

## Принцип построения антенной системы БРЛК КА «Метеор-М» № 2-3, 2-4 и верификации её характеристик на орбите

Д. Д. Габриэльян, В. И. Демченко, К. М. Занин, А. А. Косогор, Ю. В. Кузнецов,  
Р. А. Лебедев, О. В. Лутченко, Н. А. Михайлов, А. Л. Шлаферов

*Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи  
Ростов-на-Дону, 344038, Россия  
E-mail: nlce@inbox.ru*

Приведены основные технические решения по построению антенной системы радиолокационного комплекса для космических аппаратов «Метеор-М» № 2-3, 2-4. Принципиальным решением является использование активной фазированной антенной решётки. Применение данного типа антенн позволяет скомпенсировать изменение характеристик приёмо-передающих трактов, возникающее из-за влияния факторов, связанных с выводом космического аппарата на орбиту, развёртыванием излучающего раскрыва антенны и последующей эксплуатацией комплекса. Рассмотрены методики калибровки бортовой антенной решётки, необходимые для формирования требуемого амплитудно-фазового распределения на апертуре. Данные методики включают в себя настройку антенной решётки на этапе наземной отработки и корректировку распределения амплитуд и фаз на её апертуре на этапе лётных испытаний. Корректировка во время лётных испытаний имеет два способа реализации. Первый заключается в коррекции геометрии раскрыва антенны по данным измерений диаграммы направленности её секций. Второй — в формировании требуемого распределения амплитуды и фазы на апертуре по данным измерений, проведённых с использованием специального режима калибровки комплекса. В качестве результата применения данных методик приведены измерения диаграммы направленности антенной решётки, выполненные на этапе наземной отработки, после вывода радиолокационного комплекса на орбиту и после коррекции распределения амплитуды и фазы. Данные результаты подтверждают возможность принципиального управления характеристиками излучения антенной решётки в условиях орбитального полёта.

**Ключевые слова:** бортовой радиолокационный комплекс, активная фазированная антенная решётка, амплитудно-фазовое распределение, диаграмма направленности

Одобрена к печати: 14.02.2024  
DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-73-85

### Введение

Бортовые радиолокационные комплексы (БРЛК) находят самое широкое применение при решении задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Решаемыми задачами ДЗЗ являются: всепогодное обеспечение оперативной информацией о поверхности Мирового океана и земных покровов, проведение исследований ледяного покрова, задачи гидрометеорологии, картографирования и др. Существуют различные подходы к построению БРЛК ДЗЗ, предназначенных для решения вышеуказанных задач. Подобные комплексы реализованы как в отечественных, так и в зарубежных проектах. Первый океанографический аппарат с установленным радиолокатором — это космический аппарат (КА) Seasat (1978). Первым отечественным радиолокатором, используемым в том числе и для наблюдения за морскими льдами, был БРЛК, функционирующий в составе КА «Космос-1500» (1983). Данный аппарат положил начало серии КА «Океан» (Кровотынцев, Милехин, 1998).

Дальнейшее совершенствование методов радиолокационного наблюдения поверхности Земли привело к разработке радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА). Отечественные исследования в этом направлении были реализованы в виде КА «Алмаз-1» с радиолокатором «Меч-КУ». Зарубежные КА для наблюдения за морской поверхностью с использованием РСА: европейские ERS-1, -2 (*англ.* European Remote-Sensing Satellite)

и Envisat (*англ.* Environmental Satellite); канадские Radarsat-1, -2; японский ALOS (*англ.* Advanced Land Observing Satellite) и др.

Современные РСА являются многофункциональными многорежимными радарными, обеспечивающими съёмку как с высоким разрешением в прожекторном режиме, так и в широкой полосе захвата в режиме радиолокатора бокового обзора (РЛБО). Реализация данных режимов требует формирования диаграммы направленности (ДН) с достаточно узким лучом в азимутальном сечении. Поскольку ДН связана с распределением амплитуды и фазы (АФР) электромагнитного поля на апертуре антенны, для формирования узкого луча необходимы раскрыты с большими электрическими размерами. В радиодиапазоне такие антенны могут иметь продольный размер 5 м и более.

Для удовлетворения габаритных ограничений при выводе КА на орбиту антенные системы (АС) располагают на складываемой раме, которая в условиях орбитального полёта приводится в рабочее положение. Одним из таких комплексов является разработанный в рамках отечественной космической программы специализированный широкозахватный БРЛК ледовой разведки «Северянин», функционирование которого предполагалось в составе космических комплексов гидрометеорологического и метеорологического обеспечения «Метеор-М» № 1 и 2 (Внотченко и др., 2010). В качестве АС используется волноводно-щелевая антенная решётка (АР), состоящая из семи разворачиваемых секций.

В случае нештатного раскрытия изменение характеристик разворачиваемых АС после вывода на орбиту и приведения в рабочее положение не может быть с достаточной точностью определено на этапах наземной отработки. Проведённый анализ информации, доступной из открытых источников, показал, что в настоящий момент в литературе недостаточно подробно рассмотрены способы проверки параметров разворачиваемых бортовых АС для случая нештатного раскрытия, поэтому вопросы верификации их характеристик в условиях орбитального полёта являются актуальными. В данной работе поставленные вопросы рассмотрены на примере БРЛК КА «Метеор-М» № 2-3, 2-4, АС которого после вывода на орбиту развернулась в рабочее положение с недостаточной точностью.

Цель работы — обсуждение принципа построения АС БРЛК КА «Метеор-М» № 2-3, 2-4 и способов верификации её характеристик в условиях орбитального полёта.

Решаемые задачи для достижения поставленной цели включают:

1. Обзор структуры построения и основных параметров АС БРЛК КА «Метеор-М» № 2-3, 2-4.
2. Рассмотрение методик верификации характеристик АС БРЛК в условиях орбитального полёта.
3. Анализ результатов лётных испытаний БРЛК КА «Метеор-М» № 2-3, 2-4.

## Обзор структуры построения и основных параметров антенных систем

Принципиальным решением построения БРЛК (РЛБО) КА «Метеор-М» № 2-3, 2-4, ранее сформулированным в работе (Горбунов и др., 2008), стало использование в его составе активной фазированной антенной решётки (АФАР), которая из-за особенностей условий эксплуатации и выведения на орбиту располагается на складываемой силовой раме. Учитывая заданный режим работы БРЛК (режим РЛБО), все преимущества АФАР не используются. Например, не применяется оперативное изменение области зондирования за счёт управления лучом ДН, не реализован режим РСА. Но регулировка комплексных весовых коэффициентов в каналах АФАР принципиально позволяет скомпенсировать искажения геометрии раскрытия антенны.

