}. \quad (4)$$

Обычно пренебрегают наличием слагаемого в области отрицательных частот [5] в формуле (4), полагая  $\omega_r \gg \beta$ . В случае измерения очень малых расстояний это соотношение не выполняется, поэтому далее необходимо учитывать оба слагаемых.

Из (3) при  $\tau = 0$  получаем выражение для дисперсии шума на выходе узкополосного следящего фильтра:

$$B_\xi(0) = N_0\beta/\sqrt{\pi}.$$

В результате дифференцирования полученного узкополосного процесса он по-прежнему остаётся нормальным с нулевым математическим ожиданием и корреляционной функцией, определяемой выражением [5]:

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

Отсюда получим:

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

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

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

Смещение  $\Delta t_i$  момента пересечения производной суммы СРЧ и шума нулевого уровня относительно момента  $t_i$  пересечения этого уровня только одной производной СРЧ найдем из уравнения:

$$\omega'(t_i) t_3 U_m \sin[\omega_0 t_3 + \omega(t_i + \Delta t_i) t_3] + \xi' = 0,$$

где  $U_m$  - амплитуда СРЧ;  $t_3$  - время задержки отражённого сигнала, поступающего на смеситель, относительно излучённого.

Точные моменты экстремумов СРЧ  $t_i$  находим из уравнения:

$$\sin[\omega_0 t_3 + \omega(t_i) t_3] = 0.$$

Моменты  $t_i$  повторяются с периодом СРЧ, но интерес представляют не их абсолютные значения, а характеристики смещения, вызванные присутствием шума.

В предположении малости уровня шума по сравнению с  $U_m$  можем в каждой точке  $t_i$  заменить функцию  $\sin(x)$  степенным рядом Тейлора, оставив в нём одно слагаемое и считая, что ЧМ осуществляется по линейному закону, после простых преобразований получить:

$$\Delta t_i = \xi'_i T_3^2 / (U_m x^2 \pi^2). \quad (6)$$

Из (6) ясно, что закон распределения плотности вероятности смещения момента “сшивания” фазы СРЧ является нормальным с нулевым математическим ожиданием и корреляционной функцией:

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

Отсюда при  $\tau = 0$  получаем дисперсию момента “сшивания” фазы СРЧ:

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

где  $q^2 = U_m^2 / [2B_{\xi}(0)]$  - отношение сигнал-шум.

Теперь найдём дисперсию соответствующей фазовой ошибки:

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

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 пре-

вышение наблюдается, происходит перескок момента “сшивания” фазы СРЧ на соседний экстремум, т.е. изменяется число нулей в периоде модуляции. Найдём из условия  $3\sigma_{1\Delta\phi} \leq \pi/2$  диапазон граничных значений величины  $q$ , при которых это событие ещё не возникает в диапазоне расстояний от  $\delta_{R_3}$  до  $\infty$ :

$$q \geq 3\sqrt{2} \sqrt{1 + 2/(\pi x^2)} / \pi = 1,727 \div 1,35. \quad (7)$$

Следовательно, можно с уверенностью утверждать, что если отношение сигнал-шум превышает 5 дБ, то перескок момента “сшивания” фазы СРЧ не наблюдается. Нас интересуют гораздо более высокие значения  $q$ , поэтому явление перескока точки «сшивания» фазы СРЧ на соседний экстремум не учитываем.

### Шумовая погрешность измерения расстояния для первого способа оценки частоты

В связи с тем, что в каждом отдельном периоде дополнительных нулей СРЧ не возникает, изменение общего числа нулей в интервале измерения происходит только за счёт смещения границы последнего периода модуляции относительно границы интервала измерения за счёт смещения момента «сшивания» под влиянием шума. При этом изменяется количество нулей, попавших в этот интервал. Поэтому нельзя использовать формулу (1) в прямом виде. Теперь в этой формуле надо учитывать суммарный фазовый сдвиг, который изменяет число периодов СРЧ, уложившихся в остаток интервала измерения.

