

Пассивные локационные системы. Перспективы и решения

Е.М. Ильин, А.Э. Климов, Н.С. Пашин,
А.И. Полубехин, А.Г. Черевко, В.Н. Шумский

В обзоре рассмотрены базовые концепции построения современных радиолокационных комплексов. Акцент сделан на конфигурацию и структуру пассивных и пассивно-активных устройств в коротковолновой области. Описаны конкретные варианты пассивных радиолокаторов, технические характеристики которых опубликованы в открытых источниках. Сформулированы основные направления предположительного развития данного класса устройств.

Ключевые слова: пассивная локация, миллиметровый диапазон длин волн, обработка радиолокационных сигналов, пассивно-активный радиолокатор.

1. Введение

В работах [1, 2] постулируется, что в последние годы, благодаря значительному прогрессу в области коммуникации, современные радиолокационные станции (РЛС) стали оснащаться новыми полупроводниковыми приборами и технологиями обработки сигналов, однако базовые концепции системного уровня, заложенные в основу радиолокации, до сих пор остаются практически неизменными. Как правило, РЛС:

- излучает идентичный сигнал всю свою «жизнь»;
- излучает в каждый момент времени только на одной частоте;
- «видит» в каждый момент времени только небольшую площадь пространства;
- механически сканирует область пространства.

Предполагается, что перечисленные выше ограничения в базовых концепциях, наряду с некоторыми другими неполноценностями современных радаров, должны быть преодолены в ближайшие десять лет. При этом отмечено, что потенциальные стратегии для будущих концепций радиолокационных систем должны будут включать:

- интеллектуальное кодирование сигнала, например, OFDM (orthogonal frequency division multiplexing – с ортогональным частотным разделением каналов), CDMA (code division multiple access – с кодовым разделением множественного доступа), получившее широкое распространение в современных системах связи;
- ММО (Multiple-Input-Multiple-Output) РЛС – метод многопозиционной радиолокации;
- цифровое формирование диаграммы направленности для более высокого углового разрешения с широким обзором без применения движущихся механических частей, улучшение технологии обработки принимаемых сигналов;
- формователи изображений – применение эффективных фазированных подсистем, использующих виртуально увеличиваемые размеры массива, с уменьшен-

ными размерами и стоимостью для формирования полного изображения с высокой разрешающей способностью;

- совершенствование и развитие радиотепловой (пассивной) локации, комплексирование активных и пассивных радиотехнических систем [30];
- RadCom (Radar and Communication Systems) – интеграция радиолокационного и информационного каналов в единой аппаратуре, расширяющая возможности обмена оперативной информацией между отдельными станциями.

По-видимому, системы пассивной локации, в которых отсутствует активный облучатель и имеется только система приёмников, связанных друг с другом по определённым условиям, будут приобретать всё более важную роль в современных и перспективных радиолокационных комплексах.

В данной работе рассматриваются особенности построения систем пассивной радиолокации в различных частотных диапазонах.

2. Системы пассивной локации

2.1. Методы пассивной локации

Под пассивной локацией подразумевается идентификация объектов, основанная главным образом на приёме их собственного или отражённого излучения при отсутствии излучения зондирующего сигнала. Это повышает скрытность работы пассивных локационных станций, существенно затрудняет их обнаружение и создание помех. Одним из главных преимуществ пассивной локации является возможность обнаруживать даже такие трудно замечаемые цели, как самолеты, оборудованные средствами противорадарной маскировки Stealth и сильно защищённые от радиолокационного обнаружения поглощающими покрытиями. К достоинствам средств пассивной радиолокации относятся:

- малое энергопотребление аппаратуры;
- малые габариты;
- относительная простота аппаратуры по сравнению с активными РЛС.

Пассивные РЛС используются для обнаружения и определения координат воздушно-космических объектов. Источниками излучения могут быть как собственные электромагнитные поля воздушных объектов, так и сторонние радиоволны, отражённые от них. Принято различать пассивную радиолокацию объектов с искусственным (радиопередатчики различного назначения) и естественным (тепловым) излучением.

Приём пассивной станцией электромагнитного излучения от земной и водной поверхностей уже достаточно давно и широко используется для дистанционного зондирования Земли при помощи космических аппаратов. Применяемые методы основаны на использовании сенсоров, которые размещаются на космических аппаратах и регистрируют электромагнитное излучение в форматах, приспособленных для цифровой обработки, в широком диапазоне электромагнитного спектра. При дистанционном зондировании используются инфракрасный диапазон отражённого излучения, тепловой инфракрасный и радиодиапазон электромагнитного спектра. В табл. 1 кратко перечислены области народного хозяйства, пользующиеся результатами дистанционного зондирования Земли, а в табл. 2 – применяемые для зондирования длины волн и частот.