Создание аппаратуры БРЛК с точки зрения АС предусматривает обеспечение в первую очередь требований по ширине полосы обзора. Обеспечение широкой полосы захвата БРЛК достигается формированием ДН специальной «косекансной» формы в угломестной (вертикальной) плоскости. Радиолокационная съёмка поверхности Земли осуществляется в маршрутном режиме перпендикулярно направлению движения КА.

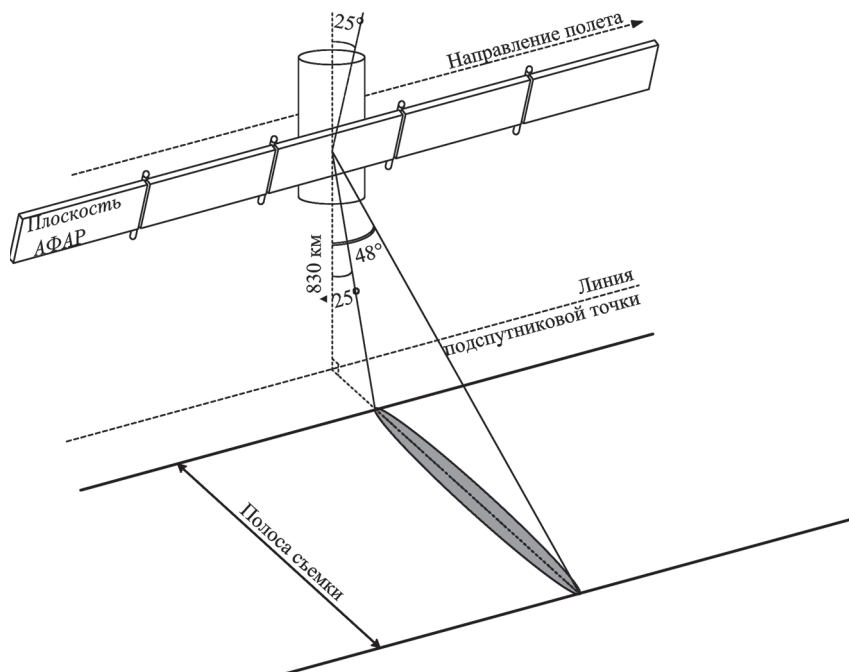


Рис. 1. Геометрия проведения съёмки

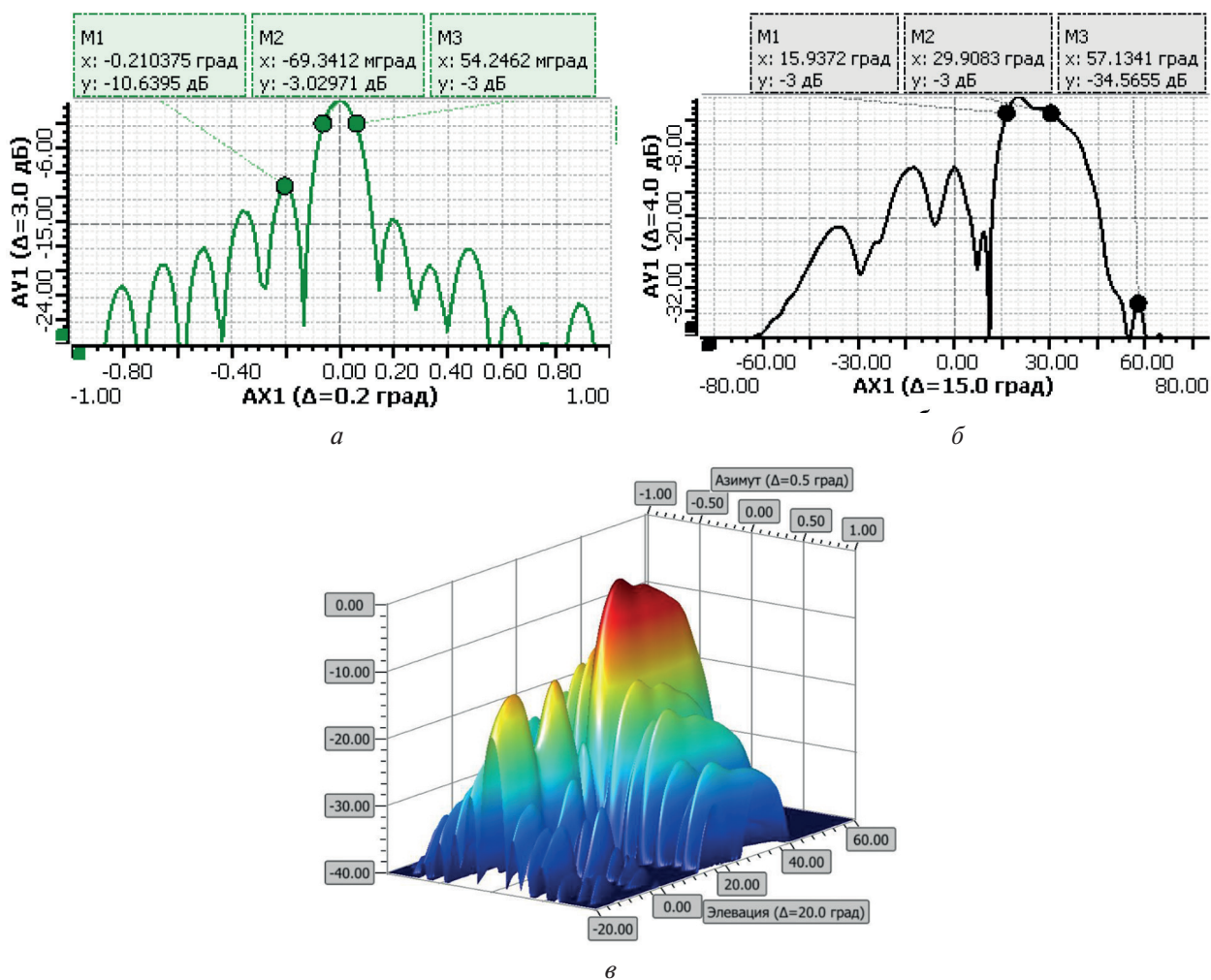


Рис. 2. Диаграмма направленности АФАР: а — азимутальное сечение; б — угловестное сечение; в — объёмная ДН

Выбор параметров ДН, достаточно полно обоснованный в работе (Внотченко и др., 2010), проведён с учётом требований технического задания на БРЛК. Необходимо отметить, что основные параметры ДН практически не изменились относительно параметров ДН БРЛК «Северянин-М». На *рис. 1* (см. с. 75) показан способ формирования БРЛК КА «Метеор-М» № 2-3, 2-4 полосы обзора на поверхности Земли при съёмке.