Исходя из этого выражение (1) можно переписать в виде:

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

где  $\varphi_{\Sigma}$  - суммарный фазовый сдвиг правой границы последнего периода модуляции в интервале измерения за счёт фазовой ошибки на границе каждого полупериода модуляции, т.е.

$$\varphi_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{2K} \Delta\phi_i. \quad (9)$$

Для оценки влияния шума на погрешность измерения расстояния, обусловленного случайным характером моментов “сшивания” фазы СРЧ, необходимо учитывать, что шумовые отсчёты, рассматриваемые в соседние моменты “сшивания” фазы, являются коррелированными. Очевидно [5], что закон распределения  $\varphi_{\Sigma}$  оста-

ётся нормальным с нулевым математическим ожиданием и дисперсией:

$$\sigma_{\varphi_{\Sigma}}^2 = \sum_{l=1}^{2K} \sum_{k=1}^{2K} \sigma_{\Delta\varphi l} \sigma_{\Delta\varphi k} r_{lk},$$

где  $\sigma_{\Delta\varphi l}$ ,  $\sigma_{\Delta\varphi k}$  - соответственно СКО ошибки “сшивания” фазы СРЧ в моменты времени  $lT_{\vartheta}$ ,  $kT_{\vartheta}$  и  $r_{lk}$  - коэффициент корреляции между значениями ошибки “сшивания” фазы в эти моменты времени.

Теперь можем записать:

$$\sigma_{\varphi_{\Sigma}}^2 = \frac{K}{q^2} \left( 1 + \frac{2}{\pi x^2} \right) \left[ 1 + \frac{1}{2K} \sum_{k=1}^{2K} \overline{B}_{\xi'} \left( \frac{kT_{\text{мод}}}{2} \right) \right], \quad (10)$$

где  $\overline{B}_{\xi'}(\tau) = B_{\xi'}(\tau)/B_{\xi'}(0)$ .

При нахождении дисперсии погрешности измерения расстояния для первого способа оценки частоты необходимо учитывать, что по формуле (8) осуществляется нелинейное преобразование нормально распределённой случайной величины  $\varphi_{\Sigma}$  с дисперсией, задаваемой формулой (10). Нелинейность задаётся функцией  $\text{Int}^*$ , имеющей вид ступенчато нарастающей линии при увеличении  $\varphi_{\Sigma}$ . В этом случае изменение значения измеряемого расстояния в результате погрешности “сшивания” под влиянием шума происходит только после того, как сумма в (8) превысит значение, кратное  $\pi$ . В промежутке между этими моментами изменения результатов измерения не происходит. Учитывая, что математическое ожидание суммарного фазового отклонения (9) равно нулю, относительную дисперсию  $\sigma_{1\Delta R}^2/\delta_{R_{\vartheta}}^2$  результата измерения расстояния на основе первого способа измерения частоты можно найти путём суммирования дискретных значений отклонений расчёта по формуле (8) с весами, равными вероятности нахождения суммы (9) в соответствующем интервале значений фазового сдвига:

$$\sigma_{1R}^2/\delta_{R_{\vartheta}}^2 = \frac{1}{N_{\text{изм}}^2} \sum_{L_{\text{мин}}}^{L_{\text{макс}}} L^2 \{F[(L+1)\pi] - F[L\pi]\}, \quad (11)$$

где  $L_{\text{мин}} = \text{Int}\{\phi_0 - 3\sigma_{\Delta\varphi}/\pi\} - \text{Int}\{\phi_0\}$ ;

$$\phi_0 = N_{\text{изм}} / [1/x + x/(2\Delta F_{\text{мин}} T_{\vartheta} N_{T_{\text{мод}}})] + 0.5;$$

$L_{\text{макс}} = \text{Int}\{\phi_0 + 3\sigma_{\Delta\varphi}/\pi\} - \text{Int}\{\phi_0\} + 1$ ;  $F^*$  - интегральная функция нормального закона распределения вероятностей,  $\sigma_{\Delta\varphi}^2$  определена в (10).

Видно, что дисперсия погрешности измерения в этом случае сложным образом зависит от  $N_{\text{изм}}$  (т.е. от длительности интервала измерения).

