

УДК 621.396

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА ОТКЛИКА СЛОЖНОГО ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА ОТ НЕЛИНЕЙНОСТИ С АППРОКСИМАЦИЕЙ СТЕПЕННЫМ РЯДОМ

М.М. ИВАНОВ, В.М. ЧЕРТКОВ
(Полоцкий государственный университет)

Разработана программная модель в среде Matlab, позволяющая моделировать переизлученный сигнал от нелинейности с аппроксимацией степенным рядом. Синтезировано несколько видов сложных зондирующих сигналов, представленных в виде аддитивной смеси СШП сигнала и негармонического СВЧ-сигнала. Проведен спектральный анализ моделируемых переизлученных сигналов. На основании результатов анализа произведен выбор и обоснование зондирующего сигнала, при котором переизлученный сигнал имеет наибольшее значение мощности.

Ключевые слова: нелинейный радиолокатор, сверхширокополосный сигнал, нелинейный элемент.

Введение. Известно, что применение аддитивной смеси сверхширокополосных (СШП) и сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов в нелинейной радиолокации обуславливает возникновение эффекта их взаимной модуляции [1], способного влиять на чувствительность нелинейного радиолокатора (НРЛ) [2].

Целью работы является сравнительный анализ сложных зондирующих сигналов, представленных в виде аддитивной смеси СШП-сигнала и негармонического СВЧ-сигнала, путем моделирования отклика от элементов с нелинейной вольтамперной характеристикой (НЭ) для повышения чувствительности нелинейного радиолокатора (НРЛ). Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- создания имитационной модели взаимодействия зондирующего сигнала с НЭ;
- проведения спектрального анализа переизлученных сигналов от НЭ;
- выбора и обоснования зондирующего сигнала, при котором переизлученный сигнал имеет наибольшее значение мощности.

Синтез программной модели. Моделирование проведено для двух случаев нелинейности, аппроксимированной степенным рядом:

- второго порядка, которая имитирует полупроводник радиоэлектронного элемента [3] и для нелинейности;
- третьего порядка, которая имитирует полупроводник, полученный в результате соединений металлов или их окислов [3].

Для анализа переизлученных сигналов от НЭ при зондировании СШП-сигналом совместно с СВЧ используется программная модель (ПМ), реализованная в среде Matlab. Программная модель выполняет следующие функции:

- генерирование зондирующего сигнала с заданными параметрами;
- имитация наличия шума в радиоканале;
- моделирование нелинейности с аппроксимацией степенным рядом;
- расчет переизлученного сигнала;
- спектральное представление зондирующего и переизлученного сигналов.

При моделировании рассмотрены следующие виды зондирующих сигналов:

- СШП-сигнал и мощный гармонический СВЧ-сигнал;
- СШП-сигнал и СВЧ-сигнал, частотно модулированный синусоидальным сигналом;
- СШП-сигнал и СВЧ-сигнал, частотно модулированный пилообразным;
- СШП-сигнал и СВЧ-сигнал, частотно модулированный последовательностью кода Баркера.

Структурная схема, поясняющая принцип работы ПМ, представлена на рисунке 1.

Зондирующий сигнал формируется с помощью Matlab модели и экспортируется в модель Simulink, где моделируется взаимодействие с нелинейностью. Затем результат моделирования экспортируется в Matlab модель для спектрального анализа. Экспорт и импорт данных осуществляется с помощью следующего программного кода:

```
wave.time = t; % экспорт времени в Simulink
wave.signals.values = zond'; % экспорт зондирующего сигнала в Simulink
wave.signals.dimensions = 1;
%% ВЫЗОВ СИМУЛИНК МОДЕЛИ
model = 'intermod_sim';
load_system(model)
sim(model)
zondh=simout2.signals.values; % экспорт зондирующего сигнала
otr=simout.signals.values % экспорт переизлученного сигнала
```

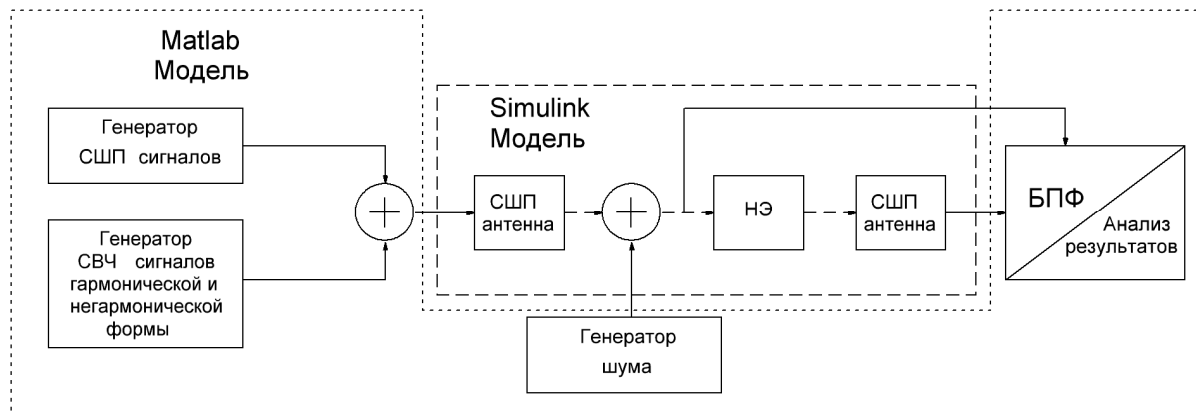


Рисунок 1. – Структурная схема ПМ

На рисунке 2 представлена структура модели Simulink.

