

Д.Д. Ступин, А.Ю. Перлов, А.В. Маврин

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЯ ПЕРЕДАЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ  
АФАР ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК РЛС**

*Показана роль передающих комплексов на базе АФАР в обеспечении параметров диаграммы направленности современной РЛС дальнего обнаружения. Описаны особенности формирования диаграммы направленности для крупноапертурной АФАР с использованием широкополосных ЛЧМ-сигналов. Указаны причины возникновения факторов, которые негативно влияют на энергетический потенциал РЛС. На конкретном примере передающего комплекса современной РЛС показаны новые технические решения в системе диаграммообразования широкополосной АФАР. Ключевым элементом в обеспечении параметров излучения являются микросхемы линий задержки, установленные в блоках усиления мощности. Для обеспечения высокой точности установки временного распределения разработана система термостатирования микросхем. Актуальной проблемой при создании многоканальных комплексов АФАР является необходимость проведения большого объема измерений в сжатые сроки. При этом за счет большого числа измеряемых каналов комплекса необходимо решить задачу обеспечения многоканального и высокоточного измерения характеристик. Для обеспечения оперативной оценки характеристик разработана измерительная система, обеспечивающая автоматизированную оценку характеристик передающих комплексов без излучения сигналов в эфир. Предложена новая методология калибровки передающих каналов путем автоматизированного выравнивания фазового распределения. Показана актуальность использования автоматизированной системы при проведении настройки и испытаний комплексов на заводе-изготовителе РЛС. Разработаны предложения по типовой структуре измерительной системы, обеспечивающей оперативную и достоверную оценку новых образцов передающих комплексов в автоматизированном режиме. Созданная измерительная система для конкретного применения при создании многоканальных комплексов РЛС нового поколения позволяет значительно сократить временные и ресурсные затраты на проведение этапов настройки и испытаний.*

*Радиолокационная станция; передающий комплекс; линия задержки; диаграмма направленности.*

D.D. Stupin, A.J. Perlov, A.V. Mavrin

**RESEARCH AND TESTING OF AESA TRANSMISSION COMPLEXES TO  
ENSURE THE TACTICAL AND TECHNICAL CHARACTERISTICS OF THE  
RADAR**

*The role of transmitting complexes based on AESA in providing the parameters of the radiation pattern of modern long-range radar is shown. The characteristics of beamforming for big AESA with the use of broadband chirp signals. The causes of the factors that adversely affect the energy potential of the radar are indicated. On a concrete example of the transmitting complex of modern radar, new technical solutions in the diagram system of broadband AESA are shown. A key element in providing the radiation parameters are delay line chips installed in the power amplification units. To ensure a high mounting accuracy temporal distribution of the developed system, temperature control circuits. An urgent problem in the creation of multi-channel systems AESA is the need for a large volume of measurements in a short time. At the same time, due to the large number of measured channels of the complex, it is necessary to solve the problem of providing multi-channel and high-precision measurement of characteristics. To ensure the rapid assessment of the characteristics, a measuring system has been developed that provides an automated assessment of the characteristics of transmitting complexes without radiation of signals into the ether. Proposed new methodology for calibration of transmission channels by computer-aided alignment of phase distribution. The relevance of the use of an automated system during the setup and testing of systems at the radar manufacturer is shown. Proposals have been developed for a typical structure of the measuring system that provides rapid and reliable evaluation of new sam-*

*ples of transmitting complexes in an automated mode. The created measuring system for a specific application in the creation of multi-channel radar systems of new generation can significantly reduce the time and resource costs for the stages of configuration and testing.*

*Radar station transmitting complex; delay line; radiation pattern.*

**Особенности создания многоканальных передающих комплексов АФАР и перечень параметров, определяющих тактико-технические характеристики РЛС.** К сложным высокопотенциальным и высокоинформативным РЛС, наиболее типичными из которых являются многофункциональные РЛС дальнего обнаружения (ДО), решающие задачи систем предупреждения о ракетном нападении (СПРН) и контроля космического пространства (СККП), предъявляются высокие требования с точки зрения их тактико-технических характеристик (ТТХ). Эти РЛС, как правило, должны иметь большую дальность действия, высокую разрешающую способность, хорошую помехозащищенность и высокую точность определения координат наблюдаемых объектов. В общем случае информационные возможности РЛС (её информативность) определяются тремя основными параметрами: полосой частот  $F$ , пространственной базой  $B$  и длительностью зондирующего сигнала  $T$ . Полоса частот  $F$  определяет разрешение и точность измерения дальности, пространственная база  $B$  определяет разрешение и точность измерения угловых координат, длительность  $T$  определяет разрешение и точность измерения радиальной скорости и более «высоких» производных дальности. Эти три параметра определяют так называемый «информационный параллелепипед»  $F-B-T$ , размеры и объём которого определяют информативность РЛС и, следовательно, её возможности по решению задач информационного обеспечения систем высшего уровня. Рассматривая наиболее значимые перспективы развития радиолокационной техники дальнего ДО, можно сделать вывод, что развитие должно идти по пути повышения информативности и помехозащищенности РЛС на основе увеличения объёма «информационного параллелепипеда» [1].

Современные РЛС СПРН и СККП с активными фазированными антенными решетками (АФАР) состоят из приёмных и передающих комплексов, объединённых в единую конструкцию, или разнесённых [2, 3]. Передающие комплексы являются самыми энергоёмкими (а в плане необходимого инженерного обеспечения – и самыми теплонапряжёнными) составными частями в составе РЛС и, как правило, представляют собой многоканальные комплексы, осуществляющие формирование и усиление радиосигналов с целью их дальнейшего излучения в эфир с заданной диаграммой направленности.

