

УДК 621.39

К ВОЗМОЖНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ РАДИОИЗЛУЧАЮЩИХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ СИНГУЛЯРНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ СИГНАЛОВ

Никитин Олег Рафаилович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники и радиосистем.
ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».
E-mail: olnikin@vlsu.ru.

Полушин Петр Алексеевич

доктор технических наук, профессор кафедры радиотехники и радиосистем.
ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».
E-mail: pap@vlsu.ru.

Мартышевская Дарья Анатольевна

аспирант кафедры радиотехники и радиосистем. ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».
Адрес: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87.

Аннотация: При использовании в телекоммуникационных системах нескольких однотипных передатчиков в различных сеансах связи часто встает задача идентификации того или иного экземпляра передатчика по принятой реализации сигнала. Так как основные параметры передатчиков стандартизированы, принятие соответствующего решения зачастую затруднительно. Для соответствующих целей предложено использовать сингулярное разложение выборок принятых сигналов. Для каждого сеанса связи строится исходная матрица с помощью «скользящего окна» и производится ее сингулярная обработка. Сравниваются столбцы левых сингулярных матриц двух анализируемых сеансов. На основе первых столбцов строятся фазовые портреты. В случае значительных отличий формы портретов от прямой линии принимается решение о работе различных экземпляров в анализируемых сеансах. Описываемый метод позволяет учитывать отличия в форме полосы пропускания трактов разных передатчиков. В работе моделированы тракты передачи с асимметрией формы и с различиями в форме спадов частотных характеристик трактов и приведены соответствующие фазовые портреты. Их визуальный анализ позволяет делать более обоснованные идентификационные заключения.

Ключевые слова: сингулярное разложение, визуализация, фазовый портрет.

Постановка задачи

При эксплуатации систем передачи цифровых сигналов может возникнуть задача определения по виду и параметрам принятых сигналов, какой из набора однотипных радиопередатчиков (РПД) работает в данный момент. В то же время все нормально функционирующие РПД должны удовлетворять соответствующим нормам и стандартам, а значит иметь одинаковые основные технические характеристики (например, несущие частоты и временные параметры символической последовательности), измеряя которые зачастую невозможно сделать

обоснованные выводы по идентификации конкретного экземпляра передатчика.

Однако, идентификация, тем не менее, возможна на основе сравнения более «тонких» различий принимаемых сигналов. Ее возможно осуществить на основе применения средств сингулярного разложения сигналов [1-4] и построения относительных фазовых портретов различных компонент сигнала, принятого в разных сеансах связи.

Основы метода сингулярного разложения

Сингулярное разложение (SVD-разложение, «Singular Value Decomposition») представляет

собой представление некоторой исходной матрицы в виде произведения трех матриц: $\mathbf{A}=\mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^T$, причем это разложение всегда осуществимо независимо от вида матрицы \mathbf{A} . Далее верхними индексами «*» и «Т» будут обозначаться операции комплексного сопряжения и транспонирования, верхним индексом «+» будет обозначаться операция эрмитова сопряжения. Прямоугольная матрица \mathbf{A} – диагональная и имеет размер $m \times n$. Значения элементов главной диагонали (сингулярных чисел) не убывают с ростом их номера. Матрицы \mathbf{U} и \mathbf{V} – унитарные матрицы, имеющие размеры соответственно $m \times m$ и $n \times n$.

Столбцы матрицы \mathbf{U} образуют ортонормированный базис из собственных векторов матрицы $\mathbf{A}\mathbf{A}^+$. Столбцы матрицы \mathbf{V}^+ (строки матрицы \mathbf{V}) образуют ортонормированный базис из собственных векторов матрицы $\mathbf{A}^+\mathbf{A}$. Пусть $\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_m$ – столбцы матрицы \mathbf{U} и $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n$ – столбцы матрицы \mathbf{V}^T . Тогда справедливы следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A}\mathbf{v}_i &= \lambda_i \mathbf{u}_i \\ \mathbf{A}^T \mathbf{u}_i &= \lambda_i \mathbf{v}_i \end{aligned} \right\} i = 1 \div \min\{m, n\}. \quad (1)$$

В дальнейшем, если не будет специальных оговорок, будем предполагать, что элементы матрицы \mathbf{A} – действительные, т.е. в показателе вместо знака «+» будем употреблять знак «Т».

