

К. Л. ГОРЯЩЕНКО, канд. техн. наук, доц., Хмельницький національний університет, Хмельницький,

А. В. ШЕВЧУК, асп., Хмельницький національний університет, Хмельницький,

А. В. ЦЫРА, канд. техн. наук, ст. преп., Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова, Одесса

АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ СУММАРНОГО СИГНАЛА ДЛЯ МНОГОШКАЛЬНОГО ФАЗОВОГО МЕТОДА АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ЛИНИИ СВЯЗИ

Рассмотрены особенности применения фазового метода определения повреждений в проводниковой линии при применении ограничений, которые накладываются свойствами объекта исследования – проводниковой линией. Определено, что полученный суммарный сигнал будет состоять из сигналов отражений, которые имеют разную частоту вращения вектора угла отражения. Угол отражения входного сигнала определяется коэффициентом отражения, поэтому начальный угол сдвига фазы также является неизвестным. Установлено, что при применении методов цифрового спектрального анализа нужно определение составляющих сигнала при априори неизвестных значениях начального сдвига фазы, а также при априори нецелом количестве периодов, которые попадают в окно анализа. Ил. 3. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: суммарный сигнал; окно анализа; начальный угол сдвига фазы; угол отражения; спектральный анализ.

Постановка проблемы и анализ литературы. Фазовый метод определения состояния проводниковой линии, который базируется на появлении сигналов отражения тестового сигнала от повреждений, является достаточно удобным инструментом для анализа состояний линии. Простота анализа полученных данных широко применяется в задачах измерения расстояний к любому объекту. В современных исследованиях принято использовать однозначность трактовки полученной информации. Так в работах [1, 2] показано применение фазовых измерений, а в [3] – принципы построения нониусных фазометрических измерителей.

В предварительно проведенных исследованиях – в работе [4] было показано, что отраженные сигналы в фазовом методе на каждой частоте являются векторной суммой гармоничных сигналов на частоте тестирования, а суммарный вектор будет изменяться в зависимости от частоты сигнала. Причина заключается в изменении суммарного угла

сдвига фазы в каждом случае, для которого он определяется приростом угла сдвига фазы для каждого отражения от частоты. Следовательно, как это было показано, в первой части работы [5], имеет место, так называемое, вращение вектора отражения (или эквивалентная ему по смыслу – скорость изменения угла сдвига фазы отражения) от частоты с определенной угловой скоростью, которая определяется согласно выражения [5]:

$$\Omega = \frac{d\varphi}{d\omega}, \quad (1)$$

где $d\varphi$ – прирост угла сдвига фазы, который возникает при изменении частоты зондирующего сигнала на величину $d\omega$.

Сам же вектор отражения повернут на угол $d\varphi_0$, значение которого определяется средами прохождения и отражения тестового сигнала.

Однако, в [5] показано, что для отраженных сигналов начальный угол сдвига фазы не определен, поэтому известные методы анализа не могут давать правильный результат.

Цель статьи: Разработать новый метод анализа отраженных сигналов, в котором частота вращения вектора отражения от каждого повреждения обладает индивидуальным свойством.

Учитывая, что угол сдвига фазы для i -го повреждения определяется из известного выражения как

$$\varphi_i = \frac{2\pi \cdot 2l_i}{\lambda},$$

или, в более удобной форме, от круговой частоты ω_j зондирующего сигнала

$$\varphi_i = \frac{2\pi \cdot 2l_i}{v} \cdot f_j = 2 \frac{l_i}{v} \cdot (2\pi \cdot f_j) = 2\omega_j \frac{l_i}{v}, \quad (2)$$

где l_i – расстояние до i -го объекта, от которого возникает отражение; v – скорость распространения сигнала в среде, для безвоздушного пространства является скоростью света; ω_j – j -я частота зондирующего сигнала.