Таблица 1. Области применения результатов дистанционного зондирования Земли в народном хозяйстве [3]

Агрокультура, лесное хозяйство	Геология	Водные ресурсы	Океанография и морские ресурсы	Окружающая среда
Выделение вегетативных зон: посевные площади, пастбища, лесные участки	Поиск полезных ископаемых, включая нефть и газ	Определение границ и объёмов поверхностных вод	Мониторинг органических морских ресурсов	Мониторинг горнодобывающей деятельности и утилизации отходов
Определение видов посевных площадей	Составление и обновление геологических карт	Определение зон наводнений и паводков	Анализ загрязнения и циркуляции вод	Картографирование и мониторинг загрязнения вод
Определение видов и объёмов лесных участков	Описание региональных структур	Определение границ снежного покрова	Мониторинг береговой линии	Мониторинг загрязнения воздушной среды
Определение качества посевов и биомассы	Схемы линеаментов	Исследование ледниковой активности	Картографирование мелей и опасных участков	Анализ последствий природных катастроф
Определение областей угнетения растительности	Исследование вулканической деятельности	Анализ загрязнения водных ресурсов	Оперативное картографирование ледяного покрова (айсбергов)	Мониторинг воздействия человеческой деятельности на окружающую среду
Определение состояния почв	Поиск признаков минерализации	Мелиорация	Исследование морских волн и приливов	Определение состояния почв
Мониторинг степных и лесных пожаров				

Таблица 2. Рабочие длины волн и частоты, используемые при дистанционном зондировании Земли [4]

Канал	Частота, ГГц	Длина волны, см	Примеры аппаратуры (частота в ГГц)
Ka	26.5 – 40	0.8 – 1.1	SSM/I (37.0)
K	18 – 26.5	1.1 – 1.7	SSJVM (19.35; 22.235)
Ku	12.5 – 18	1.7 – 2.4	Cassini (13.8)
X	8 – 12.5	2.4 – 3.8	X-SAR (9.6)
C	4 – 8	3.8 – 7.5	SIR-C (5.3), ERS-1 (5.25), RADARSAT (5.3)
S	2 – 4	7.5 – 15	Magellan (2.385)
L	1 – 2	15 – 30	Seasat (1.275), SIR-A (1.278), SIR-B (1.282), SIR-C (1.25), JERS-1 (1.275)
P	0.3 – 1	30 – 100	NASA/JPL DC-8 (0.44)

В монографиях [4, 5] достаточно подробно описаны разработанные к настоящему времени методы компьютерной обработки получаемой от космических аппаратов информации для представления её либо визуально в виде карт, графиков и т.д., либо в цифровой форме, которая может быть использована для автоматического распознавания образов.

В отличие от активной локации, пассивная не позволяет получить дальность до интересующего объекта по данным приёма сигналов только одной станции [6 – 8]. Это, несомненно, является существенным недостатком. Для полного вычисления координат объекта необходимо использовать совместные результаты нескольких (более 2) следящих станций, удалённых друг от друга на известное расстояние, и любой из известных способов обработки: триангуляционный, разностно-дальномерный или угломерно-разностно-дальномерный.

Современная станция пассивной локации состоит из высокочувствительного приёмника и антенны с узкой, иглообразной диаграммой направленности, сканирующей в заданном секторе. Разнесённые в пространстве приёмные позиции обеспечивают измерение либо пеленгов на излучающую цель, либо задержек прихода сигналов цели на каждой позиции. И в том и в другом случае измерение на трёх позициях позволяет определить все три пространственные координаты излучающего объекта. Введение в систему избыточности в виде четвёртой измерительной позиции позволяет значительно улучшить селекцию целей в сложной тактической обстановке.

Наиболее простой конфигурация системы разнесённой пассивной локации получается при измерении относительных задержек сигналов. В этом случае можно обойтись всенаправленными антеннами и отказаться от такого привычного понятия, как обзор пространства. Но полностью отказаться от обзора не удаётся. В отличие от активной локации, в пассивной заранее неизвестно, на какой частоте излучает тот или иной объект, поэтому обзор производится в частотной области. Поскольку позиции разнесены в пространстве, сигнал от цели придёт на каждую из них в своё время. В случае импульсного излучения различие времени прихода сигнала на каждую позицию сравнительно просто измеряется по величине задержки от любого заданного момента времени. В случае непрерывного сигнала, например излучения постановщика помех, для измерения задержек необходимо использовать взаимные корреляционные функции излучения, принятого на отдельных позициях.

Если же в пассивной системе используются приёмные антенны с достаточно узкими диаграммами направленности, возможно измерение азимута и угла места излучающего объекта. Для однозначного определения всех трёх координат объекта в этом случае достаточно двух измерений азимута и двух измерений угла места. Такое измерение, в свою очередь, потребует достаточно сложного обзора пространства, реализовать который можно только при электронном управлении диаграммой направленности приёмных антенн. Зато введение пространственного обзора значительно упрощает селекцию целей.

Комплекс пассивной локации обеспечивает полную скрытность работы и, следовательно, высокую выживаемость в боевых условиях. Запеленговать его нельзя, противорадиолокационные ракеты, эффективные при борьбе с традиционными РЛС, здесь неприменимы. Чтобы обречь пассивную локацию на бездействие, необходимо предусмотреть в тактике применения средств воздушного нападения режим радиомолчания. Однако практически это крайне трудно выполнить. Строго говоря, современные самолеты не могут обойтись без излучений. Излучают навигационные приборы, предназначенные для определения местоположения самолета, излучают запросчики и ответчики системы государственного опознавания, системы предупреждения столкновения в воздухе, излучает бортовая аппаратура, излучают двигатели и многие другие компоненты летательных аппаратов. К тому же радиопоглощающее покрытие, выполненное по технологии Stealth, существенно ослабляет экранирующий эффект корпуса, что делает саму эту технологию не столь привлекательной.

