

УДК 520.8

ОЦЕНКА ФЛЮКТУАЦИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ РАЗНОСТИ МГНОВЕННЫХ ЧАСТОТ СИГНАЛОВ ИНТЕРФЕРОМЕТРА

© А.И. Гончар, О.С. Голод, А.В. Куница, Л.И. Шлычек, 2008

Научно-технический центр панорамных акустических систем НАН Украины, г. Запорожье

В статті отримано енергетичний спектр флуктуацій відмінності миттєвих частот сигналів, прийнятих антенами інтерферометра.

В статье получен энергетический спектр флуктуаций разности мгновенных частот сигналов, принятых антеннами интерферометра.

In the article power spectrum of instantaneous frequencies fluctuation of the signals, which were received by interferometer array was obtained.

ИНТЕРФЕРОМЕТР, ФЛЮКТУАЦИЯ, ДОННАЯ РЕВЕРБЕРАЦИЯ, МГНОВЕННАЯ ЧАСТОТА, КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР.

В работе [1] рассмотрена возможность повышения информативности интерферометра с большой базой путём измерения и обработки разности мгновенных частот сигналов донной реверберации, принятых двумя антеннами интерферометра.

Оценим флюктуационную составляющую разности мгновенных частот. В большинстве случаев сигнал донной реверберации представляет собой узкополосный гауссов процесс, спектр которого соответствует спектру излучаемого интерферометром зондирующего импульса, т.е. сигнал донной реверберации можно представить в виде:

$$U(t) = A(t)\cos[\omega_0 t + \varphi(t)],$$

где $A(t)$ – мгновенная амплитуда реверберации,

ω_0 – средняя частота,

$\varphi(t)$ – мгновенная фаза реверберации.

Корреляционная функция $B(\tau)$ такого сигнала определяется соотношением:

$$B(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} G(\omega) \cos \omega \tau d\omega, \quad (1)$$

где $G(\omega)$ – огибающая спектра зондирующего импульса интерферометра.

Для упрощения дальнейших выкладок введём некоторую аппроксимацию – будем считать спектр $G(\omega)$ идеально прямоугольным с шириной спектра $\Delta\omega_n$ и центральной частотой ω_0 , тогда

$$B(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega_0 + \Delta\omega) \cos(\omega_0 + \Delta\omega) \tau d\Delta\omega. \quad (2)$$

Аналогичные вычисления проведены в [2], где получено

$$B(\tau) = \sigma^2 R_0(\tau) \cos \omega_0 \tau, \quad (3)$$

где $R_0(\tau) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega_0 + \Delta\omega) \cos \Delta\omega \tau d\Delta\omega$ – коэффициент корреляции,

$$R_0(\tau) = \frac{\sin \frac{\Delta\omega_n \tau}{2}}{\frac{\Delta\omega_n \tau}{2}},$$

σ^2 – дисперсия процесса.

Мгновенная частота сигнала $\Delta\omega(t)$ определяется как

$$\omega(t) = \omega_0 + \frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega_0 + \Delta\omega(t), \quad (4)$$

$$\Delta\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}.$$

Общее выражение для функции корреляции мгновенной частоты узкополосного процесса $B_\omega(\tau)$ имеет вид [3]:

$$B_\omega(\tau) = \frac{1}{2} [\dot{R}_0^2(\tau) - \ddot{R}_0(\tau) R_0(\tau)] \left[1 + \frac{R_0^2(\tau)}{2} + \frac{R_0^4(\tau)}{3} + \dots \right] =$$

$$- \frac{1}{2} [\dot{R}_0^2(\tau) - \ddot{R}_0(\tau) R_0(\tau)] \frac{\ln[1 - R_0^2(\tau)]}{R_0^2(\tau)}, \quad (5)$$

где $\dot{R}_0(\tau) = \frac{dR_0(\tau)}{d\tau}$;

$$\ddot{R}_0(\tau) = \frac{d^2 R_0(\tau)}{d\tau^2}.$$

$B_\omega(\tau)$ – функция корреляции мгновенной частоты сигнала $U(t)$.

Используя принятое выше допущение о прямоугольной аппроксимации спектра сигнала, можно получить приближённое выражение для корреляционной функции мгновенной частоты сигнала донной реверберации.

