

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ФАЗОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛОВ, НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ РАЗНОСТЕЙ ПСЕВДОФАЗ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Дубровин А.В.

ЗАО «Радий ТН», dubrovin@radiytn.ru

При разработке аппаратуры, в которой используется когерентный прием сигналов (в частности при разработке пеленгационной аппаратуры, при создании фазированных антенных решеток и т. д.) достаточно острым является вопрос юстировки каналов с целью дальнейшей компенсации систематических ошибок. В [1] был синтезирован алгоритм одноэтапного оценивания координат источников радиоизлучений. Одним из важных следствий, вытекающих из общих результатов, полученных в [1], является возможность измерения фазовой задержки (под фазовой понимается задержка, соизмеримая с периодом узкополосного сигнала), используя оптимальный (максимально правдоподобный) алгоритм. При построении когерентных систем часто возникает потребность в выравнивании каналов по сигналам излучателей с известными координатами и как следствие создающими в радиоприемных трактах воздействия с известными фазовыми задержками. В процессе отладки аппаратуры часто возникают ситуации для анализа которых требуется имитационное моделирование на ЭВМ. Вполне приемлемой моделью входного воздействия (на основании практических исследований автора), позволяющей понять суть происходящих в приемных трактах процессов, является модель узкополосного гауссовского сигнала $s(t)$, наблюдаемого на фоне гауссовского шума $\xi(t)$

$$\begin{aligned} u_1(t) &= a_1 s(t) + \xi_1(t), \\ u_2(t) &= a_2 s(t-D) + \xi_2(t), \end{aligned}$$

где $u_i(t)$ – суммарный сигнал на входе i -го канала; a_i – амплитудный множитель ($i=1,2$); $D=\tau+\chi$; τ – задержка между сигналами, поддающаяся расчету; χ – систематическая ошибка, которую необходимо оценить.

Используя результаты, полученные в [1] можно предложить правило измерения задержки между двумя стохастическими сигналами

$$D = -\Phi_{21}/2\pi f_0, \text{ где} \quad (1)$$

$$\Phi_{21} = \arctan \left\{ \int_{f_1}^{f_2} |U_2(f)| |U_1(f)| \sin(\varphi_2(f) - \varphi_1(f)) df, \int_{f_1}^{f_2} |U_2(f)| |U_1(f)| \cos(\varphi_2(f) - \varphi_1(f)) df \right\} - \text{разность}$$

«псевдофаз» между сигналами 2-го и 1-го каналов; $\varphi_i(f) = \arctan \{ \text{Im}(U_i(f)), \text{Re}(U_i(f)) \}$ – фазочастотная характеристика сигнала в i -м канале; $\arctan(b,c) = \arctg(b/c)$ при $c > 0$; $\arctan(b,c) = \arctg(b/c) + \text{sign}(b) \frac{\pi}{2}$ при $c < 0$;

$\text{sign}(b) = 1$ (-1) при $b > 0$ ($b < 0$); $\arctan(b,0) = \text{sign}(b) \frac{\pi}{2}$ ($b \neq 0$); $\arctan(0,0) = 0$; f_0 – центральная частота сигнала; f_1 и f_2 – соответственно нижняя и верхняя частоты расположения сигнала ($f_0 = (f_2 + f_1)/2$).

Предлагаемый метод имеет ряд преимуществ перед корреляционным методом измерения фазовой задержки между сигналами, заключающиеся в следующем. Во-первых, измерение задержки производится в явном виде, во-вторых, при анализе сигналов как правило оперируют с отсчетами в частотной области и предлагаемое правило не требует операции обратного преобразования Фурье.

Граница Крамера-Рао ошибок измерения фазовой задержки при определенных допущениях выглядит следующим образом [1]

$$\sigma_D^2 = \frac{1 + 2q}{16\pi^2 T_H f_0^2 \Delta_f q^2},$$

(2)

где T_H – время наблюдения; $\Delta_f = (f_2 - f_1)/2$ – половина ширины спектра сигнала; $q = aG_s/G_\xi$ – отношение сигнал/шум; G_s, G_ξ – спектральные плотности мощности сигнала и шума соответственно (предполагается, что $G_s(f)$ и $G_\xi(f)$ являются равномерными в полосе частот $f_0 \pm \Delta_f$, и $a_1 = a_2 = a$).

Для пояснения термина «фазовая задержка» на рис. 1 представлена зависимость разности фаз от частоты при отсутствии шума для следующих исходных данных: ширина полосы сигнала $2\Delta_f = 40$ кГц, $f_0 = 50$ МГц; $T_H = 6.5$ мс. По оси ОХ данные представлены в Герцах, по оси ОУ – в градусах. Как видно из рисунка изменение фазы происходит буквально в пределах долей градуса.

