

## ШУМОВАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

К. А. Лукин

*Институт радиопрофики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: [LNDES@kharkov.com](mailto:LNDES@kharkov.com)*

Кратко изложены результаты исследований и разработок в области шумовой радарной технологии, выполненных в отделе нелинейной динамики электронных систем. Описаны генераторы хаотических сигналов мм диапазона, используемые в передатчиках шумовых радаров, широкополосных корреляционных приемниках, а также шумовые радарные системы различного назначения: радар предупреждения столкновений, шумовой когерентно-импульсный радар, наземный шумовой радар с синтезированием апертуры (РСА) и др. Получены когерентные РСА изображения с высоким разрешением, достигнута высокая точность и стабильность измерения малых сдвигов на поверхности облучаемых объектов. Показана возможность мониторинга больших зданий с целью регистрации их структурных изменений. Ил. 14. Табл. 1. Библиогр.: 37 назв.

**Ключевые слова:** динамический хаос, шумовая радиолокация, мониторинг.

В последние годы в отделе нелинейной динамики электронных систем Института радиопрофики и электроники (ИРЭ) НАН Украины успешно развивается перспективное направление прикладной радиопрофики и электроники – современная шумовая радарная технология, или шумовая радиолокация.

Идея шумовой радиолокации известна давно и заключается в применении непрерывных или импульсных случайных (шумовых) сигналов (ШС) в качестве зондирующих и когерентном приеме их отражений. Анализ первых экспериментов по радиобнаружению металлических объектов показывает, что они были выполнены именно с помощью ШС сигналов, но при их некогерентном приеме. К. Хюльсмаер (*Christian Huelsmeyer*) в Германии создал и запатентовал в 1904 г. первый предшественник радара – «телеметаллодетектор» (*«telemobiloscope»*) [1] в моностатическом исполнении. Однако еще в 1897 г. А. С. Попов в России испытал установку с аналогичной функцией, но в бистатическом варианте [2]. В обоих случаях авторы использовали искровые разрядники в качестве передатчиков шумовых импульсов и когерентер – как детектор, который осуществлял прием отраженных шумовых импульсов. По-видимому, первые работы по разработке измерителей расстояний, базирующихся на когерентном приеме ШС, были опубликованы Р. Буретом (*R. Bourret*) в 1957 г. [3] и Б. Хортоном (*B. M. Horton*) в 1959 г. [4].

При обеспечении когерентного приема радиолокационных отражений ШС можно отнести к наиболее эффективным зондирующим сигналам, который позволяет обеспечить важные эксплуатационные характеристики радара: высокое разрешение по дальности и скорости, наилучшую помехоустойчивость, электромагнитную совместимость, скрытность работы, помехозащищенность и др. Разработчиками радарных систем неоднократно предпринимались попытки

создания эффективных шумовых радаров с когерентной обработкой отраженных сигналов во многих исследовательских центрах мира, в том числе и в ИРЭ НАН Украины. Однако эти исследования не были успешными, в основном, по следующим причинам: отсутствие эффективных источников ШС и управляемых широкополосных линий задержек, необходимых для когерентной обработки отраженных случайных сигналов, т. е. широкополосных корреляционных приемников.

Таким образом, к ключевым задачам, решение которых необходимо для успешного развития современной шумовой радиолокации, следует отнести: создание эффективных источников шумовых радиосигналов и широкополосных корреляционных приемников для когерентной обработки таких сигналов. Разработанные нами методы хаотизации электронных систем и цифро-аналоговой обработки случайных сигналов позволили создать ряд генераторов хаотических колебаний и широкополосных корреляторов, на основе которых разработаны и испытаны исследовательские образцы современных шумовых радаров мм и микроволнового диапазонов, и тем самым, заложить основы современной шумовой радарной технологии [5-11].

Шумовая радарная технология включает три основных составляющих:

- разработка и исследование генераторов ШС на основе методов хаотизации колебаний в электронных системах микроволнового и мм диапазонов;
- разработка методов цифровой обработки случайных сигналов и создание широкополосных цифро-аналоговых корреляторов;
- разработка шумовых радаров и зондирующих систем различного назначения.

Кроме исследований в указанных направлениях нами проводится изучение автодинного эффекта в генераторах хаотических колебаний и возможности его применения в радиолока-

ции, а также исследование явления интерференции декоррелированных сигналов, в частности, спектральной интерферометрии, и построение на его основе прецизионных измерительных систем. Кратко остановимся на полученных результатах в каждом из направлений.

**1. Автогенераторы хаотических колебаний, как источники ШС.** Создание эффективных широкополосных источников случайных сигналов с требуемыми характеристиками – одна из ключевых задач современной шумовой радиолокации, которая успешно решается в отделе нелинейной динамики электронных систем ИРЭ НАНУ [8-12]. Основная идея построения источников случайных сигналов базируется на использовании явления динамического хаоса в электронных приборах микроволнового и мм диапазонов, используемых нами для создания источников ШС. Разработка первого генератора хаотических колебаний мм диапазона [8, 9] опиралась на теоретические исследования динамического хаоса и достижения ИРЭ в области электронно-вакуумных приборов О-типа. Стохастизация автоколебательного режима лампы обратной волны (ЛОВ) возможна за счет эффекта запаздывания в канале обратной связи через амплитудную автомодуляцию огибающей, которая реализуется при отношениях рабочего тока к стартовому  $> 30$ . Однако в мм диапазоне длин волн реализация таких отношений токов затруднена из-за слабой связи электронного потока с полем синхронной волны и технологических ограничений получения плотных электронных потоков, поэтому в мм диапазоне удалось разработать и изготовить только резонансные лампы обратной волны (ЛОВО), колебательная система которых имеет сравнительно высокую добротность. Последнее обстоятельство делает невозможным возбуждение широкополосных колебаний в таких генераторах и, следовательно, реализацию хаотических режимов. Нами было найдено новое решение, которое обеспечило уменьшение стартовых токов и достаточную широкополосность колебательной системы ЛОВО. С этой целью мы значительно увеличили длину взаимодействия электронов с полем, что позволило уменьшить стартовый ток (а следовательно, увеличить достижимые превышения рабочего тока над стартовым), и значительно ослабили коэффициент отражения ( $\sim 0,3-0,5$ ) поверхностной волны от коллекторного и пушечного выводов СВЧ мощности, что несколько повышает стартовый ток, но значительно расширяет возможную полосу генерируемых частот. Такие электронно-вакуумные приборы получили название слабрезонансных ЛОВО [8, 9].

На рис. 1 показано схематическое изображение слабрезонансной ЛОВО 8-мм диапазона, а спектры генерируемых колебаний при

различных значениях отношения рабочего тока к стартовому представлены на рис. 2.



Рис. 1. Генератор хаоса на основе слабрезонансной ЛОВО 8-мм диапазона

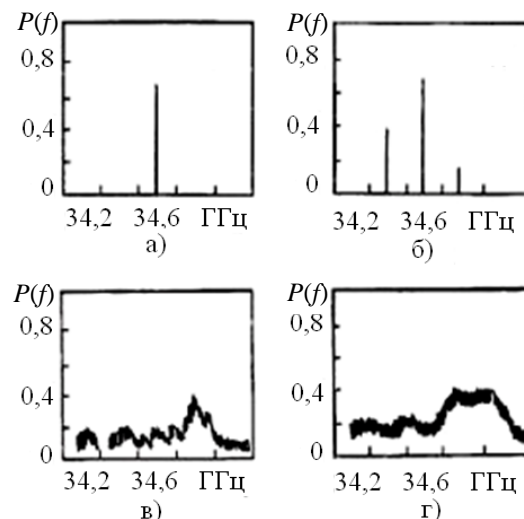


Рис. 2. Эволюция спектра мощности сигнала слабрезонансной ЛОВО 8-мм диапазона с ростом отношения рабочего тока к стартовому  $K$ : а) –  $K = 3$ ; б) –  $K = 7$ ; в) –  $K = 19$ ; г) –  $K = 48$

Уже в первых экземплярах слабрезонансных ЛОВО 8-мм диапазона были получены рекордные значения полосы генерируемых частот и мощности непрерывной генерации ШС, характеризующихся сплошным спектром и быстрым уменьшением корреляций генерируемого сигнала. Однако более важное достижение этих исследований заключалось в том, что впервые был построен автогенератор хаотических колебаний, который с эксплуатационной точки зрения эквивалентен автогенератору одночастотных колебаний, так как для получения требуемого широкополосного сигнала на такой прибор достаточно

подать питающее напряжение без какой-либо дополнительной модуляции и т. п.