Из выражения (1) с учетом выражения (2) получим результирующее выражение, которое обуславливает частоту вращения вектора сигнала отражения от физического расстояния к повреждению или так называемую "мнимую" частоту вращения

$$\Omega_i = \frac{\left(2\omega_{j+1} \frac{l_i}{v}\right) - \left(2\omega_j \frac{l_i}{v}\right)}{\omega_{j+1} - \omega_j} = 2 \frac{l_i}{v} \cdot \frac{\omega_{j+1} - \omega_j}{\omega_{j+1} - \omega_j} = 2 \frac{l_i}{v}. \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что частота вращения вектора отражения для каждого отражения является независимой от частоты зондирующего сигнала, прямопропорционально зависит от расстояния к объекту – повреждению в линии связи. Для каждого объекта, который характеризуется отражением от него зондирующего сигнала, будет существовать собственная частота вращения вектора отражения. Учитывая тот факт, что повреждения в линии априори находятся на разных расстояниях, то это обуславливает полностью понятное следствие из выражения (3): частота вращения вектора индивидуальна, а, следовательно, и анализ сигналов фазовой дальнометрии следует рассматривать с точки зрения определения частот вращения соответствующих векторов отражения. Следовательно, можем сделать обоснованный вывод: частота вращения вектора отражения является индивидуальным свойством.

Нужно определить физическое содержание понятия "частота вращения вектора отражения". Представленное выше выражение (2) указывает на то, что при зондировании линии гармоническими колебаниями частотой ω_j будет получен ряд значений углов сдвигов фаз φ_i для каждого повреждения на соответствующей частоте. Важно заметить, что эти углы сдвигов фаз для входа будут представлены как векторная сумма в виде единственного вектора, положение которого определяется также единственным значением угла сдвига фазы. При последовательном изменении зондирующей частоты ω_j также будут изменяться углы сдвигов фаз для каждого повреждения.

Учитывая то, что генерирование зондирующего сигнала частотой ω_j и измерение соответствующего угла сдвига фазы для отражения (или отражений) происходит в физическом времени, то в произвольный момент времени можно определить только положение одной из точек, что представляет собой положение в пространстве суммарного вектора отражения для данной частоты. Выполняя последовательный перебор частот ω_j , можно установить форму сигнала отражения. Таким образом, вектор сигнала отражения отображается в определенном "мнимом времени", где функцию "времени" несет частота тестового сигнала.

Отсюда следует следующий вывод – суммарный сигнал, как функция от векторной суммы векторов отражений также существует

только в "мнимом времени", поскольку для ее создания необходима операция накопления результата для каждой частоты отдельно. С точки зрения организации процесса измерения, это предоставляет дополнительное преимущество – в процессе измерения возможно установление сигнала за определенный промежуток времени и дальше выполнять измерение сигнала отражения необходимо за произвольный промежуток времени. В отличие от измерений импульсным методом, это позволяет устранить влияние переходных процессов в момент изменения входных сигналов и выполнять измерение при устоявшихся параметрах.

Следовательно, угол сдвига фазы можно получить, оперируя произвольным значением зондирующей частоты. В реальности, доступные для применения частоты для проводниковой линии ограничены. На рис. 1 показан график изменения волнового сопротивления и принцип формирования окна рабочих частот.

Фактически, рис. 1 показывает, что для исследования можно использовать лишь ограниченный диапазон частот. При проведении зондирования проводниковой линии гармоническими сигналами в доступном частотном диапазоне мы можем получить значение углов также в определенном диапазоне. А это эквивалентно тому, что можно наблюдать лишь часть сигнала вращения вектора отражения или их совокупности, согласно выражения (2).