Технические требования к передающим АФАР определяются заданными в ТТЗ на изделие характеристиками в части следующих параметров:

- ◆ диапазона частот;
- ◆ сектора сканирования;
- ◆ ширины диаграммы направленности;
- ◆ энергетического потенциала РЛС;
- ◆ ширины мгновенной полосы частот.

Энергетический потенциал ( $Q$ ) РЛС с разнесёнными в пространстве передающими и приёмными АФАР определяется следующим образом:

$$Q = \frac{P \cdot \tau \cdot S_t \cdot S_r \cdot \sigma}{4\pi \cdot \lambda^2 \cdot k_B \cdot T_s \cdot R_0^4 \cdot L} \quad (1)$$

В выражении (1)  $P$  – суммарная импульсная мощность во всех каналах передающей системы;  $\tau$  – длительность зондирующего импульса;  $S_t$  и  $S_r$  – эффективная площадь апертуры передающей и приёмной АФАР соответственно;

$\sigma$  – ЭПР цели;  $\lambda$  – длина волны зондирующего колебания;  $k_B$  – постоянная Больцмана;  $T_s$  – шумовая температура приёмной системы;  $R_0$  – дальность для расчёта энергетического потенциала;  $L$  – суммарный коэффициент потерь [4–6].

Из выражения (1), в частности, следует, что одной из принципиальных характеристик, обеспечивающих потенциал РЛС (а, следовательно, и ее ГТХ) является эффективная площадь передающей антенны. С точки зрения повышения потенциала, необходимо добиваться увеличения  $S_e$ , однако увеличение апертуры неизбежно приведет к увеличению влияния факторов, связанных с конечностью размеров антенны и ухудшению характеристик диаграммы направленности (ДН).

Современные РЛС большой дальности строятся на основе высокопотенциальных и крупноапертурных АФАР, что обусловлено их важными свойствами:

- ♦ возможностью значительного повышения суммарной мощности излучаемых сигналов при ограниченной мощности отдельных передатчиков;
- ♦ формированием узких диаграмм направленности и на излучение, и на прием;
- ♦ высоким угловым разрешением;
- ♦ гибкостью и вариативностью режимов обзора пространства.

Основным достоинством АФАР является простота реализации и управления формой амплитудно-фазового распределения (АФР), а значит и формой ДН [7–10]. Возбуждение каждого антенного элемента в АФАР по фазе не зависит от частоты в случае, когда направление падающей мощности излучения перпендикулярно к поверхности антенной решетки.

При работе АФАР с широкополосными сигналами форма ДН меняется при изменении длины волны излучаемого сигнала, а значит характеристики антенной решетки являются частотно-зависимыми. Влияние частоты на форму ДН минимально в случае нулевой разности хода волн между соседними излучателями. Принципиальной особенностью является то, что формирование диаграммы направленности и суммирование мощности сигналов отдельных каналов в АФАР происходит непосредственно в эфире, благодаря их интерференции.

В случае излучения широкополосного ЛЧМ-сигнала разница в изменении длины волны на величину  $\Delta\lambda$  в отдельных составляющих спектра сигнала может быть соизмерима со значением длины волны на центральной частоте излучаемого сигнала, что приводит к возникновению проблем в обеспечении сложения в пространстве излучаемых сигналов в одной фазе. Набег фазы излучаемых сигналов вдоль антенной решетки определяется порядковым номером канала:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda \pm \Delta\lambda} md \sin \theta, \quad (2)$$

где  $\theta$  – угол отклонения ДН,  $d$  – шаг решетки,  $\lambda$  – длина волны,  $\Delta\lambda$  – изменение длины волны,  $m$  – порядковый номер канала.

Из выражения (2), следует, что разность хода волн между соседними излучателями составляет:

$$\Delta l = \frac{\Delta\phi(\lambda \pm \Delta\lambda)}{2\pi m}, \quad (3)$$

На энергетический потенциал РЛС также оказывают влияние ряд негативных факторов, которые приведены в табл. 1. Формально они входят в суммарный коэффициент потерь  $L$ , но, учитывая многофакторность источников потерь, этот коэффициент имеет сложную природу. Очевидно, что потери возникают в передаю-

шей системе при формировании сигналов внутри аппаратуры АФАР и при дальнейшем суммировании сигналов в пространстве. Это уменьшает потенциал РЛС, что снижает максимальную дальность обнаружения целей, а также негативно сказывается на точности оценок параметров цели (вследствие снижения отношения сигнал/шум). Всего в таблице перечислено 7 основных факторов, которые необходимо учитывать при создании высокопотенциальных крупноапертурных передающих АФАР [11–13].