Применение электронно-вакуумных источников электромагнитных сигналов оправдано лишь в тех случаях, когда это действительно необходимо, например, для обеспечения требуемой мощности зондирующего сигнала. Поскольку такое применение для шумовой радиолокации в то время не прогнозировалось, то основные усилия в дальнейшем развитии этого направления были сосредоточены на изучении возможностей полупроводниковых активных элементов, таких как диоды Ганна, лавинно-пролетные диоды (ЛПД), транзисторы, а также микрополосковой технологии для генерации хаотических колебаний с целью создания эффективных автогенераторов ШС.

Развитие методов хаотизации динамики электронных систем и разработка генераторов хаотических колебаний основаны на результатах фундаментальных исследований нелинейных динамических систем. С математической точки зрения любая динамическая система может быть описана в терминах дифференциальных или дифференциально-разностных уравнений, что послужило отправной точкой в исследовании нелинейных динамических систем и их классификации. Динамическая система может демонстрировать хаотическое поведение лишь в том случае, если она является нелинейной и имеет не менее 1,5 степеней свободы, т. е. описывается системой уравнений третьего порядка и выше. Существует два обширных класса таких систем. К первому классу относятся нелинейные и квазилинейные системы, описываемые обыкновенными дифференциальными уравнениями (ОДУ), дифференциальными уравнениями в частных производных или дифференциально-разностными уравнениями (ДРУ) с линейными граничными условиями. Примером системы, описываемой ОДУ, является многорезонансная система с хаотическим взаимодействием мод, возбуждаемая активным эле-

ментом [10, 11]. Примером системы, которая описывается дифференциальными уравнениями в частных производных, может служить электронно-вакуумная система с пространственным взаимодействием электромагнитного поля с электронным пучком, т. е. упомянутая выше слаборезонансная ЛОВО. Второй класс – это линейные уравнения в частных производных с нелинейными граничными условиями. Этому случаю, в частности, соответствуют электронные системы с запаздывающей обратной связью (ЗОС), такие как нелинейный усилитель с кольцевой ЗОС (в СВЧ диапазоне – это известный «шумотрон»), линия передачи, нагруженная нелинейным активным элементом [12] и др. Генераторы этого класса были созданы нами на основе результатов теории линейных колебательных систем с нелинейно отражающими стенками [13, 14]. Еще один класс хаотических систем связан с использованием свойства микроволновых хаотических резонаторов, характеризующихся наличием так называемых неинтегрируемых и несепабельных границ, способных поддерживать широкополосные нерегулярные состояния полей, что дает возможность возбуждения в них широкополосных хаотических автоколебательных режимов [11]. На рис. 3 показано схематическое изображение транзисторных генераторов хаоса с использованием микрополосковых колебательных систем с запаздыванием и хаотическим резонатором. Следует отметить, что хаотические сигналы, генерируемые нелинейными динамическими системами, обладают свойством экспоненциального спада автокорреляционной функции, поэтому хаотические сигналы с полным основанием могут использоваться в шумовой радиолокации, где прием сигналов основан на экспериментальной оценке корреляций между отраженным и опорным сигналами, а разрешение по дальности определяется шириной основного максимума корреляционной функции.

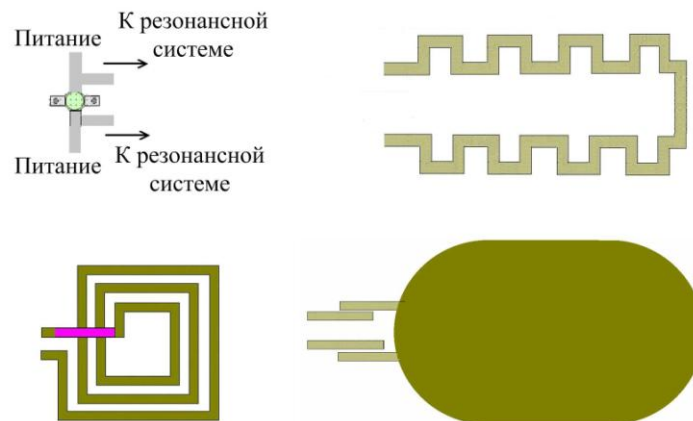


Рис. 3. Схематическое изображение транзисторных генераторов хаоса с запаздывающей обратной связью и хаотической резонансной системой типа «стадион»

**2. Автодинный эффект в автогенераторах хаоса.** В ходе исследований автоколебательных режимов слаборезонансной ЛОВО был обнаружен автодинный эффект в автогенераторах хаоса [15-17]. Автодинный эффект в автогенераторах хаоса существенно отличается от аналогичного эффекта в генераторах монохроматических колебаний. Он заключается в появлении периодической структуры в спектральной плотности мощности выходного сигнала при наличии даже неподвижного отражателя в тракте нагрузки на расстоянии, значительно превышающем длину когерентности генерируемого сигнала. Частотный период этой структуры обратно пропорционален расстоянию до отражателя, что допускает его применение для измерения расстояний. Если же отражатель движется или колеблется, то каждая спектральная компонента выходного сигнала осциллирует с соответствующей доплеровской частотой. В том случае, когда отражатель находится на расстояниях, меньших длины когерентности ШС, автодинные эффекты в генераторах хаотических и монохроматических колебаний качественно аналогичны, в том числе и с точки зрения регистрации доплеровского сигнала от движущихся объектов. Таким образом, автодинный эффект в автогенераторах хаоса позволяет измерять не только скорость объекта, но и расстояние до него. Более того, эти свойства автодинного эффекта в автогенераторах хаоса дают возможность строить доплеровские датчики, регистрирующие движение объекта только в зоне когерентности или только в зоне некогерентности, либо в пределах переходной области между зонами когерентности и некогерентности генерируемого сигнала, что расширяет функциональные возможности таких датчиков.

**3. Широкополосные корреляционные приемники ШС.** Для оптимального приема ШС микроволнового и мм диапазонов, а также измерения корреляционных функций и доплеровских спектров сигналов, отраженных объектами радиолокационного наблюдения, нами было разработано несколько цифро-аналоговых корреляционных приемников. Основным элементом таких приемников является программируемая (перестраиваемая) линия задержки (ПЛЗ). Были разработаны и созданы ПЛЗ как в диапазоне промежуточных частот, так и на несущей частоте мм диапазона [18-19].

В настоящее время задача построения корреляционного цифрового приемника в диапазоне промежуточных частот 1-1000 МГц значительно упрощается, так как достаточно быстрые аналого-цифровые преобразователи (АЦП) широкополосных сигналов (с тактовой частотой до 2 ГГц и выше) хоть и дороги, но все же коммерчески доступны. Однако 15 лет назад АЦП даже с

частотой 50-100 МГц были недоступны, об их существовании можно было узнать только по ссылкам в зарубежных публикациях. Поэтому мои предложения специалистам ИРЭ в области радиолокации построить шумовой радар мм диапазона, используя наш автогенератор хаоса, не нашли поддержки из-за непреодолимых в то время технических трудностей создания ПЛЗ и эффективных передатчиков ШС.

Как мы показали, требования, предъявляемые к ПЛЗ радиолокационных приемников, можно было удовлетворить в диапазоне частот 1-500 МГц, даже не имея в распоряжении быстродействующие АЦП. Один из наиболее перспективных путей создания корреляционного приемника в этом диапазоне состоит в следующем [18-19]. Реализация случайного сигнала в опорном канале заменяется его бинарной копией (так называемое клиппирование сигнала), которая сохраняет информацию о знаке и временах смены знака мгновенной амплитуды зондирующего сигнала. Из теории спектрально-корреляционного анализа случайных процессов следует, что функция кросс-корреляции  $R(\tau, \tau_0)$  между исходными сигналами и функция кросс-корреляции между принятым и клиппированным сигналами  $\hat{R}(\tau, \tau_0)$  прямо пропорциональны друг другу [19]

$$\hat{R}(\tau, \tau_0) = \frac{2}{\pi} R(\tau, \tau_0),$$

где  $\tau$  и  $\tau_0$  – времена задержки опорного и зондирующего сигналов.

Видно, что во втором случае коэффициент корреляции уменьшается примерно на 2 дБ. Это свойство положено в основу разработки корреляторов релейного типа [20], в которых перемножается бинарная копия опорного сигнала и аналоговый отраженный сигнал. Такой подход существенно упрощает аппаратную реализацию ПЛЗ – основного узла корреляционного приемника. Эта идея легла в основу разработки широкополосных цифро-аналоговых корреляционных приемников с полосой обрабатываемого сигнала до 250 МГц, в которых используются цифровые линии задержки для бинарных сигналов и аналоговые перемножители и интеграторы [18-19].