Дальнейшим шагом в развитии средств обнаружения станет создание пассивно-активных многопозиционных радиолокационных комплексов. В них основным режимом контроля воздушного пространства будет пассивный прием бортовых излучений, не позволяющий за-

ранее определить положение комплекса. А наряду с пассивным обзором и по его данным будут периодически, возможно на весьма короткое время, включаться один или несколько передатчиков, зондируя зону ответственности. Сами передатчики, скорее всего, будут расположены на мобильных платформах, что не позволит определить их местоположение с точностью, достаточной для их поражения. Поскольку пассивным комплексам безразличен вид излучения, для зондирования и получения отражённого сигнала можно применять очень широкий набор передатчиков, включая передатчики УКВ радиостанций и телевизионных сигналов, передатчики, работающие в режиме мерцания из различных точек пространства и многое другое. Именно такая система обнаружения позволит ПВО успешно бороться с перспективными средствами воздушного нападения.

Экспоненциальный рост цифровых технологий в последнее время, вместе с соответствующим снижением их стоимости, оказывает глубокое влияние на совершенствование радиолокационных систем. Всё большее количество функций, которые ранее реализовывались в аналоговом виде, в настоящее время осуществляется в цифровом формате, что приводит к увеличению производительности и гибкости, к уменьшению размеров и стоимости радиолокаторов. Тенденция развития устройств обработки информации в течение последних десятилетий заключается в постепенном замещении аналоговых методов цифровыми, что схематично изображено на рис. 1 [9].

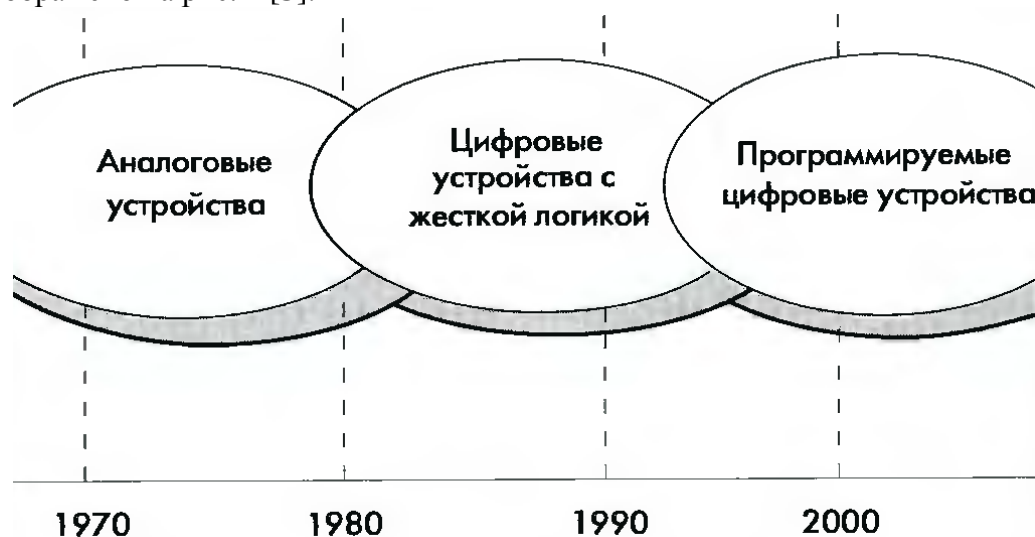


Рис. 1. Тенденция развития устройств обработки информации в РЛС [9]

Замена аналоговых устройств на цифровые, сначала с жёстко запрограммированной логикой работы, а впоследствии и с программируемыми процессорами, обеспечивает несомненные системные преимущества, такие как:

- стабильность характеристик во всём диапазоне условий эксплуатации;
- возможность адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации;
- модернизацию устройства за счёт модификации программного обеспечения без существенных изменений аппаратной части;
- снижение массы, габаритов и, как следствие, существенное повышение надёжности;
- простоту настройки аппаратуры;
- снижение цены по сравнению с аналоговым вариантом за счёт большей технологичности и невысокой цены на комплектующие при массовом производстве.

Достижения в технологиях аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразований существенно трансформируют передний край приёмного тракта РЛС, смещая границу между аналоговой и цифровой обработкой всё ближе и ближе к антеннам.

Развитие цифровой обработки сигналов привело к значительному усовершенствованию алгоритмов радиолокационного сопровождения. Сочетание цифровых методов управления

и антенных решёток с электронным сканированием луча позволило значительно расширить класс излучаемых радиолокационных сигналов. В цикле работ [9 – 11] изложены принципы, которые легли в основу построения систем обработки сигналов в современных РЛС. В подобных станциях устройство обработки сигналов обеспечивает приём и обработку сигналов, отражённых от целей в реальном масштабе времени. Как правило, первичное устройство обработки сигналов располагается после антенного и высокочастотного приёмных устройств (рис. 2), в которых происходит пространственная селекция, усиление сигнала и понижение несущей частоты сигнала до величин, удобных для дальнейшей обработки.

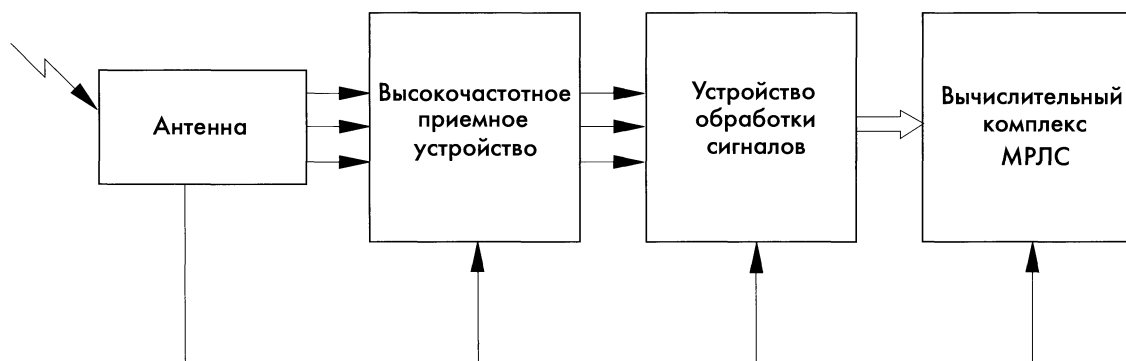


Рис. 2. Блок-схема тракта обработки сигналов [9]

