

Структура высокоинформативной многофункциональной радиолокационной системы на основе реконфигурируемой цифровой платформы

Е. М. Ильин, А. Н. Кренев, В. Е. Туров, Д. Ю. Вишняков, А. И. Полубехин

Определены задачи построения многофункциональной радиолокационной системы. Рассмотрен вариант ее построения на основе реконфигурируемой цифровой платформы. Показаны возможности реализации нетрадиционных методов локации на базе перспективной многофункциональной радиолокационной системы и обоснован её состав.

Ключевые слова: многофункциональная радиолокационная система, нетрадиционные методы локации, полнополяриметрический режим, шумоподобный сигнал, фрактальная обработка, синтезированная апертура, радиоголография, фоновая локация.

Многофункциональные РЛС занимают важное место среди всех радиотехнических систем (РТС). В зависимости от требований к объему и характеру информации о целях их класс и режимы работы существенно отличаются. К основным функциям обнаружения, измерения координат, распознавания и опознавания целей могут добавляться задачи определения радиальной скорости и ее производных, ожидаемой траектории полета, видимых размеров, особенностей геометрической формы и т.д. [1, 3]. В условиях применения современных средств радиопротиводействия требования к РЛС противоречивы. Они должны иметь высокую производительность, высокую вероятность и большую дальность обнаружения, надежно разрешать и распознавать реальные цели на фоне ложных целей и помех, обеспечивать снижение дальности радиоразведки и высокую защищенность от самонаводящихся противорадиолокационных снарядов (ПРС) и ракет [3, 4].

Возможности РЛС во многом определяются зондирующими сигналами. Радиолокационные сигналы, освоенные к настоящему времени, обеспечивают разные степени информативности и помехозащищенности РЛС.

В зависимости от используемых сигналов РЛС различаются по следующим критериям [5]:

- точность определения дальности и ее производных для одиночной цели;
- разрешающая способность по дальности и скорости, возможность селекции элементов сложной цели и их классификации (расознавания);
- степень скрытности от радиотехнической разведки, защищенности от самонаводящихся ПРС и активных помех;
- технические возможности создания аппаратуры формирования и обработки сигналов, в том числе сигналов, существенно повышающих информационные возможности РЛС, например, короткоимпульсных, длительностью 1–5 нс;
- возможность приема и обработки помеховых сигналов для обнаружения и измерения координат постановщиков помех.

Для достижения оптимальности структуры и параметров современной РЛС по всем указанным критериям необходимо сочетать ряд качеств, порою противоречивых. Снизить

остроту противоречий можно попытаться путем создания системы, состоящей из элементов, сочетающих различные возможности. Такие возможности заложены в нетрадиционных методах радиолокации, к которым можно отнести такие, как метод полнополяризационного широкополосного зондирования, метод зондирования шумоподобными сигналами, метод фрактальной обработки, метод синтезированной апертуры и радиоголографии, метод пассивной локации и ряд других.

При дополнении РЛС режимами, реализующими эти методы, в системе появятся новые свойства, отсутствующие у отдельных элементов, что определяется как закономерность целостности (эмерджентность). Объединенные в систему элементы, как правило, утрачивают часть своих свойств, присущих им вне системы, т.е. система как бы подавляет ряд свойств элементов. С другой стороны, элементы, попав в систему, могут приобрести новые свойства. Бераланфи считал эмерджентность основной системной проблемой [2].

Считаем, что в пространстве существует информационно-логическое поле, проявляющееся в наличие логических связей между находящимися в пространстве объектами. Источником поля является структура материи, окружающей объект, которая сложилась под воздействием структуры самого объекта. Полю присуща информационная функция. В силу принципа адекватности отражения информация является функцией материи. Скорость распространения информации конечна. При оценке информации необходимо учитывать относительную информационную проницаемость среды. Теоретически, источник поля информации (теорема Гаусса [6]) полностью идентифицируем по реакции тех или иных объектов (приемников применительно к РЛС) на излучаемое им поле. Однако приемники, в силу своих различных свойств, на одинаковый поток информации реагируют различно. Совокупность таких приемников, представляющих «элементарные» системы (отдельные каналы и модули РЛС) образуют синтетическую многокачественную систему – многоканальную (МК) либо многопозиционную (МП) РЛС.