Использование свойств сингулярного разложения для различения радиопередающих устройств

Основные технические характеристики цифровых систем передачи, такие как: несущие частоты и временные параметры символьной последовательности, жестко контролируются, и для выявления их различий у разных экземпляров РПД необходимо анализировать сеансы очень большой длительности, что обычно практически недостижимо. Более доступны для анализа различия принимаемых сигналов, обусловленные отличиями в форме склонов частотных характеристик (ЧХ) мощных усилителей трактов передачи на краях полосы пропускания. В этом случае пусть даже форма огибающих символов, генерируемых в мало-мощных блоках передатчиков, будет строго

идентичной, но после прохождения тракта усиления мощных блоков с несколько различными ЧХ огибающие символов на выходах различных передатчиков приобретают свои собственные особенности. Чем больше различий в форме ЧХ, тем сильнее будут различия.

Наблюдаемая форма ЧХ может быть несимметричной относительно несущей частоты, и эта симметрия у различных экземпляров передатчиков может быть выражена по-разному. Это приводит к необходимости получать и рассматривать обе ортогональные компоненты огибающей символов и проводить SVD-преобразование в комплексной форме. Выборки временного ряда проводятся на видеочастоте после синхронного детектирования принятого сигнала. Временной интервал между отсчетами выборки должен быть значительно меньше длительности символа. Первый отсчет необходимо точно синхронизировать с началом первого символа выборки. Полученная в каждом сеансе приема выборка отсчетов записывается.

После получения выборок двух анализируемых сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$ (длина выборок предполагается одинаковой) формируются на их основе две исходные матрицы \mathbf{A}_1 и \mathbf{A}_2 с помощью скользящего окна. После сингулярного преобразования этих матриц получаются соответствующие им матрицы \mathbf{V}_1 и \mathbf{V}_2 и сравниваются их столбцы $\mathbf{v}_i^{(1)}$ и $\mathbf{v}_i^{(2)}$ с одинаковыми номерами. Последовательно рассматриваемые элементы этих столбцов могут рассматриваться, $v_i^{(1)}(t)$ и $v_i^{(2)}(t)$ как выборки определенных отдельных аддитивных составляющих $v_i^{(1)}(t)$ и $v_i^{(2)}(t)$ сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$. При этом, чем больше номер составляющих, тем они, очевидно, отражают более тонкие исходных сигналов.

Применялся подход, основанный на визуальном сравнении фазовых портретов, построенных на сигналах $v_i^{(1)}(t)$ и $v_i^{(2)}(t)$, откладываемых по соответствующим координатным осям. В случае, если элементы векторов $\mathbf{v}_i^{(1)}$ и $\mathbf{v}_i^{(2)}$ – комплексные числа, то отдельно строятся фазовые портреты для действительной и для мнимой составляющих векторов.

Пронумеруем полученные фазовые портреты в соответствии с номерами i векторов, на основе которых они были получены. Если оба сравниваемых сеанса передачи проводились с использованием одного и того же передатчика, то при незначительном уровне шумов и отсутствии частотно-селективных искажений фазовые портреты всех номеров будут представлять собой прямые линии, пересекающие начало координат.

Если же сравниваемые сеансы проводились с использованием различных передатчиков, то фазовые траектории образуют фигуры, отличающиеся от прямой линии. Степень отличия определится степенью различия огибающих. Поскольку различия формы ЧХ трактов различных передатчиков приводят к довольно тонким различиям огибающих, то отличия огибающих будут проявляться в большей степени в фазовых портретах с большими номерами.