Переход к программируемым цифровым устройствам обработки сигналов принципиально изменяет подходы при разработке и проектировании специализированной аппаратуры цифровой обработки сигналов (ЦОС). Во-первых, существенно возросла роль алгоритмов обработки, которые теперь практически полностью определяют эффективность устройств ЦОС. Это, в частности, позволяет рассчитать характеристики разрабатываемого устройства до проектирования с использованием имитационного моделирования на универсальных ЭВМ. Во-вторых, на передний план выступает программное обеспечение процессоров, которое имеет большой удельный вес затрат в процессе проектирования. В-третьих, архитектура аппаратной части близка к архитектуре универсальной ЭВМ, и за счёт рационального распределения вычислительных ресурсов и объёма памяти её можно оптимизировать, что не исключает возможности в готовой аппаратуре изменять рабочие программы. Все эти свойства позволяют получить гибкую аппаратуру, которая в процессе эксплуатации может быть перестроена под решение различных задач.

Библиотека рабочих программ в каждом конкретном случае может комплектоваться и пополняться современными разработками, к которым относятся:

- фрактальные методы обнаружения объектов [12 – 14];
- взвешивание атомарными гармоническими функциями [15 – 17];
- адаптивное взвешивание [18] для обобщённого алгоритма быстрого преобразования Фурье;
- достижение сверхразрешения РЛС методами рандомизации [19 – 20];
- линейные преобразования ортогональными матрицами [21].

Дальнейшее развитие теории радиолокации и совершенствование программного обеспечения и архитектуры интегральных схем должно привести к качественно новым возможностям локационной аппаратуры.

2.2. Пассивная радиолокация в радиодиапазоне

Концепция пассивного радарного обнаружения с использованием отражённого окружающего радиосигнала, излучаемого удалённым передатчиком, не нова. К этой идее серьёзно обратились уже в 1950-е годы. Первые в истории попытки боевого применения пассивных систем обнаружения сводились к использованию пеленгационных каналов РЛС с последую-

щим объединением информации от различных РЛС на пункте обработки. Метод получил название триангуляции. В 1969 г. в Англии была принята на вооружение однобазовая триангуляционная система с базой порядка 100 км. Двухбазовая триангуляционная система с базой порядка 40 км разрабатывалась в 1970-е гг. в США. Имеются также сообщения о работах такого плана в ФРГ. Однако широкого распространения триангуляционный метод не получил из-за принципиальной невозможности обеспечить точность и разрешение.

Наибольшее внимание привлёк разностно-дальномерный метод, основанный на измерении разности хода сигналов до приёмных позиций. Этот метод позволяет работать как по импульсным, так и по непрерывным сигналам, в том числе по шумовым и шумоподобным. Особенно эффективен он в случаях, когда для вычисления разности хода применяется базово-корреляционная обработка, при которой вид принимаемых сигналов не имеет значения. Принципиальное отличие разностно-дальномерного метода от триангуляции заключается в синхронном приёме сигналов от излучающего источника на разнесённых позициях. Определение координат источника осуществляется по разности прихода сигналов на каждую из позиций, а сама разность прихода сигнала к одной позиции относительно другой определяется из положения максимума взаимно-корреляционной функции сигналов от этих позиций или разности прихода импульса до приёмных пунктов.

Распознавание сигналов, реализованное для простых импульсов, усложняется при попытках работать по более сложным сигналам. И, самое главное, уже установилась тенденция использования в бортовой радиоэлектронной аппаратуре непрерывных и квазинепрерывных сигналов, что обещает сделать метод, базирующийся на измерении задержек прихода импульсов, полностью бесполезным для целей обороны. Потому в военных системах использование импульсного канала будет весьма недолгим, и будущее — целиком за базово-корреляционными методом обнаружения, который не зависит от модуляции принимаемых сигналов и потенциально устойчив к помехам.

Развитие средств вычислительной техники позволило повысить быстродействие корреляторов и многократно снизить стоимость реализации базово-корреляционного метода. Можно ожидать, что рост возможностей вычислительных средств продолжится и впредь. С другой стороны, уже разработаны алгоритмы, позволяющие решить задачу распознавания сигналов по виду корреляционной функции [22, 23]. Базово-корреляционный канал резко усиливает возможности пассивной станции по обнаружению воздушных объектов, применяемых в качестве средств воздушного нападения, и позволяет решать задачи как по контролю воздушного пространства, так и по выдаче целеуказания активным средствам ПВО.

Примеры использования пассивных радаров [24, 25]

Станция пассивной радиотехнической разведки **KRTP-86 «Tamara»** в начале 1989 года была принята на вооружение Чехословацкой народной армии. Станция «Tamara» может использоваться как для ведения стратегической, так и тактической разведки. «Tamara» способна обнаруживать радиолокаторы, излучатели радиолокаторов, передатчики системы «Свой — чужой», навигационные системы TACAN, дальномеры системы DME, системы обмена тактической информацией JTIDS, а также постановщики активных помех, работающие в диапазоне 0.82 — 18 ГГц. Во время испытаний новая система обнаруживала цель типа F-16 на дальности 400 км, CF-18A — 355 км, F-15 — 365. Более старые истребители типа F-4 засекались на отметке 395 км, F-104 — 425 км. Основным вариантом системы был мобильный. Самоходная «Tamara» состоит из 8 единиц техники, размещённых на автомобильном шасси Tatra T-815. В её составе три приёмных устройства RS-AJ/M, одна аппаратная кабина приёмного комплекса RS-KB, аппаратная кабина обработки сигналов RS-KM, а также дополнительно может быть развернут командный модуль ZZP-5 с системами отображения информации.

