



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НЕЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ

Н.С. Вернигоров, директор ООО «Вихрь», д. т. н., профессор, лауреат премии Совмина СССР
e-mail: nsv@tomsk.ru

Имеющиеся в настоящее время результаты теоретических и экспериментальных исследований в области нелинейной радиолокации (НРЛ) [1-4] не дают ответа на вопрос о поведении отклика сложного объекта, а также не раскрывают понятия "эффективная поверхность рассеяния" (ЭПР) даже для элементарного электрически нелинейного объекта (ЭНО) в виде вибратора, нагруженного на нелинейный элемент (НЭ).

Данная статья завершает цикл работ [5-16] по нелинейной локации. Целью исследований являлось решение следующих задач:

- определение нелинейно преобразующих свойств объекта на основе общепринятой теории;
- экспериментальные исследования зависимости принимаемой мощности от дальности для преобразованного сигнала второй гармоники и сравнение с теоретическими моделями;
- экспериментальное исследование диаграммы обратного излучения сложного объекта.

ВВЕДЕНИЕ

Обратившись к модели НРЛ [5], можно увидеть, что нелинейная радиолокационная станция (НРЛС) принимает сигнал от ЭНО на частоте, не равной частоте излучения станции. Это означает, что ЭНО обладает следующими возможностями:

- имеет приемную систему для поглощения падающей энергии, которая в радиолокации определяется через плотность потока падающей мощности;
- преобразует поглощенную энергию в другой частотный диапазон (спектр), отличный от зондирующего;
- имеет систему излучения преобразованной энергии в другом частотном диапазоне (спектре).

В этой ситуации поглощенная энергия находится по формуле

$$P_{\text{над}} S_{\text{ЭНОэф}} = P_{\text{прин.НЭ}},$$

где $P_{\text{над}}$ — плотность потока падающей мощности (энергии);

$S_{\text{ЭНОэф}}$ — некая эффективная поверхность приемной системы ЭНО для поглощения падающей энергии;

$P_{\text{прин.НЭ}}$ — поглощенная НЭ энергия, выраженная через мощность.

Для радиолокации значение эффективной поверхности приемной системы ЭНО выразим как

$$S_{\text{ЭНОэф}} = \lambda^2 G_{\text{прин.ЭНО}} / 4\pi,$$

где $G_{\text{прин.ЭНО}}$ — параметр, характеризующий эффективность приемной системы ЭНО (в данном случае это коэффициент усиления приемной антенны ЭНО);

λ — длина волны излучения НРЛС.

Тогда, записав классическое выражение для определения ЭПР

$$\sigma = 4\pi r^2 \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{над}}}, \text{ где } P_{\text{над}} = \frac{P_{\text{изл.НРЛС}} G_{\text{изл.НРЛС}}}{4\pi r^2}, \quad (1)$$

из (1) получаем принимаемую НЭ мощность (поглощенную энергию) как:

$$P_{\text{прин.НЭ}} = \frac{P_{\text{изл.НРЛС}} G_{\text{изл.НРЛС}} \lambda^2 G_{\text{приним.ЭНО}}}{4\pi r^2 4\pi}, \quad (2)$$

Обозначим коэффициент преобразования поглощенной энергии (мощности) в другой частотный спектр как ξ_n , где n - номер преобразованной гармоники. Тогда преобразованную ЭНО мощность (энергию), излучаемую в эфир, можно определить по формуле $P_{\text{нлиз.ЭНО}} = P_{\text{прин.НЭ}} \xi_n$. Выразим эффективность излучающей системы ЭНО на n -й гармонике как $G_{\text{нлиз.ЭНО}}$. Тогда плотность потока преобразованной ЭНО мощности, излучаемой в эфир, можно определить по формуле

$$P_{\text{"отр".ЭНО}} = P_{\text{над}} S_{\text{НЭэф}} \xi_n \frac{G_{\text{нлиз.ЭНО}}}{4\pi r^2}$$

Подставляя из (1, 2) значения $P_{\text{над}}$, $P_{\text{прин.НЭ}}$ и $S_{\text{ЭНОэф}}$, получаем:

$$P_{\text{"отр".ЭНО}} = \left[\frac{P_{\text{изл.НРЛС}} G_{\text{изл.НРЛС}}}{4\pi r^2} \times \left(\frac{\lambda^2 G_{\text{изл.НРЛС}} G_{\text{приним.ЭНО}}}{4\pi} \right) \xi_n \right] \frac{G_{\text{нлиз.ЭНО}}}{4\pi r^2} \quad (3)$$