Для чего найдём:

$$\dot{R}_0(\tau) = \frac{dR_0(\tau)}{d\tau} = \frac{\Delta\omega_n}{2} \left[\frac{\cos \frac{\Delta\omega_n \tau}{2}}{\frac{\Delta\omega_n \tau}{2}} - \frac{\sin \frac{\Delta\omega_n \tau}{2}}{\left(\frac{\Delta\omega_n \tau}{2}\right)^2} \right],$$

$$\ddot{R}_0(\tau) = \frac{d^2 R_0(\tau)}{d\tau^2} = \frac{\Delta\omega_n^2}{4} \left\{ -2 \frac{\cos \Delta\omega_n \tau}{\left(\frac{\Delta\omega_n \tau}{2}\right)^2} - \left[1 - \frac{2}{\left(\frac{\Delta\omega_n \tau}{2}\right)^2} \right] \frac{\sin \frac{\Delta\omega_n \tau}{2}}{\frac{\Delta\omega_n \tau}{2}} \right\}.$$

Разложим $\ddot{R}_0(\tau)$ в ряд и ограничимся двумя членами, тогда

$$\ddot{R}(\tau) \approx -\frac{\Delta\omega_n^2}{12} + \frac{\Delta\omega_n^3}{48} \tau,$$

и соотношение (5) можно представить в виде:

$$B_\omega(\tau) \approx \frac{\Delta\omega_n^2}{12} [0,5R_0^2(\tau) + 0,65R_0^6(\tau) + 0,33R_0^{12}(\tau)]. \quad (6)$$

Формула (6) является приближением и её нельзя использовать для оценки дисперсии процесса, т.е. при $\tau = 0$.

Найдём корреляционную функцию разности мгновенных частот $B_{\omega T}(\tau)$ сигналов, принятых антеннами интерферометра. Анализ проведём для случая, когда расстояние d между антеннами много меньше пространственной длительности импульса, т.е. при $d \ll c \tau$, в этом случае можно считать сигналы на входах обеих антенн идентичными по форме и отличающимися только временным сдвигом T .

Для интерферометра

$$T = \frac{d}{c} \sin \alpha, \quad (7)$$

где d – размер базы интерферометра;

c – скорость распространения волн в среде;

α - угол визирования рассеивающего в данный момент элемента дна, относительно оси антенной системы.

Корреляционная функция разности мгновенных частот $B_{\omega T}(\tau)$ сигналов на входах антенн интерферометра для рассматриваемого случая может быть определена как [3]:

$$B_{\omega T}(\tau) = 2B_{\omega}(\tau) - B_{\omega}(\tau + T) - B_{\omega}(\tau - T), \quad (8)$$

где T – временной сдвиг между сигналами на разных антеннах интерферометра;

$B_{\omega}(\tau)$ - корреляционная функция, определяемая соотношением (6).

Подставив в (8) значение $B_{\omega}(\tau)$ можно найти $B_{\omega T}(\tau)$.

При построении устройств обработки информации часто удобнее пользоваться понятиями не корреляционных функций, а энергетических спектров. Для расчёта энергетического спектра $F_{\omega T}(\omega)$ разности мгновенных частот воспользуемся соотношением [3]:

$$F_{\omega T}(\omega) = 4 \sin^2 \frac{\omega T}{2} F_{\omega}(\omega), \quad (9)$$

где $F_{\omega}(\omega)$ – энергетический спектр мгновенной частоты.

Для нахождения энергетического спектра $F_{\omega}(\omega)$ мгновенной частоты донной реверберации, выполнив преобразование Фурье корреляционной функции $B_{\omega}(\tau)$ по соотношению (6), получим:

$$F_{\omega}(\omega) \approx \frac{\Delta\omega_n}{4} \left[\frac{\pi}{2} \frac{\Delta\omega_n - \omega}{\Delta\omega_n} + \sqrt{\pi} e^{-\left(\frac{\omega}{\Delta\omega_n}\right)^2} + \sqrt{\frac{\pi}{2}} e^{-\frac{\omega^2}{2\Delta\omega_n^2}} \right]. \quad (10)$$

