

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗОВЫХ СДВИГОВ В СМЕСИТЕЛЕ

Выявление погрешности измерений абсолютных фазовых сдвигов, возникающих в смесительном диоде при гетеродинном преобразовании частоты из-за его нелинейности. Целью исследования является решение проблемы влияния нелинейности фазовых сдвигов гармоник при умножении частоты на результаты измерений абсолютных фазовых сдвигов, возникающих в смесителе и погрешностей в

различных методах измерений этих сдвигов в смесителе при гетеродинном преобразовании частоты входного СВЧ сигнал. В статье показано неравенство фазовых сдвигов гармоник произведению номера гармоники, умноженной на фазовый сдвиг умножаемого сигнала используемых в методах измерений абсолютных фазовых сдвигов смесителей. Предложен метод, лишенный этих погрешностей.

Смеситель СВЧ сигналов, сдвиг фаз, гетеродинное преобразование частоты.

Serdyukov Vladimir Vladimirovich, Korotkov Konstantin Stanislavovich

ON THE ISSUE OF DETERMINING PHASE SHIFTS IN A MIXER

Identification of measurement errors of absolute phase shifts occurring in a mixing diode during heterodyne frequency conversion due to its nonlinearity. The aim of the study is to solve the problem of the influence of the nonlinearity of phase shifts of harmonics when frequency multiplication on the measurement results of absolute phase shifts occurring in mixers and errors in various measurement methods of these shifts in the mixer during heterodyne frequency conversion of the input microwave signal. The article shows the inequality of phase shifts of harmonics by the product of the harmonic number multiplied by the phase shift of the multiplied signal used in the measurement methods of absolute phase shifts of mixers. A method devoid of these errors is proposed.

Microwave signal mixer, phase shift, heterodyne frequency conversion.

Введение

В последнее время, для передачи информации широкое распространение получил способ фазовой модуляции радиосигналов как наиболее крипто- и помехозащищенный. При этом подавляющее число устройств для приема таких радиосигналов использует принцип гетеродинного преобразования частоты с применением смесителей радиосигналов, построенных на основе полупроводниковых диодов, которые вносят дополнительный сдвиг фаз и в принципе являющийся паразитным, искажающим передаваемую информацию. Это связано с тем, что всякий полупроводниковый диод имеет реактивные элементы в виде индуктивности, объема полупроводника L_S , по которому протекает сигнал, и барьерной емкости C_0 p-n перехода, которые, как всякая реактивность, вносят в протекающий через них сигнал время задержки, что эквивалентно дополнительному сдвигу фаз, особенно в диапазоне СВЧ.

Основная часть

В настоящее время разработаны шесть инструментальных способов определения (измерения с последующим вычислением результатов) сдвигов фаз, возникающих в смесителе при гетеродинном преобразовании частоты. Метод трёх смесителей [1] когда последовательно измеряются сдвиги фаз трёх смесителей, один из которых испытуемый, а два других вспомогательные с последующим вычислением по результатам измерений сдвига фаз испытуемого смесителя. [2]

Метод двойного преобразования частоты [3] в котором с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ) измеряют общий сдвиг фаз двух последовательно соединённых испытуемых смесителя, включённых один в прямом, а второй в обратном направлениях с общим для обеих гетеродином, а полученный результат делят пополам и приписывают каждому из испытуемых смесителей.

Метод отражения [2] при котором через испытуемый смеситель пропускается испытательный сигнал в прямом направлении, который на его выходе отражается от нагрузки с известным коэффициентом отражения и опять возвращается через смеситель на его вход, где и измеряют сдвиг фазы между прямым и отражённым сигналами, который равен сдвигу фаз испытуемого смесителя. [4]

Метод фазовой опоры в котором используют ВАЦ содержащий генератор комбинационных частот вырабатывающих гармоники путём умножения частоты опорного кварцевого генератора 10 МГц с дискретностью гармоник 10 МГц, которые используют для получения испытательного сигнала, испытуемого смесителя и опорного сигнала ПЧ, который сравнивают по фазе с выходным сигналом ПЧ этого же смесителя, в результате чего измеряют их фазовый сдвиг. [5]

Сигнал гетеродина также сравнивают по фазе с соответствующей ему гармоникой и измеряют фазовый сдвиг между ними. Затем вычитают этот фазовый сдвиг из измеренного фазового сдвига сигнала ПЧ в результате чего получают фазовый сдвиг смесителя вносимый им в сигнал ПЧ при гетеродинном преобразовании частоты входного сигнала.

