

УДК 621.373

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ РАДИОЧАСТОТНОГО ГЕНЕРАТОРА

В. А. Зверев, Е. Ф. Орлов, В. В. Семенов, И. К. Спиридонова

Описан метод измерения спектральной плотности мощности колебаний радиочастотного генератора, основанный, как и в оптике, на исследовании интерференционной картины. Измерения проводились при помощи аппаратуры оптической корреляционной и спектральной обработки записей процессов. Приводятся результаты определения формы спектральной линии кварцевого генератора частотой 1 Мгц.

Ширина спектральной линии источников излучения в оптике может быть определена по наблюдению интерференционной картины, причем для оценки ширины линии достаточно измерить интервал когерентности данного колебания или «длину цуга». Для радиодиапазона такой метод не применим ввиду очень большой длины цуга, достигающей космических масштабов.

Как известно, для генераторов радиочастоты Гореликом [1] были введены понятия «технической» и «естественной» ширины спектральной линии радиочастотного генератора. Берштейном [2] был разработан и применен экспериментальный метод, основанный на демодуляции колебания генератора. Этот метод позволяет измерить естественную ширину линии, обусловленную дробовыми шумами элементов генератора, на фоне медленных уходов частоты, определяющих техническую ширину линии, которая много больше естественной. Между тем в ряде задач требуется знание действительной ширины спектральной линии с учетом всех факторов, действующих на реальный генератор.

В настоящей работе описывается метод непосредственного измерения формы и ширины спектральной линии радиочастотного генератора, основанный, как и в оптике, на использовании интерференционной картины, получаемой при помощи аппаратуры оптической обработки сигналов. Форма спектральной линии при этом находится как фурье-преобразование интерференционной картины.

1. Колебание радиочастотного генератора имеет вид

$$a(t) = A_0 \cos [\omega_0 t + \varphi(t)], \quad (1)$$

где $\varphi(t)$ — случайная функция времени. Нас будет интересовать в дальнейшем техническая ширина линии, обусловленная медленными (по сравнению с $2\pi/\omega_0$) изменениями $\varphi(t)$. В этом случае для определения ширины спектральной линии колебания $a(t)$ можно воспользоваться методом, применяемым в оптике, т. е. исследовать интерференционную картину колебания, описываемую выражением

$$\Phi_a(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T a(t) a(t + \tau) dt, \quad (2)$$

Чтобы измерить ширину линии колебания, достаточно определить интервал когерентности, т. е. величину τ_0 , при которой оценка корреляционной функции $\Phi_a(\tau)$ убывает в e раз. Что же касается формы спектральной линии, то для ее определения необходимо произвести фурье-преобразование интерференционной картины

$$W(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \Phi_a(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau, \quad (3)$$

причем необходимо иметь значения функции $\Phi_a(\tau)$ на интервале не меньшем, чем интервал когерентности τ_0 .

Однако осуществить такую задержку с помощью радиоинтерферометра даже при определении технической ширины линии весьма трудно. В самом деле, ширина линии стабильных радиочастотных генераторов, изучение которых представляет интерес, составляет доли герца, что соответствует длине цуга в несколько миллионов километров. Столь большая длина цуга d получается в результате пространственно-временного преобразования $d = c\tau_0$ (c — скорость света) при распространении радиоволн в свободном пространстве.

Между тем для генераторов радиодиапазона имеется возможность существенно уменьшить длину цуга путем применения других методов пространственно-временного преобразования. Например, колебания радиочастоты можно излучить в пространстве в виде звуковых волн, что позволяет уменьшить пространственные масштабы приблизительно в 10^5 раз при тех же временных масштабах. Возможно и дальнейшее сокращение пространственных масштабов, достигаемое путем записи исследуемого колебания на ленту, движущуюся со скоростью $v \ll c$. При этом можно достичь необходимого сокращения масштабов путем уменьшения скорости записи.

Практически применение записи колебания генератора на движущуюся ленту для оценки его стабильности содержит две принципиальные трудности. Во-первых, записать на ленту можно только такое колебание, период которого на записи не меньше разрешающей способности ленты и записывающего устройства. Это требование накладывает ограничение на нижнюю границу скорости записи и не позволяет получить практически приемлемую длину цуга. Во-вторых, скорость движения ленты при записи должна быть весьма стабильной и, во всяком случае, не хуже стабильности изучаемого генератора.

