

УДК 623.486

**Метод оптимизации комплекса контроля и управления
техническим состоянием адаптивных фазированных антенных
решёток РЛС**

Линкевичиус А.П.

Группа компаний «РТИ»,

ул. 8 Марта, 10, стр. 1, Москва, 127083, Россия

e-mail: ALinkevichius@oaorti.ru

Аннотация

В статье предложен метод оптимизации принятия решений с использованием объективных данных контроля технического состояния АФАР РЛС, на основе которого предлагается построить автоматизированный комплекс контроля и управления техническим состоянием (ККУТС), предусматривающий наличие аппаратной и программной составляющей, а также прогнозирование периодичности контроля, восстановления и ремонта. Используются современные логико-вероятностные методы анализа надежности восстанавливаемых систем, базирующиеся на блок-схемах надежности. Практическая реализация основана на применении численных методов оптимизации.

Ключевые слова: адаптивные фазированные антенные решётки РЛС, техническое обслуживание, оптимизация, контроль, контролепригодность.

Введение

Современные радиоэлектронные системы (РЭС) являются сложными аппаратно-программными комплексами (АПК), сочетающими аппаратную и информационную составляющую, в связи с чем их часто выделяют в отдельный класс радиоинформационных систем [1]. В последнее время, автоматизация РЭС, включая процессы контроля и анализа «больших данных», позволяют существенно повысить отказоустойчивость и долговечность РЭС. В частности, этого можно достичь интеграцией систем сервисного техобслуживания (ТО) и контроля. Актуальна задача комплексного учета методов контроля и оптимизации техобслуживания (включая превентивные действия).

Адаптивные фазированные антенные решётки (АФАР) современных РЛС, представляющие собой сложные АПК, можно отнести к восстанавливаемым системам, надёжность работы которых определяется совокупностью характеристик и параметров, которые в той, либо иной степени в данный момент либо на заданном промежутке времени должны соответствовать заданным. В идеале на заданном промежутке времени АФАР должна находиться в работоспособном состоянии и обеспечивать заданные режимы работы РЛС в целом.

Однако, в процессе эксплуатации современных АПК возникают, как неисправности аппаратной части, так и неисправности программного обеспечения (ПО). При этом, неисправности, приводящие к потере

работоспособности АФАР, либо её компонент, являются самыми критичными с точки зрения поддержания заданных надёжных характеристик и относятся к категории отказов. При возникновении отказа восстановление работоспособности АФАР может быть реализовано, во-первых, путем перезагрузки ПО, переключения на резервные мощности и т.д., без вывода АФАР и РЛС из работоспособного состояния, во-вторых, путём поиска и устранения отказа также в процессе работы с частичным выводом отдельных компонент АФАР из режима работы, и наконец, путём устранения отказа в режиме полной потери АФАР работоспособного состояния.

Поэтому, сложные АПК требуют разработки регламентов ТО различной периодичности и продолжительности для принятия технических мер и проведения комплекса проверок, направленных на поддержание технических характеристик АФАР на необходимом уровне, а также – на предупреждение непреднамеренных выходов АФАР и РЛС из режима работы. Для того необходимо применение комплексов технического обслуживания, которые способны учитывать, конструктивные особенности системы, включая взаимодействие ее компонент, специфику отказов и набор возможных действий по ремонту и восстановлению.

Следует отметить, что современный научно-методический аппарат диагностики и управления техническим состоянием АФАР развит недостаточно, несмотря на широкие технические возможности диагностики на всех этапах жизненного цикла. В традиционном понимании, комплекс ТО

включает комплекс операций (проверок, технических мероприятий и т.д.) по поддержанию работоспособности или исправности техники. Вместе с тем, конечной целью любой диагностики и выполнения определенных операций по техническому сопровождению (регламентных работ, ТО, ремонтных либо восстановительных работ и т.д.) является повышение надежности функционирования АФАР и обеспечение (продление) срока ее эксплуатации. При этом, желаемым конечным эффектом можно считать минимизацию затрат на эксплуатацию АФАР.