Фазовые портреты можно построить и непосредственно по огибающим сигналам $s_1(t)$ и $s_2(t)$ в разных сеансах приема, но если анализируемые сеансы проводились с использованием разных передатчиков, то отличия в составляющих $v_i^{(1)}(t)$ и $v_i^{(2)}(t)$, вызывающие искривления и раздвоение соответствующих фазовых портретов, будут выражены сильнее.

Может быть заранее накоплена библиотека эталонных выборок сигналов всех передатчиков данного типа, эксплуатируемых в системе и на основе вновь полученной выборки принимать решение о работе конкретного экземпляра. Наличие шумов значительного уровня искажает форму огибающих, особенно в отношении ее «тонких» особенностей и уменьшает эффективность метода.

Результаты экспериментов

С использованием компьютерного моделирования проводилось экспериментальное исследование возможностей описываемого метода анализа сигналов. Исходные сравниваемые сигналы имитировались пропуском одного и того же сигнала типа «меандр» через фильтры с несколько различающимися формами ЧХ. Соответственно, наблюдались и неболь-

шие отличия формы сигналов после разных фильтров. На основе выборок этих сигналов производилось сингулярное разложение и строились соответствующие фазовые портреты. Эксперименты проводились при следующих параметрах сигналов: период следования символов равен 1 (в условных единицах); период дискретизации равен $0.05/\pi$, размеры исходной матрицы \mathbf{A} равны $m \times n = 50 \times 300$.

Некоторые из графиков, полученных в результате экспериментов, представлены на рис. 1-12. Группа графиков рис. 1-6 соответствует введенной асимметрии тракта формирования второго сигнала. Группа графиков рис. 7-12 соответствует вводимым различиям и в крутизне спада ЧХ, и в асимметрии. На рис. 1 и 7 расположены графики обоих сравниваемых сигналов $s_1(t)$ – сверху и $s_2(t)$ – снизу. На рис. 2 и 8 расположены фазовые портреты временных реализаций сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$. На рис. 3-6 и 9-12 приведены фазовые портреты, построенные на некоторых из столбцов матриц $\mathbf{V1}$ и $\mathbf{V2}$ (составляющих $v_i^{(1)}(t)$ и $v_i^{(2)}(t)$). Графики и фазовые портреты, построенные на основе действительных составляющих, расположены на каждом рисунке слева и обозначены как «Re», графики, построенные на основе мнимых составляющих, расположены на каждом рисунке справа и обозначены как «Im».

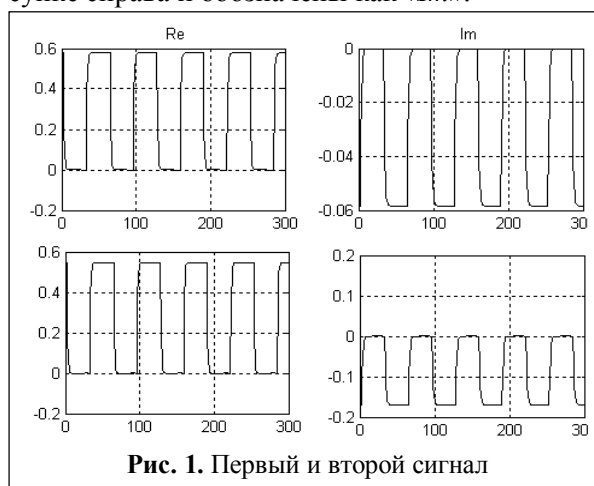
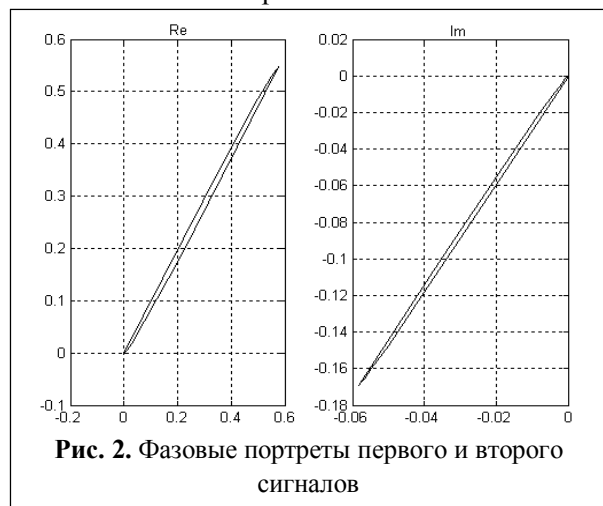