Сечения в азимутальной и угломестной плоскости и объёмная ДН показаны на *рис. 2* (см. с. 75). Данная характеристика измерена на этапе наземной отработки. Приведённая ДН сформирована с использованием антенны, геометрические размеры раскрыва которой составляют 13,5×0,3 м (440×10 единиц длин волн на средней рабочей частоте), а общее число антенных элементов (АЭ) составляет 8320.

С учётом технической сложности управления АФР на апертуре в большом количестве АЭ, которая связана с ограничениями на массогабаритные параметры и стоимость АФАР, излучающий раскрыв антенны разделён на подрешётки. Каждая подрешётка связана с одним приёмо-передающим модулем (ППМ) и совместно с ППМ образует один канал управления АФР. Подрешётки расположены эквидистантно с образованием линейной АФАР. Распределение амплитуды и фазы вдоль широкой стороны АФАР в каждой подрешётке является нерегулируемым равноамплитудным и синфазным. Вдоль узкой стороны раскрыва АФАР также является нерегулируемым и обеспечивает формирование косекансной ДН, показанной на *рис. 2б*.

Количество каналов управления, диапазон и точность установки амплитуды и фазы в каналах были определены с учётом компромисса между ограничениями на массогабаритные параметры и стоимость АФАР с одной стороны и ограничениями на выходную мощность одного ППМ и требуемой точностью восстановления АФР в излучающем раскрыве — с другой. Проведённые исследования показали, что в соответствии с указанными условиями необходимо 65 сегментов, в которых подрешётка объединяет 128 (16×8) излучателей.

Вследствие габаритных ограничений на АФАР, возникающих при выводе КА и БРЛК на орбиту, раскрыв антенны разделён на пять секций силовой рамы производства АО «Корпорация «ВНИИЭМ», которые складываются в транспортное положение и, таким образом, удовлетворяют габаритным ограничениям.

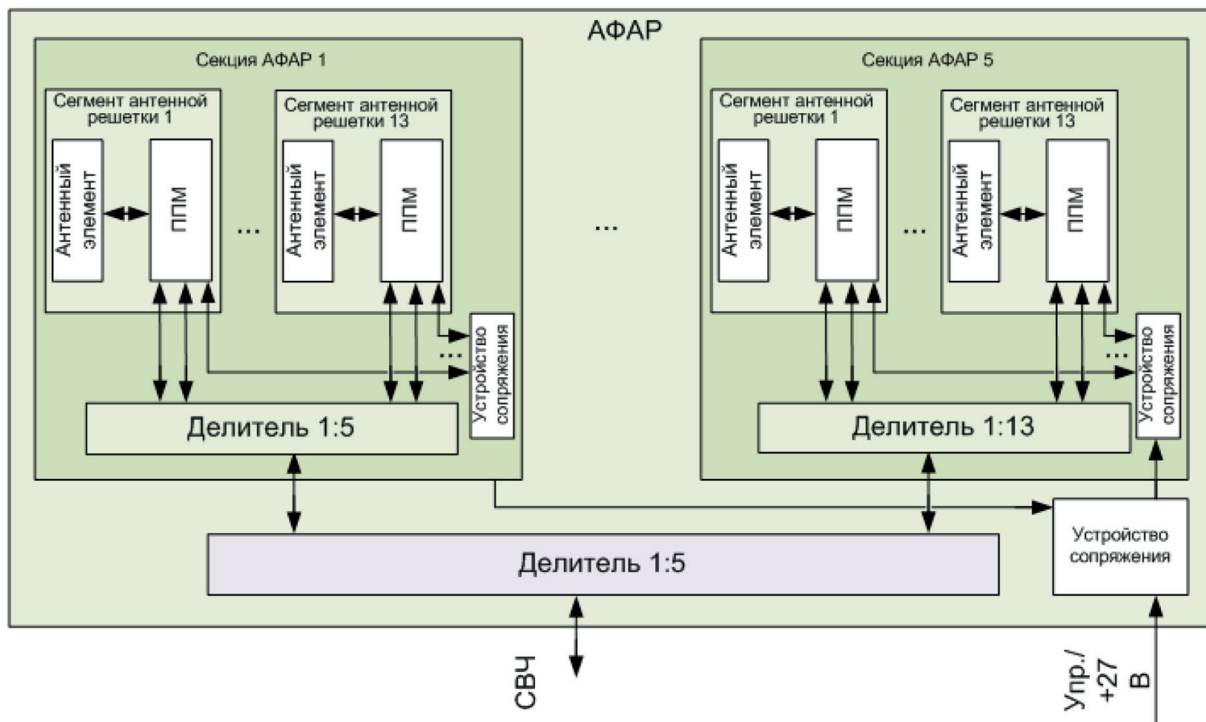
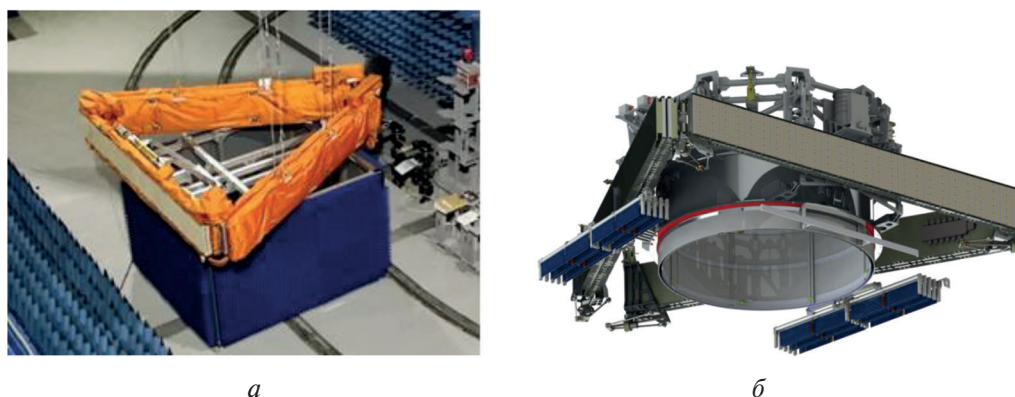


Рис. 3. Функциональная схема АФАР

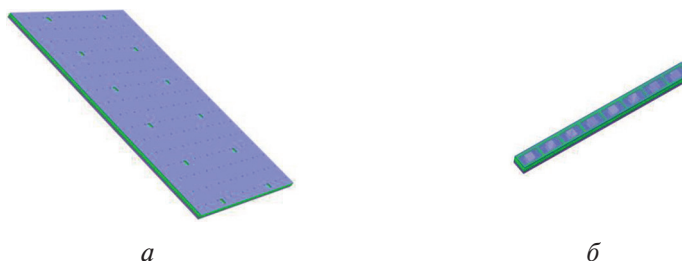
Снижение параметров ДН, приведённой на *рис. 2*, относительно предельных (максимальный уровень боковых лепестков в азимутальном сечении превышает уровень минус 13,3 дБ) обуславливается конструктивными особенностями формирования раскрыва развёртываемой АФАР и погрешностями реализации равномерного АФР на апертуре с учётом обозначенного выше компромисса.