В рамках предложенного подхода нами созданы цифро-аналоговые корреляционные приемники релейного типа, в которых не применяются дорогостоящие АЦП, а в качестве элементов ПЛЗ используются микросхемы быстродействующей цифровой памяти с произвольным или последовательным доступом. Разработано три типа цифровых ПЛЗ:

- на основе универсальных синхронных 8-разрядных регистров;
- на основе оперативной памяти ЭВМ;

– цифро-аналоговая прецизионная линия задержки на основе мультиплексоров [18-19].

Первая широкополосная ПЛЗ была построена на основе сдвиговых регистров, допускающих тактовую частоту до 500 МГц. Она позволила впервые осуществить когерентный прием широкополосных (200 МГц) ШС, отраженных от объектов, которые расположены на расстояниях  $\approx 100$  - 200 м, и обеспечить обзор по дальности с шагом  $\approx 30$  см в пределах 20 м с одновременной регистрацией доплеровского смещения частоты с заданной дальности. К недостаткам такой линии задержки следует отнести необходимость увеличения количества сдвиговых регистров с ростом рабочей дальности, а также большую потребляемую мощность, габариты, невысокую степень интеграции, а также необходимость принудительного охлаждения. Вместе с тем, изучение возможности разработки ПЛЗ в виде отдельной микросхемы показало, что именно ПЛЗ на сдвиговых регистрах – наиболее подходящий прототип. Следующим шагом в построении цифровых линий задержки стало использование микросхем компьютерной памяти (микросхемы типа RAM). По сравнению с регистровой ПЛЗ линия задержки на основе таких микросхем имеет высокую степень интеграции, что сделало ее конструкцию менее зависимой от рабочей дальности и позволило уменьшить габариты и потребление электроэнергии. Кроме того, такое решение позволяет упростить разработку многоканальных корреляционных приемников, что, в частности, существенно ускоряет время обзора по дальности. На базе такой ПЛЗ построен коррелятор смешанного типа (последовательно-параллельного действия), имеющий девять параллельных каналов: восемь каналов дальности и один доплеровский канал [19]. В описанных выше ПЛЗ минимальное время задержки определяется периодом тактовой частоты, что ограничивает достижимую величину точности измерения дальности. Для улучшения этого параметра была разработана прецизионная линия задержки. Она состоит из коротких (2-3 см) последовательно соединенных отрезков коаксиального кабеля, выходы которых коммутируются с помощью селектора-мультиплексора, управляемого двоичными кодами микроконтроллера. При этом минимальное запаздывание составило величину 25 пс. Применение прецизионной ПЛЗ позволяет создавать корреляторы с повышенной точностью измерения дальности.

Основываясь на приведенных разработках и используя различные типы цифровых интегральных микросхем, мы имеем возможность проектирования различных ПЛЗ с характеристиками, которые способны удовлетворить требованиям, предъявляемым к современным корреляционным приемникам различного назначения.

В частности, они использовались при разработке первых шумовых радаров, описанных в нижеследующих разделах.

**4. Современная цифровая обработка случайных сигналов.** Современный подход к построению корреляционных приемников базируется на применении широкополосных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) в сочетании с реализацией разработанных алгоритмов в стандартных ПК или в Программируемых логических интегральных схемах, в английской терминологии – *Field Programmable Gate Array (FPGA)*. О применении широкополосных АЦП будет рассказано в разделах, посвященных разработанным шумовым радарам. Здесь мы кратко опишем работы по реализации оптимального приема ШС в реальном времени с помощью *FPGA*, а также возможность реализации шумового радара с компьютерным (или программным) формированием и обработкой сигналов.

На рис. 4. схематически показана структурная схема такого радара (без приемопередающих антенн и усилителя мощности и мал шумящего усилителя (МШУ)) на базе *FPGA*.

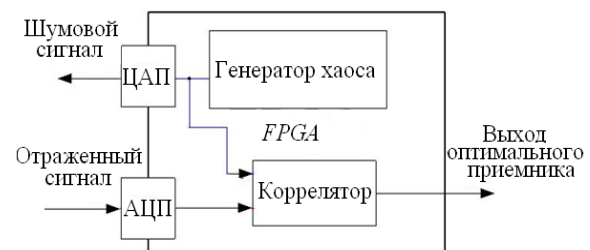


Рис. 4. Структурная схема шумового радара с программным формированием зондирующего сигнала и корреляционным приемом отраженных сигналов

Экспериментальная плата, содержащая *FPGA* фирмы *Altera*, АЦП, цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и другие компоненты, необходимые для реализации шумового радара с программным формированием и обработкой сигналов, показана на рис. 5.

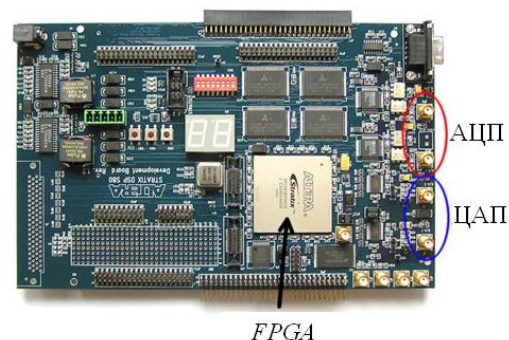


Рис. 5. Экспериментальная плата, содержащая *FPGA* фирмы *Altera*, АЦП, ЦАП и другие необходимые компоненты

К достоинствам современной технологии *FPGA* следует отнести возможность многократной записи алгоритмов, что позволяет быстро и дешево совершенствовать алгоритмы обработки принимаемых сигналов и изменять тип генерируемого сигнала.

Другим важным достоинством современной технологии *FPGA* является реализуемость в ней параллельных вычислений, что недостижимо в компьютерах с последовательным выполнением операций. Таким образом, реализация алгоритмов генерации зондирующего сигнала с последующим его преобразованием в аналоговую форму и излучением с помощью антенн позволяет создавать радиолокаторы с программным формированием и приемом радиосигналов. Этот подход можно реализовать даже без преобразования несущей частоты сигналов в тех диапазонах, где полоса пропускания входных и выходных цепей платы *FPGA* совпадает с рабочим диапазоном разрабатываемого радара. В тех случаях, когда рабочие частоты намного выше, следует применять традиционное аналоговое преобразование частот сигналов в диапазон промежуточных частот.

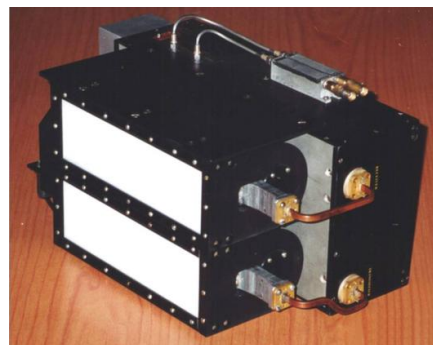
**5. Радиолокационные системы на основе непрерывных ШС.** К настоящему времени наши разработки в области шумовой радиолокации ограничены созданием и испытанием систем сверхближнего и ближнего (до 1 км) действия для различных приложений [5-12, 17-29, 30-33].

В отделе нелинейной динамики электронных систем был разработан ряд исследовательских образцов радиолокационных систем на основе шумовых зондирующих сигналов и их когерентного приема с помощью методов корреляционной и спектральной обработки. Они предназначены для решения таких задач, как предупреждение столкновений автомобильного транспорта, кругового или секторного обзора пространства, получение когерентных изображений различных объектов, дистанционного мониторинга природной среды и крупных инженерных сооружений и др.

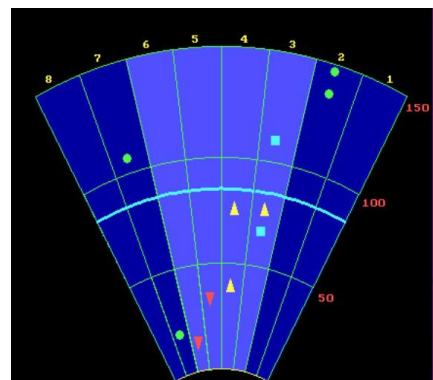
Первый исследовательский образец шумового радара был создан в 8-мм диапазоне длин волн. В нем использовался непрерывный ШС с шириной спектра до 150 МГц и корреляционная обработка отраженных сигналов с помощью разработанного цифро-аналогового коррелятора. Разрешающая способность по дальности составила величину порядка 1 м в диапазоне рабочих расстояний до 100 м. Введение в опорный канал фиксированной линии задержки в виде коаксиального кабеля позволяло смещать зону обзора в сторону больших расстояний. Проведенные испытания показали, что выбранные параметры сигнала и времени корреляции позволяют наблюдать радиолокационную обстановку на дороге в

реальном масштабе времени, различая транспортные средства по виду огибающей регистрируемой корреляционной функции, фиксировать их перемещение и т. п. Более того, разработанный корреляционный приемник, принимая отраженные сигналы с фиксированной дальности, был способен регистрировать очень медленные движения объектов, различать деревья различных видов по характеру доплеровских спектров сигналов, рассеиваемых их листвой, и др. Кроме того, разработанный шумовой радар использовался в рефлектометре 8-мм диапазона для диагностики плотной плазмы. Рефлектометр создан и испытан совместно с коллегами из Харьковского физико-технического института (ХФТИ) [1, 21, 22].