Желательно разработать такой инструмент, который позволяет управлять коррекцией сроков проведения и видов технического обслуживания АФАР на основе сбора и обработки разнородной информации о состоянии АФАР, поступающей в реальном масштабе времени. При этом должна быть учтена по данным стенда генерального конструктора "историческая" информация, постоянно рассчитываться и учитываться коэффициент риска, как при создании АФАР, так и в процессе эксплуатации, как это сделано в [2] при оценке риска создания РЛС.

Традиционный подход к ТО, основанный на проведении периодических регламентных работ и ремонте «по факту обнаружения дефектов», сопровождается серьезными издержками: в том числе, материальными (необходимостью проведения дорогостоящих операций по обслуживанию техники) и функциональными, из-за перерывов на время ремонта и обслуживания.

На данном этапе развития технологий процессов контроля и восстановления сложных систем возникает принципиальная возможность разработки нового адаптивного метода оптимизации ТО, позволяющего существенно повысить отказоустойчивость АФАР. В работе [3] предложен метод построения аппаратно-вычислительного комплекса контроля и управления техническим состоянием (ККУТС) АФАР РЛС. По совокупности всех данных, полученных с использованием системы встроенного контроля АФАР и стенда генерального конструктора РЛС, ККУТС оценивает технические и надёжностные характеристики, а также определяет и реализует управление техническим состоянием АФАР на основе моделей риска [4].

Необходимо отметить, что в последнее время методическим вопросам использования систем встроенного контроля для коррекции техобслуживания уделяется особенное внимание, поскольку контроль лишь тогда дает заметный эффект, когда обоснованно назначается техническое обслуживание [5]. В данной статье формулируется задача построения единого комплекса контроля управления техническим состоянием (ККУТС) АФАР РЛС с использованием моделей надёжности АФАР и возможностей новых систем встроенного контроля.

Разработка ККУТС возможна на основе детального анализа значительных объемов данных, которые непрерывно, в реальном времени, поступают с контрольно-измерительной аппаратуры, в том числе,

ретроспективных данных, накопленных в процессе испытаний эксплуатации предыдущих поколений АФАР.

Каждая компонента АФАР обладает надёжностными характеристиками, в частности:

- статистикой «фатальных» отказов (не предусматривающих возможности восстановления);
- параметрами, характеризующими особенности контроля и обнаружения неисправностей, в частности: средним временем обнаружения отказа того или иного типа, а также средним временем восстановления;
- параметрами, характеризующими особенности восстановления компонента: посредством перезагрузки ПО, программных манипуляций или технических мер;
- дополнительными характеристиками прогнозирования работоспособности компонента.

На основе конструктивной схемы функционирования АФАР могут быть построены так называемые «блок-схемы надёжности» (RBD), а на основе перечня возможных сценариев отказов – «дерева отказов» (FTA), при помощи которых можно оценить текущие характеристики отказоустойчивости. Так как АФАР – это типичная восстанавливаемая система, то для оценки ее показателей необходимо использовать методы исследования надёжности восстанавливаемых систем. В частности, в

качестве показателя надежности следует использовать коэффициент готовности (нестационарный и стационарный) [6].

Аналогично, можно описывать и надежность ПО, входящего в аппаратно-программный комплекс (АПК) АФАР. Для математического описания надежности ПО можно применять функцию риска $R(t)$, представляющую вероятность возникновения отказа на интервале $(0, t)$ и соответствующее значение вероятности безотказной работы (ВБР) на интервале $(0, t)$, равное, по определению $1-R(t)$.

Таким образом, для разработки оптимального ККУТС можно использовать оценку общих надёжностных характеристик, как для аппаратной, так и для программной части. В качестве основного инструмента будет применена теория надежности и принцип минимизации риска.