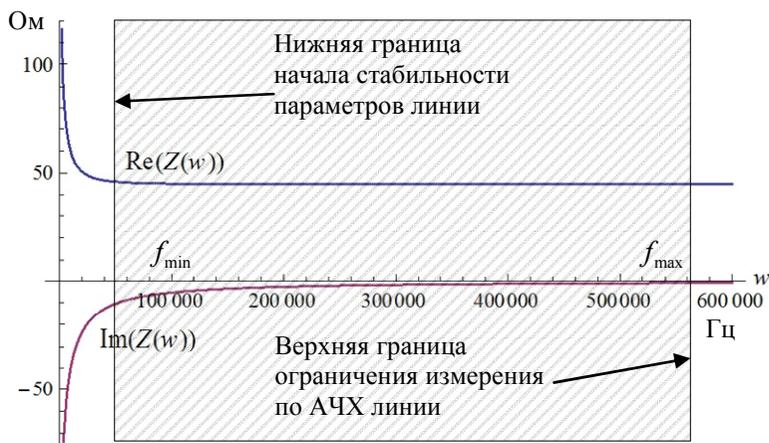


Рис. 1. Изменение действительной и мнимой частей волнового сопротивления линии $\dot{Z}_{волн}[\omega]$ и формирования окна рабочих частот

Дальнейший анализ выражения (2) показывает, что при применении ограничения частот от f_{min} до f_{max} диапазон изменения углов фазовых сдвигов из выражения (2) будет

$$\varphi_{i \min} = 2\omega_{j \min} \frac{l_i}{v}, \quad \varphi_{i \max} = 2\omega_{j \max} \frac{l_i}{v}, \quad (4)$$

а полное количество циклов вращения вектора отражения будет

$$N_{i \text{циклов}} = \frac{\varphi_{i \max} - \varphi_{i \min}}{2\pi}. \quad (5)$$

Анализ выражения (5) с учетом (4) показывает, что при теоретически доступной частоте зондирования в 0 Гц, начальные углы сдвигов фаз сигналов φ_i для любого расстояния l_i составляют 0 градусов. Учитывая ограничение (рис. 1), начальные углы сдвигов фазы в окне частот наблюдения принимают произвольные значения. Второй особенностью выражения (5) является то, что значение $N_{i \text{циклов}}$ не будет обязательно целым числом. Напротив, величина $N_{i \text{циклов}}$ будет дробной.

Представленные выше результаты указывают на то, что информация о расстояниях к повреждениям в проводниковой линии представлена в виде сигналов разной мнимой частоты вращения. Определим особенности измеренного сигнала, который представляет информационный сигнал согласно выражения (2) с условиями (4).

Прежде всего, ограничение в частотном диапазоне от f_{\min} до f_{\max} приведет к установлению начальных углов сдвигов фаз для каждого из сигналов. Из выражения (2) видно, что при $f_{\min} = 0$, начальная фаза также $\varphi_i \rightarrow 0$. А учитывая частоты ограничений, видно, что в диапазоне рабочих частот, сигналы отражений будут иметь определенное начальное значение угла сдвига фазы. На рис. 2 показаны начальные состояния для нескольких зондирующих сигналов разных частот. Как видно, начальная фаза сигналов разная.

Суммарный сигнал для рис. 2 представлен на рис. 3.

Следовательно, суммарный сигнал из уравнения (3) будет определяться в окне от f_{\min} до f_{\max} из выражения (2) для i -го повреждения как:

$$\varphi_{i \min} = \frac{2\pi \cdot 2l_i}{v} \cdot f_{\min},$$

$$\varphi_{i \max} = \frac{2\pi \cdot 2l_i}{v} \cdot f_{\max}.$$

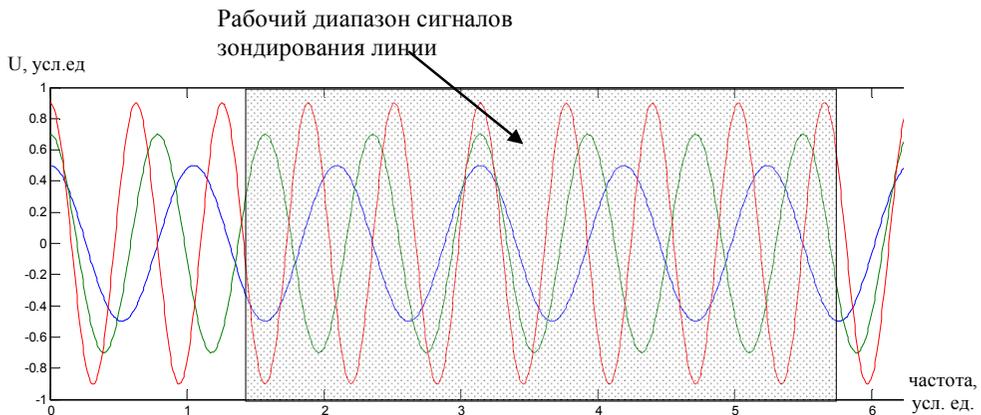


Рис. 2. Распределение проекций векторов от сигналов отражений для каждого угла сдвига φ_i (сигнал вида $0,5 \cos(6\varphi) + 0,7 \cos(8\varphi) + 0,9 \cos(10\varphi)$ для

диапазона $\varphi = 0..2\pi$, при условии что $\frac{l}{v}$ – целое число)

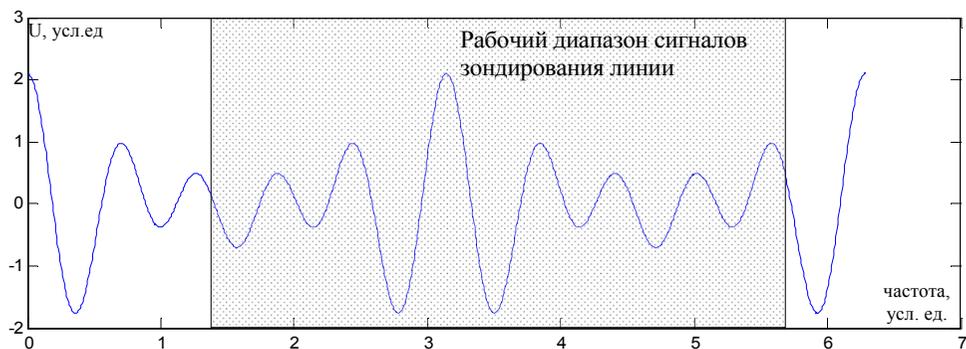


Рис. 3. Суммарный сигнал для сигналов рис. 2 (сигнал вида $0,5 \cos(6\varphi) + 0,7 \cos(8\varphi) + 0,9 \cos(10\varphi)$ для диапазона $\varphi = 0..2\pi$)

В работе [5] было принято предложение проводить анализ в диапазоне от 0 Гц. А как установлено выше, для практического приложения минимальная рабочая частота составляет не менее 20 – 50 кГц.

Выводы.

Установлено, что частота вращения вектора отражения от каждого повреждения обладает индивидуальным свойством. Значение частоты вращения определяется расстоянием к повреждению и скоростью распространения сигнала в проводнике на частоте зондирования.

Полученный в результате измерения суммарный сигнал, как

функция от векторной суммы векторов отражений на определенной частоте зондирования, существует только в "мнимом времени". Под "мнимым временем" принимается значение частоты тестового сигнала.

Диапазон частот тестового сигнала является ограниченным, время измерения ограничивается необходимой точностью измерения, а шаг установки частот тестового сигнала может быть достаточно малым. Анализ спектральных составляющих сигнала можно провести только с применением накопления результатов таких измерений и используя спектральный анализ полученного суммарного сигнала после выполнения полного цикла измерения.

Применение методов спектрального анализа позволит получить значения скорости вращения вектора угла отражения согласно выражению (3), а при этом устраняется необходимость в определении значения начального угла отражения этого вектора.