В такой системе имеется возможность измерения трех координат и вектора скорости не только радиолокационной цели, но и источников излучения. Это позволяет построить траектории целей как в активном, так и в пассивном режимах. Данное положение относится и к источникам активных помех, когда на фоне их излучений не удастся сопровождать прикрываемые ими цели (в том числе и при самоприкрытии) [4]. Пассивный режим МП РЛС может применяться также и для разведки местоположения РЛС противника. В общем случае система становится активно-пассивной (АП РЛС).

В АП РЛС возрастает объем «сигнальной» информации. Под «сигнальной» (в отличие от координатной) обычно понимают содержащуюся в эхо-сигналах информацию о геометрических, физических и других характеристиках цели, а также характеристиках ее движения вокруг собственного центра масс. Измеряя амплитуду, фазу и поляризацию принятых различными каналами сигналов, можно определять размеры, форму и характеристики собственного вращения цели точнее и за меньшее время [1, 3]. В пространственно-когерентных АП РЛС с достаточно большими размерами апертуры антенной системы можно получать двухмерное и даже трехмерное радиоизображение цели [5]. При отсутствии длительной пространственной когерентности возможно сформировать несколько дальностных портретов целей под разными ракурсами, а также двух- и трехмерные радиоизображения путем измерения разностей фаз эхо-сигналов от разрешенных по доплеровским частотам блестящих точек цели [1].

Для принятия решения о составе системы зафиксируем известные на данный момент компоненты и связи между ними. Затем синтезируем новые компоненты и включим их в исходное множество [6].

Известными компонентами являются: многоканальная РЛС с зондирующими сигналами, обеспечивающими заданные показатели качества работы. Такие сигналы и алгоритмы их обработки хорошо изучены и дают неплохие результаты работы современных РЛС. Однако существует ряд проблем (помехозащищенность, скрытность и т.д.), требующих дальнейшего совершенствования РЛС [7]. Еще одним известным компонентом можем считать пассивный

канал приема внешних излучений, решающий задачу определения координат источников активных помех [1, 3, 4, 5]. Наиболее предпочтительным из структур таких каналов является базово-корреляционный модуль пассивной локации [7].

Связи между элементами системы должны обеспечить их совместное функционирование. Кроме того, при объединении информации от различных элементов системы возможно получение качественно новой информации, такой как координаты и параметры постановщиков помех активным РЛС, радиопортреты целей, траектории движения целей, и, как результат анализа всей обстановки, – тактического замысла противника.

В табл. 1 приведены элементы радиолокационной системы, их основные задачи и возможные результаты.

Таблица 1. Задачи элементов системы

Тип элемента системы	Решаемые задачи			
	<i>Технология</i>	<i>Обработка</i>	<i>Основной результат</i>	<i>Дополнительный результат</i>
<i>Канал с полнополяризационной обработкой и широкополосным зондирующим сигналом</i>	Режим модуляции вектора поляризации	Поляризационно-векторный анализ объектов и поверхности	Обнаружение малозаметных объектов над, на и под поверхностью земли	Оценивание угловых координат и дальности флуктуирующей цели
<i>Канал зондирования шумоподобным сигналом</i>	Режим формирования шумоподобных сигналов	Режим обработки и анализа шумоподобных сигналов	Получение радиолокационных портретов целей	Скрытность работы
<i>Канал фрактальной обработки</i>	Режим формирования банка фракталов	Режим фрактальной обработки и анализа радиолокационной сцены	Построение детальной радиолокационной карты местности	Обнаружение протяженных малозаметных объектов
<i>Режим синтезированной апертуры и радиоголографии</i>	Режим обратного синтеза при обзоре в секторе	Режим САР при размещении РЛС на воздушном носителе	Определение размеров объектов	Определение маневра цели
<i>Пассивный модуль</i>	Режим работы РЛС с выносным пунктом приема сигналов (ВП)	Режим совместной обработки и анализа принятых радиолокационных сигналов РЛС и ВП	Обнаружение целей в пассивном режиме	Скрытность работы

