

Идентификация модели просветного радара на разных этапах технического проектирования радиолокационной системы

Ф. Н. Ковалев, В. П. Хранилов

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Россия, 603600, Нижний Новгород, ул. Минина, 24
e-mail: kovalev@nntu.nnov.ru, hranilov@nntu.nnov.ru

Аннотация. Представлены результаты системного анализа и идентификации радиолокационной системы, использующей принцип локации «на просвет». Рассмотрены проблемы и задачи просветной радиолокации, построена и обоснована феноменологическая модель хронологической эволюции просветных радиолокационных систем. На основе этой модели построена и идентифицирована математическая модель, предназначенная для применения при анализе, разработке и проектировании просветных радиолокационных систем. Основное внимание в работе уделено исследованию, моделированию, структурной и параметрической идентификации получаемых при этом различных вариантов построения систем, описываемых разными динамическими моделями и характеризующихся разными возможностями по обеспечению эффективности решения основной задачи радиолокационных систем – определению координат объекта.

Ключевые слова: проектная модель, кибернетическая модель «черный ящик», идентификация модели, структурная идентификация, параметрическая идентификация, локация «на просвет», просветная радиолокационная система, эволюция просветных радиолокационных систем, системная модель, пространство параметров, пространство состояний, модель проектирования в пространстве состояний, структурный синтез, параметрический синтез, управление параметрами просветного радиолокатора.

1. Введение

Радиолокаторы (радары) представляют собой сложные радиотехнические устройства, состоящие из антенных систем, передающих трактов, приемников, передатчиков, устройств обработки сигналов, устройств отображения [1–3]. Во взаимодействии этих элементов проявляются основные свойства радиолокационных систем (РЛС): обнаруживать объекты, определять их местоположение и траектории, распознавать объекты.

Отдельный класс радаров представляют собой РЛС, использующие принцип локации «на просвет». Таким системам присущи свои особенности во всех перечисленных задачах обнаружения, сопровождения и распознавания.

Необходимость развития названного направления радиолокации, создания возможностей реализации более совершенных РЛС, внедрения их в практику исследования окружающей среды и другие отрасли человеческой деятельности требуют разработки более перспективных подходов к реализации их жизненного цикла (особенно наиболее ресурсоемких его стадий — проектирования и производства), основанных на принципах непрерывной информационной поддержки жизненного цикла изделий (CALS-технологий). В данной работе предпринята попытка применения такого системного подхода и идентификации соответствующих моделей, в соответствии с которым рассмотрены проблемы и задачи просветной радиолокации, построена и обоснована феноменологическая модель эволюции просветных РЛС. На основе данной модели построены и идентифицированы математические модели, предназначенные для применения при анализе, разработке и проектировании просветных РЛС на всех этапах их жизненного цикла. Основное внимание в работе уделено исследованию, моделированию, структурной и параметрической идентификации получаемых при этом различных вариантов построения систем, описываемых различными динамическими моделями и характеризующихся различными возможностями по эффективности решения одной из основных задач РЛС — определению координат объекта.

Проблемам создания, разработки и технического проектирования таких РЛС посвящено большое количество публикаций, составляющих единое научное направление просветной радиолокации [4–13, 26–28]. Подавляющее большинство работ раскрывает частные вопросы построения и функционирования просветных систем и в них, как следствие, отсутствует единый системный подход к просветной радиолокации в целом и системный подход к организации просветных РЛС различных назначений. Недостаточность и отсутствие глубины применения методов системного анализа при проектировании просветных РЛС, а также системного изложения проблем просветной радиолокации и рассмотрения соответствующих аналитических моделей, формализующих процессы, реализуемые на различных этапах их технического проектирования, в значительной степени ограничивает дальнейшее развитие этого перспективного инновационного направления в разработке и внедрении РЛС.

2. Системный анализ содержания предметной области исследования

2.1. Просветный радиолокатор — радиотехническая система для извлечения информации

Радиолокационные системы относятся к обширному классу информационных радиосистем извлечения информации при помощи радиоволн, являющихся носите-

лем радиосигналов [2, 3]. Система извлечения информации (рис. 1) состоит из нескольких элементов, связанных между собой для выполнения задачи извлечения информации об исследуемом объекте. Информация извлекается из собственных сигналов, излученных в направлении на исследуемый объект и отраженных от него (типичная система радиолокации [3]), или из сигналов других радиосистем (система радиоизмерений), или из собственного радиоизлучения различных тел (система пассивной радиоастрономии).

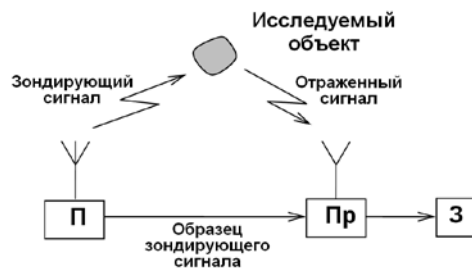


Рисунок 1. Схема системы извлечения информации

На рис. 1: радиопередающее устройство — передатчик (П) — излучает в направлении исследуемого объекта специальный (зондирующий) сигнал, который после рассеяния (отражения от объекта) поступает в радиоприемное устройство — приемник (Пр), отфильтровывается от помех и сравнивается с образцом зондирующего сигнала, поступающего непосредственно из радиопередающего устройства П, расположенного либо рядом с приемным устройством (как в совмещенных радиолокаторах), либо на расстоянии от него (как в разнесенных, или бистатических радиолокаторах [2–6, 11]). В результате этого сравнения извлекается информация о наличии или отсутствии объекта отражения, его местоположении, параметрах движения и рассеивающих свойствах. После чего информация поступает потребителю — заказчику (З).

В просветных РЛС, относящихся к классу бистатических или разнесенных радиолокационных систем, используется рассеянное излучение повышенной интенсивности (просветный эффект) в направлении тени [6]. Применение этого эффекта изначально предполагает расположение приемника по другую сторону от объекта относительно передатчика. Просветным системам присуща небольшая зона действия (в окрестности отрезка, соединяющего передатчик с приемником) [5] и малая задержка рассеянного сигнала относительно прямого сигнала передатчика, поступающего непосредственно на вход приемной системы (см. рис. 1).

2.2. Интеграция РЛС и повышение эффективности радиолокационного поля

Современной тенденцией развития радиолокации является объединение нескольких радаров в более сложную систему — многопозиционную радиолокацион-

ную систему (МПРЛС) [12]. Такое объединение позволяет получить новые свойства РЛС.

На рис. 2 показана возможная структура многопозиционной РЛС [2], включающая в себя однопозиционные РЛС (ОПРЛС1, ОПРЛС2), бистатические (БиРЛС1 ÷ БиРЛС6) и пассивные (ПРЛС1 ÷ ПРЛС4), расположенные в различных точках пространства. Расстояния между позициями называются базой и обозначены на рис. 2 буквой Б.

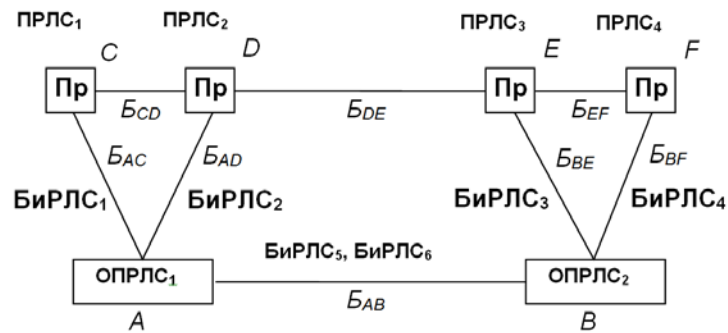


Рисунок 2. Возможная структура МПРЛС

В обобщенной структуре (рис. 3), выделяемой в результате анализа системных связей в МПРЛС (рис. 2), также выделяют основные компоненты системы [2]: аппаратуру разнесенных позиций (РП), каналы передачи информации (1), каналы синхронизации (2) и пункт обработки информации (ПОИ), где поступающие от разных позиций и систем сигналы и информация объединяются и обрабатываются совместно.

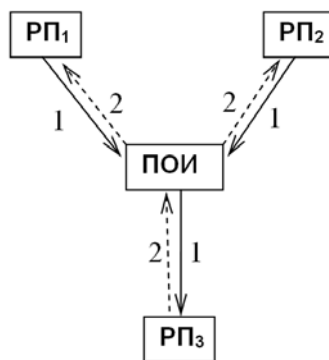


Рисунок 3. Обобщенная структурная схема МПРЛС

Просветные РЛС, изначально основанные на разнесении элементов (передатчика и приемника), удачно вписываются в концепцию многопозиционных радаров

[29], а из представленных схем и анализа их структурных преобразований следует, что изучение и всесторонние исследования возможностей просветных радаров позволяют четко определить их место и роль как в многопозиционных системах, так и в более крупном образовании — радиолокационном поле. Обозначенные возможности наиболее полно могут быть реализованы при условии применения методов и математического аппарата системного анализа, управления и обработки информации, так как возрастающая сложность РЛС требует применения адекватных их усложнению методов анализа, математических моделей и комплексных проектных решений.