Таблица 1

### Потери энергетического потенциала РЛС в части передающей системы

Наименование потерь	Причина возникновения потерь
1. Потери при формировании ДН передающей АФАР	Обусловлены отклонением реального амплитудно-фазового распределения (АФР) от требуемого. Для немодулированных и фазо-кодированных (ФКМ) радиоимпульсов возникает вследствие: <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ -дискретности фазовращателей передающих подрешёток,</li> <li>◆ ошибок измерения фазы при калибровке, передающей АФАР;</li> </ul> Для радиоимпульсов с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ) вызывается: <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ дискретностью фазовращателей передающих подрешёток,</li> <li>◆ ошибками измерения фазы при калибровке передающих подрешёток;</li> <li>◆ ошибками расчёта (либо измерения) функций ФЧХ и АЧХ подрешёток.</li> </ul>
2. Потери при фазировании, возникающие при отклонении направления максимума ДН передающей АФАР от заданного направления	Обусловлены ошибками установки и неидентичностью ДН излучателей на антенном полотне передающей АФАР
3. Потери коэффициента усиления (КУ) передающей подрешётки	Обусловлены дисперсией ДН при излучении ЛЧМ РИ
4. Потери в передающих кабелях и разъёмах	Снижение надёжности в кабельной продукции при их эксплуатации и транспортировке
5. Потери из-за рассогласования передающего антенного полотна с пространством	Неточности в обеспечении геометрических параметров антенного полотна («неплоскостность» антенного полотна, вариации шага решетки между излучателями)
6. Потери, обусловленные ДН передающего излучателя	Отклонения направления на цель от нормали к АФАР
7. Потери в радиопрозрачном укрытии (РПУ) передающей АФАР	Деграция параметров материала, применённого при изготовлении РПУ

Таким образом, формирование диаграммы направленности с заданными в ТЗ на АФАР характеристиками является одной из самых важных задач для обеспечения ТТХ РЛС и требует применения уникальных схемотехнических и программных решений на протяжении всего жизненного цикла создания изделия [14, 15].

**Первая ступень диаграммообразования в многоканальных передающих комплексах АФАР.** Рассмотрим конкретный пример передающего комплекса на базе крупноапертурной АФАР из состава РЛС ДО нового поколения, работающего в L-диапазоне частот.

Широкополосный радиосигнал в передающем комплексе представляет собой ЛЧМ радиоимпульсы (полоса более 15 % от несущей), излучаемые с низкой частотой повторения. Применение сигналов с такой полосой обеспечивает возможность реализации в РЛС режима «сверхразрешения» целей. Данный режим используется при сопровождении целей для определения с высокой точностью дальности до них, а также построения их радиолокационных портретов (РЛП) и последующего распознавания типа цели. Когерентные пачки сверхширокополосных ЛЧМ-сигналов при использовании их согласованной и весовой обработки потенциально имеют низкий уровень боковых лепестков, что обеспечивает построение наиболее информативного двумерного РЛП в координатах «дальность-радиальная скорость».

Рассмотрим новые схемотехнические решения, примененные в передающей системе с АФАР, где основной функциональной единицей является подсистема формирования и распределения сверхширокополосных сигналов. Данная подсистема содержит 48 основных формирователей сверхширокополосных радиосигналов, формирующих ЛЧМ радиоимпульсы с регулируемой задержкой по времени для фазирования главного лепестка (ГЛ) ДН передающей АФАР в заданном направлении. Каждый сформированный сигнал далее распределяется по подрешеткам, состоящим из 64-х трактов формирования, усиления и разводки сигналов (рис. 1).

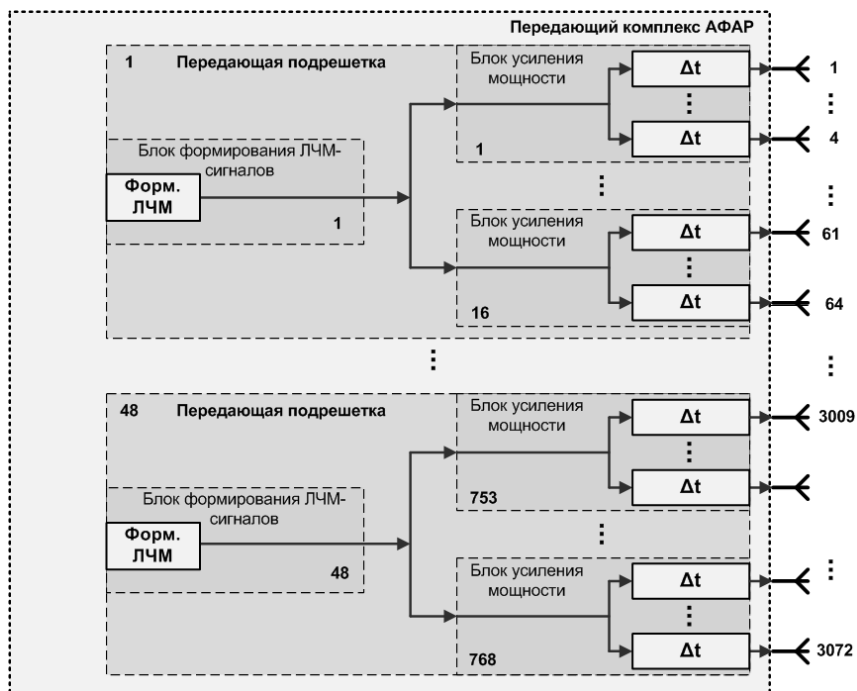


Рис. 1. Структурная схема подсистемы диаграммообразования передающей АФАР

При работе с сверхширокополосными ЛЧМ-сигналами диаграммообразование в рассматриваемом передающем комплексе АФАР осуществляется двухступенчатым способом. Для компенсации временного набега по антенному полотну

АФАР в первой ступени диаграммообразования ставят блоки формирования ЛЧМ-сигналов, каждый из которых генерирует сигнал с заданной задержкой, соответствующей заданному направлению фазирования, от 0 до максимального набега сигнала на апертуре передающей АФАР.