Анализ данной таблицы показывает необходимость использования в радиолокационной системе указанных элементов в виде подсистем для получения высоких показателей качества функционирования всей системы – многофункционального радиолокационного комплекса (МРЛК).

Рассмотрим особенности использования указанных подсистем.

Для обеспечения полнополяризметрического (ПП) режима работы МРЛК необходимы:

- антенная система с излучением и приемом сигналов с различной поляризацией;
- переключатели (коммутаторы) сигналов для антенн с различной поляризацией;
- цифровой модуль управления режимами поляризации приемных и передающих антенн;
- программное обеспечение процессов формирования и обработки сигналов различной поляризации;
- средства отображения информации (экраны индикаторов) по результатам полнополяризметрической обработки.

В ходе работы по воздушным, наземным и подповерхностным целям решаются следующие задачи.

1. Получение поляризационных портретов целей и их различение (распознавание).
2. Поляризационная селекция целей на фоне окружающих объектов и поверхностей и подавление помех.
3. Когерентное накопление поляризованных сигналов, их совместная обработка, обнаружение целей и формирование карты местности.
4. Поляризационно-векторный анализ пространственного распределения поля и различение (распознавание) объектов.
5. Снижение флуктуаций сигналов целей и повышение устойчивости сопровождения (измерения координат) при полнополяризметрическом режиме работы МРЛК.
6. Уточнение размеров, параметров и характера движения целей при сопровождении (измерении координат).

Получение отраженного сигнала при различных поляризациях от пространственно-ориентированных элементов цели обеспечит:

- уменьшение флуктуаций принятых сигналов за счет их усреднения по поляризации;
- увеличение дальности обнаружения за счет ПП накопления сигналов;
- устойчивость сопровождения по дальности, скорости и угловым координатам за счет уменьшения флуктуаций накопленного сигнала;
- повышение информативности РЛ портретов целей за счет ПП-режима;
- повышение помехозащищенности ПП РЛС за счет поляризационной селекции;
- снижение радиотехнической заметности, повышение скрытности и живучести ПП РЛС за счет смены режимов поляризационного зондирования.

Перспективным направлением современной радиолокации является широкополосная локация, которая использует широкополосные зондирующие сигналы и обеспечивает их формирование и обработку. Важной задачей, решаемой с помощью широкополосных сигналов, является задача обнаружения и распознавания протяженных целей. Получение и обработка отраженных сигналов от протяженной цели при различных длительностях и спектрах зондирующих сигналов обеспечит:

- определение размеров и маневров цели за время нескольких периодов зондирования;
- увеличение вероятности обнаружения малоконтрастных затененных объектов за счет фазовой структуры сигналов;
- различение границ объектов за счет анализа амплитудно-фазовой структуры радиолокационной сцены;
- повышение информативности РЛ-портретов целей за счет высокого разрешения по дальности;
- повышение помехозащищенности РЛС за счет использования сложных широкополосных сигналов;
- снижение радиотехнической заметности, повышение скрытности и живучести РЛС за счет смены режимов зондирования.

К направлению «широкополосная локация» можно отнести и режим динамического хаоса МРЛК, для реализации которого используется шумоподобный зондирующий сигнал. Обеспечение этого режима осуществляется благодаря системе трактов формирования и обработки принимаемых сигналов динамического хаоса. Управление режимами формирования и обработки излучаемых и принимаемых сигналов динамического хаоса целесообразно возложить на цифровой модуль, имеющий соответствующее программное обеспечение процессоров. Необходимы также и средства отображения (экраны индикаторов) результатов обработки сигналов динамического хаоса.

