

Техническая реализация и экспериментальное исследование средств нелинейной радиолокации.

Зыонг Дык Тхиен

Рассматриваются тактико-технические характеристики серийных нелинейных локаторов. Представлены результаты экспериментальных исследований методов нелинейной радиолокации с использованием прибора НР-900 ЕМ и описывается метрологическое обеспечение нелинейных радиолокационных измерений.

Введение.

Во время войны, которую развязали американские агрессоры против Демократической республики Вьетнам, спровоцировав в 1968 году пресловутый "тонкинский инцидент", применялись многие новые способы и средства радиоэлектронной борьбы. Одним из технических и тактических новшеств было применение нелинейной радиолокации для обнаружения систем и средств вооружений и военной техники в условиях сильных фоновых отражений от земной поверхности и широколиственных растительных покровов. Эффекты, лежащие в основе нелинейной радиолокации, известны еще с сороковых годов XX века [3]. Так в 1939 г. на судах ВМС США проявился эффект "ржавого болта", приводящий к помехам при работе мощных коротковолновых судовых радиостанций [2]. При рассмотрении взаимодействия электромагнитного поля и нелинейного перехода на основе металлического контакта все внимание уделялось анализу преобразования частоты для третьей гармоники. В 1972 г. В 70-х г. прошлого века, судя по количеству и объему публикаций, интенсивность исследований резко возросла. В печати появились первые данные о создании опытного образца американской нелинейной РЛС METTRA с мощностью излучения 1 кВт, несущей частотой 750 МГц и частотой следования импульсов 10 кГц. В [4] были приведены результаты экспериментальных исследований локатора METTRA на третьей гармонике для обнаружения с вертолета замаскированной бронетанковой техники. В [4] приведены теоретические расчеты и экспериментальные исследования с этим локатором для наклонного зондирования объектов в приповерхностном слое. Аналогичные работы велись и в России [1,2,3]. Исследования методов и средств нелинейной локации в это время проводились, прежде всего, с целью создания приборов для обнаружения мин, в том числе с электронными взрывателями. Широкое применение таких приборов впервые было осуществлено Великобританией во время военного конфликта на Фолклендских островах.

1. Серийные нелинейные локаторы

Разработки серийных нелинейных локаторов проводятся в России, США и Великобритании начиная с середины 70-х годов. Первым устройством, поступившим на эксплуатацию в

ЦРУ, был локаатор "Super Scout", серийный выпуск которого начался с 1980 г. В 1981г. появился британский локаатор "Broom", который несколько уступал американскому аналогу; в 1982 г. Появился первый серийный российский локаатор, который назвали "Орхидея". Российские исследования и разработки средств нелинейной локации велись независимо от зарубежных. В результате "Орхидея" резко превосходила по своим тактико-техническим характеристикам (ТТХ) современные ей американские и английские локаторы, а массогабаритные показатели были в 2 раза лучше.

В настоящее время на рынке представлен широкий ассортимент нелинейных локаторов. Параметры основных моделей, приведенные в таблице, заимствованы из [4,5]. К числу наиболее перспективных способов построения средств нелинейной радиолокации относятся технические решения, предусматривающие использование импульсных зондирующих сигналов и двухканальных приемников второй и третьей гармоник основной несущей частоты запросного излучения. Основные параметры нелинейных радиолокаторов – мощность, режим и частота излучения. Увеличение мощности ведет к повышению дальности действия. Но вместе с этим растет экологическая опасность. Так при работе локаатора в непрерывном режиме максимальная мощность излучения достигает 5 Вт. Такая мощность на частотах 880...1000 МГц уже может стать источником опасности для обслуживающего персонала. В импульсном режиме мощность в импульсе достигает 300 Вт, однако средняя мощность очень мала. Например, в локаторе серии "Циклон" максимальная средняя мощность составляет 0,12 Вт, в локаторе "Октава" - от 0,45 до 1,5 Вт.

В силу физической природы процесса преобразования частоты полупроводниковыми приборами, связанной с их частотными свойствами и, в частности, с граничной рабочей частотой, уровень мощности преобразованного сигнала тем выше, чем ниже несущая частота запросного сигнала локаатора, поэтому технические характеристики локаатора при понижении частоты существенно повышаются.

2. Экспериментальные результаты обнаружения и селекции нелинейных отражателей

При выборе модели локаатора постоянно возникает вопрос о регистрации отраженного сигнала на 2-й и 3-й гармониках сигнала зондирующего. Это позволяет селективировать электронные изделия, содержащие полупроводниковые элементы, и изделия и контакты металлических поверхностей. Теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать вывод о том, что в сигнале, отраженном конструкциями с полупроводниковыми элементами и подводными проводами, преобладает вторая гармоника зондирующего сигнала. А для нелинейных металлических контактов характерен более высокий уровень третьей гармоники. Этот эффект можно пояснить следующими качественными рассуждениями.

