

Измерение кратковременной нестабильности частоты сверхстабильных квазигармонических сигналов

Нсуе Хасинто Мба Бийе, С. В. Кучерявенко, В.П. Федосов

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: Работа посвящена определению нестабильности частоты генераторов, которые обеспечивают синхронизацию цифровых сетей связи. В работе предложен алгоритм обнаружения кратковременной нестабильности частоты сверхстабильных квазигармонических колебаний.

Ключевые слова: синхронизация, нестабильность, частота, вариация Алана, умножительно-преобразовательный критерий, гармоники.

Задача измерения частоты сигналов, а также обеспечения ее стабильности является актуальной задачей в областях науки как, например: радиоэлектронике, приборостроении, электронике, электросвязи, медицине и других. Приборами, выполняющими эти измерения, являются частотомеры, с определёнными степенями чувствительности. На данный момент самые чувствительные измерительные приборы способны обнаружить относительную нестабильность, лежащую в пределах от 10^{-9} до 10^{-11} , а сверхстабильные квазигармонические колебания, которые обеспечивают синхронизацию цифровых сетей связи, обладают относительной нестабильностью частоты порядка от 10^{-13} до 10^{-14} и меньше в течение двух секунд.

Цель работы представляет собой разработку алгоритма определения кратковременной нестабильности частоты сверхстабильных квазигармонических колебаний, для последующей возможности ее измерения обычными методами.

Задача этой статьи заключается в выполнении требований, изложенных в ее названии: были рассмотрены современные методы измерения кратковременной нестабильности частоты высокостабильных квазигармонических сигналов, такие как, например: вариация Алана, вариация Адамара или модифицированная вариация Алана.

Приступим к рассмотрению измерения кратковременной нестабильности частоты квазигармонических колебаний, путем умножительно-преобразовательного критерия [1]. Для этого рекомендуется вспомнить суть умножения частоты, которая заключается в процессе получения колебаний с частотой, кратной частоте исходного колебания. Сущность метода заключается в следующем: имеются два сигнала:

$$s_1(t) = A_0 \cos[\omega_0 t + \phi_1(t)], \quad s_2(t) = A_0 \cos[\omega_0 t + \phi_2(t)], \quad (1)$$

которые отличаются только мгновенной фазой, а все остальные параметры считаются одинаковыми. Эти сигналы подвергаются обработке по следующей схеме [2]:

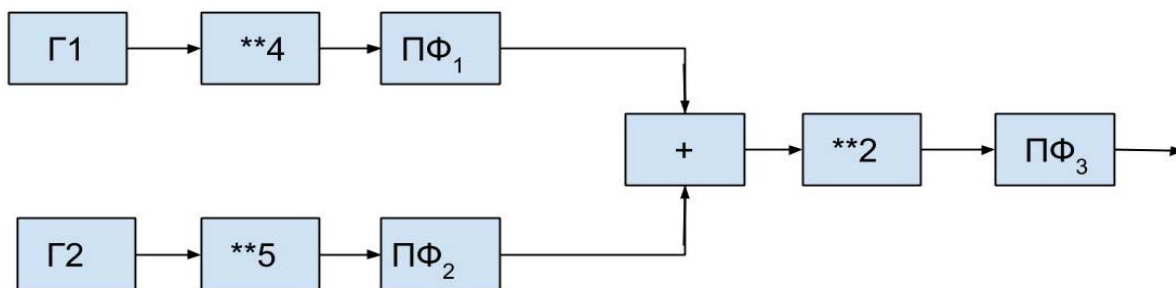


Рис. 1. – Структура умножительно-преобразовательных операций

На первом этапе обработки сигналов происходит возведение сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$ в четвертую и в пятую степень соответственно. Аналитический процесс преобразования или возведения сигнала Γ_1 или $s_1(t)$ в четвертую степень проводится в соответствии с выражением (2):

