Новое поколение отечественных нелинейных локаторов на основе вторичной обработки сигналов с потенциалом искусственного интеллекта

УДК 004.93'1; 621.396; 519.254

Одним из направлений улучшения качества обнаружения и распознавания в нелинейной локации является построение пространственной картины распределения сигналов в обследуемом пространстве. Это позволяет уверенно распознавать точечные и протяженные объекты, осуществлять целеуказание на геометрический центр источника вторичных излучений. В перспективе предполагается использовать общеизвестные методы искусственного интеллекта для распознавания пространственных картин по совокупности топологических признаков и амплитудных откликов от объектов поиска. Нелинейные локаторы, реализующие принципы вторичной обработки сигналов, следует относить к новому поколению этих изделий.

В настоящее время в лаборатории АО «Группа Защиты-ЮТТА» проводятся испытания прототипа нелинейного локатора нового поколения с целью исследования потенциальных характеристик обнаружения и распознавания объектов в автоматизированном режиме.

Ключевые слова: сигнал, нелинейная локация, поиск, обнаружение, распознавание, пространственная фильтрация, вторичная обработка

Владимир Николаевич Ткач,
генеральный директор
stt@detektor.ru

Владимир Анатольевич Иванов,
доктор технических наук, профессор, разработчик РЭА
stt@detektor.ru

АО «Группа Защиты-ЮТТА»

Введение

Проведенный анализ открытой научно-технической информации в сфере нелинейной локации (далее – НЛ) показал, что вопросы пространственной селекции объектов на фоне помех по топологическим признакам в публикациях и патентах ведущих научных школ страны и за рубежом не освещались. В то же время в классической радиолокации как в смежной области знаний существует серьезный научно-технический задел, связанный со вторичной и третичной обработкой радиолокационной информации [1]. Эти методы целесообразно адаптировать для задач НЛ. Современная элементная база и математическое обеспечение позволяют в ближайшее время предложить изделие с новыми свойствами и повышенными показателями обнаружения.

Табл. 1 отражает сравнение понятий первичной, вторичной и третичной обработки сигналов классической радиолокации и аналогичные определения для НЛ.

При разработке методов вторичной обработки сигналов в НЛ следует учитывать ряд особенностей:

- работа ведется в ближней зоне, где картина распределения элек-

En **A New Generation of Domestic Nonlinear Locators Based on Secondary Signal Processing with the Potential of Artificial Intelligence**

V. N. Tkach,
General Director

V. A. Ivanov,
PhD (Eng., Grand Doctor), Full Professor

JSC «Protection Group UTTA»

One of the ways to improve the quality of detection and recognition in a nonlinear location is to build a spatial picture of the distribution of signals in the surveyed space. This makes it possible to accurately recognize point and extended objects, and target the geometric center of the secondary radiation source. In the future, it is planned to use well-known artificial intelligence methods to recognize spatial patterns based on a set of topological features and amplified responses from search objects. Nonlinear locators that implement the principles of secondary signal processing should be considered a new generation of products.

Currently, a prototype of a new generation nonlinear locator is being tested in the laboratory of JSC «YuTTA Protection Group» in order to study the potential characteristics of object detection and recognition in an automated mode. At the moment, the first estimated results have been obtained.

Keywords: signal, nonlinear location, search, detection, recognition, spatial filtering, secondary processing

тромагнитного поля очень сложная, что определяет значительные погрешности в определении местоположения объекта;

- антенная система, как правило, не согласована с рабочим диапазоном волн[1], а углы диаграммы направленности (ДН) локаторов находятся в пределах от 60° до 120°;
- при средней излучаемой мощности локатора 2…3 Вт практическая дальность обнаружения не превышает 10…12 м, что значительно меньше заявленных показателей;
- объекты поиска обладают сложной и зачастую непредсказуемой диаграммой обратного рассеяния с различных углов облучения, и для волн разной поляризации сигналы значительно варьируются;
- большое количество помеховых факторов различной природы, влияющих на эффективность поиска, начиная от физических параметров окружающей среды и заканчивая так называемыми «коррозионными диодами»;
- низкая мощность сигнала от нелинейного перехода и существенная зависимость от расстояния поиска;
- применение локатора осуществляется, как правило, оператором и преимущественно в ручном варианте, что приводит к дополнительной паразитной модуляции сигнала, хотя известны попытки установить локатор на роботизированные платформы.

