

К. т. н. Ю. В. ВИШНЯКОВА

Украина, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

E-mail: juvalort@gmail.com

ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ НА СПЕКТРАЛЬНУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МНОВХОДОВЫХ АНТЕННЫХ СИСТЕМ

Предложены методика и алгоритм проектирования многовходовых антенных систем. В их основе лежит математическая модель, учитывающая наличие элементов с нелинейными свойствами. Представлены результаты численного моделирования многовходовой многоантенной системы. Показано, что при воздействии интермодуляционных помех на систему, в составе которой присутствуют элементы с нелинейными характеристиками, ее частотные характеристики существенно отличаются от характеристик линейной системы. В частности, происходит снижение спектральной эффективности системы вблизи рабочей частоты за счет появления в ее спектральном отклике дополнительных комбинационных составляющих.

Ключевые слова: нелинейные эффекты, многовходовая система, антенна с нелинейными элементами, спектральная эффективность, системы ММО.

При проектировании и исследовании характеристик многовходовых систем, таких как системы ММО (multiple-input multiple-output — технология передачи данных со многими входами и многими выходами), реконфигурируемые адаптивные антенные решетки, возникает необходимость в использовании все более совершенных математических моделей для корректного описания их свойств.

Реальные системы передачи информации являются нелинейными системами из-за нелинейности свойств усилителей, управляющих и переключающих элементов в составе реконфигурируемых излучателей и согласующих цепей и т. п., поэтому помимо сосредоточенных помех, обусловленных присутствием в канале сторонних источников излучения, в таких системах присутствуют также помехи, создаваемые самой системой, например комбинационные составляющие полезных и помеховых сигналов. Наличие таких нелинейных продуктов приводит не только к росту шумовой составляющей, но и к снижению мощности полезного сигнала, следовательно, можно ожидать не только «количественного», но и «качественного» изменения поведения спектральной эффективности (пропускной способности) такой системы. Поскольку большинство разработанных к настоящему времени моделей многовходовых систем, в том числе ММО [1–3], основано на предположении о линейности каналов, они не позволяют учесть влияние эффектов, обусловленных присутствием в составе системы элементов и устройств с нелинейными характеристиками.

Из доступных в настоящее время литературных источников известно несколько нелинейных

моделей ММО [4, 5], но они могут быть использованы для корректного анализа ограниченного числа многовходовых систем, в частности тех, что позволяют пренебречь взаимным влиянием элементов на передающей и приемной сторонах. Это связано с тем, что в этих моделях не анализируется вся система целиком (передающая и приемная части рассматриваются отдельно), соответственно, присутствие нелинейных элементов не может быть учтено при формировании матрицы, описывающей канал передачи, а учитывается только при расчете информационных характеристик системы. В [6, 7] показано, что для моделирования систем ММО и анализа возникающих в них нелинейных эффектов может быть использован математический аппарат теории антенн с нелинейными элементами, подробно описанный в [8], а также разработана более общая математическая модель многовходовых систем, позволяющая учесть присутствие в них различных нелинейных элементов.

Целью настоящей работы была разработка методики и алгоритма проектирования на основе указанной модели, которые позволят проводить анализ многовходовых систем, в составе которых присутствуют элементы и устройства с нелинейными характеристиками, а также проанализировать влияние интермодуляционных помех на спектральную эффективность многовходовой системы.

Методика и алгоритм проектирования

Многовходовая система представляет собой достаточно сложную структуру, в составе которой присутствуют элементы как с сосредоточен-

ными, так и с распределенными параметрами, элементы с линейными и нелинейными характеристиками, поэтому проектирование такой системы на различных этапах целесообразно проводить с использованием моделей различного уровня. Так, на определенных этапах достаточно воспользоваться схмотехническим проектированием и библиотеками моделей стандартных компонентов, в то время как на других этапах невозможно обойтись без полного электродинамического (ЭД) моделирования. Исходя из этого, можно сформулировать следующие требования к методике проектирования многовходовых систем с учетом наличия в них устройств с нелинейными свойствами:

- возможность определения параметров всех типов элементов, входящих в состав системы, с учетом особенностей каждого из них (линейные/нелинейные, сосредоточенные/распределенные, аналоговые/дискретные и т. п.);

- взаимодействие между отдельными «блоками» системы с учетом существующих между ними связей;

- единообразное представление характеристик составных частей системы для возможности анализа всей системы в целом.

