

Моделирование паразитной фазовой модуляции информационных сигналов в системах электромагнитного контроля геодинамических объектов

Г.С.Васильев¹, О.Р. Кузичкин¹, Д.И.Суржик², С.М.Харчук²

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный национальный исследовательский университет", E-mail: vasilievgleb@yandex.ru

²Муромский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых", E-mail: arzerum@mail.ru

Получены аналитические соотношения для исследования эффекта паразитной фазовой модуляции в различных устройствах и системах формирования и обработки сигналов. Представлены результаты моделирования паразитной фазовой модуляции информационных сигналов в системах электромагнитного контроля геодинамических объектов фазометрическим методом.

Analytical expressions for the study of the effect of parasitic phase modulation in various devices and systems of signal formation and processing are obtained. The results of modeling the parasitic phase modulation of information signals in the systems of electromagnetic control of geodynamic objects by the phase-metric method are presented.

Введение

Фазовый метод электромагнитного контроля геодинамических объектов обладает повышенной помехоустойчивостью по сравнению с обычно используемым амплитудным методом, что позволяет повысить эффективную глубину зондирования и (или) контролировать слабоконтрастные неоднородности исследуемого геологического разреза (например, карстово-суффозионные полости). Для улучшения качественных показателей фазометрических систем контроля необходимо повышать точность регистрации фазовых отклонений информационного сигнала в результате прохождения зондируемой среды. Разработан способ компенсации мультипликативных помех, обусловленных внешними дестабилизирующими воздействиями, в фазометрических измерительных системах [1]. Другим нежелательным фактором, снижающим точность измерения фазовых сдвигов, является наличие паразитной фазовой модуляции (ПФМ) сигналов в блоках информационной обработки систем геодинамического контроля.

Сложность анализа эффекта фазовой модуляции определяется тем, что аналитические соотношения для сигналов с ПФМ и их спектров получены только для самых простых случаев. Так, в работе [2] выполнено аналитическое представление периодической последовательности прямоугольных импульсов с однотональной фазовой модуляцией рядом Фурье и проведен анализ спектрального состава модулированной последовательности с использованием функций Бесселя. При анализе спектров других ФМ сигналов более сложной формы аналитические соотношения в общем виде отсутствуют, поэтому приходится ограничиваться численными решениями для отдельных частных случаев.

Авторами была предложена аппроксимация произвольных детерминированных воздействий на основе непрерывных кусочно-линейных функций (НКЛФ) [3] и выполнен аналитический расчет переходных режимов различных преобразователей радиосигналов спектральным методом [4-8]. Представляется возможным обобщить данный подход также на ФМ сигналы.

Блок-схема устройства электромагнитного контроля геодинимических объектов фазометрическим методом

Исследуемая блок-схема устройства электромагнитного контроля геодинимических объектов фазометрическим методом показана на рис. 1. На схеме обозначены блоки измерительной части устройства (1-4, 10): усилитель 1; полосно-заграждающий фильтр 2, подавляющий помехи промышленной частоты; фазовый детектор на элементе «И» 3, регистр 4; компаратор 10 для формирования прямоугольного сигнала и измеряемой фазой. Генераторная часть устройства включает в себя усилители 8 и 9, полосно-пропускающие фильтры 6 и 7, регистр 5 для вывода опорных тактовых последовательностей, формируемых ЭВМ. ПФМ сигналов в различных блоках устройства приводит к погрешностям измерения фазового сдвига и, как следствие, к снижению качественных показателей системы геодинимического контроля в целом: повышение вероятности ложных тревог и/или снижение вероятности правильного обнаружения опасной геодинимики, снижение точности локализации контролируемой неоднородности геологического разреза, и пр.