Перечисленные трудности удастся обойти, если использовать для исследования колебания двух идентичных генераторов. В самом деле, исследуем два генератора с близкими частотами ω_1 и ω_2 и с относительной нестабильностью $\Delta\omega/\omega_{1,2}$. Выделим при помощи детектора колебание разностной частоты

$$b(t) = B_0 \cos [\Omega t + \varphi_2(t) - \varphi_1(t)] \quad (4)$$

и запишем его на движущейся ленте. Пусть запись производится со скоростью v и относительной нестабильностью $\Delta v/v$, причем, как это бывает практически, стабильность протяжки много хуже, чем стабильность генераторов, т. е.

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_{1,2}} \ll \frac{\Delta v}{v}. \quad (5)$$

Если линия генератора достаточно узкая, то разностную частоту можно выбрать достаточно низкой с тем, чтобы выполнялись условия

$$\frac{\Delta\omega}{\Omega} \gg \frac{\Delta v}{v} \quad (6)$$

и

$$\frac{\Delta\omega}{\Omega} \ll 1. \quad (7)$$

Тогда, в силу условия (6), флуктуациями скорости записи можно пренебречь, и поэтому ширина линии колебания (4) будет целиком определяться флуктуациями φ_1 и φ_2 . Так как эти флуктуации статистически независимы, а также в силу условия (7), уширение спектральной линии колебания (4) будет вдвое больше ширины линии $\Delta\omega$ исходных колебаний, а форму спектра исходных колебаний можно найти расчетным путем после измерения функции корреляции колебания (4).

Действительно, функции корреляции исходных колебаний и колебания (4) описываются выражениями

$$\Phi_{a_1, a_2}(\tau) = \Psi(\tau) \cos(\omega_{1, 2}\tau); \quad (8a)$$

$$\Phi_b(\tau) = [\Psi(\tau)]^2 \cos(\Omega\tau), \quad (8б)$$

поэтому, измерив функцию $\Phi_b(\tau)$, можно определить форму спектра исходных колебаний

$$W_{1, 2}(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \sqrt{\widetilde{\Phi_b(\tau)}} \cos(\omega_{1, 2}\tau) \cos(\omega\tau) d\tau, \quad (9)$$

где $\widetilde{\Phi_b(\tau)}$ — огибающая функции $\Phi_b(\tau)$, определяемая (8б).

В то же время при исследовании биений колебаний двух генераторов период записываемых колебаний $b(t)$ увеличивается в ω/Ω раз, что позволяет уменьшить в том же отношении скорость движения ленты v , а следовательно, и длину цуга.

Таким образом, измерение формы и ширины спектральной линии радиочастотного генератора становится возможным путем использования методов, применяемых в оптике.

2. Для практической реализации метода были использованы два идентичных кварцевых генератора, частоты которых были порядка одного мегагерца и могли быть изменены в небольших пределах. Благодаря стабилизации питающих напряжений и параметров схем, техническая ширина линии генераторов составляла доли герца, поэтому наименьшая разностная частота генераторов, удовлетворяющая условию (7), была порядка одного герца. Огибающая биений генераторов записывалась в плотностном виде на фотопленке при относительной нестабильности движения порядка 10^{-3} . При этом выполнялось также и условие (6). Для получения интерференционной картины запись обрабатывалась при помощи оптического коррелометра ОКА-2 [3], который позволяет получать значения текущей корреляционной функции

$$R(\tau, t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+\tau} b(t') b(t' + \tau) dt', \quad (10)$$

где τ — относительная задержка, вносимая коррелометром, T — время интегрирования. Максимальная величина времени интегрирования в коррелометре ОКА-2 определяется размером диафрагмы и разрешающей способностью записи и составляет ~ 500 периодов колебания. При исследовании технической ширины линии, определяемой в основном медленными нестационарными флуктуациями фазы, представляет интерес увеличение времени интегрирования при сохранении того же значения

разностной частоты Ω , определяемого условиями (6) и (7). С этой целью получаемые значения функции $R(\tau, t)$ записывались в яркостном виде на плоскости τ, t индикатора, в качестве которого использовалась приемная часть фототелеграфного аппарата «Нева».

На рис. 1 представлена запись значений функции $R(\tau, t)$ на плоскости τ, t при интервале усреднения $T = 4$ сек. Как видно из этого ри-

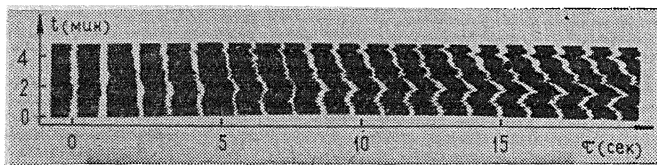


Рис. 1.