Тогда с классической точки зрения ЭПР электрически нелинейного объекта на гармониках будет равна:

$$\sigma_{\text{нЭЭН}} = 4\pi r^2 \frac{P_{\text{"отр".ЭНО}}}{P_{\text{над}}} = 4\pi r^2 \left[\frac{P_{\text{изл.НРЛС}} G_{\text{изл.НРЛС}}}{4\pi r^2} \times \left(\frac{\lambda^2 G_{\text{изл.НРЛС}} G_{\text{приним.ЭНО}}}{4\pi} \right) \xi_n \right] \frac{G_{\text{нлиз.ЭНО}}}{4\pi r^2} \times \frac{4\pi r^2}{P_{\text{изл.НРЛС}} G_{\text{изл.НРЛС}}} = \frac{\lambda^2 G_{\text{изл.НРЛС}} G_{\text{приним.ЭНО}}}{4\pi} \xi_n G_{\text{нлиз.ЭНО}} \equiv M^2 \quad (4)$$

Таким образом, ЭПР электрически нелинейного объекта для гармоник частоты зондирующего сигнала в корне отлична от классического представления.

Итак, в радиоволновом диапазоне ЭНО производит преобразование поглощенной энергии от источника накачки — НРЛС в энергию другого частотного спектра радиочастотного диапазона с последующим ее излуче-

нием. В этом случае речь должна идти не о «пассивном нелинейном отражателе», а только о нелинейном излучателе - активном ответчике, при этом понятие «отраженная плотность потока мощности ЭНО» (энергии) теряет смысл.

Классическим примером аналогичного нелинейного преобразования в квантовой электронике является преобразование падающей энергии накачки оптического излучения в высшую гармонику с последующим излучением преобразованной энергии с помощью нелинейных кристаллов.

Как и в канале с активным ответом, в нелинейной локации ситуация аналогичная: нелинейный объект, как активный ответчик, принимает сигнал запроса на $\lambda_{изл.лок.}$, а ответ посылает на преобразованной частоте гармоники. Разница в том, что здесь отсутствует понятие «запустить ответчик для генерации сигнала ответа». ЭНО всегда реагирует на зондирующую частоту, а одна и та же антенна (антенны) объекта принимает излучение НРЛС и излучает преобразованную частоту на n -й гармонике. КПД преобразования поглощенной энергии ξ_n для разных гармоник имеет свою зависимость как от $P_{пр.нел.отв.} = f(P_{пад.})$ — принимаемой ответчиком мощности, так и от $\lambda_{изл.лок.}$.

Тогда для НРЛ, как и для классической локации, уравнение с активным ответом будет иметь классический вид:

$$P_{пр.нел.отв.} = \frac{P_{изл.лок.} G_{изл.лок.}}{4\pi r_1^2} \times \frac{G_{нел.отв.пр.} \lambda_{изл.}^2}{4\pi}; \quad (5)$$

$$P_{нпр.лок.} = \frac{P_{пнп.нел.отв.} G_{пнп.отв.изл.}}{4\pi r_2^2} \times \frac{G_{нпр.лок.} (\lambda_{изл.} / n)^2}{4\pi}$$

где r_1 — расстояние от локатора до объекта;

r_2 — расстояние от объекта до локатора.

При $r_1 = r_2 = r$, как и для классической локации, (5) примет вид:

$$P_{пнп.} = \frac{P_{изл.} G_{изл.} G_{пнп.лок.} \times (\lambda_{изл.лок.} / n)^2}{(4\pi)^3 r^4} \times \quad (6)$$

$$\times \lambda_{изл.}^2 G_{нел.отв.пр.} \xi_n (P_{изл.лок.}, \lambda_{изл.лок.}) \frac{G_{пнп.отв.изл.}}{4\pi}$$

где $P_{изл.}$ — мощность излучения станции;

$G_{изл.}$ — коэффициент усиления излучающей антенны станции;

$G_{пнп.лок.}$ — коэффициент усиления приемной антенны станции для n -й гармоники.

Выражение (6) означает, какова должна быть чувствительность приемника локатора при заданном максимальном расстоянии r_2 , чтобы выделить сигнал нелинейного ответчика из собственных шумов приемника НРЛС.

Значение ξ_n поддается математическому расчету по методике [5, 17]. Для большинства НЭ с р-п-переходом превалирует квадратичная составляющая в ряду разложений ВАХ. Для нелинейных элементов с характеристиками N и S превалирующей будет кубическая составляющая. Вышесказанное относится только к искусственным р-п-переходам. Для естественных нелинейных контактов типа металл-окисел-металл (МОМ-диод), включая ржавчину, соотношения с превалирующим значением в ВАХ квадратичной или кубической

зависимости носят вероятностный характер. Математические модели исследований по [1-4] относились именно к таким естественным НЭ. Кроме того, в общем случае, используя эффект умножения, в НРЛ на активный ответчик возможно параллельно подавать через свободное пространство бесконечное множество входных сигналов с различными значениями и видом как по частоте, так и по амплитуде (мощности) [7]. В этой ситуации спектр переизлученного ЭНО сигнала на гармониках принципиально отличен от зондирующего [7, 16].

1. РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ОСНОВНОГО УРАВНЕНИЯ И НЕЛИНЕЙНО ПРЕОБРАЗУЮЩИХ СВОЙСТВ ОБЪЕКТА

По методике [5] был произведен расчет зависимости $\xi_2 = f(P_{нав.нел.эл.})$ диода 2А605Б (рис.1), где коэффициент пропорциональности $k_2 = 2,15 \cdot 10^{-5} (1/Bm)$.

Отличие ξ_2 для других типов полупроводниковых приборов и ВАХ будет лишь в абсолютной величине. Для нелинейного вибратора с диодом 2А605Б при условии, что $P_{изл.} = 10 \text{ кВт}$, $f_{изл.лок.} = 900 \text{ МГц}$ и $r = 3 \text{ м}$, по (6) был проведен расчет зависимости $\xi_2 = f(f_{ивиб.})$, где $f_{ивиб.}$ - рабочая частота i -го вибратора. В модели предполагалось, что частота излучения локатора задавалась постоянной, а происходило изменение рабочей частоты i -го вибратора. При этом для $f_{ивиб.} = f_{изл.лок.} - Z_{ив.вибр.} = Z_n$, а $Z_n = \text{const}$ входное сопротивление НЭ - частотно-независимое в полосе от $\lambda_{0изл.лок.}$ до $\lambda_{0изл.лок.}/2$. Во всех остальных случаях $Z_{ив.вибр.} = f(\lambda_{0изл.лок.})$. Этот факт показывает, что НРЛС обладает ярко выраженным диапазоным свойством обнаружения объекта в частотной области, которое менее свойственно классическому локатору на монохроматической частоте излучения [10].

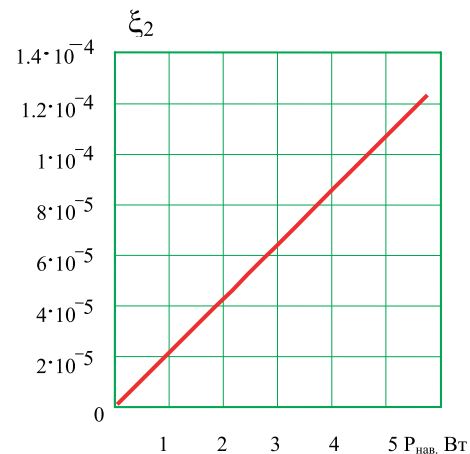


Рис. 1. Зависимость коэффициента нелинейного преобразования второго порядка от наведенной на НЭ мощности для диода 2А605Б

Параметры вибраторов R_{1z}, R_{2iz} — сопротивление излучения и $G_{1пнп.вибр.}, G_{2пнп.вибр.}$ для первой и второй гармоник рассчитывались прямым решением их интегральных уравнений. Входные сопротивления $Z_{ив.вибр.}$ для первой и второй гармоник рассчитывались прямым решением

классического уравнения Халлена. Расчетная зависимость $\xi_2 = f(f_{\text{виб.}})$ показана на рис. 2. Максимум в зависимости соответствует условию согласования на частоте излучения 900 МГц — $Z_{0 \text{ изв. вибр.}} = Z_n$, и для $P_{\text{изл. лок.}} = 10 \text{ кВт}$ значение $P_{0 \text{ при н. нел. элем.}} = 1,52 \text{ Вт}$.

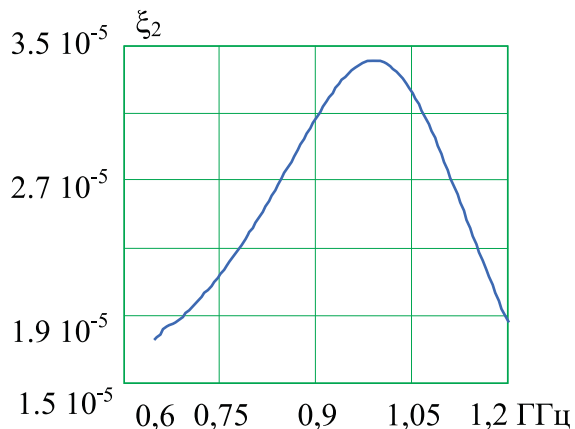


Рис. 2. Зависимость коэффициента нелинейного преобразования диода 2А605Б от рабочей частоты вибраторов.