2.3. Физические основы просветной радиолокации

Принцип просветной радиолокации состоит в применении разнесенной схемы радиолокационного наблюдения, когда рассеивающий объект (рис.1) находится между передатчиком и приемником [6]. Основная привлекательность такого способа наблюдения состоит в возможности принимать поле повышенной интенсивности, рассеянное в направлении тени объекта. Эффект повышенного переизлучения в направлении тени называют просветным [5]. Он начинает проявляться при размерах объекта, больших длины волны λ .

Расчет рассеянного на объекте поля в просветных системах основан на использовании принципа Бабинне [4], согласно которому плоский поглощающий экран конечных размеров можно заменить отверстием той же формы и размеров в бесконечном плоском экране. Соотношения для расчета и анализа получаются с применением для расчетов дифракционного интеграла Кирхгофа [5, 6]. Расчет рассеянного поля в этом случае сводят к дифракции на отверстии с границами и размерами, определяемыми проекцией теневого контура цели на плоскость, перпендикулярную направлению падающей волны. Рассеянное на объекте поле можно представить в виде суммы собственного поля рассеяния E_p и теневого поля E_t , имеющего наибольшую интенсивность в направлении геометрической тени объекта [4, 5]. Поле E_t определяется теньевым контуром, т. е. границей освещенной части поверхности [4]. Исключительно важным моментом является слабая зависимость теневого поля непрозрачных (черных) тел от поверхности тела и материала, из которого оно изготовлено [4, 5].

2.4. Состояние и системные проблемы просветной радиолокации

Исторически просветная схема наблюдения лежала у истоков всей радиолокации [1]. В первых опытах по радиосвязи А. С. Поповым была установлена возможность обнаружения объекта (корабля) при пересечении им линии радиосвязи между двумя другими кораблями. К РЛС просветного типа также относятся первая выпущенная серийно в конце 30-х годов XX века отечественная радиолокационная станция наземного базирования с непрерывным излучением РУС-1 и американская РЛС AN/FPS-23 («Fluttar») [6]. Однако последующее развитие радиолокации пошло

по пути создания и совершенствования импульсных совмещенных (однопозиционных) РЛС, считавшихся в 40-50-е годы более передовыми по отношению к радарам первого поколения.

Интерес к просветному способу радиолокационного наблюдения возродился в 70–80-х годах прошлого века в связи с их уникальными возможностями по обнаружению «черных тел» и появлением самолетов-невидимок Stealth. В отмеченный период времени стали появляться публикации по просветной радиолокации, методам расчета теневого поля и принципам распознавания объектов [4, 6]. С некоторой задержкой, в 1990–2000 годах, вышли работы, посвященные методам определения координат цели [5, 8, 9]. В отличие от простейших просветных систем с одним передатчиком и одним приемником и выделением доплеровских биений, оценка координат потребовала усложнения приемника — добавления в нем угломерного устройства (местоположение определялось по измерениям азимута и доплеровской частоты).

В 2000-е годы Нижегородским федеральным научно-производственным центром радиолокации (ННИИРТ) представлен серийный образец просветного радиолокатора. Предполагалось, что построение систем с траекторной обработкой, несмотря на исходную «плохую» геометрию просветных радиолокаторов [13], существенно расширяет их возможности. Определение координат в бистатических просветных радиолокаторах производят на основе угломерно-дальномерного метода [9, 13] и приближенных выражении, получаемых для равномерного прямолинейного движения цели ортогонально линии базы [7].

В настоящее время на основе совокупности достижений нескольких известных российских научных школ констатируется формирование единого научного направления — просветной радиолокации, с приоритетом, признаваемым в зарубежном научном мире. Достигнутые теоретические результаты охватывают в основном физические принципы действия просветных РЛС, проблемы моделирования и адекватной математической обработки первичной информации, получаемой с антенных устройств, вопросы совершенствования методов формирования антенных полей и использования фазированных антенных решеток, методы цифровой обработки сигналов на всех элементах трактов передачи информации, в том числе приемных трактов и трактов отображения информации и т. д. Прикладные достижения в этой области позволили начать внедрение идеи просветной радиолокации на практике.

Однако специфика создаваемых устройств, а также необходимость возможно быстрого внедрения просветных РЛС, отодвинули на второстепенный план системотехнические проблемы создаваемых РЛС, относящихся по общепринятой классификации к разряду «больших информационных систем» с разнообразными и разнородными по своей природе и структуре информационными потоками, с характерных для практики проектирования таких систем применением принципов системного подхода и соответствующего инструментария исследований, моделирования и разработки, построенных на теоретической основе системного анализа, технической кибернетики с использованием присущего им математического аппарата.

Отсутствие единого системного подхода к просветной радиолокации в целом и системного подхода к организации просветных РЛС различного назначения, недостаточное внимание разработчиков к применению методов системного анализа при проектировании просветных РЛС, а также отсутствие соответствующих аналитических моделей, формализующих процессы проектирования, приводят в совокупности к ограничению в значительной степени дальнейшего развития этого перспективного инновационного направления радиолокации в разработке и внедрении современных РЛС.

3. Системная модель эволюционного развития просветных систем

Хронологический анализ развития любой технической системы позволяет получить множество полезной информации, позволяющей систематизировать и формализовать существующие тенденции и закономерности их развития в ходе непрерывного совершенствования качественных и количественных характеристик, определяющих их функциональность. Такой анализ [14, 15], проведенный для предметной области вычислительных систем, дал возможность определить тенденции, выделить тренды и приоритеты развития отдельных направлений.

Исходя из обоснованно выделенных в ходе анализа развития проблемы просветной радиолокации п. 2.4 системных проблем просветных РЛС, вполне разумно и целесообразно применить зарекомендовавший себя прием системного анализа для построения и идентификации феноменологической модели эволюционного развития изучаемой предметной области, ожидая при этом достижения аналогичных целей — определение тенденций, выделение трендов и приоритетов развития отдельных направлений и технологий просветной радиолокации в целом, и, в частности, РЛС, использующих просветный эффект.

Модель эволюционного развития просветных систем можно построить и идентифицировать, исходя из следующих предпосылок:

- устойчиво сложившаяся в практике применения на протяжении от их появления до нашего времени структура просветных систем (структурирование-идентификация в пространстве качественного состава основных элементов РЛС и их структуры, т. е. в пространстве состояний [17]);
- хронологическая последовательность изменения структуры и параметров элементов отдельных компонентов РЛС (структурирование-идентификация во временной области [17]);
- нормированные безразмерные обобщенные показатели временных уровней эволюции просветных систем (структурирование-идентификация в пространстве обобщенных параметров компонентов РЛС, т. е. в пространстве параметров [17]).

Предметная область просветных систем (от начала появления и в будущем) может быть условно разбита на РЛС 1÷5 поколений.

В соответствии с номером поколений менялись возможности систем и их структура:

- РЛС обнаружения (О) [12] (первая отечественная РЛС РУС-1);
- однозвенная и двухзвенная системы с одним передатчиком и двумя приемниками (РУС-1);
- РЛС обнаружения и распознавания (Р) [6];
- РЛС обнаружения, распознавания и локации (Л) [5, 10];
- многозвенная система, т. е. системы с несколькими последовательными ячейками П-Пр [28];
- многопозиционные РЛС (МПРЛС) [29];
- МПРЛС на основе передатчиков других систем (создание космических систем);
- РЛС с управляемым зондирующим сигналом и изменяемой структурой обработки в зависимости от типа обнаруживаемого объекта (адаптивные РЛС — АРЛС) — предполагаемая фаза развития в будущем.

Анализ эволюционного развития просветных РЛС на обозначенных основаниях и выделенных поколениях систем позволяет построить феноменологическую модель развития просветных систем с применением теоретико-множественного подхода (рис. 4). При этом вводится в рассмотрение характеризующий систему интегральный параметр ИП.

Так, для системы третьего поколения его можно представить следующим:

$$\text{ИП}_3 = \text{O} \cup \text{P} \cup \text{L}. \quad (1)$$

На рис. 4 существующее (третье) поколение отмечено серым цветом. Соответственно для двух предыдущих поколений параметр ИП принимает вид:

$$\text{ИП}_1 = \text{O}, \quad (2)$$

$$\text{ИП}_2 = \text{O} \cup \text{P}, \quad (3)$$

Модели систем других поколений получаются аналогично, в соответствии с рис. 4., при помощи теоретико-множественных операций объединения, пересечения разности, используя исключение и добавление новых характеристик.

Анализ построенной и идентифицированной модели позволяет выявить следующие закономерности и тенденции в развитии техники просветных РЛС. Из (1), (2), (3) несложно видеть изменение параметра ИП_i по мере развития просветных РЛС. Основой изменений является как углубление теоретических моделей, описывающих процессы в системе, так и, что особенно важно, совершенствование средств обработки сигнала. Так, если в системах первого поколения (ИП_1) использовались достаточно простые (по современным меркам) аналоговые средства регистрации сигнала и наблюдения, то в перспективных системах следует ожидать применения как более чувствительных приемников, так и вычислительных машин большой мощности. Все это совместно с новыми методами цифровой обработки

сигналов позволяет производить более «тонкий» анализ рассеянного сигнала и получать большее число сведений о наблюдаемых объектах [6, 11].