сунка, запись функции $R(\tau, t)$ аналогична интерференционной картине, получаемой в оптике, и представляет собой набор изокорреляционных кривых $R(\tau, t) = \text{const}$, описываемых выражением

$$R(\tau, t) = \frac{B_0^2}{2T} \int_t^{t+\tau} \cos [\Omega\tau + \varphi(t' + \tau) - \varphi(t')] dt', \quad (11)$$

которое при условии медленности флуктуаций по сравнению с T переходит в

$$R(\tau, t) = \frac{B_0^2}{2} \cos [\Omega\tau + \varphi(t + \tau) - \varphi(t)] \quad (12)$$

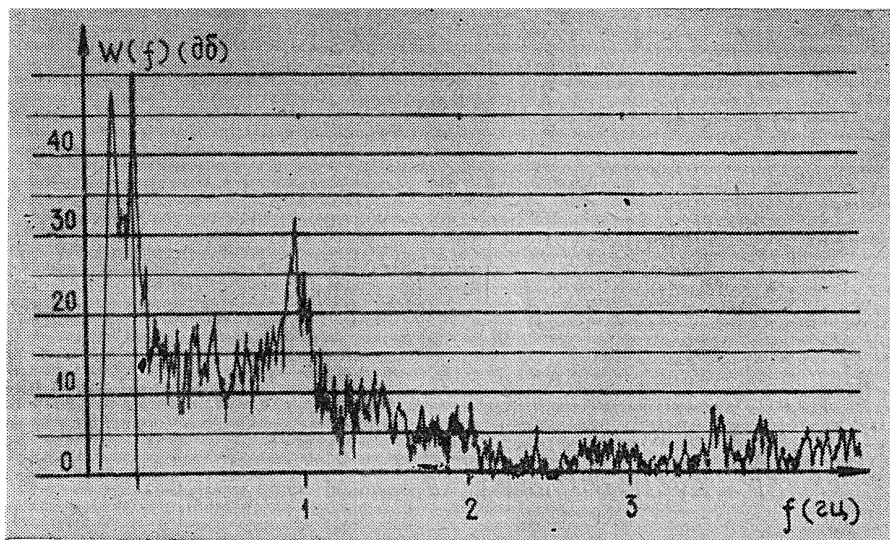
или в первом приближении

$$R(\tau, t) = \frac{B_0^2}{2} \cos [\Omega_0\tau + \Omega(t)\tau].$$

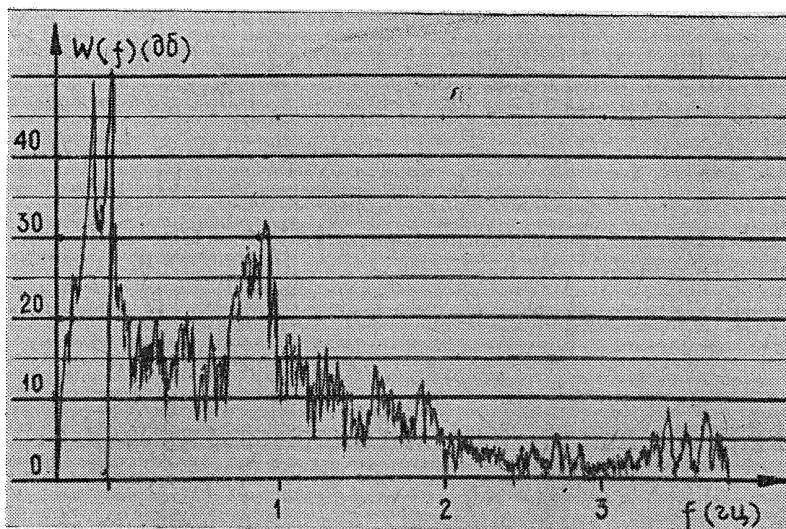
Из рассмотрения интерференционной картины видно, что имеются медленные флуктуации частоты, что приводит к растяжению всей картины по оси τ , причем это растяжение примерно пропорционально величине задержки. Рассматривая поведение кривых $R(\tau, t) = \text{const}$, можно оценить ширину спектральной линии при различном времени наблюдения без последующей дополнительной обработки. Однако для измерения формы спектральной линии необходимо усреднить значения функции $R(\tau, t)$, пропорциональные плотности записи на индикаторе, по переменной t и выполнить затем вычисления, воспользовавшись выражениями (8) и (9). Это можно реализовать, например, при помощи фотометрирования интерференционной картины и последующей обработки результатов на ЭВМ. Если же ограничиться измерением свертки спектров колебания двух генераторов, то достаточно обработать $R(\tau, t)$ при помощи оптического анализатора ОСА-2 [4], который одновременно выполняет операции фурье-преобразования и усреднения по времени t . Для этого штрихи муаровой картины, образованной решетками анализатора, устанавливаются параллельно оси t интерференционной картины, а для анализа открывается участок записи с необходимым интервалом усреднения Δt .