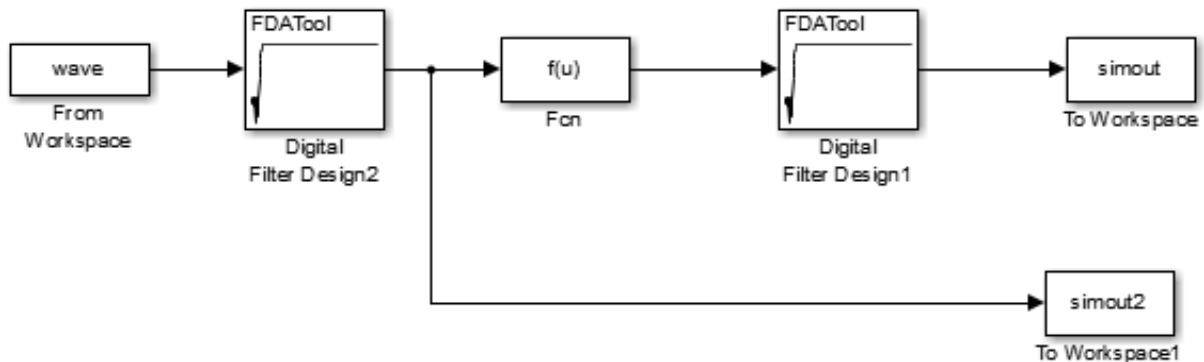


Рисунок 2. – Модель взаимодействия нелинейного элемента с зондируемым сигналом

Функциональное назначение блоков модели Simulink:

- блок «From workspace» импортирует из workspace отсчеты зондирующего сигнала;
- блоки «Digital Filter Design2» и «Digital Filter Design1» моделируют ограничение нижней частоты передающей и принимаемой антенн соответственно и представляют собой цифровые СВЧ-фильтры;
- блок «Fcn» моделирует нелинейность, аппроксимированную степенным рядом второго или третьего порядка;
- блок «To Workspace» экспортирует отсчеты в workspace переизлученного от НЭ сигнала и принятого на приемную антенну НРЛ;
- блок «To Workspace1» экспортирует отсчеты в workspace зондирующего сигнала с учетом ограничения его спектра на передающей антенне.

Считаем, что антенны, используемые на прием и передачу СШП-сигналов, одинаковы, нижняя частота полосы пропускания которых составляет 450 МГц.

СШП-сигнал имеет вид последовательности импульсов, форму которых описывает вторая производная функции Гаусса. Данный вид сигнала широко распространен в СШП-радиолокации [4]. Спектр СШП-сигнала находится в диапазоне от 0,5 до 1,5 ГГц, а уровень средней мощности составляет минус 60 дБм.

Последовательность таких импульсов частотой 100 МГц и максимальной мощностью – минус 45 дБм в Matlab модели описана с помощью кода

```
N=512; % количество моделируемых точек
Fs=10e+9; % частота дискретизации
fp=1/(1e-9); % ширина спектральной плотности СШП сигнала
t=0:1/Fs:(N-1)/Fs; %формирование временных отсчетов моделирования
yi=0;
for i=1:512
y(i,:) = gausspuls(t-(i*100)/Fs,fp,1); % формирование последовательности
yi=yi+y(i,1:512); % второй производной импульсов Гаусса
end
```

```
figure; % вывод на график СШП сигнала в частотной области
plot(f,fftshift(10*log10(1000/50*abs(fft(yi.*w')).^2)));xlabel('f,Hz');
ylabel('Power,dBm')
figure; % вывод на график во временной области СШП сигнала
plot(t,yi);xlabel('t,c'); ylabel('U,B')
```

Моделируемый СШП сигнал во временной области представлен на рисунке 3, а и в частотной – на рисунке 3, б.