С учетом этих требований был разработан развернутый алгоритм проектирования многовходовых систем, блок-схема которого представлена на **рис. 1**. В представленном алгоритме выбор физического принципа действия (ФПД) подразумевает выбор элементной базы проектируемой многовходовой системы, выбор механизма реконфигурации излучателей, согласующих цепей, рассеивателей и т. п.

Второй этап проектирования — выбор технического решения (ТР) — включает выбор конкретного типа приемных и передающих антенн и определяет все последующие этапы проектирования. В зависимости от типа и сложности конфигурации излучающей структуры, выбираются методы и программы для последующих этапов. На этапе выбора ТР определяется также количество и тип используемых переключателей, наличие подстроечных и согласующих элементов, размеры и материал изготовления элементов.

В тех случаях, когда полученные схемы и конфигурация элементов не позволяют реализовать требуемые характеристики многовходовой системы, возникает необходимость оптимизации значений параметров сосредоточенных элементов и топологии элементов с распределенными параметрами. Соответственно, третий этап проектирования (оптимизация) включает в себя решение задач параметрического и структурного синтеза проектируемой системы в рамках выбранного ТР в соответствии с заданными критериями качества.

Для этапа оптимизации был модифицирован и программно реализован генетический алгоритм (ГА) как достаточно простой и показавший свою эффективность, в частности, при решении задач

синтеза антенн [9, 10]. Разработанная программа WIRE_MIMO позволяет проводить оптимизацию антенн сложной конфигурации в тонкопроволочном представлении, в состав которых входят сосредоточенные элементы с управляемыми нелинейными характеристиками, изменение которых может происходить дискретно либо непрерывно.

На каждом шаге предложенного алгоритма перечисленные выше требования учтены путем совместного использования программных продуктов различного уровня. Для каждого из блоков системы выбирается наилучшая с точки зрения точности получаемых результатов и временных затрат среда моделирования, например: 3D-ЭД-моделирование — для систем проволочных излучателей (в данной работе использовался доработанный автором пакет WIRE_MIMO); 2,5D-ЭД-моделирование — для планарных электродинамических структур; схмотехническое моделирование — для элементов с сосредоточенными параметрами (в данной работе использовался пакет AWR MWO) и т. п. Анализ всего канала передачи информации с учетом подключаемых нелинейных элементов (подробнее см. в [6]) осуществляется в среде ЭД-моделирования (WIRE), благодаря чему учитываются взаимные связи и взаимодействия между всеми элементами нелинейной многовходовой системы. Такой анализ становится возможным благодаря единообразному представлению всех блоков системы в виде многополюсников, описываемых матрицами S , Z либо Y параметров, а также за счет реализации в используемых пакетах программ представления выходных данных в едином формате.

Если в структуру элемента с распределенными параметрами (излучателя, рассеивателя, цепи согласования либо питания и т. п.) требуется включить сосредоточенные элементы с нелинейными характеристиками, то в геометрию ЭД-модели вводятся дополнительные внешние узлы, в результате чего у линейного многополюсника формируются дополнительные группы входов для подключения моделей нелинейных элементов, конкретный вид которых выбирается на этапе схмотехнического моделирования. После этого проводится схмотехнический анализ нелинейной системы (например, методом гармонического баланса, методом рядов Вольтерра и т. п.) и рассчитываются выходные характеристики многовходовой системы (мощность, поступающая в нагрузку приемника, отношение сигнал/(шум+помеха) на входе приемных антенн, спектральная эффективность системы и т. п.).

Таким образом, представленные методика и алгоритм позволяют рассматривать многовходовые системы при наличии в них элементов и устройств с нелинейными характеристиками, в том числе и многовходовые системы передачи информации, такие как MIMO.