Дальность обнаружения станцией радиотехнической разведки «Тамара» составляет 450 км и ограничена только радиогоризонтом. Система способна практически в режиме реального времени сопровождать до 72 целей в секторе 100°. Относительно центральной станции. «Тамара» находится в серийном производстве и постоянно модернизируется путём включения в её состав новых подсистем и обновления алгоритмов обработки информации. Обновлённый комплекс получил обозначение KRTP-91, его сектор обзора увеличился до 120°.

Станция пассивной радиотехнической разведки «Vera-E» не отличается от предшественниц. Современные технологии и новая элементная база позволили сократить размеры и вес отдельных элементов, которые повысили мобильность системы. Диапазон частот, в котором станция может обнаруживать излучение воздушных и наземных целей, составляет 1 – 18 ГГц и может быть дополнительно расширен до диапазона от 0.1–1 ГГц до 18–40 ГГц. Станция «Vera-E» может обнаруживать излучение вторичных транспондеров бортовых РЛС и передатчиков системы госопознавания (1090 МГц – 5 МГц), навигационных систем TACAN и дальномеров DME (1025–1150 МГц). Сектор обзора «Vera-E» увеличился до 120°, а по желанию заказчика он может быть круговым. Максимальная дальность обнаружения цели составляет 450 км. Одновременно система «Vera-E» может сопровождать до 200 целей. Темп обновления информации от 1 до 5 сек. Антенный модуль представляет собой цилиндр высотой 2 м, диаметром 0.9 м и весит 300 кг. Двусторонняя микроволновая радиолиния связывает антенный модуль с аппаратным модулем.

Конкурентами чешских станций радиотехнической разведки являются не менее известная украинская РЛС «Кольчуга», за продажами которой внимательно следит правительство США, и российская разработка – комплекс радиотехнической разведки 85B6-A «Вега», которая пока только продвигается на экспортные рынки.

Американская система космического наблюдения. Военно-морской флот США располагает обширной радарной системой, часто называемой «Забор», элементы которой простираются от Сан-Диего (шт. Калифорния) до форта Стюарт (шт. Джорджия). Система разработана для того, чтобы обнаруживать и измерять траектории объектов на орбите Земли. Передатчики излучают чрезвычайно мощный (768 кВт), высокочастотный (216.98 МГц) на непрерывной волне радиосигнал, который передаётся через ряд фазированных антенн, формирующих тонкий «веер» электромагнитной энергии, излучаемой в космос. Когда орбитальный объект проникает через испускаемый луч, сигнал, отражённый объектом, регистрируется многократными, синхронизированными по времени приёмниками. Эта система, как сообщается, является достаточно чувствительной для того, чтобы обнаруживать объект диаметром 10 сантиметров на расстоянии до 27600 километров от поверхности, что приблизительно равняется двум диаметрам Земли. По-видимому, крупные объекты могут быть обнаружены на значительно большем расстоянии.

«Тихая сторожевая» (Silent Sentry) пассивная система наблюдения компании Lockheed Martin. Всепогодная система наблюдения, разработанная, чтобы обнаруживать цели, используя отражённые радиосигналы от коммерческих ЧМ-радиостанций.

Пассивная радарная система отображения ионосферы в Вашингтонском университете. Отдел электротехники Вашингтонского университета применяет систему пассивного ЧМ-радара, чтобы отображать небольшие флуктуации ионосферы Земли. Система использует коммерческие ЧМ-радиосигналы (88 – 108 МГц) как источники, которые отражаются от ионосферы и обнаруживаются приёмниками, удалёнными на несколько сотен миль, на противоположной стороне Каскадных Гор.

Описанные системы обнаружения могут быть использованы по следующим сценариям [25].

Сценарий 1: Использование коммерческого ЧМ-радио и сигналов современных телекоммуникационных систем.

Большое количество мощных коммерческих радиостанций в США предлагают с готовностью доступный источник МЧ-сигнала в радиопередачах (88–108 МГц для радио) для ис-

пользования типичной мультистатической радарной системой. Предпосылки для действия пассивной радарной системы следующие: 1) процессор сигнала имеет доступ к сигналу радиопередачи, который служит эталоном и 2) передатчик «невидим» приёмниками, то есть он находится выше горизонта от приёмников или так или иначе «огражден» от них.

С приёмником, настроенным на операционную частоту любой радиостанции, перехваты системой могут быть отнесены к соседнему пункту отражения либо в атмосфере, либо на поверхности. Сравнение полученного сигнала с оригинальным сигналом радиопередачи предоставит информацию о природе цели. Имея достаточную способность для анализа сигнала, система в состоянии вычислить местоположение цели, её скорость, ускорение и курс полёта и, возможно, оценить её размер. Эта информация должна быть адекватной для того, чтобы отличать различные типы целей.

Сценарий 2: Использование передатчика Системы наблюдения ВМФ США.