Примерный вид вольтамперной характеристики полупроводникового р-п перехода рис.1 обычно с достаточно высокой степенью точности аппроксимируется степенным рядом, в котором ограничиваются членами, не выше второй степени, т.е. применяют параболическую аппроксимацию

$$i(t); \alpha_0 + \alpha_1 u(t) + \alpha_2 u^2(t) + \dots \quad (1)$$

Такое преобразование гармонического запросного сигнала радиолокатора $s(t) = a \cos \omega t$ создаст ток, в котором существенный уровень будет иметь вторая гармоника

$$i(t) = \alpha_1 s(t) + \alpha_2 s^2(t) = \frac{a^2}{2} + \alpha_1 a \cos \omega t + \frac{\alpha_2 a^2}{2} \cos 2\omega t \dots,$$

т.е. колебание,

$$i_2(t) = \frac{\alpha_2 a^2}{2} \cos 2\omega t, \quad (2)$$

которое и создаст отраженный сигнал на второй гармонике частоты запросного сигнала.

Характер тока через контакт проводников несколько иной. Поскольку структура контактирующих проводящих поверхностей, разделенных слоем диэлектрика рис.1 а), симметрична, центральной симметрией должна, в принципе, обладать и вольтамперная характеристика туннельного через такой контакт рис. 1.б).

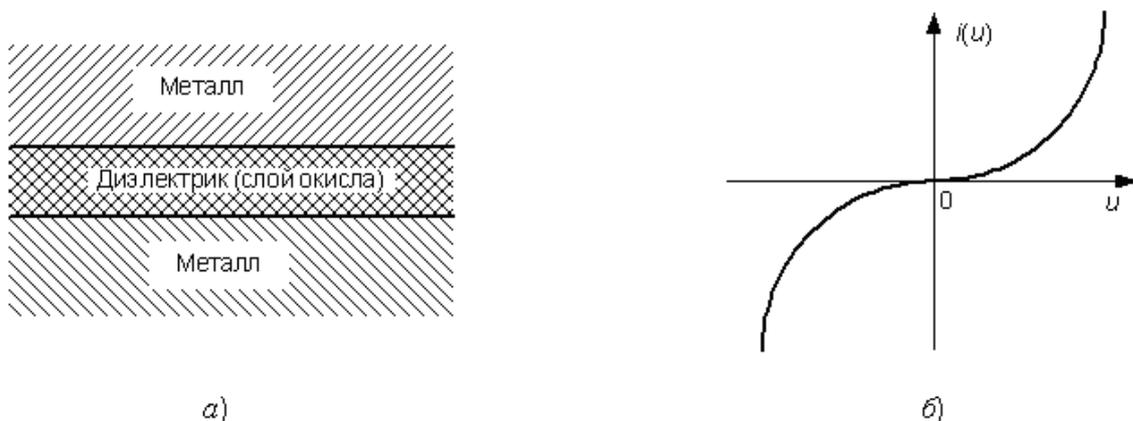


Рис.1. Контакт металлов а) и его вольтамперная характеристика б)

Общее приближенное выражение степенного ряда для тока через контакт металлов, разделенных тонким слоем окисла, не содержит членов с четными степенями [2], т.е. представляется в виде

$$i(t); \frac{1}{R_0} [u(t) + \beta u^3(t) + \dots]. \quad (3)$$

Поэтому ток через контакт при синусоидальном приложенном напряжении $s(t) = a \cos \omega t$ будет

$$i(t); \frac{1}{R_0} s(t) + \frac{\beta}{R_0} s^3(t) = \frac{a \cos \omega t}{R_0} + \frac{\beta a}{R_0} \cos^3 \omega t = \frac{1}{R_0} \left[\frac{7a}{4} \cos \omega t + \frac{a}{4} \cos 3\omega t \right], \quad (4)$$

т.е. обязательно будет содержать составляющую на частоте третьей гармонике зондирующего сигнала, а составляющей на второй гармонике может и не быть. Поэтому нелинейные локаторы, предназначенные для поиска и обнаружения скрытых объектов, содержащих металлические конструкции (железобетонные сооружения укрытий, предметы вооружения и военной техники) должны создавать вторичное излучение прежде всего на третьей гармонике зондирующего сигнала.

Опубликованные экспериментальные результаты по определению нелинейной эффективной поверхности рассеяния автомобилей и гусеничной техники [3] подтверждают этот вывод. Так на рис.2 соответственно представлены угловые зависимости нелинейной ЭПР автомобиля КАВЗ-651 с цельнометаллическим кузовом, автомобиля Урал-375, трактора С-100 на второй и третьей гармониках облучающего сигнала. В качестве облучающей волны использовался импульсный сигнал с частотой $f_0=155$ МГц. Импульсная мощность 200 кВт, длительность импульсов 6 мкс, частота следования импульсов 360 Гц, чувствительность приемного устройства 120 дБ/Вт.

