

**СОСТАВ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕМАТИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ – ЦИФРОВОМУ «ДВОЙНИКУ» ПОДСИСТЕМЫ ПЕРВИЧНОЙ
ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ С
СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ СПУТНИКА ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Радионович В.В.¹, аспирант

Лобан М.А.², инженер

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Козлов С.В. – доктор техн. наук

Аннотация. В статье рассмотрена актуальность создания цифрового двойника (ЦД) радиолокатора с синтезированием апертуры антенны (РСА) спутника системы дистанционного зондирования Земли. Обоснованы основные требования, предъявляемые к ЦД РСА. Приведена структура ЦД, перечень моделируемых составных частей аппаратуры и алгоритмов обработки информации. Рассмотрен вопрос выбора языка программирования высокого уровня для реализации ЦД.

Ключевые слова. Цифровой двойник, синтезирование апертуры, активная фазированная антенная решетка, диаграммообразование, среда программирования.

Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) космического базирования являются эффективным средством получения оперативной и долговременной информации о состоянии и динамике объектов и районов земного шара в глобальных и региональных масштабах независимо от метеорологических условий и времени суток [1]. Именно из-за независимости от погоды и освещенности, а также из-за высокого разрешения получаемого изображения, для решения задач ДЗЗ используются радиолокаторы с синтезированием апертуры (РСА) [1,2].

Создание цифровых двойников, а также моделирование различных процессов, протекающих в оборудовании, очень важно из-за экономии времени и ресурсов. Для обеспечения надежности и безопасности дорогостоящего высокотехнологичного оборудования необходимо резкое увеличение числа испытаний, которые, несомненно, быстрее и дешевле делать в виртуальном пространстве на стадии проектирования, чем на реальном оборудовании. А если речь идет об аппаратуре космического базирования, то практические испытания провести еще сложнее, так как необходимо еще воссоздавать условия наблюдения земной поверхности с заданной орбиты. Поэтому разработка цифрового двойника аппаратуры радиолокационного наблюдения космического базирования является, безусловно, актуальной задачей.

У самого термина «цифровой двойник» довольно много толкований [3-6, 8] – от самого широкого, когда цифровым двойником называют все проекты, где создают любую цифровую копию живого или неживого объекта, проекта или системы, до специализированного наукоемкого толкования, когда цифровыми двойниками называют решение, которое соответствует выполнению целого ряда жестких требований, направленных на повышение уровня адекватности: наличие мультифизической модели, моделирование материалов на микро- и макроуровне, одновременное наличие физических и статистических моделей, основанных на эксплуатационных данных, получаемых от датчиков, передаче данных физическим и цифровым двойниками в реальном времени.

В некоторых определениях [4, 5] речь идет только о виртуальной части (модели), состоящей из двух частей: «цифровой мастер», «цифровая тень». Цифровой мастер содержит информацию, достаточную для изготовления аппаратуры (системы) с определенными свойствами, а цифровая тень – набор данных, получаемых от датчиков, и модель, которая позволяет прогнозировать свойства объекта в определенных пределах [4]. Применительно к РСА цифровой мастер должен содержать информацию о том, как изготавливать радиолокатор: массогабаритные параметры самого спутника, антенной решетки, панелей солнечных батарей, конкретные характеристики по стабильности частоты опорного генератора, емкости аккумуляторных батарей и т.д.. А цифровая тень, используя информацию от датчиков и модель, способна прогнозировать работоспособность отдельных модулей и системы при решении как известных, так и новых задач, а также получать количественные оценки эффективности решения указанных задач в различных условиях съемки и в различных сигнально-помеховых ситуациях.

Такое многообразие толкований и определений имеет тесную связь с развитием возможностей моделирования. На сегодняшний день процесс моделирования можно улучшить и упростить средствами визуализации, использованием готовых библиотек, модулей, а также программ для поиска ошибок. Поэтому моделирование является обязательной частью проектирования, а уровень детализации с использованием современных вычислительных средств может быть настолько подробным, что модель можно назвать цифровым двойником. В перспективе, разработанная модель может быть использована и при эксплуатации для контроля состояния оборудования. Исходя из вышесказанного, можно разбить процесс эволюции концепции цифровых двойников как показано на рисунке 1 [4].