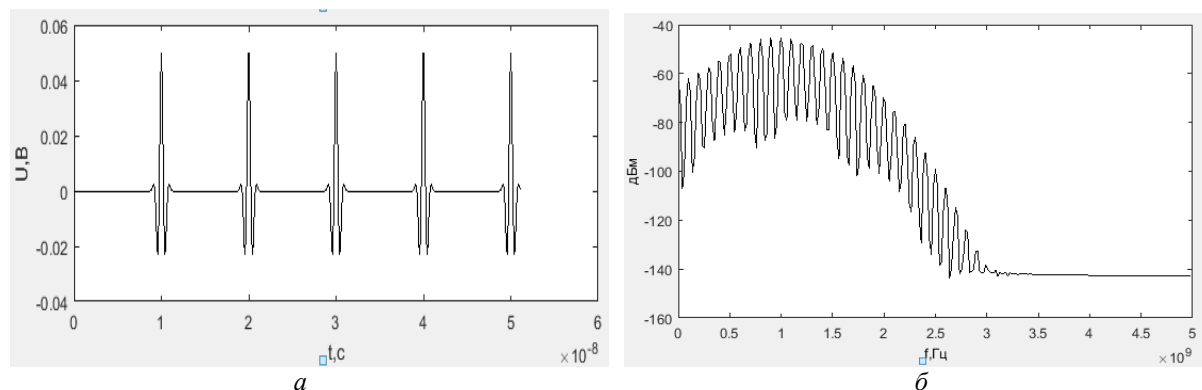


Рисунок 3. – Моделируемый СШП-сигнал во временной области (а), в частотной области (б)

Спектральный анализ и результаты моделирования.

Эксперимент 1. Зондирующий сигнал представляет собой аддитивную смесь СШП и мощного гармонического СВЧ-сигналов. Мощность гармонического сигнала задана на уровне минус 4,4 дБм, частота – 900 МГц, при этом средний уровень шума составляет минус 50 дБм. Листинг кода модели Matlab для моделирования гармонического сигнала выглядит следующим образом:

```
harmonic=0.5.*sin(2*pi*fn*t); % гармонический сигнал
Noise=0.02*randn(1,length(t)); % шум
figure; % гармонический сигнал во временной области
```

Рассмотрим результаты моделирования. Спектр зондирующего сигнала показан на рисунке 4.

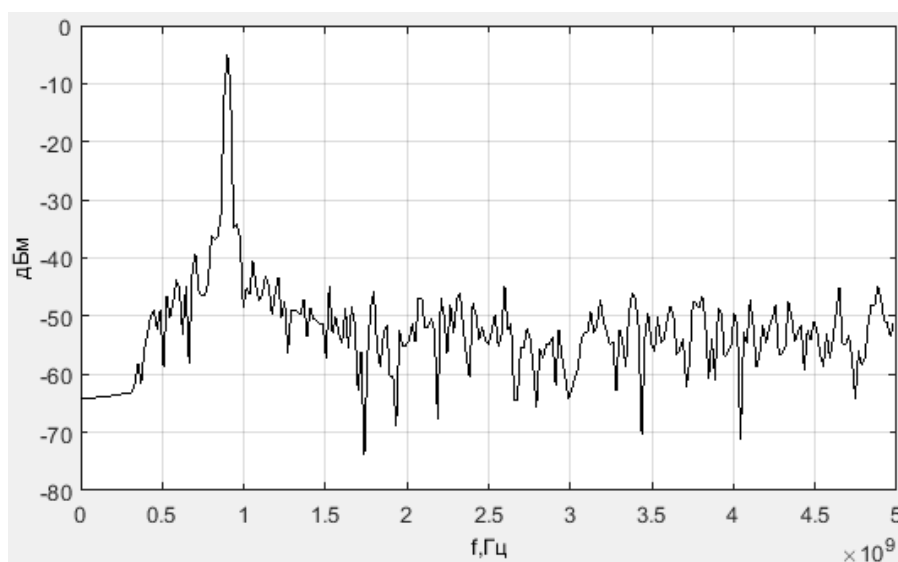


Рисунок 4. – Спектр зондирующего сигнала

В таком случае спектр переизлученного сигнала от нелинейности, аппроксимированной степенным рядом второго порядка, показан на рисунке 5, а, а от нелинейности аппроксимированной степенным рядом третьего порядка – на рисунке 5, б.

