

УДК 519.876.5:656.71.06:654(045)
DOI: 10.15587/2313-8416.2014.28583

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ АВИАЦИОННЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ РЯДОВ ВОЛЬТЕРРА

© Ю. В. Пена, Д. М. Захаров, И. К. Малецкий

В работе рассматриваются методы математического моделирования процессов формирования и передачи аналоговых и цифровых сигналов авиационных радиоэлектронных систем с помощью рядов Вольтерра. Созданы математические модели процессов модуляции при наличии различных исходных данных, проведено компьютерное моделирование. Процессы аналоговой модуляции промоделированы с помощью MATLAB+SIMULINK, которая позволяет моделировать эти процессы, а также исследовать их.

Ключевые слова: ряды Вольтерра, моделирование, цифровые сигналы, нелинейная модуляция, система компьютерной математики.

The paper deals with mathematical modeling methods for the formation and transmission of analogue and digital avionics systems using Volterra series. A mathematical model of the modulation in the presence of various initial data is developed, the computer modeling is conducted. The processes of analog modulation is simulated using MATLAB+SIMULINK, which allows you to simulate these processes, as well as explore them.

Keywords: Volterra series, modeling, digital signals, nonlinear modulation, system of computer mathematics.

1. Введение

В настоящее время в мире проектируются, изготавливаются и используются летательные аппараты различного назначения. Эти аппараты выполняют задачи различного рода, начиная от военного назначения, заканчивая перевозкой грузов и пассажиров. Все летательные аппараты включают в свой состав радиоэлектронное оборудование, которое в свою очередь включает в себя системы и комплексы, предназначенные для решения задач радиолокации, радионавигации, радиосвязи, управления воздушным движением. В зависимости от выполняемых задач радиоэлектронными системами, предъявляются требования к надёжности работы данных систем в целом и в жёстких климатических условиях.

Чаще всего в авиационных радиоэлектронных системах (РЭС) используются процессы модуляции при передаче аналоговых данных, а также процессы передачи дискретных сообщений по непрерывному каналу радиосвязи, поскольку они нашли широкое применение в современных системах авиационной электросвязи и постепенно вытесняют аналоговые [1].

Подобные системы осуществляют последовательное преобразование передаваемых сообщений в сигнал, пригодный для передачи по имеющейся в распоряжении среде распространения, и обратно. В связи с чем существует объективная необходимость в описании операций модуляции и демодуляции для наиболее общего случая –

пространственно-временного канала связи. Разумно предположить, что в более общем случае данные отображения должны быть нелинейными, а их представление в виде подобных рядов с ограниченным числом членов по существу является только частным случаем. В данной работе остановимся лишь на рассмотрении операции модуляции.

2. Постановка задачи и литературный обзор

Наиболее общее описание нелинейных преобразований можно получить на основе рядов Вольтерра [2]. Однако при этом следует учесть, что в каноническом виде он определяет нелинейные преобразования между бесконечномерными пространствами, а операции модуляции Φ и демодуляции Φ' задают отношения между конечномерными и бесконечномерными пространствами. Необходимо несколько видоизменить ряды Вольтерра путем представления сигналов на соответствующих конечномерных концах в виде рядов из взвешенных дельта-функций, то есть сигналы на выходе модулятора можно записать в непрерывном виде как следующие суммы:

$$x(t_j, r_j) = \sum_{k_j=1}^N x_{k_j} \delta(k_j - t_j) \delta(t_j 1_{n_a} - r_j), \quad j = \overline{1, \infty}, \quad (1)$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T$ – вектора на входе дискретного канала связи (на входе модулятора) размерности N ; 1_{n_a} – единичный вектор размерности; n_a – число

измерений пространства на входе и выходе непрерывного многопараметрического канала связи соответственно.

