

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.8.9>

УДК: 621.396

МЕТОД ОЦЕНКИ СМЕЩЕНИЯ ЧАСТОТЫ ВСТРОЕННОГО ГЕНЕРАТОРА РЕТРАНСЛЯТОРА ОТНОСИТЕЛЬНО НОМИНАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЛИГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА

**Н.О. Кузьмин, С.С. Журавлев, А.А. Савин,
Е.В. Андронов, К.Н. Рошин, Е.Д. Морозов**

**ООО Научно-производственная компания «ТЕСАРТ»,
634015, г. Томск, ул. Циолковского, 19**

Статья поступила в редакцию 12 мая 2025 г.

Аннотация. Стремительная модернизация радиоэлектронных средств приводит к росту требований к ним. Такие устройства должны быстро проходить тестирование на соответствия ограничениям. Для этого необходимо отыскивать способы и методы измерения характеристик устройств, обеспечивающие метрологические требования. В работе представлен метод измерения смещения частоты встроенного генератора ретранслятора спутника связи относительно номинального значения с применением полигармонического сигнала. Рассмотрена измерительная установка, в нее входит два генератора, исследуемое устройство (смеситель) и цифровой осциллограф. Синхронизация генератора, высокочастотный сигнал которого поступает на радиочастотный вход смесителя, и цифрового осциллографа осуществляется опорным сигналом генератора. Для имитации смещения частоты на гетеродинный вход смесителя подается сигнал с детерминированной ошибкой, постоянной на интервале измерения. Сигнал регистрируется на цифровом осциллографе, и затем выполняется переход в частотную область с помощью модуля VSA. Далее, используя

значения приращения фазы, вычисляется смещение частоты. Детерминированная ошибка задавалась в диапазоне от -1 кГц до 1 кГц. Для каждого значения проводилось 3 измерения. При использовании синхронизации по векторному генератору сигналов получены ошибки установки частоты относительно номинальных значений, отражающие систематическую ошибку предложенного метода измерения.

Ключевые слова: векторный генератор сигналов, встроенный гетеродин, смещение частоты, цифровой осциллограф.

Финансирование: Работа выполнена в рамках программы развития Передовой Инженерной Школы «Электронное приборостроение и системы связи» им. А.В. Кобзева.

Автор для переписки: Кузьмин Никита Олегович kuzjmin.nikita23@gmail.com

Введение

В настоящее время радиоэлектронные средства (РЭС) получили широкое применение во многих сферах жизнедеятельности людей. К примеру, в системах космической связи. Техническое обеспечение данной сферы является важным, поскольку она поддерживает суверенитет и безопасность стран. В большом комплексе различных РЭС применяются ретрансляторы-конвертеры. Такие устройства предназначены для приема сигнала от радиопередатчика, обработки (восстановления и усиления) принятого сигнала и излучения этого сигнала к приемнику. Ретрансляторы-конвертеры нашли широкое применение в системах спутниковой связи, устанавливая связь в труднодоступных местах на Земле и за её пределами (космические спутники) [1]. В современном мире, в период активной популяризации 5G и разработки 6G связи системы ретрансляторов стали незаменимым средством для обеспечения корректного функционирования этих систем [2,3]. При отработке характеристик таких устройств крайне важными вопросами является точность и повторяемость результатов измерений с использованием любой измерительной методики. Также немаловажной задачей является сокращение времени измерений,

что приводит к удешевлению производства. Для этого используют сложный тестовый сигнал, который позволяет в результате измерений получать несколько интересующих характеристик.

1. Методы и подходы

Преобладающая часть измерений основывается на знании значений частот сигналов (высоких частот, промежуточных частот и частот гетеродина). Существуют преобразователи частоты, у которых встроенные источники сигнала гетеродина с внутренним питанием. В некоторых случаях при работе с ними можно использовать сигнал синхронизации REF 10 MHz. В других, доступ к ним ограничен, и использование опорного сигнала не предоставляется возможным. Такие измерения принято называть измерениями со «встроенным гетеродином» [4].