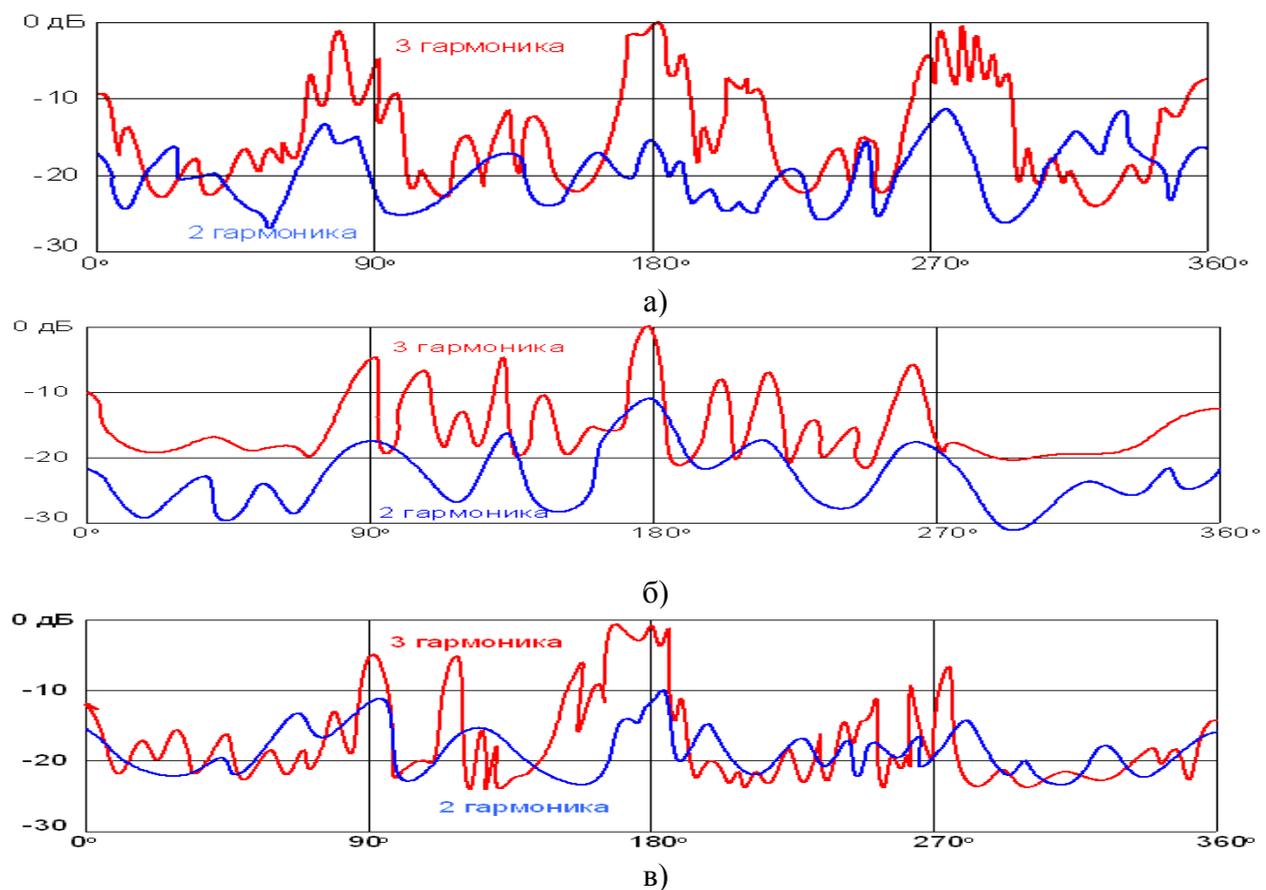


Рис.2. Диаграмма обратного рассеяния поля на второй и третьей гармониках облучающей волны а) автомобиля КАВЗ-651, б) автомобилем УРАЛ-375, в) трактором С-100

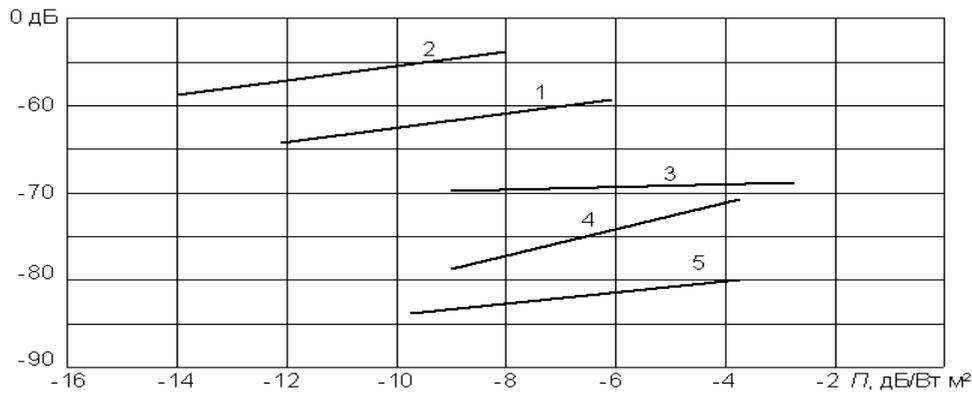


Рис.3. Зависимость ЭПР технических объектов (автомобильного прицепа-фургона, гусеничного трактора и автомобиля ГАЗ-66) на третьей гармонике от плотности потока мощности облучающей волны: 1 соответствует автомобильному прицепу-фургону; 2 — гусеничному трактору при неработающем двигателе; 3 — гусеничному трактору при работающем двигателе; 4 — автомобилю ГАЗ-66 при неработающем двигателе; 5 — автомобилю ГАЗ-66 при работающем двигателе

Максимальные значения нелинейной ЭПР σ_{\max} , усредненные значения ЭПР $\sigma_{\text{ср}}$, в секторе углов $\pm 180^\circ$ и среднеквадратичное отклонение ЭПР $\Delta\sigma$ представлены в табл.2.