Полученная функциональная схема АФАР приведена на *рис. 3* (см. с. 76). Данная схема содержит:

- делитель 1:5, предназначенный для разветвления сигнала на пять секций АФАР;
- пять секций АФАР, каждая из которых включает 13 каналов управления с соответствующими подрешётками излучающего раскрыва и ППМ, делитель 1:13;
- устройства сопряжения (одно центральное и четыре периферийных), которые реализуют электропитание и управление каналами АФАР.



*Рис. 4.* Компоновка АФАР: *а* — на этапе наземной отработки; *б* — в составе КА



*Рис. 5.* Составные части излучающего раскрыва АФАР: *а* — 128-элементная подрешётка; *б* — 8-элементная линейная АР из состава подрешётки с интегрированным сумматором

Компоновка АФАР в транспортном положении показана на *рис. 4*.

На *рис. 5* приведена подрешётка излучающего раскрыва, выполненная с использованием технологии многослойных печатных плат.

### **Рассмотрение методик верификации характеристик антенных систем бортового радиолокационного комплекса**

Коррекция АФР в раскрыве выполняется после вывода БРЛК на орбиту по результатам измерения параметров сигналов в режимах излучения и приёма АФАР с использованием специальных методик, разработанных на основе патента (Габриэлян и др., 2018). На основе указанных методик проводятся:

1. Настройка АФАР и измерение ДН перед установкой БРЛК на КА. Настройка АФАР выполняется с целью получения параметров ДН, соответствующих требуемым значениям.

2. Измерение ДН АФАР после вывода её на орбиту в режимах излучения и приёма для определения соответствия параметров формируемой ДН требуемым значениям и необходимости проведения коррекции параметров излучающего раскрыва.
3. Измерение ДН каждой секции и определение её соответствия расчётной форме. Показателем соответствия становится среднеквадратическое отклонение расчётной и измеренной ДН, критерием — непревышение данного показателя заданного значения.
4. Измерение ДН одновременно включённых двух и более секций и определение углов их взаимного поворота. По результатам расчётов выполняется коррекция геометрических параметров АФАР и проводится повторное измерение ДН. Коррекция геометрических параметров заключается в следующем:
  - на этапе наземной отработки до настройки ДН секции АФАР устанавливаются с образованием единой плоскости раскрыва с заданной точностью (рис. 6);



Рис. 6. Установка АФАР с образованием единой плоскости раскрыва

- выполняется запись показаний датчиков углов взаимного разворота секций из состава силовой рамы и настройка ДН в данном положении;
  - при раскрытии АФАР на орбите контролируется взаимное положение секций согласно полученным результатам;
  - выполняется измерение ДН одновременно включённых двух и более секций и расчёт угла их взаимного поворота;
  - в соответствующем режиме БРЛК (силовой рамы АФАР) корректируется взаимное геометрическое положение секций (механический поворот) на величину, вычисленную по результатам измерений;
  - в случае если механический поворот не обеспечивает необходимую точность положения секций, с использованием возможностей АФАР на основе результатов наземной настройки ДН выполняется коррекция АФР согласно известным геометрическим параметрам раскрыва.
5. В случае если ДН какой-либо секции или ДН АФАР после коррекции геометрических параметров не соответствует заданным требованиям, проводится внешняя калибровка каналов антенны. Данный режим является более универсальным и позволяет учесть многофакторность искажений АФР на апертуре, но также он оказывается более трудоёмким и требует использования высокоточной измерительной аппаратуры. Поэтому считается целесообразным при калибровке АФАР сначала сделать предположение, что секции антенны после наземной настройки сохранили требуемое распределение ам-

плитуды и фазы на апертуре и выполнить приведённые выше четыре пункта методик. В противном случае для проведения внешней калибровки необходимо осуществить следующие этапы:

- в составе схемы наземного измерительного пункта, приведённой на *рис. 7*, проводится излучение/приём сигналов БРЛК; на рисунке применены следующие обозначения:  $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$  — генераторы сигналов;  $W_1, W_2$  — антенны X-диапазона частот; МШПР — малошумящий преобразователь; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ПК — персональный компьютер; ОГ — опорный генератор (стандарт частоты);  $f_T$  — частота гетеродина;  $f_c$  — частота сигнала;

