

Изобретение относится к технике радиотехнических измерений энергетического спектра СВЧ-сигналов миллиметрового, субмиллиметрового и инфракрасного диапазонов длин волн и может использоваться при исследованиях в радиоастрономии, связи, биологии и медицине, для спектрометрии плазмы и в космических исследованиях.

Традиционно измерение энергетического спектра сигналов в упомянутых диапазонах осуществляется квазиоптическими (интерференционными) методами [1, 2] или с применением гетеродинного преобразования спектра исследуемых сигналов с последующей узкополосной фильтрацией [3]. Известны также способы спектральных измерений, в которых используются интегральные соотношения типа преобразований Гильберта и Фурье между исследуемым спектром и первично регистрируемой реакцией приемника исследуемого излучения [4, 5].

Измерение спектра квазиоптическими средствами не обеспечивает необходимое высокое разрешение, широкополосность и оперативность анализа. Так, многолучевой интерференционный спектрометр принципиально не может иметь больше 3,0 коэффициент перекрытия по частоте, а для разрешения порядка 1,0 ГГц должен использовать радиооптические элементы неприемлемо больших размеров. Требование высокой оперативности анализа приводит к противоречию между высокоточным координированием элементов используемой в интерференционных спектрометрах радиооптики и высокой скоростью их перемещения.

Гетеродинный анализ спектра на основе нелинейного преобразования исследуемых сигналов требует применения генераторов непрерывно перестраиваемой опорной частоты, которые в упомянутых диапазонах отсутствуют. Кроме того, нелинейный характер гетеродирования спектра принципиально ограничивает коэффициент перекрытия по частоте на уровне 2,0.

Наиболее близким к предлагаемому способу по технической сущности и по достигаемому результату является способ измерения спектра с использованием приемника излучения на основе сверхпроводящего перехода, предусматривающий регистрацию отклика приемника исследуемого излучения как функции изменяемого параметра и формирование спектра путем интегрального преобразования Гильберта зарегистрированной функции [5]. Этот способ позволяет измерять энергетический спектр узкополосных сигналов в широком диапазоне частот перестройки и обеспечивает их высокое разрешение. Однако он плохо приспособлен для оперативного и точного измерения спектра широкополосных сигналов.

Указанные недостатки связаны с искусственной деформацией ядра используемого в способе-прототипе интегрального преобразования. Эта деформация является следствием пренебрежения конечной шириной ν спектра собственной генерации приемника в представлении отклика приемника на монохроматический сигнал и приводит к необоснованному использованию преобразования Гильберта в качестве интегрального преобразования, описывающего связь отклика приемника излучения и измеряемого энергетического спектра.

Следует также отметить, что используемое в

прототипе преобразование Гильберта принадлежит к классу физически нереализуемых преобразований, поскольку в аналитической форме представляется выражением:

$$P(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Delta i}{\omega - \nu} d\nu,$$

где $P(\omega)$ - изменяемый спектр; Δi - отклик приемника; ω - круговая частота; ν - изменяемый параметр.

Признаками физической нереализуемости преобразования являются существование его ядра $1/(\omega - \nu)$ на бесконечном интервале и бесконечно большие значения ядра в окрестности точки разрыва $\nu = \omega$.

Практическая реализация преобразования Гильберта всегда сопровождается усечением его ядра на конечном интервале $-0,5V < \nu < +0,5V$

и ограничением значений ядра в окрестности точки разрыва конечной величиной $\pm I_{\max}$. При этом возникает погрешность формирования спектра $P(\omega)$, величина которой при фиксированных значениях размера ядра V и его максимальных значений I_{\max} растет по мере увеличения ширины спектра исследуемых сигналов. Необходимое для уменьшения такой погрешности измерения увеличение размера V ядра сопровождается увеличением времени выполнения преобразования, то есть снижает оперативность анализа спектра.

Отмеченное противоречие между шириной полосы, величиной погрешности измерения спектра и временем анализа ограничивает практическое применение способа измерения энергетического спектра на основе преобразования Гильберта при исследовании широкополосных сигналов.

