

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.3>

УДК: 537.874.2: 621.969.3

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДВУХУРОВНЕВОГО ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА В НЕЛИНЕЙНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

И. Л. Афонин, А. Н. Дегтярёв, А. Л. Поляков, В. Г. Слезкин, Г. В. Слезкин

Федеральное государственное автономное учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»,
299053, г. Севастополь, ул. Университетская 33

Статья поступила в редакцию 20 ноября 2021 г.

Аннотация. Предложено в импульсных нелинейных радиолокаторах применять зондирующий сигнал в виде двух, следующих друг за другом, радиоимпульсов разной амплитуды, но с одинаковыми энергиями, а в приёмном устройстве — корреляционную обработку или оптимальную фильтрацию каждой из составных частей отражённого сигнала на несущей частоте. Так как отклик оптимального фильтра пропорционален энергии импульсного сигнала, уровни откликов для двух импульсов, отражённых от объекта без нелинейных свойств, будут одинаковыми. При наличии объекта с нелинейными свойствами уровни откликов на выходе устройства оптимальной обработки в соответствующие моменты времени будут различными, что является признаком обнаружения нелинейного объекта. Благодаря равенству энергий составных частей зондирующего сигнала и оптимальной фильтрации при приёме отражённого сигнала обеспечивается одинаковое влияние шумовой помехи на погрешность сравнения уровней составных частей принятого сигнала. С учётом уровня помехи должны быть выбраны верхняя и нижняя границы амплитудной неопределённости, в пределах которых невозможно считать уровни откликов различными. Решение о наличии нелинейного объекта принимается, если отличие в уровнях откликов выходит за пределы этих границ. Предложена структурная схема одноканального решающего устройства на основе последовательной корреляционной обработки каждой составной части

принятого сигнала, в котором уровень отклика коррелятора в момент окончания первого импульса запоминается до момента принятия решения, совпадающего с моментом окончания второго импульса.

Ключевые слова: нелинейный радиолокатор, зондирующий сигнал, два радиоимпульса разной амплитуды, сигналы с одинаковыми энергиями, оптимальная обработка на несущей частоте.

Abstract. A probing signal represented by two successive radio impulses having the same amplitude but different energies is suggested for application in pulsed nonlinear radars, while for the receiver it is suggested to perform either correlation processing or optimal filtering of each of the reflected signal components at the carrier frequency. Due to the fact that the response of the optimal filter is proportional to the energy of the pulsed signal, the response levels of the two impulses reflected from an object lacking nonlinear properties will be equal. Should an object have nonlinear properties the response levels at the optimal processing device output at certain moments of time will be different thus indicating that a nonlinear object has been detected. Since the energies of the probing signal components are equal and optimal filtration is performed when receiving the reflected signal, this ensures that the noise interference equally affects the error while comparing levels of the received signal components. Depending on the error magnitude it is necessary to select upper and lower limits of the amplitude uncertainty within which response levels can be considered different. Decision about the presence of the nonlinear object is made if the difference in response levels goes beyond these limits. Suggested below is a block diagram of a decision-making device based on a successive correlation processing of each of the received signal components where the response level of the correlator at the moment when impulse ends is stored until the time when the decision is made i.e. when the second impulse ends.

Key words: nonlinear radar, probing signal, two radio impulses of different amplitudes, signals with equal energies, optimal processing at the carrier frequency.

Введение.

Нелинейные радиолокаторы (НРЛ) применяются, например, для выявления в помещении скрытых электронных устройств, осуществляющих несанкционированный доступ к конфиденциальной информации.

Принцип действия НРЛ состоит в следующем [1—4].

Функциональные узлы современных радиоэлектронных устройств выполняют на основе печатных плат с проводниками, в разрывы которых включены полупроводниковые элементы: диоды, транзисторы, микросхемы. Для зондирующего сигнала локатора отрезки печатных проводников работают как приёмные антенны, поэтому возникающие на них сигналы могут воздействовать на $p-n$ переходы полупроводниковых структур. Из-за нелинейности вольтамперных характеристик этих структур спектр сигнала обогащается:

- появляются гармоники основной частоты высокочастотного сигнала;
- если высокочастотный сигнал модулирован по амплитуде или частоте, то появляются дополнительные комбинационные составляющие частоты модуляции.