Подстановка непрерывного вида сигналов на входе модулятора (1) в выражение ряда Вольтерра, а также учет нелинейности, не превышающей величины N_a (число членов ряда Вольтерра ограничено данным значением), и замена переменных, делает возможным следующее представление:

$$x(t, r) = \sum_{i=1}^{N_a} \int_{t_1}^t \int_{t_2}^{t_1} \dots \int_{t_i}^{t_{i-1}} \left\{ \prod_{j=1}^i x_{k_j} \delta(k_j - t_j) \delta(t_{N_a} - r_j) \right\} \phi(t, r, t_1, \dots, t_i, r_1, \dots, r_i) dt_1 \dots dt_i dr_1 \dots dr_i \quad (2)$$

Раскрытие произведения, перегруппировка слагаемых внутри него, а также использование фильтрующего свойства дельта-функции трансформирует операцию нелинейной модуляции к следующему виду:

$$x(t, r) = \sum_{i=1}^{N_a} \left[\sum_{k_1=1}^N \sum_{k_2=1}^N \dots \sum_{k_i=1}^N \left\{ \prod_{j=1}^i x_{k_j} \right\} \cdot \phi(t, r, k_1, \dots, k_i, k_1 1_{N_a}, \dots, k_i 1_{N_a}) \right] \quad (3)$$

Отсюда следует важное условие осуществимости нелинейной модуляции, выражающееся в обязательном превышении или, по крайней мере, равенности размерности сигналов на входе модулятора N степени нелинейности модулятора N_a , то есть $N_a \leq N$. В обратном случае ($N_a > N$) произведения в фигурной скобке (3) не существуют, что означает идентичность операций модуляции с нелинейностью большей N_a операции модуляции с нелинейностью N_a .

Следует также заметить, что вследствие свойства коммутативности операции умножения (то есть $\prod_{j=1}^i x_{k_j} = \prod_{j'=1}^i x_{k'_j}$, даже при условии, что $\exists k_j \neq k'_j$) число суммируемых базисных функций можно существенно сократить. Количество одинаковых произведений соответствует числу перестановок упорядоченного множества индексов сигнала на входе модулятора $\{k_j\}$, $j = \overline{1, i}$, $k_j < k_{j'} \mid j < j'$, $j' = \overline{1, i}$, а само данное множество перестановок целесообразно обозначить как P_i , каждый элемент которого $P_{i,p} = \{k_{j_p}\}$, представляет собой уникальную перестановку исходного упорядоченного множества. Следовательно, базисные функции модуляции являются функциями только временных и пространственных выходных координат, так как входные координаты дискретны, и имеют следующий вид:

$$\phi_{k_1, \dots, k_i}(t, r) = \sum_{\{k_{j_p}\} \in P_i} \phi(t, r, k_1, \dots, k_i, k_1 1_{N_a}, \dots, k_i 1_{N_a}), j_p = \overline{1, i}, p = \overline{1, i!} \quad (4)$$

где число элементов множества перестановок P_i , $i = \overline{1, N_a}$ равно числу всех возможных перестановок, то есть $i!$ [3].

Перегруппировка слагаемых в (3) и использование (4) приводит к формуле нелинейной модуляции в виде:

$$x(t, r) = \sum_{i=1}^{N_a} \left[\sum_{k_1=1}^N \sum_{k_2=k_1}^N \dots \sum_{k_i=k_{i-1}}^N \left\{ \prod_{j=1}^i x_{k_j} \right\} \phi_{k_1, \dots, k_i}(t, r) \right] \quad (5)$$

Таким образом, в наиболее обобщенном структурированном виде уравнение (5), являющееся, по сути, оператором нелинейной модуляции Φ , задает дискретное отображение непрерывного многопараметрического канала связи.

Следует подчеркнуть еще одно немаловажное достоинство именно подобного (5) структурного типа дискретного отображения. Так, в наиболее общем виде подобное отображение предполагает учет нелинейности произвольно большой степени, вплоть до бесконечной. В результате и реализация и синтез оптимальных операций, как модуляции, так и демодуляции оказывается весьма затруднительными, за исключением случаев определенной заданной формы используемых базисных функций. Однако в данное обстоятельство является достаточно сильным ограничением, поскольку способно существенно сократить класс операторов отображения. Представление же операции модуляции в параметризованном виде (5) делает возможным как выбор заданного числа базисных функций в рамках определенного порядка нелинейности, так введение ограничения на максимальную нелинейность оператора дискретного отображения. В итоге, решение задач синтеза оптимального модулятора возможно как в общем виде (при устремлении степени нелинейности к бесконечности), что должно быть подобно оптимальным нелинейным системам, как правило, трудно реализуемым на практике, так и при достаточно произвольных ограничениях на число и порядок нелинейности базисных функций, что приводит к сравнительно простым реализациям вышеописанных процедур.