Особенности работы по воздушным, наземным и подповерхностным целям в рассматриваемом режиме заключаются в получении высокоинформативных портретов целей и их различение (распознавание) в режиме динамического хаоса за счет высокого разрешения по дальности. Также в режиме динамического хаоса обеспечивается эффективная простран-

ственно-временная селекция целей на фоне окружающих объектов и поверхностей и подавление помех. В таком режиме возможно и когерентное накопление сигналов, их совместная обработка и обнаружение целей с высокими показателями качества. Шумоподобный сигнал большой длительности обеспечивает снижение флуктуаций сигналов целей и повышение устойчивости сопровождения (измерения координат) при работе МРЛК в режиме динамического хаоса с когерентным накоплением. Режим динамического хаоса обеспечивает уточнение размеров, параметров и характера движения целей при сопровождении (измерении координат).

Рассмотренные режимы могут быть дополнены двух-(трех-)диапазонным режимом работы МРЛК. Для обеспечения его работы необходимы:

- антенная система с излучением и приемом сигналов в двух (трех) диапазонах частот;
- переключатели (коммутаторы) сигналов для антенн различных диапазонов частот;
- цифровой модуль управления режимами работы (зондирования и приема сигналов) антенной системы;
- программное обеспечение процессов формирования и обработки сигналов различных диапазонов частот;
- средства отображения информации (экраны индикаторов) по результатам обработки сигналов в двух (трех) диапазонах частот.

Особенности работы по воздушным, наземным и подповерхностным целям заключаются в получение портретов целей в каждом из используемых частотных диапазонов и их различение (распознавание). Может быть выполнена частотная селекция целей на фоне окружающих объектов и поверхностей и подавление помех. Кроме того, в каждом из используемых частотных диапазонов может проводиться когерентное накопление сигналов, их совместная обработка и формирование карты местности. Частотно-векторный анализ пространственного распределения поля в разных частотных диапазонах повысит качество различения (распознавания) объектов. При двух-(трех-)диапазонном режиме работы МРЛК также следует ожидать снижения флуктуаций сигналов целей и повышения устойчивости сопровождения (измерения координат). Режим позволит выполнить уточнение размеров, параметров и характера движения целей при сопровождении (измерении координат).

Особый интерес с точки зрения повышения информативности на этапе вторичной обработки радиолокационной информации вызывает фрактальный режим работы МРЛК.

Для обеспечения режима необходимы следующие средства:

- антенная система с излучением и приемом сигналов в двух (трех) диапазонах частот (например, фрактальная);
- цифровой модуль управления режимами работы (зондирования и приема сигналов) фрактальной антенной системы;
- программное обеспечение процессов формирования и обработки сигналов фрактальным методом;
- средства отображения информации (экраны индикаторов) по результатам фрактальной обработки сигналов.

Особенности работы МРЛК во фрактальном режиме заключаются в получении фрактальных портретов целей на фоне окружающих предметов и поверхностей в каждом из используемых частотных диапазонов для различных поляризации и их различение (распознавание). При этом возможна фрактальная селекция целей на фоне окружающих объектов и поверхностей и подавление помех. Фрактальная обработка может быть использована и для формирования электронной карты местности. Фрактальный анализ пространственного распределения признаков сигналов цели в разных частотных диапазонах и при различных поляризациях может значительно повысить качество распознавания объектов.

Перспективный МРЛК может быть размещен как на воздушном носителе, так и на стационарной позиции. При расположении на воздушном носителе может быть использован режим радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) антенны. При размещении на стационарной позиции в обзорной РЛС может быть применен режим обратного синтеза аперту-

ры антенны. Применение указанных режимов повышает разрешающую способность МРЛК. Для обеспечения режимов РСА и обратного синтеза необходимы:

- антенная система с когерентным излучением и приемом сигналов в фазовом моноимпульсном режиме;
- высокостабильный синтезатор частот и задающий генератор;
- цифровой модуль управления режимами приемных и передающих антенн;
- программное обеспечение процессов формирования и обработки сигналов в режиме синтезированной апертуры антенны;
- средства отображения информации (экраны индикаторов) по результатам обработки в режиме синтезированной апертуры антенны.