Природа передач фазовой сложной антенны, используемой Системой наблюдения ВМФ США для обнаружения и отслеживания орбитальных объектов, делает её идеальной для любительского отслеживания целей в околоземной среде или вне её. Передатчики системы посылают очень мощный (768 кВт), высокочастотный непрерывный волновой сигнал (216.98 МГц), который должен допускать лёгкое обнаружение и высокую разрешающую способность объектов близ трёх передатчиков системы. Учитывая, что система была разработана, чтобы обнаруживать цели приблизительно 10 сантиметров в диаметре на расстоянии до 27600 километров, обнаружение цели, диаметр которой составляет порядка десяти метров, для такого диапазона был бы тривиальным процессом.

Сценарий 3: Адаптация пассивной системы Вашингтонского университета.

Персонал в Вашингтонском университете, г. Сиэтл, разработал рабочую бистатическую радарную систему, которая спонсируется Национальным фондом науки, для исследования и отображения в метровом масштабе Е-слоя ионосферы Земли (90 – 120 км). Система может быть дублирована и приспособлена к тому, чтобы отслеживать объекты в околоземной среде. Система, вероятно, должна быть преобразована в мультистатическую систему с многократными антеннами, чтобы позволять получать трёхмерное отображение. Мощность обрабатываемого сигнала, возможно, придётся значительно увеличить, чтобы позволить обрабатывать в режиме реального времени быстрые перемещения целей. Достаточные ресурсы и технический персонал делают такой проект, по-видимому, выполнимым.

2.3. Миллиметровый и сантиметровый диапазоны

В прошлом веке миллиметровый диапазон длин волн широко использовался в радиоастрономических исследованиях [26], однако уже тогда отмечалась его перспективность для систем радиолокации, навигации и радиосвязи. Пассивная визуализация в диапазоне миллиметровых волн обладает значительными преимуществами по сравнению с аналогичными оптическими и инфракрасными системами. В плохих погодных условиях, таких как туман, снег, дождь, облака, дым и пыль, – миллиметровое излучение ослабляется на несколько порядков меньше, чем видимое или инфракрасное излучение [27]. Кроме того, система миллиметровой визуализации может функционировать как днём, так и ночью.

Вопросы пассивной радиолокации в миллиметровом и сантиметровом диапазонах достаточно подробно рассмотрены в монографиях [7, 8]. В последнее время активно осваивается короткая часть этого диапазона. Однако из-за интенсивного поглощения миллиметровых электромагнитных волн в атмосфере [28] они, как правило, находят применение в области разработок РЛС и систем связи военного назначения с небольшими дальностями действия (до 10 км).

Миллиметровый диапазон радиоволн является наиболее эффективным и для обеспечения высокой разрешающей способности целей в системах радиолокации, и для решения проблемы «тесноты» в эфире в системах связи.

Пассивная радиолокация в данных диапазонах заключается в исследовании собственного теплового излучения земной поверхности, атмосферы и наблюдаемых на их фоне объектов. В этом случае фиксируется мощность радиотеплового излучения, его спектральный состав и вид поляризации.

Основные физические принципы

Собственное радиотепловое излучение возникает в результате следующих эффектов: тепловых, резонансных излучений атомов и молекул ряда веществ, тормозных и магнитотормозных механизмов излучения заряженных частиц. В естественных условиях преобладает СВЧ-излучение, имеющее тепловую природу.

Эталонным источником равновесного излучения является абсолютно чёрное тело (АЧТ) с соответствующими характеристиками распределения частиц по скоростям и интенсивности излучения. Однако в естественных условиях полное термодинамическое равновесие не реализуется, поэтому приходится иметь дело с квазиравновесными состояниями излучения и вещества.

Для описания интенсивности потоков радиотеплового излучения используются следующие физические величины [7]:

- спектральная плотность мощности потока излучения в полосе один герц, измеряемая в янах. $1 \text{ ян} = 10^{-26} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$;
- яркость источника излучения B_f – величина спектральной интенсивности источника излучения с единичной площади, испускаемой в единичном телесном угле;
- спектральная сила излучателя F_f или мощность излучателя в единичном телесном угле в полосе один герц $[\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}]$;
- антенная температура T_a – важнейшая величина, принимаемая радиометром, пропорциональная спектральной плотности излучения, выделяемой на согласованной нагрузке в полосе Δf .

Интенсивность излучения источника может быть описана также радиояркостной температурой и излучательной способностью:

- радиояркостная температура T_y – эквивалентная температура АЧТ с яркостью, равной яркости источника излучения;
- излучательная способность источника X_v – отношение яркости источника к яркости АЧТ при температуре T . Она определяется соотношением

$$X_v = \frac{B_f T}{B_f^{\text{АЧТ}} T}.$$

Тепловое излучение может иметь регулярную или случайную поляризацию. Регулярную поляризацию подразделяют на линейную, эллиптическую или круговую, что следует учитывать при выборе и проектировании приёмной аппаратуры.

Тепловое излучение атмосферы и земных покровов

Термодинамическая температура земной поверхности и атмосферы лежит в диапазоне 150 – 300 К, и, соответственно, максимум излучаемой энергии находится в ИК-диапазоне. Известно, что интенсивность излучения в миллиметровом диапазоне в 10^8 раз меньше, чем интенсивность излучения в инфракрасном. Тем не менее, в настоящее время приёмники миллиметровых волн имеют, по крайней мере, в 10^5 раз более высокую чувствительность по отношению к шуму, в то время как температурный контраст закрывает оставшееся 10^3 . Это делает миллиметровую визуализацию сравнимой по качеству с современными инфракрасными системами [27].