Шумовой радиолокатор непрерывного действия 4-мм диапазона волн для систем предупреждения столкновений автомобильного транспорта [23] был разработан в рамках проекта УНТЦ. В качестве зондирующего сигнала использовался непрерывный ШС с центральной частотой 76,5 ГГц и шириной спектра 180 МГц, а оптимальный прием отраженных сигналов осуществлялся с помощью описанного выше многоканального коррелятора релейного типа [6, 19]. Внешний вид разработанного радиолокатора показан на рис. 6, а.



а)



б)

Рис. 6. Внешний вид шумового радара для системы предупреждения столкновений (а) и отображение информации на дисплее шумового радара секторного обзора (б)

В его состав входят: антенная система, передатчик, корреляционный приемник, синхронизатор, блок сбора, подготовки и ввода данных в компьютер. Антенная система состоит из синхронно сканирующих антенн приемника и передатчика. Передатчик включает в себя генератор шума и канал формирования опорного сигнала. В состав приемника входят двухканальный когерентный конвертор и многоканальный коррелятор. Конвертор состоит из двух смесителей, гетеродина, фазовращателя и двух усилителей промежуточной частоты (УПЧ). В состав коррелятора входят: формирователь бинарного сигнала, цифровая линия задержки, восемь каналов измерения дальности и один канал измерения скорости. Радиолокатор позволяет решать задачи обнаружения участников дорожного движения, измерения дальности до них, их радиальной скорости и ее знака. Алгоритм обработки состоит из двух частей. Первая реализована аппаратно в корреляторе, а вторая – в виде компьютерных программ. Такой подход позволил реализовать обработку данных в реальном масштабе времени. Программная часть предназначена для обработки числовых данных, поступающих с выхода корреляционного приемника, и отображения дорожной обстановки на экране монитора в виде индикатора секторного обзора. Она состоит из трех этапов и позволяет обнаружить движущиеся неподвижные цели в зоне обзора, определить расстояние до каждой из них, а также определить значение скорости и направление движения цели, которая была выбрана для наблюдения. Индикатор секторного обзора представляет собой схему рабочей зоны радиолокатора, разбитую на восемь равных секторов, которые соответствуют восьми пеленгам. Один пеленг обрабатывается в течение 6,25 мс. За это время происходит прием, ввод и обработка радиолокационных данных, а также отображение результатов на экране монитора.

**6. Когерентно-импульсные шумовой радар кругового обзора и РСА.** Первый когерентно-импульсный шумовой радиолокатор кругового обзора был разработан в 3-см диапазоне длин волн и предназначен для обнаружения, наблюдения и измерения дальности, скорости и азимута объектов, находящихся в зоне обзора [24]. Шумовой когерентно-импульсный радар 3-см диапазона, внешний вид которого показан на рис. 7, состоит из антенной системы, передатчика, конвертора, синхронизатора, блока сбора и обработки импульсных ШС и монитора для отображения радиолокационной обстановки.

С помощью передатчика производится формирование зондирующего сигнала с заданными характеристиками. Спектр сигнала формируется путем специальной частотной модуляции колебаний генератора напряжением источника хаотических колебаний. Кроме формирователя ШС передатчик включает канал опорного сигнала, усилитель мощности и электрически управляе-

мые аттенюаторы, обеспечивающие гибкое управление уровнем сигналов.

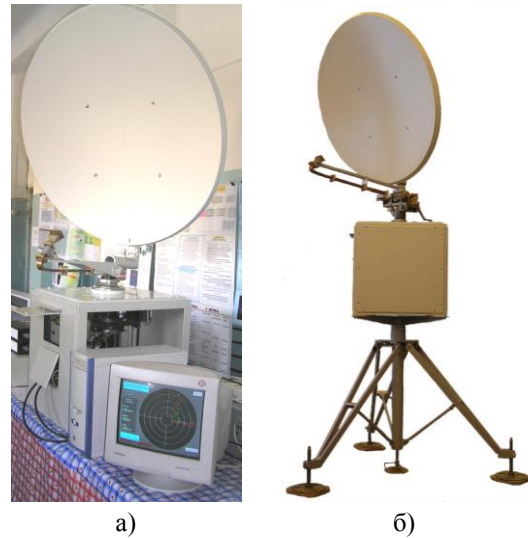


Рис. 7. Внешний вид когерентно-импульсного шумового радара кругового обзора для работы в лабораторных (а) и в полевых (б) условиях

Излучение зондирующих и прием отраженных сигналов осуществляется с помощью приемо-передающей зеркальной параболической антенны. Отраженный и зондирующий сигналы в конверторе преобразуются в диапазон промежуточных частот 10-400 МГц. Выходной сигнал конвертора оцифровывается с помощью АЦП фирмы *GoGe* типа *CompuScope82G-2M* и поступает в компьютер для дальнейшей обработки и отображения на экране монитора наблюдаемой радиолокационной обстановки. АЦП *CompuScope82G-2M* имеет тактовую частоту до 2 ГГц, что позволяет работать с импульсными сигналами, имеющими ширину спектра до 1 ГГц. Однако ввиду ограничения полосы рабочих частот входных усилителей АЦП рабочая полоса радара была не выше 400 МГц. Аппаратная часть радиолокатора управляется с помощью разработанного синхронизатора, выполненного на основе современных микроконтроллеров. Управление радаром осуществляется оператором с клавиатуры компьютера. Анализ отраженных ШС производится с помощью разработанного программного обеспечения, реализующего как когерентную, так и некогерентную обработку. В режиме кругового обзора используется зеркальная антенна с диаграммой направленности шириной 2,5° как по азимуту, так и по углу места. Обработка отраженных ШС и отображение радиолокационной информации на индикаторе кругового обзора производится в компьютере в реальном масштабе времени с периодом обзора 10 или 20 с и когерентным накоплением 10-15 импульсов для каждого пеленга.

На основе когерентно-импульсного шумового радиолокатора кругового обзора 3-см диапазона длин волн создан шумовой РСА, в ко-

тором фазовый центр приемо-передающей антенны движется по дугообразной траектории [24]. Для этого вместо зеркальной параболической антенны установили штангу длиной до 3 м с рупорной антенной на ее конце (рис. 8).



Рис. 8. Внешний РСА на базе когерентно-импульсного шумового радара кругового обзора

Рупорная антенна имеет симметричную диаграмму направленности, ширина которой составляет  $20^\circ$  в обеих взаимно ортогональных плоскостях. Фазовый центр этой антенны движется по дуге радиусом 2 м в секторе с угловым размером  $120^\circ$ . При этом отраженный и зондирующий сигналы в цифровом виде записываются с помощью АЦП *CompuScope82G-2M* на жестком диске компьютера для последующей корреляционной обработки и синтеза апертуры антенны с помощью соответствующего программного обеспечения. В этом режиме радиолокатор работает в условно реальном масштабе времени. Движение приемо-передающей антенны по дуге представляет особый интерес при разработке исследовательских РСА в связи с простотой реализации подобного движения. На рис. 9 показан схематический план территории и ее РСА изображение, полученное с помощью данного РСА