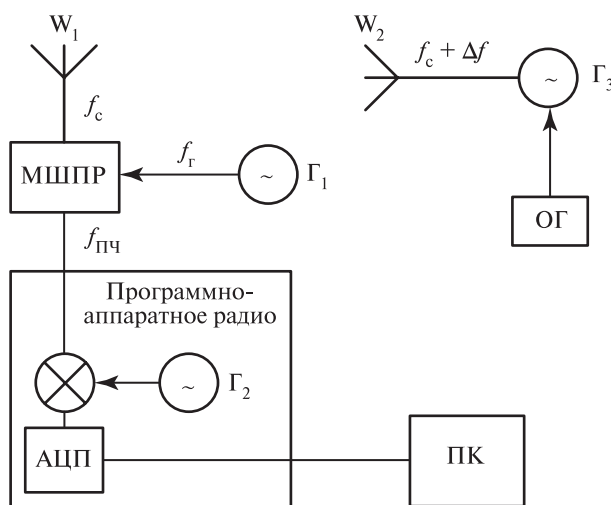


Рис. 7. Схема измерительной установки наземного пункта

- в режиме внешней калибровки БРЛК выполняет каждый ППМ поочередно излучение сигнала на центральной рабочей частоте. Приём сигнала на наземном пункте осуществляется с использованием антенны  $W_1$ , которая работает в режиме сопровождения движения КА;
- принятый сигнал переносится на промежуточную частоту (ПЧ) с помощью гетеродинного преобразования и усиливается в МШПР (в качестве гетеродина используется высокостабильный генератор  $\Gamma_1$ );
- сигнал ПЧ подаётся на вход программно-аппаратного радио, где он подвергается дополнительному преобразованию частоты и записи в виде отсчётов АЦП (гетеродином в этом случае служит внутренний опорный генератор программно-аппаратного радио);
- для определения относительных начальных фаз сигналов, излучённых каждым каналом БРЛК, на ПК наземного комплекса формируется модельный сигнал (данный сигнал характеризуется монотонным изменением фазы и не имеет разрывов по оси времени);
- начальные фазы принятых импульсов сравниваются с фазами модельного сигнала на соответствующих временных отрезках (такой подход требует, чтобы частота модельного сигнала и закон её изменения с высокой точностью соответствовали принимаемому сигналу БРЛК);
- для обеспечения требуемой точности оценивания частоты принимаемого сигнала на наземном комплексе дополнительно установлена антенна  $W_2$ , подключённая к источнику гармонического сигнала (генератор  $\Gamma_3$ , стабилизированный внешним опорным генератором ОГ), частота которого отстроена от частоты принимаемого сигнала с учётом возможного доплеровского сдвига частоты;
- совместная обработка двух сигналов позволяет уточнить частоту принимаемого импульсного сигнала БРЛК и закон её изменения;

- с учётом параметров движения КА, положения наземного пункта, известной частоты сигнала определяется амплитудно-фазовый коэффициент передачи каждого канала АР и проводится при необходимости его коррекция. Аналогичные операции выполняются в режиме передачи сигналов с наземного пункта на БРЛК для калибровки приёмных каналов ППМ;
- после установления уточнённых амплитуды и фазы в каналах АР проводится измерение ДН АФАР в режиме приёма/передачи, при котором убеждаются в соответствии её формы требуемым характеристикам.

### **Анализ результатов лётных испытаний бортового радиолокационного комплекса**

На основе разработанных методик была проведена верификация АФАР БРЛК в процессе лётных испытаний и получены снимки. Лётные испытания проводились в период с июля по сентябрь 2023 г. Результаты работы представлены на *рис. 8–18* (см. с. 81–82). На *рис. 8* приведена ДН АФАР, полученная после вывода БРЛК на орбиту и развёртывания силовой рамы, на *рис. 9* — соответствующее радиолокационное изображение.

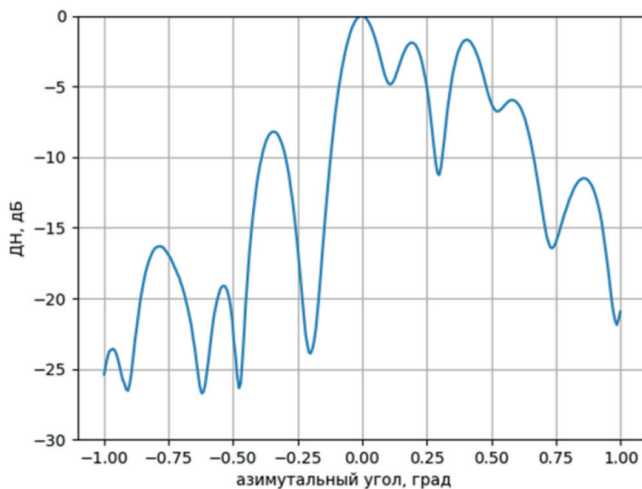
Согласно п. 4 предложенной методики была проведена поэтапная коррекция геометрических параметров раскрыва АФАР. Диаграммы направленности совместно включённых двух из пяти секций до и после коррекции положения приведены на *рис. 10*.

На *рис. 11, 12* показаны ДН АФАР, полученные после коррекции взаимного положения секций 4 и 5, и соответствующее радиолокационное изображение.

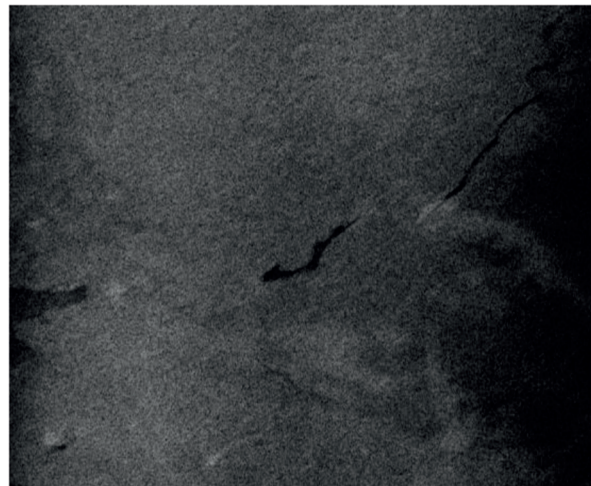
После коррекции геометрии раскрыва для секций 3 и 4 боковые лепестки снижены на 10 дБ и сформированы «провалы» между главным лепестком ДН и первыми боковыми лепестками. Диаграммы направленности совместно включённых секций 3 и 4 до и после коррекции геометрии раскрыва приведены на *рис. 13*.

На *рис. 14, 15* показаны ДН АФАР, полученные после коррекции взаимного положения секций 3–4 и 4–5, и соответствующее радиолокационное изображение.

Аналогично выполнен поворот оставшихся секций. На *рис. 16* приведены ДН АФАР в азимутальном сечении, измеренные после вывода БРЛК на орбиту (до коррекции параметров АС) и после настройки по предложенной методике. На *рис. 17* показаны радиолокационные изображения, полученные после вывода БРЛК на орбиту и верификации по предложенной методике.