$$\begin{aligned} [s_1(t)]^4 &= A_0^4 \cos^4[\omega_0 t + \phi_1(t)] = \\ &= A_0^4 \left[\frac{1 + \cos 2[\omega_0 t + \phi_1(t)]}{2} \right] \left[\frac{1 + \cos 2[\omega_0 t + \phi_1(t)]}{2} \right] = \\ &= \frac{A_0^4}{4} (3 + 4 \cos[2\omega_0 t + 2\phi_1(t)] + \cos[4\omega_0 t + 4\phi_1(t)]) = \\ &= 3 \frac{A_0^4}{4} + A_0^4 \cos[2\omega_0 t + 2\phi_1(t)] + \frac{A_0^4}{4} \cos[4\omega_0 t + 4\phi_1(t)] \end{aligned} \quad (2)$$

Процесс возведения сигнала Г2 или $s_2(t)$ в пятую степень проводится в соответствии с выражением (3):

$$\begin{aligned} [s_2(t)]^5 &= A_0^5 \cos^5[\omega_0 t + \phi_2(t)] = A_0^5 \cos[\omega_0 t + \phi_2(t)] \cos^4[\omega_0 t + \phi_2(t)] = \\ &= A_0^5 \cos[\omega_0 t + \phi_2(t)] \cdot \frac{1}{4} (3 + 4 \cos[2\omega_0 t + 2\phi_2(t)] + \cos[4\omega_0 t + 4\phi_2(t)]) = \\ &= \frac{A_0^5}{4} \left(3 \cos[\omega_0 t + \phi_2(t)] + 4 \left(\frac{1 + \cos[2\omega_0 t + 2\phi_2(t)]}{2} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \cos[\omega_0 t + \phi_2(t)] \cos[4\omega_0 t + 4\phi_2(t)] \right) = \\ &= \frac{A_0^5}{4} \left(3 \cos[\omega_0 t + \phi_2(t)] + 2 + 2 \cos[2\omega_0 t + 2\phi_2(t)] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} (\cos[3\omega_0 t + 3\phi_2(t)] + \cos[5\omega_0 t + 5\phi_2(t)]) \right) = \\ &= \frac{A_0^5}{2} + \frac{3A_0^5}{4} \cos[\omega_0 t + \phi_2(t)] + \frac{A_0^5}{2} \cos[2\omega_0 t + 2\phi_2(t)] + \\ &\quad + \frac{A_0^5}{8} \cos[3\omega_0 t + 3\phi_2(t)] + \frac{A_0^5}{8} \cos[5\omega_0 t + 5\phi_2(t)] \end{aligned} \quad (3)$$

Преобразования этих двух сигналов имеют последние слагаемые, самые высокие гармоники сформированных квазигармонических сигналов.

На втором этапе преобразования полученные колебания фильтруются полосовыми фильтрами, настроенными на четвертую гармонику исходного колебания в полосовом фильтре ПФ1

$$u_1(t) = U_0 \cos[4\omega_0 t + 4\phi_1(t)] \quad (4)$$

и на пятую гармонику в полосовом фильтре ПФ2

$$u_2(t) = U_0 \cos[5\omega_0 t + 5\phi_2(t)], \quad (5)$$

колебания на выходах полосовых фильтров складываются

$$u_1(t) + u_2(t) = U_0 (\cos[4\omega_0 t + 4\phi_2(t)] + \cos[5\omega_0 t + 5\phi_2(t)]) \quad (6)$$

и сумма возводится во вторую степень (7).

Фильтры, используемые в преобразовании, на рисунке 1 обозначаются с индексами, так как они отличаются по частоте: ПФ1, ПФ2.