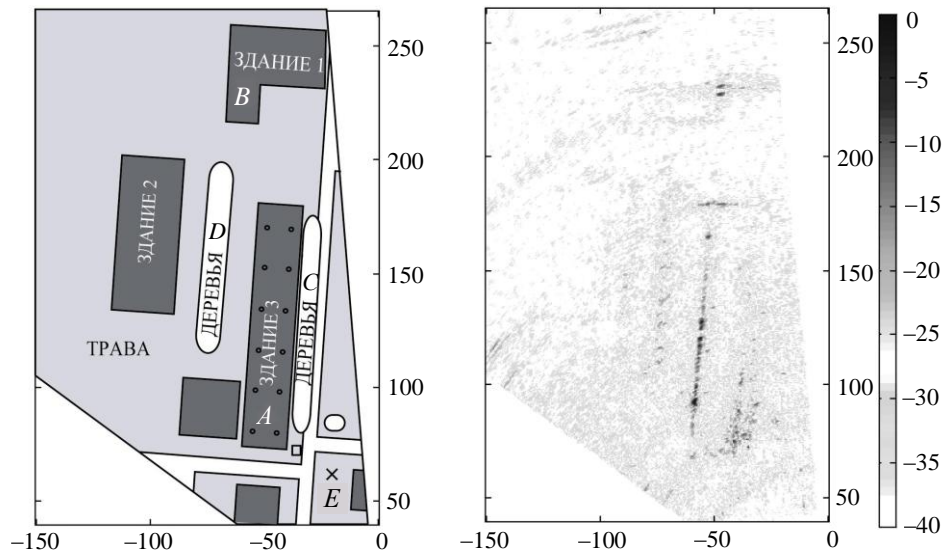


Рис. 9. Сектор обзора РСА с высоты 5-го этажа корпуса ИРЭ с планом расположения крупных объектов (а) и РСА изображение (б), полученное с помощью 3-см шумового РСА с дугообразным движением антенны

**7. Наземный шумовой РСА 8-мм диапазона и дифференциальная интерферометрия.** Дифференциальная РСА интерферометрия (аналог голографической интерферометрии в оптике) заключается в сравнении фазовых распределений двух РСА изображений и позволяет обнаруживать очень малые, визуально незаметные деформации инженерных сооружений, случившиеся в течение определенного промежутка времени. Это достигается с помощью получения РСА изображений наблюдаемого объекта в разные моменты времени с одной и той же позиции и регистрации разности фаз в идентичных участках полученных РСА изображений. Поскольку в разработанных шумовых радарах реализована когерентная обработка отраженных сигналов, построение РСА на

основе шумовых сигналов сомнений не вызывает. Первый РСА с непрерывным шумовым сигналом 3-см диапазона был разработан нами для проведения совместных исследований в Институте космических исследований Европейской комиссии (*JRC EC-Ispra*) г. Испра, Италия, в 1998 г. [25]. Полученные результаты экспериментально подтвердили применимость ШС для получения когерентных изображений. Более того, разработанный передатчик обладает высокой устойчивостью энергетического спектра выходного сигнала к дестабилизирующим факторам благодаря применению на выходе генератора шума (термостабильного) эталонного пассивного фильтра с требуемой полосой пропускания. Это свойство шумового радара, а также примененная корреляци-



онная обработка, предполагающая запоминание излучаемого сигнала, обеспечили очень высокую долговременную стабильность и повторяемость выходных характеристик шумового радара. Эти качества дали возможность успешного использования шумовой РСА в дифференциальной интерферометрии. Проведенные эксперименты показали, что одним из перспективных применений шумового РСА может быть дистанционный мониторинг состояния инженерных сооружений, основанный на дифференциальной РСА интерферометрии. К таким инженерным сооружениям следует отнести здания, мосты, плотины, телевизионные вышки, разнообразные металлоконструкции и другие объекты сложной формы, имеющие участки зеркального отражения: края, ребра, угловые конструкции и участки более сложной топологии. При этом размеры участков локального отражения значительно превышают длину волны зондирующего сигнала. Преимущество применения РСА по сравнению с аналогичными лазерными системами заключается в том, что требуемая высокая точность фазовых измерений сочетается с достаточно большой степенью усреднения в пределах ячейки разрешения (дальность – азимут), что позволяет решать задачу обнаружения малых отклонений, обрабатывая несравненно меньший поток данных, игнорируя несущественные изменения поверхности зондируемого объекта. Кроме того, обеспечение фазовой и частотной стабильности лазеров часто представляет собой более сложную задачу по сравнению с обеспечением

стабильности приемопередатчиков радаров мм диапазона.

Шумовой наземный РСА 8-мм диапазона был разработан в рамках проекта УНТЦ для обеспечения дистанционного мониторинга состояния конструкции саркофага Чернобыльской АЭС и других инженерных сооружений [26-28]. Схема мониторинга саркофага условно показана на рис. 10.

В состав 8-мм шумового РСА, показанного на рис. 11, входят: приемопередатчик, антенная система, система управления режимами работы, система сбора и обработки отраженных сигналов, а также система генерации и отображения полученных РСА изображений.



Рис. 10. Схематическое изображение дистанционного мониторинга саркофага Чернобыльской АЭС с помощью наземного шумового РСА

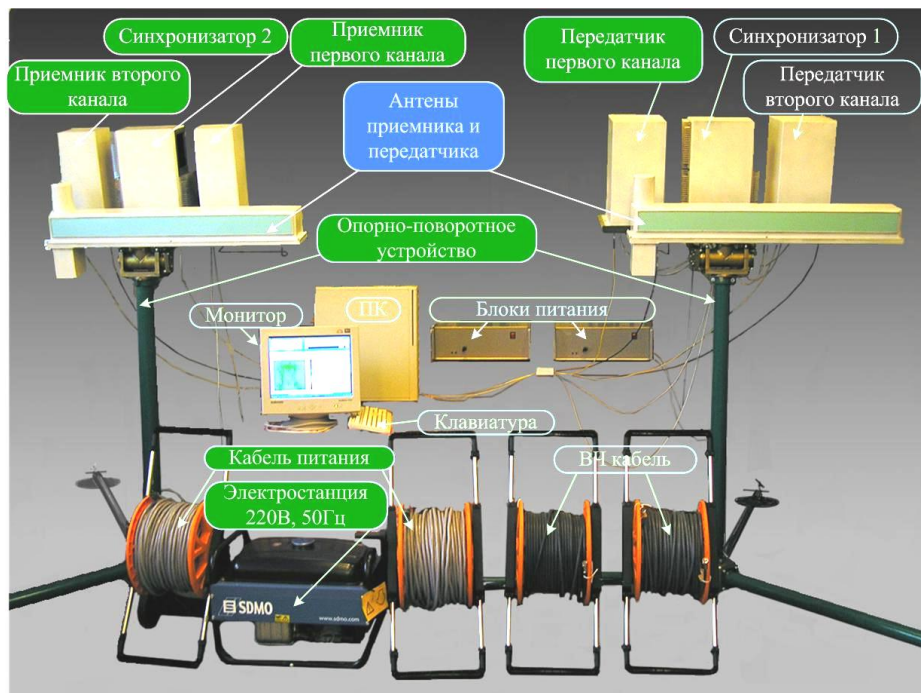


Рис. 11. Наземный многопозиционный шумовой РСА 8-мм диапазона

В разработанном РСА используется когерентный приемо-передающий тракт и движение фазового центра приемо-передающей антенны вдоль стабильно повторяющейся траектории, что позволяет регистрировать амплитудно-фазовое распределение отраженных сигналов с азимутальным разрешением, определяемым длиной траектории. Для обеспечения движения фазового центра излучателя наземной РСА были предложены и разработаны антенны нового типа – сканирующие антенны с синтезированием апертуры [30, 35-37]. При этом когерентность обработки ШС обеспечивается запоминанием зондирующих сигналов и осуществлением взаимно корреляционной обработки с отраженными сигналами. Для этого приемник непрерывных шумовых РСА строится по двухканальной схеме. Он состоит из опорного канала и канала приема отраженных сигналов. Основная обработка отраженных сигналов происходит в компьютере на уровне программного обеспечения. Это позволяет применить очень сложные и гибкие алгоритмы обработки принятых сигналов. Основные характеристики шумового РСА представлены в таблице.

Основные характеристики шумового наземного РСА 8-мм диапазона

№ п/п	Параметры	Значения
1.	Диапазон частот	36 ÷ 37 ГГц
2.	Полоса ШС	500 МГц
3.	Размер синтезированной апертуры	0,7 м
4.	Обзор по азимуту	80°
5.	Обзор по углу места	20°
6.	Разрешение по дальности	0,3 м
7.	Разрешение по азимуту на дистанции 50 м	0,5 м
8.	Точность измерения смещений	0,1 мм
9.	Время одного скана	–20 с
10.	Рабочий диапазон расстояний	3 ÷ 100 м

Не останавливаясь более детально на описании состава и функций разработанной шумовой РСА, отметим, что в ней заложены потенциальные возможности работы в разнообразных режимах:

- импульсный и непрерывный;
- режим с удвоением рабочей полосы частот благодаря переключению центральных частот передатчика и гетеродина;
- режим моностатической и бистатической РСА.