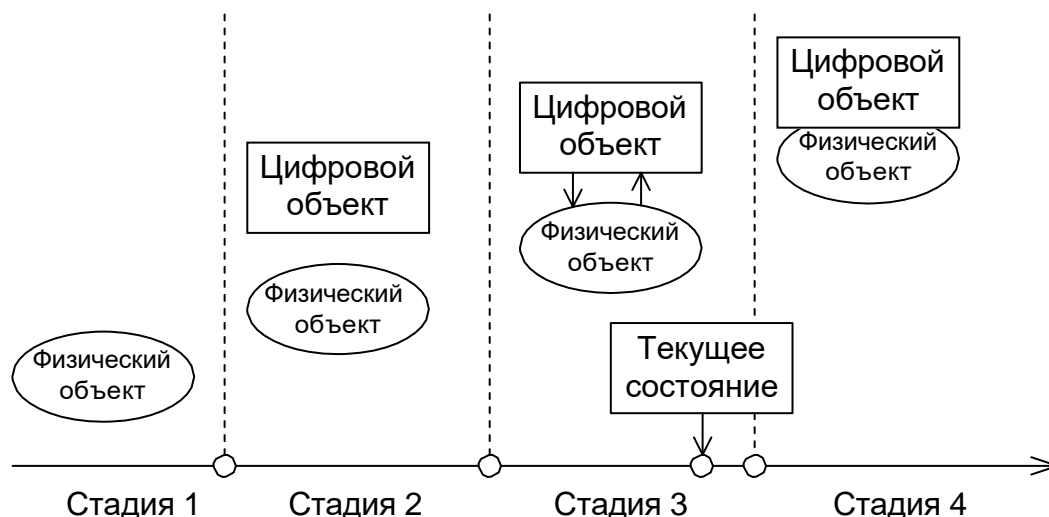


Рисунок 1 – Эволюция концепции цифровых двойников [4]

Первый этап развития цифровых двойников соответствует периоду, когда физические объекты создавались без цифрового прототипа. Второй этап относится к периоду, когда искусственные объекты проектировались с помощью цифровой модели, которая использовалась только на стадии создания объекта, что на рисунке 1 отражено самостоятельным (без пересечения) существованием физического и цифрового объекта. На третьем этапе начинается взаимодействие (обмен информацией) между физическим и цифровым двойниками. И, четвертый – характеризует сближение и «пересечение» физического и цифрового двойников, когда информационный обмен и обновление цифрового и физического двойников идет практически в реальном времени.

Создание цифрового двойника для РСА необходимо для того, чтобы проверить будет ли хотя бы модель функционировать, насколько достоверные данные будут от цифрового двойника, как будут взаимодействовать различные модули между собой, будет ли осуществляться правильное функционирование при различных новых и (или) нестандартных ситуациях.

Для создания цифрового двойника какого-либо оборудования необходимо проанализировать его составные части. Структурная схема бортовой РСА совместно с другими составными частями взаимодействующего оборудования, приведена на рисунке 2.

После определения структуры оборудования необходимо определить перечень задач по математическому моделированию для каждого их составных блоков. Например, модель модуля активной фазированной антенной решетки (АФАР) [13-17] должна обеспечивать решение следующих задач:

- расчета диаграммы направленности (ДН) модуля на передачу как функции частоты на горизонтальной или вертикальной поляризации с учетом ошибок установки амплитудно-фазового распределения на апертуре и межмодульной задержки зондирующих сигналов;
- расчет ДН на прием на горизонтальной и вертикальной поляризации как функции частоты с учетом ошибок установки амплитудно-фазового распределения на апертуре;
- формирование траекторного сигнала на выходе модуля с учетом внутреннего шума.

Модель процессора обработки сигналов должна обеспечить воспроизведение процессов анализа помеховой обстановки, формирование весовых коэффициентов адаптированных приемных каналов, весового суммирования сигналов модулей АФАР с учетом неравномерностей комплексных частотных характеристики приемных каналов, ошибок синхронизации по времени (джиттера) и частоте, разбаланса квадратурных смесителей и т.д. На выходе процессора обработки сигналов должны формироваться адаптированные траекторные сигналы в суммарном и разностных или интерферометрических приемных каналах с заданным положением фазовых центров.