Важным является тот факт, что даже при очень малом уровне шума возможно изменение числа нулей СРЧ в интервале измерения. Это происходит на тех дальностях, при которых правая граница интервала анализа приближается к положению одного из нулей СРЧ. Малейший шум, изменяющий длительность периода модуляции, смещает эту границу, изменяя тем самым число нулей СРЧ на единицу. Следовательно, при изменении расстояния существуют зоны, в которых возникает большая ошибка. При малых шумах между ними существуют интервалы дальности, в которых дополнительная погрешность, вызванная неточностью «сшивания», не возникает. Ширина и количество таких зон зависят от уровня шума. При достаточно большом уровне шума все зоны сливаются в одну. При этом от уровня шума зависит величина погрешности определения числа нулей СРЧ. Таким образом, зависимость погрешности измерения (11) от дальности носит характер сложной дискретной функции. Поэтому для оценки качества алгоритма обработки формула (11) неудобна. Используем для этой цели результат усреднения погрешности на некотором интервале расстояний. Величину интервала усреднения можно выбрать равной ОД, так как именно с таким шагом происходит изменение числа нулей СРЧ при изменении расстояния. Для расчётов на компьютере соотношение запишем в дискретной форме, где в явном виде учитываем зависимость погрешности от расстояния:

$$\sigma_{1cp}^2(R_{cp i})/\delta_{R_{\vartheta}}^2 = \sum_{k=0}^{N_R-1} \sigma_{1\Delta R}^2(R_{ki}) / (N_R \delta_{R_{\vartheta}}^2), \quad (12)$$

где  $R_{cp i} = 0.5(2i+1)\delta_{R_{\vartheta}}$ ,  $i = 1, 2, \dots$ ;

$R_{ki} = (i + k/N_R)\delta_{R_{\vartheta}}$ ,  $N_R$  - число учитываемых точек дальности на участке длиной  $\delta_{R_{\vartheta}}$ .

### Шумовая погрешность измерения расстояния для второго способа оценки частоты

Во втором способе оценки частоты при выполнении условия (7) дополнительные нули СРЧ в интервале измерения под влиянием шума не возникают. Погрешность измерения обусловлена изменением длительности интервала обработки, происходящей за счёт случайного изменения моментов “сшивания” фазы. В соответствии с выражением (2) относительную дисперсию погрешности измерения расстояния на основе второго способа измерения частоты  $\sigma_{2\Delta R}^2/\delta_{R_{\vartheta}}^2$  можем записать в виде:

$$\sigma_{2R}^2/\delta_{R_{\vartheta}}^2 = \frac{T_{\vartheta}^2}{[N_{\text{мод}}(\pi q T_{\text{мод}})^2]} \left[ 1 + \frac{2}{\pi x^2} \right] \times$$

$$\times \left[ 1 + \frac{\sum_{k=1}^{2N_{mod}} \overline{B}_{\xi'}(0,5kT_{mod})}{2N_{mod}} \right], \quad (13)$$

где

$$T_{mod} = 2T_{\varphi} \left[ 1 + \text{Int} \left( \frac{4R}{\lambda_{\varepsilon\theta}} \right) - \text{Int} \left( \frac{4R}{\lambda_{\varepsilon\eta}} \right) \right] \frac{\delta_R}{R} + 2t_3;$$

$\lambda_{\varepsilon\eta}$  и  $\lambda_{\varepsilon\theta}$  - длины волн сигнала, соответствующего нижней и верхней эталонным частотам.

### Количественная оценка шумовой составляющей погрешности измерения расстояния

Анализ формул (11) и (13) показывает, что при изменении расстояния погрешность измерения изменяется слабо. Результаты расчёта по формуле (12) для погрешностей (11) и (13) показаны на рис. 1 в виде зависимости логарифма относительного СКО погрешности измерения от измеряемого расстояния при  $q = 40$  дБ. Причём для второго способа построены два графика при  $N_{mod} = 0.5$  (оценка за один период) и  $N_{mod} = 50$ . Для первого способа оценки частоты график соответствует  $N_{изм} = 50$ .