В [5, 8] приведена расчетная зависимость ξ_2 от частоты в диапазоне до 6 ГГц. Большой интерес представляет подобная зависимость в диапазоне 800 ÷ 950 МГц, поскольку в этом диапазоне работают практически все нелинейные локаторы малой мощности, предназначенные для применения в системах защиты информации [9-11].

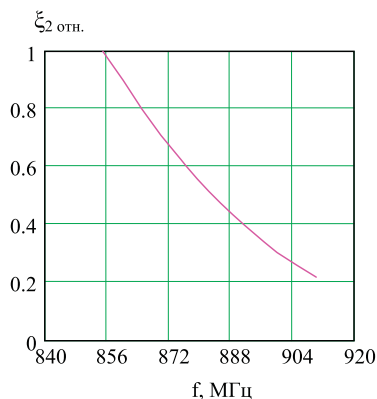


Рис. 3. Зависимость коэффициента нелинейного преобразования второго порядка от частоты.

На рис. 3 показана относительная зависимость ξ_2 в указанном диапазоне для диода 2А605Б. Даже для СВЧ-диода в интервале частот 855 ÷ 910 МГц ($\Delta F = 55 \text{ МГц}$) значение изменяется в 5 раз, что эквивалентно изменению мощности переизлученного НЭ сигнала на 7 дБ. Эта зависимость оказывает существенное влияние на обнаружительную способность локаторов с перестройкой частоты, таких как «Катран», NR-900ц, «Орион» [10], применяемых для обнаружения скрытых устройств съема информации. Указанные изделия представляют собой локаторы, у которых зондирующий сигнал является ЛЧМ-сигналом с малой базой. В [7] показаны результаты обнаружения ЭНО НРЛС с зондированием ЛЧМ-сигналом с большой базой, когда девиация частоты составляет $\Delta F = 500 \text{ МГц}$.

Расчет ξ_n для сложного объекта является проблематичным, ибо это становится усредненной характеристикой статистически неопределенного ансамбля. Для сложного объекта мы имеем не просто статистически неопределенную систему приема — излучателей, но и совершенно новую ситуацию — нелинейную систему со статистически неопределенным амплитудно-частотно-фазовым преобразованием, которая является функцией от указанного выше распределения. Таким образом, определение ξ_n сложных ЭНО и исследование его зависимости от частоты и мощности зондирующего сигнала целесообразно осуществлять экспериментально.

Исследования проводились в специальной измерительной лаборатории, близкой по параметрам к безэховой камере: ослабление сигнала составляло минус 55 дБ. Частота зондирующего сигнала НРЛС — 900 МГц, чувствительность приемника для второй гармоники — 10^{11} Вт при отношении сигнал/шум 5 дБ, мощность излучения в импульсе — 10 кВт. Поляризация приемно-излучающих антенн — круговая. Высота подвеса антенн и объекта над радиопоглощающей поверхностью — 1,1 м. В качестве объектов использовались: реальный сложный объект — электронный взрыватель противотанковой мины без подключенного источника питания и четвертьволновый вибратор (для частоты зондирующего сигнала), нагруженный на диод 2А605Б. Для вибратора не предпринималось специальных мер согласования его входного сопротивления с входным сопротивлением НЭ, что достигалось чисто конструктивно для имитации элементарного нелинейного ответчика в сложном реальном объекте.

Нормированная мощность регистрируемого сигнала по (6) для второй гармоники определялась по формуле

$$\lg P_{2\text{норм.}} = \lg \frac{P_{2\text{имн.}}}{P_{2\text{пр. max}}} = \alpha (\lg r_{\text{min}} - \lg r_i)$$

где $P_{2\text{нр}}$ — регистрируемая мощность в точках расположения объекта на расстоянии r_i от НРЛС, усредненная по десяти реализациям;

α — степенная зависимость от дальности по (6), как проверка этой зависимости от дальности по [1-4].

Тогда значение α определяется по формуле

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\lg P_{2\text{норм.}}}{\lg r_{\text{min}} - \lg r_i} \quad (7)$$

где N — число выборок местоположения объекта до НРЛС.

Для сложного объекта из (7) $\bar{\alpha} = 4,4$, тогда как для нелинейного вибратора $\bar{\alpha} = 2,5$.

На рис. 4 приведены экспериментальная (а) и аппроксимированная (б) зависимости $P_{2\text{нр}} = f(1/r^{2,5})$ для элементарного ЭНО, а также экспериментальная (в) и аппроксимированная (г) зависимости $P_{2\text{нр}} = f(1/r^4)$ для реального сложного объекта. Для реального объекта экспериментальная и аппроксимированная зависимости имеют небольшое различие, тогда как для элементарного объекта наблюдается существенное расхождение.

