



АНТЕННЫЕ МОДУЛИ ДЛЯ АФАР Х-ДИАПАЗОНА

ANTENNA MODULES FOR X-BAND AESA

УДК 621.3

АБОЛДУЕВ ИГОРЬ МИХАЙЛОВИЧ*mail6@pulsarnpp.ru***БОРИСОВ ОЛЕГ ВАЛЕРЬЕВИЧ***466@pulsarnpp.ru***ГЕРАСИМОВ АНДРЕЙ ОЛЕГОВИЧ***gerasimov@pulsarnpp.ru***КОЛКОВСКИЙ ЮРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ***Прфессор**kolk@pulsarnpp.ru***МИННЕБАЕВ ВАДИМ МИНХАТОВИЧ***minnebaev_vm@pulsarnpp.ru***ОСИПОВСКИЙ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ***alekos@pulsarnpp.ru***РЕДЬКА АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ***redka_av@pulsarnpp.ru***РЕДЬКА АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ***redka_av@pulsarnpp.ru***ТИХОМИРОВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ***tikhomirov@pulsarnpp.ru**АО «НПП «Пульсар»**Москва, Россия*

In this paper the results of development and manufacturing of antenna modules designed for the active electronically scanned antenna array of space radar system for Earth remote sensing are presented. Products comprise transceiver modules based on microwave GaN HEMTs, secondary power supplies, microstrip antenna arrays.

Keywords: AESA; transceiver module; beam pattern; X-band; electronic antenna assembly; antenna module.

Антенные модули (МА) являются основным конструктивным и радиотехническим элементом активных фазированных антенных решеток (АФАР) различного назначения. МА является законченной конструктивной единицей и подлежит всему комплексу испытаний как законченное изделие. В АО «НПП «Пульсар» на основе нитрид-галлиевой ЭКБ собственного изготовления разрабатываются и изготавливаются МА для радиолокаторов с синтезированной апертурой с АФАР космического применения.

В зависимости от типа излучателей АФАР и требований к излучаемой пиковой мощности, антенный модуль, его состав, геометрические и тактико-технические характеристики могут корректироваться. При этом технологический процесс изготовления и основные конструктивные элементы остаются неизменными, то есть сохраняется конструктивно-технологическая преемственность. Ниже представлены два типа МА, разработанных в АО «НПП «Пульсар».

В состав модуля антенного (рис. 1) входят 32 приемопередающих (ППМ) двухполяризационных модуля, 4 микрополосковые

ABOLDUEV IGOR M.*mail6@pulsarnpp.ru***BORISOV OLEG V.***466@pulsarnpp.ru***GERASIMOV ANDREY O.***gerasimov@pulsarnpp.ru***KOLKOVSKIY YURY V.***Professor**kolk@pulsarnpp.ru***MINNEBAEV VADIM M.***minnebaev_vm@pulsarnpp.ru***OSIPOVSKIY ALEXEI A.***alekos@pulsarnpp.ru***REDKA ALEXEI V.***redka_av@pulsarnpp.ru***REDKA ANDREY V.***redka_av@pulsarnpp.ru***TIKHOMIROV ALEXANDER V.***tikhomirov@pulsarnpp.ru**“S&PE PULSAR” JSC**Moscow, Russia*

8-канальные антенные решетки, 8 делителей/сумматоров на 8, модуль диаграммообразования, 2 вторичных источника питания, блок управления антенным модулем, СВЧ и НЧ кабельные сети.

В состав антенного модуля, изображенного на рис. 2, входят двухканальные двухполяризационные приемопередающие модули (8 шт.), делитель/сумматор на 8, вторичный источник питания и 2 групповых излучателя. В отличие от 1 варианта, где за формирование диаграммы направленности антенны отвечает специализированный модуль, в варианте 2 его функция возлагается на отдельный модуль предварительного усиления и задержки, включенный в состав секции АФАР и обслуживающий 4 МА одновременно.

В зависимости от системных требований к радиолокатору антенные модули отличаются конфигурацией приемопередающих модулей и составом передающих и приемных трактов. ППМ является основой пространственного канала обработки

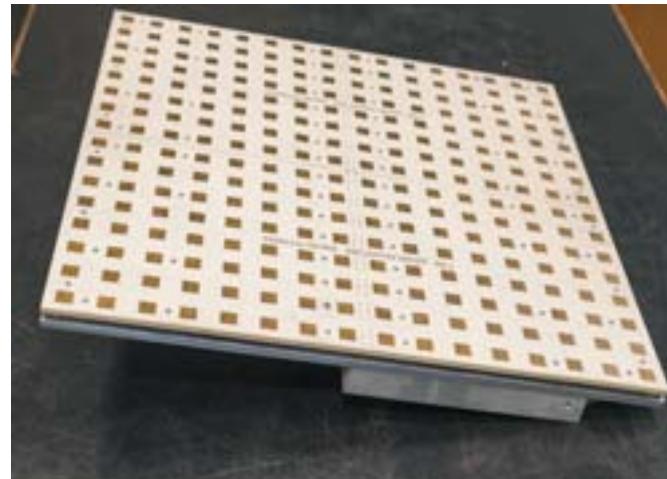


*Рис. 1. Модуль антенный, Тип 1
Fig. 1. Antenna module, type 1*

сигнала в МА и в АФАР в целом. Около 80 % стоимости антенного модуля приходится на ППМ. Для каждого антенного модуля (Тип 1 и Тип 2) были разработаны приемопередающие модули. Основой всех разработанных ППМ служат изготовленные на предприятии мощные нитридгаллиевые транзисторы. ГИС усилителей мощности на основе этих кристаллов позволили обеспечить необходимый уровень выходной мощности при длительности импульса $\tau_i = 10-60 \text{ мкс}$ и скважности $Q = 10$. В состав приемных и передающих трактов входят три типа кристаллов GaN транзисторов с ширинами затворов $W_{31} = 250 \text{ мкм}$, $W_{32} = 1000 \text{ мкм}$ и $W_{33} = 5000 \text{ мкм}$. Удельная выходная мощность составляет $P_{\text{вых.уд.}} \geq 5 \text{ Вт/мм}$, кроме того для GaN HEMT с $W_{31} = 250 \text{ мкм}$ коэффициент шума на $F = 10 \text{ ГГц}$ составляет $K_{\text{ш}} \leq 1,9 \text{ дБ}$.