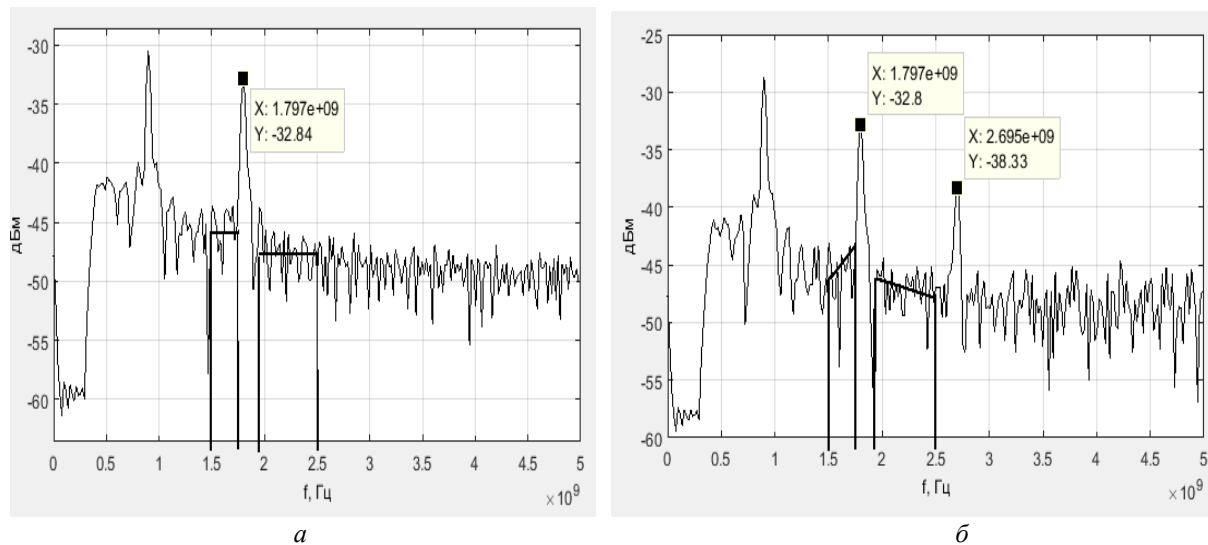


Рисунок 5. – Спектр переизлученного сигнала от нелинейности, аппроксимированной степенным рядом второго порядка (а) и третьего порядка (б)

В спектре переизлученного сигнала от нелинейности, аппроксимированной степенным рядом второго порядка, появилась удвоенная гармоника СВЧ-сигнала мощностью минус 33 дБм, в диапазоне от 1,5 до 1,7 ГГц виден подъем средней мощности до минус 44 дБм, а в диапазоне от 1,9 до 2,5 ГГц – до минус 47 дБм. Уровень шума составляет минус 50 дБм.

В спектре переизлученного сигнала от нелинейности, аппроксимированной степенным рядом третьего порядка, появились удвоенная и утроенная гармоники СВЧ-сигнала мощностью минус 33 дБм и минус 38 дБм соответственно. В диапазоне от 1,5 до 1,7 ГГц значение средней мощности увеличилось до минус 44 дБм, в диапазоне от 1,9 до 2,3 ГГц – до минус 45 дБм. Необходимо отметить, что и уровень шума вырос до минус 46 дБм.

Эксперимент 2. Зондирующий сигнал представляет собой аддитивную смесь СШП и частотно модулированного СВЧ сигнала. Индекс модуляции равен 10, модулирующий сигнал имеет вид синусоидального сигнала частотой 3кГц, Формирование данного зондирующего сигнала выполняется с помощью следующего программного кода:

```
tone=5.*sin(2*pi*3e3*t); %генерация тона
mod=pmmod(tone, fn,Fs,10);% модуляция тоном
zondfm=mod+yi+Noise; %зондирующий сигнал
```

Рассмотрим результаты моделирования. Спектр зондирующего сигнала показан на рисунке 6.

Спектр переизлученного сигнала от нелинейности, аппроксимированной степенным рядом второго порядка, показан на рисунке 7, а и от нелинейности, аппроксимированной степенным рядом третьего порядка, – на рисунке 7, б.

В спектре переизлученного сигнала от нелинейности, аппроксимированной степенным рядом второго порядка, присутствует вторая гармоника СВЧ-сигнала мощностью минус 12 дБм, а также наблюдается повышение средней мощности в диапазонах от 1,5 до 1,7 ГГц до минус 45дБм и от 1,9 до 2,5 ГГц до минус 43 дБм, вызванное нелинейным преобразованием СШП-сигнала.

В спектре переизлученного сигнала от нелинейности, аппроксимированной степенным рядом третьего порядка, уровень шума увеличился до минус 44 дБм. Присутствуют вторая и третья гармоники СВЧ-сигнала мощностью минус 12 дБм и минус 18 дБм соответственно. Наблюдается повышение значения средней мощности в диапазонах от 1,5 до 1,7 ГГц до минус 43 дБм, в диапазоне от 1,9 до 2,5 ГГц – до минус 44 дБм.

Уровень мощности второй гармоники на 21 дБм выше уровня мощности второй гармоники при проведении эксперимента 1. Аналогичное превышение уровня наблюдается и для третьей гармоники. Значение средней мощности на частотах в диапазоне от 1,9 до 2,5 ГГц в эксперименте 2 выше на 2 дБм чем в эксперименте 1.