На рис. 5 показана экспериментальная зависимость $P_{2\text{нр}} = f(I_{\text{над. изл.}})$ для нелинейного вибратора, которая характеризуется двумя участками с различными углами наклона, где точка перегиба соответствует 3 м до

НРЛС. Эксперимент показал, что на участке (2 ÷ 3) м $\alpha = 1,5$, а на участке (3 ÷ 7) м $\alpha = 3,7$ и имеет несущественное расхождение с аппроксимированной зависимостью $P_{2np} = f(1/r^d)$ — рис. 4 г.

Неравномерность в виде интерференционных колебаний (рис. 4, 5) объясняется свойствами измерительной лаборатории при большой мощности излучения НРЛС (10 кВт) для согласованного режима — $f_{0\text{ивиб.}} = f_{0\text{изл.лок.}}$. Линейный участок зависимости $P_{2np} = f(P_{\text{пад.изл.}})$ на расстоянии (3 ÷ 7) м (рис. 5) является экспериментальным подтверждением расчетной зависимости $\xi = f(P_{\text{нав.нел.элм.}})$ по рис. 1 в пределах до 2 Вт наведенной мощности на НЭ.

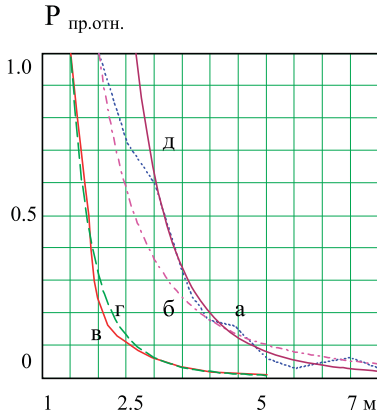


Рис.4. Экспериментальная зависимость принимаемой мощности от дальности для нелинейного вибратора (а,б,д) и реального объекта (в,г).

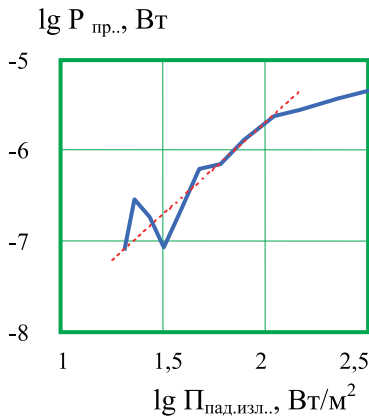


Рис. 5. Зависимость принимаемой мощности от плотности потока падающей мощности для нелинейного вибратора.

В [12] приведены экспериментальные результаты воздействия сверхмощного импульсного СВЧ-излучения на полупроводниковые приборы, где впервые применялся метод дистанционной бесконтактной диагностики с использованием нелинейной локации [17]. Это позволило наблюдать процесс воздействия в масштабе реального времени, в результате чего было установлено несколько этапов:

- кратковременное изменение ВАХ - время изменения, равное длительности воздействующего СВЧ-импульса (до долей секунды), с последующим восстановлением первоначального значения;

- долговременное изменение ВАХ (в течение 1-60 мин) с последующим восстановлением до исходной характеристики;
- необратимое (устойчивое) изменение ВАХ;
- предпробойное состояние - фриттинг, когда фиксировались произвольные флуктуации сигнала отклика, включая временные флуктуации длительности воздействующего импульса;
- необратимый вывод приборов из строя.

Иллюстрацией этому является рис. 6, где показана динамика необратимого изменения ВАХ. Аналогичные результаты были получены с мощной НРЛС во время натурных испытаний для наклонного зондирования по обнаружению противотанковой мины с электронным взрывателем в активном (включенном) режиме, где в предпробойном состоянии происходила самоликвидация мины.

Изменение зависимости P_{2np} от $P_{\text{пад.изл.}}$ для нелинейного вибратора (рис. 5) объясняется зависимостью $\xi = f(P_{\text{нав.нел.элм.}})$, только за счет изменения ВАХ диода.

Изменения ВАХ диода ведут и к мгновенному изменению реактивных параметров НЭ [12], что еще более усугубляет его рассогласование с вибратором.

Методики [5, 17], в которых используется теория рядов Вольпера, не позволяют провести строгий анализ зависимости $\xi = f(P_{\text{нав.нел.элм.}})$ для сильного электромагнитного взаимодействия, при котором происходит полное изменение исходных параметров объекта (параметрическое взаимодействие).

Основной задачей любого локатора является максимальная дальность обнаружения объекта. Изменение происходит при значительной $P_{\text{пад.изл.}}$, когда объект обнаружен и производится его сопровождение. При этом сохранение $P_{2np} = f(1/r^d)$ в этой зоне уже не является определяющим.