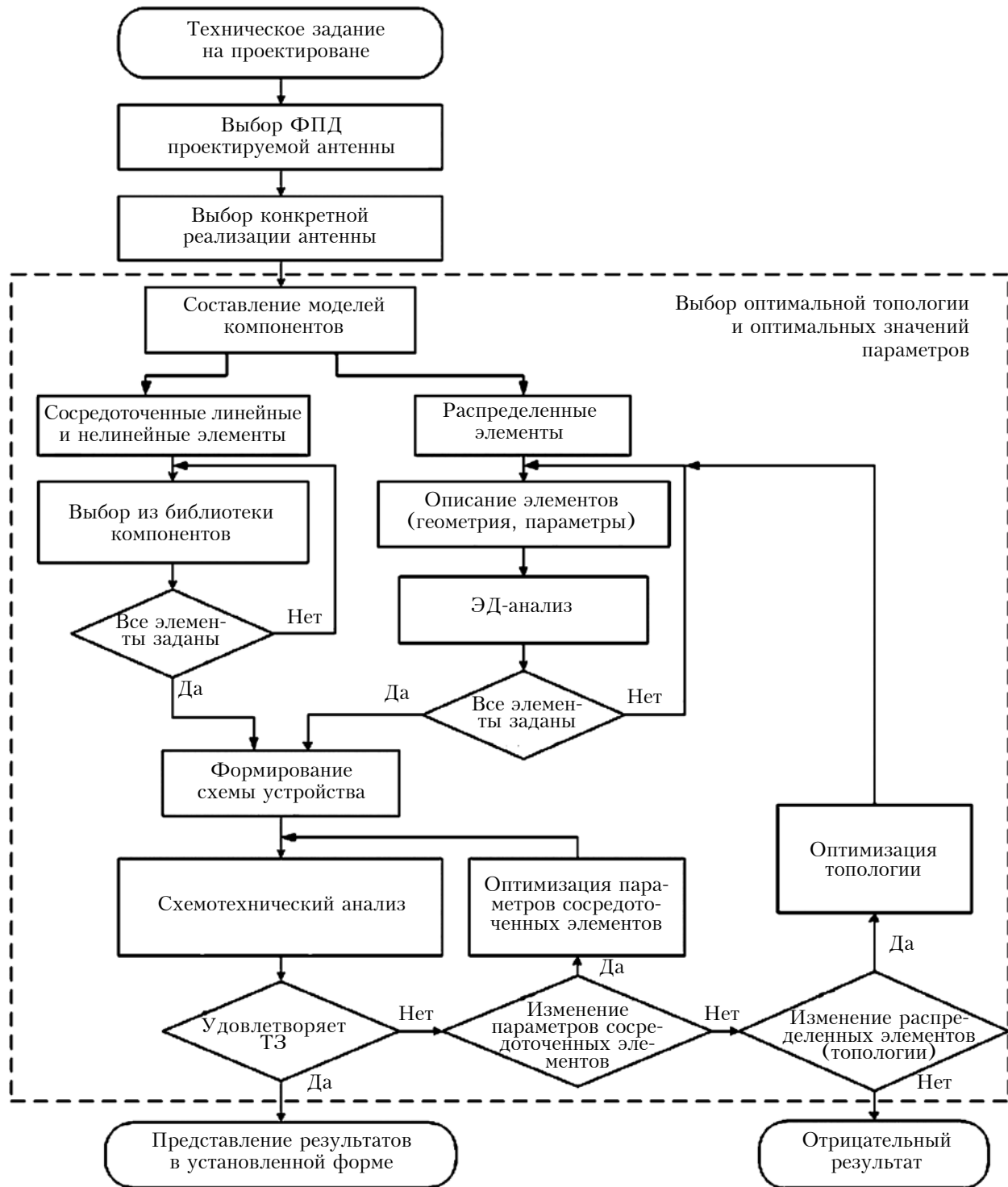


Рис. 1. Алгоритм проектирования реконфигурируемых антенных систем

Влияние интермодуляционной помехи на спектральную эффективность многовходовой системы с нелинейными элементами

В качестве примера использования описанных выше алгоритма и программных продуктов проведено исследование характеристик простой многовходовой системы, показанной на

рис. 2. Система состоит из передающей решетки *TX* (антенны 1 и 2 с близкими рабочими частотами — 2,500 и 2,501 ГГц) и приемной решетки *RX* (пассивный рассеиватель 3 и антенна 4, на выходе которой включена нелинейная проводимость). В данном примере для численных расчетов в программе WIRE межэлементное расстояние d , приведенное к длине волны λ , при-

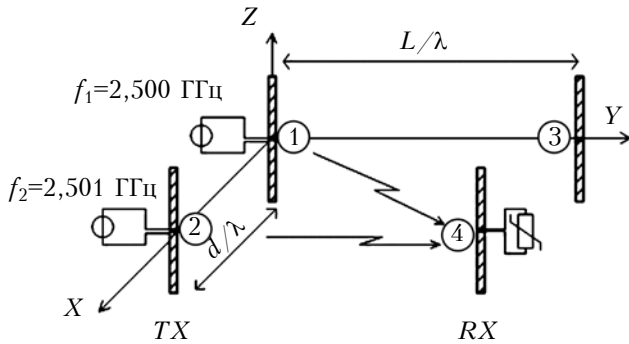


Рис. 2. Пример многоходовой системы:
TX — передающая решетка; RX — приемная решетка;
1, 2 — антенны; 3 — пассивный рассеиватель; 4 — антенна

нято равным $d/\lambda=1$; расстояние между передающей и приемной решетками $L/\lambda=10$. В качестве примера рассматривалась кубическая нелинейность, и вольт-амперная характеристика нелинейного элемента описывалась выражением

$$i(u)=g_1u+g_2u^2+g_3u^3, \quad (1)$$

где g_1, g_2, g_3 — параметры, характеризующие степень нелинейности сосредоточенной проводимости.