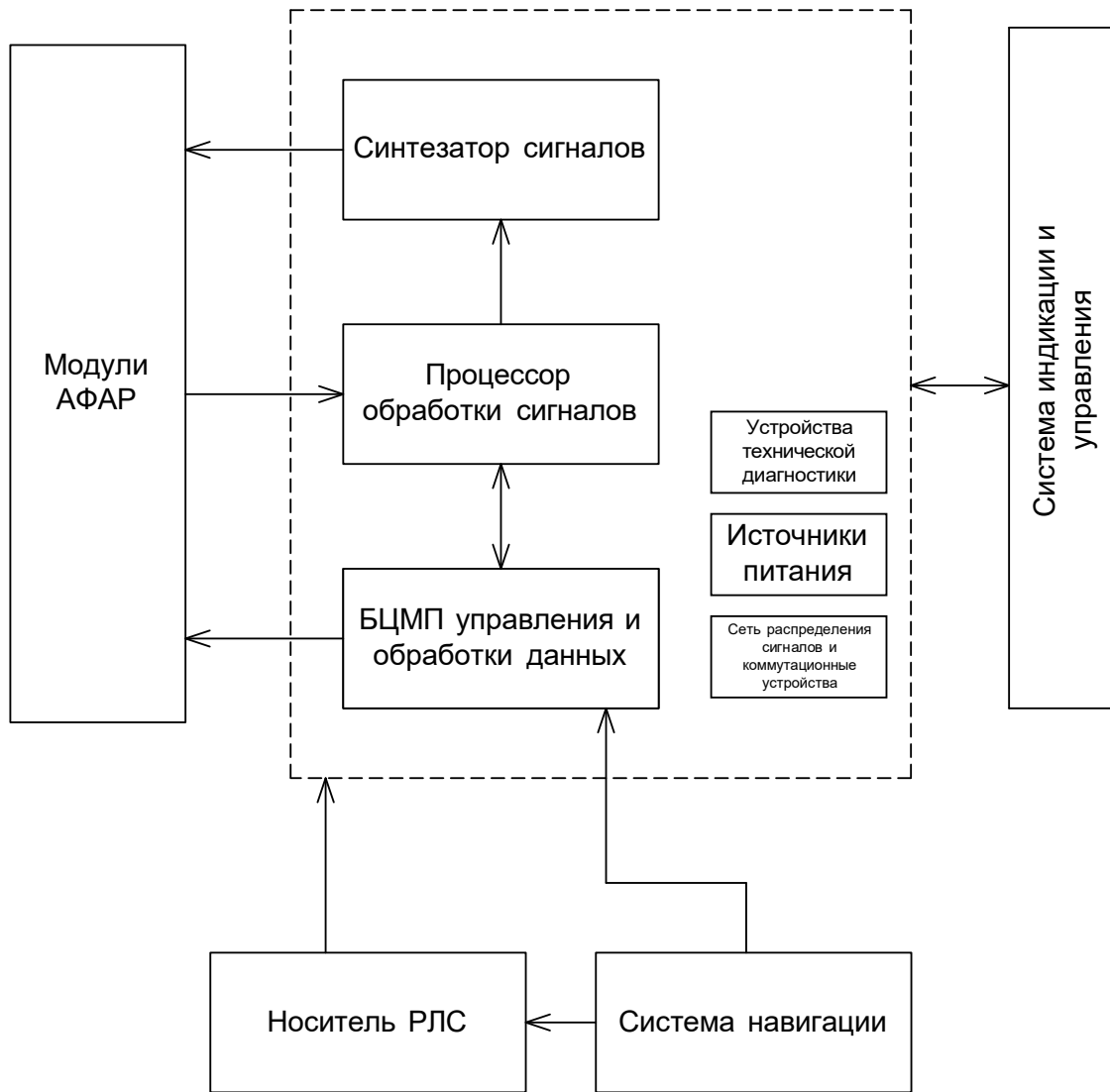


Рисунок 2 – Структурная схема бортовой аппаратуры РСА [2]