В результате на выводах полупроводниковых элементов, а значит, на печатных проводниках, играющих роль передающих антенн, возникает сигнал с обогащённым спектром. Излучённое проводниками поле попадает в антенну НРЛ и его приёмное устройство, где выполняется анализ спектра сигнала с целью принятия решения о наличии объекта с нелинейностью (нелинейного объекта) и исключения «ложной тревоги», если объект не содержит $p-n$ переходов.

В современных НРЛ чаще всего используется выделение второй и третьей гармоник зондирующего сигнала. Так как электрические контакты типа «металл-окисел-металл» (МОМ), например, стыки арматуры в железобетоне, обладают нелинейными свойствами, обнаружение подобных «ложных» объектов в НРЛ происходит на основе сравнения относительного уровня сигналов второй и третьей гармоник, что обусловлено различиями в самом виде амплитудных характеристик.

Известно, что вольтамперная характеристика (ВАХ) $p-n$ перехода в области отрицательных напряжений соответствует незначительному току утечки, а для положительных напряжений — существенно нелинейному возрастанию тока (рис. 1 а). ВАХ МОМ-структур, во-первых, симметричны относительно нуля напряжения, а во-вторых, из-за непредсказуемости свойств контактов имеют значительный разброс (рис. 1 б).

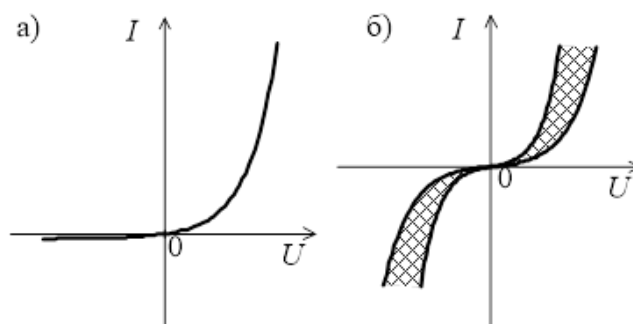


Рис. 1. Вид вольтамперных характеристик $p-n$ перехода (а) и МОМ-структуры (б).

МОМ-структуры порождают преимущественно нечётные гармоники в отражённом сигнале вследствие «нечётного» характера ВАХ. Наоборот, «квадратичный» вид ВАХ $p-n$ перехода обуславливает преобладание в отражённом сигнале чётных гармоник.

Таким образом, в современных НРЛ используется частотное разделение трёх каналов: канала зондирующего сигнала на частоте f_1 и двух информационных каналов — на частотах второй и третьей гармоник $2f_1$ и $3f_1$, соответственно. При этом благодаря значительному частотному разнесу нетрудно дуплексировать приёмный и передающий тракты и выделить нужные сигналы в приёмном тракте. Однако при этом трудности создания трёхчастотных антенн и приёмо-передающих устройств с высокой линейностью оказываются существенными, что приводит к определённым ограничениям качественных характеристик НРЛ. Благодаря частотному дуплексированию в известных НРЛ можно применять непрерывное излучение, а если в конкретных моделях и используют импульсный режим работы, то, например, для удобства аналого-цифровой обработки сигналов.

В данной работе рассматривается возможность применить в НРЛ двухуровневый импульсный зондирующий сигнал с временным разделением составных частей, позволяющий получать информацию о наличии нелинейности в исследуемом объекте не только на частотах гармоник, но и на частоте зондирующего сигнала.

1. Принцип зондирования нелинейного объекта двухуровневым сигналом

Предположим, что зондирующий сигнал имеет вид пары следующих друг за другом радиоимпульсов с разными амплитудами. Если такой сигнал попадает на объект, не обладающий нелинейностью, то отношение амплитуд соответствующих отражённых импульсов останется таким же, как в зондирующем сигнале. Если же зондирующий сигнал попадает на нелинейный объект, то отношение уровней отражённых сигналов изменится в ту или иную сторону. Количественно это изменение будет определяться различиями между ВАХ нелинейного объекта от аппроксимирующей линейной зависимости.