Перечисленные выше особенности НЛ предопределяют продолжительное время поиска и значительные погрешности в интерпретации результатов. Вероятность обнаружения находится на уровне ≈ 0,8…0,9, что зачастую не устраивает заказчика.

До настоящего времени методы НЛ развивались преимущественно в следующих направлениях:

- анализ тонкой структуры сигналов от объектов на кратных гармониках;
- физика сигналообразования в полупроводниковых структурах и нелинейных элементах;
- исследование источников помех и их сигналов;
- использование сложных зондирующих сигналов.

В данной статье приводятся результаты исследований, которые можно трактовать как апробацию нового метода вторичной обработки сигналов НЛ. Представленный новый метод НЛ заключается в построении картины пространственного распределения сигналов откликов от объектов на кратных гармониках.

Описание опытного образца и программы экспериментальных исследований

Вторичную обработку сигналов в НЛ можно сравнить с 3D-сканированием пространства. Приведем ее этапы:

- построение результирующей пространственной картины распределения откликов от объектов на кратных гармониках;
- локализация откликов от объектов;
- вычисление геометрических центров локальных максимумов;
- целеуказание на источник сигнала;
- вычисление совместной многомерной плотности распределения вероятностей амплитуд (мощностей) сигналов нескольких гармоник в центрах локальных максимумов;
- вычисление спектров сигналов кратных гармоник в локальных максимумах;
- распознавание предполагаемого обнаруженного объекта с использованием многомерного признакового пространства.

Для реализации принципов вторичной обработки сигналов НЛ была разработана и реализована структура опытного образца перспективного локатора (рис. 1).

Опытный образец работает следующим образом. Вычислитель задает управляющий сигнал для системы управления обзором пространства. Обзор осуществляется с помощью механического или элек-

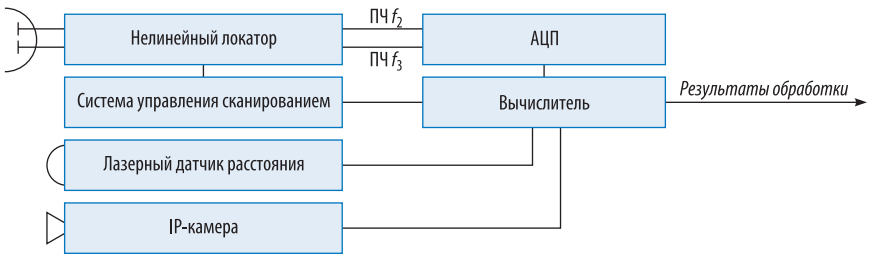


Рис. 1. ***Лабораторная установка нелинейной локации***

Табл. 1. ***Сопоставление принципов обработки сигналов в локации на разных уровнях***

Локация / Уровень	Радиолокация	Нелинейная локация
Первичная обработка	Обнаружение сигнала, отраженного от цели, и определение параметров: угол места, азимут, дальность до цели, радиальная скорость	Обнаружение сигналов нелинейных переходов на кратных гармониках, определение направления на цель, оценка мощности сигналов на кратных гармониках и дальности
Вторичная обработка	Построение траекторий целей, определение скорости, экстраполяция и прогнозирование положения, распознавание целей и фильтрация ложных целей	Оценка пространственного распределения интенсивности сигналов от объектов, распознавание целей по соотношению мощностей на кратных гармониках, целеуказание на источник излучений
Третичная обработка	Совместная обработка радиолокационной информации нескольких радиолокационных станций	Совместная обработка сигналов нескольких локаторов