На рис. 2 представлены образцы спектров, полученных при различном времени интегрирования с разрешающей способностью $F_{\text{ан}} =$

$= 0,015$ *гц*. По полученным данным построена зависимость ширины линии генератора от времени наблюдения. Эта зависимость приведена на рис. 3, где экспериментально наблюдаемые значения отмечены точками. Значения ширины линии приведены в единицах разрешающей способности анализатора ОСА-2, равной в данном случае $0,015$ *гц*. Как



а)



б)

Рис. 2. Форма спектральной линии генераторов при различном времени интегрирования Δt :

а) $\Delta t=1$ мин, б) $\Delta t=5$ мин.

видно из рисунка, измеряемая ширина линии превышала разрешающую способность анализатора от 3 до 10 раз. Это свидетельствует о том, что как сам факт уширения линии со временем наблюдения, так и параметры этого явления зафиксированы с помощью описанной методики вполне уверенно.

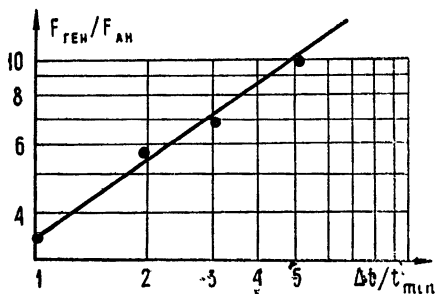


Рис. 3.

Полученные результаты позволяют провести их сравнение с теоретическим расчетом, выполненным Малаховым [5], исходя из предположения о фликкерном характере флуктуаций параметров генератора, являющихся причиной его неустойчивости. Согласно этому расчету, если предположить, что спектр флуктуаций частоты имеет вид

$$S_{\omega}(F) = \frac{A_1}{2\pi |F|^{\gamma}}, \quad (13)$$

где $1 < \gamma < 3$, то зависимость спектральной линии от времени наблюдения будет иметь вид

$$\Delta F = A_2(\Delta t)^{(\gamma-1)/2} \quad \text{или} \quad \lg \Delta F = A_3 + \frac{\gamma-1}{2} \lg \Delta t. \quad (14)$$

Прямая, проведенная на рис. 3, построена по формуле (14) при значении $\gamma = 2,36$. Как видно из графика, экспериментальные точки хорошо ложатся на теоретическую кривую, что можно рассматривать в качестве подтверждения фликкерного характера флуктуаций генератора в течение данного времени наблюдения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Горелик, Изв. АН СССР, сер. физ., 14, № 2, 187 (1950).
2. И. Л. Берштейн, ДАН СССР, 68, № 3, 11 (1948).
3. В. А. Зверев, И. В. Мосалов, Е. Ф. Орлов, В. Л. Сибиряков и К. Е. Роговцев, Авторское свидетельство № 150918, 1961.
4. В. А. Зверев, И. В. Мосалов, Е. Ф. Орлов, В. Л. Сибиряков, ПТЭ, 1, 110 (1962).
5. А. Н. Малахов, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 9, № 3, 625 (1966).

Научно-исследовательский радиофизический институт
при Горьковском университете

Поступила в редакцию
18 апреля 1967 г.,
после доработки
17 февраля 1969 г.

DETERMINATION OF THE SHAPE OF THE SPECTRAL LINE OF RF GENERATOR

V. A. Zverev, E. F. Orlov, V. V. Semenov, I. K. Spiridonova

A method of measuring the spectral density of the oscillation power of RF generator is described. It is based, as in optics, on the investigations of the interference pattern. The measurements were carried out by means of optical analogue apparatus of correlation and spectral analysis of process records. The results of determining the form of the spectral line of 1 Mc/s quartz generator are presented.