К ожидаемым результатам применения режима РСА можно отнести получение растрового изображения радиолокационной сцены с высоким разрешением, обнаружение малозаметных целей и формирование детальной карты местности, уточнение размеров, параметров и характера движения целей.

Близким к режиму РСА можно считать режим радиоголографии. Этот режим позволяет получать радиоголографические изображения целей, уточнять их размеры и форму и распознавать.

Для обеспечения режима необходимы:

- антенная система с излучением и приемом сигналов в широком спектре частот на разнесенных позициях;
- переключатели (коммутаторы) сигналов в широком спектре частот для антенн с различных позиций;
- цифровой модуль управления режимами приемных и передающих антенн в широком спектре частот на разнесенных позициях;
- программное обеспечение процессов формирования и обработки сигналов в широком спектре частот на разнесенных позициях;
- средства отображения информации (экраны индикаторов) по результатам радиоголографической обработки сигналов.

Кроме перечисленных режимов, обеспечивающих существенное повышение характеристик и возможностей МРЛК, существует еще несколько режимов, дополняющих информацию о радиолокационной сцене. К такому режиму можно отнести режим фоновой радиолокации и радиолокации на просвет.

Для обеспечения этого режима необходимы:

- антенная система с излучением и приемом сигналов на разнесенных позициях;
- переключатели (коммутаторы) сигналов для антенн с различных позиций;
- цифровой модуль управления режимами приемных и передающих антенн на разнесенных позициях;
- программное обеспечение процессов формирования и обработки сигналов разнесенных позиций;
- средства отображения информации (экраны индикаторов) по результатам обработки сигналов в фоновом режиме и на просвет.

Особенность работы в этих режимах заключается в возможности обнаружения малозаметных маловысотных целей, перемещающихся на фоне поверхности либо поперек линии визирования между передатчиком и приемником РЛС. В результате применения режима фоновой локации и локации на просвет решаются следующие задачи.

1. Получение пространственно-разнесенных портретов целей и их различение (распознавание).
2. Пространственно-временная селекция целей на фоне окружающих объектов и поверхностей и подавление помех.
3. Когерентное накопление сигналов разнесенных пунктов приема, их совместная обработка, обнаружение целей и определение их параметров.

Рассмотренные режимы могут быть реализованы в МРЛК в виде компонент комплекса. Однако для каждой из компонент необходимо решить ряд задач, которые позволят улучшить качество их работы в составе общей системы – МРЛК.

Синтезируем структуру МРЛК, обеспечивающую наличие качеств, удовлетворяющих указанным критериям. В состав такого МРЛК должны входить устройства обнаружения и распознавания целей, измерения их координат и параметров движения и устройства защиты от активных и пассивных помех. Для решения этих задач РЛС должна быть многоканальной с адаптивной антенной решеткой (РЛС с АФАР). Кроме того, в РЛС необходимы дополнительные модули, способные обеспечить работу МРЛК в рассмотренных режимах. Только в таком сочетании можно обеспечить высокую информативность и помехозащищенность системы в целом на качественно новом уровне.

Вариант структуры радиолокационной системы с указанными каналами и компонентами показан на рис. 1. В качестве основы цифровой платформы выступает цифровое ядро (ЦЯ) – плата с процессором на базе современной ПЛИС.