Эксперимент 3. В качестве зондирующего сигнала используется аддитивная смесь СШП и частотно модулированного СВЧ-сигнала сигналом пилообразной формы частотой 30 кГц. Индекс модуляции равен 10. Ниже представлен программный код моделирования данного сигнала:

```
chirp = 5.*sawtooth(2*pi*30e3*t); % формирование пилообразного сигнала
mod=pmmod(chirp, fn,Fs,10);      % ЧМ модуляция
zondlchm=mod+yi+Noise; % зондирующий сигнал
```

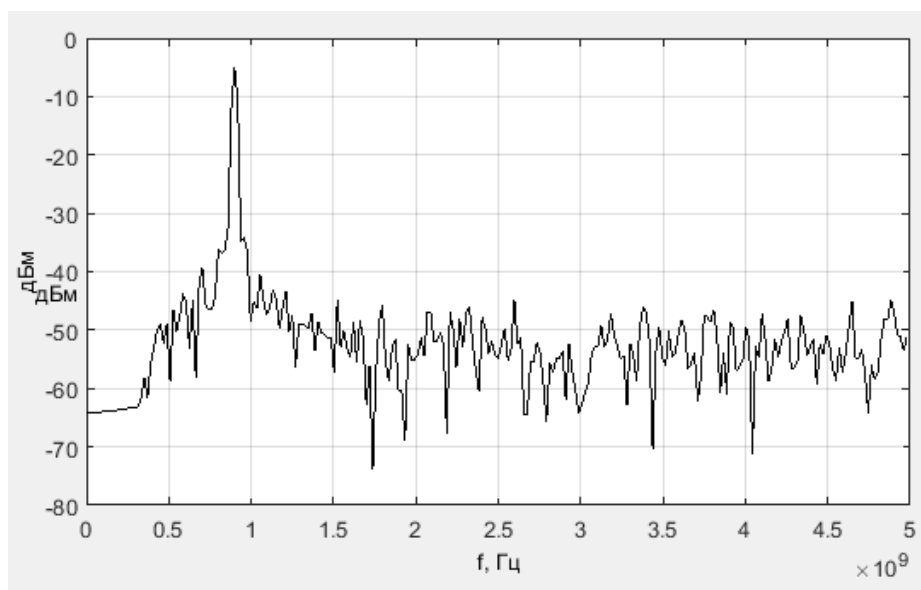


Рисунок 6. – Спектр зондирующего сигнала

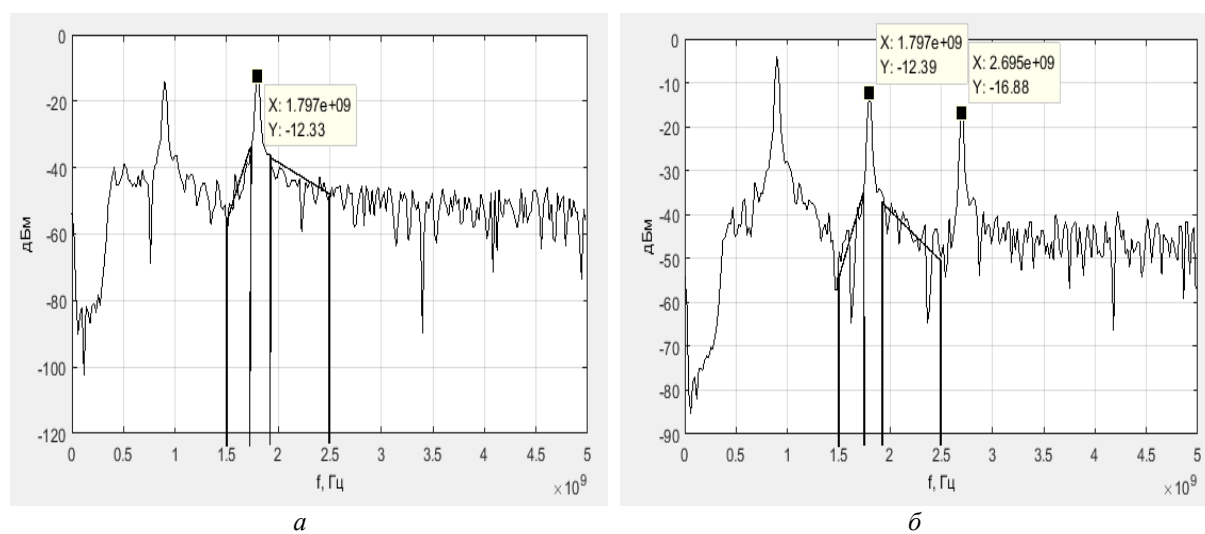


Рисунок 7. – Спектр переизлученного сигнала от нелинейности, аппроксимированной степенным рядом второго порядка (а) и третьего порядка (б)

Спектр зондирующего сигнала представлен на рисунке 8.

Спектр переизлученного сигнала от нелинейности, аппроксимированной степенным рядом второго порядка, показан на рисунке 9, а, а от нелинейности, аппроксимированной степенным рядом третьего порядка, – на рисунке 9, б.

В спектре переизлученного сигнала от нелинейности, аппроксимированной степенным рядом второго порядка, присутствует вторая гармоника СВЧ сигнала мощностью минус 12дБм. В диапазоне от 1,5 до 1,7 ГГц повышения значения средней мощности не наблюдается, а в диапазоне от 1,9 до 2,5 ГГц средняя мощность увеличилась до минус 42 дБм.