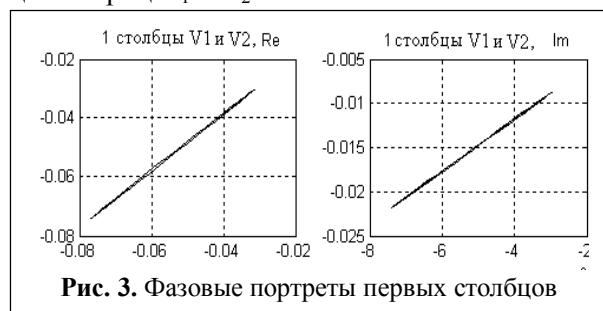
Рис. 1. Первый и второй сигнал

Эксперименты показывают, что при практически незначительных отличиях формы временных реализаций сигналов, которые получаются из-за различий формы тракта ЧХ разных передатчиков, учет формы фазовых порт-

ретов соответствующих сигналов тем не менее позволяет различить эти передатчики. При этом зачастую отличия от прямой линии лучше наблюдаются в фазовых портретах, построенных на основе столбцов сингулярных матриц более высоких номеров.



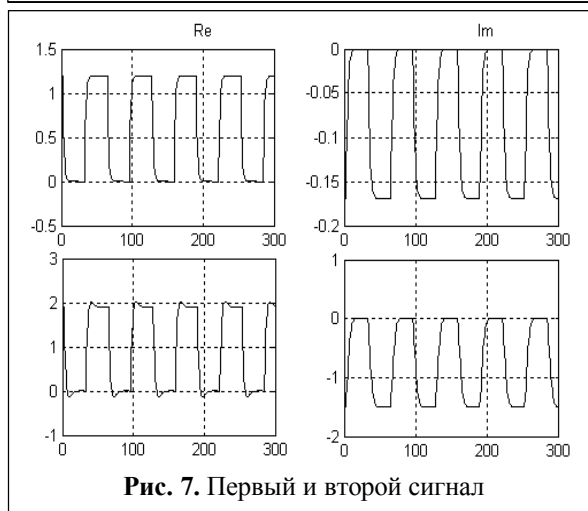
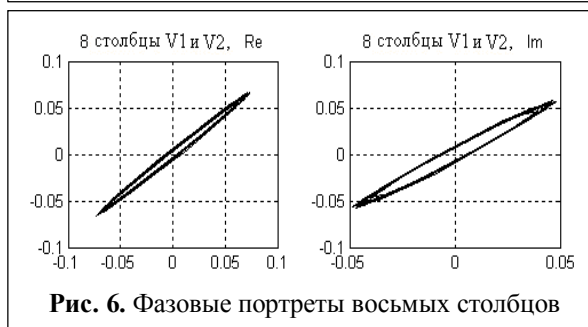
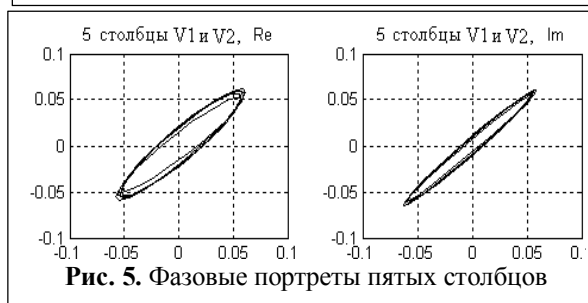
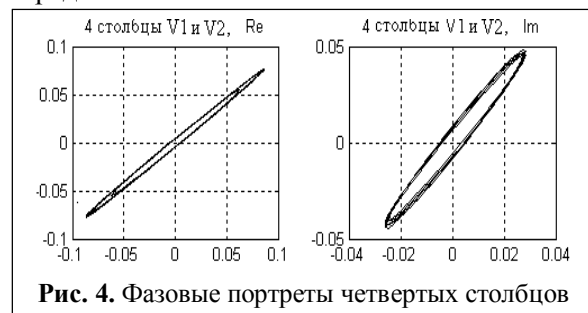
Графики демонстрирует факт, что при приеме идентификационного решения необходимо использовать обе ортогональные составляющие сигналов (учитывать обе комплексные составляющие сингулярного разложения). Для принятия более обоснованного решения выгодно использовать комплексно достаточно большое количество столбцов сингулярных матриц, так как отличия могут быть более выражены в столбцах более высоких номеров, что показано приводимыми примерами столбцов матриц V_1 и V_2 .