Смещение частоты является нежелательным и негативным эффектом при выполнении измерений. Это значение разницы между предполагаемой (ожидаемой) и фактической частотами сигнала. При измерении, к примеру, фазовых или частотно-зависимых характеристик смещение частоты приводит к ошибке, что в дальнейшем может привести к некорректной работе оборудования. Для предупреждения этого используют различные методы измерения смещения частоты [5]. На рисунке 1 представлены обобщенные структурные схемы измерительной установки для оценки смещения частоты гетеродина. На рис. 1: Γ_1 – генератор, формирующий воздействующий сигнал; Γ_2 – генератор, формирующий сигнал гетеродина; ЦО – цифровой осциллограф. Стоит отметить, что на схеме слева обеспечена синхронизация для Γ_1 , Γ_2 и ЦО. В таком случае, смещение частоты для сигнала гетеродина отсутствует. На рисунке справа видно, что сигнал синхронизации отсутствует для гетеродина. Это соответствует ситуации, когда присутствует смещение частоты встроенного гетеродина. Рассматривая гетеродин (в ретрансляторе), стоит понимать, что это устройство с изменением частоты. Существует известный метод тестирования их, например, основанный на применении векторного анализатора цепей, однако, он требует

сложных алгоритмов калибровки и конфигурации оборудования, что приводит к большому времени измерения. Для предупреждения этого можно прибегнуть к использованию полигармонического сигнала в качестве зондирующего. Такой сигнал содержит информацию об амплитуде и фазе каждой гармоники, входящей в его состав. Это позволяет получать характеристики исследуемого устройства одновременно в широкой полосе частот.

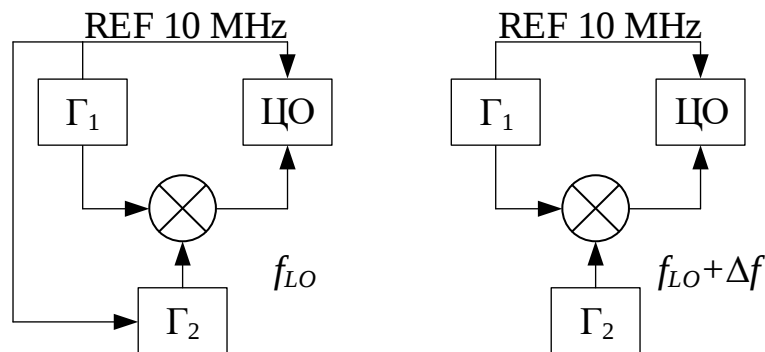


Рис. 1. Обобщенные структурные схемы измерительной установки для оценки смещения частоты гетеродина.

При использовании полигармонического сигнала, исходный сигнал с Γ_1 может быть задан следующими выражениями:

$$s(t) = \text{Re}[\dot{S}(t) \cdot \exp(j\omega_0 t)]; \quad (1)$$

$$\dot{S}(t) = \sum_{k=1}^N A_k \cdot \exp[j(\Omega_k t + \theta_k)], \quad (2)$$

где t – время (с); A_k – амплитуды гармонических составляющих сигнала; Ω_k – угловые частоты относительно несущей (рад/с); θ – начальные фазы (рад); N – количество тонов в сигнале.

С выхода гетеродина на смеситель подается гармонический сигнал с частотой гетеродина f_{Lok} . Ожидается получение на выходе сигнала промежуточной частоты и его регистрация на приемном устройстве, однако в действительности, в виду не идеальности работы системы, будет наблюдаться сигнал со смещенной частотой [7]. Для оценки смещения можно полагать, что оно является фиксированным (постоянным) на интервале измерения. Немаловажным является факт постоянства смещения частоты, независимо

от частоты тона. Это позволяет проводить анализ обособленно, к примеру, для одного тона.

Проведен эксперимент с измерением частоты смещения полигармоническим тестовым сигналом с фиксированным смещением частоты для векторного генератора сигналов и цифрового осциллографа [8,9].