4. Реализация процесса модуляции с помощью программного пакета MATLAB+SIMULINK

Для повышения качества разработки и эксплуатации систем радиосвязи целесообразно промоделировать процессы аналоговой модуляции, при этом, используя такую систему компьютерной математики, как MATLAB+SIMULINK, которая позволяет моделировать эти процессы, исследовать их, изменять необходимые параметры и строить необходимые графики [4].

Промоделируем процесс РЭС радиосвязи, используя систему MATLAB+SIMULINK [5]. Обосновав математическую модель для процесса амплитудной модуляции (АМ), получим функциональные схемы на рис. 1 и рис. 3, где процесс модуляции происходит по закону (5). В этих схемах можно изменять исходные параметры модуляции и выводить результаты в графическом виде на экран блока (осциллографа). На экране осциллографа будут изображаться осциллограммы для процесса АМ с различными параметрами: m , ω_0 , Ω , A_0 (рис. 2, рис. 4).

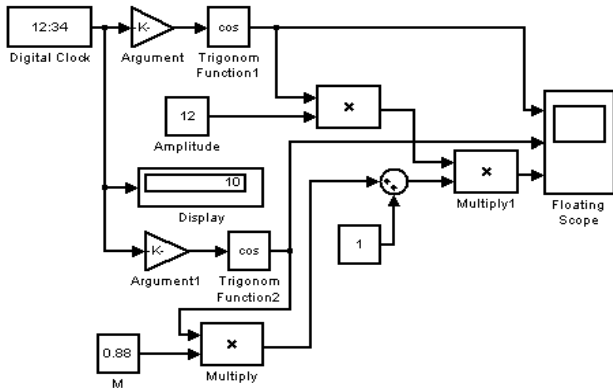


Рис. 1. Функциональная схема однотоновой модели АМ сигнала в РЭС

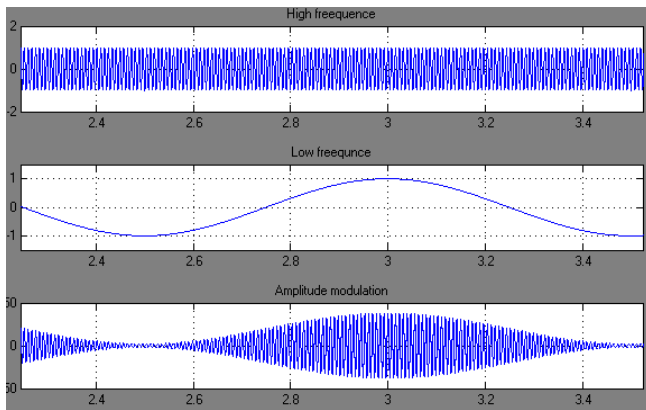


Рис. 2. Осциллограммы моделирования АМ сигнала с параметрами: $m = 0,88$; $\omega_0 = 127$ МГц; $\Omega = 1$ кГц; $A_0 = 12$ В

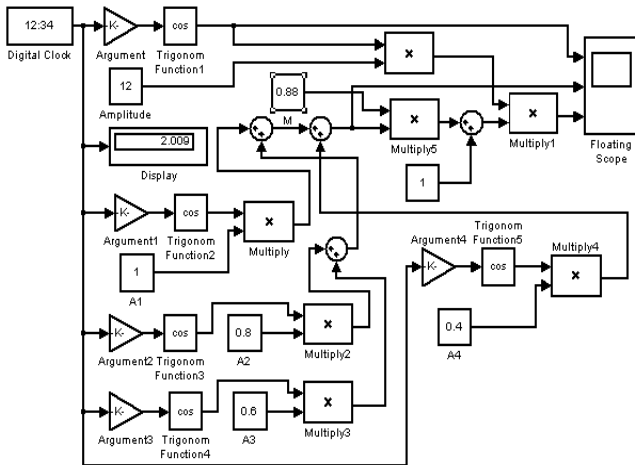


Рис. 3. Функциональная схема многотонной модели АМ сигнала РЭС

Для процесса частотной модуляции (ЧМ) обоснована функциональная схема (рис. 5), при этом на экране осциллографа будет изображена осциллограмма (рис. 6) для процесса ЧМ с параметрами: ω_d – коэффициент девиации частоты; ω_0 – несущая частота; Ω – частота модулирующего сигнала; U_m – амплитуда модулируемого сигнала.