Таблица. 1.

| Объект | Вторая гармоника | | | Третья гармоника | | |
|---------------------|-----------------------------|----------------------------------|--|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| | $\sigma_{\max}, \text{М}^2$ | $\sigma_{\text{ср}}, \text{М}^2$ | $\Delta\sigma, \text{М}^2$ | $\sigma_{\max}, \text{М}^2$ | $\sigma_{\text{ср}}, \text{М}^2$ | $\Delta\sigma, \text{М}^2$ |
| Автомобиль Урал-375 | $11,0 \cdot 10^{-4}$ | $2,3 \cdot 10^{-4}$ | $6,4 \cdot 10^{-7}$ $162,0 \cdot 10^{-4}$ | $18,6 \cdot 10^{-4}$ | $312,0 \cdot 10^{-7}$ | |
| Автомобиль Урал-651 | $6,5 \cdot 10^{-4}$ | $2,6 \cdot 10^{-4}$ | $4,62 \cdot 10^{-7}$ | $323,0 \cdot 10^{-4}$ | $26,0 \cdot 10^{-4}$ | $680,0 \cdot 10^{-7}$ |
| Трактор С-100 | $13,2 \cdot 10^{-4}$ | $3,1 \cdot 10^{-4}$ | $7,0 \cdot 10^{-7}$ | $327,0 \cdot 10^{-4}$ | $16,0 \cdot 10^{-4}$ | $140,0 \cdot 10^{-7}$ |

Как видно, наибольшая доля энергии падающей волны, преобразованная в гармоники, переизлучается на частотах $2f_0$ и $3f_0$. Мощность вторичного поля на третьей гармонике при плотности потока мощности падающей волны порядка $0,1 \text{ Вт/м}^2$ на $10 \dots 15 \text{ дБ}$ превышает мощность поля, рассеянного на второй гармонике. Можно считать, что вольтамперная характеристика естественных нелинейных металлических контактов на реальных объектах близка к зависимости (4), используемой для аппроксимации вольтамперной характеристики контактов металл-диэлектрик металл при теоретических исследованиях. Большая изрезанность диаграммы обратного рассеяния объектов на гармониках указывает на значительное число элементов с нелинейными свойствами, формирующих вторичное поле.

На рис.3 представлена экспериментальная зависимость ЭПР объектов техники (автомобильного прицепа-фургона, гусеничного трактора к автомобилю ГАЗ-66) на третьей гармонике от плотности потока мощности облучающей волны [3], в качестве которой использовалось непрерывное монохроматическое излучение с частотой 300 МГц . Плотность потока мощности облучающего поля в месте расположения объекта составляет 1 Вт/м^2 . Измерения $\sigma = F(P_0)$ для

гусеничного трактора и автомобиля ГАЗ-66 проводились при неработающих и работающих двигателях, т.е. объекты находились в неподвижном и вибрирующем состояниях. Зависимость нелинейной ЭПР объектов от плотности потока мощности облучающей волны для неподвижных объектов при $P_0 \geq 1$ Вт/м² может быть представлена параболической зависимостью. При увеличении плотности потока мощности падающего поля до 1 Вт/м² показатель степенной функции, аппроксимирующей зависимость $\sigma = F(P_0)$, стремится к 1 (к линейной функции). Возрастание P_0 достигалось путем сближения объекта с источником облучающего поля.

При измерении нелинейной ЭПР сильно вибрирующих объектов наблюдается снижение "нелинейной" ЭПР на 10-25дБ и ее независимости от плотности потока мощности падающей волны. Это явление может быть объяснено возрастанием коэффициента нелинейности третьего порядка вольтамперной характеристики нелинейных контактов при вибрации и переходом рассеивателя в существенно нелинейный режим. При переходе к режиму с существенной нелинейностью наблюдается уменьшение скорости возрастания плотности потока мощности поля на гармониках при увеличении плотности потока мощности облучающего поля. Данный эффект с уменьшением сопротивления нелинейного контакта, приводящим к тому, что возрастание тока, формирующего поле на гармониках, происходит более быстро, чем увеличение ЭДС.

Модели объектов, относящихся ко второму классу, отличаются от моделей первого класса меньшим числом "нелинейных" контактов. Радиолокационные характеристики объектов данного класса оцениваются в основном экспериментально. Теоретическое исследование отражательных свойств объектов с двумя-пятью сосредоточенными нелинейностями основано на представлении их в виде совокупности простых нелинейных рассеивателей, к которым относятся штырь, продольная и крестообразная щели в волноводе.

3. Экспериментальные исследования методов нелинейной радиолокации с использованием прибора НР-900

Для отработки методов экспериментального исследования свойств нелинейной локализации и характеристик нелинейных локаторов использовался прибор НР 900-ЕМ (рис.4).

В ходе эксперимента исследовались как отражательные свойства элементарных нелинейных рассеивателей вроде полупроводниковых диодов и транзисторов, а также нелинейных контактов металлических поверхностей рис.5 и рис.6, но также и характеристики (эффективные поверхности отражения) сложных технических устройств, таких как измерительные приборы устройства несанкционированного съема информации и т.п. рис.7.