Постановка задачи оптимизации ККУТС по данным контроля.

Любой комплекс настроек, проверок и других корректирующих воздействий направлен на повышение (обеспечение) надёжностных характеристик и возвращение контролируемых параметров к заданным значениям. Данный подход лежит в основе построения ККУТС, использование которого позволит повысить надежность и продлить ресурс безотказной работы АФАР РЛС. Такой ККУТС анализирует совокупность данных, полученных от системы встроенного контроля АФАР, стенда генерального конструктора и информацию, накопленную в системе управления жизненным циклом в течение срока разработки и эксплуатации

АФАР и осуществляет численное решение оптимизационной задачи, выбирая оптимальный состав и содержание корректирующих действий.

Для восстанавливаемых систем наиболее часто в качестве комплексного показателя надежности используется коэффициент готовности. По определению [6], нестационарным коэффициентом готовности $K_2(t)$ называется вероятность того, что рассматриваемая система окажется в работоспособном состоянии в любой момент времени t (в периоде применения по назначению). В то же время, современные АФАР являются высоконадежными системами, которые характеризуются крайне низкой частотой отказов, что достигается поддержанием работоспособного состояния в рамках комплекса превентивных мер по ТО. Поэтому, во многих практических задачах в качестве основного параметра надежности часто используется и вероятность безотказной работы на заданном промежутке времени $P(t_3)$. Соответственно, метод построения ККУТС, в зависимости от конкретных требований заказчика к надежности, может основываться на максимизации как $P(t_3)$, так и коэффициента готовности.

С целью определения оптимального состава и структуры ККУТС необходимо обеспечить возможность комплексного учета данных, непрерывно поступающих с систем контроля и уточняющих, в каждый момент времени, сведения о состоянии АФАР. Обычно этими данными является фиксированный набор параметров, для которых имеется ретроспективная выборка, характеризующая состояние АФАР. Она выражается матрицей с большим числом элементов x и моментами

наступления отказов T , характеризующихся параметрами y , а также данными о способах последующего восстановления z . Таким образом, данная задача включает классическое «обучение по прецедентам», т.е. поиск моделей зависимостей:

$$y=B(x),$$

$$Kz(t)=f(x,y,z).$$

Здесь предполагается, что существуют неизвестные целевые зависимости — отображения $X \rightarrow Y$ (т.е. множеств описания данных контроля X и возможных отказов Y). Если такие зависимости найдены (в частности, методами машинного обучения), это дает возможность разработать оптимальный ККУТС, т.е. автоматизировать процесс выработки корректирующих действий, в зависимости от наблюдаемых данных контроля $x(t)$.

Метод разработки оптимального ККУТС состоит в том, что, имея уточненные модели зависимости

$$K_z = f(t, x, y=B(x), z)$$

и, решая в каждый момент времени оптимизационную задачу, мы получим актуальный на момент t комплекс действий по оптимальному ТО АФАР.

Зависимость ККУТС от структуры АФАР

Показатели надежности, в частности, $P(tz)$ и $Kz(t)$, зависят в том числе, от структуры системы, в частности, от применения резервирования ее компонент. В случае последовательной блок-схемы АФАР, состоящей из N

компонент, т.е. независимых отказов компонент, в соответствии с формулой расчета вероятности независимых событий, ВБР всей системы будет задаваться произведением ВБР компонент $P_1(t_3) \dots P_N(t_3)$:

$$P_c(t_3) = P_1(t_3) \cdot P_2(t_3) \cdot \dots \cdot P_N(t_3)$$

Аналогично, коэффициент готовности всей системы будет задаваться произведением коэффициентов готовности компонент $K_1(t) \dots K_N(t)$:

$$K_c(t) = K_1(t) \cdot K_2(t) \cdot \dots \cdot K_N(t).$$

Анализ экспериментальных данных по отказам показывает, что интенсивность отказов λ на промежутках времени между ТО можно считать постоянной. Соответственно, в качестве закона распределения случайной величины числа отказов в единицу времени целесообразно выбрать экспоненциальное распределение. Для экспоненциального закона распределения таком случае вычислить ВБР системы можно аналитически, складывая $\lambda = \lambda_1 + \dots + \lambda_5$ и вычисляя ВБР P и вероятность отказа R на промежутке $(0, T)$:

$$P = \exp(-\lambda \cdot T),$$

$$R = 1 - \exp(-\lambda \cdot T).$$

Таким образом, параметрами надёжности, которые будут описывать каждый компонент АФАР, будут:

- интенсивность «фатальных» отказов, не подлежащих восстановлению, описываемая ВБР (вероятностью безотказной работы) – т.е. вероятностью того, что в пределах заданной

наработки на интервале времени от 0 до t отказ компонента (и системы в целом) не возникнет (как функция времени t);

- интенсивность потока неисправностей, предусматривающих восстановление компонента (например, посредством перезагрузки ПО, программных манипуляций или физического ремонта);
- коэффициент готовности $Kz(t)$



Рис.1. Укрупненная блок-схема надежности АФАР с резервированием

На практике, надёжность АФАР определяется в сложных случаях, когда предусмотрено взаимное влияние компонент и необходимо применять логико-вероятностные методы для построения расчета блок-схем надежности. Пример блок-схемы надежности АФАР из трех модулей с одним резервированным модулем приведен на рис.1. Соответствующий результат расчетов ВБР для нескольких сочетаний интенсивностей отказов компонент приведен в табл.1.

Табл. 1. Пример расчета ВБР для разных вариантов структуры АФАР

(аналитические расчеты λ , 1/час)

Варианты структуры	Модуль 1	Модуль 2		Модуль 3	Результат (ВБР для 10^4 и $2 \cdot 10^4$ час)
		2А	2В		
Вариант А	$\lambda=10^{-7}$	$\lambda=10^{-4}$	$\lambda=10^{-6}$	$\lambda=10^{-6}$	0.98 / 0.96
Вариант Б	$\lambda=10^{-7}$	$\lambda=2 \cdot 10^{-6}$	$\lambda=10^{-6}$	$\lambda=10^{-6}$	0.99 / 0.98
Вариант В	$\lambda=5 \cdot 10^{-7}$	$\lambda=10^{-6}$	$\lambda=10^{-6}$	$\lambda=10^{-6}$	0.985 / 0.97

Для того, чтобы использовать модель надежности в ККУТС, необходимо учесть, что каждому варианту структуры АФАР соответствуют различные комплексы ТО (как превентивного, так и по факту отказа). Более того, для каждого варианта структуры АФАР можно составить ряд различных вариантов ТО, которые (для каждого варианта структуры) зависят от разных учитываемых параметров. В том числе, одним и тем же регламентам соответствуют, как дискретные, так и непрерывные зависимости, например, зависимость от промежутка между регламентными работами или от времени восстановления.

Для представленного простейшего примера зависимости надёжностных характеристик ТО от параметров контроля и модели надежности в целях построения оптимального ККУТС можно исследовать аналитически. Тем не менее, данный подход остается эффективным и для сложных систем, которые

учитывают, как блок-схемы реальных АФАР, так и модели надежности, включающие описание процедур восстановления и ремонта.

Модели восстановления

Введем в рассмотрение модель восстановления АФАР и ее компонент. Рассмотрим ту же модель АФАР из трех компонент. Если для второго модуля (с резервированием) расчетная интенсивность отказов равна λ_2 , то интенсивность отказов всей системы составит $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$.

Если задать возможность восстановления для каждого элемента через фиксированное или случайное время $T_в$, то значение коэффициента готовности для всей системы АФАР удобнее рассчитывать при помощи методов Монте-Карло. В частности, выбрав фиксированное время восстановления $T_в$ для всех трех элементов (что соответствует традиционному КТО).