Сигналы всех гармоник когерентны между собой. Поэтому считают, что их фазовые сдвиги соответствуют фазе исходного сигнала опорного кварцевого генератора умноженной на номер гармоники

Но как было показано ранее фазы гармоник отличаются друг от друга на величину $\Delta\varphi_{П}$ разную для каждой отдельной гармоники, что является прямой погрешностью измерений, так как измеряется не истинный фазовый

сдвиг испытуемого смесителя, а его реплика, отличающаяся от истинного сдвига фаз на величину $\Delta\varphi_{\Pi}$. Поэтому необходима таблица индивидуальной коррекции сдвигов фаз с дискретностью равной частоте опорного кварцевого генератора.

Все вышеперечисленные методы испытаний смесителей имеют существенные недостатки.

В методе трёх смесителей главная и существенная погрешность при измерении фазы возникает из-за согласования входных сопротивлений смесителей, собранных в пару между собой и входами каждой пары смесителей и входами ВАЦ, к которым они присоединяются для испытаний. Как показывает практика, погрешность измерения фазы при КСВ входов смесителей 1,5-2,0 может достигать 10° - 15° градусов.

Метод отражения применим для измерения параметров смесителей в том числе и фазы, только в случае, когда потери преобразования смесителя в прямом и обратном направлении равны и кроме того, не превышают 10 дБ.

Метод двойного преобразования частоты пригоден только для измерений двух совершенно идентичных по параметрам смесителей и совершенно непригоден для двух последовательно соединённых смесителей с разными потерями преобразования и, следовательно, с разными собственными сдвигами фаз. Кроме того, даже при двух совершенно идентичных по параметрам смесителях соединённых последовательно в пару амплитуда испытательного сигнала на входе второго смесителя пары будет меньше по амплитуде, чем амплитуда испытательного сигнала на входе первого смесителя пары на величину его потерь преобразования, что неизбежно приводит к разным сдвигам фаз у первого и второго смесителей пары.

В методе фазовой опоры главный недостаток состоит в том, из-за нелинейности фазовых сдвигов между гармониками фазовой опоры это приводит к измерению не самого фазового сдвига вносимого смесителем при гетеродинном преобразовании в сигнал ПЧ, а его реплики отличающиеся от истинного сдвига фаз на величину $\Delta\varphi_{\Pi}$ разную для разных гармоник.

Все испытательные сигналы в таком методе являются когерентными так как получены на основе частоты опорного кварцевого генератора 10 МГц.

В то же время известен метод измерения абсолютного сдвига фаз смесительного диода, лишенный вышеперечисленных недостатков.

Который [6] состоит в том, что одновременно измеряют сумму и разность сдвигов фаз двух смесителей, один из которых опорный, а другой

испытуемый при общем гетеродине для обоих смесителей. При измерении суммы сдвига фаз испытуемой и опорной смесители соединяются вместе последовательно выходами ПЧ. На вход испытуемого смесителя подают испытательный сигнал, который в результате прямого преобразования частоты в испытуемом смесителе и обратного преобразования частоты в опорном смесителе снимают с его выхода с частотой равной частоте входного испытательного сигнала и подают на один из двух входов фазометра, но другой вход которого поступает входной испытательный сигнал, в результате чего измеряют общий сдвиг фаз (сумму) двух смесителей в виде:

$$\sum \varphi = (\varphi_1 + \varphi_2)$$

где φ_1 — сдвиг фаз испытуемого, а φ_2 — сдвиг фаз опорного смесителей. Затем измеряют разность сдвигов фаз между включёнными параллельно в диапазоне их промежуточных частот в результате чего получают $\Delta\varphi$.