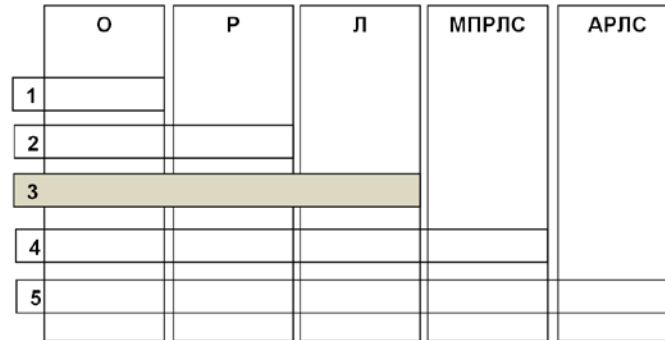


Рисунок 4. Теоретико-множественная модель эволюции просветных РЛС

С развитием технологий цифровой обработки сигналов, производством высокопроизводительных компактных вычислительных устройств связаны перспективные направления развития просветной радиолокации. Одним из них является многопозиционная радиолокация [27, 29], что соответствует общему направлению развития радиолокации в целом [12]. Применение разнесенного приема позволяет, в частности, увеличить объем сигнальной информации и, как следствие, повышает качество распознавания и сопровождения объектов.

Полученные в результате анализа тренды развития подтверждены в практике разработок, ведущихся в профильных исследовательских коллективах. Следует заметить, что выделение отдельной процедуры идентификации модели эволюционного развития просветных систем в пространствах состояний (структур) и параметров позволяет получить необходимую информацию для прогноза технического развития просветных РЛС не только в плане их ретроспективного развития, а и как источник рекомендаций по их совершенствованию и модернизации.

4. Проектная модель просветной РЛС

4.1. Модели просветного радара

Просветные радары и многопозиционные системы на их основе относятся к категории «больших информационных систем», обладающих повышенной сложностью структуры, с большим количеством элементов, разнообразными и разнородными по своей природе и структуре информационными связями. Наиболее существенными факторами, определяющими их качественные характеристики можно считать [18]:

- наличие единой цели функционирования для всей системы;
- многообразии и разнородности функций, реализуемых системой;

- большое число информационно-связанных и взаимодействующих элементов;
- возможность деления системы на подсистемы;
- иерархическая структура связей подсистем;
- наличие в системе управления и высокая степень его автоматизации;
- устойчивость к воздействию внешних и внутренних возмущающих факторов и наличие элементов стабилизации и самоорганизации.

Математическая постановка задач, возникающих при анализе и проектировании просветных систем, так или иначе связана с оптимизацией параметров элементов и интегральных характеристик. Важное значение здесь имеет задание и построение иерархии моделей, их идентификация в пространствах состояний (структур), параметров и во временной области. В этом случае каждому этапу исследования и проектирования сопоставляется самостоятельная модель элементов и системы и, тем самым, поставленные задачи необоснованно не усложняются. Тесно связанным с вопросом задания моделей является выбор параметров, которые наиболее точно характеризуют соответствие системы исходным или промежуточным (на этапе проектирования) целям.

4.2. Обобщенные кибернетические модели просветной системы на этапе проектирования

Математическую модель (ММ) просветного радиолокатора можно задать в виде традиционной кибернетической модели «черного ящика» [19, 20]:

$$\Sigma_M = \{T_M, X_M, U_M, \Omega_M, Y_M, \Gamma_M, H_M, G_M\}, \quad (4)$$

где T_M — множество моментов времени; X_M — множество состояний системы; U_M — множество мгновенных значений входных воздействий; Ω_M — множество допустимых входных воздействий; Y_M — множество мгновенных значений выходных воздействий; Γ_M — множество допустимых выходных воздействий; H_M — оператор переходов, устанавливающий функциональную связь между состояниями X_M ; G_M — оператор, устанавливающий связь между состоянием системы и ее выходной интегральной характеристикой, предопределяющей множество Γ_M .

В зависимости от уровня и назначения модели под величинами $X_M, U_M, \Omega_M, Y_M, \Gamma_M$ можно подразумевать разные процессы. Например, в качестве U_M и Y_M можно взять входные и выходные процессы только приемника. При дальнейшем углублении модели моделью (4) можно описывать только вторичную обработку сигнала, а в качестве U_M использовать результаты первичных измерений просветного радиолокатора (доплеровская частота, запаздывания сигнала и т. д).

Под множеством моментов времени T_M здесь подразумевается последовательность дискретных моментов времени $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$, а соответствующие им процессы можно назвать отсчетами.

Дальнейшее представление модели (4) основано на более детальном учете отдельных аспектов и зависит от назначения модели. При проектировании просветной системы часть управляющих функций осуществляется при помощи автоматизированной управляющей системы (АС), однако остается приоритетной доля человеческого участия. Поэтому управление при проектировании осуществляется непосредственно со стороны человека, как лица, принимающего решения (ЛПР) и при помощи автоматизированной управляющей системы. Процесс управления на стадии проектирования можно представить в виде замкнутой схемы на рис. 5.

Таким образом, для начальной стадии проектирования просветной системы можно использовать следующую модель [21, 22]:

$$Y_M = F(X_M, \Lambda_M, U_M, U'_M), \quad (5)$$

где X_M — условно можно назвать вектором состояний ресурсов системы (элементов внутренних параметров, задаваемых в общем случае технико-экономическими характеристиками); Λ_M — вектор параметров внешних воздействий (к ним можно отнести не только мешающие воздействия, но и сами цели с указанием с той или иной точностью их параметров); U_M — вектор управляющих воздействий; U'_M — вектор корректирующих управляющих воздействий; Y_M — вектор выходных параметров (интегральных технико-экономических характеристик просветного радиолокатора, или, в более узком смысле, информацию для заказчика-потребителя, см. рис. 1), отображающий результаты управления ресурсами и параметрами системы; F_M — теоретико-множественный функционал, выражающий соответствие $q_M = (X_M, Y_M, F_M)$ с учетом воздействия внешних факторов Λ_M и управляющих воздействий U_M, U'_M и Z_M (рис. 5).

На схеме (рис.5) обозначены основные функциональные зависимости составляющих ММ, описывающие процесс управления ресурсами состояний системы X_M при проектировании РЛС.

4.3. Идентификация модели в пространстве состояний

В большинстве случаев для представления в ММ просветного радиолокатора (4) пространства состояний (ПС) в качестве ядра ММ применяются дифференциальные уравнения и, соответственно, ПС может быть выражено множеством фазовых состояний, задаваемых с учетом трех основных составляющих: имеющихся ограничений; заданной дискретности отсчетов времени; закона эволюции, отображающего любую точку фазового пространства при любом отсчете времени в однозначно определенное состояние системы [16, 17]. Состояние x_i определяется как структурой модели, так и сложившимися в определенный момент времени набора-

ми параметров, т. е. применение традиционного разложения модели на ПС и ПП и следующая за ним отдельная обработка модели не представляются вполне корректной проектной операцией, хотя в ряде случаев, например, при проектировании систем автоматического управления [19, 20], вполне уместна и зарекомендовала себя с положительной стороны, приводя к конструктивным решениям, обладающим необходимыми качественными показателями.

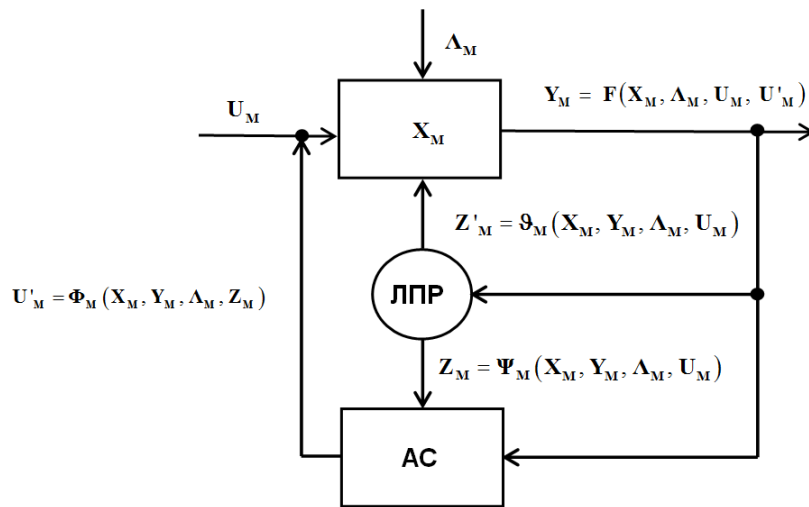


Рисунок 5. Модель прямого интерактивного (автоматизированного) управления при проектировании прожекторной РЛС

Однако, при необходимости получения решения в условиях неопределенности, порождаемой вариациями структуры и параметров элементов проектируемой системы в процессе структурного и параметрического синтеза, изменением вектора управления и внешних воздействий U , а также определяемой наличием неустойчивости параметров или интерактивного управления, применение традиционного математического аппарата при создании алгоритмического и программного обеспечения не приводит к приемлемым результатам проектирования, адекватным ожидаемым и удовлетворяющим запросы разработчиков.