В основу предлагаемого изобретения поставлена задача создать способ измерения энергетического спектра электромагнитного излучения с использованием в качестве приемника излучения сверхпроводящего перехода Джозефсона, в котором выбор тока смещения в качестве изменяемого параметра перехода Джозефсона и новый алгоритм обработки зарегистрированных на его выходе зависимостей позволяют учесть влияние ширины ν спектра собственной генерации, что обеспечивает уменьшение погрешности измерения и устраняет ее зависимость от ширины измеряемого энергетического спектра при сохранении оперативности (времени выполнения) анализа спектра.

Указанный технический результат достигается за счет того, что в предлагаемом способе измерения энергетического спектра электромагнитного излучения с использованием приемника излучения на основе сверхпроводящего перехода Джозефсона, предусматривающем регистрацию отклика приемника на исследуемое излучение как функции изменяемого параметра и формирование измеряемого спектра путем применения к зарегистрированной зависимости функциональных преобразований, согласно изобретению в качестве изменяемого параметра выбирают ток смещения сверхпроводящего перехода Джозефсона, изменяемый в процессе измерения от нуля до значения, при котором частота собственной генерации сверхпроводящего перехода совпадает с верхней частотой диапазона

измерений, регистрируют отклик приемника на исследуемое излучение по напряжению при фиксированной рабочей температуре приемника, осуществляя обращение отклика, обращенный отклик подвергают быстрому преобразованию Фурье, взвешивают по полученный продукт зеркально-симметричной функцией, представляющей спектр отклика сверхпроводящего перехода Джозефсона на монохроматический сигнал, и применением обратного быстрого преобразования Фурье к взвешенному продукту получают измеряемый спектр.

Заявляемые существенные признаки способа обеспечивают получение заявляемого технического результата. Действительно, в предлагаемом способе измерения энергетического спектра электромагнитного излучения, в отличие от способа-прототипа, используют интегральную связь отклика сверхпроводящего перехода на исследуемое электромагнитное излучение Δi и измеряемого спектра $P(\omega)$, учитывающую ширину спектра собственной генерации приемника излучения. Эта связь описывается выражением:

$$\Delta i(v) = \frac{1}{4v^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{P(\omega)(v-\omega)}{(v-\omega)^2 + \gamma^2} d\omega.$$

Приведенное выражение представляет интегральное уравнение Вольтерра первого рода, подынтегральной функцией которого является измеряемый энергетический спектр исследуемого сигнала. Решение такого уравнения можно получить в форме обратного преобразования Фурье отношения спектров левой части уравнения и его ядра:

$$P(\omega) = F^{+1} \{ F^{-1} \{ \Delta i(v) \} / F^{-1} \{ \frac{1}{(v-\omega)^2 + \gamma^2} \} \},$$

где символами F^{+1} и F^{-1} обозначены операторы прямого и обратного преобразований Фурье, соответственно.

Существенно, что применение в предлагаемом способе в качестве изменяемого параметра тока смещения сверхпроводящего перехода в указанных пределах повышает точность представления используемого в приведенном интегральном соотношении отклика перехода, то есть дополнительно повышает точность формирования измеряемого спектра.

Предписываемые предлагаемым способом преобразования отклика Δi сверхпроводящего перехода, представляющего левую часть уравнения, строго соответствует используемому в предлагаемом способе решению интегрального уравнения Вольтерра и, таким образом, формируют образ подынтегральной функции, то есть энергетический спектр $P(\omega)$ исследуемого сигнала. При этом все установки параметров процедур, предписываемые используемым алгоритмом для формирования энергетического спектра исследуемого сигнала, не зависят от ширины спектра исследуемых сигналов. Выполнение составляющих основу предлагаемого способа, процедур преобразования Фурье на основе "быстрых" алгоритмов существенно сокращает общее время анализа спектра, то есть повышает его оперативность.