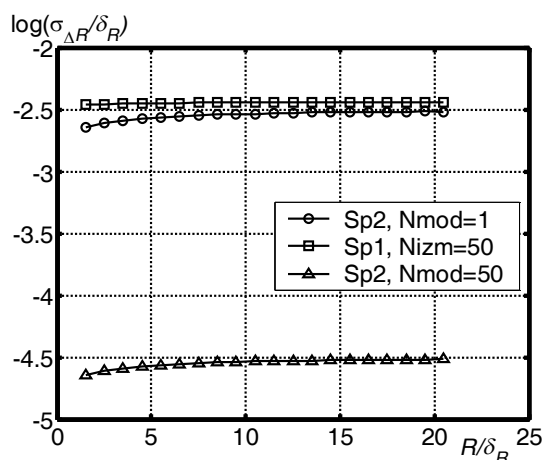


Рис. 1. Зависимость логарифма относительного СКО погрешности измерения от нормированного расстояния

Видно, что для первого способа оценки частоты погрешность практически не изменяется при изменении расстояния. У второго способа оценки частоты изменение погрешности при изменении расстояния имеется, но незначительное, и им можно пренебречь.

Более интересной является зависимость погрешности измерения от уровня шума. При этом целесообразно сравнить между собой два способа оценки частоты, и оба из них сравнить с известной границей Крамера-Рао [5 - 7].

Применительно к нашей задаче необходимо использовать формулу для дисперсии оценки частоты радиоимпульса при известной фазе сигнала [7]. Для каждого из двух рассмотренных выше способов оценки частоты можно записать нижние границы относительной дисперсии оценки расстояния:

- первый способ оценки частоты

$$\sigma_{1R_{мин}}^2 / \delta_{R\varepsilon}^2 = 3 / (2\pi q N_{изм})^2;$$

- второй способ оценки частоты

$$\sigma_{2R_{мин}}^2 / \delta_{R\varepsilon}^2 = \frac{3}{\left\{ (2\pi q N_{mod})^2 \left[ \frac{2N_{T_{mod}}}{x} + \frac{x}{(\Delta F_{мин} T_{\varphi})} \right]^2 \right\}}.$$

На рис. 2 приведены графики зависимости логарифма относительного СКО измерения расстояния от отношения сигнал-шум, построенные по формуле (12) с учётом (11) и (13) при указанных выше параметрах обработки и  $2\Delta F_{мин} T_{\varphi} = 5000000$  (сплошные линии), и нанесены соответствующие границы Крамера-Рао (пунктирные линии).

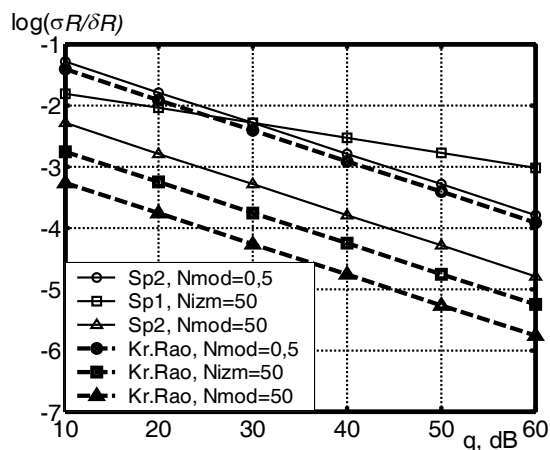


Рис. 2. Зависимость логарифма относительного СКО погрешности измерения от отношения сигнал-шум

Видно, что первый способ измерения разностной частоты при  $N_{изм} = 50$  обеспечивает график зависимости с меньшим наклоном, чем второй способ. Поэтому при некотором отношении сигнал-шум он пересекает график, соответствующий второму способу оценки разностной частоты, в течение одного полупериода модуляции. Следовательно, первый способ оценки частоты, используемый в режиме “сшивания” фазы СРЧ, совершенно не эффективен. Это подтверждается и соотношением между ним и соответствующей ему границей Крамера-Рао. По рис. 2 видно, что эти графики разнесены очень далеко. Граница Крамера-Рао ниже погрешности перво-

го метода более чем на порядок. Второй способ оценки разностной частоты более эффективен. Даже при оценке частоты только в течение одного полупериода модуляции, начиная с некоторого отношения сигнал-шум, он обеспечивает меньшую погрешность измерения, чем первый способ. Удлинение интервала измерения за счёт увеличения числа обрабатываемых полупериодов модуляции  $N_{mod}$  приводит к существенному снижению погрешности измерения.