Поскольку в АФАР возможны отказы не только техники, но и ПО, то это, с одной стороны снижает надежность АПК, а с другой – дает возможность контроля за счет мониторинга параметров работы АФАР (аппаратной части и ПО) и позволяет производить контроль и оценку состояния компонентов и набирать статистику для прогнозирования). Время обнаружения отказа можно включить, допуская незначительную погрешность, во время восстановления $T_в$ [6].

В модель восстановления можно добавить:

- возможность быстрого восстановления (например, за счет перезагрузки ПО;
- автоматизированного контроля.

Для описания надежности ПО применяется функция $R(t)$, представляющая вероятность возникновения отказа на интервале $(0, t)$. В простейшей модели [7], когда имеется выборочная статистика отказов при испытаниях (тестировании ПО), можно положить, что вероятность безотказной работы :

$$P(t) = 1 - R(t) = 1 - n/N,$$

где N – представляет собой общее число испытаний компонента в промежутке $(0, t)$;

n – число отказов, зафиксированных при этих испытаниях.

Эта простейшая модель, фактически, не описывает зависимости от времени t (что актуально при прогнозировании отказоустойчивости ПО в «боевом» режиме) и потому сейчас применяется редко.

Чтобы учесть зависимость от времени, следует ввести в рассмотрение число отказов $N(t)$ программы за время t . С вероятностной точки зрения, $N(t)$ может быть хорошо описана нестационарным случайным процессом с независимыми приращениями времени, в частности, неоднородным процессом Пуассона, характеризующимся интенсивностью $\lambda(t)$.

Тогда, в соответствии с теорией случайных процессов, среднее число отказов ПО за время t будет равно

$$m(t) = \int_0^t \lambda(s) ds.$$

Соответственно, вероятность безотказной работы на интервале времени $(0, t)$ будет равна

$$P(t) = \exp[-m(t)].$$

Построив оценку для $\lambda(t)$ по результатам тестирования и отладки может быть получена искомая вероятность безотказной работы ПО. Помимо представленной экспоненциальной модели отказов, могут применяться вейбулловские и степенные модели. Подобный подход позволяет включить учет надежности ПО в решение задачи оптимизации КТО, проводимую в рамках ККУТС.

Продолжая рассматривать в качестве конкретного примера модель АФАР из трех модулей, оценим влияние самовосстановления компонентов и резервирования. Будем считать, что модули 1 и 3 – нерезервируемые, а модуль 2 – с резервированием (дублированием 2-го компонента). Вариант структуры приведен на рис. 2, причем некоторые (или все) модули могут быть заменены аналогами (с различными конструктивными свойствами, условиями эксплуатации, показателями отказоустойчивости, производства разных поставщиков и т.д.).

Как было отмечено ранее, надежность АФАР определяется:

- перечисленными параметрами надежности модулей;
- структурной схемой взаимодействия модулей;
- комплексом ТО для каждого модуля.

Нами уже было принято допущение, что время обнаружения неисправности восстановления является фиксированным и равно T_g .

Перечень корректирующих действий, вырабатываемых ККТУС(для каждого варианта структуры) зависит от разных параметров (в том числе, могут присутствовать и непрерывные зависимости, например, от промежутка между регламентными работами или от времени восстановления). В табл.2 приведены расчеты коэффициента готовности для той же структуры АФАР, что показана на рис.1 (для примера выбран вариант «В» из предыдущей таблицы 2), которая предусматривает восстановление модулей с разным регламентным временем восстановления.