Измеритель вторичных полей (детектор нелинейных переходов) «НР 900 ЕМ» предназначен для поиска устройств, содержащих полупроводниковые компоненты, независимо от их функ-

ционального состояния. Он обеспечивает возможность эффективного поиска любых видов радиомикрофонов, в том числе с дистанционным управлением, а также микрофонных усилителей проводных микрофонов, средств негласного съема информации инфракрасного и ультразвукового диапазонов, средств звукозаписи. Энергетический потенциал изделия обеспечивает эффективный поиск в элементах интерьера и в ограждающих строительных конструкциях (пол, потолок, стены). В изделии «НР 900 ЕМ» предусмотрена возможность подключения усилителя мощности зондирующего сигнала «Мезон», что позволяет еще более повысить его энергетический потенциал.

Остронаправленная антенная система, широкий диапазон регулировок основных параметров изделия обеспечивают высокую точность локализации и облегчают проведение поисковых мероприятий.

Одновременный прием второй и третьей гармоник зондирующего сигнала, визуальная индикация их уровней, а также режим выделения огибающей отраженного сигнала (режим «20К»), позволяют оператору отличить сигналы, отраженные от полупроводниковых радиоэлементов, от сигналов естественных (коррозийных) нелинейных отражателей.



Рис.4. Нелинейный радиолокатор НР 900 ЕМ

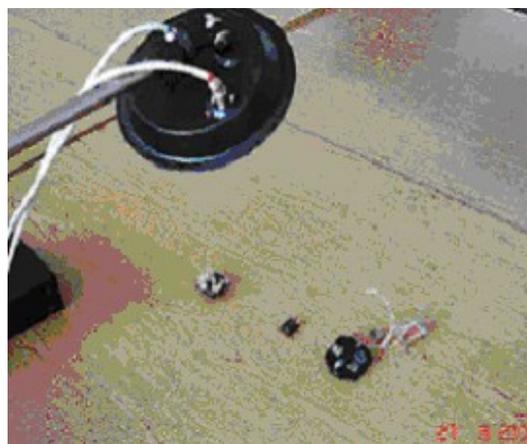


Рис.5. Экспериментальное определение интенсивности отражений элементарных нелинейных рассеивателей



Рис.6. Экспериментальное определение и сравнение интенсивности 2 и 3 гармоник несущей импульсного сигнала, рассеянного элементарными нелинейными отражателями



Рис.7. Применение нелинейного лоатора НР 900 ЕМ для определения ЭПР различных радиоэлектронных устройств и приборов

Применение совместно с изделием «НР 900 ЕМ» комплекта зондовых антенн с согласующим устройством позволяет обследовать труднодоступные полости, в том числе экранированные.

4. Технические данные нелинейного лоатора НР 900-ЕМ

- Дальность обнаружения штатного имитатора не менее 0,7 м в режиме максимальной мощности и максимальной чувствительности. В качестве имитатора выбран полупроводниковый диод 2Д521А, размещенный в защитном кожухе.
- Питание изделия осуществляется от встроенного автономного сменного источника - аккумулятора «Panasonic VBF-2E», или от сети переменного тока частотой (50...60) Гц, напряжением (220±22) В через адаптер сетевого питания.
- Мощность, потребляемая изделием, не превышает 10 ВА.
- Время непрерывной работы изделия от автономного источника питания не менее 4 часов.
- Индикация обнаружения: визуальная - на четырехстрочном ЖКИ и звуковая - на головные телефоны.
- Масса изделия в штатной упаковке не превышает 12 кг. Масса снаряженного блока приемопередатчика не превышает 3,0 кг.
- Условия эксплуатации: диапазон рабочих температур - от 5±2°С до 50±2°С; значения предельных пониженной и повышенной температур - минус 40±2°С и 70±2°С; повышенная влажность (80±3)% при температуре 25±2°С.

5. Методика и план проведения эксперимента

Порядок действий при локации нелинейного объекта в ходе эксперимента применялся следующий.

1. Устанавливалась максимальная мощность передатчика, максимальная чувствительность приемника и максимальная громкость сигнала в телефонах. При этом в головных телефонах прослушивались модуляционные сигналы второй гармоники зондирующего сигнала.

2. Антенная система максимально приближалась к обследуемой поверхности в точке обнаружения переотражающего объекта. При перемещении антенны параллельно обследуемой поверхности от точки обнаружения к периферии на 30...40 см и обратно, обнаруживалось изменение уровня шумового сигнала в телефонах.

3. В зависимости от характера переотражающего объекта – коррозионный диод или искусственный полупроводниковый элемент (радиоэлектронное устройство), возможны две принципиально различных зависимости уровня шума в головных телефонах от перемещения антенной системы вдоль обследуемой поверхности. Их типичный вид представлен на рис.8.