При цифровом формировании сигналов в подсистеме диаграммообразования важную роль играют цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), примененные в блоках формирования ЛЧМ-сигналов. Цифровые коды отсчетов импульсов ЛЧМ-сигналов для заданных параметров (начальная и конечная частота, длительность импульса, уровень мощности, начальная фаза) формируются в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) и подаются на цифровой вход ЦАП. В качестве тактового сигнала ЦАП используется ВЧ-сигнал гетеродина, синфазно раздаваемый для всех блоков формирования в АФАР, благодаря чему формирование импульсов ЛЧМ-сигналов осуществляется синхронно во всех каналах антенной решетки.

Для формирования требуемой диаграммы направленности, формируемые в каждом канале ЛЧМ-сигналы могут быть смещены друг относительно друга по начальной фазе, начальной частоте или по задержке времени начала импульса. Установленный после ЦАП полосовой фильтр с заданной полосой пропускания осуществляет выделение сигнала в рабочей полосе и подавляет спектральные составляющие выходного сигнала ЦАП за пределами рабочего диапазона частот.

Благодаря разработанному алгоритму цифровой обработки, реализованному на высокопроизводительной ПЛИС, была достигнута возможность обеспечения управления моментом начала формирования ЛЧМ-сигналов (в пределах десятков нс с точностью установки десятков пс). Данное решение дало возможность регулировать временное распределение в пределах всего полотна АФАР и отказаться от применения в составе блоков формирования сигналов микросхем фазовращателей или же линий задержки.

**Вторая ступень диаграммообразования в многоканальных передающих комплексах АФАР.** Во второй ступени диаграммообразование осуществляется за счет управления временным распределением в блоках оконечного усиления и разводки сигналов. При работе с узкополосными сигналами это приводит к несущественным потерям в характеристиках передающей АФАР. Однако с увеличением рабочей полосы частот РЛС и апертуры АФАР такой метод приводит к увеличению потерь коэффициента усиления, расширению ГЛ ДН и увеличению уровня боковых лепестков (БЛ) ДН. Поэтому в рассматриваемом варианте реализации АФАР формирование ДН достигается за счет использования микросхем линий задержки вместо микросхем фазовращателей в передающих трактах АФАР. Предложенное решение позволяет полностью отказаться от фазовращателей, перейдя на широкополосные линии задержки с кодовым управлением переключения задержки зондирующих сигналов с минимальным шагом, и учесть, таким образом, набег по временным задержкам на полной апертуре АФАР.

Необходимость высокой точности установки временных задержек обусловлена тем, что фаза коэффициентов передачи передающих ВЧ-трактов (электрическая длина) от каждого входного до соответствующего выходного разъема должна быть выравнена с максимально возможной точностью. Однако достижение данной точности при использовании имеющихся на сегодняшний момент микросхем, например, цифровой программируемой линии задержки SY89296U фирмы Micrel [16], представляет сложную техническую задачу, связанную с погрешностью установки задержки в каждом разряде микросхемы и большой зависимостью величин устанавливаемых задержек от изменения температуры. Это обусловлено тем, что микросхемы устанавливают в аппаратуру формирования и усиления ВЧ радиоим-

пульсов, в которой на фазу сигнала с ростом частоты сильно влияют температурные процессы, возникающие при усилении сигналов в транзисторах. Для компенсации теплового ухода и обеспечения точного сведения импульсов в направлении максимума излучения при создании передающего комплекса АФАР потребовалась разработка системы термостатирования микросхем линий задержки. Данное решение обеспечило требуемую точность установки значений временных задержек зондирующих сигналов по всему полотну АФАР, что привело к формированию требуемой диаграммы направленности АФАР в пространстве.

**Автоматизация измерений характеристик многоканальных передающих комплексов АФАР.** При создании современных передающих комплексов АФАР остро стоит вопрос о проведении настройки их электрических характеристик и приемо-сдаточных испытаний [17]. При сложившейся практике приемо-сдаточные испытания в значительной степени определяют уровень затрат на создание АФАР, а также длительность проверки ее характеристик [18].

В сочетании с жесткими ресурсными ограничениями это диктует необходимость разработки новых методов и средств проведения настройки и испытаний крупноапертурных АФАР и ее составных частей для обеспечения их создания с требуемым качеством и в заданные сроки. Ключевую роль в обеспечении решения этой задачи приобретают стендовые испытания, а именно натурные испытания с помощью специальных автоматизированных систем измерений. В современных условиях автоматизированные системы измерений являются эффективным средством ускорения работ по проверке основных электрических характеристик комплексов с большим числом аппаратуры, инструментом сокращения материальных затрат, инструментом повышения качественных характеристик, заданных в ТЗ на АФАР [19, 20]. Автоматизированные измерения параметров передающих комплексов при проверке его электрических характеристик на соответствие техническим условиям (ТУ) позволяют определить соответствие создаваемого комплекса заданным техническим требованиям и при необходимости внести изменения в его конструкцию до начала отработки в составе вышестоящей единицы.

Принципиальной особенностью современных передающих комплексов АФАР является способность управлять амплитудным и фазовым распределением в каждом канале излучения, что приводит к необходимости проверки амплитудных и фазовых характеристик на выходе каждого передающего канала. Вследствие того, что рассматриваемый в статье комплекс содержит в своем составе 48 блоков формирования ЛЧМ сигнала и 768 четырехканальных блоков усиления мощности, то при последующей их установке в состав многоканального комплекса АФАР число электрических параметров увеличивается за счет возрастания сложности передающего тракта, а также необходимости калибровки передающих трактов по фазе. Таким образом, число измеряемых каналов передающей АФАР составляет 3072.