Для управления взаимодействием составных частей РСА разработан синхронизатор, построенный на основе микроконтроллеров, который позволяет гибко изменять конфигурацию РСА, обеспечивая любое сочетание указанных выше режимов. Достоинством импульсного ре-

жима является возможность использования одного и того же приемника для записи как зондирующих, так и отраженных сигналов, благодаря чему вносимые амплитудно- и фазочастотные искажения будут идентичны для обоих сигналов, что значительно упрощает их обработку. В системе реализована синхронизация всех ее узлов, использован термостабилизированный кварцевый генератор в качестве гетеродина, что обеспечивает полную когерентность РСА во всех режимах. Минимальный размер ячейки разрешения составляет 30×30 см на расстояниях порядка 50 м при секторе обзора 80° (азимут) на 20° (угол места). Потенциальная точность измерения дальности – 10 см, а потенциальная погрешность измерения смещений отражателей – 0,1 мм, время полного обзора – 30 с.

Разработанный шумовой РСА позволяет проводить разнообразные эксперименты в области ближней радиолокации, получать РСА изображения в 8-мм диапазоне длин волн с высоким разрешением, обрабатывать методы дифференциальной интерферометрии и прецизионного мониторинга состояния инженерных сооружений, а также проводить сравнение радаров, использующих зондирующие сигналы разных типов и др. Первые испытания шумовой РСА были проведены в лабораторных условиях. Полученные результаты подробно изложены в работах [26-28]. Здесь отметим два важных результата:

- шумовой РСА позволяет получать когерентные изображения внутри помещений в условиях множественных отражений зондирующего сигнала;
- инструментальная погрешность измерения смещений рассеивающих объектов составляет величину не хуже 0,1 мм для измерений внутри помещений и 0,05 мм на открытых площадках.

Разработанный наземный РСА использовался для проведения краткосрочного мониторинга колокольни Софиевского собора в г. Киеве [29]. Фотография этого здания и РСА на переднем плане приведена на рис. 12.

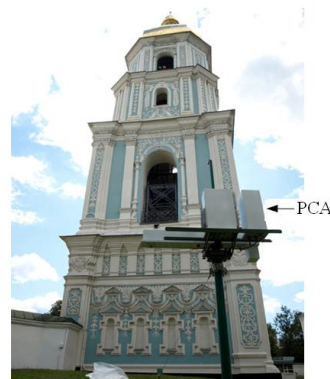


Рис. 12. Колокольня Софиевского собора в г. Киев и шумовой РСА 8-мм диапазона

Высота колокольни – 75 м от поверхности земли. РСА был установлен на поверхности земли на расстоянии 22 м от стены колокольни. Передающая и приемная антенны РСА были направлены вверх под углом  $54^\circ$  относительно линии горизонта. Измерения проводились в течение 20 ч с интервалом 0,5 и 1 ч в зависимости от времени суток. Результаты измерений были записаны на жесткий диск компьютера и обработаны с помощью соответствующего алгоритма для получения РСА изображений.

Пример РСА-изображения колокольни, полученного в ночное время, приведен на рис. 13, а. На рис. 13, б показано РСА изображение после восхода солнца. На рисунках отчетливо видно здание колокольни и такие характерные ее части, как козырьки, окна с металлическими решетками, купол и крест. Метод дифференциальной интерферометрии позволяет проводить сравнение фаз между РСА изображениями, полученными в разные моменты времени. Это дает возможность обнаруживать небольшие смещения частей объекта относительно друг друга.

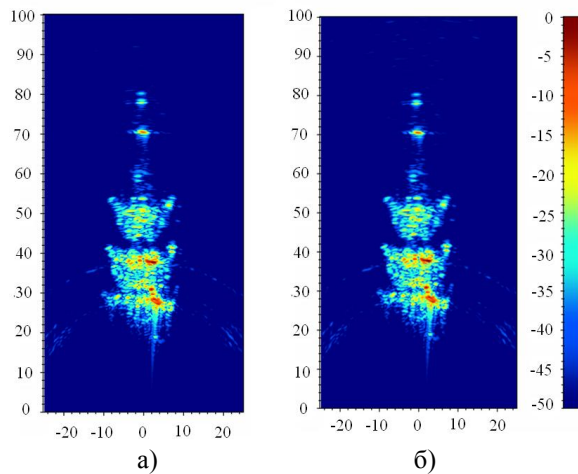


Рис. 13. РСА изображения колокольни Софиевского собора, полученные в ночное (а) и утреннее (б) время

На рис. 14. показаны РСА интерферограммы колокольни для ночных измерений (а) и во время восхода солнца (б).

На интерферограммах светло-серым цветом обозначена область с отношением сигнал/шум ниже  $-45$  дБ. Темно-серым цветом отмечены области со сдвигом фазы, близким к нулю, что соответствует отсутствию смещений облучаемой поверхности за время между этими измерениями. Видно, что в первом случае смещения наблюдаемого объекта не зарегистрированы, в то время как в период восхода солнца зарегистрированы изменения разности фаз в области интерферограммы, соответствующей восточной части колокольни, что, очевидно, вызвано смещением

деталей колокольни за счет их нагрева в солнечных лучах.

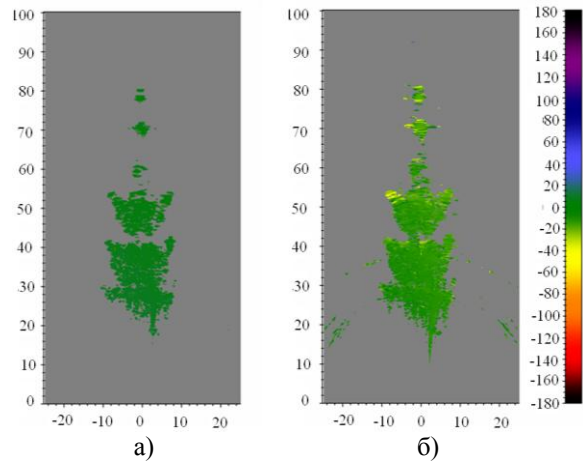


Рис. 14. Интерферограммы РСА изображений колокольни Софиевского собора, полученные в ночное (а) и утреннее (б) время

Для анализа погрешности измерений применялись гистограммы разности фаз сравниваемых изображений. По ширине пика такой гистограммы можно судить о статистике отклонений фазы между двумя измерениями. Ночные измерения показали достаточно высокую стабильность колокольни: при постоянной температуре и в отсутствие ветра отклонения от среднего значения составило величину порядка  $0,05$  мм, что соответствует аппаратной погрешности. Отклонение фазы при измерениях в дневное время соответствовало смещению на величину порядка  $1$  мм, что, скорее всего, связано с постоянным прогревом деталей колокольни под действием солнечных лучей и появлением восходящих потоков воздуха. Таким образом, была подтверждена возможность получения изображений и интерферограмм конструкций с помощью разработанной аппаратуры в реальных условиях. Результаты измерений показали очень высокую стабильность и воспроизводимость измерений благодаря как соответствующему качеству оборудования, так и методу обработки сигналов, который использовался в шумовом РСА. Достигнута очень высокая (характерная для интерферометрических методов) чувствительность к малым радиальным смещениям и структурным изменениям наблюдаемого объекта и точность их измерений.

**8. Сканирующие антенны с синтезированием апертуры.** Неотъемлемой частью разработанного наземного шумового РСА являются сканирующие антенны с синтезированием апертуры [29, 34, 35]. Как известно, разработка быстродействующих сканирующих антенн с широким сектором обзора и большим количеством положений луча представляет собой трудную научно-

техническую задачу, которая решена с помощью предложенных в работах [29, 34, 35] антенн нового типа – сканирующих антенн с синтезированием апертуры. Основная идея этого подхода предложена мною и состоит в сочетании применения концепции синтеза апертуры с реализацией перемещения излучающей щели (или другого элементарного излучателя) вдоль неподвижной реальной апертуры. Оказалось, что этот подход позволяет разработать антенны с эквивалентным сканированием луча по азимуту с числом положений, недостижимым при использовании традиционных методов. Предложенная в работах [29, 34, 35] спирально-щелевая антенна синтезированной апертуры представляет собой одно из возможных технических решений, реализующих данный принцип. Эта антенна образована двумя полыми коаксиальными цилиндрами. Внешний цилиндр имеет продольную щель, параллельную оси цилиндра, в то время как другой содержит волновод спиральной формы, в узкой стенке которого имеется последовательность полуволновых щелей, должным образом ориентированных относительно щели внешнего цилиндра. Полуволновые щели используются в качестве элементарной приемо-передающей антенны. При вращении внутреннего цилиндра происходит перемещение точки пересечения спирального волновода с продольной щелью внешнего цилиндра, что дает перемещение полуволновых щелей вдоль нее. Обеспечивая экранирование излучения остальных полуволновых щелей, мы реализуем линейное движение приемо-передающей антенны, необходимое для синтеза апертуры.