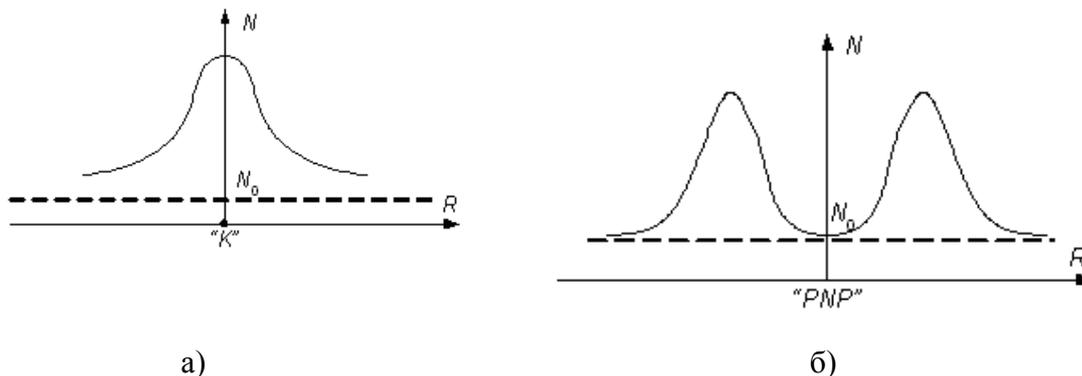


Рис.8. а) Зависимость уровня модуляционных шумов 2-ой гармоники коррозионного $p-n$ перехода от расстояния, б) Зависимость уровня модуляционных шумов 2-ой гармоники полупроводникового $p-n$ перехода от расстояния объекта до оси антенной системы анализатора.

"К" - точка расположения коррозионного $p-n$ – перехода; N – уровень шума в головных телефонах; N_0 - уровень шума в головных телефонах при отсутствии нелинейного переотражающего объекта; R - расстояние от точки расположения переотражающего объекта до оси антенной системы изделия; "PNP" - точка расположения полупроводникового элемента; N – уровень шума в головных телефонах; N_0 - уровень шума в головных телефонах при отсутствии нелинейного переотражающего объекта; R - расстояние от точки расположения переотражающего объекта до оси антенной системы изделия.

4. Коррозионный переход металл-окисел-металл, как правило, создает хриплый нерегулярный хруст при механическом воздействии на него. При переходе в режим прослушива-

ния модуляции третьей гармоникой зондирующего сигнала зависимости шумов в головных телефонах противоположны (кривые, изображенные на рис.11 и рис.12 меняются местами).

5. Существенное превышение 2-ой гармоникой зондирующего сигнала над 3-ей гармоникой (20 дБ и более) с высокой степенью вероятности свидетельствует об искусственном характере переотражающего элемента.

6. Метрологическое обеспечение нелинейных радиолокационных измерений

При исследовании характеристик линейного рассеяния калибровки измерительных установок проводятся тремя способами: безэталонным методом, методом косвенного эталона и методом реального эталона. Эти же методы могут быть использованы для калибровки устройства нелинейного зондирования [4]. При калибровке должны быть установлены коэффициенты связи C_1 и C_2 , которые при измерениях характеристик нелинейного локатора позволяют определить по зафиксированным при нелинейном зондировании значениям $P_{зс}$ и $P_{рс}$

искомые величины $S_{зс}$ и $S_{рс}$:
$$S_{зс} = \frac{P_{зс}}{C_1}; S_{рс} = \frac{P_{рс}}{C_2}.$$

Безэталонный метод заключается в расчете искомых коэффициентов C_1 и C_2 на основе уравнений распространения электромагнитного сигнала на частотах зондирующего и принимаемого сигналов при известных дальности до нелинейного локатора и коэффициентах усиления антенн. При этом не учитываются особенности распространения зондирующего и рассеянного сигналов на трассе от антенны локатора до объекта.

Калибровка с использованием косвенного эталона [4] сводится к экспериментальному измерению коэффициентов C_1 и C_2 . Такой метод калибровки наиболее часто используется при исследовании нелинейного рассеяния. В соответствии с этим методом в месте расположения исследуемого нелинейного рассеивателя помещают эталонную антенну с известными эффективной площадью S_3 на частоте запросного сигнала и коэффициентом усиления G_3 на частоте принимаемого сигнала. После этого измеряют коэффициенты потерь K_x на частоте запросного сигнала в тракте запросного сигнала на пути от входа антенны запросного сигнала до выхода эталонной антенны и K_2 на частоте принимаемого сигнала в тракте принимаемого сигнала на пути от входа эталонной антенны до выхода антенны принимаемого сигнала. Коэффициенты K_1 и K_2 связаны с искомыми C_1 и C_2 соотношениями

$$C_1 = K_1 S_3; C_2 = \frac{4\pi G_3}{K_2}. \quad (6)$$

Наиболее часто используемым в линейной радиолокации [4] является метод реального эталона, при котором на стенде измеряется объект с известной эффективной поверхностью рассеяния. Этот метод позволяет повысить точность и оперативность измерений. Однако ко-

коэффициенты распространения на частотах запросного сигнала и принимаемого сигнала при нелинейном рассеянии различны, поэтому непосредственное использование метода реального эталона для случая калибровки УНЗ затруднено. Даже для нелинейного рассеяния с известной характеристикой рассеяния при прямых измерениях недостаточно данных для определения коэффициентов C_1, C_2 . Действительно, характеристика рассеяния известна

$$S_{\text{рзс}} = g(S) \quad (7)$$

Нелинейный локатор позволяет измерить зависимость $P_{\text{пс}}$ от $P_{\text{зс}}$ которая связана с характеристикой рассеяния коэффициентами C_1 и C_2 :

$$P_{\text{пс}} = C_2 g\left(\frac{P_{\text{зс}}}{C_1}\right). \quad (8)$$

Выражение (8) не позволяет непосредственно определить C_1 и C_2 .

