

КАЛИБРОВКА СПЕКТРА ПО ЭКВИВАЛЕНТУ НА АНТЕННЕ

А. Ф. Дравских, Э. В. Дравских

Показано, что можно избавиться от влияния интерференционных паразитных спектральных эффектов в антенно-фидерном тракте при калибровке спектральных измерений по эквивалентному генератору шума, включаемому на антенне, путем периодического изменения положения каждой неоднородности тракта на четверть волны.

It is shown that harmful spectral effects due to interference in the antenna feeder could be eliminated using the equivalence noise generator and changing the position of each inhomogeneous part of the feeder on a quarter of wavelength.

Одной из серьезных проблем в спектральном анализе являются интерференционные эффекты, возникающие в антенно-фидерном тракте и приводящие к паразитным неоднородностям в спектре исследуемого сигнала. Влияние интерференционных явлений на спектральные исследования рассматривается в ряде работ [1—3]. В настоящей статье обсуждается одна возможность исключения или, по крайней мере, значительного ослабления влияния этих паразитных интерференционных эффектов.

Интерференционные паразитные спектральные (ИПС) эффекты можно разделить на две группы: мультипликативные и аддитивные. Первые возникают при прохождении исследуемого сигнала к приемнику по линии передачи, содержащей более одной неоднородности. В этом случае, даже если коэффициент отражения каждой неоднородности не зависит от частоты, общий коэффициент отражения будет зависеть от частоты в связи с интерференцией сигналов, отраженных от ряда неоднородностей. Взаимные фазы отраженных сигналов зависят от электрической длины линии между неоднородностями, а последняя зависит от длины волны (частоты). Мультипликативный ИПС-эффект определяется геометрией линии передачи и всегда пропорционален мощности исследуемого сигнала. Аддитивный ИПС-эффект возникает при прохождении шума аппаратного происхождения по этой же линии передачи. Шум может возникать как в приемнике, так и в элементах линии передачи. Этот ИПС-эффект не зависит от исследуемого сигнала, он пропорционален мощности шума.

Роль ИПС-эффектов очень велика, мощность ИПС-сигнала может достигать (при одинаковых амплитудах отражений от неоднородностей) величины $P_i n^2$, где P_i — мощность, отраженная от одной неоднородности, n — число неоднородностей.

Спектральные исследования в радиоастрономии весьма разнообразны по относительной ширине наблюдаемых спектров (от 10^{-6} до ~ 1).

Роль ИПС-эффектов различна при различных полосах частот спектрального анализа. Так, для существования ИПС-эффектов необходимо сохранение когерентности между сигналами, отраженными от различных неоднородностей антенно-фидерного тракта. Время когерентности τ определяется спектральным разрешением Δf прибора $\tau \approx 1/\Delta f$. Отсюда следует, что при исследовании широкополосных спектров на больших антеннах ИПС-эффектами от антенны можно пренебречь. Например, для радиотелес-

копа РАТАН-600 отражениями от основной отражающей поверхности можно пренебречь уже при спектральном разрешении $\Delta f \geq 10$ Мгц.

С другой стороны, исследование широкополосных спектров из-за наличия ИПС-эффектов сложнее, чем узкополосных. Действительно, ИПС-сигнал может быть воспринят как полезный спектральный сигнал в том случае, когда он имеет ширину полосы, сравнимую с полезным спектральным сигналом, в противном случае он может быть отфильтрован. При двух неоднородностях ИПС-эффект представляет собой гармонику с периодом по частоте сигнала, равным $v/2(x_2 - x_1)$, где $(x_2 - x_1)$ — расстояние между неоднородностями, v — фазовая скорость распространения излучения в тракте. Этот период и можно принять за ширину полосы ИПС-эффекта. В современных радиотелескопах антенно-фидерный тракт имеет длину ~ 10 м и, значит, расстояние между неоднородностями ≤ 10 м. Отсюда ширина полосы ИПС-эффекта ≥ 15 Мгц. Таким образом, действительно, исследование широкополосных спектров связано с большими трудностями, чем узкополосных.

Наилучшим способом устранения влияния всех интерференционных эффектов является калибровка спектра исследуемого источника путем наблюдения внеземного источника близкой интенсивности с известным спектром. Однако не для всех исследуемых источников можно подобрать соответствующий калибровочный источник. В частности, нет на небе эквивалента для Солнца. Использование же в качестве эквивалента какого-либо генератора шума, включаемого в тракт на антенне, неизбежно приводит к ИПС-эффектам, поскольку излучение эквивалента проходит по иному пути, чем излучение источника.

Для устранения или, по крайней мере, для существенного уменьшения влияния всех ИПС-эффектов при калибровке спектральных наблюдений по эквиваленту на антенне (будем считать, что эквивалентный генератор шума включается в линию путем замены части тракта сигнала трактом эквивалента, например заменой облучателя генератором шума) можно модулировать (изменять) положение каждой неоднородности на $\lambda/4$ (речь идет об устранении влияния ИПС-эффектов в не слишком широкой полосе частот, скажем, не превосходящей 10%), при этом в среднем результате из ряда измерений ИПС-эффект будет отсутствовать. Рассмотрим это более подробно.