Рассмотрим экспериментальную установку, генератор [10] соединен с цифровым осциллографом [11] кабельной сборкой с опорным сигналом *REF* 10 MHz для синхронизации. Далее необходимо установить фиксированное смещение частоты и провести серию измерений. Первое измерение с включенной синхронизацией по векторному генератору сигналов. В таком случае, должно быть определено точное значение фиксированного смещения. Второе измерение производится без синхронизации, в таком случае будет видно значение, отличное, от фиксированного смещения частоты. В формирование этого значения вносят вклад встроенные генераторы и векторного генератора сигналов, и цифрового осциллографа (вместо встроенного гетеродина). Далее выполняются аналогичные измерения с различной фиксированным смещением. На рисунке 2 представлена схема измерительной установки для оценки смещения частоты векторного генератора сигналов. Рассматривался ряд следующих отстроек: 0 Гц, ± 1 Гц, ± 100 Гц, ± 1 кГц.

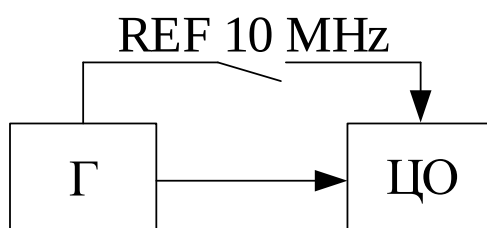
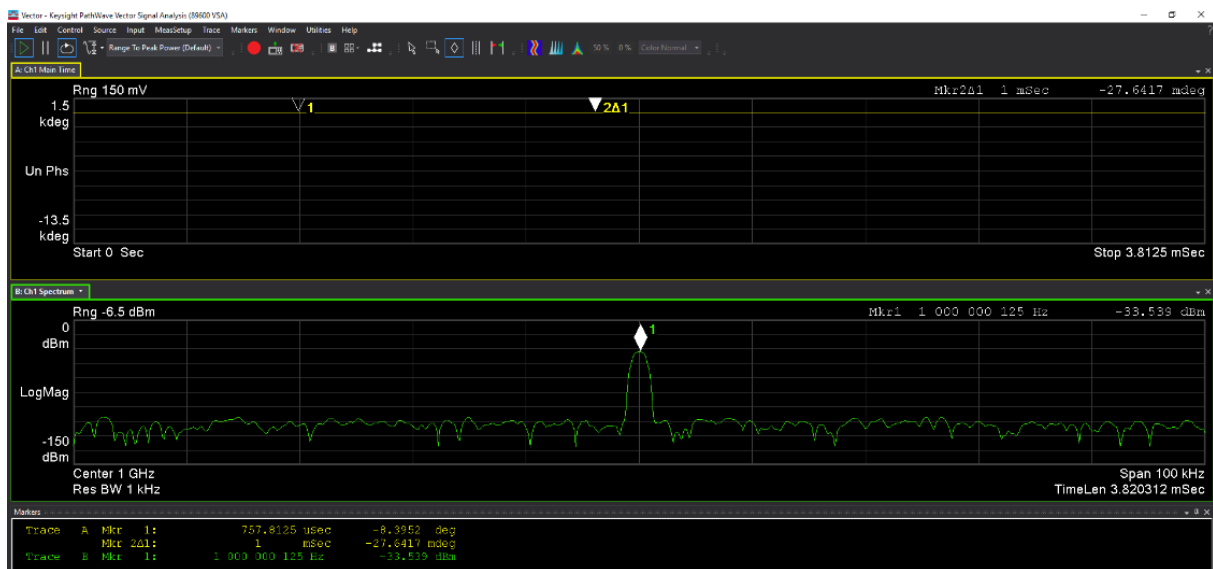


Рис. 2. Схема измерительной установки.