С математической точки зрения для любого наперёд заданного диапазона изменения напряжения нетрудно подобрать линейную функцию, с наименьшей погрешностью аппроксимирующую данный участок ВАХ $I(U)$ (например, по методу наименьших квадратов) и вычесть эту функцию из выражения для ВАХ. В результате вычитания мы получим нелинейную составляющую ВАХ $\Delta I(U)$, значения которой имеют первый порядок малости по отношению к значениям тока, соответствующим ВАХ в выбранном динамическом диапазоне, а следовательно, нелинейные отклонения амплитуд тока от «линейных» значений на выходе $p-n$ перехода могут быть значительными (рис. 2).



Рис. 2. Вид ВАХ $p-n$ перехода, её линейной аппроксимации (а) и разностной функции между ними ΔI (б).

Коэффициенты преобразования амплитуды синусоидального сигнала в амплитуды гармоник определяются результатом перемножения «добавок» к амплитуде выходного сигнала, вызванных нелинейностью ВАХ, т. е. имеют второй, третий и т. д. порядки малости по сравнению с эффектом нелинейности, наблюдаемым на основной частоте. Это означает, что амплитуды сигналов на частотах гармоник принципиально должны быть значительно меньше, чем изменение отношения амплитуд в принятом двухуровневом сигнале.

2. Результаты численного эксперимента

Численный эксперимент по оценке результатов прохождения двух синусоидальных сигналов с одинаковой частотой f_1 через p - n переход и МОМ-структуру был проведен следующим образом.

Для описания зависимости тока I p - n перехода от приложенного к нему напряжения U чаще всего применяют экспоненциальную модель [4] (рис. 1 а)

$$I(U) = I_s \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

где I_s — ток утечки;

q — заряд электрона;

k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура перехода.

Так как на результаты сравнительного анализа константы не влияют, в расчётной модели для численного эксперимента зависимость нормированного тока p - n перехода i от нормированного напряжения u имела упрощённый вид

$$i(u) = \exp(u) - 1. \quad (2)$$

Форма характеристики МОМ-структуры для положительных значений напряжения совпадала с (2), а для отрицательных значений имела зеркальный вид. Амплитуда первого тестового синусоидального сигнала $s(t)$ была постоянной и принималась за единицу, а амплитуда A второго сигнала $s_A(t)$ варьировалась (рис. 3).

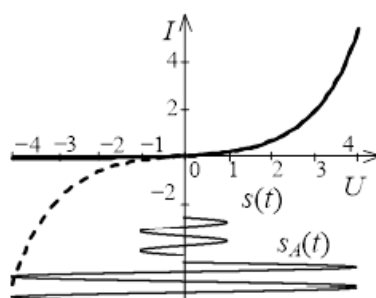


Рис. 3. Расчётные вольтамперные характеристики p - n перехода (сплошная линия) и МОМ-структуры (штрихи), а также вид тестовых сигналов.

Численный эксперимент выявил следующие моменты.

В спектре сигнала на выходе p - n перехода при входном сигнале $s(t)$, как и следовало ожидать, присутствовали постоянная составляющая с амплитудой u_0 , практически равной половине амплитуды первой гармоники u_1 , вторая и третья гармоники с соответствующими амплитудами u_i (рис. 4 а), а в спектре сигнала на выходе МОМ-структуры вторая гармоника практически отсутствовала (рис. 4 б).