Откуда энергетический спектр $F_{\omega T}(\omega)$ флюктуаций разности мгновенных частот сигналов, принятых антеннами интерферометра, запишем в виде:

$$F_{\omega T}(\omega) \approx \Delta\omega_n \sin^2 \left(\frac{\omega d}{2c} \sin \alpha \right) \left[\frac{\pi}{2} \frac{\Delta\omega_n - \omega}{\Delta\omega_n} + \sqrt{\pi} e^{-\left(\frac{\omega}{\Delta\omega_n}\right)^2} + \sqrt{\frac{\pi}{2}} e^{-\frac{\omega^2}{2\Delta\omega_n^2}} \right]. \quad (11)$$

Из полученного соотношения очевидно, что уровень флюктуационной составляющей разности мгновенных частот сигналов интерферометра зависит и от параметров зондирующего импульса, и от мгновенного положения разрешаемой площадки дна относительно оси антенны. Поэтому оптимизацию геометрических и акустических

характеристик интерферометра необходимо выполнить применительно к каждой конкретной задаче.

На рис. 1 представлен спектр флюктуаций разности мгновенных частот (11) рассчитанный для интерферометра с рабочей частотой $f = 300$ кГц и базой $d = 15$ длин волн при угле визирования $\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ соответственно, нормированной частоте $\frac{\omega}{\Delta\omega_n} = 0.1; 0.2; 0.4; \dots 2$ и величине $\frac{d}{c} = 0.00005$. На рис. 2 построена зависимость энергетического спектра флюктуаций разности мгновенных частот от угла визирования, в данном случае $\alpha \in \left[0; \frac{\pi}{2}\right]$ при фиксированной нормированной частоте $\frac{\omega}{\Delta\omega_n} = 1$.

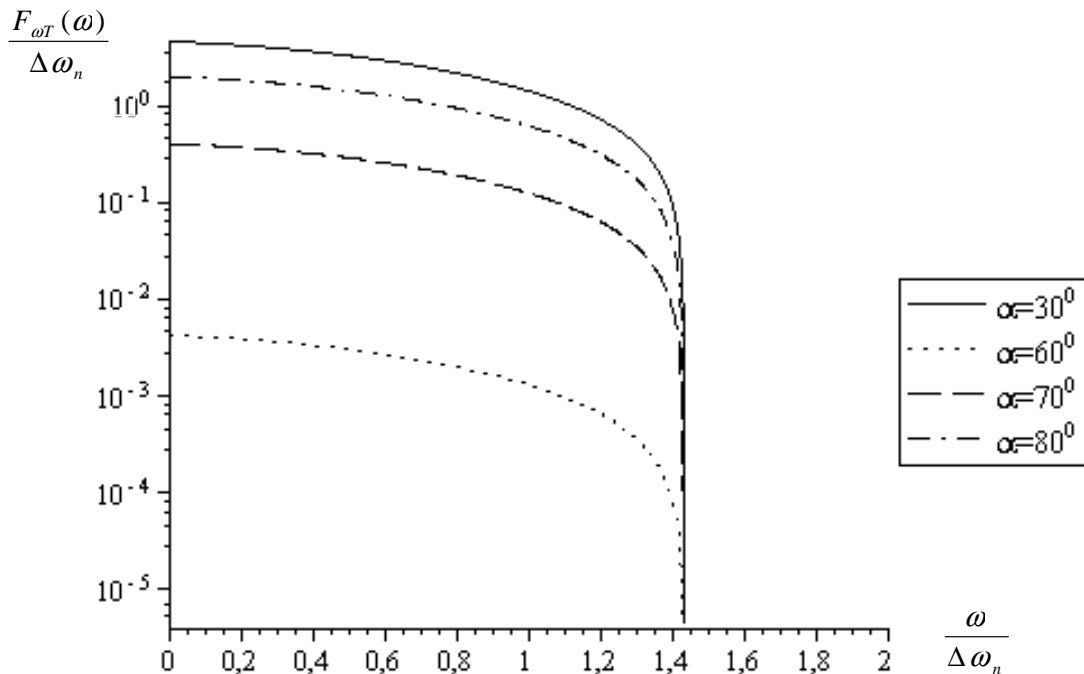


Рис. 1 - Спектр флюктуаций разности мгновенных частот $\frac{F_{\omega T}(\omega)}{\Delta\omega_n}$ при $\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ в логарифмическом масштабе по вертикали

Из рис. 1 видно, что при нормированной частоте $\frac{\omega}{\Delta\omega_n} \approx 1,432$ для любого угла визирования α энергетический спектр флюктуаций разности мгновенных частот равен нулю и с последующим увеличением нормированной частоты энергетический спектр принимает отрицательные значения. Поэтому, для практических целей следует рассматривать его абсолютное значение.