Для сложного объекта зависимость $P_{2np} = f(P_{\text{пад.изл.}})$ в диапазоне $P_{\text{пад.изл.}} = (50 \div 1000)$ Вт/м² меняется несущественно (рис. 4 в), что объясняется геометрическими размерами элементарных вибраторов, которые не согласованы ни с длиной волны на прием зондирующих сигналов, ни с $Z_{\text{н}}$ нелинейного элемента. Ввиду большого числа НЭ в ансамбле, если предположить, что происходит изменение ξ нескольких отдельных элементов за счет изменения их ВАХ, это менее существенно влияет на общую картину, что показано ниже на поляризационных характеристиках объекта.

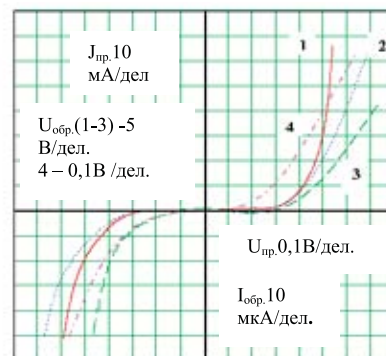


Рис.6. Изменение ВАХ диода КД514А от плотности потока облучающей мощности однократного импульса. 1 – до облучения; 2 – 100 Вт/см²; 3- 500 Вт/см²; 4 – 1 кВт/см²

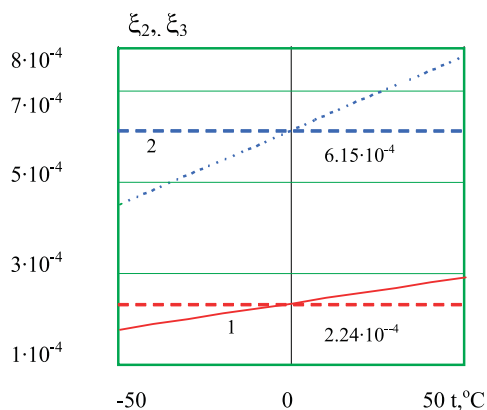


Рис.7. Зависимость коэффициента нелинейного преобразования от температуры для диода 2A605
1- ξ_2 – второго порядка, 2 - ξ_3 – третьего порядка.

Наглядным примером параметрического взаимодействия в НРЛ является температурная зависимость ВАХ любого p-n-перехода (естественного или искусственного), что по характеру изменения для прямых ветвей напоминает рис. 6. Методика [5] позволяет произвести расчет $\xi = f(t, ^\circ C)$, и для диода 2A605Б по второй и третьей гармоникам при постоянной наведенной на диоде мощности 160 мВт, показана на рис. 7.

Экспериментальные исследования этой зависимости для диода 2A605Б в интервале температур $(-35 \div +45)^\circ C$ подтвердили расчетную зависимость. При постоянной мощности излучения локатора и фиксированном расстоянии до объекта, когда $P_{\text{над. изл.}} = \text{const}$, в силу $\xi = f(t, ^\circ C)$, мощности $P_{\text{изл. отв.}}$ и $P_{\text{нпр.}}$ в (5, 6) меняются.

Если попытаться дать объяснение этому факту с точки зрения зависимости «ЭПР – электрически нелинейный объект» как функции от падающей плотности потока мощности по [1-4], мы зайдем в тупик.

Здесь опять же уместно вести речь о КПД нелинейного преобразования как функции $\xi_i = f(P_{\text{над. изл.}} = f(E, B/m); H (A/m); \text{изл.}; t, ^\circ C; P (Pa))$ и прочих факторах воздействия на среду для любой гармоники и любого вида ВАХ нелинейного элемента, где происходит либо прямое воздействие на НЭ, либо опосредованно через среду, в которой находится нелинейный объект.

Более подробно влияние внешних возмущающих факторов на отклик нелинейных объектов показано в [14].

Проведенные экспериментальные исследования показали, что нелинейная локация обладает возможностью

диагностики состояния цели [18] при ее облучении электромагнитным полем, а потому может использоваться как инструмент контроля функционального поражения объекта электромагнитным оружием [19, 20].

Это относится также к обнаружению и уничтожению электромагнитных бомб [13, 21].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ОБЪЕКТА С ЭЛЕКТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Большой интерес представляет изучение свойств обратного рассеяния (излучения) преобразованной энергии ЭНО. Поскольку в НРЛ одна и та же антенна объекта является и приемной, и излучающей [5], разделить экспериментально эти параметры сложного объекта пока не представляется возможным. В силу этого снималась эквивалентная диаграмма обратного рассеяния (излучения) – на прием частоты зондирующего сигнала и излучения частоты переизлученного сигнала – для электронного взрывателя противотанковой мины в пассивном режиме (без включенного источника питания взрывателя), от дальности до НРЛС на второй гармонике принимаемого сигнала. Параметры нелинейного локатора соответствовали указанным выше и круговой поляризации приемопередающих антенн локатора. Для дальностей до объекта 1, 3, 5 м эти диаграммы показаны на рис. 8.