[1] *Эффективная антенна, например, согласованная с сигналом на частоте 850 МГц, может достигать 2 м в длину [2], что явно не подходит для практических задач поиска. Более того, создать эффективную универсальную антенну для излучаемого сигнала и нескольких принимаемых гармоник проблематично даже теоретически. У реальных антенн для НЛ имеется много боковых лепестков, что также ухудшает условия поиска.*

тронного управления ДН локатора. Порядок просмотра элементов разрешения (ЭР) определяется вычислителем. Сигналы с выхода усилителей промежуточной часты (ПЧ) гармоник f_2 и f_3 поступают на 2-канальный АЦП и далее в вычислитель. В ходе обзора пространства из каждого ЭР в базу сигналов записываются реализации ПЧ f_2 и f_3 длительностью 0,1 с, а также вычисляется средняя мощность сигналов в реализациях. По итогам сканирования пространства формируются две матрицы мощностей сигналов ПЧ f_2 и f_3 размерами $M \times N$, где M и N – число просмотренных ЭР по горизонтали и по вертикали. По полученным реализациям строятся спектры сигналов.

В состав локатора включена IP-камера. Сектор ее наблюдения согласован с единичным ЭР локатора, и в момент регистрации сигналов делается снимок исследуемого пространства. Каждому снимку соответствуют две реализации сигналов ПЧ f_2 и f_3. По окончании обзора все снимки сшиваются в панораму для последующего документирования результатов поиска. На снимки в перспективе будут наноситься изолинии регистрируемых сигналов и значений в точках максимумов.

Также в составе локатора имеется лазерный датчик расстояния, который совмещен с осью ДН локатора и работает в видимом ИК-диапазоне. Результаты измерений расстояния используются в вычислителе для коррекции оценок мощностей сигналов ПЧ f_2 и f_3, поскольку затухание сигналов НЛ в ближней зоне на 1 м может составлять от 4 до 8 раз [3]. По итогам измерений формируется матрица расстояний размерностью $M \times N$. Элементы этой матрицы используются в качестве поправочных коэффициентов в формуле дальности НЛ [4].

По окончании сканирования пространства строится 3-мерная поверхность откликов сигналов f_2 и f_3, которая аппроксимирована с помощью полиномиальной регрессии. На этих поверхностях отыскиваются все локальные и краевые максимумы, в которых возможно наличие неоднородностей, содержащих полупроводники, а также вычисляются геометрические центры найденных предполагаемых объектов. Точки максимумов поочередно подсвечиваются лазерным целеуказателем, в эти точки переводится ДН локатора для распознавания (доразведки) вероятного класса обнаруженной неоднородности уже на более длительном интервале времени и с применением более мощных алгоритмов [5], в том числе искусственного интеллекта.

Результаты апробации метода вторичной обработки сигналов НЛ

Испытания проводились в лабораторных условиях:

а) типовое офисное помещение, высота потолков 3 м, материал стен – кирпич, межэтажные перекрытия – железобетон (ж/б);

б) на фоне макета ж/б стены, один слой арматуры, шаг ячейки арматуры – 18…20 см, толщина прутка – 10 мм.

Использовались имитаторы электронных устройств (неэкранированные и частично экранированные). Имитаторы размещались посередине помещения и на фоне ж/б стены (10 см перед ж/б стеной и 10 см за ж/б стеной). Расстояние до имитатора или до ж/б стены – 1,4…1,7 м (типовая практическая поисковая дальность).

Были зафиксированы следующие параметры:

- частота зондирования $f_{изл.}$ = 845 МГц, режим излучения – непрерывный, мощность – 2 Вт;
- шаг угла смещения ДН – 5°;
- количество ЭР по горизонтали – 12, по вертикали – 10;
- обследуемая поверхность – 1,8 × 1,5 м;
- ЭР на расстоянии 1,5 м аппроксимируется кругом, ∅ ≈ 0,7…0,9 м;
- смещение центра ЭР на исследуемой поверхности составляет ≈ 0,15 м;
- высота антенны локатора относительно пола ≈ 1,3 м.
- настройки трактов усиления и ПЧ опытного образца не менялись.