Для решения задачи отработки и испытаний передающего комплекса в условиях временных ограничений разработана автоматизированная система измерений основных СВЧ характеристик на выходе каждого передающего тракта, к которым относятся:

- ◆ Длительность фронта среза излучаемого импульсного сигнала (измеряется с помощью осциллографа);
- ◆ Выходная импульсная мощность (измеряется с помощью анализатора спектра);
- ◆ Относительный уровень побочных составляющих спектра (измеряется с помощью анализатора спектра);
- ◆ Уровень внеполосных составляющих спектра (измеряется с помощью анализатора спектра);

- ◆ Диапазон регулировки длительности импульсного сигнала (измеряется с помощью осциллографа);
- ◆ Диапазон внутримпульсной модуляции частоты сигнала (измеряется с помощью анализатора спектра);
- ◆ Фаза коэффициента передачи передающего канала (измеряется с помощью векторного анализатора цепей);
- ◆ Неравномерность спектра на выходе передающего канала в диапазоне рабочих частот (измеряется с помощью анализатора спектра).

Вышеприведенные характеристики «охватывают» весь передающий тракт комплекса и измеряются на выходе антенного полотна АФАР. Автоматизация измерений заключается в обеспечении высокоточного и многоканального измерения электрических параметров 64-х каналов (подрешетки) передающего комплекса за счет последовательного переключения передающих каналов с помощью коммутационных матриц на требуемые измерительные приборы в автоматическом режиме. На основе возможностей современных измерительных приборов «высшего класса», а также имеющегося опыта проведения измерений были разработаны алгоритмы, а затем создано специальное программное обеспечение (СПО) для автоматизации процесса измерения электрических параметров подрешетки АФАР. Структурная схема измерений передающего комплекса с помощью автоматизированной системы приведена на рис. 2.

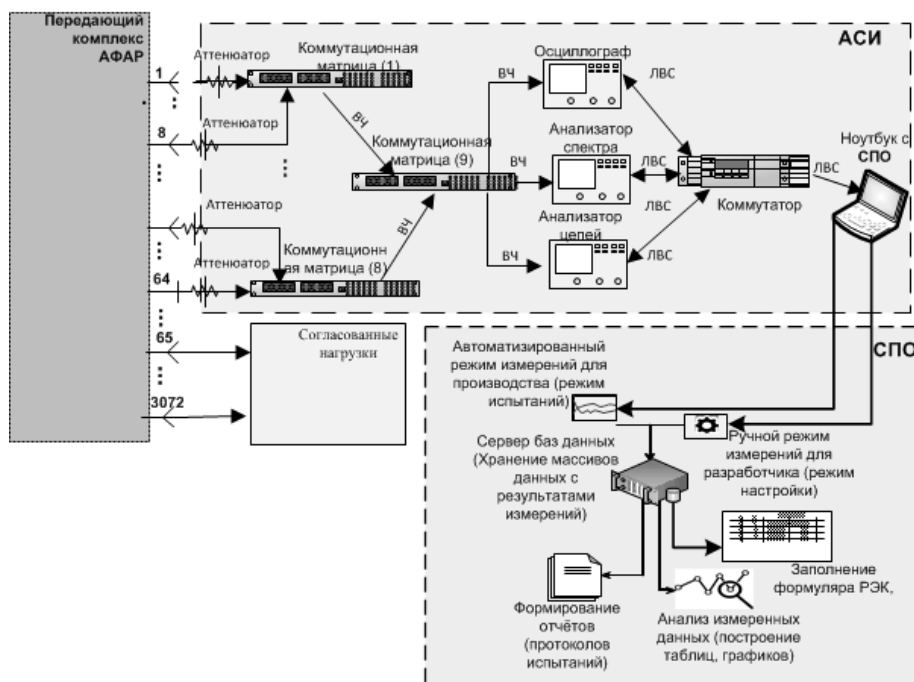


Рис. 2. Схема измерений передающего комплекса АФАР с помощью автоматизированной системы

По результатам проведения оценки характеристик передающего комплекса с помощью разработанной системы было выявлено, что при автоматизированном режиме измерения:

- ◆ количество привлекаемых специалистов сокращается с 4-х до 2-х в связи с автоматическим управлением настройками измерительных приборов и автоматическим формированием протокола испытаний;



- ♦ отсутствует необходимость механического переключения измерительных кабелей между каналами при измерении подрешетки;
- ♦ значительно уменьшается время и ресурсное обеспечение на проведение оценки передающего комплекса.

Принципиальной особенностью данной методологии измерений является то, что на выходе АФАР вместо излучателей на антенное полотно устанавливаются ВЧ-переходы, к которым подключаются коммутационные матрицы из состава автоматизированной системы. Применение коммутационных матриц с переключаемыми СВЧ реле на 64 канала позволило сократить число подключений измерительных приборов с 3072 до 48 раз. Конфигурация автоматизированной системы имеет возможность расширения за счет модульной структуры коммутационных матриц. Все измерительные приборы и коммутационные матрицы управляются оператором с помощью СПО, установленного на моноблок по интерфейсу Ethernet. Благодаря использованию в схеме измерений аттенуаторов и стоек с согласованными нагрузками, была обеспечена возможность излучения высокого уровня мощности всеми передающими каналами АФАР, что позволило проводить измерения при максимальном тепловыделении технологической аппаратуры передающего комплекса.

Перед началом измерений с помощью СПО проводится проверка соединения между измерительным оборудованием, затем выбирается перечень измеряемых характеристик. Далее выбирается измеряемая подрешетка и диапазон измеряемых каналов (от 1 до 64) и запускается процесс измерений. Все эти действия выполняются на компьютере по получению соответствующих команд от оператора. После этого проводится автоматическая оценка результатов на соответствие требованиям ТУ и измеренные значения в табличном виде, пригодном для построения графика сохраняются в базу данных. Благодаря применению сервера с базой данных оператор может удаленно в автоматизированном режиме сформировать протокол испытаний измеряемого комплекса или построить графики, отражающие зависимости различных параметров одного или группы каналов за выбранный цикл проведенных измерений с помощью одного нажатия кнопки.