На рис. 2 изображен тот же случай, но при наличии шума, причем отношение сигнал/шум q равно 20 дБ.

Выражение (1) рассматривает, наклонную прямую, изображенную на рис. 1 в виде горизонтальной прямой. Это позволяет извлечь полезную информацию из достаточно сильно зашумленной картинки, представленной на рис.2.

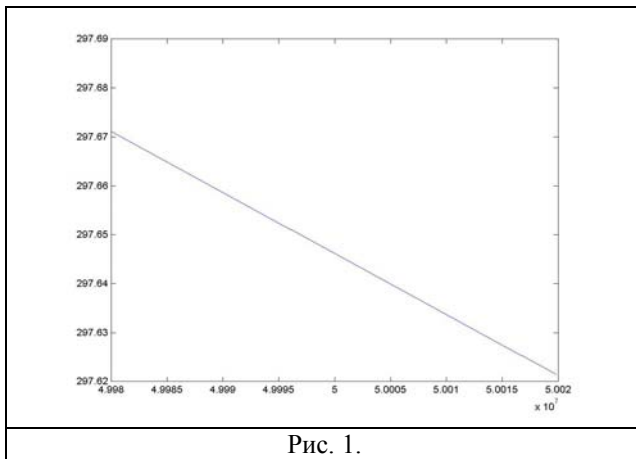


Рис. 1.

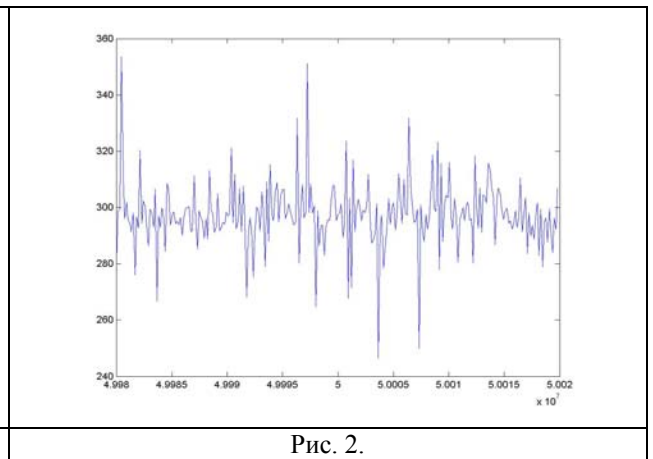


Рис. 2.

Насколько справедливо подобного рода допущение может продемонстрировать моделирование на ПЭВМ.

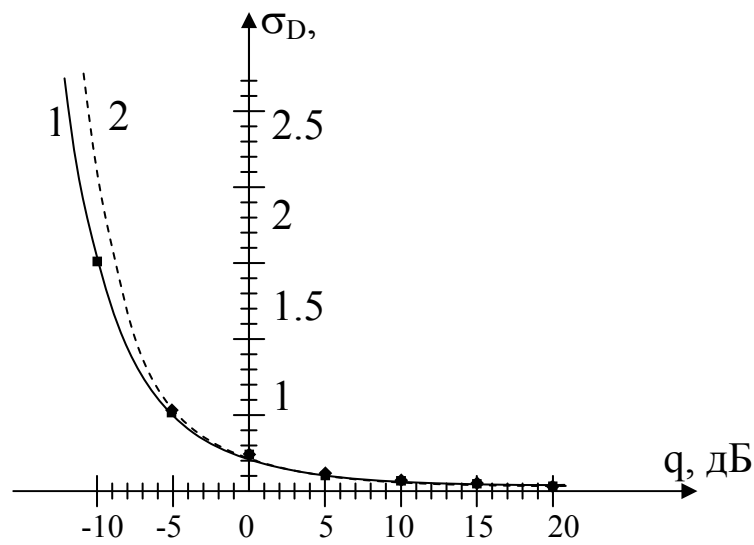


Рис. 3.

Здесь сплошной линией изображена кривая, рассчитанная в соответствии с (2), пунктирной линией изображена кривая, полученная на основе результатов моделирования на ПЭВМ. Как видим, для выбранного случая нижнее значение, при котором результаты моделирования фактически совпадают с нижней границей Крамера-Рао составляет -5 дБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубровин А. В., Сосулин Ю. Г. Одноэтапное оценивание местоположения источника радиоизлучения пассивной системой, состоящей из узкобазовых подсистем // Радиотехника и электроника, 2003, №11.