Табл.2 Пример расчета K_g для разных регламентов КТО (метод Монте-Карло)

Варианты КТО	Модуль 1	Модуль 2		Модуль 3	Результат (ВБР 10^4 и $2 \cdot 10^4$ час)
		2А	2В		
Вариант В1	$T_{восст}=100$ ч	-	-	$T_{восст}=100$ ч	0.9999 / 0.9986
Вариант В2	$T_{восст}=50$ ч	-	-	$T_{восст}=100$ ч	0.9999 / 0.9986
Вариант В3	$T_{восст}=50$ ч	$T_{восст}=100$ ч	-	$T_{восст}=100$ ч	0.9999 / 0.9990
Вариант	$T_{восст}=24$ ч	$T_{восст}=100$ ч	$T_{восст}=100$ ч	$T_{восст}=24$ ч	0.9999 / 0.9998

В4					
----	--	--	--	--	--

Расчеты демонстрируют, что резервирование и специфика отказов делают редкими «фатальные» отказы (когда АФАР выходит из строя, и её дальнейшая работа невозможна). Вместо этого, цепочка отказов отдельных компонент АПК, входящих в состав АФАР, вызывает постепенное снижение ТТХ. Наличие автоматизированного контроля обеспечивает своевременное восстановление большинства характеристик в режиме реального времени (в том числе, автоматизированное).

Применение методов описания связи параметров восстановления и превентивного ТО с алгоритмом пересчета ВБР и коэффициента готовности, позволяет использовать построенную модель надежности для численного решения задачи оптимизации ККУТС.

Практическое решение задачи оптимизации

Существенной сложностью практического (численного) решения задачи оптимизации является наличие большого числа применяемых методов контроля характеристик и технического состояния АФАР и ее компонент, которые по-разному влияют на надёжность (отказоустойчивость) (рис.2). В связи с этим, задача оптимизации усложняется, т.к. необходимо учитывать сложную многопараметрическую зависимость $K_2(t, P)$, заданную алгоритмически.



Рис.2 Методы контроля характеристику и технического состояния АФАР и ее КОМПОНЕНТ

В этих условиях для решения задачи оптимизации целесообразно использовать комбинацию численных методов:

- перебора («сканирования»), необходимого для первичной (грубой) локализации локальных минимумов;
- быстрых градиентных методов, определяющих с высокой точностью решение задачи оптимизации (например, наискорейшего градиентного спуска).

Иллюстрация численной оптимизации (для упрощенного случая двух произвольно выбранных параметров АФАР) приведена на рис.3. Расчетная функция коэффициента готовности показана в виде графика поверхности

(слева) и соответствующих линий уровня (в укрупненном масштабе, вблизи максимума, справа). Соответственно, искомый максимум (оптимальное сочетание параметров АФАР) лежит приблизительно в центре правого графика.