*Рис. 8.* Диаграмма направленности АФАР, полученная после вывода БРЛК на орбиту



*Рис. 9.* Радиолокационное изображение Восточной Европы, полученное после вывода БРЛК на орбиту



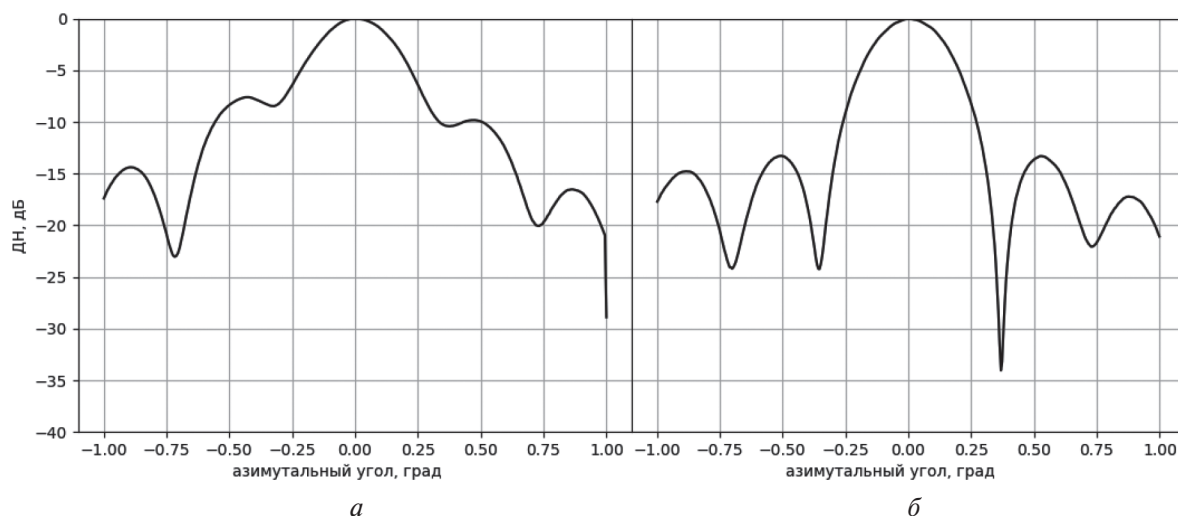


Рис. 10. Диаграммы направленности совместно включённых секций 4 и 5:  
*a* — до коррекции геометрии раскрыва; *б* — после коррекции

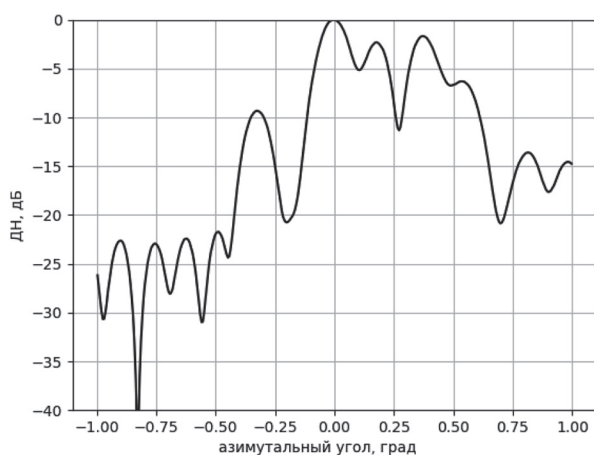


Рис. 11. Диаграмма направленности АФАР, полученная после коррекции взаимного положения секций 4 и 5

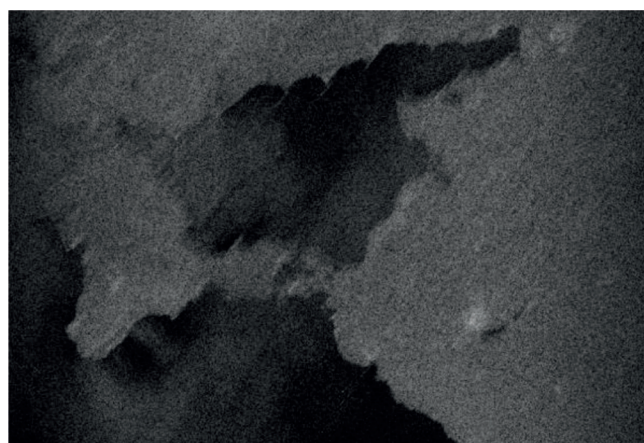


Рис. 12. Радиолокационное изображение, полученное после коррекции взаимного положения секций 4 и 5

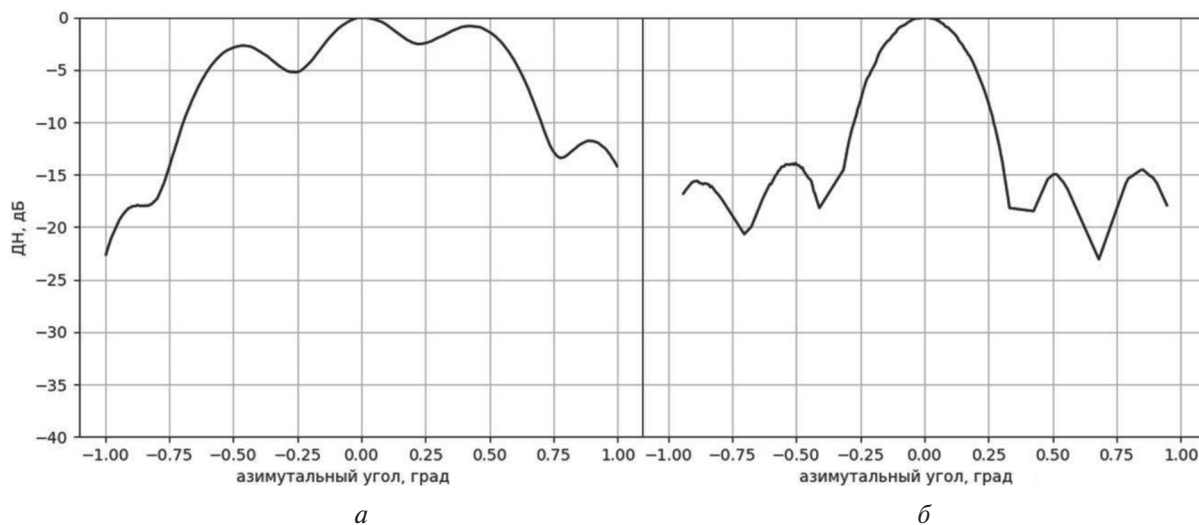


Рис. 13. Диаграммы направленности совместно включённых секций 3 и 4:  
*a* — до коррекции геометрии раскрыва; *б* — после коррекции

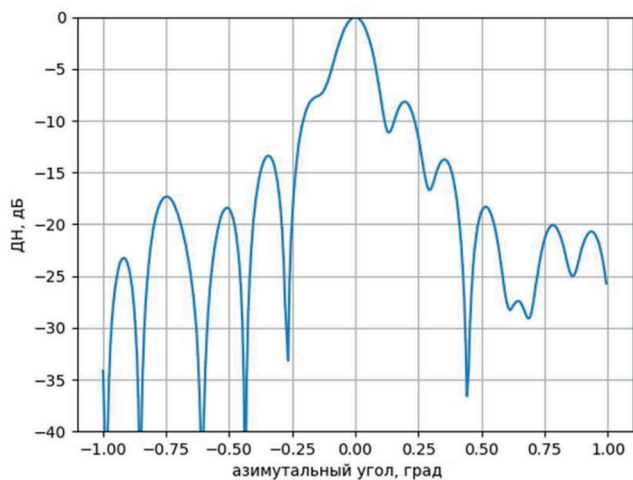


Рис. 14. Диаграмма направленности АФАР, полученная после коррекции взаимного положения секций 3–4 и 4–5