На расстоянии 1 м до НРЛС диаграмма обратного излучения является узконаправленной, однолепестковой, напоминающей диаграмму уголкового отражателя в одном квадранте. На расстоянии 3 м направленные свойства теряются и напоминают диаграмму с неравномерной круговой поляризацией, а на 5 м поляризационная характеристика принимает вид, характерный для вибраторной антенны. Дальнейшее увеличение расстояния (до 100 м высоты НРЛС от объекта, расположенного под подстилающей поверхностью, – экспериментальные результаты с НРЛС, расположенной на вертолете) приводит к тому, что диаграмма принимает вид классической «восьмерки».

Поскольку в сложном объекте каждый произвольный нелинейный элемент нагружен на свой произвольный элементарный вибратор и обладает своей зависимостью $\xi_i = f(P_{\text{инт.}}, \lambda_{\text{изл.}})$, это приводит к различным значениям мощностей высших гармоник сигнала отдельным нелинейным элементом. С увеличением расстояния до НРЛС вклад отдельного элементарного ЭНО в сложной системе будет тем более различен, чем более различно начальное значение $P_{\text{инт.}}$.

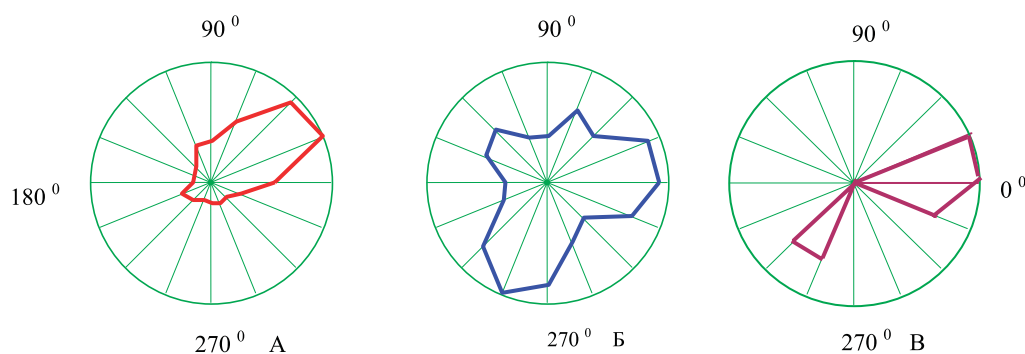


Рис. 8. Диаграммы обратного рассеяния реального объекта для расстояний: А – 1 м; Б – 3 м; В – 5 м.

С другой стороны, в сложной системе произвольных элементарных излучателей при их произвольном расположении происходит изменение взаимного влияния как по приемному каналу на частоте зондирующего сигнала, так и по каналу излучения на высшей гармонике. В зависимости от дальности уровень ЭДС высших гармоник меняется более существенно, что ведет к более существенному изменению взаимного влияния элементарных вибраторов от наведенных ЭДС высших гармоник.

Для нелинейного вибратора диаграмма остается классической «восьмеркой» независимо от расстояния до НРЛС.

Подобный характер изменения поляризационных свойств сложных ЭНО ведет к тому, что максимальная дальность обнаружения является функцией их ориентации в пространстве. Этот фактор не может быть объяснен моделью по [1-4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

НРЛ по своей природе есть не что иное, как аналог классической локации с активным ответом, при этом для второй гармоники регистрируемого сигнала полностью соответствия классической зависимости принимаемой мощности от дальности. И только при сверхбольшой *П_{изл.лок.}*, за счет параметрического воздействия на нелинейный элемент, наблюдается отклонение от известной зависимости.

За дальность обнаружения (как функции ЭПР в классическом понимании) в НРЛ отвечает лишь один параметр — коэффициент нелинейного преобразования НЭ для элементарного нелинейного объекта либо их ансамбля для сложного объекта. Для элементарного нелинейного объекта этот параметр поддается математическому расчету. Для сложных нелинейных объектов в пределах падающей плотности потока мощности до *П_{пад. изл.} = 100 кВт/м²* основное уравнение радиолокационного наблюдения полностью соответствует классической зависимости.

Важнейшей особенностью НРЛ является то, что эта радиолокация является инструментом диагностики поражения цели электромагнитным излучением.

Здесь мы имеем явление, которое называется нелинейно-параметрической радиолокацией. Это явление будет наблюдаться от воздействия не только электрической составляющей электромагнитного поля, но и от температуры и давления среды, изменения магнитного поля в контролируемой среде и воздействия как непосредственно на НЭ, так и на его среду окружения потока высокоэнергетических частиц.