Для сохранения общности в математической записи выражения модели множество дискретных состояний системы X_M , представляющее множество вариантов схемы устройства со своими фиксированными наборами элементов, обозначим как $S = \{s_0, s_1, s_2, \dots, s_n\}$ (рис. 6).

Таким образом, для формализованного описания состояний проектируемой ТС в ПС, определенного в обозначениях рассматриваемой ММ, имеем

$$S(t_2) = H_M(S(t_1), U, \Omega),$$

следовательно, для единичных мгновенных состояний проектируемой ТС в ПС

$$s(t_2) = \varphi(s(t_1), u(t_1)), u(t_1) \in \Omega.$$

Введем также в рассмотрение множества параметров элементов системы — \mathbf{P} , и множество их допустимых значений — \mathbf{D}_P , определяющих состояния системы и предназначенных в данном случае для организации взаимосвязи и отображения изменений в ПП при изменениях в ПС и наоборот.

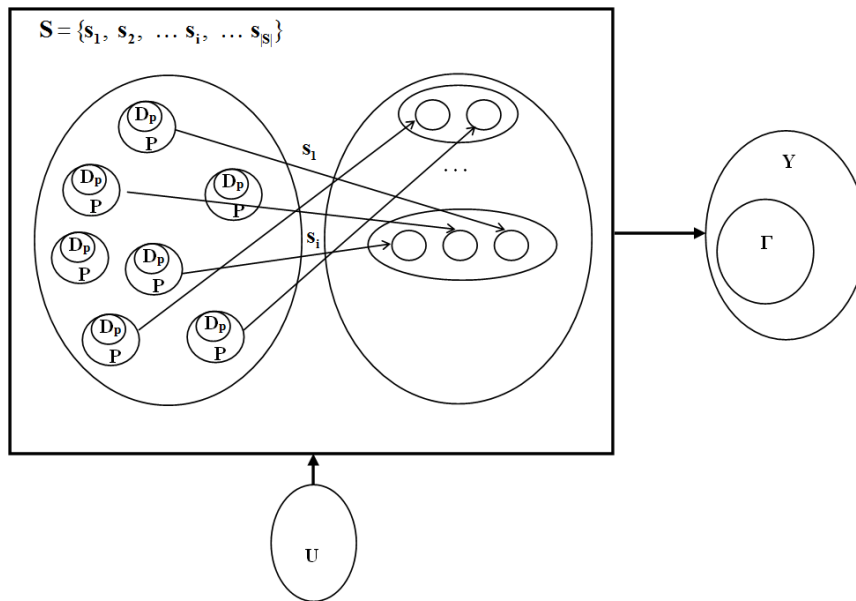


Рисунок 6. Модель изменения состояний в результате структурного синтеза

Введение в рассмотрение множества \mathbf{P} приводит к необходимости проведения дополнительного анализа применяемого внутреннего оператора \mathbf{H}_M и выделения в нем компоненты \mathbf{F}_M , отображающей преобразование параметров, вызванное структурными изменениями и функциональными связями между параметрами: $\mathbf{H}_M = \mathbf{H}'_M \cup \mathbf{F}_M$. Это требуется для обеспечения согласованного описания подмножеств состояний (вариантов структурных решений) в ПС модели проектируемой РЛС и их параметрических описаний в ПП.

4.4. Идентификация внутренних операторов модели просветной системы на этапе проектирования

Идентификация оператора \mathbf{H}'_M . Для внутреннего оператора \mathbf{H}'_M , устанавливающего связь между состояниями системы, наиболее целесообразным для идентификации будет его выражение в ПС в виде теоретико-множественного соответствия в форме отображения $\Gamma: \mathbf{M} \rightarrow \mathbf{Q}$ (рис. 7).

В этом случае задача проектирования РЛС, как распределенной системы \mathbf{Q} , состоящей из объектно-ориентированных модулей-наборов (ООН) \mathbf{Q}_i , реализующих

необходимые рабочие функции РЛС, рассматривается как их формирование из элементов $m_i \in \mathbf{M}$ проблемно-ориентированного набора (ПОН) — \mathbf{M} [16, 17, 21, 22]. Реализация процесса формирования ООН \mathbf{Q}_i подразумевает интерактивное взаимодействие разработчика и системы проектирования, т. е. соответствует принятой в п. 4.2 схеме замкнутого непрямого управления (рис. 5). Для идентификации ММ в пространстве состояний процесс формирования ООН описывается отображением $\Gamma: \mathbf{M} \rightarrow \mathbf{Q}$. При описании операций передачи модулей между базовым множеством ПОН — \mathbf{M} и множеством ООН — \mathbf{Q} исходное отображение $\Gamma: \mathbf{M} \rightarrow \mathbf{Q}$ целесообразно разбить на два уровня: $\Gamma_1: \mathbf{M} \rightarrow \mathbf{V}$ и $\Gamma_2: \mathbf{V} \rightarrow \mathbf{Q}$, дополнив процесс формирования виртуальной фазой, соответствующей на практике созданию и апробации виртуальных моделей пробных вариантов РЛС, обозначаемых множеством \mathbf{V} (рис. 7). Доказывается [25], что универсальным математическим аппаратом для описания состояний элементов проектируемой РЛСС $m_i \in \mathbf{M}$ с учетом неопределенности условий вхождения в различные ООН является нечеткое множество (НМ) \tilde{A} , заданное на базовом множестве \mathbf{M} и образованное прямым отображением $\Gamma: \mathbf{M} \rightarrow \mathbf{Q}$:

$$\tilde{A}(m_i) = \{ \langle \mu_{\mathbf{Q}_i}(m_i), \mathbf{Q} \rangle \} = \\ = \{ \mu_{\mathbf{Q}_1}(m_i) / \mathbf{Q}_1; \mu_{\mathbf{Q}_2}(m_i) / \mathbf{Q}_2; \dots; \mu_{\mathbf{Q}_i}(m_i) / \mathbf{Q}_i; \dots; \mu_{\mathbf{Q}_m}(m_i) / \mathbf{Q}_m \},$$

где $\mu_{\mathbf{Q}_i}(m_i)$ — степень принадлежности m_i к ООН \mathbf{Q}_i ; $n = |\mathbf{M}|$; $m = |\mathbf{Q}|$.

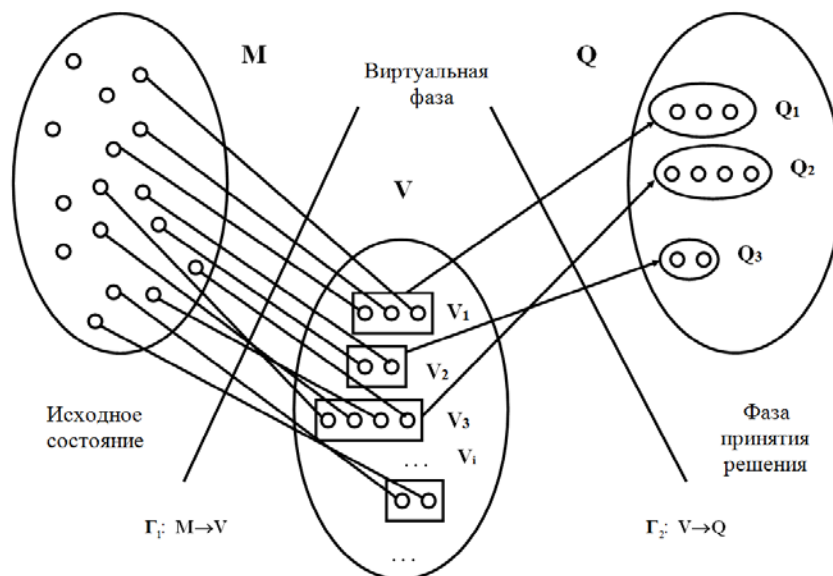


Рисунок 7. Формализованное описание процесса проектирования РЛС
в пространстве состояний

Геометрической интерпретацией варианта объекта при идентификации ММ в ПП является точка в n -мерном Евклидовом пространстве внутренних параметров, в котором для каждой из n управляемых переменных выделена соответствующая координатная ось [25]. Модель проектируемых объектов идентифицируется в ПП с использованием соотношений, полученных в п. 4.2.

Таким образом, для формализованного описания единичных мгновенных состояний элементов проектируемой ТС в ПС, определенного в обозначениях рассматриваемой ММ, имеем $s(t_2) = \varphi'(s(t_1), u(t_1))$, $\varphi' \in \mathbf{H}'_M$, $\mathbf{H}'_M \in \mathbf{H}_M$, $u(t_1) \in \Omega$. В соответствии с принятой моделью переходов в виде теоретико-множественных отображений получается: $s(t) = s_1(t) \cup s_2(t)$, где $s_1(t) | v_j = \Gamma_1 m_i$; $s_2(t) | q_k = \Gamma_2 v_j$ при $m_i, v_i, q_i \in \mathbf{M}$.