Калибровка передающих трактов АФАР достигается обеспечением минимального разброса фазы коэффициента передачи передающих каналов между собой. Однако, калибровка передающих трактов многоканального комплекса со сложными передающими трактами представляет собой весьма трудоемкий процесс, поскольку необходимо сначала измерить фазу коэффициента передачи на выходе передающих каналов, а затем выравнять измеренный массив фазового распределения с помощью подачи команд управления на линии задержки.

Основная сложность в измерении и выравнивании фазового распределения по всем каналам состоит в том, что фаза широкополосных сигналов в L-диапазоне частот сильно зависит как от температуры окружающей среды, так и от времени, потраченного на измерение на нескольких частотных точках. Для решения задачи исключения температурной зависимости при измерении фазы коэффициента передачи в схеме испытаний были применены армированные фазостабильные кабельные сборки, а измерение фазы проводилось векторным анализатором цепей на несущей частоте зондирующих сигналов с погрешностью измерения фазы в  $\pm 3$  градуса. Для сокращения временных и ресурсных затрат в программном обеспечении по автоматизации измерений были заложены алгоритмы, позволяющие в автоматическом режиме считывать значения фазы передающего канала с векторного анализатора цепей и принимать решения, насколько фазу в канале нужно «докрутить», после чего с моноблока оператора отправлялась соответствующая команда управления в каждый измеренный канал, где производилась корректировка значения фазы сигнала при помощи линий задержки. Данное решение позволило про-

вести калибровку передающей АФАР в значительно меньшие сроки по сравнению с «ручными» измерениями, за счет автоматизированной и высокоточной калибровки всей подрешетки.

Принципиальным достоинством описанной методологии измерений является то, что она позволяет проводить как прямые измерения в СВЧ трактах подрешетки комплекса АФАР, так и калибровку её электрической длины. В результате внедрения данной технологии на этапе настройки и испытаний передающих АФАР финансовые и ресурсные затраты на создание РЛС были сокращены примерно в 20 раз, за счет многоканальной оценки характеристик РЭК в автоматизированном режиме.

**Вывод.** На примере созданного передающего комплекса с крупноапертурной АФАР для высокопотенциальной РЛС ДО показаны новые схемотехнические решения в части обеспечения параметров диаграммообразования со широкополосными зондирующими ЛЧМ сигналами.

Выявление и снижение технических рисков при создании многоканальных передающих комплексов АФАР за счет использования современного измерительного оборудования вместе с программой автоматизированных измерений основных электрических параметров, а также реализацией высокой точности управления и контроля амплитудно-фазового распределения передающих трактов АФАР позволило развить технологию поддержки всего жизненного цикла изделия. Снижение технических рисков при разработке элементов РЛС с применением автоматизированной системы привело к уменьшению ресурсных и временных затрат на создание РЛС в целом.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ступин Д.Д.* Возможности распознавания ситуации в зоне действия РЛС наблюдения космических объектов при использовании когерентных сигналов большой длительности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 3 (128). – С. 119-126.
2. *Боев С.Ф.* Управление рисками проектирования и создания радиолокационных станций дальнего обнаружения. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 430 с.
3. *Боев С.Ф., Рахманов А.А.* Метод повышения эффективности внедрения новых технологий при создании РЛС нового поколения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1 (162). – С. 73-81.
4. Справочник по радиолокации / под ред. М.И. Скольника: пер. с англ. / под общ. ред. В.С. Вербы. В 2 кн. Кн. 2. – М.: Техносфера, 2014. – 680 с.
5. *Barton D.K., Leonov S.A.* Radar technology encyclopedia. – Boston, Artech House, 1997. – 511 с.
6. *Skolnik M.* Radar handbook. Third Edition. – The McGraw-Hill Companies, 2008. – 1351 с.
7. *Боев С.Ф., Хайбутов К.Е.* Обоснование концептуального проектирования ряда развития РЛС дальнего обнаружения на основе платформенного подхода // Вестник Ярославского зенитного ракетного училища противовоздушной обороны: Сб. научных трудов. – 2014. – № 17. – С. 53-62.
8. *Боев С.Ф., Рахманов А.А.* Методологические основы управления созданием высокоинформативных унифицированных РЛС ракетно-космической обороны // Радиопромышленность. – 2016. – № 1. – С. 6-13.
9. *Боев С.Ф., Слока В.К., Рахманов А.А.* Система модульно-параметрического проектирования радиолокационных станций дальнего обнаружения нового поколения ОАО «РТИ» / История отечественной радиолокации / под ред. С.В. Хохлова. – М.: Столичная энциклопедия. – 2015. – С. 407-414.
10. *Боев С.Ф.* Система разведки и предупреждения о воздушно-космическом нападении: основные проблемы создания и пути их решения // Сборник научных трудов «Перспективы развития РЛС дальнего обнаружения и интегрированных систем и комплексов информационного обеспечения ВКО». – М., 2013.