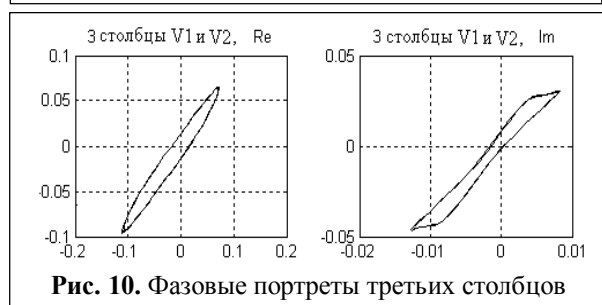
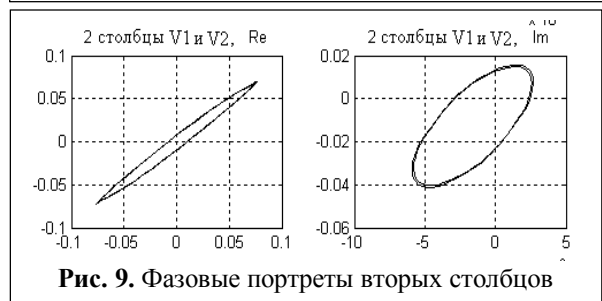
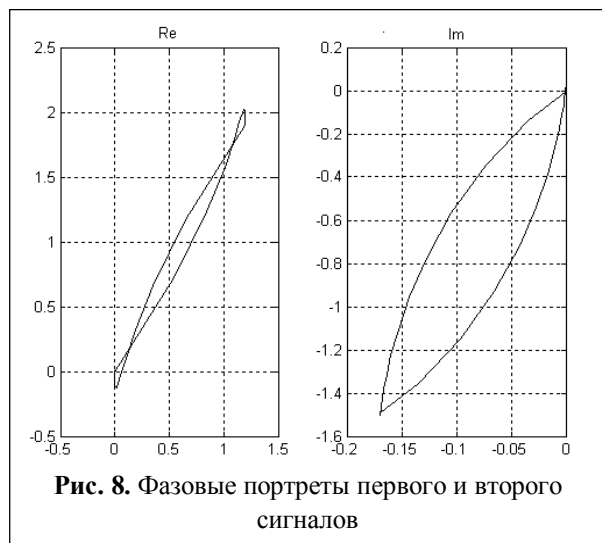