Фильтр ПФ1 настроен на четвертую гармонику основной частоты исходного сигнала $s_1(t)$, а фильтр ПФ2 – на пятую гармонику частоты сигнала $s_2(t)$.

$$\begin{aligned} [u_1(t) + u_2(t)]^2 &= U_0^2 \left[\begin{aligned} &\cos^2 [4\omega_0 t + 4\phi_1(t)] + \\ &+ \cos^2 [5\omega_0 t + 5\phi_2(t)] + \\ &+ 2(\cos [4\omega_0 t + 4\phi_1(t)] \cos [5\omega_0 t + 5\phi_2(t)]) \end{aligned} \right] = \\ &= U_0^2 \left[\begin{aligned} &\cos [\omega_0 t + 5\phi_2(t) - 4\phi_1(t)] + \\ &+ \cos [9\omega_0 t + 4\phi_1(t) + 5\phi_2(t)] + 1 + \\ &+ \frac{1}{2} \cos [8\omega_0 t + 8\phi_1(t)] + \\ &+ \frac{1}{2} \cos [10\omega_0 t + 10\phi_2(t)] \end{aligned} \right] = \\ &= U_0^2 \cos [\omega_0 t + 5\phi_2(t) - 4\phi_1(t)] + U_0^2 \cos [9\omega_0 t + 4\phi_1(t) + 5\phi_2(t)] + \\ &+ \frac{U_0^2}{2} \cos [8\omega_0 t + 8\phi_1(t)] + \frac{U_0^2}{2} \cos [10\omega_0 t + 10\phi_2(t)] \end{aligned} \quad (7)$$

На третьем этапе суммарное колебание фильтруется в полосовом фильтре ПФ3, настроенном на комбинационную составляющую, по частоте равную частоте исследуемых генераторов. И в итоге получаем:

$$u(t) = U \cos[\omega_0 t + 5\phi_2(t) - 4\phi_1(t)] \quad (8)$$

Применяя преобразование Гильберта к выражению (8), автоматически получим отдельно все присутствующие в нем величины, в зависимости от их размерностей.

Из вышесказанного вытекает следующее выражение, для полной флуктуирующей частоты:

$$\frac{d\Psi}{dt} = \omega_0 + \frac{d[5\phi_2(t) - 4\phi_1(t)]}{dt} \quad (9)$$

Из производной (9) получим однозначную сумму двух случайных процессов $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$.

Суммарная дисперсия случайных процессов определяется следующим образом:

$$\sigma_{\Sigma, \Delta}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 \pm 2R\sigma_1\sigma_2 \quad (10)$$

Случайные процессы $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ являются независимыми, следовательно, коэффициент корреляции между ними равен нулю $R=0$. Поэтому формула (10) преобразовывается:

$$\sigma_{\Sigma, \Delta}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 \quad (11)$$

И так, разностное среднеквадратическое отклонение в итоге получается:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{25\sigma^2 + 16\sigma^2} = 6,4\sigma \quad (12)$$

Коэффициент 6,4 в формуле (12) показывает, во сколько раз увеличилась нестабильность частоты.

Таким образом, предложен алгоритм оценки предельно малых значений кратковременной нестабильности частоты, основанный на умножении флуктуаций частоты одновременно с умножением самой частоты. В результате работы алгоритма, приходим к выводу об увеличении нестабильности частоты квазигармонического колебания в 6,4 раза по среднеквадратическому отклонению и в 41 раз по дисперсии.

Работа выполнена при поддержке инициативного научного проекта №ВнГр-07/2017-25 Южного федерального университета.

Литература

1. Нсуе Х.М.Б., Федосов В.П., Терешков В.В. Оценка нестабильности частоты с помощью показателей во временной области // Ростовский научный журнал. 2016. №6. С. 5-15.

2. Рыжов В.П., Федосов В.П. Многопользовательское пространственно-временное кодирование и декодирование в системе связи на основе антенных решеток // Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн». - Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2003. - С. 15-19.

3. Нсуе Х.М.Б., Федосов В.П. Цифровой алгоритм измерения кратковременной нестабильности частоты высокостабильных генераторов



умножительно-преобразовательным методом // Ростовский научный журнал. 2016. №6. С. 63-70.