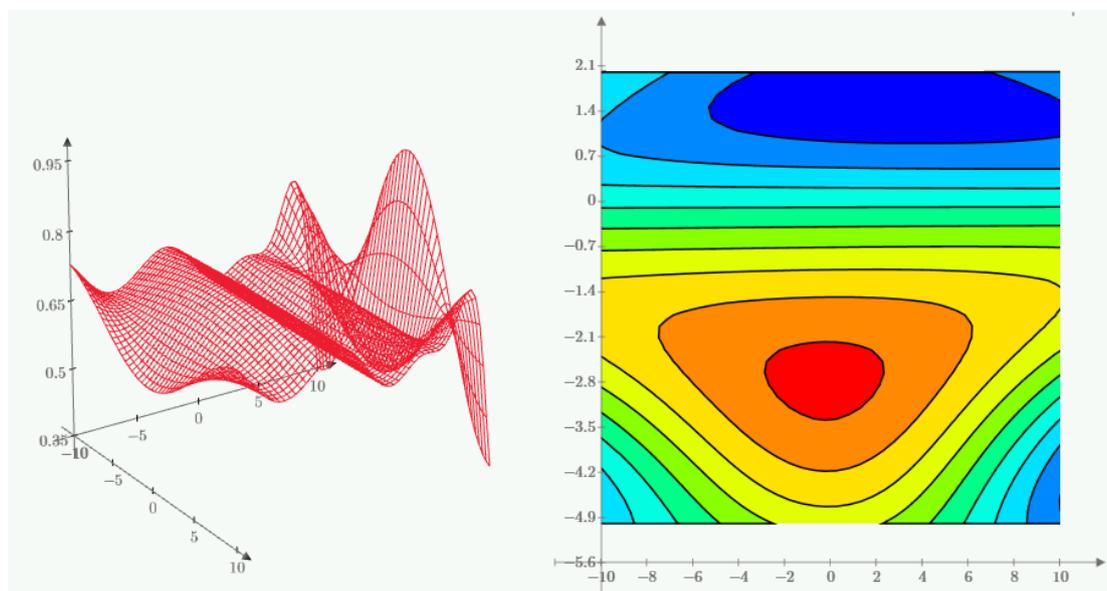


Рис.3. Целевая функция коэффициента готовности

(необходимо на графиках показать наименование координат)!!!!

При этом решение задачи состоит в максимизации коэффициента готовности АФАР на основе представленных в статье моделей восстановления, которые учитывают особенности структуры АФАР, т.е. взаимодействия ее компонентов, в том числе, применения резервирования и учета контролепригодности, восстановления и ремонта.

Заключение

Для перспективных АФАР предложен метод построения комплекса контроля и управления техническим состоянием, основанный на разработке и создании многофункционального ККУТС, который реализует комплексное использование данных встроенного контроля и численное решение задачи оптимизации. Для этого последовательно построена модель надежности АФАР, которая учитывает её специфику, как высоконадежной восстанавливаемой радиоинформационной системы, включая особенности резервирования, восстановления, учет контролепригодности и наличие и функционирование программной и аппаратной части ККУТС.

Модель надежности АФАР учитывает возможность использования данных автоматического контроля, которые, при комплексном анализе ретроспективной информации по уже произошедшим неисправностям (стенд главного конструктора), отказам и особенностям восстановления, позволяет организовать уточнение модели путем «обучения по прецедентам». Для построения модели использованы методы блок-схем надежности. В качестве входных данных используются данные встроенного контроля АФАР и стенда генерального конструктора, осуществляется расчет ВБР - коэффициента готовности, на основе их отклонений от требуемых величин формируется управляющее воздействие.

ККУТС, основанный на практическом применении модели надежности, позволяет рассчитать состав и структуру корректирующих воздействий, которые будет обеспечивать оптимальное поддержание безотказной работы и

надёжных характеристик АФАР, а также – сокращение времени ввода АФАР в режим работы, длительную эксплуатацию и сокращение расходов на реализацию жизненного цикла.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ
(№ НШ-6831.2016.8).*

Библиографический список

1. Конторов Д.С., Конторов М.Д., Слока В.К. Радиоинформатика. - М.: Радио и связь, 1993. – 299 с.
2. Боев С.Ф., Казанцев А.М., Панкратов В.А., Дембицкий Д.Н., Петраков А.М. Событийная модель оценки рисков создания РЛС ДО // Труды МАИ. 2015. № 80. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=57034>
3. Линкевичиус А.П., Боев С.Ф. Контроль и управление техническим состоянием крупноапертурных АФАР на основе данных встроенного контроля и системы управления жизненным циклом РЛС // Нелинейный мир. 2016. Т. 14. № 5. С. 17-22.
4. Боев С.Ф., Рахманов А.А., Слока В.К. История отечественной радиолокации: Система модульно-параметрического проектирования радиолокационных станций дальнего обнаружения нового поколения. - М.: Издательский дом «Столичная энциклопедия», 2015. - 736 с.

5. Лубков Н.В., Спиридонов И.Б., Степанянц А.С. Влияние характеристик контроля на показатели надежности систем // Труды МАИ. 2016. № 85. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=67501>
6. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. – СПб.: Питер, 2005. – 479 с.
7. Nelson E.C. A Statistical Basis for Software Reliability Assessment, TRW-SS-73-03, March (1973).