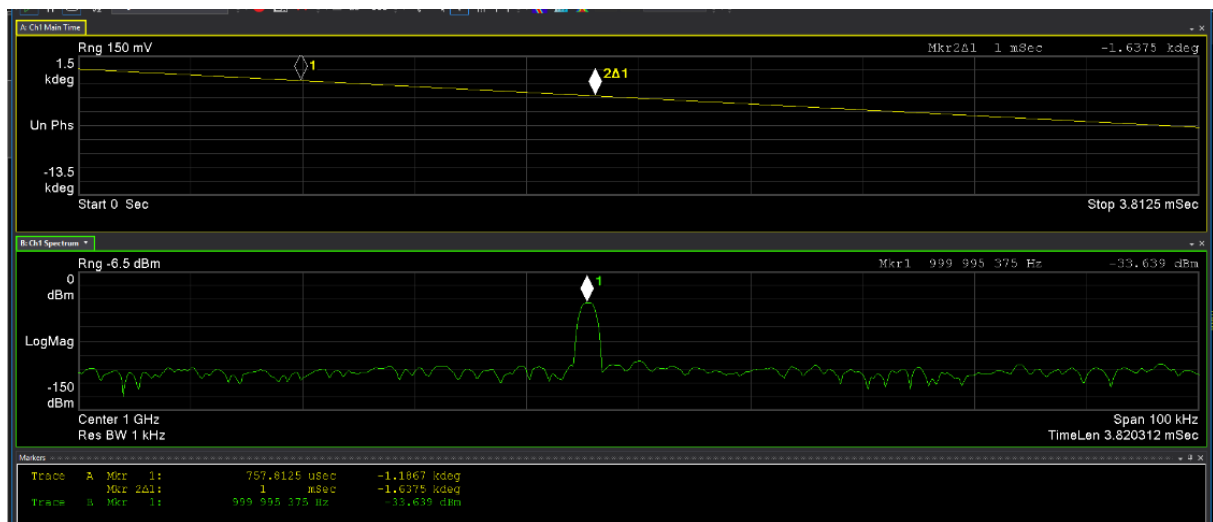
На цифровом осциллографе при регистрации сигнала во временной области есть возможность перехода в частотную область в режиме реального времени с использованием программной опции VSA. Таким образом, наблюдая сигнал или отдельную составляющую в частотной области, имеется возможность применения математического аппарата к ним. В данном случае, рассматриваемой величиной является мгновенное приращение фазы, которое

связано со смещением частоты. На экране осциллографа наблюдается фрагмент амплитудного спектра на входе ЦО, представленный на рисунке 3. На нем рассматривается один тон полигармонического сигнала с настройкой полоснопропускающего фильтра, равной 100 кГц (полоса обзора). На второй части дисплея видно изменение мгновенной фазы во времени. На этом графике установлены два маркера, разнесенные во времени на 1 мс. Это необходимо для наблюдения разницы в угле наклона фазы, что свидетельствует об изменении частоты [12]. Можно заметить, что разница между двух точек составила минус $27,64 \cdot 10^{-3}^\circ$. Ниже приведен расчет отстройки по частоте для данного приращения фазы. Зная изменение угла наклона фазы и временной интервал, за который произошло это изменение, можно определить значение смещения частоты. На рисунке 4 представлены результаты измерения полигармонического сигнала с использованием синхронизации и без неё.

$$\Delta f = \frac{\left(\frac{\Delta \varphi \cdot \left(\frac{\pi}{180^\circ} \right)}{\Delta t} \right)}{2 \cdot \pi} = \frac{\left(\frac{-27,6417 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{\pi}{180^\circ} \right)}{1 \cdot 10^{-3}} \right)}{2 \cdot \pi} = -0,075 \text{ Гц.} \quad (3)$$