Для того чтобы уверенно различать объекты на фоне подстилающих покровов, должна быть различаема разность «эффективных» температур или яркостной контраст. При этом

учитывается и ослабление на пути распространения (влияние атмосферы и гидрометеоров), и конкретные характеристики приёмного тракта (антенны, усилителя, метода обработки).

Основные области применения таких миллиметровых локаторов можно определить следующим образом [7, 29]:

- дистанционные наблюдения Земли, объектов и сред;
- наземное движение в аэропортах;
- морская навигация в тумане, особенно в таких густонаселенных регионах, как порты;
- сканирование в системах безопасности аэропортов для выявления скрытого оружия, наркотиков и т.д.;
- устройства для предотвращения столкновений в тумане, например для вертолётов с проложенными кабелями и автомобилей при плотном движении;
- пассивная локация.

Обзор по основным характеристикам и реализации элементов существующих сканирующих систем миллиметрового диапазона, а также их сравнение с характеристиками инфракрасных и оптических систем представлен в статье [29].

3. Заключение

В данном обзоре рассмотрены различные аспекты, сопровождающие работу пассивных радиолокационных комплексов в радиочастотном диапазоне, где типичные рабочие частоты расположены в интервале 0.1 – 30 ГГц, и в миллиметровой области спектра. Анализ литературных данных показал, что современные тенденции развития и совершенствования локационного оборудования направлены на создание сложных мультистатических систем, объединяющих станции как активные, так и пассивные. Современное оборудование характеризуется всё увеличивающимся использованием программируемых логических интегральных схем, позволяющих проводить цифровую обработку принимаемой информации по сложным алгоритмам, выполнять электронное управление рабочими характеристиками, такими как диаграммы направленности и сканирование луча, виртуальный размер фазовой антенной решетки и т.п. Переход к более высоким частотам и использование интеллектуального кодирования радиолокационных сигналов, по-видимому, обеспечит не только улучшение характеристик отдельной станции, но и скоростной обмен информацией внутри всего комплекса.

Литература

1. Быстров Р. П., Соколов А. В., Чесноков Ю. С. Методы современной военной радиолокации // Вооружение, политика, конверсия. 2004. № 5. С. 36–40.
2. Wiesbeck W., Sit L. Radar 2020: The Future of Radar Systems. // International Radar conference. 2014 (13-17 October 2014). – Lille, France, 2014. – P. 265-268.
3. Применение данных ДЗЗ [Электронный ресурс] // Магнолия Терра, дистанционное зондирование Земли: [сайт]. [1999-2015]. URL: <http://www.magnolia.com.ru/remotesensing/table/> (дата обращения: 20.02.2015)
4. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
5. Campbell J.B., Wynne R.H. Introduction to remote sensing. New York: The Guilford Press, 2011. 5th ed. 684 p.
6. Рябов Б. Новый облик радиолокации ПВО // Воздуш.-косм. оборона. 2001. № 1. С. 30–32.

7. Быстров Р. П. Пассивная радиолокация: методы обнаружения объектов / Р. П. Быстров, Г. К. Загорин, А. В. Соколов, Л. В. Фёдорова. Монография / под ред. Р. П. Быстрова, А. В. Соколова. М.: Радиотехника, 2008. 320 с.
8. Голунов В. А. Пассивная радиолокация на миллиметровых волнах / В. А. Голунов, Т. К. Загорин, А. Ю. Зражевский [и др.] // Вопросы перспективной радиолокации. Коллективная монография / под ред. А. В. Соколова М.: Радиотехника, 2003. С. 393-463.
9. Бобров Д. Ю. Цифровая обработка сигналов в многофункциональных РЛС, часть 1: Принципы разработки. Преобразование сигнала в цифровую форму / Д. Ю. Бобров, А.П. Доброжанский, Г.В. Зайцев и др. // Цифровая обработка сигналов. 2001. №4. С. 2-11.
10. Бобров Д. Ю. Цифровая обработка сигналов в многофункциональных РЛС, часть 2: Алгоритмы обработки радиолокационных сигналов / Д. Ю. Бобров, А. П. Доброжанский, Г.В. Зайцев и др. // Цифровая обработка сигналов. 2002. №1. С. 28-39.
11. Бобров Д. Ю. Цифровая обработка сигналов в многофункциональных РЛС, часть 3: Программируемый многоканальный процессор / Д. Ю. Бобров, А. П. Доброжанский, Г.В. Зайцев и др. // Цифровая обработка сигналов. 2002. №2. С. 42-50.
12. Соколов, А. В. Вопросы перспективной радиолокации. Коллективная монография / под ред. А. В. Соколова. М.: Радиотехника, 2003. 512 с.
13. Потапов А. А. Фракталы, скейлинг и дробные операторы в физике и радиотехнике // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2009. Т.1. № 1-2. С. 64-108.
14. Потапов А. А. Фракталы, скейлинг и дробные операторы в радиотехнике и электронике: Современное состояние и развитие // Электронный журнал «Журнал радиоэлектроники (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)». 2010. № 1. сайт]. [2010]. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan10/4/text.pdf> (дата обращения: 20.09.2014).
15. Горшков А. С., Кравченко В. Ф., Рвачев В. Л. Атомарные гармонические функции и обобщённый алгоритм БПФ // Доклады Академии Наук. 1994. Т.336. №4. С. 462-465.
16. Кравченко В. Ф., Пустовойт В. И., Чуриков Д. В. Цифровая обработка сигналов на основе обобщённых теорем отсчётов Кравченко-Котельникова-Левитана // Радиотехника и электроника. 2012. Т.57. №9. стр. 1039-1048.
17. Применение семейств атомарных, WA-систем и R-функций в современных проблемах радиофизики. Часть I / В.Ф. Кравченко, О.В.Кравченко, В.И.Пустовойт и др. // Радиотехника и электроника, 2014. Т. 59. № 10. С. 949-978.
18. Одиноченко Н. М., Какаев В. В., Алуев С. В. Использование алгоритмов быстрого преобразования Фурье и адаптивного взвешивания при обработке радиолокационных сигналов // Информационно-управляющие системы. 2011. № 6(55). С. 16-18.
19. Горбунов Ю. Н. Повышение эффективности обработки и формирования сигналов в РЛС с СДЦ методами рандомизации // Электронный журнал «Журнал радиоэлектроники (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)». 2014. № 10. сайт]. [2014]. URL: <http://jre.cplire.ru/win/oct14/6/text.pdf> (дата обращения: 30.09.2014).
20. Горбунов Ю. Н. Цифровая обработка радиолокационных сигналов в условиях использования грубого (малоразрядного) квантования: Монография // Федеральное космическое агентство, ФГУП «ЦНИРТИ им. академика А. И. Берга» М., 2007. 87 с.
21. Климов С. А. Метод повышения разрешающей способности радиолокационных систем при цифровой обработке сигналов // Электронный журнал «Журнал радиоэлектроники (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)». 2013. № 1. сайт]. [2013]. URL: <http://jre.cplire.ru/win/jan13/1/text.pdf> (дата обращения: 30.09.2014).
22. Рогожников Е. В., Ушарова Д. Н., Убайчин А. В. Использование сигналов современных телекоммуникационных систем в пассивных радиолокационных системах // Изв. Том. политехн. ун-та. 2013. Т. 323, № 5. С. 44-49.
23. Применение вариационного метода к задаче оценки параметров сигналов в пассивной радиолокации с посторонним подсветом / Н.Г. Пархоменко, А.А. Перетягко, Я.А. Рейзенкинд и др. // Автометрия. 2014. Т.50. №1. С. 60-65.