Регистрировались абсолютные значения мощностей сигналов f_2 и f_3 (мВт) на выходе усилителей ПЧ в каждом ЭР.

Изначально предполагалось, что в обследуемом помещении нет посторонних электронных устройств. Такую обстановку можно считать фоном помещения (или исходным состоянием). Рис. 2 отражает пространственную усредненную картину распределения мощностей сигналов фона в исследуемом помещении (расстояние до стен >5 м). Локальные максимумы мощности сигналов составили: f_2 ≈ 40…50 мВт и f_3 ≈ 3…4 мВт. Видно, что в зону обнаружения (на высоте ≈ 1,0 м) попал протяженный горизонтальный объект инженерных коммуникаций здания.

На следующем этапе для исследования пространственного распределения сигналов НЛ от электронных устройств перед локатором на расстоянии 1,5 м и на высоте 1,1 м были размещены два имитатора. Результат показан на рис. 3. Пики мощности f_2 достигли 70 мВт (превышение фона >2 раза), а f_3 – 100 мВт (превышение фона >10 раз). При этом локализация по f_2 полностью соответ-

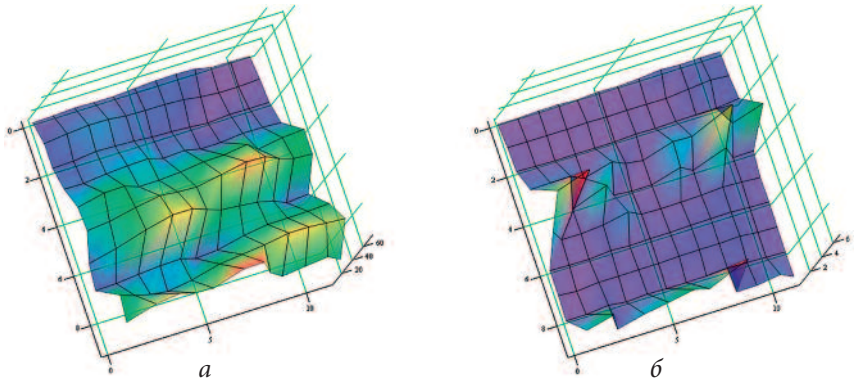


Рис. 2. ***Усредненный фон сигналов в помещении: а) на частоте f_2; б) на частоте f_3***

ствует размещению имитаторов в пространстве (в отличие от f_3, где сформировались ложные максимумы). Погрешность автоматического целеуказания для f_2 по вертикали составила ±0,2 м, по горизонтали – ±0,3 м.

Особый интерес представляет локализация объектов на фоне ж/б стены (частый случай на практике). В соответствии с планом эксперимента сначала исследовалась стена в качестве фона (рис. 4), а затем перед стеной (рис. 5) и позади стены (рис. 6) размещались имитаторы.

На рис. 4 приведены усредненные по нескольким реализациям сигналы НЛ от одного и того же фрагмента ж/б стены на расстоянии 1,5 м. Сигналы f_2 и f_3достигают соответственно 70 и 80 мВт и схожи с сигналами от имитаторов. Следовательно, если обследование помещения осуществляется впервые, то такие экстремумы могут быть ошибочно восприняты в качестве сигналов от реальной цели. Многократное повторение опыта показало, что пространственная картина сигналов НЛ от ж/б стены статична, погрешность не превысила 10 %.

При размещении имитатора перед ж/б стеной простр́нственная картина сигналов f_2 и f_3 изменилась (см. рис. 5). Максимум мощности f_2 составил 75 мВт, а f_3 – 100 мВт. По сравнению с фоном от ж/б стены сигнал увеличился на 15–20 %, то есть уверенное обнаружение в таких условиях проблематично. Погрешность локализации ухудшилась: по вертикали она составила ±0,3 м, по горизонтали – ±0,4 м. Область локализации представляет собой «пятно» диаметром ≈ 0,6 м.