Другой вариант реализации нового принципа предложен в волноводно-ленточном сканере (*Tape Scanner*). Излучение – прием электромагнитных волн осуществляется резонансной щелью в металлической ленте, экранирующей продольную щель, сделанную в широкой стенке волновода. Перемещение ленты, а тем самым и щели вдоль волновода происходит за счет вращения ведущего шкива. Таким образом, приемником на входе антенны могут быть зарегистрированы амплитуда и фаза микроволнового поля в любой точке вдоль направления волновода связи. Дроссельные канавки вдоль волновода предотвращают паразитное излучение из антенны, а короткозамыкающий поршень повышает эффективность излучения из щели. В системах ближнего радиовидения часто требуются антенны с максимально широкой диаграммой направленности (ДН) в азимутальной плоскости. По этой причине щель в ленте ориентирована перпендикулярно направлению движения. Уникальное свойство данной антенны заключается в том, что она обеспечивает рекордно широкие значения сектора обзора в азимутальной плоскости:  $140^\circ$ . Такие значения

сектора обзора не могут быть обеспечены другими видами сканирующих антенн. По сравнению со спиральным сканером данная антенна обладает большей широкополосностью и не требует применения вращающегося сочленения для приема/излучения микроволновой энергии. В дальнейшем нами был предложен и *2D Tape Scanner*, позволяющий несколько расширить сектор обзора в азимутальной плоскости и обеспечить дискретное сканирование луча в угломестной плоскости [30].

Предложенные решения можно рассматривать как технические реализации сканирующих антенн нового класса, обеспечивающих поворот луча приемной антенны с помощью метода синтеза апертуры в когерентном радаре, но при неподвижной антенне как целого. В таких антеннах пространственно-временное перемещение приемо-передающей антенны вдоль апертуры может быть либо реальным, либо виртуальным. В свою очередь, виртуальное перемещение элементов линейной антенной решетки осуществляется с помощью либо электромеханических, либо электронных коммутирующих устройств [29, 34, 35]. Одним из перспективных применений таких антенн могут быть радары обзора летного поля современных аэропортов [30, 31].

**9. Спектральная интерферометрия стационарных случайных сигналов.** Понятие когерентности волн является одним из центральных понятий многих областей современной физики и техники, таких как оптика и лазеры, электродинамика и радиофизика, квантовая/волновая механика и акустика и др. Традиционно когерентность определяется как сохранение во времени фазовых соотношений двух и более гармонических (квазигармонических) процессов с близкими средними частотами; ее проявление изучается через регистрацию интенсивности суммарного процесса. Нами ведутся работы по обобщению этого фундаментального понятия на случай интерференции стационарных случайных процессов в спектральной области (спектральной интерферометрии [16, 18, 32, 33, 38]).

В рамках этих исследований наиболее заметен прогресс в области шумовых измерительных систем на основе спектральной интерферометрии [32, 33, 38]. Принцип работы таких систем основан на явлении интерференции гармонических составляющих зондирующего и отраженного сигналов, которое удобно наблюдать в спектральной области в тех случаях, когда расстояние до отражателя намного превышает длину когерентности ШС. При этом спектр суммарного сигнала приобретает периодическую модуляцию с частотным периодом, обратно пропорциональным удвоенному расстоянию до отражателя, а положение интерференционных максимумов и

минимумов в спектральной области модуляции определяется фазовыми соотношениями между опорным и принятым сигналами. В работах Пуарье предложено измерять расстояние до отражателей, определяя частоту появления интерференционных максимумов с помощью вторичной обработки спектра суммы излучаемого и отраженного сигналов, и указано на принципиальную возможность применения этого подхода в радиолокации. Значительное преимущество этого метода состоит в том, что для измерения расстояний линия задержки не требуется, однако возникают дополнительные трудности (например, необходимость выравнивания уровней опорного и отраженного сигналов), затрудняющие практическое применение спектральной обработки на больших расстояниях. В то же время такая обработка представляется весьма перспективной для прецизионного измерения коротких расстояний. Нами предложена модификация метода двойной спектральной обработки [32, 33, 38], основанная на измерении частотных координат интерференционных максимумов модуляции и позволяющая проводить абсолютные измерения расстояний с прецизионной точностью. В рамках проектов УНТЦ были разработаны абсолютные измерители расстояний, использующие ШС и метод спектральной интерферометрии в 3-см и оптическом диапазонах. Теоретически показана возможность абсолютного измерения расстояний порядка 10 м с помощью такого прибора с погрешностью несколько десятков микрон. К основным недостаткам таких приборов следует отнести высокие требования к стабильности частоты гетеродина и необходимость проведения статистического усреднения по большому числу реализаций. Можно отметить еще одно потенциальное преимущество шумового радара со спектральной обработкой, связанное с возможным решением проблемы паразитного просачивания энергии передатчика в приемник непрерывного шумового радара через его антенны и канал гетеродина. Метод спектральной интерферометрии позволяет использовать сигнал паразитного просачивания в качестве опорного сигнала.

**Выводы.** В работе продемонстрированы возможности развития шумовой радарной технологии и построения на ее основе современных высокоинформативных шумовых радаров различного назначения. Применение ШС и корреляционного приема отраженных сигналов обеспечивают целый ряд преимуществ при их проектировании.

Шумовые/хаотические/случайные сигналы позволяют реализовать одновременно:

- оптимальный прием отраженных сигналов, что обеспечивает максимальные отношения сигнал/шум;

- высокую степень сжатия сигнала, дающее высокое разрешение по дальности;

- отсутствие боковых лепестков функции неопределенности (хотя и с сохранением остаточных флуктуаций);

- независимое управление параметрами разрешения при совместных измерениях дальности и скорости;

- однозначное определение дальности для непрерывных и импульсных сигналов: отсутствие интервала неоднозначности даже для импульсно-периодических шумовых радаров.

Кроме того, шумовые радары обладают наилучшими показателями таких важных характеристик радаров, как помехозащищенность (устойчивость и надежность работы), скрытность (низкая вероятность обнаружения) и электромагнитная совместимость (одновременная работа многих радарных систем в одном и том же месте). Данные преимущества шумовых радаров в сочетании с достижениями современной технологии микроволн и волн мм диапазона (малые размеры, легкий вес антенн и других СВЧ компонент и т. д.) показывают, что шумовая радиолокация является перспективной многообещающей технологией для создания недорогих, портативных, с малым потреблением энергии радиолокационных систем для многих областей гражданского и военного назначения. В настоящее время области разработки шумовых радаров мм диапазона ИРЭ НАНУ занимает лидирующее положение в мире.

В экспериментальных и теоретических исследованиях в области динамического хаоса, широкополосных цифро-аналоговых корреляторов и шумовых радаров в разное время принимали участие сотрудники отдела: А. А. Могила, Ю. А. Александров, П. Л. Выплавин, О. В. Земляной, В. В. Кулик, В. П. Паламарчук, Ю. А. Шиян, Н. К. Заяц, В. Л. Вирченко, В. А. Ракитянский, Н. Коваленко, Р. Коваленко. Всем им автор выражает искреннюю благодарность и надеется на дальнейшее плодотворное сотрудничество. Автор также признателен сотрудникам ИРЭ В. Н. Скресанову, М. П. Натарову, А. И. Шубному и В. Гламаздину за существенный вклад в разработку антенн с синтезированием апертуры и блока микроконтроллера управления радаром, а также О. Нечаеву и президенту фирмы «Лекис» (г. Киев) Б. С. Чернию за разработку и изготовление компонент приемно-передающей аппаратуры шумовых радаров.

1. Van Loon B. Radar 101: Celebrating 101 years of development // Proc. IEEE. – 2005. – 93, No. 4. – P. 844-846.
2. Chernyak V. S., Immoreev I. Ya., Vovshin B. M. Radar in the Soviet Union and Russia: A brief historical outline // IEEE. Aerosp. Electron. Syst. Mag. – 2003. – 18, No. 12. – P. 8-12.
3. Bourret R. A. proposed technique for the improvement of range determination with noise radar // Proc. IRE. – 1957. – 45, No. 12. – P. 1744-1744.
4. Horton B. M. Noise-modulated distance measuring systems // Proc. IRE. – 1959. – 47, No. 5. – P. 821-828.