В спектре переизлученного сигнала от нелинейности, аппроксимированной степенным рядом третьего порядка присутствуют вторая и третья гармоники СВЧ-сигнала мощностью минус 12 дБм и минус 18 дБм соответственно. Также наблюдается увеличение значения средней мощности в диапазоне от 1,9 до 2,5 ГГц до минус 41 дБм, а в диапазоне от 1,5 до 1,7 ГГц значение средней мощности не увеличилось.

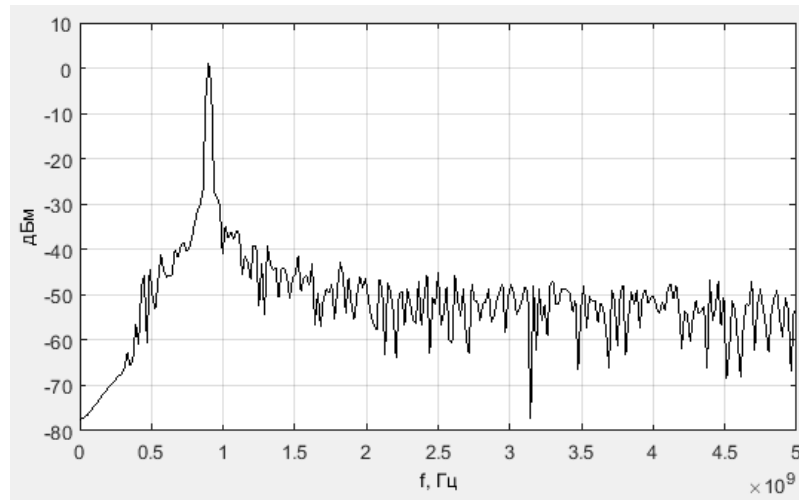


Рисунок 8. – Спектр зондирующего сигнала

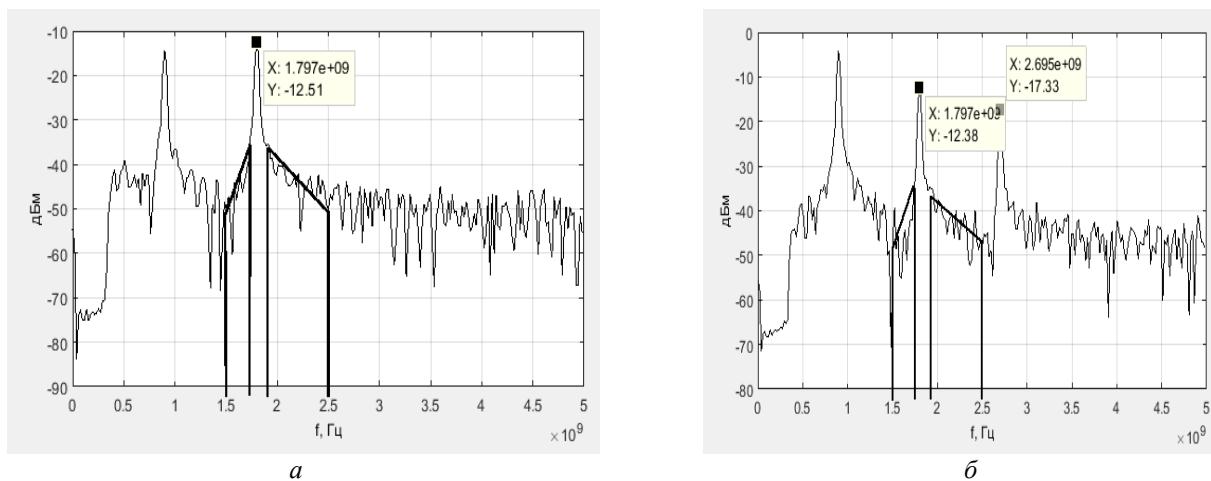


Рисунок 9. – Спектр переизлученного сигнала от нелинейности, аппроксимированной степенным рядом второго порядка (а) и третьего порядка (б)

Эксперимент 4. Зондирующий сигнал представляет собой аддитивную смесь СШП и частотно модулированного СВЧ-сигнала кодом Баркера длиной 13 символов. Индекс модуляции равен 10.

Ниже представлен программный код моделирования.

```
hBCode = comm.BarkerCode('SamplesPerFrame',13, 'Length', 13); %формирование
seq_barker=step(hBCode);%запись кода в переменную
seq_barker_t=[]; %пустой массив
for j=1:13
    for i=1:40
        seq_barker_t=[seq_barker_t,seq_barker(j)]; % формирование с таймсэмпами
    end
end
%figure; plot(seq_barker_t);
mod=pmmod(0.01.*seq_barker_t(1:512), fn,Fs,10); %модуляция
zondbark=mod+yi+Noise; %зондирующий сигнал
```

Спектр полученного зондирующего сигнала показан на рисунке 10.