Размещение имитатора за ж/б стеной позволило исследовать с помощью методов НЛ возможности запреградного обнаружения объектов. Полученные результаты оказались обнадеживающими (см. рис. 6): несмотря на еще больше ухудшившуюся локализацию объекта, сигналы уверенно превысили фон от того же участка ж/б стены. Максимум мощности f_2 превышал 90 мВт, а f_3 – 200 мВт. «Пятно», характеризующее область искомого объекта, составило ≈ 0,7…0,9 м.

При исследовании опытного образца был апробирован общеизвест-

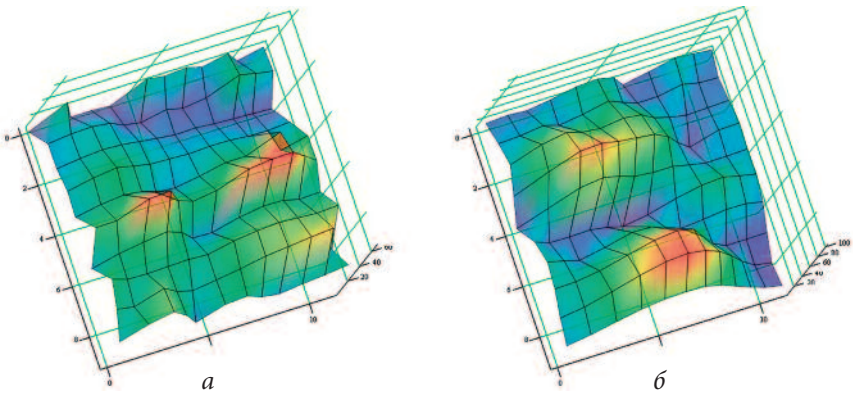


Рис. 3. ***Сигнал от 2 электронных устройств: а) на частоте f_2; б) на частоте f_3***

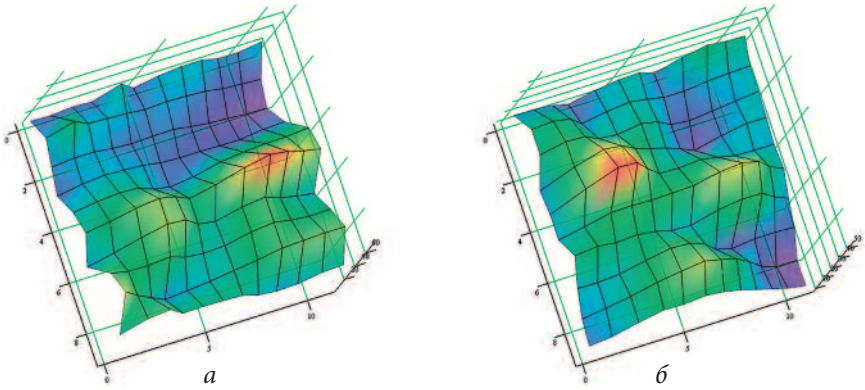


Рис. 4. ***Усредненный сигнал от железобетонной стены: а) на частоте f_2; б) на частоте f_3***

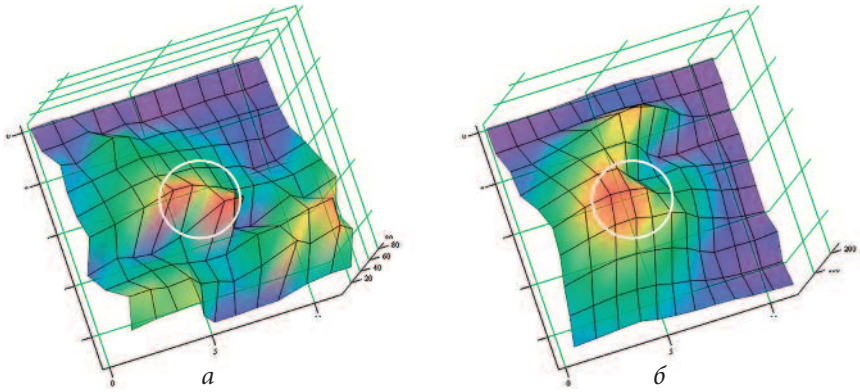


Рис. 5. ***Сигнал от электронного устройства на фоне железобетонной стены: а) на частоте f_2; б) на частоте f_3***