5. Лукин К. А. Шумовая радарная технология // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 1999. – 4, № 3. – С. 105-111.
6. Lukin K. A. The principles of noise radar technology // Proc. of The First International Workshop on Noise Radar Technology. – (18-20 Sept. 2002, Yalta, Ukraine). – 2002. – 280 p.
7. Lukin K. A. Noise radar technology: the principles and short overview // Proc. of the International Conference on Noise Radar Technology, NRT-2003 / Applied Radio Electronics, Kharkov. – 2005. – 1. – 142 p.
8. Lukin K. A., Rakityansky V. A. Sources of millimeter wave noise oscillations // Proc. Int. Symposium «Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves». – 1995. – 2. – P. 322-324.
9. Rakityansky V. A., Lukin K. A. Excitation of the Chaotic Oscillations in Millimeter BWO // Int. Journal of Infrared and Millimeter waves. – 1995. – 16, No. 6. – P. 1037-1050.
10. Lukin K. A., Kulik V. V., Zemlyaniy O. V. // Proc. NRTW-2002 Application of dynamical chaos for design of random waveform generators, (Yalta, Ukraine. 18-20 September 2007). – 2007. – P. 129-135
11. Lukin K. A., Kulik V. V., Zemlyaniy O. V. Random Waveform Generators for Noise Radar // Applied Radio Electronics. – 2005. – 4, No. 1. – P. 104-110.
12. Земляний О. В., Лукин К. А. Корреляционно-спектральные свойства хаоса в нелинейной динамической системе с запаздыванием и асимметричным нелинейным отображением // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2002. – 7, № 2. – С. 406-414.
13. Лукин К. А., Шестопалов В. П. Рассеяние электромагнитных волн на границе с нелинейным отражением. – Харьков, 1985. – 15 с. – (Препр. / АН УССР. Ин-т радиофизики и электрон.; № 288).
14. Лукин К. А., Майстренко Ю. Л., Шарковский А. Н., Шестопалов В. П. Метод разностных уравнений в резонансной задаче с нелинейным отражением // Докл. АН СССР. – 1989. – 309, № 2. – С. 327-331.
15. Лукин К. А. Теория автоколебаний в приборах дифракционной электроники: Дис. ...докт. физ.-мат. наук. – Харьков, 1987. – 431 с.
16. Ефимов Б. П., Лукин К. А., Ракитянский В. А. О трансформации спектра стохастических колебаний автогенератора под действием отражений // Журн. техн. физики. – 1988. – 58, № 12. – С. 2398-2400.
17. Kulik V. V., Lukin K. A., Rakityansky V. A. Autodyne effect in the Weak-Resonant BWO with chaotic dynamics // Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 1998. – 19, No. 3. – P. 427-440.
18. Mogyla A. A., Lukin K. A., Shyian Yu. A. Relay-Type Noise Correlation Radar for the Measurement of Range and Vector Range Rate // Telecommunications and Radio Engineering. – 2002. – 57, No. 2/3. – P. 175-183.
19. Lukin K. A., Mogyla A. A., Alexandrov Yu. A. Fast Correlator for Coherent Reception of Noise Radar Return in Real Time Scale // Proc. of the First International Workshop on the Noise Radar Technology, NRTW. – 2002. – P. 157-164.
20. Балл Г. А. Аппаратурный корреляционный анализ случайных процессов. – М.: Энергия, 1968. – 160 с.
21. Korostel'ov V. S., Lukin K. A., Pavlichenko O. S. et al. New Approach to Microwave Reflectometry: Correlation Reflectometry Via Stochastic Noise Signals // Proc. of the IAEA Technical Meeting on Microwave Reflectometry for Fusion Plasma. – 1992.
22. Korostel'ov V.S., Lukin K.A., Pavlichenko O.S. et al. Correlation Reflectometry Via Stochastic Noise Signals // Proc. of the Int. Conference on Millimeter Wave and Far-Infrared Technology, Beijing, China. – 1992.
23. Lukin K. A., Mogyla A. A., Alexandrov Y. A., Shiyani Y. A. Noise Radar Sensor for Collision Warning Systems // Applied Radio Electronics. – 2005. – 4, No. 1. – P. 47-53.
24. Лукин К. А., Могыла А. А., Супрун Д. Ю. Моделирование импульсного шумового РСА // Радиотехника. – 2008. – вып. 152. – С. 184-192.
25. Tarchi D., Leva D., Lukin K. A. et al. Short range imaging applications noise radar technology // Proc. 3<sup>rd</sup> European Conference on Synthetic Aperture Radar. – 2000. – P 361-364.
26. Lukin K. A. Ground based noise-waveform-SAR for monitoring of Chernobyl sarcophagus // Proc. Int. Radar Symp., IRS-2005. – P. 655-659.
27. Lukin K. A., Mogyla A. A. Noise waveform SAR and differential interferometry for detection of structural changes in Chernobyl sarcophagus // Proc. EUSAR 2006, 6th European Conf. Synthetic Aperture Radar. – 2006.
28. Lukin K. A., Mogyla A. A., Palamarchuk V. P., Vyplavin P. L. et al. Ka-band bistatic ground-based noise waveform SAR for short-range applications // IET Radar, Sonar and Navigation. – 2008. – 2, No. 4. – P. 233-243.
29. Lukin K. A. A Novel Approach to Scanning Antenna Design // Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques, ICATT. – 2003. – 2. – P. 290-293
30. Lukin K. A. Synthetic Aperture Scanning Antennas // Proc. 5<sup>th</sup> European Conference on Synthetic Aperture Radar, EUSAR2004 (May 25-27, Ulm, Germany). – 2004. – 2. – P. 679-672.
31. Lukin K. A. Sliding Antennas for Synthetic Aperture Radar // Applied Radio Electronics. Special Issue on Noise Radar Technology. – 2005. – 4, No.1. – P. 103-106.
32. Glamazdin V. V., Lukin K. A., Moreira J., Scresanov V. N. 2D Tape Scanner Antenna for Microwave Holography // Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques, ICATT'05. – 2005. – 2. – P. 250-253.
33. Lukin K. A., Mogyla A. A., Palamarchuk V. P. et al. Measurement of Shifts in Bell Tower of Sophia Cathedral Using Ka-band Noise Waveform SAR // Proc. of MRRS. – 2008. – P. 134-137.
34. Lukin K. A. Capability of Noise Radar Technology in Design for Airport Surveillance Sensors // Proc. of JISSA. – 2001. – P. 22-32.
35. Lukin K. A., Mogyla A. A., Galati G., Pavan G. Novel Concepts for Surface Movement Radar Design // Proc. of Tyrrhenian International Workshop ESAV. – 2008. – P. 120-125.
36. Кулик В. В., Лукин К. А. и Ракитянский В. А. Модификация метода двойной спектральной обработки шумовых сигналов // Укр. метролог. журн. – 1997. – 4. – С. 28-32.
37. Mogyla A. A., Lukin K. A., Kulyk V. V. Statistical Errors of Ranging in the Spectral Interferometry Technique // Telecommunications and Radio Engineering. – 2001. – 55. – P. 10-11.
38. Lukin K. A., Kulyk V. V., Mogyla A. A. Spectral Interferometry Method and Autodyne (self-mixing). Effect for Noise Radar Applications // Proc. the first Int. Workshop on the Noise Radar Technology, NRTW. – 2002. – P. 179-186.

## MILLIMETER RANGE NOISE RADAR

K. A. Lukin

Main results of research and development on noise radar technology carried out in the Laboratory for Nonlinear Dynamics of Electron Systems are briefly described. Millimeter wave generators of chaos used in the noise radar transmitters and fast correlation receivers are described. Various noise radars are briefly described, such as: car collision warning radar, pulse-coherent noise radar, ground based noise waveform (GB NW) SAR, etc. High resolution SAR images have been obtained and high accuracy and stability of detection of small shifts in the surface of monitored objects. Applicability of GB NW SAR to monitoring of large buildings aiming detection of structural changes has been approved.

**Key words:** dynamical chaos, noise radar technology monitoring.

## ШУМОВА РАДІОЛОКАЦІЯ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

К. О. Лукін

Стисло викладено результати досліджень і розробок в області шумової радарної технології, виконаних у відділі нелінійної динаміки електронних систем. Описано генератори хаотичних сигналів мм діапазону, що використовуються у передавачах шумових радарів і широкосмугових кореляційних приймачах, а також шумові радарні системи різного призна-

чення: радар попередження зіткнень, шумовий когерентно-імпульсний радар, наземний шумовий радар із синтезом апертури (РСА) та ін. Одержано когерентні РСА зображення з високим розрізненням, досягнута висока точність і стабільність вимірювання малих зміщень на поверхні опромінюваних об'єктів. Показано можливість моніторингу великих будівель з метою реєстрації їх структурних змін.

**Ключові слова:** динамічний хаос, шумова радіолокація, моніторинг.

*Рукопись поступила 12 октября 2008 г.*