Список литературы:

1. *Bisgaard S. Time Series Analysis and Forecasting by Example / S. Bisgaard, M. Kulahci // A John Wiley & Sons New Jersey. – 2011. – 400 p.*
2. *Chattopadhyay A.K. Statistical Methods for Astronomical Data Analysis / A.K. Chattopadhyay, T. Chattopadhyay // Springer Science+Business. New York. – 2014. – 356 p.*
3. *Богородицкий А.А. Нониусные аналого-цифровые преобразователи / А.А. Богородицкий, А.Г. Рыжеский. – Библиотека по автоматике. – Вып. 533. – М.: Энергия, 1975. – 120 с.*
4. *Pylypenko O.V. Phase ambiguity resolution in relative displacement measurement by microwave interferometry / O.V. Pylypenko, N.B. Gorev, A.V. Doronin, I. F. Kodzheshirova // Техн. механіка. – 2017. – № 2. – С. 3-11.*
5. *Горященко К.Л. Аналіз спектральних складових сумарного сигналу для багатотонального фазового методу аналізу стану лінії зв'язку. Повідомлення 1. / К.Л. Горященко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2007. – № 6. – Т. 1. – С. 115-120.*
6. *Шрюфер Э. Обработка сигналов: цифровая обработка дискретизированных сигналов / Э. Шрюфер. – К.: Либідь, 1995. – 320 с.*
7. *Eben Kunz, Jae Young Choi, Vijay Kunda, Laura Kocubinski, Ying Li, Jason Miller, Gustavo Blando, Istvan Novak. Sources and Compensation of Skew in Single-Ended and Differential Interconnects. Signal Integrity Journal, April 2017. – P. 208.*
8. *Wilczek, Andrzej & Szyplowska, Agnieszka & Kafarski, Marcin & Skierucha, Wojciech. A Time-Domain Reflectometry Method with Variable Needle Pulse Width for Measuring the Dielectric Properties of Materials // Sensors. – 2016. – 16. – P. 191. DOI 10.3390/s16020191.*
9. *Kivilcim Yuksel, Marc Wuilpart, Véronique Moeyaert, and Patrice Mégret. Optical Frequency Domain Reflectometry: A Review. Proceedings of ICOON. 2009.*

References:

1. Bisgaard, S., and Kulahci, M. (2011), *Time Series Analysis and Forecasting by Example*. A John Wiley & Sons New Jersey, 400 p.
2. Chattopadhyay, A.K., and Chattopadhyay, T. (2014), *Statistical Methods for Astronomical Data Analysis*. Springer Science+Business, New York, 356 p.

3. Bogorodickij, A.A., and Ryzhevskij, A.G. (1975), *Vernier A/D Converters*, Automation Library, Vol. 533, Moscow, Energy, 120 p.
4. Pylypenko, O.V. Gorev, N.B., Doronin, A.V., and Kodzhespoirova, I.F. (2017), "Phase ambiguity resolution in relative displacement measurement by microwave interferometry", *Technical mechanics*, Issue 2, pp. 3-11.
5. Horiashchenko, K.L. (2007), "Analysis of the spectral components of the total signal for the multichannel phase method of analysis of the state of the communication line, Message 1". *Bulletin of Khmelnytsky National University. Engineering sciences*, Issue 6, Part. 1, pp. 115-120.
6. Shrjufer Je. (1995), *Signal Processing: Digital Processing of Sampled Signals*, Kyiv. Libid', 320 p.
7. Eben Kunz, Jae Young Choi, Vijay Kunda, Laura Kocubinski, Ying Li, Jason Miller, Gustavo Blando, and Istvan Novak (2017), "Sources and Compensation of Skew in Single-Ended and Differential Interconnects", *Signal Integrity Journal*, pp. 208.
8. Wilczek, Andrzej & Szyplowska, Agnieszka & Kafarski, Marcin & Skierucha, Wojciech. (2016), "A Time-Domain Reflectometry Method with Variable Needle Pulse Width for Measuring the Dielectric Properties of Materials", *Sensors*, 16, 191, DOI 10.3390/s16020191.
9. Kivilcim Yuksel, Marc Wuilpart, Véronique Moeyaert, and Patrice Mégret (2009), "Optical Frequency Domain Reflectometry": *A Review. Proceedings of ICOON*.

