

УДК 621.396.628 : 523.164

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗОВОЙ СТАБИЛЬНОСТИ НЕЗАВИСИМЫХ ГЕТЕРОДИНОВ

Ю. П. Кузнецов, Т. Г. Кузнецова, Ю. А. Кухаренко, А. Н. Шамшев

Декорреляция сигналов в приемных пунктах радиоинтерферометра независимого приема, приводящая к снижению потенциальных возможностей интерферометра, определяется в значительной степени нестабильностью фазы гетеродинов. Предлагается критерий и методика измерения фазовой стабильности, определяющие интегральный эффект декорреляции сигналов в течение сеанса наблюдения. Нестабильность фазы оценивается методами теории статистических решений с учетом специфики обработки сигналов радиоинтерферометра (при обработке производится поиск по частоте интерференции).

Выходным эффектом радиоинтерферометра с независимым приемом [1-6] является функция взаимной корреляции сигналов на выходе приемных устройств с несинхронизированными гетеродинами. Нестабильность фаз вызывает уменьшение степени корреляции сигналов, что ограничивает время непосредственного усреднения сигнала. Это в конце концов приводит к ограничению чувствительности и разрешающей способности интерферометра.

В аппаратуре приемных пунктов фазовая нестабильность создается, в основном, нестабильностью разности фаз независимых гетеродинов. Для выявления потенциальных возможностей интерферометра необходимо оценить влияние фазовой стабильности гетеродинов на степень корреляции сигналов и определить допустимую длительность наблюдения, исходя из ограничения со стороны фазовой стабильности.

Для количественных оценок необходимо сформулировать критерий фазовой стабильности, т. е. выделить параметры, наиболее полно характеризующие указанную стабильность, и определить методику их измерения. Общеупотребительного критерия фазовой стабильности не существует. Сводка основных критериев фазовой стабильности приводится в таблице, составленной по материалам [2, 4, 6]. Некоторые критерии создавались применительно к конкретным задачам и, естественно, не могли учитывать специфики радиоинтерферометров с независимым приемом. Кроме того, в ряде случаев величина декорреляции сигнала связана нелинейной зависимостью с величиной разности фаз гетеродинов, что необходимо отразить при оценке фазовой стабильности.

Требования к критерию фазовой стабильности гетеродинов можно определить исходя из особенностей работы радиоинтерферометра с независимым приемом.

1. Численная оценка по критерию должна определять изменение выходного эффекта интерферометра за счет влияния фазовой нестабильности.

2. Критерий должен учитывать проведение в процессе обработки операций поиска и последующего учета разности частот гетеродинов. Поэтому должны учитываться только остаточные фазовые вариации по-

Критерии оценки фазовой стабильности гетеродинов радиоинтерферометров с независимым приемом

Номер критерия	Параметр, по которому оценивается фазовая стабильность	Процедура измерения параметра	Количественная характеристика оценки нестабильности фазы	Примечания	Литература
1	Отклонение фазы $\Delta\varphi(T)$, накопленной генератором за интервал T	1. $\Delta\varphi(T) = \Phi(t) - \Phi(t - T) - \omega_0 T$ 2. $\Delta\omega(T) = \frac{\Delta\varphi(T)}{T}$, 3. $\sigma_{\Delta\varphi}(T) = T\sigma_{\Delta\omega}(T)$	$\overline{\Delta\varphi^2(T)}$	Для разных T	[4]
2	Разность фаз $\Delta\varphi(t)$ генераторов	$\Delta\varphi(T) = \Phi_1(t) - \Phi_2(t)$	$\Delta\varphi_{\max}$	В течение интервала	[3]
3	Отклонение фазы $\Delta\varphi_\tau$ от текущего значения, определяемого средней частотой ω_0 (на интервале T) для $0 \leq \tau < T$	1. $\omega_0 = \frac{\Phi(t) - \Phi(t - T)}{T}$ 2. $\Delta\varphi_\tau = \Phi(t) - \Phi(t - \tau) - \omega_0 \tau$	$\overline{\Delta\varphi_\tau^2}$ $\Delta\varphi_{\tau \max}$	Для разных T и τ	
4	Отклонение фазы $\Delta\varphi(t)$ относительно $\hat{\Phi}(\omega, t) = \int_{t_0}^t \hat{\omega}(t) dt + \hat{\varphi}_0$ — оценки фазы на интервале T	1. $F(T, \omega) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f[\Phi(t) - \hat{\Phi}(\omega, t)] dt$ 2. Оценка: $\hat{\omega}(t)$ и $\hat{\varphi}_0 \sim F_{\min}$ 3. $\Delta\varphi(t) = \Phi(t) - \hat{\Phi}(\omega, t)$	$\bar{F} = \frac{K_{M0} - K_M}{K_{M0}}$	Для разных T	