Идентификация оператора \mathbf{F}_M . Для выражения внутреннего оператора \mathbf{F}_M , устанавливающего изменения параметров элементов при переходах между состояниями, применяются, как правило, математические модели физических процессов, определяющих функционирование проектируемого объекта. Принятое, как правило, в этом случае применение математического аппарата дифференциальных уравнений способно продвинуть решение задачи и получить удовлетворительные результаты лишь при условии строго фиксированной структуры модели, т. е. только в ПП без отображения связей и взаимодействий, неизбежно возникающих при структурных изменениях [19, 20], традиционно вынесенных в ПС и отображаемых там с применением соответствующих математических описаний в виде графов. Вместе с тем при обращении к конкретной предметной области проектирования РЛС почти всегда имеются рекомендации, учитывающие эти взаимосвязи, и накопленные опытным путем [1–3, 7–11, 13]. В некоторых случаях эти взаимосвязи формализованы в результате специальных исследований и последующего анализа [7, 11, 13]. Применение этих зависимостей позволяет учитывать взаимные влияния элементов путем введения в алгоритмы расчетов соответствующих корректирующих поправок в виде отдельных расчетных моделей, поправочных коэффициентов и т. п. При использовании современных САЕ-систем и наличии в их составе надежных и приемлемых по временным затратам (быстродействующих) моделей элементов и корректно реализованных алгоритмов их сборки при структурном синтезе РЛС их рекомендуется использовать после необходимых преобразований, позволяющих извлекать зависимости, отображающие взаимные связи параметров элементов.

Таким образом, для формализованного описания единичного мгновенного состояния проектируемой РЛС в ПП, определенного в обозначениях рассматриваемой ММ, имеем $p(t_2) = f(p(t_1), u(t_1))$, где $f \in \mathbf{F}_M$, $\mathbf{F}_M \in \mathbf{H}_M$ может быть выражена непосредственными аналитическими зависимостями, полученными заранее в результате применения к массивам взаимосвязанных параметров регрессионного [16] или корреляционного [16, 22] анализа. Вместе с тем в работе [23] показана принципиальная возможность применения для этих целей математического аппарата искусственных нейронных сетей.

Идентификация оператора \mathbf{G}_M . Внутренний оператор \mathbf{G}_M устанавливает связь между состояниями системы и ее выходными характеристиками в ПП. Подмножества управляемых параметров $\mathbf{P} = (p_1, p_2, \dots, p_n)$, выходных параметров $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ и управляющих параметров $\mathbf{U} = (u_1, u_2, \dots, u_p)$ формируют ПП ММ. При помощи скалярной свертки векторов управляемых и управляющих параметров, соответственно \mathbf{P} и \mathbf{U} формируется образ вектора выходных параметров. Вместе с описанием ПС, определенным множествами \mathbf{M} , \mathbf{V} , \mathbf{Q} и отображениями Γ_1 и Γ_2 (рис. 7), использование согласованного параметрического описания характеристик отдельных элементов — \mathbf{P} и всей проектируемой ТС в целом — \mathbf{Y} , в виде скалярной свертки, позволяют установить необходимую для процесса проектирования связь между ними во временной области $T = (t_0, t_1, t_2, \dots, t_n)$.

Таким образом, для формализованного описания состояний проектируемой ТС в ПП, определенного в обозначениях рассматриваемой ММ, имеем $\mathbf{Y}(t) = \mathbf{G}_M(\mathbf{S}(t), \mathbf{U}, \Gamma, \Omega)$, следовательно, для единичных мгновенных состояний проектируемой ТС в ПП: $y(t) = \eta(s(t), u(t))$, $u(t) \in \Omega$, $y(t) \in \Gamma$, где $\eta \in \mathbf{G}_M$.

4.5. Идентификация модели процесса проектирования просветной РЛС

Формально описать этапы процесса проектирования просветной РЛС, т. е. фактически идентифицировать модель проектирования в пространстве состояний (структур) можно, представив ее в виде трехфазного процесса трансформации структуры проектируемой РЛС (рис. 7). Следует заметить, что предлагаемая схема процесса проектирования, реализуемая в модели, формально отражает основные этапы конструирования РЛС с заданными характеристиками из имеющегося набора исходных компонентов, из которых и «собирается» радар.

Аналогичные модели и процесс их идентификации апробированы в различных приложениях [17, 21–24] и зарекомендовали себя как хорошее средство адекватного моделирования и описания процессов проектирования разнообразных технических систем.

Рассмотрим задачу проектирования РЛС как распределенной системы \mathbf{Q} , состоящей из объектно-ориентированных модулей-наборов (ООН) \mathbf{Q}_i , реализующих процессы управления на рабочих станциях \mathbf{V}_j [21, 22] и формируемых в процессе интерактивного взаимодействия разработчика и системы проектирования из элементов $m_i \in \mathbf{M}$ проблемно-ориентированного набора (ПОН) — \mathbf{M} (рис. 8). Для идентификации ММ в пространстве состояний процесс формирования ООН описывается отображением $\Gamma: \mathbf{M} \rightarrow \mathbf{Q}$. При описании операций передачи модулей между базовым множеством \mathbf{M} , множеством маршрутов \mathbf{V} и множеством ООН — \mathbf{Q} исходное отображение $\Gamma: \mathbf{M} \rightarrow \mathbf{Q}$ целесообразно разбить на два уровня: $\Gamma_1: \mathbf{M} \rightarrow \mathbf{V}$ и $\Gamma_2: \mathbf{V} \rightarrow \mathbf{Q}$. Доказывается [25], что универсальным математическим аппаратом

для описания состояний элементов проектируемой ТС $m_i \in \mathbf{M}$ с учетом неопределенности условий вхождения в различные ООН является нечеткое множество (НМ) \tilde{A} , заданное на базовом множестве \mathbf{M} и образованное прямым отображением $\Gamma: \mathbf{M} \rightarrow \mathbf{Q}$:

$$\begin{aligned} \tilde{A}(m_i) &= \{ \langle \mu_{Q_i}(m_i), \mathbf{Q} \rangle \} = \\ &= \{ \mu_{Q_1}(m_i) / \mathbf{Q}_1; \mu_{Q_2}(m_i) / \mathbf{Q}_2; \dots; \mu_{Q_i}(m_i) / \mathbf{Q}_i; \dots; \mu_{Q_m}(m_i) / \mathbf{Q}_m \}, \end{aligned}$$

где $\mu_{Q_i}(m_i)$ — степень принадлежности m_i к ООН \mathbf{Q}_i ; $n = |\mathbf{M}|$; $m = |\mathbf{Q}|$.

Состояния элементов $m_i \in \mathbf{M}$ в наборах \mathbf{V}_j описываются НМ:

$$\begin{aligned} \tilde{B}(m_i) &= \{ \langle \mu_{V_j}(m_i), \mathbf{V} \rangle \} = \\ &= \{ \mu_{V_1}(m_i) / \mathbf{V}_1; \mu_{V_2}(m_i) / \mathbf{V}_2; \dots; \mu_{V_j}(m_i) / \mathbf{V}_j; \dots; \mu_{V_m}(m_i) / \mathbf{V}_m \}, \end{aligned}$$

где $\mu_{V_j}(m_i)$ — степень принадлежности элемента $m_i \in \mathbf{M}$ к модулю \mathbf{V}_j .

Состояния модулей-наборов $\mathbf{V}_j \subset \mathbf{V}$ описываются НМ:

$$\begin{aligned} \tilde{C}(m_i) &= \{ \langle \mu_{Q_i}(\mathbf{V}_j), \mathbf{Q} \rangle \} = \\ &= \{ \mu_{Q_1}(\mathbf{V}_j) / \mathbf{Q}_1; \mu_{Q_2}(\mathbf{V}_j) / \mathbf{Q}_2; \dots; \mu_{Q_i}(\mathbf{V}_j) / \mathbf{Q}_i; \dots; \mu_{Q_m}(\mathbf{V}_j) / \mathbf{Q}_m \}, \end{aligned}$$

где $\mu_{Q_i}(\mathbf{V}_j)$ — степень принадлежности модуля \mathbf{V}_j к ООН \mathbf{Q}_i .

Геометрической интерпретацией варианта объекта в пространстве параметров при идентификации ММ в пространстве параметров является точка в n -мерном Евклидовом пространстве внутренних параметров, в котором для каждой из n управляемых переменных выделена соответствующая координатная ось [25]. Модель проектируемых объектов идентифицируется в пространстве параметров с использованием соотношений, полученных в п. 4.2.

Полученный в результате вариант модели, идентифицированный в пространстве состояний (структуры РЛС) приведен на рис. 8.