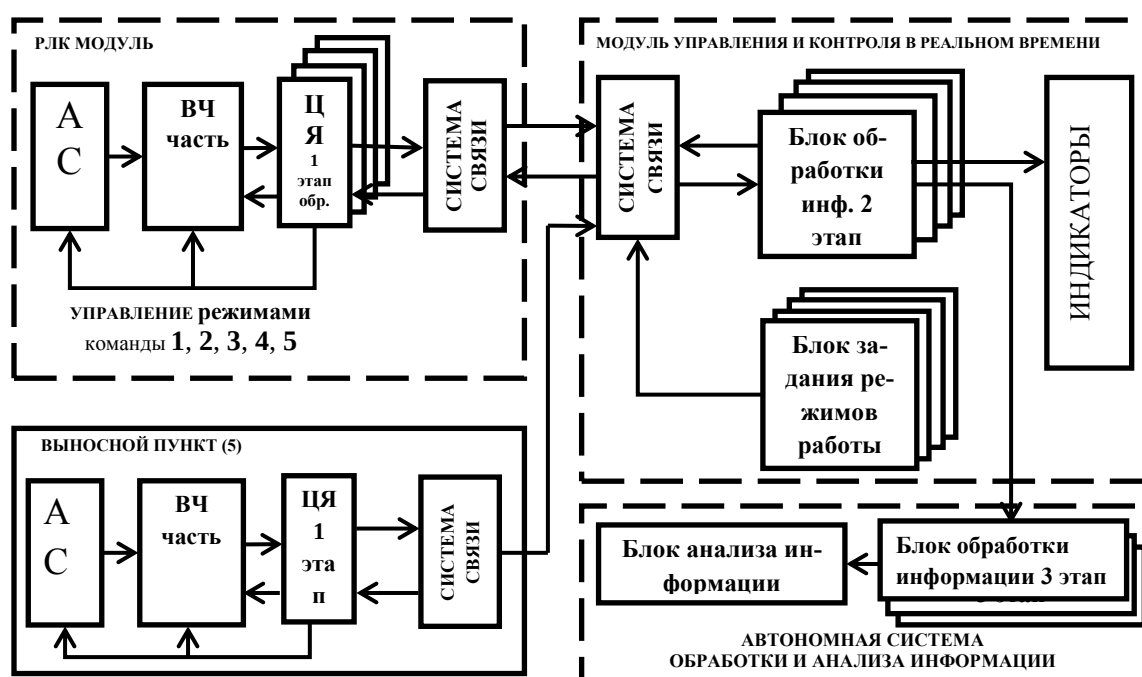


Рис. 1. Структура высокоинформативного многофункционального радиолокационного комплекса на основе реконфигурируемой цифровой платформы

Обозначения режимов:

- 1) **Полнополяризационный режим** – коммутация поляризационных каналов антенной системы и специальные алгоритмы обработки.
- 2) **Режим зондирования шумоподобным сигналом** – формирование и обработка шумоподобного сигнала в цифровом ядре РЛС.
- 3) **Режим фрактальной обработки** – обработка специальными алгоритмами с использованием банка опорных фракталов.
- 4) **Режим синтезированной апертуры и радиоголографии** – зондирование радиолокационной сцены при сканировании ДНА по угловым координатам и обработка принятых сигналов специальными алгоритмами.
- 5) **Режим фоновой локации** – использование выносного пункта и специальных алгоритмов обработки принятых сигналов

Основой системы является реконфигурируемая РЛС с цифровой платформой, антенной системой (АС) и блоками высокочастотного тракта (ВЧ-часть). Она должна обеспечивать наилучшую обработку сигналов в условиях заданных режимами изменения их параметров

на трех этапах обработки. Первый этап первичной обработки радиолокационной информации выполняется на реконфигурируемом цифровом ядре (ЦЯ). Второй этап обработки предполагает выдачу первичной информации на индикаторы РЛС. На третьем этапе обработки выполняется углубленная обработка и анализ результатов.

Для синтеза структуры РЛС, удовлетворяющей перечисленным требованиям, необходимо сформировать целевую функцию, параметрами которой являются информативность и помехозащищенность, и найти такие значения параметров, которые обеспечивают максимум этой функции [5] на основе выбора показателей качества и критерия построения МРЛК, что является самостоятельной задачей.