На фиг.1 показано семейство спектров $P_f(\omega)$ с П-образным спектром различной ширины Ω , возмущающих сверхпроводящий переход,

полученное при использовании предлагаемого способа измерения энергетического спектра электромагнитного излучения; на фиг.2 - семейство спектров $P_h(\omega)$ тех же широкополосных сигналов, полученных при использовании способа-прототипа.

Пример. Исследуемое электромагнитное излучение генератора на ЛПД направляют на приемник излучения - сверхпроводящий переход Джозефсона (торцевой контакт на основе $Nb-\alpha-Si-Nb$), имеющий ширину спектра собственной генерации порядка 200 МГц. Переход охлаждается до рабочей температуры жидкого гелия при нормальном давлении при помощи криогенной установки. Ток смещения изменяют от нуля до 1 мА, при котором частота собственной генерации перехода совпадает с верхней частотой диапазона измерения 300 ГГц. В процессе изменения тока смещения изменяют и регистрируют в памяти процессора цифровой обработки отклик приемника излучения по напряжению на исследуемый сигнал. После регистрации отклика производят ряд его функциональных преобразований: осуществляют обращение измеренного отклика, подвергают обращенный отклик быстрому преобразованию Фурье, взвешивают полученный продукт зеркально-симметричной функцией, представляющей спектр отклика сверхпроводящего перехода Джозефсона на монохроматический сигнал, и для получения измеряемого энергетического спектра к взвешенному продукту применяют обратное быстрое преобразование Фурье. При этом используют заранее определенную теоретическим путем для используемого типа сверхпроводящего перехода и заданной его рабочей температуры расчетную взвешивающую зеркально-симметричную функцию.

Для иллюстрации эффективности предлагаемого способа и инвариантности погрешности измерения к изменению ширины измеряемого спектра на фиг.1 показано семейство спектров $P_f(\omega)$ широкополосных сигналов с П-образным спектром различной ширины Ω , возмущающих сверхпроводящий переход. Спектры получены путем имитационного моделирования представляющих предлагаемый способ процедур преобразования отклика $\Delta i(v)$ сверхпроводящего перехода Джозефсона. В представленном на фиг.1 семействе графиков образ с номером $n=1,2,3,4,5$ соответствует ширине спектра исследуемого сигнала $\Omega_n = 2^{n-1} / x \Omega_{min}$, где минимальная ширина спектра Ω_{min} принята равной 1/16 части всего диапазона исследуемых частот, представленного 512 отсчетами. Таким образом, спектр минимальной ширины представлен 16 отсчетами и имеет ширину 9,3 ГГц. Спектр максимальной ширины представлен 256 отсчетами и равен 150 ГГц. Центральные частоты всех исследуемых спектров равны и совмещены с центральной частотой диапазона измерений $\omega_0 = 150$ ГГц. Спектральная плотность мощности p_0 спектра всех исследуемых сигналов на интервале его существования условно принята равной единице.

Анализ результатов имитационного моделирования показывает, что погрешность измерения энергетического спектра предлагаемым способом практически не зависит от его ширины и во всем диапазоне ее вариаций при заданных параметрах рабочих процедур не превышает 5% от

измеряемого в центре рабочего диапазона значения.

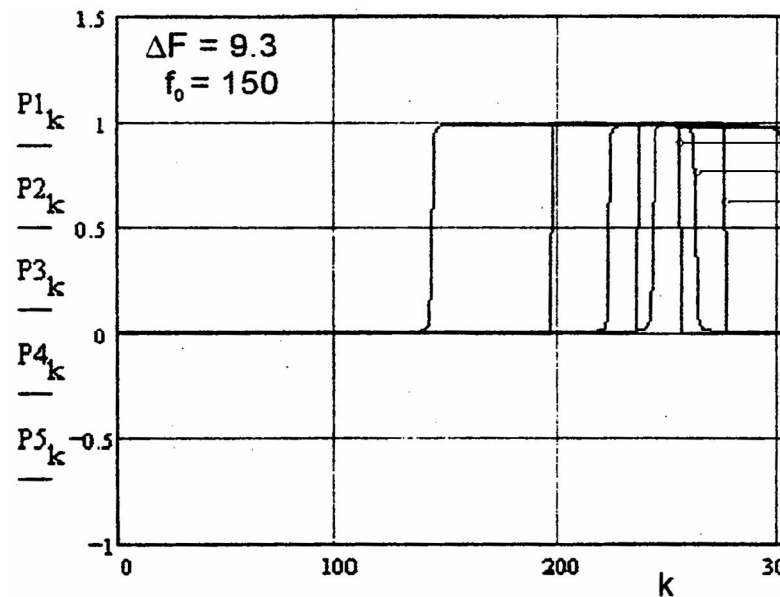
Для иллюстрации недостатков способа-прототипа на фиг.2 показано семейство спектров $P_k(\omega)$ широкополосных сигналов с П-образным спектром различной ширины Ω , возмущающих сверхпроводящий переход. Спектры получены путем имитационного моделирования представляющих способ-прототип процедур регистрации и преобразования отклика $\Delta I(v)$ сверхпроводящего перехода Джозефсона.