Обозначения: $\Phi(t) = \int_0^t \omega(t) dt$ — фаза колебания, $\omega(t)$ — частота, ω_0 — номинальная частота, f — преобразование отклонения фазы при обработке, K — коэффициент корреляции сигналов (после преобразования частоты независимыми гетеродинами), K_0 — коэффициент корреляции при преобразовании идеальными гетеродинами (без нестабильности фазы), K_M и K_{M0} — максимальные значения K и K_0 ,

$$K = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u_1[t, \Delta\varphi(t)] u_1(t) dt.$$

сле устранения набега фаз, создаваемого разностью частот гетеродинов, определяемой при поиске.

При этих требованиях к критерию фазовую стабильность гетеродинов целесообразно оценивать непосредственно по величине уменьшения корреляции сигналов (критерий 4). В этом случае учитывается результирующее действие нестабильности фазы при усреднении за то же время, что и для выходного сигнала интерферометра.

Рассмотрим преобразование фазовой нестабильности гетеродинов при обработке сигналов. Сигналы на выходе приемных устройств интерферометра (задержку по времени не учитываем) равны

$$u(t) \cos [\omega_{01} t + \varphi_1(t)], \quad u(t) \cos [\omega_{02} t + \varphi_2(t)]. \quad (1)$$

Здесь $\omega_{01} = \omega_c - \omega_{r10}$, $\omega_{02} = \omega_c - \omega_{r20}$ — частоты сигналов; ω_c — частота входного сигнала; $\omega_{r10} t - \varphi_1(t)$ — фаза первого гетеродина; $\omega_{r20} t - \varphi_2(t)$ — фаза второго гетеродина; ω_{r10} , ω_{r20} — номинальные значения частот гетеродинов; $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$ — фазовые нестабильности гетеродинов.

Разность $\varphi_1(t) - \varphi_2(t)$ в течение времени усреднения можно представить в виде ряда

$$\begin{aligned} \varphi(t) = \varphi_1(t) - \varphi_2(t) &= \varphi_0 + \varphi'(t - t_0) + \frac{1}{2!} \varphi''(t - t_0)^2 + \dots = \\ &= \varphi_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varphi^{(n)}}{n!} (t - t_0)^n, \end{aligned} \quad (2)$$

где t_0 — начало интервала усреднения. Коэффициенты ряда φ_0 и $\varphi^{(n)}/n!$ определяются на интервале усреднения от t_0 до $t_0 + T$ (T — длительность интервала).

При обработке определяется коэффициент корреляции сигналов

$$\begin{aligned} K(m, T) = A \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \cos [\omega_{01} t + \varphi_1(t)] u(t) \cos [\omega_{02} t + \\ + \varphi_2(t)] \cos \psi_m(t) dt, \end{aligned} \quad (3)$$

где A — нормирующий коэффициент.

Для компенсации первых m составляющих ряда (2) в подынтегральное выражение вводится добавочный гармонический сомножитель $\cos \psi_m(t)$, имеющий структуру, подобную $\varphi(t)$ (2), но с ограниченным числом составляющих:

$$\psi_m(t) = \psi_0 + \sum_{n=1}^m \frac{\psi^{(n)}}{n!} (t - t_0)^n. \quad (4)$$