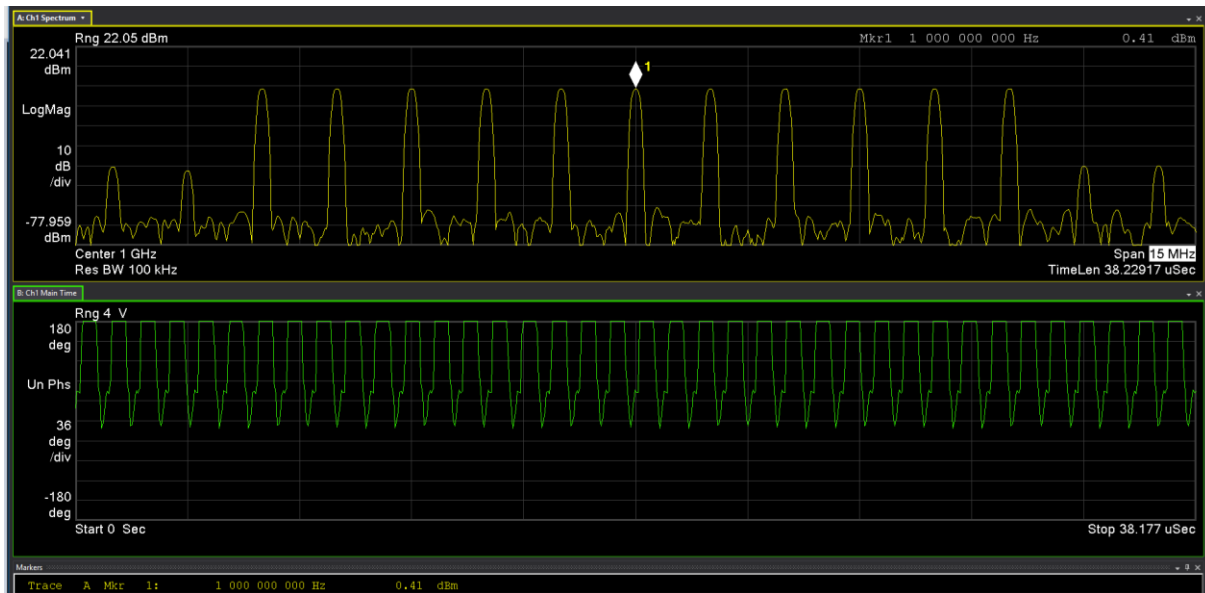


a)

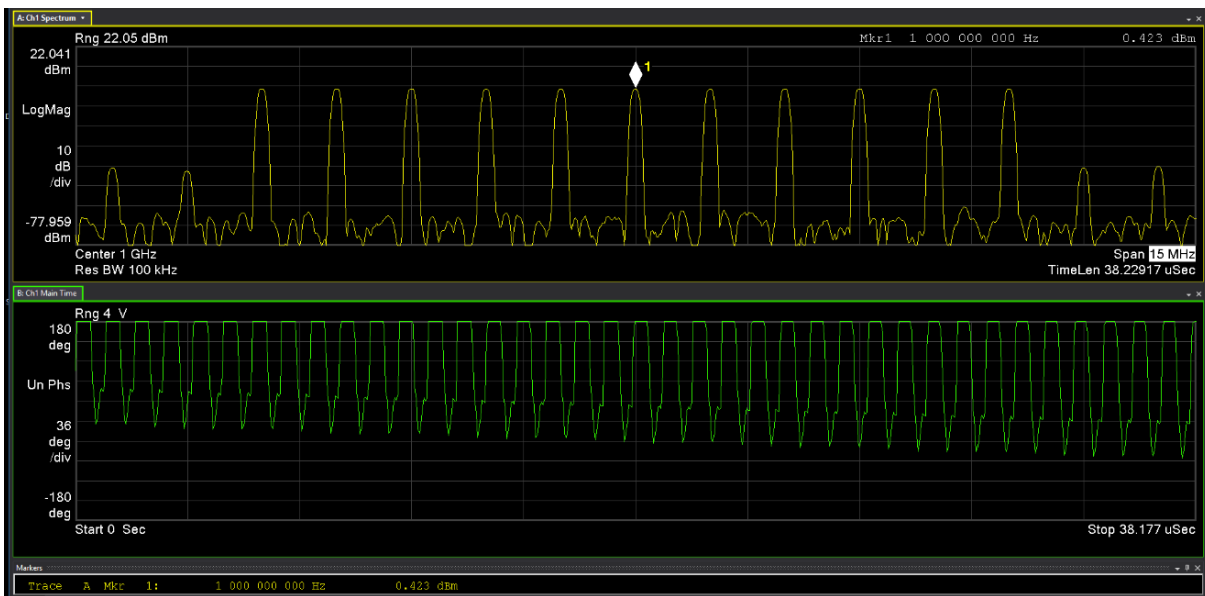


б)

Рис. 3. Результат измерения на экране осциллографа с синхронизацией (а) и без синхронизации (б).



а)



б)

Рис. 4. Результат измерения на экране осциллографа с синхронизацией (а) и без синхронизации (б).

Отрицательный знак у изменения фазы указывает на отстройку от несущей частоты в область более низких частот. Таким образом, для каждой отстройки проведено по три измерения. Ниже приведены таблицы с измеренными значениями приращения частоты для одного тона на несущей частоте $f_{\text{несущей}} = 1$ ГГц при различных отстройках по частоте с использованием и без синхронизации. В строке «разница» указаны разностные значения между фиксированными смещениями частот и максимально отличающимися значениями фактических частот.