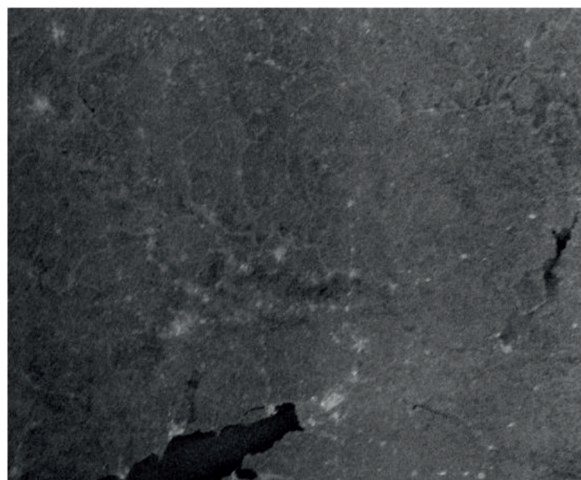


Рис. 15. Радиолокационное изображение, полученное после коррекции взаимного положения секций 3–4 и 4–5

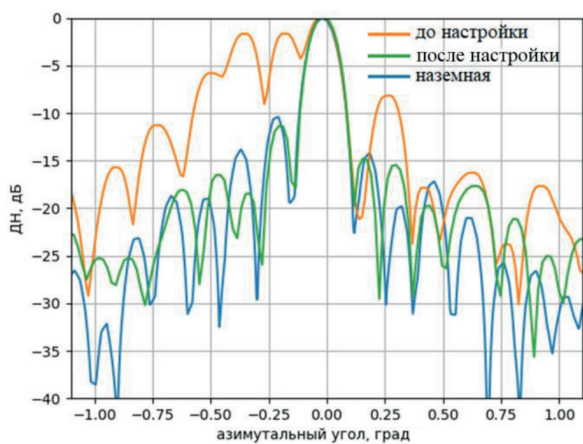


Рис. 16. Диаграмма направленности АФАР, полученная после коррекции взаимного положения секций

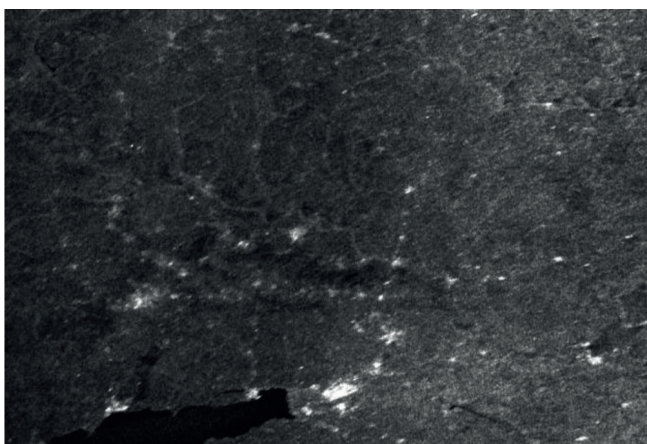


Рис. 17. Радиолокационное изображение Восточной Европы, полученное после верификации параметров АФАР

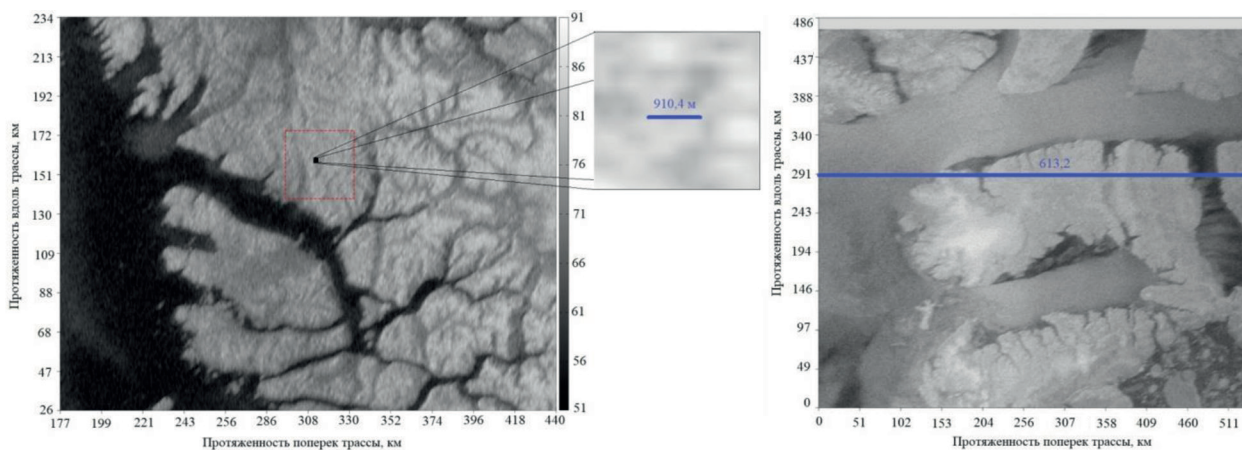


Рис. 18. Радиолокационное изображение о. Гренландия

На *рис. 18* приведены радиолокационные изображения с указанием пространственного разрешения и ширины полосы съёмки.

Представленные на *рис. 8–18* результаты подтверждают возможность принципиального управления характеристиками излучения АР на орбите. Полученные после коррекции параметров АФАР результаты пригодны для дальнейшего использования в приложениях ДЗЗ.