Наибольшее значение коэффициента корреляции сигналов $K_m(m, T)$ находится при поиске по параметрам ψ_0 и $\psi^{(n)}$, причем $K_m(m, T)$ соответствуют оценочные значения $\hat{\psi}_0$ и $\hat{\psi}^{(n)}$, являющиеся оценочными значениями φ_0 и $\varphi^{(n)}$ для данной реализации процесса; $\hat{\psi}_0$ и $\hat{\psi}^{(n)}$, естественно, зависят от числа членов ряда (4) и интервала усреднения:

$$\hat{\psi}_0, \hat{\psi}^{(n)} \sim K_m(m, T). \quad (5)$$

Величина декорреляции сигнала $1 - K_m(m, T)$, вызываемая разностью фаз,

$$\Delta\varphi(t) = \varphi(t) - \hat{\varphi}(t) = (\varphi_0 - \hat{\varphi}_0) + \sum_{n=1}^m \frac{1}{n!} [\varphi^{(n)} - \hat{\varphi}^{(n)}] \times \\ \times (t - t_0)^n + \sum_{n=m+1}^{\infty} \frac{1}{n!} \varphi^{(n)} (t - t_0)^n, \quad (6)$$

характеризует интегральную величину фазовых флуктуаций при времени усреднения T для данной реализации фазовой нестабильности гетеродинов.

За параметр оценки фазовой стабильности гетеродинов целесообразно принять среднюю величину относительного уменьшения коэффициента корреляции сигналов, вызываемого нестабильностью фазы, для выбранной величины интервала усреднения и при определенном числе производных, по которым производится поиск разности фаз гетеродинов при расчете коэффициента корреляции:

$$\overline{F(m, T)} = 1 - \overline{K_m(m, T)}. \quad (7)$$

По сути дела изложенная методика основана на теории статистических решений (см., например, [7]).

При анализе апостериорной вероятности принятых гипотез о законе изменения разности фаз гетеродинов в течение сеанса наблюдения по максимальной величине корреляции сигналов определяются:

— оценка параметров (первых производных) закона изменения разности фаз гетеродинов;

— временная зависимость остаточной (некомпенсированной) разности фаз*;

— оценка фазовой нестабильности гетеродинов по результирующему эффекту декорреляции сигналов. Последняя оценка определяется как статистическая характеристика нестабильности разности фаз гетеродинов за вычетом учитываемого при обработке оценочного значения изменения фазы гетеродинов. При учете различного числа производных в законе изменения разности фаз гетеродинов при обработке, естественно, получаются различные значения оценки фазовой нестабильности.

Измерение интегральной фазовой стабильности гетеродинов производится по блок-схеме, представленной на рис. 1. На вход двух каналов подается сигнал от генератора стандартных сигналов (ГСС). Сигналы с выходов смесителей (C_m) (преобразователей частоты) обрабатываются по алгоритму обработки интерферометрических записей. Измерение коэффициента корреляции на выходе при определенном времени усреднения производится в двух режимах — при преобразовании сигналов с помощью одного общего гетеродина (Γ) и при независимых гетеродинах. Соответственно получаем коэффициенты корреляции K_0 и K , по ко-

* Остаточное значение разности фаз гетеродинов $\Delta\varphi(t)$ (6), вызывающее декорреляцию сигналов, можно анализировать и оценивать также любым из известных способов (см., например, [8], Приложение 5).

торым вычисляется параметр оценки интегральной фазовой неустойчивости F :

$$F = \frac{K_0 - K}{K_0}. \quad (8)$$

Методика измерения фазовой стабильности независимых гетеродинов пригодна и для измерения фазовой стабильности всего интерферометра. Измерения проводятся на аппаратуре интерферометра, в том числе и при расположении ее в

разнесенных пунктах. В последнем случае источником сигнала может служить точечный источник космического радиоизлучения или сигнал, передаваемый со спутника на синхронной или высокоэллиптической орбите (источниками неустойчивости фазы в этом случае являются, кроме гетеродинов, неустойчивости в приемных трактах и на пути прохождения сигнала). При достаточно большом отношении сигнал/шум можно принять $K_0 = 1$.