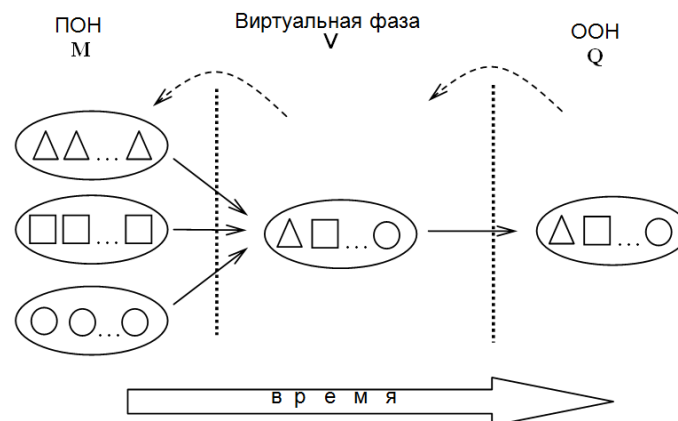


Рисунок 8. Формальное описание (модель) процесса проектирования

Треугольниками на рисунке показаны варианты геометрических параметров системы (длина волны, расстояние между передатчиком и приемником, и т. д.); квадратиками — различные виды сигнала (монохроматический сигнал, модулированный сигнал, или как подвид последнего — импульсный сигнал); кружочками — структура приемника, которая определяет первичные измеряемые параметры и в конечном счете точность и выходные параметры, получаемые заказчиком. Исходными предпосылками к созданию системы является техническое задание, в котором описаны предназначение системы (классы обнаруживаемых объектов), место размещения системы (наземное, на подвижных носителях и т. д.), требуемые характеристики обнаружения и сопровождения и т. д.

Здесь следует отметить приоритетное построение просветной РЛС с непрерывным излучением, например, монохроматическим [5, 6, 11], или излучением на двух гармониках [7]. Данный приоритет связан с одновременным воздействием на приемник прямого и рассеянного сигнала при относительно небольшой временной разнице между ними [28], а также традиционной схеме построения просветных радиолокаторов с прямым сигналом в качестве опорного и использованием амплитудного детектирования для выделения колебания доплеровской частоты [5, 27–29].

Стрелками на рис. 8 обозначены переходы от одной фазы к другой — эти переходы осуществляются последовательно во времени. Пунктирными стрелками показаны возможные возвраты и изменения выбора тех или иных вариантов элементов и параметров системы. Такие возвраты возможны, например, в случае моделирования системы (виртуальной фазы) [21, 22] и при невыполнении заранее заложенных техническим заданием требований.

4.6. Структурная идентификация модели просветной системы

Очевидно, что вопросы, касающиеся внутреннего устройства и функционирования системы, невозможно решить только с использованием модели «черного ящика». Для этого необходимы более развитые модели — модели состава и функционирования просветного радиолокатора.

Простейшая модель состава может быть получена на основе рис. 1 и состоять всего из четырех классов элементов, располагаемых в виде матрицы (рис. 9).

В общем случае передатчики излучают разные сигналы; также в системе может осуществляться переключение от одного передатчика к другому. В состав радиолокационной системы могут входить несколько приемников, причем с различной структурой (определяемой типом зондирующего сигнала и типом объекта, а также геометрическими размерами системы). На рис. 9 изображено несколько заказчиков (З) и несколько объектов (Об), что является вполне возможной ситуацией. Причем объекты могут быть различного характера (в том числе и создающие помехи). То же относится и к заказчику (потребителю), каждый из которых может потребовать разную информацию по результатам радиолокационного наблюдения.

На начальном этапе анализа и проектирования, с целью определения методов и алгоритмов обработки сигнала и траекторной обработки целесообразно рассмотреть работу системы с одним объектом и одним потребителем информации о координатах объекта — именно такой случай является исходным пунктом изучения любого радиолокатора.



Рисунок 9. Комбинационная модель состава просветной РЛС, состоящая из множества блоков: передатчиков (П_i), приемников (Пр_i), объектов (Об_i) и заказчиков (З_i)

Указание связи между элементами модели (рис. 9) позволяет перейти к модели следующего уровня — модели структуры или структурной схеме, в которой описано взаимодействие между элементами радиолокатора.

5. Возможности применения проектных моделей при разработке просветных РЛС

Одной из наиболее важных задач проектирования является использование методов и средств системного анализа с целью разработки предпосылок создания проектных ММ просветных РЛС с различной конфигурацией. Разработка и исследование таких ММ позволяет определиться с выбором в пользу того или иного структурного решения в зависимости от задач создаваемой просветной системы с использованием структурной идентификации (п. 4.5). Основное внимание при этом уделено вторичной обработке информации, исходным параметром которой является вектор первичных измерений \vec{z} . Приведенные в предыдущих разделах положения позволили создать условия для проведения системного анализа процесса проектирования просветных РЛС и получить важные для данной предметной области результаты [7, 11, 26].

Далее приводятся разные варианты функциональных схем просветных РЛС, полученные в результате структурной идентификации проектной модели в ПС, а также даются краткие содержательные комментарии к полученным решениям.

На рис. 10 рассмотрена модель структуры простейшего просветного радиолокатора. В виде отдельных блоков учтены времена распространения t_3 и $t_{пр}$ рассеянного и прямого сигналов соответственно. Блок K_p — коэффициент передачи объекта, учитывает рассеивающие свойства объекта.

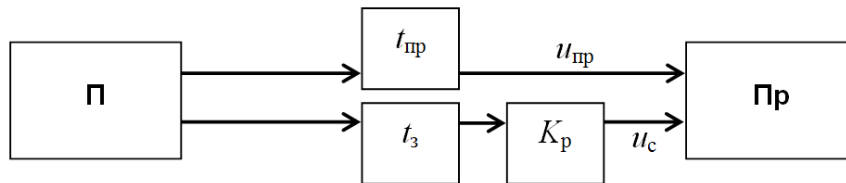


Рисунок 10. Структурная схема просветного радиолокатора с одним передатчиком (П) и одним приемником (Пр): $u_{пр}$ — прямой сигнал; u_c — рассеянный сигнал

Далее для определенности будем полагать, что объект находится на достаточно больших расстояниях от передатчика и приемника в окрестности отрезка, их соединяющего. При движении объекта значения t_3 и K_p меняются. Блок K_p — коэффициент передачи объекта, учитывает рассеивающие свойства объекта. Совокупность блоков t_3 и K_p описывает рассеивающий объект.

При движении объекта значения t_3 и K_p меняются. Коэффициент K_p учитывает медленные изменения амплитуды и фазы сигнала, обусловленные диаграммой направленности теневой апертуры A . Быстрые изменения, связанные с движением объекта, учитываются в изменении фазы принимаемого сигнала $\phi_3 = -\omega t_3$, ω — частоты несущего колебания. Производная последней определяет доплеровское смещение (доплеровскую частоту), на которое отличается частота принимаемого колебания от зондирующего.

Приемник просветной РЛС, в свою очередь, можно представить в виде последовательного соединения блоков оценки первичных параметров \vec{z} (доплеровской частоты рассеянного сигнала [8, 27], задержки рассеянного сигнала относительно прямого и т. д.) и траекторных параметров $\vec{\chi}$ (рис. 11).

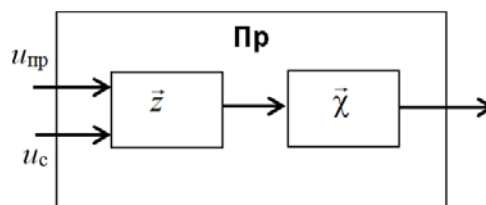


Рисунок 11. Структурная схема приемника простейшего просветного радиолокатора

На этапе разработки алгоритмов определения координат и траекторного сопровождения (данная задача имеет особую значимость с учетом особенностей просветной РЛС — узости зоны действия системы и необходимости учета влияния прямого сигнала, а ее решение в значительной степени определяет конструкцию приемника и возможности радиолокатора [7, 11, 28]) следует положить, что вектор $\vec{\chi}$, вычисляемый по вектору \vec{z} , состоит из набора траекторных параметров и(или) текущих координат. После оценки вектора $\vec{\chi}$ информация может передаваться на пункт обработки информации (ПОИ, см. рис. 3) либо потребителю.

Применяемая при проектировании ММ является динамической и может быть построена на основе решения задачи статистического оценивания вектора $\vec{\chi}$ по вектору наблюдений \vec{z} [7–9, 27]:

$$\vec{z} = \vec{h}(\vec{\chi}) + \Delta\vec{z}, \quad (6)$$

где вектор ошибок $\Delta\vec{z}$ распределен нормально [8, 28]; $\vec{h}(\vec{\chi})$ — векторная функция, определяющая зависимость первичных параметров от траекторных параметров.

Можно положить, что вектор \vec{z} состоит из набора сделанных последовательно измерений доплеровской частоты f или доплеровских частот в разнесенных приемниках или доплеровской частоты и угловой координаты φ (или угловых координат). Не исключены и другие комбинации параметров. Так, вектор \vec{z} могут составить оценки частот, задержек Ξ рассеянного сигнала относительно прямого и углов в разнесенных пунктах [7].

Если допустить, что приемник принимает сигнал в единственной точке пространства (такое допущение позволяет отказаться от условностей, связанных с измерением угла рассредоточенной (протяженной) в пространстве приемной антенной системой), то в зависимости от типа зондирующего колебания и обработки сигнала первичными измеряемыми параметрами в одиночном пункте могут быть задержка Ξ рассеянного сигнала относительно прямого сигнала передатчика или доплеровская частота f .