Из-за присутствия в системе элемента с нелинейными характеристиками воздействие двух сигналов с близкими частотами приводит к появлению на выходе системы новых комбинационных составляющих с частотами $f_{\text{ИМ}}=mf_1+nf_2$, где m и n — целые числа. Ближе всего к рабочим частотам передающих антенн расположены комбинационные составляющие нечетных порядков: третьего порядка с частотами $2f_1-f_2$ и $2f_2-f_1$, а затем пятого порядка с частотами $3f_1-2f_2$ и $3f_2-2f_1$. Соответственно, все эти составляющие представляют наибольшую опасность, поскольку, как правило, попадают в полосу рабочих частот системы.

Если система линейная, т. е. ток через нелинейный элемент равен нулю ($g_1=g_2=g_3=0$, $i(u)=0$), принимаемый сигнал в антенне 4 имеет две составляющие с частотами полезных сигналов f_1 и f_2 , а побочные составляющие отсутствуют. При подключении нелинейного элемента ко входу приемной антенны $g_3 \neq 0$ (например, $g_3=0,1$), $i(u)=g_3u^3 \neq 0$, и в принимаемом сигнале появляется существенная по величине помеховая компонента P_i , обусловленная комбинационными составляющими третьего и пятого порядков со следующими частотами: $2f_1-f_2=2,499$ ГГц; $-f_1+2f_2=2,502$ ГГц; $-2f_1+3f_2=2,498$ ГГц; $3f_1-2f_2=2,503$ ГГц. На рис. 3 приведены частотные зависимости мощности составляющих сигнала на выходе приемной антенны, полученные средствами AWR (показаны только составляющие с частотами f_1 , $2f_1-f_2$ и $-2f_1+3f_2$, поскольку кривые $P(f_1)$

и $P(f_2)$, $P(2f_1-f_2)$ и $P(-f_1+2f_2)$, $P(-2f_1+3f_2)$ и $P(3f_1-2f_2)$ практически совпадают).

Спектральная эффективность (СЭ) системы описывается выражением [3]

$$C = \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_i + P_{sh}} \right), \quad (2)$$

где второе слагаемое в скобках представляет собой отношение сигнал/(помеха+шум), а P_s , P_i , P_{sh} — соответственно, мощность полезного сигнала, помехи и шума (в мВт).

Значения мощности вычисляется по формулам

$$P_s = \frac{1}{n_s} \sum_{k=1}^{n_s} P_{s_k},$$

$$P_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} P_{i_j},$$

где n_s , n_i — количество полезных и помеховых сигналов соответственно.

Мощность шума изменялась в пределах $-10, -20, \dots, -150$ дБм, т. е. $P_{sh}=10^{-1}, 10^{-2}, \dots, 10^{-15}$, 0 мВт. Частотная зависимость спектральной эффективности при различной мощности шума для случая, когда интермодуляционная (ИМ) помеха отсутствует (система линейная), представлена на рис. 4, а, где видно, что с уменьшением мощности шума спектральная эффективность системы растет.

При наличии нелинейности и, соответственно, появлении ИМ-помехи характер частотной зависимости изменяется (рис. 4, б, в): вблизи рабочей частоты спектральная эффективность резко уменьшается, а при удалении от рабочей частоты передающих антенн — стремится к случаю линейной системы. Такое поведение СЭ можно объяснить, основываясь на частотной зависимости мощности комбинационных составляющих на выходах приемной антенны (см. рис. 3). По мере удаления от рабочей частоты значения амплитуды комбинационных составляющих высших порядков (помеховых сигналов) уменьшаются быстрее, чем для основных составляющих,