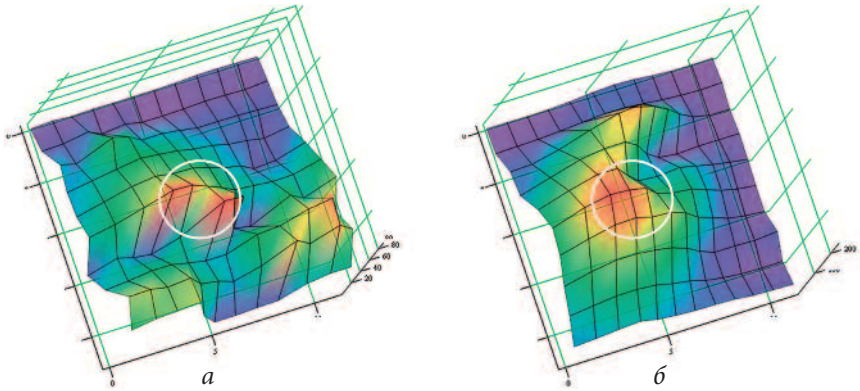


Рис. 6. ***Сигнал от электронного устройства, размещенного за железобетонной стеной: а) на частоте f_2; б) на частоте f_3***

ный разностный метод селекции объектов [6], когда из текущего сигнала вычитается сигнал фона или предыдущего обследования объекта.

Рис. 7 отражает разностную пространственную картину для размещения имитатора перед ж/б стеной. При этом контрастность цели по f_2 существенно улучшилась. При размещении имитатора перед ж/б стеной отношение сигнал/шум составило ≈ 3…6 (ранее было 1,2…1,5). Сигнал f_3 практически скомпенсировался до уровня 30…35 мВт.

Для НЛ разностным методом за ж/б преградой (рис. 8) отношение сигнал/шум также улучшилось и составило ≈ 1,5…2,5. Другими словами, цели, размещенные за ж/б преградой, сохраняют контрастность.

Заключение

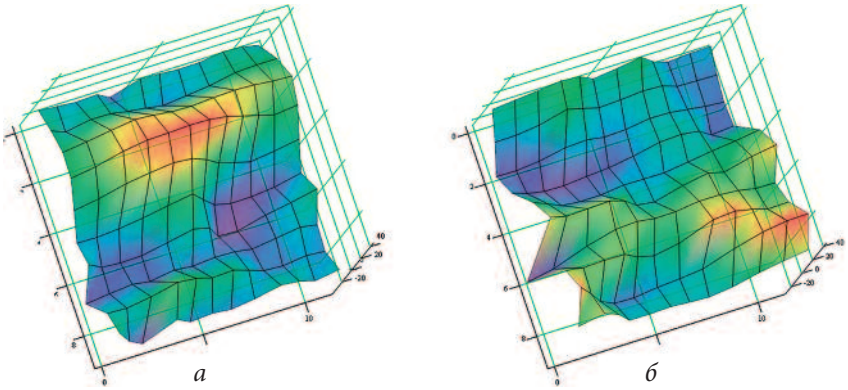
В целом результаты проведенных исследований по обнаружению и распознаванию сигналов от электронных устройств на фоне металлических конструкций внушают оптимизм и требуют дальнейшей проработки.

Оценка воспроизводимости пространственных картин распределений сигналов НЛ была выполнена корреляционным методом. Вычислялись коэффициенты корреляции между матрицами в одинаковых экспериментах. Для всех экспериментов корреляция пространственных картин в сигналах f_2 составила от 0,67 до 0,85. Наихудшая корреляция зафиксирована для имитаторов, расположенных за преградой, наилучшая – для фонов помещения. Корреляция для f_3 оказалась неудовлетворительной: в пределах от 0,12 до 0,25, что требует дополнительного исследования (возможно, сигнал f_3 = 2,535 ГГц попал в полосу частот Wi-Fi, для которой характерна более высокая интенсивность помех).