Как и на фиг.1, спектр с номером $n=1, 2, 3, 4, 5$ на фиг.2 соответствует ширине спектра исследуемого сигнала $\Omega_n = 2^{n-1} \times \Omega_{min}$, где минимальная ширина спектра равна 9,3 ГГц. Центральные частоты всех исследуемых спектров равны 150 ГГц и совмещены с центральной частотой рабочего диапазона $\omega_0 = 300$ ГГц. Спектральная плотность мощности p_0 спектра принята равной единице.

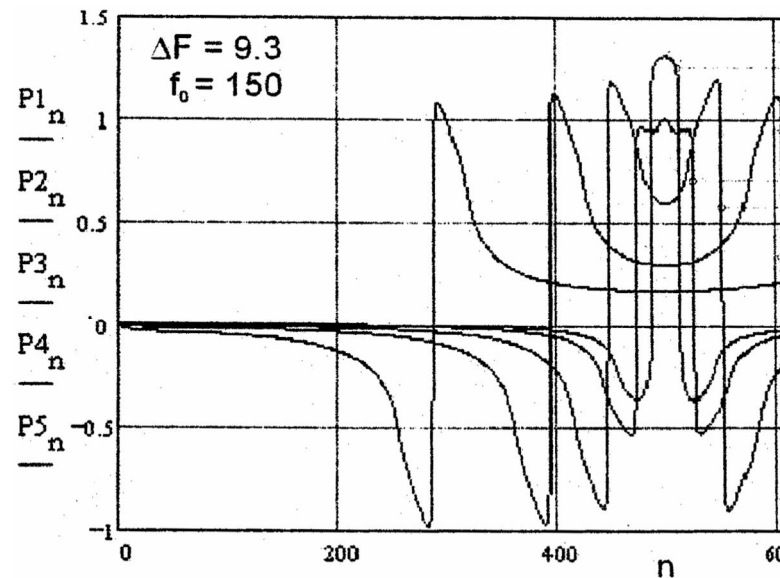
Ядро преобразования Гильберта, используемого в имитационной модели, представлено 32 отсчетами, что обеспечивает удовлетворительную точность измерения спектра только при его минимальной ширине.

Анализ приведенных на фиг.2 спектров иллюстрирует существенное увеличение погрешности измерения спектра при увеличении его ширины. Ошибка по мере роста ширины спектра увеличивается до 70%. Особенности практической реализации преобразования Гильберта при росте размера ядра свидетельствует о свойственном всем преобразованиям типа аperiodической сверки увеличении вычислительных затрат и, как следствие, времени его выполнения, то есть о снижении быстродействия способа-прототипа в режиме анализа широкополосных сигналов.

Таким образом, применение предлагаемого способа измерения энергетического спектра широкополосного электромагнитного излучения путем регистрации отклика приемника на основе сверхпроводящего перехода Джозефсона и предлагаемых функциональных преобразований этого отклика приведет к повышению точности измерений и устранил зависимость качественных показателей результатов измерений от ширины измеряемого спектра при сохранении оперативности анализа спектра.



Фиг. 1



Фиг. 2