В то же время для измерения параметров нелинейного рассеивателя в режиме слабого взаимодействия в качестве эталона может быть использован прибор или устройство с известной эффективной поверхностью рассеяния σ . В этом случае при калибровке и измерениях решается не задача определения коэффициентов C_1, C_2 , а задача сравнения величины σ известного (его можно назвать калибровочным) и измеряемого нелинейного рассеивателя. Действительно, пусть эта величина для калибровочного нелинейного рассеивателя известна. Обозначив ее $\sigma_{\text{оп}}$ и воспользовавшись соотношением [4]

$$S_{\text{рзс}} = \frac{\sigma S_{\text{зс}}^n}{4\pi} \quad (9)$$

для режима слабого взаимодействия можно представить (8) в форме

$$P_{\text{пс}} = \frac{C_2 \sigma_{\text{оп}}}{4\pi} \left(\frac{P_{\text{зс}}^*}{C_1}\right)^n, \quad (10)$$

где $P_{\text{пс}}^*$ – измеренная мощность принимаемого сигнала для калибровочного нелинейного рассеивателя при фиксированной мощности запросного сигнала $P_{\text{зс}}^*$.

Зафиксировав $P_{\text{пс}}$ на входе приемника для исследуемого нелинейного рассеивателя, при излучаемой мощности $P_{\text{зс}}$ можно однозначно определить искомую величину σ :

$$\sigma = \sigma_{\text{оп}} \left(\frac{P_{\text{зс}}^*}{P_{\text{зс}}}\right)^n \frac{P_{\text{пс}}}{P_{\text{пс}}^*}. \quad (11)$$

Из (11) следует, что наиболее точные результаты получаются при неизменной мощности запросного сигнала ($P_{\text{зс}} = P_{\text{зс}}^*$). При измерениях с применением нелинейного локатора предполагают выполнение условия слабого взаимодействия, проверку которого легко реали-

зовать, изменяя на небольшую величину $P_{зс}$ (например, на 1 дБ). При этом в соответствии с (9) мощность $P_{пс}$ должна изменяться как $\Delta P_{пс} [\text{дБ}] = n \Delta P_{зс} [\text{дБ}]$.

Измерения параметров нелинейного рассеяния при других режимах работы нелинейного рассеивателя требуют определения коэффициентов C_1 и C_2 . Использование метода реального эталона возможно и в этом случае, однако для определения коэффициентов C_1 и C_2 нужно привлекать косвенные методы измерений.

В [9] показано, что амплитудные характеристики некоторых нелинейных рассеивателей могут иметь характерные точки. В частности, такими НР могут быть линейные антенны, нагруженные на сборку из различных диодов либо на диод, имеющий в составе несколько $p-n$ переходов. Так на рис.5 представлены амплитудные характеристики некоторых таких нелинейных рассеивателей в виде диполей, нагруженных на полупроводниковые диоды. На кривой 1 наблюдаются характерные точки типа максимум и минимум, на кривой 2 видна характерная точка типа "скачок". В характерной точке можно зафиксировать величины $S_{зс}^*$ и $S_{пс}^*$.

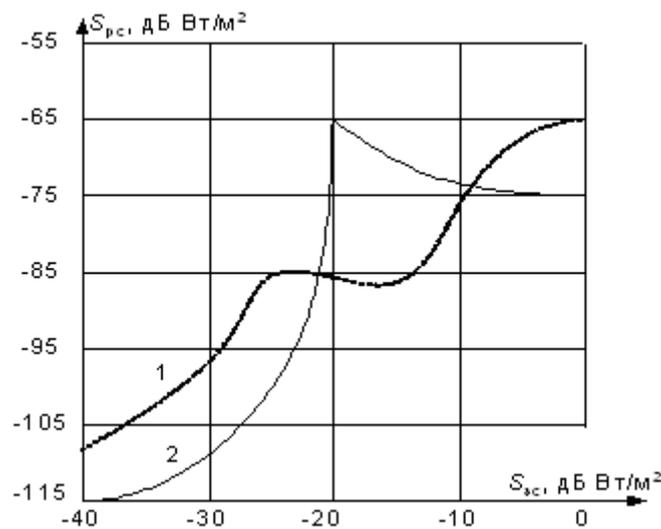


Рис.9. Амплитудные характеристики нелинейных рассеивателей с характерными точками, $f_{зс}=300\text{МГц}$, вторая гармоника кривая 1 - диполь, нагруженный на диод ГИ401, кривая 2 - на диод 1И104Д

Исследования показали, что при постоянстве внешних условий амплитудные характеристики таких нелинейных рассеивателей обладают необходимой стабильностью (многokrатно измеренные в ходе экспериментов и известные по литературным источникам амплитудные характеристики были полностью идентичны) и такие нелинейные рассеиватели могут выполнять функцию эталонных. При калибровке нелинейного локалатора в зоне облучения зондирующим сигналом помещается эталонный нелинейный рассеиватель и измеряется зависимость $P_{пс}$ от $P_{зс}$, которая подобна амплитудной характеристике и имеет те же характерные точки. За-

фиксировав значения $P_{зс}^*$ и $P_{рс}^*$, соответствующие выбранной характерной точке, можно

определить коэффициенты C_1, C_2 , т.е. выполнить задачи калибровки: $C_1 = \frac{P_{зс}^*}{S_{зс}^*}$; $C_2 = \frac{P_{рс}^*}{S_{рс}^*}$.