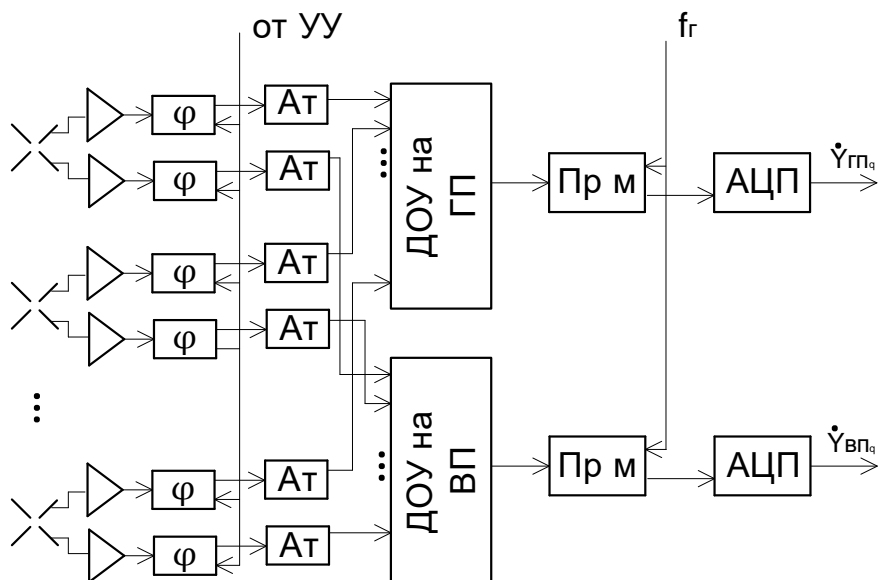


Рисунок 3 – Структурная схема модуля АФАР (приемные канал)

Модель синтезатора сигналов должна выдавать математический эквивалент колебаний заданной частоты, частот модуляции и преобразования для модулей АФАР с учетом ошибок при

распределении указанных сигналов между модулями АФАР. Так как модель является абстракцией, то запрограммировать высокостабильный опорный генератор, который присутствует в реальном синтезаторе частот, не составляет труда. Это обеспечит взаимную когерентность всех сигналов.

БЦВМ управления и обработки данных обеспечивает согласование работы и режимов всех устройств РСА и ее носителя в соответствии с задачей, а также обработку данных с выхода процессора.

Таким образом, математические модели модулей АФАР, синтезатора частот, БЦВМ управления и обработки, должны работать по следующему алгоритму. Формирование многоканального траекторного сигнала на двух поляризациях осуществляется в цифровых двойниках модулей АФАР. ЦД модулей АФАР взаимодействуют с ЦД опорного генератора и распределительной системы сигналов временной синхронизации и опорной частоты. Сформированный многоканальный сигнал является исходными данными для функционирования ЦД процессора обработки сигналов. На выходе ЦД процессора обработки формируются сигналы адаптированных приемных каналов и осуществляется их сжатие в согласованном фильтре внутрипериодной обработки.

Сформированный многоканальный сигнал сохраняется с памяти и с заданной периодичностью (при нахождении в зоне видимости) передается наземный пункт приема и обработки. Так как объем запоминаемых и передаваемых сигналов очень велик, то осуществляется сжатие сигналов с использованием соответствующего алгоритма адаптивного кодирования. Это сопровождается некоторым снижением качества, что требует разработки соответствующей модели – ЦД алгоритма кодирования.

Дальнейшая обработка проводится в цифровых двойниках наземного пункта приема и обработки информации, где осуществляется декодирование траекторных сигналов, формирование комплексных, амплитудных и фазовых РЛИ на двух поляризациях и измерение параметров (например, высоты точек земной поверхности) [1,2,11].

Цифровой двойник наземной аппаратуры РСА обязан поддерживать и различные режимы работы. На сегодняшний день в РСА космического базирования реализуются практически все типовые режимы съемки мониторинга земной поверхности. Наиболее распространенными и перспективными из них являются режимы [11]:

- полосовой съемки;
- телескопической (прожекторной) съемки;
- обнаружения наземных движущихся целей;
- видео РСА;
- когерентного обнаружения изменений;
- интерферометрической съемки;
- поляриметрический режим съемки.