4. Галустов Г.Г., Рыжов В.П. Выбор параметров сигналов при частотно-временных измерениях // Радиотехника. - 2004. - №4. - С. 4.

5. Федосов В.П., Муравицкий Н.С., Кучерявенко С.В. Техническая реализация и результаты испытаний пространственно-временного компенсатора отражений от подстилающей поверхности // Радиотехника. - 2008. - №11. - С. 89-92.

6. Федосов В.П., Муравицкий Н.С., Кучерявенко С.В. Повышение эффективности радиосвязи в релейском канале на основе антенных решеток // Радиотехника. - 2008. - №11. - С. 195-204.

7. Кучерявенко С.В., Рыжов В.П. Использование технологии National Instruments для моделирования случайных процессов и их преобразований // Материалы Международной научной конференции «Технологии National Instruments в науке, технике и образовании». - Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2006. - С. 15-17.

8. Fedosov V.P., Lomakina A.V., Legin A.A., Voronin V.V. Modeling of systems wireless data transmission based on antenna arrays in underwater acoustic channels // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Architectures, Algorithms, and Applications. - Baltimore: The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2016. - P. 98720.

9. Kucheryavenko A.V., Fedosov V.P. Model of multicomponent micro-Doppler signal in environment MatLab // XIII International Scientific-Technical Conference "Dynamics of Technical Systems" - "DTS-2017". - Rostov-na-Don: Serbian Journal of Electrical Engineering ISSN 1451-4869 (MATEC Web of Conferences 132, 05008 (2017) DTS-2017 URL: matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2017/46/matecconf_dts2017_05008.pdf), 2017



10. Синельщиков П.В., Новожилов А.С. Использование непрерывного вейвлет преобразования для диагностирования электроприводной арматуры // Инженерный вестник Дона, 2009, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2009/109

11. Кучерявенко А.В. Подавление турбинного эффекта радиолокационного сигнала в импульсно-доплеровской РЛС // Инженерный вестник Дона, 2017, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4440

References

1. Nsue J.M.B., Fedosov V.P., Terechkov V.V. Rostovskij nauchnyj zhurnal. 2016, №6. pp. 5-15.
2. Ryzhov V.P., Fedosov V.P. Trudy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Inluchenie i rassejanie jelektromagnitnyh voln". Taganrog: Izdatel'stvo Juzhnogo federal'nogo universiteta, 2003. pp. 15-19.
3. Nsue J.M.B., Fedosov V.P. Rostovskij nauchnyj zhurnal. 2016, №6. pp. 63-70.
4. Galustov G.G., Ryzhov V.P. Radiotekhnika. 2004. №4. P.4.
5. Fedosov V.P, Muravickij N.S., Kucherjavenko S.V. Radiotekhnika. 2008. №11. pp.89-92.
6. Fedosov V.P, Muravickij N.S., Kucherjavenko S.V. Radiotekhnika. 2008. №11. pp.195-204.
7. Kucherjavenko S.V., Ryzhov V.P. Materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Tehnologii National Instruments v nauke, tehnike i obrazovanii". Taganrog: Izdatel'stvo Juzhnogo federal'nogo universiteta, 2006. pp. 15-17.
8. Fedosov V.P., Lomakina A.V., Legin A.A., Voronin V.V. Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering Architectures, Algorithms, and Applications. Baltimore:



- The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2016.
P. 98720.
9. Kucheryavenko A.V., Fedosov V.P. XIII International Scientific-Technical Conference "Dynamics of Technical Systems". "DTS-2017". Rostov-na-Don: Serbian Journal of Electrical Engineering ISSN 1451–4869 (Scopus, DOAJ), 2017. pp. 59-64.
10. Sinel'shnikov P.V., Novozhilov A.S. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2009, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2009/109
11. Kucheryavenko A.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4440