## Выводы

1. Принципиальным решением построения АС БРЛК КА «Метеор-М» № 2-3, 2-4 является использование АФАР, геометрические размеры раскрыва которой составляют  $13,5 \times 0,3$  м, а общее число АЭ — 8320. С учётом габаритных ограничений АФАР разделена на пять секций, которые располагаются на складываемой силовой раме производства АО «Корпорация «ВНИИЭМ» и выводятся на орбиту в свёрнутом положении. Для обеспечения компромисса между стоимостью АФАР, с одной стороны, и ограничениями на выходную мощность одного ППМ и требуемую точностью восстановления АФР на апертуре — с другой, АФАР разделена на 65 подрешёток, которые совместно с ППМ образуют каналы управления АФР. Подрешётки, объединяющие 128 ( $16 \times 8$ ) АЭ, расположены эквидистантно с образованием линейной АФАР. Распределение амплитуды и фазы вдоль широкой стороны АФАР в каждой подрешётке нерегулируемое и равномерное. Вдоль узкой стороны раскрыва АФР также является нерегулируемым и обеспечивает формирование косекансной ДН.
2. Рассмотренные методики верификации характеристик БРЛК включают в себя следующие этапы:
  - настройку и измерение ДН АФАР на этапе наземной отработки;
  - посекционное измерение ДН АФАР после вывода на орбиту и выполнение коррекции геометрических параметров раскрыва;
  - выполнение внешней калибровки каналов АФАР в случае, если ДН после коррекции геометрических параметров раскрыва не соответствует заданным требованиям.

Для коррекции геометрических параметров раскрыва может применяться механический поворот секций с использованием возможностей силовой рамы или коррекция АФР путём изменения весовых коэффициентов в каналах АФАР с учётом известных геометрических параметров раскрыва. Выполнение внешней калибровки заключается в формировании требуемого распределения амплитуды и фазы на апертуре по данным измерений, выполненных с использованием специального режима калибровки БРЛК. Данный способ представляется более универсальным, но требующим использования высокоточной измерительной аппаратуры. Поэтому считается целесообразным сначала сделать предположение, что секции АФАР после наземной настройки сохранили требуемое АФР на апертуре, и выполнить коррекции геометрических параметров раскрыва.

3. Анализ ДН и радиолокационных изображений, полученных во время лётных испытаний БРЛК до и после верификации параметров АФАР, показал, что представленные результаты подтверждают возможность принципиального управления характеристиками излучения АР на орбите. Использование АФАР позволяет скомпенсировать изменение характеристик приёмо-передающих трактов антенны, возникающее из-за влияния факторов, связанных с выводом КА на орбиту, нештатным развёртыванием излучающего раскрыва АФАР и последующей эксплуатацией БРЛК. Полученные после коррекции параметров АФАР радиолокационные изображения в полосе съёмки 600 км имеют пространственное разрешение менее 1 км и пригодны для дальнейшего использования в приложениях ДЗЗ.

## Литература

1. Внотченко С. Л., Коваленко А. И., Римап В. В., Теличев А. В., Чернышов В. С., Шишанов А. В. Системные принципы реализации космического радиолокатора «Северянин-М» // Всероссийская научно-практич. конф. «Косм. радиолокация». Владимир: Владимирский гос. ун-т, 2010. С. 20–29.
2. Габриэлян Д. Д., Демченко В. И., Кузнецов Ю. В., Петин В. О., Федоров Д. С., Шлаферов А. Л. Способ коррекции амплитудно-фазового распределения раскрываемой антенной решётки космического аппарата на орбите. Патент РФ 2655655. Рег. 30.05.2018.
3. Горбунов А. В., Чуркин А. Л., Павлов Д. А. Космический комплекс гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М» с космическим аппаратом «Метеор-М» // Вопросы электромеханики. 2008. Т. 103. С. 17–28.
4. Кровотыпцев В. А., Милехин О. Е. Характеристики радиолокационного обратного рассеяния морских льдов Арктики по данным ИСЗ «Океан» // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 2. С. 68–80.

## Principle of construction of the antenna system of the radar complex of Meteor-M No. 2-3, 2-4 satellites and verification of its characteristics in orbit

D. D. Gabrielyan, V. I. Demchenko, K. M. Zanin, A. A. Kosogor, Yu. V. Kuznetsov,  
R. A. Lebedev, O. V. Lutchenko, N. A. Mikhailov, A. L. Shlaferov

*Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communications  
Rostov-on-Don 344038, Russia  
E-mail: nlce@inbox.ru*

This paper presents the main technical solutions for the construction of an antenna complex for Meteor-M No. 2-3, 2-4 satellites. The principal solution to the construction of the complex was the use of an active phased antenna array. The use of this type of antennas makes it possible to fix the changes in the characteristics of channel paths that arise due to the influence of factors related to the launch of the spacecraft into space, the deployment of the radiating aperture of the antenna and subsequent exploitation of the complex. The methods of calibration of the antenna array necessary for the formation of the required amplitude-phase field at the aperture are considered. These techniques include setup of the antenna array at the factory testing stage and adjustment of the amplitude and phase field at its aperture at the space test stage. The adjustment during space tests has two ways of implementation. The first method consists in the mechanical correction of the geometry of the antenna aperture according to the measurement data of the directional patterns of its sections. The second method consists in the reconstruction of amplitude and phase field at the aperture according to the measurement data made using a special calibration mode. To demonstrate application of these techniques, the results of measuring the antenna array directional patterns performed at the factory testing stage, after satellite launch and putting into orbit and after correcting the amplitude and phase field are presented. These results confirm the possibility to control the antenna array directional pattern in space.

**Keywords:** space radar system, active phased array antenna, amplitude-phase field, directional pattern

Accepted: 14.02.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-73-85

## References

1. Vnotchenko S. L., Kovalenko A. I., Riman V. V., Telichev A. V., Chernyshov V. S., Shishanov A. V., System principles of the implementation of the space radar “Severyanin-M”, *Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya “Kosmicheskaya radiolokatsiya”* (Proc. All-Russia Conf. “Satellite Radar Survey”), Vladimir: Vladimir State University, 2010, pp. 20–29 (in Russian).

2. Gabrielyan D. D., Demchenko V. I., Kuznetsov Yu. V., Petin V. O., Fedorov D. S., Shlaferov A. L., *Sposob korrektsii amplitudno-fazovogo raspredeleniya raskrivaemoi antennoi reshetki kosmicheskogo apparata na orbite* (Spacecraft in orbit expandable antenna array amplitude-phase distribution adjustment method), Patent RU 2655655, Reg. 30.05.2018 (in Russian).
3. Gorbunov A. V., Churkin A. L., Pavlov D. A., The space complex of hydrometeorological and oceanographic support “Meteor-3M” with the spacecraft “Meteor-M”, *Voprosy elektromekhaniki*, 2008, Vol. 103, pp. 17–28 (in Russian).
4. Krovotintsev V. A., Milekhin O. E., Characteristics of radar backscattering of Arctic sea ice according to the data of the Ocean satellite, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1998, No. 2, pp. 68–80 (in Russian).