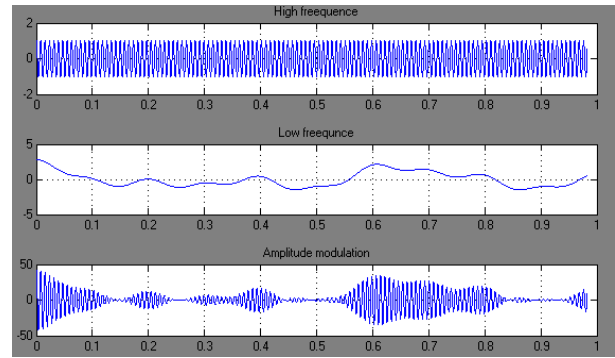


Рис. 4. Осциллограммы моделирования АМ сигнала с параметрами: $m = 0,88$; $\omega_0 = 127$ МГц; $\Omega_1 = 300$ Гц; $\Omega_2 = 600$ Гц; $\Omega_3 = 1$ кГц; $\Omega_4 = 2$ кГц; $A_0 = 12$ В

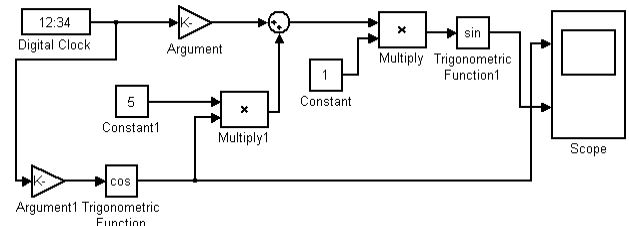


Рис. 5. Функциональная схема модели ЧМ сигнала РЭС

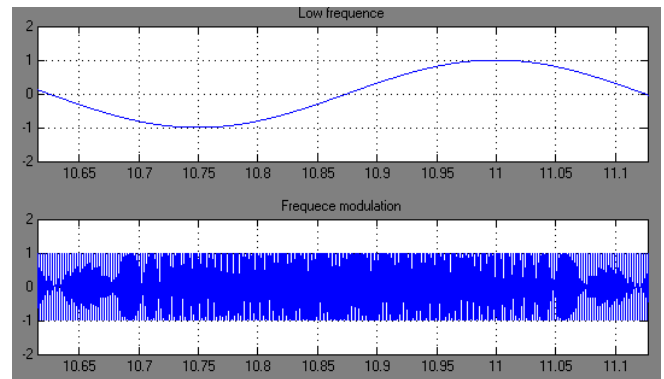


Рис. 6. Осциллограммы модели ЧМ сигнала с параметрами: $\omega_d = 5$ кГц; $\omega_0 = 142$ МГц; $\Omega = 1$ кГц; $A_0 = 1$ В

Для процесса передачи дискретных сообщений по ЧМ каналу обоснована функциональная схема (рис. 7), а на экране осциллографа будет изображена соответствующая осциллограмма для этого процесса (рис. 8).

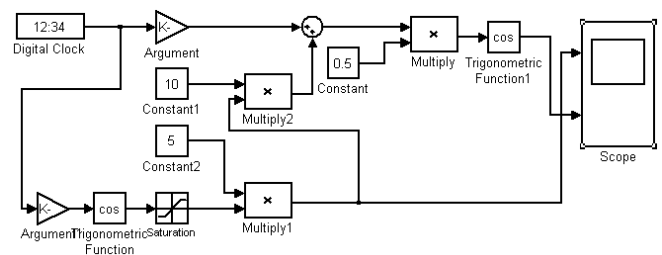


Рис. 7. Функциональная схема модели для процесса передачи дискретных сообщений по ЧМ каналу в РЭС

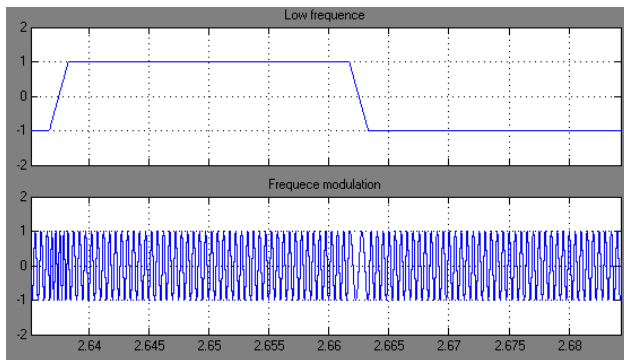


Рис. 8. Осциллограммы модели ЧМ для процесса передачи дискретных сообщений с параметрами: $\omega_d = 5$ кГц; $\omega_0 = 142$ МГц; $\Omega = 10$ кГц; $A_0 = 1$ В

5. Выводы

Таким образом, предложенные математические модели процессов АМ и ЧМ, а также их схемы реализации дают возможность проведения экспериментов при разработке, проектировании и эксплуатации реальных РЭС связи.