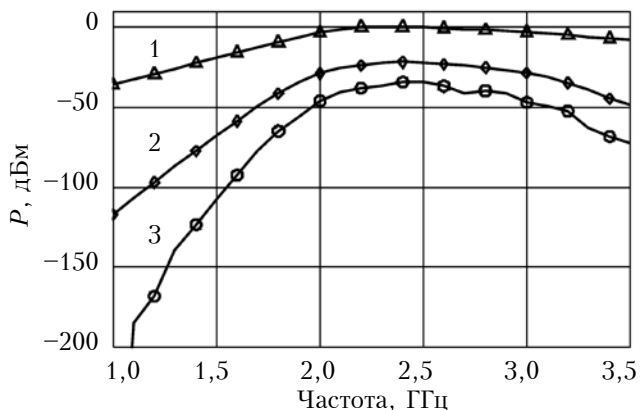


Рис. 3. Частотная зависимость мощности составляющих сигнала на выходе приемной антенны:
1 — $P(f_1)$; 2 — $P(2f_1-f_2)$; 3 — $P(-2f_1+3f_2)$

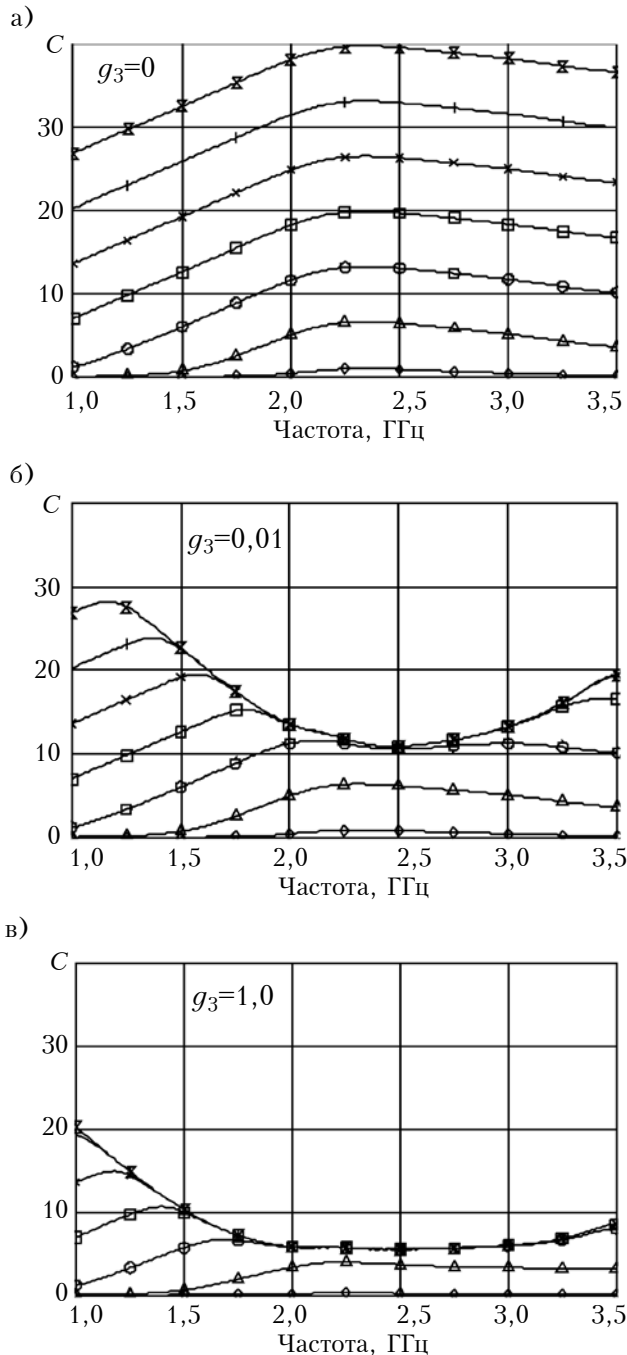


Рис. 4. Частотная зависимость спектральной эффективности C многовходовой системы при отсутствии ИМ-помехи (а) и при ее наличии (б, в) для различной мощности шума $P_{sh}=10^k$ мВт, определяемой при $k = -3$ для верхней кривой и далее с шагом -2 вплоть до $k = -15$ для нижней

и становятся несущественными по сравнению с амплитудами сигналов основной частоты, что соответствует случаю линейной системы.

Таким образом, с уменьшением мощности шума спектральная эффективность растет как в линейном, так и в нелинейном случае при любой степени нелинейности (величине g_3). В то же время, в области рабочих частот предельное