Полученные реализации позволяют разработать критериальный аппарат обнаружения и распознавания на основе классических методов статистической радиотехники [7]. Дальнейший сбор статистических данных пространственных распределений сигналов НЛ ведет к созданию обучающей выборки для использования искусственного интеллекта при распознаваниипространственных картин. Потребуется порядка 100 реализаций пространственных картин для каждого действующего фактора, искомых объектов и помех.

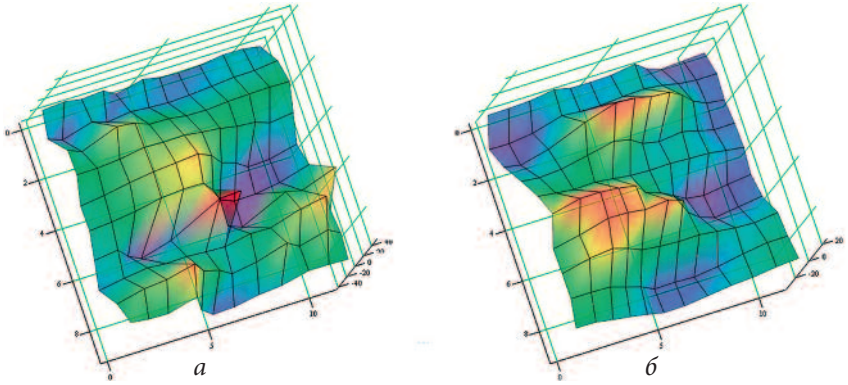
Таким образом, в ходе исследования пространственной картины распределения сигналов нелинейной локации от объектов обнаружения и помех в различных условиях впервые была показана возможность и перспективность вторичной обработки сигналов.

Основные решающие правила следует строить на основе анализа второй гармоники. Признаковое пространство на основе третьей гармоники в настоящее время является ненадежным. ■



а *б*

Рис. 7. ***Разностный сигнал электронного устройства, размещенного перед железобетонной стеной, и фона железобетонной стены: а) на частоте f_2; б) на частоте f_3***



а *б*

Рис. 8. ***Разностный сигнал электронного устройства, размещенного за железобетонной стеной, и фона железобетонной стены: а) на частоте f_2; б) на частоте f_3***

ЛИТЕРАТУРА

1. *Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп.; под ред. Я. Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.*
2. *Воскресенский Д. И. Антенны и устройства СВЧ: учеб. пособие / Д. И. Воскресенский, В. Л. Гостюхин, В. М. Максимов [и др.] – М.: Радио и связь, 1972. – 856 с.*
3. *Вернигоров Н. С. Экспериментальные исследования воздействия импульсного СВЧ-излучения на материалы / Н. С. Вернигоров, А. П. Саркисьян [и др.] // Радиоэлектроника и телекоммуникации. – 2004. – № 6 (24). – С. 51.*
4. *Иванов М. М., Железняк В. К., Чертков В. М. Обзор методов обнаружения нелинейных элементов с помощью нелинейного радиолокатора / М. М. Иванов, В. К. Железняк, В. М. Чертков // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2017. – № 12. – С. 10–16.*
5. *Иванов В. А. Непараметрическое оценивание двумерной плотности распределения сигналов нелинейной локации в интересах распознавания объектов на фоне помех / В. А. Иванов, И. Н. Крюков, А. В. Черковец // Радиотехника. – 2024. – Т. 88, № 2. – С. 12–18.*
6. *Волчкова Д. С. Алгоритм обнаружения малоконтрастных объектов в различной фоноце-левой обстановке / Д. С. Волчкова, А. С. Долгова // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». – 2021. – № 2. – С. 76–89.*
7. *Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. – 2-е изд., перераб. и доп. / В. И. Тихонов – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.*