При использовании калибровки методом реального эталона принципиально возможны следующие ошибки измерения:

1. ошибка эталона (расхождение паспортных и реальных параметров);
2. ошибка фиксирования момента характерной точки в зависимости $P_{рс}$ от $P_{зс}$;
3. ошибку измерения величины мощности запросного сигнала и сигнала, принимаемого нелинейным локатором.

Первая и третья ошибки связаны с возможностями измерительной аппаратуры, используемой для калибровки эталона и проводимых измерений. Эти ошибки традиционны для всех методов, решающих подобную задачу. Для лучших образцов измерительной аппаратуры значения этих ошибок могут составлять 0,1 дБ.

Вторая ошибка свойственна только для рассмотренного выше метода. Ее величина зависит от того, насколько ярко выражена характерная точка и каким методом она фиксируется. Наибольшее преимущество с точки зрения лучшей фиксации имеет характерная точка типа скачок (для некоторых образцов обнаружены скачки уровня РС в 20 дБ и более). Зафиксировать такой перепад уровня принимаемого сигнала с высокой точностью не трудно.

В то же время следует заметить, что при измерениях уровень запросного сигнала, как правило, изменяется с какой-то дискретностью (особенно если используется современное поколение аппаратуры). Так, для генератора Г4-164 минимально возможный шаг дискретного переключения уровня мощности 0,1 дБ. Такого изменения мощности запросного сигнала вполне достаточно, чтобы на интервале дискретизации произошел скачок уровня принимаемого сигнала. Поэтому ошибку при определении C_1 можно считать не превышающей 0,1 дБ. Для C_2 ошибка будет определяться диапазоном принимаемых значений величины интенсивности рассеянного сигнала после характерной точки на интервале дискретизации запросного сигнала. Как показала практика, величина ошибки лежит в пределах 0,1.. 0,2 дБ.

Таким образом, калибровка установок нелинейного зондирования по методу реального эталона сводится к операции, аналогичной измерению амплитудной характеристики нелинейного рассеивателя с характерной точкой.

Заключение

Таким образом в ходе и в результате проведенных исследований

- показана возможность применения нелинейной радиолокации для решения задачи обнаружения и распознавания объектов, обладающих контактами металлических элементов и нелинейные характеристики.

- проведено метрологическое обеспечение нелинейных радиолокационных измерений и также перечисление условия влияния на результаты измерения.

Список литературы.

1. Штейншлейгер В. Б. К теории рассеяния электромагнитных волн вибратором с нелинейным контактом // Радиотехника и электроника, 1978, Т23, № 7, с 1329-1338.
2. Кузнецов А.С., Кутин Г. И. Методы исследования эффекта нелинейного рассеяния электромагнитных волн // Зарубежная Радиоэлектроника, 1985, № 4, с 41-43.
3. Штейншлегер В.Б. Нелинейное рассеяние радиоволн металлическими объектами. // Успехи физических наук, 1984, Т. 142, вып. 1.
4. Harger R.O. IEEE, 1976, v. AES-12, № 2, p. 230.
5. Беляев В.В, Маюнов А.Т, Разиньков С.Н. Состояние и перспективы развитие нелинейной радиолокации // Зарубежная радиоэлектроника, 2002, № 6, с 59-78.
6. Мусабеков П.М., Паньчев С.Н. Нелинейная радиолокация: методы, техника и области применения. // Зарубежная радиоэлектроника, 2000, № 5, с 54-60.
7. Беляев В.В., Маюнов А.Т., Разиньков С.Н. Оценка характеристик обнаружения объектов средствами нелинейной радиолокации при использовании сигналов с линейно-частотной модуляцией. // Сборник статей - нелинейный радиолокация с.29-35.
8. Горбачев А.А., Ларцов С.В., Тараканов С.П. Измерение характеристик объектов, нелинейно рассеивающих электромагнитные волны. // Радиотехника и электроника, 2001, том 46, № 6, с. 659-665.
9. Франческетти Дж., Пинто И. Нелинейные электромагнитные волны. М.: Мир, 1983.
10. Зыонг Дык Тхиен. Исследование возможностей и методов построение аппаратуры для нелинейной радиолокации. Сборник докладов VII-ой всероссийской юбилейной научно-технической конференции МАИ 2005. с 204-206.

Сведения об авторе

Зыонг Дык Тхиен, аспирант кафедры радиосистемы передачи информации и управления Московского авиационного института (государственного технического университета), e-mail: ddthien@mail.ru