Многомерные передаточные функции, описывающие поведение и свойства нелинейных инерционных систем и объектов являются естественным обобщением одномерных передаточных функций, эффективно применяемых для описания и анализа линейных систем. Можно ожидать, что развитие методов анализа многомерных передаточных функций нелинейных систем позволит сделать более эффективным анализ и синтез систем с мягкими нелинейностями, а также включить аппарат рядов Вольтерра в качестве одного из инструментов моделирующих программ.

Анализ на основе рядов Вольтерра может применяться для схем, содержащих устройства со слабой нелинейностью. Современные программы моделирования электронных схем могут объединять такой метод с анализом шумов и линейных схем, что позволит настраивать даже достаточно сложные схемы практически в реальном масштабе времени. Благодаря своей совместимости с другими методами анализа, метод рядов Вольтерра должен стать

неотъемлемой частью всех современных программ моделирования электронных схем.

Литература

1. Малецкий, И. К. Моделирование процессов авиационных РТС [Текст] / И. К. Малецкий, Д. М. Захаров, А. Н. Левчук // Проблемы транспорту: зб. наук. пр. – 2009. – Вип. 6. – С. 13–18.
2. Малецкий, И. К. Моделирование процессов передачи шифрованных данных в современных авиационных радиотехнических системах специальной связи [Текст] / И. К. Малецкий, Е. А. Каминский, Д. М. Захаров // Захист інформації. – 2011. – № 1 (50). – С. 63–69.
3. Пупков, К. А. Функциональные ряды в теории нелинейных систем [Текст] / К. А. Пупков, В. И. Капалин, А. С. Ющенко. – М.: Наука, 1976. – 448 с.
4. Окоча, С. В. Обработка модифицированной информации волоконно-оптических систем передачи данных [Текст] / С. В. Окоча, Ю. В. Пепа // Вестник Восточно-украинского национального университета им. В. Даля. – 2010. – № 9 (151), Ч. 1. – С. 277–280.
5. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] / С. И. Баскаков. – М.: Высшая школа, 1988. – 448 с.
6. Дьяконов, В. П. MATLAB 6.5 SP/7 + Simulink 5/6: Обработка сигналов и проектирование фильтров [Текст] / В. П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с.

References

1. Malecki, I. K., Zakharov, M. D., Liauchuk, A. N. (2009) Modeling of processes of encrypted data in modern aircraft electronic systems, special communications. Defense of information, 6, 13–18.
2. Malecki, I. K., Kaminski, E. A., Zakharov, M. D. (2011) Modeling of processes of encrypted data in modern aircraft electronic systems, special communications. Defense of information, 1 (50), 63–69.
3. Pupkov, K. A., Kapalin, V. I., Yushchenko, A. S. (1976) Series of functions in the theory of nonlinear systems. Science, 448.
4. Okocha, S. V., Pepa, Y. V. (2010). Obrobka modifikovanoї informatsii in fiber systems optichnih peredachi danih. Bulletin of East Ukrainian National University, 9 (151), 277–280.
5. Baskakov, S. I. (1988). Radio Circuits and Signals. High School, 448.
6. Dyakonov, V. P. (2005) .MATLAB 6.5 SP / 7 + Simulink 5/6: Signal processing and designing filters. SOLON Press, 576.

Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Шутко В. М.
Дата надходження рукопису 19.10.2014

Пепа Юрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент, кафедра радиоэлектронных систем и приборов, Национальный авиационный университет, пр. Космонавта Комарова, 1, г. Киев, Украина, 03680
E-mail: yurka14@i.ua

Захаров Даниил Михайлович, аспирант, кафедра радиоэлектронных систем и приборов, Национальный авиационный университет, пр. Космонавта Комарова, 1, г. Киев, 03680
E-mail: dzaharov@meta.ua

Малецкий Иван Константинович, старший преподаватель, кафедра радиоэлектронных систем и приборов, Национальный авиационный университет, пр. Космонавта Комарова, 1, г. Киев, Украина, 03680