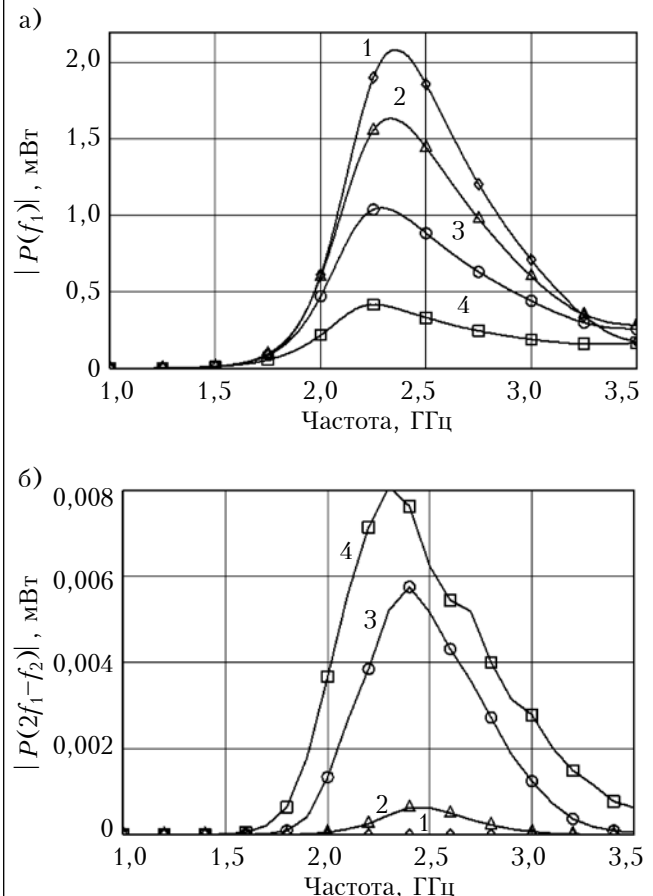


Рис. 5. Частотная зависимость мощности на выходе приемной антенны на основной частоте f_1 (а) и на частоте $2f_1 - f_2$ (б) при различной степени нелинейности: 1 – $g_3 = 0$; 2 – $g_3 = 0,01$; 3 – $g_3 = 0,1$; 4 – $g_3 = 1$

значение СЭ в значительной мере зависит от степени нелинейности: на частоте $f_0=2,5$ ГГц при $g_3=0,01$ СЭ составляет примерно 11 (рис. 4, б), а при $g_3=1,0$ – около 6 (рис. 4, в). Это обусловлено различием значений мощности интермодуляционных помех на выходах приемной антенны, частотные зависимости которой для различных g_3 показаны на рис. 5. Как видно из графиков, с ростом степени нелинейности уменьшается амплитуда основных частотных составляющих (рис. 5, а) и растут амплитуды интермодуляционных составляющих (рис. 5, б).

На рис. 6 представлена частотная зависимость спектральной эффективности при значениях мощности шума 10^{-7} и 10^{-15} мВт для линейного ($g_3=0$) и для нелинейного ($g_3=0,01; 0,1; 1$) случаев. Здесь видно, что при преобладании шумовой компоненты (рис. 6, а) максимум СЭ рассматриваемой системы находится вблизи рабочей частоты, а при преобладании помеховой компоненты (рис. 6, б) наличие комбинационных составляющих высших порядков приводит к тому, что по мере удаления от рабочей частоты значение СЭ все более существенно возрастает по сравнению со значением на центральной частоте. То есть, с уменьшением шумовой составляющей рост СЭ

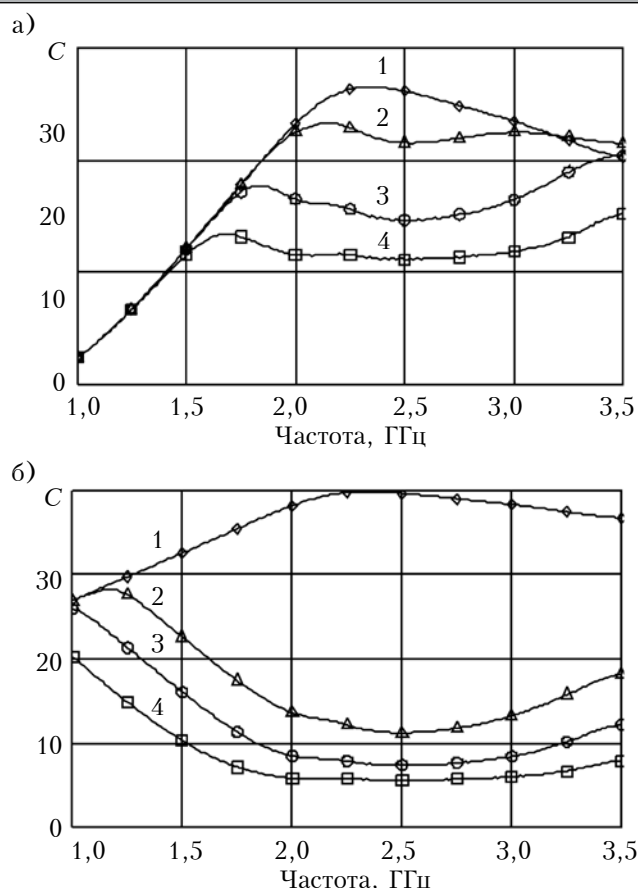


Рис. 6. Частотная зависимость спектральной эффективности многовходовой системы для мощности шума $P_{sh}=10^{-7}$ мВт (а) и $P_{sh}=10^{-15}$ мВт (б) при различной степени нелинейности:

1 — $g_3 = 0$; 2 — $g_3 = 0,01$; 3 — $g_3 = 0,1$; 4 — $g_3 = 1$

наблюдается до тех пор, пока не начинает преобладать помеховая составляющая.

Таким образом, очевидно, что исследование реальных многовходовых систем необходимо проводить с учетом элементов с нелинейными характеристиками, поскольку их наличие может, с одной стороны, привести к снижению мощности, излученной на основных частотах, а с другой — к снижению отношения сигнал/шум на выходах приемных антенн и, соответственно, к снижению спектральной эффективности всей системы передачи информации.

Выводы

Разработанная методика и алгоритм проектирования позволили провести моделирование и проанализировать многовходовые системы, в состав которых входят элементы с нелинейными характеристиками. Анализ показал, что наличие нелинейных элементов приводит к уменьшению спектральной эффективности системы за счет появления наряду с шумами дополнительных интермодуляционных помех. При этом ча-

стотная характеристика спектральной эффективности нелинейной и линейной систем существенно различаются между собой, а различие зависит от степени нелинейности характеристик элементов, мощности излучения передающих антенн, уровня помеховых сигналов. При сильной нелинейности спектральная эффективность может уменьшиться более чем в два раза.

Проведенные исследования показали, что при проектировании и анализе характеристик многовходовых систем передачи информации необходимо использовать модели, методики и алгоритмы, позволяющие учитывать присутствие в составе таких систем элементов и устройств с нелинейными свойствами. Представленные в данной работе методика и алгоритм проектирования позволяют решать такие задачи и получать адекватные характеристики реальных систем.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Wallace J.W., Jensen M.A. Termination-dependent diversity performance of coupled antennas: network theory analysis // IEEE Trans. on Ant. and Prop. — 2004. — Vol. 52, N 1. — P. 98–105.
2. Wallace J.W., Mehmood R. On the accuracy of equivalent circuit models for multi-antenna systems // IEEE Trans. on Ant. and Prop. — 2012. — Vol. 60, N 2. — P. 540–547.
3. Пономарев Л.И., Скородумов А.И. Оптимизация спектральной эффективности в многоканальных системах сотовой связи // Радиотехника и электроника. — 2009. — Т. 54, № 1. — С. 81–97.
4. Banani S.A., Vaughan R.G. Compensating for non-linear amplifiers in MIMO communications systems // IEEE Trans. on Ant. and Prop. — 2012. — Vol. 60, N 2. — P. 700–714.
5. Rizzoli V., Costanzo A., Masotti D., Aldrigo M., Donzelli F., Esposti V.D. Integration of non-linear, radiation, and propagation CAD techniques for MIMO link design // Int. Journal of Microwave and Wireless Technologies. — 2012. — Vol. 4, N 2. — P. 223–232.
6. Вишнякова Ю.В. Использование теории антенн с нелинейными элементами для анализа ММО систем // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. — 2013. — № 4(12). — С. 5–22.
7. Вишнякова Ю.В., Лучанинов А.И. Математическая модель ММО системы с учетом нелинейных эффектов // Матер. 23-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2013). Т. 2. — Украина, г. Севастополь. — 2013. — С. 967–968.
8. Luchaninov A.I., Shifrin Ya.S. Mathematical model of antenna with lumped nonlinear elements // Telecommunications and Radio Engineering. — 2007. — Vol. 66, N 9. — P. 763–803.
9. Дубровка Ф.Ф., Василенко Д.О. Конструктивный синтез планарных антенн с помощью природных алгоритмов оптимизации // Известия вузов. Радиоэлектроника. — 2009. — Т. 52, № 4. — С. 3–22.
10. Altshuler E.E. Electrically small self-resonant wire antennas optimized using a genetic algorithm // IEEE Trans. on Ant. and Prop. — 2002. — Vol. 50, № 3. — P. 297–300.

Дата поступления рукописи
в редакцию 19.12 2014 г.