11. Боев С.Ф., Ступин Д.Д., Кочкаров А.А. Обеспечение государственной безопасности в контексте взаимосвязи оборонных, техногенных и социальных угроз // Материалы 6-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления. – Ростов-на-Дону, 2013. – Т. 4. – С. 86-89.
12. Боев С.Ф., Слока В.К. Эволюция радиоэлектроники и радиотехники в суперрадиолокации // Интеллект & технологии. – 2014. – № 2 (8). – С. 48-55.
13. Боев С.Ф., Казанцев А.М., Панкратов В.А. Особенности конструирования современных суперрадиолокаторов // Сборник трудов 56-й научной конференции МФТИ: Всероссийской научной конференции «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе», Всероссийской молодежной научно-инновационной конференции «Физикоматематические науки: актуальные проблемы и их решения». – 2013. – С. 180-182.
14. Боев С.Ф., Рахманов А.А., Слока В.К. Принципы и подходы к проектированию и созданию РЛС дальнего обнаружения нового поколения // Сб. материалов 9-й всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – Таганрог, 2014. – С. 5-7.
15. Боев С.Ф. Инновационные решения при разработке станций дальнего обнаружения метрового диапазона // Сб. научных трудов «Радиотехнические технологии в приборостроении». – Туапсе, 2013.
16. Перлов А.Ю., Алташин А.Н., Ермаков А.М. Обеспечение точности установки цифровых линий задержки в РЛС с крупноапертурными ФАР // Всероссийская научно-техническая конференция молодых конструкторов и инженеров «Минцевские чтения»: – М., 2015. – С. 51-57.
17. ГОСТ Р.15.201-2000 Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство. Издание официальное. – М., 2000.
18. Боев С.Ф. Новые технологии – основа перспектив развития РЛС дальнего обнаружения // Сб. трудов XII отраслевой научно-практической конференции Министерства промышленности и торговли Российской Федерации «Актуальные вопросы радиоэлектронной промышленности». – М., 2013.
19. Боев С.Ф. Концептуальная основа системы автоматизированного эскизно-технического проектирования перспективных РЛС ДО // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2014. – № 8. – С. 3-10.
20. Боев С.Ф., Рахманов А.А., Слока В.К. Унифицированная платформа создания ряда радиолокационных станций дальнего обнаружения нового поколения // Сб. материалов II всероссийской научно-технической конференции «РТИ Системы РКО-2014». – 2014.

## REFERENCES

1. Stupin D.D. *Vozможности raspoznvaniya situacii v zone denstviya RLS nablyudeniya kosmicheskikh ob"ektov pri ispol'zovanii kogerentnykh signalov bol'shon dlitel'nosti* [Possibilities of recognition of the situation in the area of operation of the space object observation radar with the use of coherent signals of great duration], *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 3 (128), pp. 119-126.
2. Boev S.F. *Upravlenie riskami proektirovaniya i sozdaniya radiolokacionnykh stanciy dal'nego obnaruzheniya*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2017, 430 p.
3. Boev S.F., Rahmanov A.A. *Metod povysheniya ehffektivnosti vnedreniya novykh tekhnologij pri sozdanii RLS novogo pokoleniya* [A method to improve the efficiency of introducing new technologies in the development of a new generation radar], *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 1 (162), pp. 73-81.
4. *Spravochnik po radiolokacii* [Handbook of radar], ed. by M.I. Skolnika: Trans. with English under the general ed. B.C. Verby. In 2 book. Book 2. Moscow: Tekhnosfera, 2014, 680 p.
5. Barton D.K., Leonov S.A. *Radar technology encyclopedia*. Boston, Artech House, 1997, 511 c.
6. Skolnik M. *Radar handbook*. Third Edition. The McGraw-Hill Companies, 2008, 1351 c.
7. Boev S.F., Haibutov K.E. *Obosnovanie konceptual'nogo proektirovaniya ryada razvitiya RLS dal'nego obnaruzheniya na osnove platformennogo podhoda* [The rationale for the conceptual design development of a number of early-warning radar based on platform approach], *Vestnik Yaroslavskego zenitnogo raketnogo uchilishcha protivovozdushnoy oborony: Sb. nauchnykh trudov* [The bulletin of the Yaroslavl school of antiaircraft missile defense], 2014, No. 17, pp. 53-62.