Кроме того, полученные экспериментальные характеристики диаграммы обратного рассеяния сложного объекта свидетельствуют о том, что для достижения максимальной дальности обнаружения сложных ЭНО, независимо от их ориентации в пространстве, приемно-излучающие антенны НРЛС должны иметь круговую поляризацию.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Harger R.O. Harmonic radar systems for near - ground in - foliage nonlinear scatterers // IEEE. - 1976. - V.AES-12. - № 2. - P.230.
2. Штейншлейгер В.Б. К вопросу рассеяния электромагнитных волн вибратором с нелинейной нагрузкой // РЭ. - 1978. - Т. 23. - Вып. 11. - С. 1329.
3. Штейншлейгер В.Б. Нелинейное рассеяние радиоволн ме-

таллическими объектами// УФН. - 1984. - Т. 142. - Вып. 1. - С. 131.

4. Кузнецов А.С., Кутин Г.И. Методы исследования эффекта нелинейного рассеяния электромагнитных волн// Зарубежная радиоэлектроника. - 1985. - № 4. - С. 41.

5. Вернигоров Н.С. Процесс нелинейного преобразования и рассеяния электромагнитного поля электрически нелинейными объектами // РЭ. - 1997. - Т. 42. - № 10. - С. 1181.

6. Вернигоров Н.С., Харин В.Б. Влияние антенно-фидерного тракта нелинейного объекта на дальность обнаружения в нелинейной локации // РЭ. - 1997. - Т.42. - № 12. - С. 1447.

7. Вернигоров Н.С., Борисов А.Р., Харин В.Б. К вопросу о применении многочастотного сигнала в нелинейной радиолокации // РЭ. - 1998. - Т. - 43. - № 1. - С. 63.

8. Вернигоров Н.С. Принцип обнаружения объектов нелинейным радиолокатором// Конфидент. С-Пб. - 1998. - № 4. - С.65.

9. Вернигоров Н.С., Кузнецов Т.В. Влияние параметров нелинейного локатора на эффективность обнаружения радиоэлектронных устройств// Сборник докладов Международной конференции "Информационные системы и технологии ИСТ-2000". - Новосибирск. - 2000. - Т. 2. - С. 377.

10. Вернигоров Н.С., Кузнецов Т.В. К вопросу о принципе сравнения в нелинейной радиолокации // Информост. - 2002. - № 3. - С.7. Электронный вариант: www.informost.ru.

11. Вернигоров Н.С., Кузнецов Т.В., Усольцев А.А. Некоторые особенности характеристик нелинейных локаторов // Информост. - 2002. - № 5. - С. 4. Электронный вариант: www.informost.ru.

12. Вернигоров Н.С., Саркисян А.П., Сулакшин А.А., Шаркеев Ю.П. Экспериментальные исследования воздействия импульсного СВЧ-излучения на материалы // Информост. - 2002. - № 6. - С. 51. Электронный вариант: www.informost.ru.

13. Вернигоров Н.С. Неизвестная нелинейная локация как технология двойного применения // Конфидент. - 2003. - № 6. - С. 54.

14. Вернигоров Н.С. Нелинейно-параметрические явления и их экспериментальные исследования в нелинейной радиолокации// Нелинейный мир. - 2004. - № 5-6. - С. 322.

15. Вернигоров Н.С. Наблюдение объектов на поверхности подстилающих сред в условиях нелинейной локации// Информост. - 2005. - № 5. - С. 41. Электронный вариант: www.informost.ru.

16. Вернигоров Н.С. Способ обнаружения терпящих бедствие. А.С. SU № 1832237 Б.И. № 29. 1993.

17. Франческетти Дж. Пинто И. Антенны с нелинейной нагрузкой// В кн.: Нелинейные электромагнитные волны. - М.: Мир, 1983.

18. Вернигоров Н.С., Борисов А.Р. Способ определения изменений вольт-амперной характеристики полупроводникового прибора. А.С. SU № 1574040.

19. Панов В.В., Саркисян А.П. Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ-средств функционального поражения// Зарубежная радиоэлектроника. - 1995. - № 10-12.

20. Вернигоров Н.С. К вопросу о поражении объектов гигантским электромагнитным импульсом// Информост. - 2005. - № 3. - С. 40. Электронный вариант: www.informost.ru.

21. Вернигоров Н.С. Нелинейная локация как инструмент защиты информации и средство диагностики поражения целей электромагнитным оружием// Тезисы докладов II Международного технологического конгресса "Военная техника, вооружения и технологии двойного применения в XXI веке". - Омск. - 2003. - С. 26.