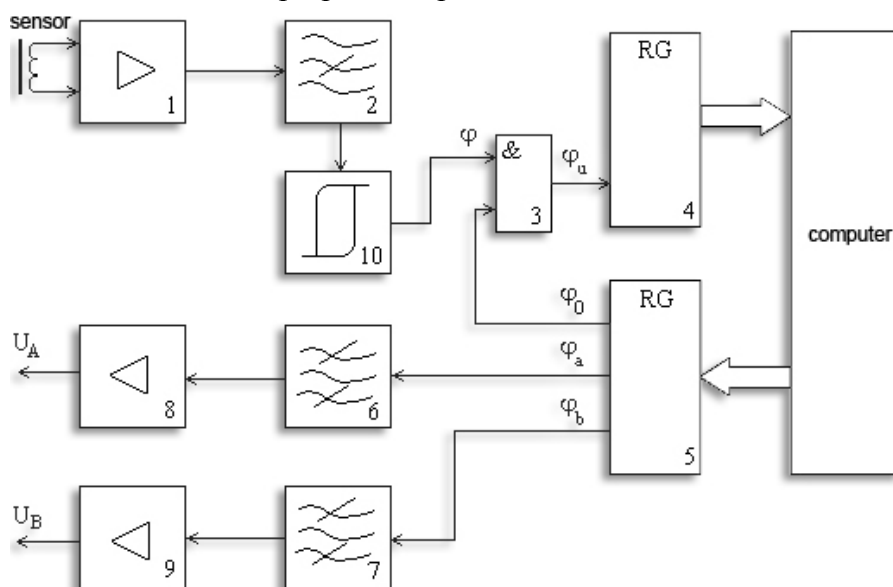


Рис. 1. Блок-схема устройства электромагнитного контроля геодинимических объектов фазометрическим методом.

Аналитические соотношения для моделирования сигналов с ПФМ

Комплексные амплитуды гармоник в спектре кусочно-линейного сигнала имеют вид

$$c_{n,k} = [a_{n,k} - jb_{n,k}] e^{-jn\omega_1 t_k^*} = \left[\frac{1}{T} \int_{-\Delta t_k/2}^{\Delta t_k/2} B_k \cos(n\omega_1 t) dt - j \frac{1}{T} \int_{-\Delta t_k/2}^{\Delta t_k/2} K_k t \sin(n\omega_1 t) dt \right] e^{-jn\omega_1 t_k^*}, \quad (1)$$

где k – текущий номер узла аппроксимации,

$\omega_1 = 2\pi/T$ – частота сигнала с периодом T ,

K_k и B_k – коэффициенты аппроксимации,

$\Delta t_k = t_{k+1} - t_k$ – шаг аппроксимации.

В данном выражении множитель $e^{-jn\omega_1 t_k^*}$ учитывает временной сдвиг на t_k^* для каждого линейного отрезка.

Полагаем, что временной сдвиг аппроксимирующих отрезков (импульсов) пропорционален значениям модулирующего сигнала в узлах аппроксимации, что

эквивалентно фазоимпульсной модуляции второго рода (ФИМ-2) исходного (модулирующего) сигнала [2]. На основе выражения (1) и свойства функций Бесселя $\sin(\alpha + \beta \sin \phi) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} J_l(\beta) \sin(\alpha + l\phi)$ получено представление сигнала с ФИМ:

$$\begin{aligned} \tilde{s}(t) = \sum_{k=0}^{K-1} \tilde{s}_k(t) = & A_0 + \sum_{k=0}^{K-1} A_{mk} \cos \omega_m(t - t_k^*) + \\ & + \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{n=1}^N \sum_{l=0}^L B_{k,n,l}^* \cos \omega_{n,l}(t - t_k^*) + K_{k,n,l}^* \sin \omega_{n,l}(t - t_k^*), \end{aligned} \quad (2)$$

где обозначено $A_0 = \sum_{k=0}^{K-1} A_{0k}$ - постоянная составляющая сигнала с ФИМ,

$A_{mk} = \frac{B_k}{q_{0k}} \Delta\varphi_{\max}$ - амплитуда k -го линейного фрагмента сигнала,

$B_{k,n,l}^*$ и $K_{k,n,l}^*$ - амплитуды нечетной и четной составляющей сигнала с частотами $\omega_{n,l} = n\omega_1 \pm l\omega_m$,

$\Delta\varphi_{\max}$ - индекс модуляции,

ω_m - частота фазовой модуляции.

Также на основе (2) было получено аналитическое представление спектра кусочно-линейного сигнала с однотональной фазовой модуляцией.