8. Boev S.F., Rakhmanov A.A. Metodologicheskie osnovy upravleniya sozdaniem vysokoinformativnykh unificirovannykh RLS raketno-kosmicheskoi oborony [Methodological bases of management of the establishment of highly informative unified radar stations missile space defense], *Radiopromyshlennost'* [Radio industry], 2016, No. 1, pp. 6-13.
9. Boev S.F., Sloka V.K., Rahmanov A.A. Sistema modul'no-parametricheskogo proektirovaniya radiolokatsionnykh stantsii dal'nego obnaruzheniya novogo pokoleniya OAO «RTI», Istoriya otechestvennoi radiolokatsii [System of modular parametric design of early-warning radar stations of the new generation of RTI Group OJSC, History of radar station], ed. by S.V. Hohlova. Moscow: Stolichnaya ehnciklopediya, 2015, pp. 407-414.
10. Boev S.F. Sistema razvedki i preduprezhdeniya o vozdušno-kosmicheskom napadenii: osnovnye problemy sozdaniya i puti ikh resheniya [Intelligence and warning of air and space attack: the main problems of creation and their solutions], *Sbornik nauchnykh trudov «Perspektivy razvitiya RLS dal'nego obnaruzheniya i integrirovannykh sistem i kompleksov informatsionnogo obespecheniya VKO»* [Collection of scientific papers "prospects for the development of long-range radar and integrated systems, and systems of information support of the East Kazakhstan region"]. Moscow, 2013.
11. Boev S.F., Stupin D.D., Kochkarov A.A. Obespechenie gosudarstvennoy bezopasnosti v kontekste vzaimosvyazi oboronnykh, tekhnogennykh i sotsial'nykh ugroz [The provision of public security in the context of the relationship of the defence, technological and social threats], *Materialy 6-y Vserossiyskoy mul'tikonferentsii po problemam upravleniya* [Materials of the 6th all-Russian multicongress on governance]. Rostov-on-Don, 2013, Vol. 4, pp. 86-89.
12. Boev S.F., Sloka V.K. Evolyutsiya radioelektroniki i radiotekhniki v superradiolokatsii [The evolution of electronics and radio engineering in superradiance], *Intellekt & tekhnologii* [Intelligence & technology], 2014, No. 2 (8), pp. 48-55.
13. Boev S.F., Kazantsev A.M., Pankratov V.A. Osobennosti konstruirovaniya sovremennykh superradiolokatorov [Features modern design superradiation], *Sbornik trudov 56-y nauchnoy konferentsii MFTI: Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Aktual'nye problemy fundamental'nykh i prikladnykh nauk v sovremennom informatsionnom obschestve», Vserossiyskoy molodezhnoy nauchno-innovatsionnoy konferentsii «Fizikomatematicheskie nauki: aktual'nye problemy i ikh resheniya»* [Proceedings of the 56th scientific conference of MFTI: all-Russian scientific conference "Actual problems of fundamental and applied Sciences in the modern information society", all-Russian youth scientific innovation conference "physical and mathematical Sciences: current problems and their solutions"], 2013, pp. 180-182.
14. Boev S.F., Rakhmanov A.A., Sloka V.K. Printsipy i podkhody k proektirovaniyu i sozdaniyu RLS dal'nego obnaruzheniya novogo pokoleniya [Features modern design superradiation], *Sbornik materialov 9-y vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [The collection of materials of the 9th all-Russian scientific-practical conference "future of the system and control problems"]. Taganrog, 2014, pp. 5-7.
15. Boev S.F. Innovatsionnye resheniya pri razrabotke stantsiy dal'nego obnaruzheniya metrovogo diapazona [Innovative solutions in the development of early warning stations meter band], *Sb.k nauchnykh trudov «Radiotekhnicheskie tekhnologii v priborostroenii»* [Collection of scientific papers "Radio technology in instrumentation"]. Tuapse, 2013.
16. Perlov A.J., Altashin A.N., Ermakov A.M. Obespechenie tochnosti ustanovki cifrovyykh liniy zaderzhki v RLS s krupnoaperturnymi FAR [Ensuring the accuracy of the installation of digital delay lines in the radar with large-aperture phased arrays], *Vserossiskaya Nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh i inzhenerov "Mintsevskie chteniya"* [All-Russian Conference of Young Designers and Engineers "Mints Readings"]. Moscow, 2015, pp. 51-57.
17. State Standard 15.201-2000. Sistema razrabotki i postanovki produktsii na proizvodstvo. Produktsiya proizvodstvenno-tekhnicheskogo naznacheniya. Poryadok razrabotki i postanovki produktsii na proizvodstvo [System of product development and launching into manufacture. Products of industrial and technical designation. Procedure of product development and launching into manufacture]. Moscow, Standartinform Publ., 2008, 15 p.
18. Boev S.F. Novye tekhnologii – osnova perspektiv razvitiya RLS dal'nego obnaruzheniya [New technologies as the basis for the development of the long-range radar], *Sbornik trudov XII otraslevoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Ministerstva promyshlennosti i trgovli Rossiyskoy Federatsii «Aktual'nye voprosy radioelektronnoy promyshlennosti»* [Proceedings of the XII sectoral scientific-practical conference of the Ministry of industry and trade of the Russian Federation "Topical issues of radio-electronic industry"]. Moscow, 2013.

19. *Boev S.F.* Kontseptual'naya osnova sistemy avtomatizirovannogo eskizno-tekhnicheskogo proektirovaniya perspektivnykh RLS DO [Conceptual framework of the system for automated thumbnail of the technical design advanced radar system TO], *Vestnik kompyuterykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Journal of computer and information technology], 2014, No. 8, pp. 3-10.
20. *Boev S.F., Rakhmanov A.A., Sloka V.K.* Unifitsirovannaya platforma sozdaniya ryada radiolokatsionnykh stantsiy dal'nego obnaruzheniya novogo pokoleniya [Unified platform for the creation of a number of radar stations in the far detection of a new generation], *Sbornik materialov II vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «RTI Sistemy RKO-2014»* [Proceedings of the II all-Russian scientific-technical conference "RTI Systems CSC-2014"], 2014.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.А. Каляев.

**Ступин Дмитрий Дмитриевич** – АО «РТИ»; e-mail: DStupin@aorti.ru; 127083, г. Москва, ул. 8-го Марта, д. 10, стр. 1; зам. генерального конструктора; к.т.н.; доцент.

**Перлов Анатолий Юрьевич** – e-mail: aperlov@rti-mints.ru; тел.: +79153351914; начальник сектора.

**Маврин Андрей Владимирович** – e-mail: amavrin@rti-mints.ru; инженер.

**Stupin Dmitry Dmitrievich** – JSC «RTI»; e-mail: DStupin@aorti.ru; 127083, Moscow, 8th March Street 10, 1; deputy General Designer; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Perlov Anatoly Yurievich** – e-mail: aperlov@rti-mints.ru; phone: +79153351914; head of sector.

**Mavrin Andrey Vladimirovich** – e-mail: amavrin@rti-mints.ru; engineer.