Спектр переизлученного сигнала от нелинейности, аппроксимированной степенным рядом второго порядка, показан на рисунке 11, а, а от нелинейности, аппроксимированной степенным рядом третьего порядка, – на рисунке 11, б.

В спектре переизлученного сигнала от нелинейности, аппроксимированной степенным рядом второго порядка, мощность второй гармоники составляет минус 12 дБм. Уровень средней мощности увеличился до минус 44 дБм и до минус 43 дБм в диапазонах от 1,5 до 1,7 ГГц и от 1,9 до 2,5 ГГц соответственно.

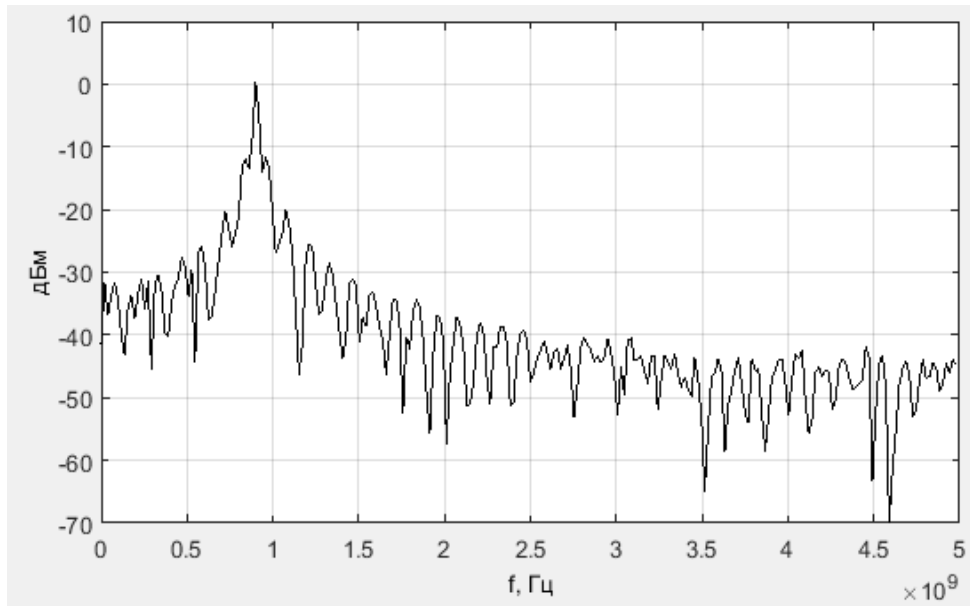


Рисунок 10. – Спектр зондирующего сигнала

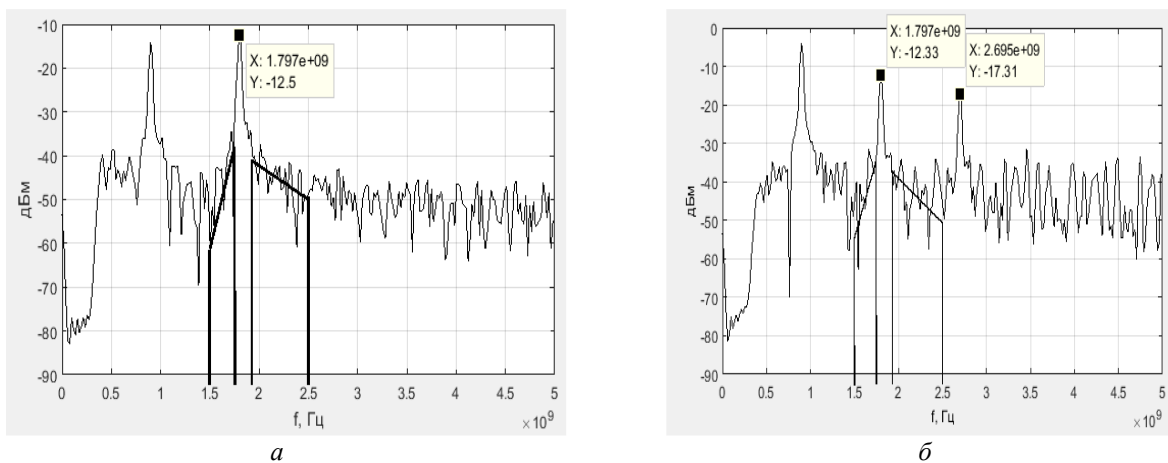


Рисунок 11. – Спектр переизлученного сигнала от квадратичной нелинейности (а) и кубической (б)

В спектре переизлученного сигнала от нелинейности, аппроксимированной степенным рядом третьего порядка, вторая гармоника СВЧ-сигнала имеет уровень мощности минус 12 дБм, третья – минус 20 дБм. Наблюдается повышение значения средней мощности в диапазонах от 1,5 до 1,7 ГГц и от 1,9 до 2,5 ГГц до минус 42дБм. Уровень шума составляет минус 42 дБм.