Данные режимы уже активно используются в различных РСА для решения широкого круга задач – это и получение детальных РЛИ, и обнаружение наземных движущихся целей, непрерывное наблюдение заданного района и изменений обстановки в нем, также оперативная оценка отражающих свойств объекта при изменении ракурса его обзора, получение информации о высоте местности и объектов, которая может использоваться для визуализации трехмерных топографических изображений и обнаружения замаскированных объектов и т.д. [12].

Для адекватного воспроизведения обработки сигналов в наземном пункте необходимы цифровые двойники следующих процессов:

- компенсации линейной, квадратичной и, при необходимости, кубической миграции дальности и миграции частоты;
- формирования комплексных и амплитудных радиолокационных изображений приемных каналов с автофокусировкой (при необходимости) на горизонтальной и вертикальной поляризации;
- некогерентного накопления радиолокационных изображений и фильтрации спекл-шума;
- определение поляризационных параметров и степени когерентности элементов радиолокационного изображения;
- измерения угловых положений точек (пикселей) на радиолокационных изображениях горизонтальной и вертикальной поляризации путем моноимпульсных измерений или развертки интерферометрической фазы;
- преобразования построенных радиолокационных изображений из системы координат «продольная-поперечная дальность» в систему географическую координат; преобразование РЛИ в удобный для пользователя вид («раскрашивание» РЛИ на горизонтальной и вертикальной поляризации).

Разрабатываемые цифровые двойники должны с требуемой степенью детальности воспроизводить функционирование аппаратуры и реализуемых в ней алгоритмов функционирования.

Технологические цифровые двойники реализуются в виде комплекса взаимосвязанных программ (имитационных моделей), написанных на языке программирования высокого уровня. В настоящее время существует множество программных продуктов, которые позволяют осуществить создание ЦД

РСА. Основными из них являются Python, C++, C# и MATLAB. Можно долго рассуждать, какой из языков программирования является лучшим, но в реальности каждый обладает своими достоинствами и недостатками [9].

Python характеризуется простотой и легкостью прочтения кода, также он предоставляет доступ ко многим мощным библиотекам и их функциям. Данный язык программирования имеет большую популярность, поэтому сообщества Python могут дать ответы на вопросы, которые вам необходимы, в публичном доступе. Также язык имеет свои недостатки. Например, трудность в обнаружении ошибок, так как Python является интерпретируемым языком программирования.

В отличие от Python, язык C++ имеет высокие показатели в производительности и имеет легкую структуру кода. В большинстве случаев программы для «цифровых двойников» пишутся на C/C++. C# является одним из наиболее часто используемых языков программирования в производственной отрасли, но разработка программного обеспечения (ПО) ограничена операционной системой Windows. C#, как и Python, предоставляет широкий спектр библиотек.

Для разработки ПО используют кроссплатформенный фреймворк (Qt). Он позволяет запускать написанное с его помощью программное обеспечение в большинстве операционных систем путём простой компиляции программы для каждой системы без изменения исходного кода. Также многие программисты используют интегрированную среду обработки (Visual studio). Она, как и Qt, поддерживает несколько языков программирования. В их числе Python, C, C++, C# и др. В свою очередь Qt поддерживает различные компиляторы, включая набор Visual Studio.

MATLAB — это не просто язык, это целая среда программирования. MATLAB широко используется инженерами для анализа и моделирования своих проектов и алгоритмов, в том числе, создание ЦД. Данная среда характеризуется мощной системой для анализа данных, скоростью написания кода и реализацией сложного моделирования. MATLAB предоставляет возможность параллельных вычислений с использованием графических процессоров (graphics processing unit, GPU).

Существует программная система, которая находится в открытом доступе, использующая совместимый с MATLAB язык высокого уровня – это GNU Octave. Основная миссия данного программного продукта – это быть достойной заменой MATLAB. GNU Octave справляется с задачами лучше остальных открытых математических пакетов, демонстрируя результат сопоставимый с результатами в среде MATLAB.

Подводя итоги, язык программирования Python чаще используется для небольших и быстрых проектов. C# представляет собой баланс между производительностью и быстрыми результатами, но не может использоваться в других операционных системах, кроме как Windows. C++ и MATLAB являются наиболее удобными языками в реализации современных ЦД с требуемой надёжностью и производительностью.