24. Аминов С. Чехословацкие станции пассивной электронной разведки [Электронный ресурс] // Вестник ПВО: [сайт]. [2008]. URL: <http://pvo.guns.ru/other/czech/tamara/> (дата обращения: 23.09.2014).
25. Davenport P. B. Using Multistatic Passive Radar for Real-Time Detection of UFO's in the Near-Earth Environment // MUFON 2004 International UFO Symposium Proceedings - Unconventional Flying Objects: The Body of Technological Evidence. 2004. P.1-15.
26. Кисляков А. Г. Радиоастрономические исследования в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн // Успехи физ. наук. 1970. Т. 101. № 4. С. 607-653.
27. Optimized compressive sampling for passive millimeter-wave imaging / L. Spinoulas, J. Qi, A.K. Katsaggelos, et al // Applied Optics. 2012. V. 51, № 26, P. 6335-6342.
28. Suen J. Y., Fang M. T., Lubin P. M. Global Distribution of Water Vapor and Cloud Cover — Sites for High-Performance THz Applications // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2014, Vol. 4, No. 1, P.86-110.
29. Lettington, A. H. Passive millimeter-wave imaging architectures / A. H. Lettington, D. Dunn, M. Attia, I. M Blankson // J. of Optics, Pt. A: Pure and Appl. Optics. 2003. Vol. 5, № 4. P. S103-S110.
30. Булкин В.В. Пассивно-активная радиометеорологическая система с повышенной чувствительностью пассивного канала. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2011. №2. С.25-29.

Статья поступила в редакцию 11.03.2015

Ильин Евгений Михайлович

д.ф.-м.н., профессор, ведущий аналитик инновационного технологического центра комплекса научной политики МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: evgil45@mail.ru

Климов Александр Эдуардович

д.ф.-м.н., заведующий лабораторией ИФП СО РАН имени А.В. Ржанова (630090, Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 13), тел. 8(383) 3-306-631, e-mail: Klimov@isp.nsc.ru

Пашин Николай Сергеевич

к.ф.-м.н., ведущий инженер ИФП СО РАН имени А.В. Ржанова (630090, Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 13), тел. 8(383) 3-306-631, e-mail: paschin@isp.nsc.ru

Полубехин Александр Иванович

к.т.н., руководитель инновационного технологического центра комплекса научной политики МГТУ им. Н.Э. Баумана тел. 89258210631, e-mail: polub1980@mail.ru

Черевко Александр Григорьевич

к.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физики СибГУТИ, зам. гл. редактора «Вестника СибГУТИ» (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. 8(383) 2-698-266, e-mail: cherevko@mail.ru

Шумский Владимир Николаевич

д.ф.-м.н., главный научный сотрудник ИФП СО РАН имени А.В. Ржанова, Лауреат Государственной премии в области науки и техники (630090, Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 13), тел. 8(383) 3-307-883, e-mail: Shumsky@isp.nsc.ru

Passive location systems. Perspectives and solutions

Eugene M. Il'yin, Alexander E. Klimov, Nikolai S. Pashchin, Alexander I. Polubekhin, Alexander G. Cherevko, Vladimir N. Shumskyi

The basic concepts of the modern radar systems construction are considered in this review. Emphasis is placed on the configuration and structure of passive and passive-active devices in the short wavelength region of radio waves. Specific embodiments of passive radars, which specifications are published in the public papers, have been described. The basic directions of the estimated development of this class of devices are formulated.

Keywords: passive location, millimeter waves, radar signal processing, passive-active radar.