Результаты моделирования информационных сигналов с ПФМ в системах электромагнитного контроля

По выражению (2) выполнено моделирование последовательности тактирующих экспоненциальных импульсов с ПФМ, полученных в результате высокочастотной фильтрации. Параметры исследуемого сигнала приняты равными: число узлов аппроксимации $K=6$, число аппроксимирующих отрезков $K-1=5$, верхние пределы сумм $N=10$, $L=6$, частота модуляции $\omega_m=0,05\omega_1$.

Исходный чистый сигнал в форме экспоненциальных импульсов $s(t)$ и сигнал с ПФМ $\tilde{s}(t)$, а также модулирующий сигнал $u_m(t) = \Delta\varphi_{\max} \sin \omega_m t$, показаны на рис. 2. Амплитудные спектры модулированного сигнала при индексах модуляции $\Delta\varphi_{\max}=0,2$ и $0,6$ соответственно, рассчитанные на основе полученных выражений и $A_{m,n,l} = |S_{m,n,l}|$, представлены на рис. 3 и 4.

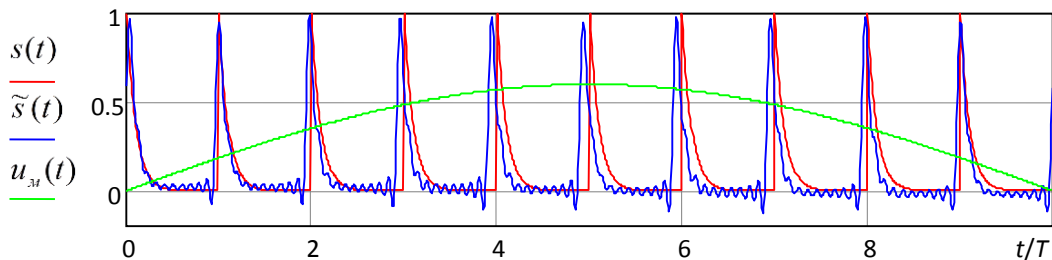


Рис. 2. Исходный тактирующий сигнал, модулирующий сигнал и сигнал с ПФМ, индекс модуляции $\Delta\varphi_{\max}=0,6$.

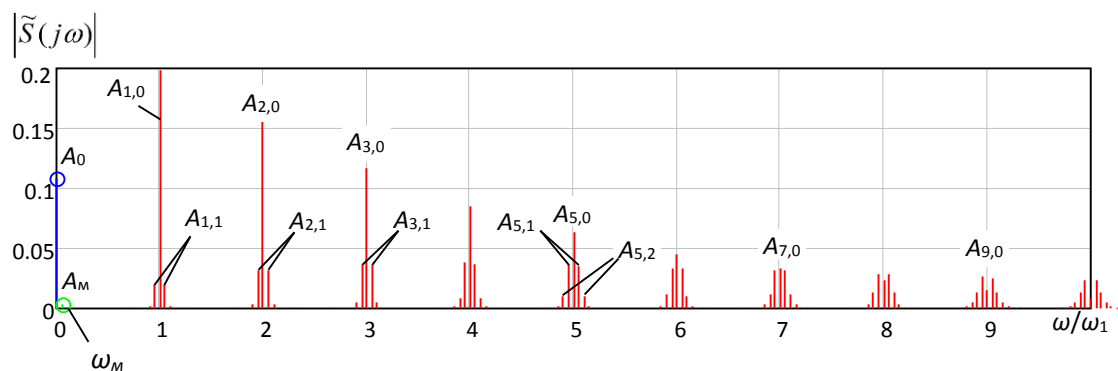


Рис. 3. Амплитудный спектр сигнала с ПФМ, индекс модуляции $\Delta\varphi_{\max} = 0,2$.