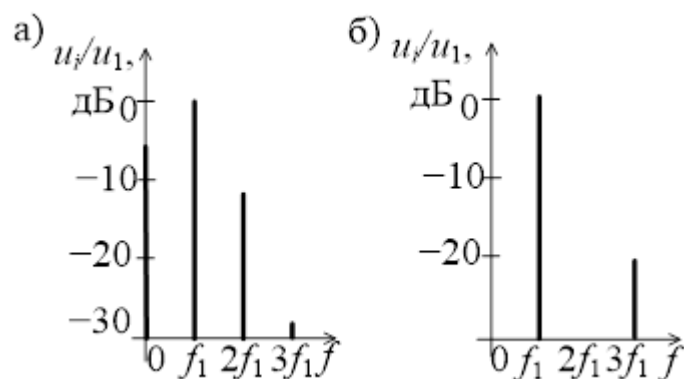


Рис. 4. Относительные уровни спектральных составляющих выходного сигнала p - n перехода (а) и МОМ-структуры (б) для тестового сигнала $s(t)$.

Данные результаты подтверждают высказанные выше предположения о том, что амплитудные коэффициенты преобразования сигнала основной частоты в сигналы второй и третьей гармоник не могут быть близкими к единице, и что уровень третьей гармоники сигнала для МОМ-структуры значительно выше, чем для p - n перехода, при практически отсутствующей второй гармонике.

Расчёты уровней спектральных составляющих для сигнала $s_2(t)$ проводились в пределах отношения амплитуд A в паре сигналов от 1 до 5 (рис. 5). Для наглядности результаты представлены в виде отношения амплитуд гармоник сигнала $s_A(t)$ u_{Ai} , нормированных на величину A , к амплитудам гармоник, вызванных сигналом $s(t)$ с единичной амплитудой (см. рис. 4).

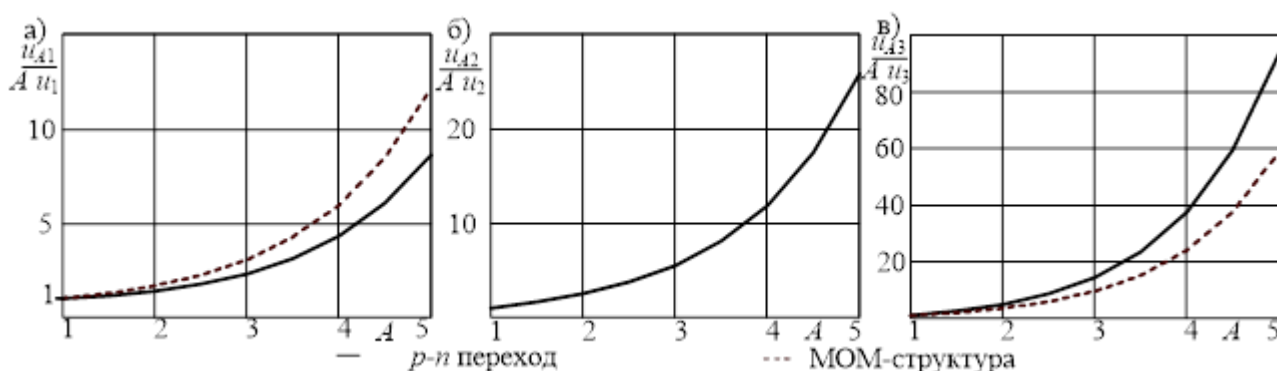


Рис. 5. Зависимости отношения нормированных амплитуд первой (а), второй (б) и третьей (в) гармоник к амплитудам гармоник с единичным уровнем для p - n перехода и МОМ-структуры.

Видно, что уже при различии в уровнях пары зондирующих сигналов в 2—3 раза (6—10 дБ) уровни отклика по всем гармоникам отличаются значительно, поэтому могут быть надёжно зафиксированы сравнительно простыми средствами.

Наблюдаемые на графиках количественные различия в представленных зависимостях для p - n перехода и МОМ-структуры вряд ли могут служить информативными признаками, позволяющими идентифицировать «ложные» объекты: во всяком случае, этот вопрос может быть решён только экспериментальным путём. Действительно, как было отмечено выше, параметры нелинейности МОМ-структуры имеют значительный разброс, так что результаты, полученные на простой экспоненциальной модели, не могут носить основополагающего характера. На указанные различия влияет также вид модели для p - n перехода. Так, например, в одном из экспериментов модель (2) была изменена: обратный ток приравнен нулю. Было установлено, что при этом различия в графиках для двух структур, заметные на рис. 5, практически исчезли.