Статью представил д-р техн. наук, проф. каф. телекомунікацій і радіотехніки Хмельницького національного університета. Любчик Віталій Романович.

Надійшла/Received: 14.02.2018.

Повторно 01.12.2019

Horiashchenko Konstantin, Cand. Tech. Sci, Associate professor
Khmelnytsky national university, Ukraine
Str. 11, Institutaska, Khmelnytsky, Ukraine, 29016
e-mail: kstvg@yandex.ua
ORCID ID: 0000-0002-7034-8702

Shevchuk O.V., Aspirant
Khmelnytsky national university, Ukraine
Str. 11, Institutaska, Khmelnytsky, Ukraine, 29016
e-mail: kostyakst@ukr.net

Tsyra Oleksandra, Cand. Tech. Sci, Senior Lecturer,
Odesa National Academy of Telecommunications named after O. S. Popov, Ukraine
e-mail: Aleksandra.tsyra@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-3552-2039

УДК 621.3.095.21:621.3.018

Горященко К.Л. Аналіз спектральних складових сумарного сигналу для багатошкального фазового методу аналізу стану лінії зв'язку / К.Л. Горященко, А.В. Шевчук, О.В. Цыра // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – № 28 (1353). – С. 59 – 67.

Розглянуто особливості застосування фазового методу визначення пошкоджень в провідниковій лінії при застосуванні обмежень, що накладаються властивостями об'єкту дослідження – провідниковою лінією. Визначено, що отриманий сумарний сигнал буде складатись з сигналів відбиттів, які мають різну частоту обертання вектору кута відбиття. Встановлено, що при застосуванні методів цифрового спектрального аналізу потрібно визначення складових сигналів при апіорі невідомих значеннях початкового кута зсуву фази, а також при апіорі нецілій кількості періодів, що попадають у вікно аналізу. Іл.: 3. Бібліогр.: 9 назв.

Ключові слова: сумарний сигнал; вікно аналізу; початковий кут зсуву фази; кут відображення; спектральний аналіз.

УДК 621.3.095.21:621.3.018

Горященко К.Л. Анализ спектральных составляющих суммарного сигнала для многошкального фазового метода анализа состояния линии связи / К.Л. Горященко, О.В. Шевчук, А.В. Цыра // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2019. – № 28 (1353). – С. 59 – 67.

Рассмотрены особенности применения фазового метода определения повреждений в проводниковой линии при применении ограничений, которые накладываются свойствами объекта исследования – проводниковой линией. Определено, что полученный суммарный сигнал будет состоять из сигналов отражений, которые имеют разную частоту вращения вектора угла отражения. Установлено, что при применении методов цифрового спектрального анализа нужно определение составляющих сигнала при априори неизвестных значениях начального сдвига фазы, а также при априори нецелом количестве периодов, которые попадают в окно анализа. Ил.: 3. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: суммарный сигнал; окно анализа; начальный угол сдвига фазы; угол отображения; спектральный анализ.

UDC 621.3.095.21:621.3.018

Horiaschenko K.L. Analysis of spectral components for phase method with multiplies frequencies for use in communication lines / K.L. Horiaschenko, O.V. Shevchuk, O. Tsyra // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2019. – № 28 (1353). – P. 59 – 67.

In article feature usage of the phase method with multiplies frequencies for determining damage in wiring line when applying constraints imposed properties of the object of study – conductor line. Found that lower frequency boundary is due to the stabilization parameter of line, upper boundary – by upper allowed frequency for signal passing. Determined that the total received signal will consist of signal reflections that have different rotational speed of reflection angle. The analysing signal must always be within the allowable frequency. This leads to the fact that the reflection signals get additional value of phase shift as initial angle. It is established that the usage of different methods of digital spectral analysis require to determine the signal components with unknown values of the initial phase shift, as well as with noninteger number of periods that fall within the window of analysis. Figs.: 3. Refs.: 9 titles.

Keywords: total signal; analysis window; initial phase angle; display angle; spectral analysis.