Легко показать, что выражение для мощности отраженного сигнала $P_{отр}$, если опустить члены второго порядка малости, будет иметь вид:

$$P_{отр} = P_0 \left(\sum_{i=1}^n \Gamma_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{k \neq i=1}^n \Gamma_i \Gamma_k \cos 2\pi \frac{2(x_k - x_i)}{\lambda} \right), \quad (1)$$

где P_0 — мощность падающей волны; Γ_i — коэффициент отражения от i -й неоднородности; $(x_k - x_i)$ — расстояние между неоднородностями; λ — длина волны в тракте. Отраженный сигнал представляет собой сумму постоянного члена $P = P_0 \sum_{i=1}^n \Gamma_i^2$ и интерференционных членов $P_{ik} = P_0 \Gamma_i \Gamma_k \cos 2\pi \cdot \frac{2(x_k - x_i)}{\lambda}$, зависящих от частоты (длины волны):

$$P_{отр} = P + P_{12} + P_{13} + \dots + P_{21} + P_{23} + \dots + P_{n1} + P_{n2} + \dots + P_{n(n-1)}. \quad (2)$$

При изменении положения x_i любой из неоднородностей на $\lambda/4$ все интерференционные члены, содержащие индекс i , изменят знак на противоположный. Поочередно меняя положение каждой неоднородности на $\lambda/4$ (с возвращением в исходное положение остальных неоднородностей), регистрируя спектр и беря среднее от регистраций, получим средний спектр, в котором отсутствуют все интерференционные члены. Действительно, в исходном уравнении (2), соответствующем измерению спектра со всеми неоднородностями, находящимися в исходном состоянии, все

интерференционные члены P_{ik} имеют знак (+). Проведя еще n измерений спектра со смещенной на $\lambda/4$ в каждом измерении одной неоднородностью, получим $(n+1)$ уравнений (строк) типа (2), в каждом уравнении будет одинаковое число интерференционных членов P_{ik} , часть из них со знаком (+), часть со знаком (-), все члены P — положительные. В каждом столбце будет содержаться 2 интерференционных члена со знаком (-) и $(n-1)$ членов со знаком (+). Чтобы исключить все члены P_{ik} , нужно, чтобы в каждом столбце было одинаковое число членов с (+) и (-) знаками. Добавим со знаком (-) m раз исходное уравнение (2) и приравняем число положительных и отрицательных членов в столбце $n-1=m+2$, отсюда $m=n-3$. Сложив все $2n-2$ уравнений, получим $(2n-2)P_{отр}=(2n-2)P$, или $P_{отр}=P$. Результат не содержит интерференционных членов.

Приведем пример для случая трех неоднородностей (такими неоднородностями могут быть, например, антенна, облучатель, вентиль).

1-я регистрация	
$P_{отр}=P+P_{12}+P_{13}+P_{21}+P_{23}+P_{31}+P_{32}$	(все неоднородности на месте)
2-я регистрация	
$P_{отр}=P-P_{12}-P_{13}-P_{21}+P_{23}-P_{31}+P_{32}$	(сместили 1-ю неоднородность на $\lambda/4$)
3-я регистрация	
$P_{отр}=P-P_{12}+P_{13}-P_{21}-P_{23}+P_{31}-P_{32}$	(сместили 2-ю неоднородность на $\lambda/4$, остальные на месте)
4-я регистрация	
$P_{отр}=P+P_{12}-P_{13}+P_{21}-P_{23}-P_{31}-P_{32}$	(сместили 3-ю неоднородность на $\lambda/4$)

Среднее значение $P_{отр}=P$

Таким же образом можно поступить и с измерением спектра эквивалентного генератора шума. Сравнение этих средних спектров исследуемого сигнала и эквивалентного генератора шума уже не будет содержать ИПС-эффектов.

Изменение положений неоднородностей на $\lambda/4$ можно делать заменой, например, отрезков волноводов на более короткие или более длинные.

Процедуру изменения положения каждой неоднородности на $\lambda/4$ можно провести только один раз, чтобы прокалибровать тракт сигнала.

Для ограничения числа неоднородностей, исключением ИПС-эффектов которых нужно заниматься, желательно общую для сигнала и для эквивалента часть тракта подключить через невзаимный элемент (вентиль).

Список литературы

1. Троицкий В. С. Флуктуации в нагруженной линии. — ЖТФ, 1955, 25, вып. 8, с. 1426—1435.
2. Гуднов В. М., Горячев И. М., Колбасов В. А., Мисежников Г. С., Сороченко Р. Л., Сестрорецкий Б. В., Штейншлейгер В. Б. Нулевой спектральный радиометр на волну 5.2 см с симметричным методом приема. — Труды ФИАН СССР, 1969, 47, с. 5—20.
3. Рыжков Н. Ф. Аппаратурные методы радиоспектроскопии межзвездной среды. Сравнительная оценка методов. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1976, 8, с. 89—119.