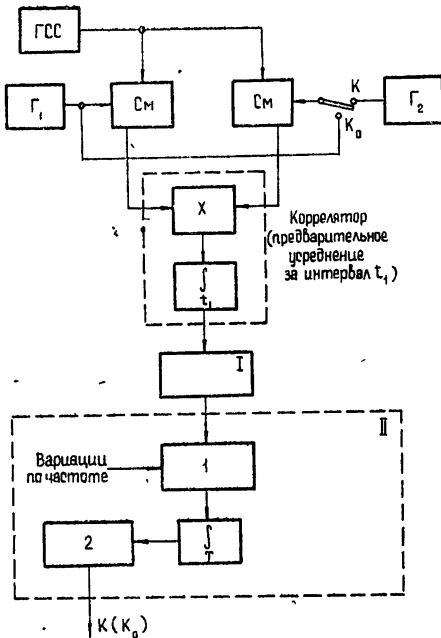


Рис. 1. Блок-схема измерения интегрального эффекта фазовой неустойчивости гетеродинов интерферометра: I—устройство ввода в ЭВМ; II—обработка в ЭВМ (1—сдвиг по частоте, 2—поиск максимума).

Условия точности выражаются соотношениями

$$\theta \ll \frac{\lambda}{D} \quad \text{— для источника космического излучения,}$$

$$\frac{\lambda}{D} \ll \frac{d}{H} \quad \text{— для спутника.}$$

Здесь θ — угловой размер источника, λ — рабочая длина волны интерферометра, D — база интерферометра, d — диаметр антенны на спутнике, H — высота спутника.

Угловые перемещения спутника приводят к смещению взаимокорреляционной функции сигналов по частоте и не сказываются на величине ее максимума, по которому производится оценка фазовой неустойчивости.

Обработка методики производилась на кварцевых генераторах с паспортной стабильностью частоты $3 \cdot 10^{-9}$ за 10 минут. Типичная зависимость коэффициента корреляции от разностной частоты (учет начальной разности фаз и первой производной фазы при обработке) изображена на рис. 2. В дальнейшем предполагается провести по вышеиз-

ложенной методике исследование фазовой стабильности стандартов частоты, используемых в качестве задающих генераторов для формирования частот гетеродинов радиоинтерферометра.

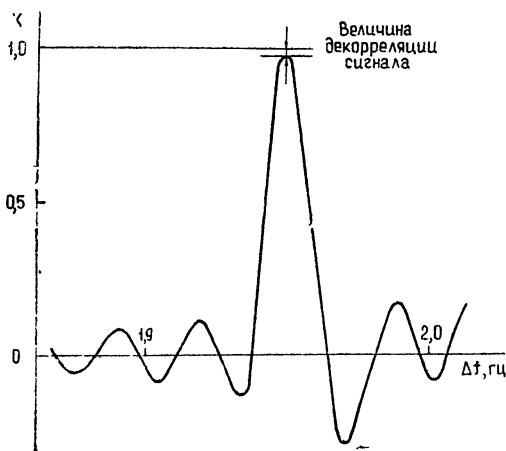


Рис. 2. Типичная зависимость коэффициента корреляции от разностной частоты генераторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. И. Матвеевко, Н. С. Кардашев, Г. Б. Шоломицкий, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 8, № 4, 651 (1965).
2. М. Коун, Д. Джонси, К. Келлерман, Б. Кларк, УФН, 100, 135 (1970).
3. В. А. Алексеев, Э. Д. Гатэлюк, В. К. Кротиков, В. Н. Никонов, В. С. Троицкий, А. И. Чикин, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 13, № 1, 5 (1970).
4. Л. Р. Коган, Радиотехника и электроника, 15, № 6, 1292 (1970).
5. К. Келлерман, УФН, 109, вып. 3, 591 (1973).
6. В. А. Алексеев, М. А. Антонец, В. В. Виткевич, Э. Д. Гатэлюк, И. С. Живора, В. Д. Кротиков, А. Е. Крюков, В. С. Троицкий, А. Н. Чикин, В. А. Шемагин, Б. П. Фатеев, М. В. Янжавцев, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 14, № 9, 1303 (1971).
7. П. А. Бакут, И. А. Большаков, Б. М. Герасимов, А. А. Курихин, В. Г. Репин, Г. П. Тартаковский, В. В. Широков, Вопросы статистической теории радиолокации, изд. Сов. радио, М., 1963.
8. Аппаратура для частотных и временных измерений, под ред. А. П. Горшкова, изд. Сов. радио, М., 1971.

Московский энергетический институт

Поступила в редакцию
2 декабря 1972 г.