Таким образом, проблема построения высокоинформативной многофункциональной радиолокационной системы включает в себя ряд задач. К ним относятся задачи построения составных частей МРЛК, обеспечивающих работу в режимах полнополяризационной обработки, зондирования шумоподобными сигналами, фрактальной обработки, синтезированной апертуры и радиоголографии, фоновой локации и, возможно, некоторых других.

Структура подобной высокоинформативной многофункциональной радиолокационной системы может быть построена на основе реконфигурируемой цифровой платформы.

Решение указанных задач обеспечит дальнейшее развитие радиолокационных систем на качественно новом уровне. Указанная многофункциональность несет синергетический эффект и позволит обнаружить и распознать малозаметные воздушные, наземные (надводные) и подповерхностные цели с высоким качеством.

Литература

1. *Аверьянов В. Я.* Основы теории и практического применения разнесенных радиолокационных станций и систем. МВИЗРУ, 1966. 164 с.
2. *Бертуланфи Л. фон.* Общая теория систем: критический обзор // Исследования по общей теории систем. М.: Прогресс, 1969. С. 23–82.
3. *Васин В. А., Власов И. Б. и др.* Информационные технологии в радиотехнических системах: учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2003. 671 с.
4. *Куприянов А. И., Сахаров А. В.* Радиоэлектронные системы в информационном конфликте. М.: Вузовская книга, 2003. 528 с.
5. *Кондратьев В. С., Котов А. Ф., Марков Л. Н.* Многопозиционные радиотехнические системы. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
6. *Волкова В. Н., Денисов А. А.* Теория систем: учебное пособие. М.: Высш. шк., 2006. 511 с.
7. *Туров В. Е.* Радиолокационная борьба. Построение и помехозащита базово-корреляционных систем пассивной локации: монография. М.: Вузовская книга, 2011. 208 с.

*Статья поступила в редакцию 17.06.2016;
переработанный вариант — 23.06.2016*

Туров Виктор Евгеньевич

д.т.н. профессор, профессор кафедры радиотехнических систем ЯрГУ им. П. Г. Демидова (150016, Ярославль, ул. Советская, 14), тел. (4852) 72-51-53, e-mail: victorturov@gmail.com.

Ильин Евгений Михайлович

д.ф.-м.н, профессор, ведущий аналитик МГТУ им. Н. Э. Баумана (105077, Москва, ул. Средняя Первомайская, д. 17, кв. 45), тел. (499) 263-68-46, e-mail: evgil45@mail.ru.

Кренев Александр Николаевич

к.т.н., доцент кафедры радиотехнических систем ЯрГУ, ведущий научный сотрудник научной лаборатории ИТТ ЯрГУ (150023, Ярославль, ул. Курчатова, д. 7, кв. 48), тел. (4852) 72-51-53, e-mail: krenev@uniyar.ac.ru.

Вишняков Денис Юрьевич

к.т.н., инженер 1 категории научной лаборатории ИТТ ЯрГУ (150030, Ярославль, ул. Гоголя, д. 9, кв. 52), тел. (4852) 72-51-53, e-mail: vishnyakovdenisu@yandex.ru.

Полубехин Александр Иванович

к.т.н., руководитель инновационного технологического центра МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), тел. (499) 263-68-46, e-mail: polub1980@mail.ru.

The structure of highly informative multi-function radar system based on reconfigurable digital platform

Eugene M. Il'yin, Alexander N. Krenev, Victor E. Turov, Denis Yu. Vishnyakov, Alexander I. Polubekhin

In this paper, problems of creation a multi-function radar system are defined. A variant of its construction based on reconfigurable digital platform is considered. The possibilities of implementation of non-traditional methods of location on the basis of the perspective multifunction radar system are shown and its composition is proved.

Keywords: multi-function radar system, non-traditional methods of location, full-polarimetric mode, noise-like signal, fractal processing, synthetic aperture, radio holography, background location.