С учетом всего вышесказанного можно обозначить конкретные требования к цифровому двойнику РСА. А именно:

- отражать структуру и характер рабочей миссии физического РСА
- с высокой детальностью воспроизводить функционирование аппаратуры и реализуемых в ней алгоритмов функционирования
- собирать данные о физическом состоянии РСА, и на основании этих данных делать прогноз о его состоянии.

Список использованных источников:

1. Леухин А.Н., Безродый В.И., Воронин А.А. Дистанционное зондирование Земли с помощью радиолокаторов с синтезированием апертуры антенны – Марийский государственный университет, г.Йошкар-Ола, 2018, С.25-41.
2. Конратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. – М.: «Радиотехника», 2005. – 368 с.
3. Минаев В.А., Мазин А.В., Здирук К.Б., Куликов Л.С. Цифровые двойники объектов в решении задач управления / В.А. Минаев, А.В. Мазин, К.Б. Здирук, Л.С. Куликов // Радиопромышленность. 2019. Т. 29, №3. С. 68-78.
4. Прохоров А., Лысачев М., Боровков А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное / Под ред. А. Боровкова – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.
5. Боровков А.И., Гамзикова А.А., Кукушкин К.В., Рябов Ю.А. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности. Краткий доклад (сентябрь 2019) – СПб.: ПОЛИТЕХПРЕСС, 2019. – 62 с.
6. Боровков А.И., Рябов Ю.А. Определение, разработка и применение цифровых двойников: подход Центра компетенций НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии» Цифровая подстанция. – 2019. - №12. – С. 20-25.
7. Керский Е.В., Балакин Д.А. Моделирование антенного радиоэлектронного комплекса средствами MATLAB и Simulink / Е.В. Керский, Д.А. Балакин // Центр инженерных технологий и моделирования «Экспонента».
8. Здирук К. Б. Применение цифровых двойников в системах управления сложными объектами [Электронный ресурс] // Экстремальные технологии и системы. URL: <https://www.extansy.com/> (дата обращения: 07.07.2019).
9. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир, 1978. 420 с.
10. Демьянов А.В., Губанов Д.В., Лазутин Р.Ю., Алешкин А.П. Модель функционирования космических радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны // Вопросы радиоэлектроники. 2017. №9. С. 78-84.
11. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.

12. Балакин Д.А., Керский Е.В. Разработка цифрового двойника радиолокационной станции дальнего обнаружения // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020.
13. Корнеева Т. Фазированные антенные решетки – М.: «Электроника:НТБ», 1998. №5-6. С.37-40.
14. Добычина Е.М., Кольцов Ю.В. Цифровые антенные решетки в бортовых радиолокационных системах – М.: Издательство МАИ, 2013. 160 с.
15. Добычина Е.М., Шмачилин П.А. Построение цифровых антенных решеток для современных радиоэлектронных систем // Научно-технические серии. К.3. Активные и цифровые антенные решетки. Коллективная монография; под ред. А.Ю. Гринёва. М.: Радиотехника, 2014. 172 с.
16. Balanis C. *Antenna Theory. Analysis and Design*. John Wiley & Sons, Inc. 2016. 1072 p.
17. Восресенский Д.И., Канащечкова А.И., Активные фазированные антенные решетки – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.

UDC 628.396

COMPOSITION AND BASIC REQUIREMENTS TO THE MATHEMATICAL MODEL - DIGITAL "TWIN" OF THE PRIMARY INFORMATION PROCESSING SUBSYSTEM OF A RADAR STATION WITH SYNTHESIS OF THE SATELLITE APERTURE

Radionovich V.V.¹

Loban M.A.²

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics¹, Minsk, Republic of Belarus

Kozlov S.V. – D.Sc.

Annotation. The article discusses the relevance of creating a digital twin (DT) of a radar with synthesized antenna aperture (SAR) of a satellite of the Earth remote sensing system. The basic requirements for the RSA DT are substantiated. The structure of the DT, a list of simulated components of the equipment and algorithms for information processing are given. The issue of choosing a high-level programming language for the implementation of the DT is considered.

Keywords. Digital twin, aperture synthesis, active electronically scanned array, diagramming, programming environment.