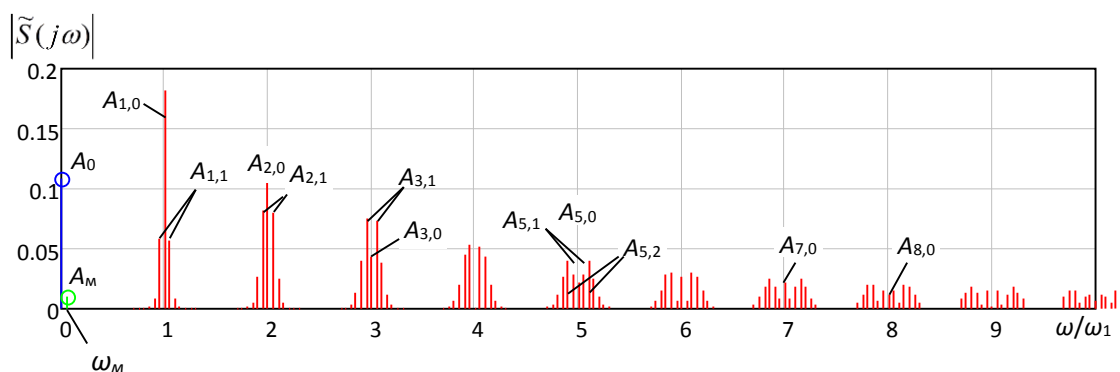


Рис. 4. Амплитудный спектр сигнала с ПФМ, индекс модуляции $\Delta\varphi_{\max} = 0,6$.

Из сравнения спектров модулированного сигнала ДВ при индексах модуляции $\Delta\varphi_{\max} = 0,2$ и $0,6$ установлено, что увеличение $\Delta\varphi_{\max}$ приводит к расширению спектров около гармоник частоты дискретизации $\omega_{n,0} = n\omega_1$ и росту амплитуды составляющей с частотой модуляции A_M , амплитуда постоянной составляющей остается неизменной ($A_0 = 0,108$). Проверка полученных значений гармоник, выполненная с помощью быстрого преобразования Фурье, показала точное совпадение рассчитанных спектров (при кратных отношениях интервала дискретизации и периода модулирующего сигнала $T_M = 2\pi/\omega_M = 20T$).

Выводы

Хорошая точность представления сигнала с ФМ формулой (2) и его спектра при малом влиянии эффекта Гиббса подтверждает справедливость предложенного подхода и полученных выражений для анализа фазомодулированных сигналов. Полученные результаты могут быть использованы для аналитического исследования эффектов ПФМ в различных устройствах, в частности, блоках формирования и информационной обработки сигналов фазометрических измерительных систем электромагнитного контроля геодинамических объектов.

Литература

1. Kuzichkin O., Grecheneva A., Mikhaleva E., Dorofeev N., Baknin M. Application of Phase-Metric Measuring Systems for Geodynamic Control of Karst Processes / Journal of Engineering and Applied Sciences / 2017, Vol. 12, Iss. 4, P. 6858-6863. DOI: 10.3923/jeasci.2017.6858.6863.

2. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей: Учебник для вузов / Под ред. В.Н. Гордиенко и В.В. Крухмалева. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 510 с.
3. Курилов И.А., Романов Д.Н., Харчук С.М. Аппроксимация характеристик и сигналов на основе включающих непрерывных кусочно-линейных функций // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2007. № 8. С. 7-11.
4. Васильев Г.С., Курилов И.А., Харчук С.М. Моделирование нелинейного автокомпенсатора фазовых помех ЦАП прямого цифрового синтезатора частот. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. №2, 2014. – С. 30-38.
5. Курилов И.А., Васильев Г.С., Харчук С.М. Анализ динамических характеристик преобразователей сигналов на основе непрерывных кусочно-линейных функций. – Научно-технический вестник Поволжья. 2010. № 1. С. 100-104.
6. Курилов И.А., Ромашов В.В., Жиганова Е.А., Романов Д.Н., Васильев Г.С., Харчук С.М., Суржик Д.И. Методы анализа радиоустройств на основе функциональной аппроксимации // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. № 1 (13). С. 35-49.
7. Курилов И.А., Васильев Г.С., Харчук С.М. Анализ динамических характеристик преобразователей сигналов на основе непрерывных кусочно-линейных функций. – Научно-технический вестник Поволжья. 2010. № 1. С. 100-104.
8. Vasilyev G.S., Kurilov I.A., Kharchuk S.M., Surzhik D.I. Analysis of dynamic characteristics of the nonlinear amplitude-phase converter at complex input influence. //2013 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2013 - Proceedings. 2013.