Таблица 1. Измеренные значения приращения частоты для одного тона на несущей частоте при различных отстройках по частоте с синхронизацией.

Отстройка, Гц	-1000	-100	-1	0	1	100	1000
Реализация							
1	-999.992	-100.027	-1.020	0.011	0.976	99.983	1000.010
2	-999.997	-100.014	-1.010	-0.017	0.992	100.017	999.991
3	-999.998	-99.945	-0.987	-0.001	1.005	99.977	999.996
Разница	-0.007	-0.054	0.021	-0.017	-0.023	0.017	0.011

Таблица 2. Измеренные значения приращения частоты для одного тона на несущей частоте при различных отстройках по частоте без синхронизации.

Отстройка, Гц	-1000	-100	-1	0	1	100	1000
№ реализации							
1	-5485.221	-4600.264	-4541.052	-4551.438	-4484.921	-4378.712	-3476.434
2	-5484.463	-4593.653	-4538.213	-4547.199	-4482.858	-4379.448	-3475.637
3	-5484.532	-4590.251	-4536.29	-4545.580	-4481.808	-4379.976	-3475.924
Разница	-4485.22	-4500.264	-4540.052	-4551.438	-4485.921	-4479.976	-4476.434

Из рисунка 3 и таблиц 1, 2 видно, что при отсутствии синхронизации показания осциллографа сильно рознятся с ожидаемыми значениями, в то время как, при использовании синхронизации наибольшая ошибка равняется минус 0,0546 Гц, что является много меньшим значением ошибки относительно ошибок без синхронизации. Видно, что без использования синхронизации три зависимости имеют схожие значения на малом интервале получения всех экспериментальных записей. Стоит отметить, что в полученный результат внесли вклад как векторный генератор сигналов, так и цифровой осциллограф. Реализации сняты в промежутке минуты друг за другом, при повторном включении вполне возможно наблюдать значения, отличные от представленных выше.

Таким образом, установлено, что при проведении измерений смещения частоты встроенного гетеродина относительно номинального значения, можно задаться предельным значением систематической ошибки (ВГС и ЦО), равной минус 0,0546 Гц. Таблица 1 показывает измеренную погрешность используемой измерительной системы (при использовании синхронизации), она отражает точность метода. Таблица 2 отражает поведение реальной системы. При отсутствии синхронизации важно учитывать влияние дрейфа частоты и фазового шума, что также актуально в контексте использования

генераторов сигналов [13]. В таких системах генераторы имеют различную частоту, что приводит к ошибке при измерениях. При измерении разности фаз ошибка определяется согласно [14]:

$$\text{Ошибка установления частоты (в градусах)} = PPM \cdot F_{LO} \cdot T \cdot 360^\circ, \quad (4)$$

где PPM – разница частот генераторов миллионных долях [PPM]; F_{LO} – частота встроенного гетеродина [МГц]; T – интервал времени между точками измерения, контролируемый микропроцессором [с] фазы тонов, задаются согласно выбранному распределению

Заключение

В работе представлена методика измерения смещения частоты встроенного генератора ретранслятора относительно номинального значения с применением полигармонического сигнала. Рассмотрена измерительная установка, включающая в себя векторный генератор сигналов и цифровой осциллограф.

Для нее проведен эксперимент с измерением частоты смещения встроенных генераторов для всей измерительной системы с использованием и без синхронизации. Рассмотрены значения фиксированного смещения частоты в диапазоне от -1 кГц до 1 кГц. Для каждого значения фиксированного смещения проводилось три измерения, после чего определялось фактическое смещение частоты для каждого. при отсутствии синхронизации показания осциллографа сильно рознятся с ожидаемыми значениями, в то время как, при использовании синхронизации наибольшая ошибка равняется минус $0,0546$ Гц, что является много меньшим значением ошибки относительно ошибок без синхронизации. Видно, что без использования синхронизации три зависимости имеют схожие значения на малом интервале получения всех экспериментальных записей. Наибольшее значение ошибки установления частоты составило минус 4551.4381 при установке сигнала на частоту 1 ГГц без использования фиксированного смещения частоты. Наибольшее значение

ошибки установления частоты составило 0.0546 Гц при фиксированном смещении частоты, равном 100 Гц (с использованием синхронизации). Полученные значения отображают погрешность предложенного метода (измерения) и влияния нескольких генераторов на результаты измерения (присутствие некоторой ошибки).