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$$

После чего вычисляют истинные сдвиги фаз испытуемого смесителя φ_1 , по формуле

$$\varphi_1 = \frac{\sum \varphi + \Delta\varphi}{2} \quad (1)$$

и опорного смесителя φ_2 по формуле

$$\varphi_2 = \frac{\sum \varphi - \Delta\varphi}{2} \quad (2)$$

Заключение

Проанализирован сдвиг фаз, вносимый полупроводниковым смесительным диодом в процессе гетеродинного преобразования частоты входного сигнала в сигнал ПЧ.

Показано, что он нелинеен в диапазоне частот, а его величина определяется постоянным активным и индуктивным сопротивлениями объёма полупроводника и переменной барьерной ёмкостью р-п перехода, теоретический инженерный расчёт которой весьма сложен и не всегда возможен.

На этом основании сделан вывод о возможности в настоящее время только инструментальных измерений сдвигов фаз, вносимых смесительным диодом в сигнал ПЧ при гетеродинном преобразовании частоты.

Рассмотрены известные инструментальные методы измерения сдвигов, вносимых смесительным диодом в сигнал ПЧ при гетеродинном преобразовании частоты и показаны их недостатки.

Приведено описание нового способа измерений сдвига фаз смесительного диода при преобразовании частоты лишенного этих недостатков.

Показано, что в случае применения полупроводникового диода для умножения частоты, сдвиги фаз каждой из гармоник не равны сдвигу фаз исходного для умножения сигнала, умноженного на номер гармоники, и их величина индивидуальна для каждой гармоники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Епифанов Е.И., Новиков В.А., Чемес Е.А.* Экспериментальные исследования радиочастотных смесителей. // Радиотехника. 1988. № 10.
2. *Дансмор, Джоэль П.* Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей: Джоэль П. Дансмор; перевод с английского и научная редакция Е. Ю. Харитоновой [и др.]. - Москва: Техносфера, 2019. - 735 с.: ил., табл.; 25 см. - (Мир радиоэлектроники / Минпромторг России; XVII-32); ISBN 978-5-94836-505-3: 1500 экз. стр.557.
3. *Дансмор, Джоэль П.* Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей: Джоэль П. Дансмор; перевод с английского и научная редакция Е. Ю. Харитоновой [и др.]. - Москва: Техносфера, 2019. - 735 с.: ил., табл.; 25 см. - (Мир радиоэлектроники / Минпромторг России; XVII-32); ISBN 978-5-94836-505-3: 1500 экз. стр.534.
4. *Дансмор, Джоэль П.* Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей: Джоэль П. Дансмор; перевод с английского и научная редакция Е. Ю. Харитоновой [и др.]. - Москва: Техносфера, 2019. - 735 с.: ил., табл.; 25 см. - (Мир радиоэлектроники / Минпромторг России; XVII-32); ISBN 978-5-94836-505-3: 1500 экз. стр.560.
5. *Дансмор, Джоэль П.* Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей: Джоэль П. Дансмор; перевод с английского и научная редакция Е. Ю. Харитоновой [и др.]. - Москва: Техносфера, 2019. - 735 с.: ил., табл.; 25 см. - (Мир радиоэлектроники / Минпромторг России; XVII-32); ISBN 978-5-94836-505-3: 1500 экз. стр.564.

6. Коротков К.С. Мальников В.Е. Суровенный В.Г. Способ определения сдвига фаз четырехполюсников с преобразователем частоты / А.с. СССР № 1475347 G01R 27/28 с приоритетом от 13.12.86. Зарегистр. 22.12.86.

Сердюков Владимир Владимирович, старший преподаватель кафедры радиофизики и нанотехнологий Кубанского государственного университета, Россия, город Краснодар, улица Ставропольская 149, 350040, телефон: +7 968 644 44 68.

Serdyukov Vladimir Vladimirovich, Senior Lecturer, Department of Radiophysics and Nanotechnology, Kuban State University, Krasnodar, Russia, 149 Stavropol Street, 350040, phone: +7 968 644 44 68.