### Результаты компьютерного моделирования процедуры обработки СРЧ

При моделировании влияния шума количественной характеристикой погрешности измерения являлась усреднённая в соответствии с выражением (12) величина относительного СКО. Для получения статистически достоверных результатов производилось многократное повторение расчётов для каждого отношения сигнал-шум и для каждой точки измеряемого расстояния. Усреднение по ансамблю расстояний производилось, как и ранее, в пределах одной дискретной ошибки.

Моделирование производилось при величине диапазона перестройки частоты  $\Delta F_{min} = 500$  МГц, что соответствует  $\delta_{R_0} = 0,15$  м. Шаг по расстоянию равнялся 1 мм, т.е. усреднялось 150 точек расстояния. В каждой точке расчёт повторялся 100 раз для разных реализаций шума, но неизменном его уровне. В результате доверительный интервал данной процедуры моделирования на графике практически незаметен, так как он сливается с самим графиком. Формирование требуемого количества отсчётов белого нормального шума с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией производилось программой `randn(*)` из пакета MATLAB 6.5. Далее отсчёты шума умножались на величину, обеспечивающую получение заданного отношения сигнал-шум и использовались для расчётов, необходимых по алгоритмам обработки сигнала.

Результаты моделирования, аналогичные представленным на рис. 2, показаны на рис. 3.

Видно хорошее совпадение результатов моделирования с теоретическими результатами и подтверждение всех качественных и количественных свойств рассматриваемого метода обработки.

### Выводы

Полученные соотношения позволяют производить количественную оценку влияния шума на погрешность измерения расстояния дальномером с адаптивной частотной модуляцией в различных практических ситуациях.

Величина шумовой составляющей погрешности становится соизмеримой с величиной методической погрешности [3] уже при уровне шума не более 30 дБ.

Второй способ оценки разностной частоты менее чувствителен к влиянию шума и при уровне шума менее 30 дБ позволяет получить меньшую погрешность измерения даже в случае, когда в качестве измерительного интервала используется всего половина периода модуляции.

Второй способ оценки разностной частоты позволяет добиться желаемого уровня погрешности измерения за счёт выбора интервала обработки СРЧ.

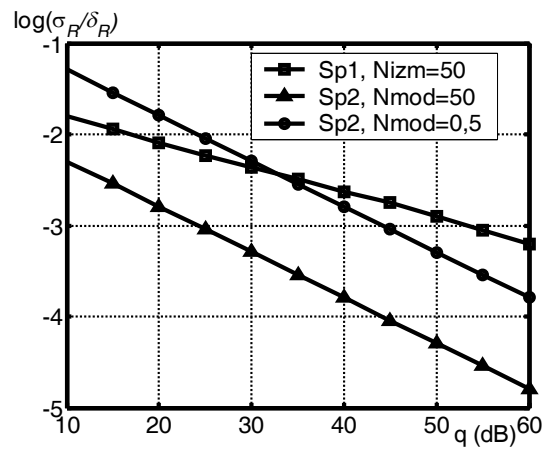


Рис. 3. Зависимость логарифма относительного СКО погрешности измерения от отношения сигнал-шум

### Библиографический список

1. Пат. РФ № 2151408 Радиолокационный дальномер / Б.А. Атаянц, В.А. Болонин, В.В. Езерский, Б.В. Кагаленко, А.И. Смутов. Оpubл. 20.06.2000 г. Бюл. № 17.
2. Езерский В.В., Кагаленко Б.В., Болонин В.А. Адаптивный частотно-модулированный уровеньмер. Анализ составляющих погрешности измерения // Датчики и системы. - 2002. - № 7. - С. 44.
3. Езерский В.В. Анализ методической погрешности дальномером с адаптивной частотной модуляцией для систем ближней радиолокации // Вестник РГРТА. Рязань, 2004. - Вып. 15. - С.40 - 45.
4. Тихонов В.И. Выбросы случайных процессов. - М.: Наука, 1970. - 392 с.
5. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники: В трёх кн. Кн. первая. Изд. 2-е, перераб. - М.: Сов. Радио, 1974. - 552 с.
6. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. - М.: Радио и связь, 1991. - 608 с.
7. Тихонов В.И. Оптимальный приём сигналов. - М.: Радио и связь, 1983. - 320 с.