К недостаткам схемы просветной РЛС с одиночным передатчиком и приемником (рис. 10) следует отнести невозможность оценки большинства траекторных параметров [27]. Поэтому возникает вопрос создания систем с несколькими приемниками, которые взаимодействуют между собой (рис. 12).

Как видно из рис. 12, в системе в этом случае появился новый блок синхронизации. Временная синхронизация является ключевым условием совместного функционирования отдельных частей в сложной системе (рис. 3) [2, 12]. Кроме этого, возможно, что часть операций блока вторичной обработки $\vec{\chi}$ может быть делегирована в приемники $Пр_1$ и $Пр_2$. Появление у системы двух идентичных приемников аналогично появлению у системы еще одной степени свободы и приводит к возможности однозначной оценки координат объекта, движущегося в плоскости расположения передатчика и приемников. Здесь же отметим, что добавление еще одного (третьего) приемника, расположенного не в одной плоскости с предыдущими

приемниками, добавляет очередную степень свободы и возможность определения пространственного положения объекта.

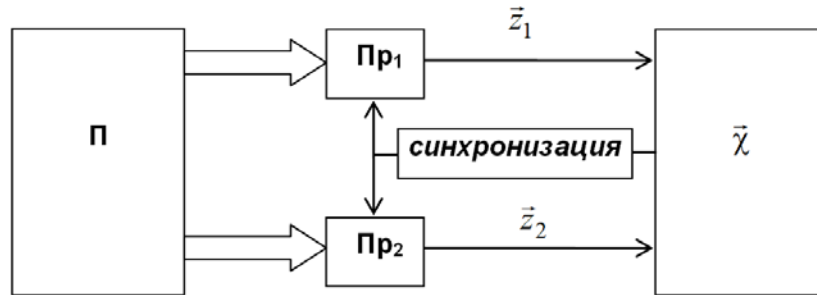


Рисунок 12. Структурная модель просветного радиолокатора с двумя приемниками.
Утолщенные стрелки учитывают совместное воздействие на приемник
прямого и рассеянного сигналов

Условно процесс преобразования вектора \vec{z} в вектор $\vec{\chi}$ в просветном радиолокаторе можно представить в виде двух следующих друг за другом блоков (рис. 13).

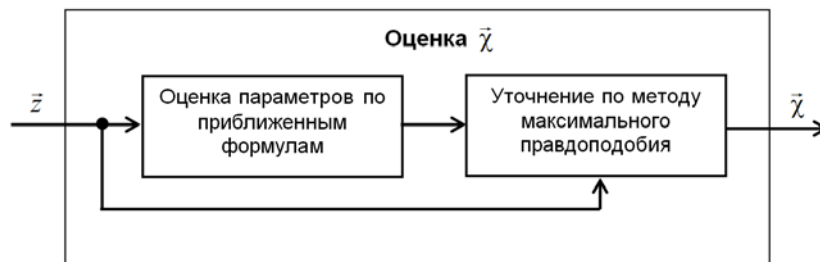


Рисунок 13. Схема блока оценки траекторных параметров

Качественная начальная оценка координат в блоке «Оценка параметров по приближенным формулам» является залогом успешной работы всей системы траекторной обработки. В зависимости от конфигурации РЛС — количества позиций и их взаимного расположения — найдены различные способы (формулы) получения начальной оценки координат и правила их применения. Показано, что разработанные способы дают высокую точность и являются надежным основанием для проведения последующей формальной процедуры — уточнения параметров траектории методом максимального правдоподобия [7, 8, 11, 27, 30]. Последний блок в схеме (рис. 13) может быть выполнен также на основе и других известных методов фильтрации первичных измерений [2, 9, 12].

Необходимо отметить, что для идентификации рассмотренных проектных моделей в ПП использовались обобщенные кибернетические модели просветной си-

стемы (4), (5) и динамическая ММ наблюдений (6). Перечень и назначение различных параметров определялись разработчиком, а внутренние операторы ММ (4) задавались в соответствии с соображениями, приведенными в п. 4.4 настоящей статьи и в [16].

6. Заключение

Таким образом, применение принципов системного подхода, выраженное в проведенном системном анализе актуальной проблемы проектирования просветных РЛС, позволило получить математические модели и прикладные способы их структурной и параметрической идентификации. В результате хронологического анализа развития идеи радиолокации «на просвет» построена и обоснована феноменологическая модель эволюции просветных РЛС, и на ее основе, построена и идентифицирована математическая модель, предназначенная для применения при анализе, разработке и проектировании радиосистем подобного класса. Показаны результаты исследования, структурной и параметрической идентификации получаемых при этом различных вариантов построения систем, описываемых разными динамическими моделями и характеризующихся разными возможностями по эффективности решения основной задачи РЛС – определению координат объекта.

Литература

- [1] Ширман Я. Д., Голиков В. Н., Бусыгин И. Н. и др. Теоретические основы радиолокации: учебное пособие для вузов / под ред. Я. Д. Ширмана. — М. : Сов. радио, 1970.
- [2] Бакулев П. А. Радиолокационные системы : учебник для вузов. — М. : Радиотехника, 2004.
- [3] Лезин Ю. С. Введение в теорию и технику радиотехнических систем : учеб. пособие для вузов. — М. : Радио и связь, 1986.
- [4] Уфимцев П. Я. Основы физической теории дифракции. — М. : БИНОМ, 2011.
- [5] Бляхман А. Б., Рунова И. А. Бистатическая эффективная площадь рассеяния и обнаружение объектов при радиолокации на просвет // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 4. С. 424–432.
- [6] Чапурский В. В. Синтезированная теневая радиоголография в бистатической радиолокации // Радиотехника. 2009. № 3. С. 52–69.
- [7] Ковалев Ф. Н., Кондратьев В. В. Особенности угломерно-дальномерного метода определения местоположения цели в просветных бистатических радиолокаторах // Журнал Радиотехники : электронный журнал. 2014. № 4. (<http://jre.cplire.ru/jre/apr14/1/text.pdf>).
- [8] Рындык А. Г., Сидоров С. Б., Бляхман А. Б., Ковалев Ф. Н. Точность определения координат методом максимального правдоподобия при локации «на просвет» // Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44. № 12. С. 1436–1440.

- [9] Бляхман А. Б., Ковалев Ф. Н., Рындык А. Г. Метод определения координат движущихся целей в бистатической РЛС // Радиотехника. 2001. № 1. С. 4–9.
- [10] Бляхман А. Б., Матюгин С. Н. Распознавание воздушных объектов при радиолокации на просвет // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 11. С. 1356–1360.
- [11] Ковалев Ф. Н., Кондратьев В. В. Фазовая пеленгация в системах радиолокации на просвет // Доклады Академии наук. 2014. Т. 455. № 4. С. 401–403.
- [12] Черняк В. С. Многопозиционная радиолокация. — М. : Радио и связь, 1993.
- [13] Ковалев А. Н., Ковалев Ф. Н. Статистические характеристики ошибок местопредопределения цели в бистатической радиолокационной системе просветного типа // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2014. Т. 57. № 3. С. 3–9.
- [14] Хранилов В. П. Математическая модель развития комплекса обеспечений автоматизированных систем // Материалы всероссийской научно-методической конференции: Информационные технологии в учебном процессе. — Н. Новгород : НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2007. С. 214–220.
- [15] Хранилов В. П. Хронологический анализ эволюционного развития комплекса обеспечений автоматизированных систем // Материалы всероссийской научно-методической конференции: Информационные технологии в учебном процессе. — Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2007. С. 220–223.
- [16] Хранилов В. П. Идентификация внутренних операторов моделей управления для задач проектирования технических систем // Тр. XII Всероссийск. совещания по проблемам управления ВСПУ–2014. — М. : ИПУ РАН им. В. А. Трапезникова, 2014. С. 3281–3288.
- [17] Хранилов В. П. Классификация состояний в динамических дискретных системах распределения вычислительных ресурсов информационных систем // Материалы международного симпозиума INTELS'2010 / под. ред. К. А. Пупкова. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. С. 90–94.
- [18] Системный анализ и принятие решений: словарь-справочник / под. ред. В. Н. Волковой, В. Н. Козлова. — М. : Высшая школа, 2004.
- [19] Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. — М. : Наука, 1978.
- [20] Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем / под. ред. Я. З. Цыпкина. — М. : Мир, 1971.
- [21] Хранилов В. П. Динамическая модель интерактивного виртуального распределения ресурсов при проектировании технических систем // Материалы международного симпозиума INTELS'2008 / под ред. К. А. Пупкова. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. С. 234–238.
- [22] Хранилов В. П. Нечеткая модель динамической системы интерактивного распределения ресурсов при проектировании и ее приложения // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2007. № 2. С. 32–41.