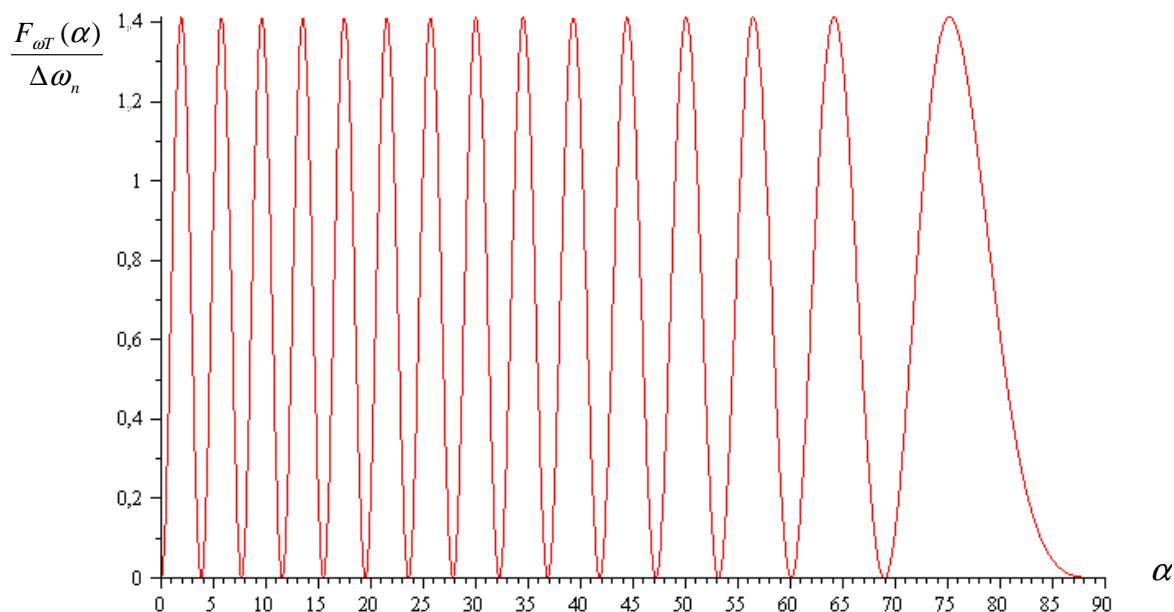


Рис. 2 - Зависимость энергетического спектра флуктуаций разности мгновенных частот $\frac{F_{\omega}(\alpha)}{\Delta\omega_n}$ от угла визирования α при фиксированной нормированной частоте $\frac{\omega}{\Delta\omega_n} = 1$

Из рис. 2, где изображена зависимость энергетического спектра от угла визирования α при фиксированной нормированной частоте $\frac{\omega}{\Delta\omega_n} = 1$, следует, что при увеличении угла визирования множество спектров флуктуаций разности мгновенных частот при фиксированной нормированной частоте возрастает и убывает с меньшей скоростью, а также оно имеет одинаковые значения максимумов и одинаковые значения минимумов, причем для каждой нормированной частоты будут свои значения максимумов и минимумов.

Литература

1. Воронова Л.Г., Гончар Ю.А., Голод О.С., Шлычек Л.И. Измерение угла падения луча в интерферометре // Гидроакустический журнал (проблемы, методы и средства исследований мирового океана): Сборник научных работ Научно-технического центра панорамных акустических систем НАН Украины. – Запорожье, 2008. – С. 204-211
2. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника: Изд. «Сов. Радио», 1967
3. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники М. Сов. Радио, 1974