Заключение. Сравнительный анализ показал:

1. Использование аддитивной смеси СШП- и СВЧ-сигналов в качестве зондирующего для НРЛ имеет место классический нелинейных эффект возникновения второй гармоники СВЧ-сигнала для полупроводниковых НЭ, которые аппроксимируются степенным рядом второго порядка. Для НЭ, представляющих тип металлических контактных соединений, переизлученный от них сигнал содержит третью гармонику. Кроме того, наблюдается эффект взаимной модуляции СШП- и СВЧ-сигналов.

2. Применение частотной модуляции СВЧ составляющей аддитивной смеси сигнала приводит к увеличению мощности переизлученного сигнала для второй и третьей гармоник примерно на 21 дБм, для СШП части – на 1 – 4 дБм по отношению к эксперименту без модуляции СВЧ-сигнала.

3. Уровень мощности переизлученного сигнала от НЭ, аппроксимированного степенным рядом второго порядка, имеет наибольшее значение при частотной модуляции СВЧ-сигнала кодом Баркера (таблица 1). Для НЭ, аппроксимированного степенным рядом третьего порядка, наибольший уровень мощности достигает при модулировании СВЧ-сигнала пилообразным сигналом. При этом отмечено, что частотная модуляции СВЧ-сигнала приводит к повышению уровня шума на 10 дБм (таблица 2). Для обоих типов НЭ наименьший уровень мощности переизлученного сигнала наблюдается при использовании гармонического СВЧ-сигнала.

Таблица 1. – Результаты моделирования для нелинейностей, аппроксимированных полиномом второй степени

Вид зондирующего сигнала	Мощность переизлученного сигнала, дБм		
	второй гармоники	средняя на частотах 1,5 – 1,7 ГГц	средняя на частотах 1,9 – 2,5 ГГц
СШП + гармонический СВЧ	-33	-44	-47
СШП + частотно модулированный тональным сигналом СВЧ	-12	-45	-43
СШП + частотно модулированный пилообразным сигналом СВЧ	-12	-50	-42
СШП + частотно модулированный кодом Баркера СВЧ	-12	-44	-43

Таблица 2. – Результаты моделирования для нелинейностей, аппроксимированных полиномом третьей степени

Вид зондирующего сигнала	Мощность переизлученного сигнала, дБм				Уровень шума, дБм
	второй гармоники	средняя на частотах 1,5 – 1,7 ГГц	средняя на частотах 1,9 – 2,5 ГГц	третьей гармоники	
СШП + гармонический СВЧ	-33	-44	-45	-38	-50
СШП + частотно модулированный тональным сигналом СВЧ	-12	-43	-44	-18	-44
СШП + частотно модулированный пилообразным сигналом СВЧ	-12	-42	-41	-18	-42
СШП + частотно модулированный кодом Баркера СВЧ	-12	-42	-42	-20	-42

4. Полученные результаты моделирования показали, что в качестве зондирующего сигнала для НРЛ предпочтительней использовать аддитивную смесь СШП-сигнала и частотно модулированного СВЧ-сигнала, чем сумму СШП и гармонического СВЧ-сигналов.

Авторы благодарят научного руководителя доктора технических наук, профессора В.К. Железняк за оказанную помощь в проводимых исследованиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дистанционная сверхширокополосная томография нелинейных радиоэлектронных элементов / В.П. Якубов [и др.] // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85, Вып. 2. – С. 122–125.
2. Иванов, М.М. Повышение чувствительности нелинейного радиолокатора / М.М. Иванов, В.К. Железняк, В.М. Чертков // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – 2016. – № 4. – С. 72–77.
3. Вернигоров, Н.С. Принцип обнаружения объектов нелинейным локатором / Н.С. Вернигоров // Защита информации. Конфидент. – 1998. – № 4. – С. 65–70.
4. Oppermann, I. UWB Theory and Applications / I. Oppermann, M. Hamalainen, J. Iinatti // John Wiley & Sons, Ltd. – 2005.

Поступила 02.03.2018

MODELING AND PROCESSING OF THE RESPONSE OF A COMPLEX SENSING SIGNAL FROM A APPROXIMATED DEGREE OF NONLINEARITY

M. IVANOU, V. CHERTKOV

A software model is developed in the Matlab environment, which makes it possible to model the re-emitted signal from an approximate power-law series of nonlinearity. Several types of complex sounding signals were synthesized, presented as an additive mixture of the UWB signal and a nonharmonic microwave signal. Spectral analysis of simulated re-emitted signals is carried out. Based on the analysis results, a probing signal was selected and justified, in which the re-emitted signal has the highest power value.

Keywords: *nonlinear radar, ultra-wideband signal, nonlinear element.*