Стоит отметить, что метод ограничен точностью измерительного оборудования. Во-первых, быстрое преобразование Фурье может вносить некоторое смещение частоты. Во-вторых, при нестабильной работе системы не исключено расхождение тактовой частоты, что может привести к некорректной работе цифро-аналогово преобразователя, что в свою очередь так же внесет свои неточности. При выполнении калибровки, исключается систематическая погрешность и остается случайная аддитивная погрешность, связанная со стабильностью генератора.

Данное исследование актуально в контексте применения нескольких генераторов и присутствия фазового шума, поскольку появляется проблема дрейфа сигнала и частоты соответственно. В качестве перспектив работы является проведение эксперимента с целью излечения ошибки установления частоты у встроенного генератора смесителя. Помимо этого, необходимо оценить метрологические характеристики предлагаемого метода.

Финансирование: Работа выполнена в рамках программы развития Передовой Инженерной Школы «Электронное приборостроение и системы связи» им. А.В. Кобзева.

Литература

1. Волков Р. В., Саяпин В. Н., Севидов В. В. Локализация земных станций по радиосигналам спутников-ретрансляторов //Инновационная деятельность в Вооруженных Силах Российской Федерации. – 2016. – С. 70-75.
2. Holma H., Toskala A., Nakamura T. (ed.). 5G technology: 3GPP evolution to 5G-advanced. – John Wiley & Sons, 2024.

3. Chowdhury M. Z. et al. 6G wireless communication systems: Applications, requirements, technologies, challenges, and research directions //IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2020. – Т. 1. – С. 957-975.
4. Дансмор Д. П. Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей //Москва: Техносфера. – 2018.
5. Ермоленко И. А., Кононов Е. А. Метод измерения флуктуационной нестабильности частоты колебаний высокочастотных генераторов с преобразованием колебаний в диапазон низких частот //Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2009. – №. 4. – С. 50-56.
6. Габриэльян Д. Д. и др. Метод оценки частот в системе генераторов //Физические основы приборостроения. – 2012. – Т. 1. – №. 2. – С. 72-77.
7. Shibasaki Y. et al. Analysis and design of multi-tone signal generation algorithms for reducing crest factor //2020 IEEE 29th Asian Test Symposium (ATS). – IEEE, 2020. – С. 1-6.
8. Van Nee R. D. J., Prasad R. OFDM for wireless multimedia communications. – 2000.
9. Measuring on generic OFDM Signals [Электронный ресурс]. – URL: https://scdn.rohdeschwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ef65/1EF65.pdf (дата обращения: 10.10.2024).
10. Manoliu L. et al. Frequency and Phase Investigation of the Local Oscillator Offset in a W-Band Satellite Communication Link //2023 53rd European Microwave Conference (EuMC). – IEEE, 2023. – С. 360-363.
11. M9383B VXG-m Microwave Signal Generator [Электронный ресурс] – URL: <https://www.keysight.com/us/en/product/M9383B/vxg-m-pxie-microwave-signal-generator.html> (дата обращения: 12.10.2024).
12. Infinium MXR B-series [Электронный ресурс] – URL: <https://www.keysight.com/us/en/assets/3123-1557/data-sheets/Infinium-MXR-B-Series.pdf> (дата обращения: 12.10.2024).

13. Measuring Group Delay of Frequency Converters with Embedded Local Oscillators [Электронный ресурс] – URL: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-01676/application-notes/5989-7385.pdf> (дата обращения 15.10.2024).
14. Stickle K. System and method of VNA S-parameter measurement with a remote receiver: пат. 10386444 США. – 2019.

Для цитирования:

Кузьмин Н.О., Журавлев С.С., Савин С.С., Андронов Е.В., Рощин К.Н., Морозов Е.Д. Методика оценки смещения частоты встроенного генератора ретранслятора относительно номинального значения с применением полигармонического сигнала. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.8.9>