ВПЛИВ НЕЛІНІЙНИХ ЕФЕКТІВ НА СПЕКТРАЛЬНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ
БАГАТОВХОДОВИХ АНТЕННИХ СИСТЕМ

Для багатовходових антенних систем запропоновано методику й алгоритм проектування, в основу яких покладено розроблену математичну модель, яка враховує наявність елементів з нелінійними властивостями. Наведено результати чисельного моделювання багатовходової багатоантенної системи. Показано, що при дії інтермодуляційних завад на систему, у складі якої присутні елементи з нелінійними характеристиками, її частотні характеристики істотно відрізняються від характеристик лінійної системи. Зокрема, відбувається зниження спектральної ефективності системи поблизу робочої частоти за рахунок появи у її спектральному відгуку додаткових комбінаційних складових.

Ключові слова: нелінійні ефекти, багатовходова система, антена з нелінійними елементами, спектральна ефективність, MIMO системи.

DOI: 10.15222/TKEA2015.4.08
UDC 621.396.677.3

J. V. VISHNIAKOVA

Ukraine, Kharkov National University of Radioelectronics
E-mail: juvalort@gmail.com

THE INFLUENCE OF NONLINEAR EFFECTS ON THE SPECTRAL EFFICIENCY
OF MULTIINPUT ANTENNA SYSTEMS

The analysis technique and design algorithm are proposed for multiinput antenna systems, based on the mathematical model developed. The technique and algorithm described allow the analysis of a wide class of multiinput systems, in particular, MIMO systems, reconfigurable multiantenna systems, multiinput systems with nonlinear components and devices.

The paper presents numerical analysis results of the intermodulation interference effect on the spectral efficiency of a multiinput system with nonlinear elements in receiving antennas, obtained using the methods, algorithms and software products developed.

It is shown that in the nonlinear system intermodulation interferences appear, and the spectral efficiency of the data transmission system decays near the operating frequency due to the appearance of additional combinational components in the frequency response of the system. This effect depends on the degree of nonlinearity, radiated power, the level of interfering signals.

Based on the results obtained, it was concluded that the presence of nonlinear elements and devices must be taken into account in the design and analysis processes of multiinput multiantenna systems, considering the specific types of those nonlinearities.

Keywords: nonlinear effects, multiinput system, antenna with nonlinear elements, spectral efficiency, MIMO systems.

REFERENCES

- Wallace J.W., Jensen M.A. Termination-dependent diversity performance of coupled antennas: network theory analysis. *IEEE Trans. on Ant. and Prop.*, 2004, vol. 52, no. 1, pp. 98-105.
- Wallace J.W., Mehmood R. On the accuracy of equivalent circuit models for multi-antenna systems // *IEEE Trans. on Ant. and Prop.*, 2012, vol. 60, no. 2, pp. 540-547.
- Ponomarev L.I., Skorodumov A.I. Optimization of the spectral efficiency in MIMO cellular wireless communications. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2009, vol. 54, no. 1, pp. 76-91. DOI: 10.1134/S1064226909010070
- Banani S.A., Vaughan R.G. Compensating for nonlinear amplifiers in MIMO communications systems. *IEEE Trans. on Ant. and Prop.*, 2012, vol. 60, no. 2, pp. 700-714.
- Rizzoli V., Costanzo A., Masotti D., Aldrigo M., Donzelli F., Esposti V.D. Integration of non-linear, radiation, and propagation CAD techniques for MIMO link design. *Int. Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2012, vol. 4, no. 2, pp. 223-232.
- Vishniakova Yu.V. [Application of the theory of antennas with nonlinear elements for the MIMO systems analysis]. *Radio and telecommunication systems*, 2013, no. 4(12), pp. 5-22. (Rus)
- Vishniakova Yu.V., Luchaninov A.I. [Mathematical model of MIMO system with nonlinear effects]. *Proc. of the 23rd Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2013)*, vol. 2, Ukraine, Sevastopol, 2013, pp. 967-968 (Rus)
- Luchaninov A.I., Shifrin Ya.S. Mathematical model of antenna with lumped nonlinear elements. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2007, vol. 66, no. 9, pp. 763-803.
- Dubrovka F.F., Vasylenko D.O. Synthesis of UWB planar antennas by means of natural optimization algorithms. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2009, vol. 52, no. 4, pp. 3-22. DOI: 10.3103/S0735272709040013
- Altshuler E.E. Electrically small self-resonant wire antennas optimized using a genetic algorithm. *IEEE Trans. on Ant. and Prop.*, 2002, vol. 50, no. 3, pp. 297-300.