3. О выборе параметров зондирующего сигнала в реальных условиях

Условия работы реальных НРЛ отличаются от идеализированных, прежде всего, наличием шумовой помехи. Её уровень в заданной полосе частот можно считать постоянным в течение всего времени анализа, следовательно, для части зондирующего сигнала с меньшим уровнем отношение сигнал-шум будет меньше, чем для сигнала высокого уровня. Понятно, что в существующих НРЛ стараются применять зондирующие сигналы минимально необходимой

мощности из соображений безопасности персонала, а это значит, что основным недостатком предлагаемого метода двухуровневого зондирования является необходимость применять более мощные сигналы.

О возможностях преодоления этого недостатка можно сказать следующее.

Во-первых, как показано выше, может оказаться достаточным увеличение уровня в 2—3 раза или даже менее, что нельзя считать радикальным повышением мощности передатчика.

Во-вторых, решением проблемы может быть применение оптимального приёма двухуровневого сигнала: накопление энергии каждой части сигнала за всё время её длительности и принятие решения путём сравнения накопленных уровней отклика оптимального фильтра в момент окончания сигнала [5]. При этом накладывается естественное ограничение на соотношение амплитуд A и длительностей составляющих зондирующего сигнала $s_1(t)$ и $s_2(t)$: они должны быть одинаковыми (амплитуды 1 к A , длительности $A\tau$ и τ , соответственно), чтобы составляющие имели одинаковую энергию E (рис. 6 а). Тогда уровни отклика оптимального фильтра z в соответствующие моменты времени t_1 и t_2 (z_1 и z_2 , соответственно), пропорциональные энергии каждой составляющей, будут также одинаковыми (рис. 6 б).

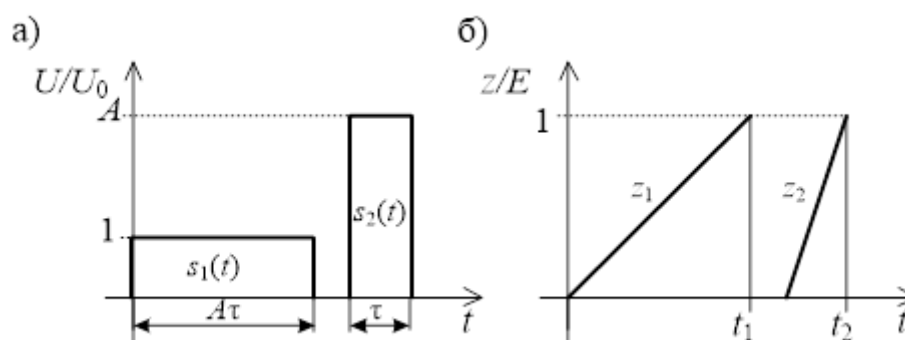


Рис. 6. Вид огибающей двухуровневого зондирующего сигнала (а) и отклика оптимального фильтра (б).

При реализации оптимальной обработки двух составных частей принятого сигнала во временной области решающее устройство может содержать только один коррелятор (рис. 7).

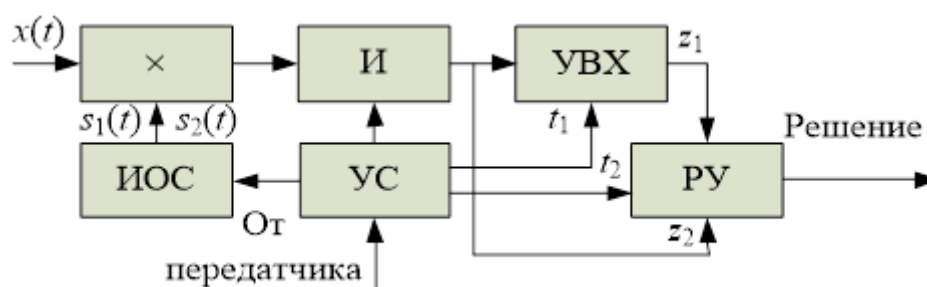


Рис. 7. Структурная схема устройства оптимальной обработки принятого сигнала.