- [23] *Хранилов В. П., Тесленко Е. В., Андреев В. В.* Формирование динамической модели управления конструкторско-технологическим взаимодействием в проектировании деталей машиностроения // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 3. С. 286–290.
- [24] *Гунин Л. Н., Кашенков А. В., Хранилов В. П.* Идентификация математической модели внедрения CALS-технологий на предприятии радиоприборостроения // Идентификация систем и задачи управления: тр. 9-й международной конференции. — М.: ИПУ РАН им. В. А. Трапезникова, 2012. С. 266–278.
- [25] Диагностика оборудования компрессорных станций : монография серии «Научные труды к 45-летию ОАО «Гипрогазцентр» / А. Ф. Пужайло, О. В. Крюков, Э. С. Соколова, В. П. Хранилов [и др.] / под ред. О. В. Крюкова. Т. 2. — Н. Новгород : Исток, 2013.
- [26] *Ковалев Ф. Н., Кондратьев В. В.* Устранение неоднозначности измерений угловых координат фазовым методом в просветных радиолокаторах // Оборонный комплекс научно-техническому прогрессу России. 2014. № 3 (123). С. 31–35.
- [27] *Ковалев Ф. Н.* Определение координат движущихся целей по измерениям доплеровской частоты в радиолокационных системах с обнаружением «на просвет» // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 3. С. 331–339.
- [28] *Nezlin D.V. [et al].* Bistatic Radar. Principles and Practice / ed.: M. Cherniakov. — England: Wiley, 2007.
- [29] *Ковалев А. Н., Ковалев Ф. Н.* Определение координат движущейся цели в просветной многопозиционной радиолокационной системе // Вестник РГРТУ. 2013. № 4–1 (46). С. 46–49.

Авторы:

Ковалев Федор Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных радиосистем института радиоэлектроники и информационных технологий Нижегородского государственного технического университета имени Р. Е. Алексеева

Хранилов Валерий Павлович, доктор технических наук, доцент, заместитель директора института радиоэлектроники и информационных технологий, профессор кафедры компьютерных технологий в проектировании и производстве Нижегородского государственного технического университета имени Р. Е. Алексеева

Identification of Model of Forward-Scattering Radar on Different Stages of Engineering Design of Radar System

F. N. Kovalev, V. P. Khranilov

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev
24 Minin Street, Nizhny Novgorod, 603950 Russia
E-mail: kovalev@nntu.nnov.ru, khranilov@nntu.nnov.ru

Abstract. The results of the system analysis and identification of forward-scattering radar system are considered. The problems and the tasks of forward-scattering radar system are considered; phenomenological model of the chronological evolution of forward-scattering radar systems is constructed and justified. On the basis of this model is constructed and identified mathematical model for development, design and analysis of forward-scattering radar systems. The main attention in the article is paid to research, modeling, structural and parametric identification of various options for building systems. These variants of radar system are describes of the different dynamic models and are characterized of the different opportunities in solving the problem of determining the coordinates of the object.

Keywords: design model, cybernetic model "black box", model identification, structural identification, parametrical identification, forward-scattering radar, forward-scattering radar system, evolution of forward-scattering radar systems, system model, space of parameters, space of states, design model in space of states, structural synthesis, parametric synthesis, control of parameters of forward-scattering radar.

Reference

- [1] Shirman Y. D. (Ed.) (1970) *Theoretical foundations of radiolocation*. Moscow: Sovetskoe Radio. (In rus.)
- [2] Bakoulev P. A. (2004) *Radar systems*. Moscow: Radiotekhnika, 2004. (In rus.)
- [3] Lezin Y. S. (1986) *Introduction to the theory and technique of radio systems*. Moscow: Radio i svyaz. (In rus.)
- [4] Ufimtsev P. Ia. (2011) *Fundamentals of the physical theory of diffraction*. Moscow: BINOM. (In rus.)
- [5] Blyakhman A. B., Runova I. A. (2001) Bistatic radar cross section and the detection of objects from their forward scatter. *Radio engineering and electronics*, 46(4), 424–432. (In rus.)
- [6] Chapursky V. V. (2009) The Synthesized Shadow Radioholography in Bistatic Radiolocation. *Radiotekhnika*. 3, 52–69.

- [7] Kovalev F. N., Kondrat'ev V. V. (2014) Features of the estimating the target location in forward-scattering bistatic radar systems. *JOURNAL OF RADIO ELECTRONICS: electronic journal*, 4. (<http://jre.cplire.ru/jre/apr14/1/text.pdf>.) (In rus.)
- [8] Ryndyk A. G., Sidorov S. B., Bliakhman A. B., Kovalev F. N. (1999) Accuracy of estimation the target coordinates by the maximum likelihood method using a forward scatter radar. *Radio engineering and electronics*, 44(12), 1436–1440. (In rus.)
- [9] Bliakhman A. B., Kovalev F. N., Ryndyk A. G. (2001) The method of determining the coordinates of a moving target in forward-scatter radar. *Radiotekhnika*. 1, 4–9. (In rus.)
- [10] Bliakhman A. B., Mat'ugin S. N. (2001) Recognition of flying object in the forward-scattering radar systems. *Radio engineering and electronics*, 46(11), 1356–1360. (In rus.)
- [11] Kovalev F. N., Kondrat'ev V. V. (2014) Phase direction finding in forward-scattering radars. *Doklady Physics*, 59(4), 173–175.
- [12] Chernyak V. S. (1993) *Multistatic radar*. Moscow: Radio i svyaz. (In rus.)
- [13] Kovalev A. N., Kovalev F. N. (2014) Statistical characteristics of target location finding error in bistatic forward scattering radars. *Izvestia vuzov. Radioelectronics*, 57(3), 3–9. (In rus.)
- [14] Khranilov V. P. (2007) Mathematical model of development of a complex wares of the automated systems. Proceedings of the All-Russia scientific — methodical conference: *Information technologies in educational process*. N. Novgorod: NNSTU, 2007? pp. 214–220. (In rus.)
- [15] Khranilov V. P. (2007) The chronological analysis of evolutionary development of a complex wares of the automated systems. Proceedings of the All-Russia scientific — methodical conference: *Information technologies in educational process*. N. Novgorod: NNSTU, pp. 220–223. (In rus.)
- [16] Khranilov V. P. (2014) Identification of the internal operators of models of management for tasks of designing of technical systems. Proceedings of the XII *All-Russian Conference on Control Problems*. RCCP-2014. Moscow: Institute of Control Sciences, pp. 3281–3288. (In rus.)
- [17] Khranilov V. P. (2012) Classification of statuses in dynamic discrete systems of distribution of computing resources of information systems. Proceedings of the 9 International Symposium «*Intelligent Systems*». INTELS'2012 / Ed. By K. A. Pupkov. Moscow: BMSTU, pp. 90–94. (In rus.)
- [18] Volkov V. N., Kozlov V. N. (eds.) (2004) *Systems analysis and decision making*. Moscow: Vusshaia shkola. (In rus.)
- [19] Buslenko N. P. (1978) *Modeling of Complex Systems*. Moscow: Nauka. (In rus.)
- [20] Kalman R. E., Falb P. L., Arbib M. A. (1971) *Topics in mathematical system theory*.
- [21] Khranilov V. P. (2008) Dynamic model of interactive virtual distribution of resources at designing technical systems. Proceedings of the 8 International Symposium: Intel-

- igent Systems INTELS'2008 / Ed. By K.A.Pupkov. Moscow: BMSTU, pp. 234–238. (In rus.)
- [22] *Khranilov V. P.* (2007) Fuzzy Sets model of dynamic system of interactive distribution of resources at designing and its application. *Information technologies in designing and manufacture*, 2, 32–41. (In rus.)
- [23] *Khranilov V. P., Teslenko E. V., Andreev V. V.* (2013) Formation of dynamic model of management of Design-technological interaction in designing details of mechanical engineering. *Scientific and Technical bulletin Volga*, 3, 286–290. (In rus.)
- [24] *Gunin L. N., Kashenkov A. V., Khranilov V. P.* (2012) Identification of mathematical model of introduction of CALS-technologies not the enterprise of radioinstrument making. *System identification and control problems: Proceedings of the 9 international Conference SICPRO'03*. Moscow: Institute of Control Sciences, pp. 266–278. (In rus.)
- [25] *Kryukov O. V.* (ed.) (2013) Diagnostics of the equipment of compressor stations: the monography of a series «The Proceedings to 45- anniversary public joint-stock company «Giprogaztsentr»». *Puzhaylo A.F., Kryukov O.V., Sokolova E.S., Khranilov V.P. [et al]*. N.Novgorod: Istok, (In rus.)
- [26] *Kovalev F. N., Kondrat'ev V. V.* (2014) Liquidation the ambiguity of measurements of the angular coordinates by phase method in forward scattering radar systems. *Defense complex to scientific and technical progress of Russia*, 3(123), 31–35. (In rus.)
- [27] *Kovalev F. N.* (2007) Estimating the coordinates of a moving target from the Doppler data measured by forward-scattering radar systems. *Radio engineering and electronics*, 52(3), 331–339. (In rus.)
- [28] *Cherniakov M.* (ed.) (2007) *Bistatic Radar. Principles and Practice*. D. V. Nezlin [et al]. England: Wiley.
- [29] *Kovalev A. N., Kovalev F. N.* (2013) Estimating the coordinates of a moving target in forward-scattering multistatic radar system. *Vestnik RSREU*. 4–1(46), 46–49. (In rus.)