Выводы

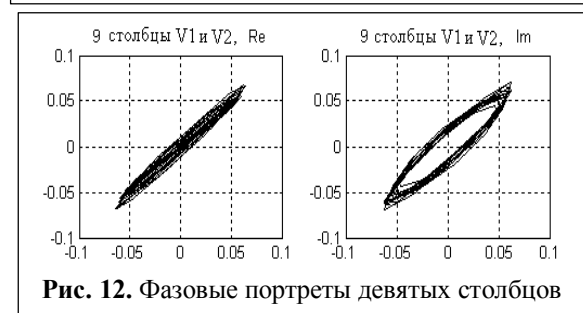
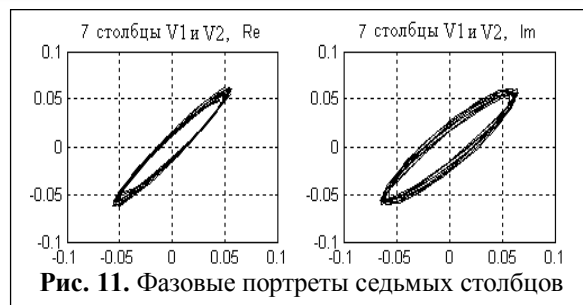
Исследование описываемой возможности идентификации радиоизлучающих средств с использованием сингулярного разложения сигналов, в частности с визуальным анализом фазовых портретов различных составляющих

разложения, позволяет комплексно учитывать «тонкие» различия сравниваемых сигналов. Это дает возможность сделать более обоснованные выводы о том, использовался ли в различных сеансах приема один и тот же радиопередатчик.





Поступила 28 октября 2013 г.



Литература

1. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. - М.: Наука, 1988, 548 с.
2. Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А. Матрицы и вычисления. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. - 320 с.
3. Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница» / Под ред. Д.Л. Данилова, А.А. Жилиевского – СПб.: Пресском, 1997. – 308 с.
4. Elsner J.B., Tsonis A.A. Singular Spectrum Analysis: A New Tool in Time Series Analysis. – New York, London: Plenum Press, 1996. – 164 p.

English

Possibility of identification of radio-tail devices on the basis of application of singular decomposition of signals

Oleg Rafailovich Nikitin – Doctor of Engineering, Professor, Head of Department of Radio Engineering and Radio Systems “Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletov”.

Pyotr Alekseevich Polushin – Doctor of Engineering, Professor, Department of Radio Engineering and Radio Systems “Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletov”.

Darya Anatolyevna Martyshevskaya – post-graduate student Department of Radio Engineering and Radio Systems “Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletov”.

Address: 600000 Vladimir, Gorky str., 87.

Abstract: It is often necessary to identify this or that copy of a transmitter by the received implementation of a signal in telecommunication systems using several single-type transmitters in different communication sessions. The decision making is often not easy as the critical parameters of transmitters are standardized. It is suggested to use singular decomposition of sample capture of the received signals for the appropriate purposes. The initial array with the help of “a slipping window” is plotted and singular processing is done for each communication session. The columns of the left singular matrixes of two analyzable sessions are compared. Phase

portraits are plotted on the basis of the first columns. In case of considerable differences of the portrait shapes from a straight line the decision on the operation of different copies in the analyzed sessions are made. The described method allows to take into consideration the differences in the shape of a band pass of paths of different transmitters. Transmission paths with a configuration asymmetry and with differences in the rolls-off shapes of path frequency responses have been simulated and the corresponding phase portraits are given in the work. Their visual analyses allows to make more reasonable identification conclusions.

Key words: singular decomposition, visualization, phase portrait.

References

1. *Gantmaher F.R.* Theory of Matrices. M.: Nauka, 1988, 548p.
2. *Voevodin V.V., Kuznetsov Ju.A.* Matrices and Calculations. M.: Nauka. Glavnaja redakcija fiziko-matematicheskoy literatury, 1984. – 320 p.
3. Main Elements of Time Series: “Caterpillar” (SSA) method. Ed. by *D.L. Danilov, A.A. Zhiljavskogo* SPb.: Presskom, 1997. 308 p.
4. *Elsner J.B., Tsonis A.A.* Singular Spectrum Analysis: A New Tool in Time Series Analysis. New York, London: Plenum Press, 1996. 164 p.