Устройство работает следующим образом.

Входной сигнал $x(t)$ подаётся на первый вход перемножителя « x », на второй вход которого последовательно поступают образцы сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$ от источника опорного сигнала (ИОС). Результат перемножения поступает на интегратор И, уровень отклика которого z_1 в момент времени t_1 запоминается в устройстве выборки-хранения (УВХ) до момента t_2 . Выход интегратора также соединён со вторым входом решающего устройства (РУ), на первый вход которого поступает сигнал с выхода УВХ. Решающее устройство обеспечивает сравнение уровней откликов z_1 и z_2 на своих входах в момент времени t_2 и принимает решение об отсутствии или о наличии объекта с нелинейными свойствами в направлении зондирования.

Работой перечисленных устройств управляет устройство синхронизации УС, которое в свою очередь жёстко синхронизировано с циклом работы передатчика.

В результате оптимальной обработки энергетические отношения сигнал-шум для обеих составных частей сигнала будут одинаковыми, благодаря чему будут одинаковы и погрешности измерений амплитуд откликов, вызванные действием шумовой помехи. Задавшись ограничениями на эти погрешности, можно выбрать подходящие уровни зондирующего сигнала в передатчике и оптимальные границы амплитудной неопределённости, в пределах которых невозможно считать уровни откликов различными. Тогда алгоритм принятия решений в устройстве оптимальной обработки принятого сигнала может быть следующим:

— если различия в уровнях откликов z_1 и z_2 находятся в пределах верхней и нижней границ амплитудной неопределённости, то считается, что в зоне обнаружения НРЛ отсутствует нелинейный объект;

— если различия в уровнях откликов z_1 и z_2 выходят за пределы верхней или нижней границы амплитудной неопределённости, то принимается решение о наличии в зоне обнаружения НРЛ нелинейного объекта.

Известную трудность представляет собой дуплексирование зондирующего и принятого сигналов. Действительно, в импульсных НРЛ малой дальности допустимые длительности импульсов будут находиться в наносекундном диапазоне. Однако наносекундная техника в настоящее время ускоренно развивается, так что технические трудности можно считать преодолимыми.

Заключение.

В данной работе предложено в нелинейных радиолокаторах применять зондирующий сигнал в виде двух, следующих друг за другом, радиоимпульсов с разными уровнями, благодаря чему для обнаружения объекта с нелинейными свойствами в направлении зондирования достаточно провести сравнительные измерения уровней составных частей отражённых сигналов на несущей частоте. При этом для выравнивания влияния шумовой помехи на точность измерений целесообразно применять пару зондирующих импульсных сигналов с одинаковой энергией и оптимальную обработку в приёмном устройстве.

Направлениями дальнейших исследований могут быть поиск вариантов технической реализации НРЛ предложенного типа и исследование возможности выявления «ложных» нелинейных объектов типа МОМ-структур без необходимости спектрального анализа принятого сигнала.

Финансирование.

Оставить пустым если финансирование отсутствует

Литература

Вернигоров Н.С. Нелинейный локатор — эффективное средство обеспечения безопасности в области утечки информации *Защита информации. Конфидент: сетевой журнал*. 1996. №1. С.67-69.

Вернигоров Н.С. Неизвестная нелинейная локация как технология двойного применения. *Защита информации. Конфидент: сетевой журнал*. 2003. №6. С.80-83.

Хорев А. А. *Методы и средства поиска электронных устройств перехвата информации*. Москва, Министерство обороны РФ. 1998. 224 с.

Джонс Т. Х. Обзор технологии нелинейной локации. *Защита информации. Конфидент: сетевой журнал*. 1999. №3. С.74-78.

Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: справочник. Под ред. Я. Д. Ширмана. Москва, Радиотехника. 2007. 512 с.

Для цитирования:

Афонин И.Л., Дегтярёв А.Н., Поляков А.Л., Слезкин В.Г., Слезкин Г.В. Об использовании двухуровневого зондирующего сигнала в нелинейной радиолокации. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.3>