Antenna modules are the basic structural and radio engineering component of active electronically scanned antenna arrays (AESA) designed for various applications. Antenna module is a complete structural unit and is subject to the full range of tests as a finished product. S&PE PULSAR has been designing and producing modules for space application AESA synthetic aperture radars (SAR) based on gallium nitride (GaN) electronic components of its own manufacturing.

Antenna module components, dimensions and performance parameters can be adjusted depending on the type of AESA radiating element and maximum output power requirements. The manufacturing process and main structural elements remain the same, preserving the design and technological continuity. The pictures below



*Рис. 2. Модуль антенный, Тип 2
Fig. 2. Antenna module, type 2*

В зависимости от системы, в которой используется ППМ, выдвигаются требования не только по уровню выходной мощности передающего тракта, коэффициента шума приемного, но и к количеству каналов в составе одного модуля. Основные технические характеристики разработанных модулей представлены в табл. 1.

Конструктивно приемопередающий модуль Тип 1 представляет собой герметичный одноканальный двухполяризационный модуль с коаксиальными входами/выходами. ППМ осуществляет усиление и передачу зондирующего сигнала в одной из поляризаций (Г или В), а также прием и усиление отраженного сигнала в двух поляризациях (ГВ, Г или В). Режим работы — симплексный. В модуле реализована возможность независимого управления фазовой характеристикой передающих и приемных каналов, а также амплитудной характеристикой приемных каналов. С этой целью в модуле установлены цифровые шестиразрядные фазовращатели и пятиразрядные аттенюаторы, а также плата управления с размещенной на ней схемой подачи питания и управления.

present two types of modules developed in S&PE PULSAR.

Antenna module (Fig. 1) comprises 32 dual-polarization transmit/receive modules (TRM), 4 microstrip 8-channel antenna arrays, 8 divider/adders by 8, beam pattern formation device, 2 secondary power supply sources, antenna control unit, microwave and low-frequency wiring.

Antenna module in Fig. 2 comprises dual-channel dual-polarization transmit/receive modules (8 pc.), divider/adder by 8, secondary power supply source and 2 radiating elements. Compared with the module of the 1st type, where antenna beam forming is controlled by specific device, in the 2nd type of antenna module, beam forming function is performed by a separate preamplifier and delay module. This separate module is included in AESA section and operates for 4 antenna modules simultaneously.

Antenna modules have different configurations of T/R modules and different composition of receiving and transmitting channels, depending on radar system requirements. TRMs are the basis of signal processing spatial channel of antenna module and AESA. TRMs account for about 80 % of the cost of the antenna module. Transmit/receive modules have been developed for each type of antenna module (type 1 and 2). All TRMs are based on powerful GaN HEMTs manufactured by PULSAR. Power amplifier hybrid ICs based on these transistors are providing the required output power levels at pulse length $\tau_p = 10-60 \mu\text{s}$ and duty cycle $Q = 10$. Receiving and transmitting channels comprise three types of GaN transistor dies with gate width $W_{g1} = 250 \mu\text{m}$, $W_{g2} = 1000 \mu\text{m}$, $W_{g3} = 5000 \mu\text{m}$. Specific output power $P_{\text{out}} \geq 5 \text{ W/mm}$. Noise figure for

Таблица 1

Table 1

Наименование параметра, ед. измерения Parameter, value	Значение параметра Parameter	
	Тип 1 Type 1	Тип 2 Type 2
- число каналов на прием, шт. - number of receiving channels, pc.	2	2
- число каналов на передачу, шт. - number of transmitting channels, pc.	2	4
- диапазон рабочих частот, ГГц - operating frequency band, GHz	X-диапазон X-band	X-диапазон X-band
- полоса рабочих частот, МГц - operating frequency bandwidth, MHz	500	500
- выходная импульсная мощность, Вт - pulsed output power, W	не менее 16 Not less than 16	не менее 8 Not less than 8
- коэффициент усиления передающего канала, дБ - transmitting channel gain, dB	$27,0 \pm 1,0$	Не менее 27,0 Not less than 27,0
- коэффициент шума приемного канала, дБ - receiving channel noise figure, dB	не более 3,5 Not more than 3.5	не более 3,5 Not more than 3.5
- коэффициент усиления приемного канала, дБ - receiving channel gain, dB	$25,0 \pm 1,0$	$27,0 \pm 1,0$
- отклонение ФЧХ приемного и передающего каналов от линейной, градусы - receiving and transmitting channels phase response to linearity deviation, degrees	не более ± 10 Not more than ± 10	не более ± 10 Not more than ± 10
- КПД приемопередающего модуля, % - transceiver PAE, %	не менее 27 Not less than 27	не менее 27 Not less than 27
- габаритные размеры модуля, мм - module dimensions, mm	94×54×20	150×44×22

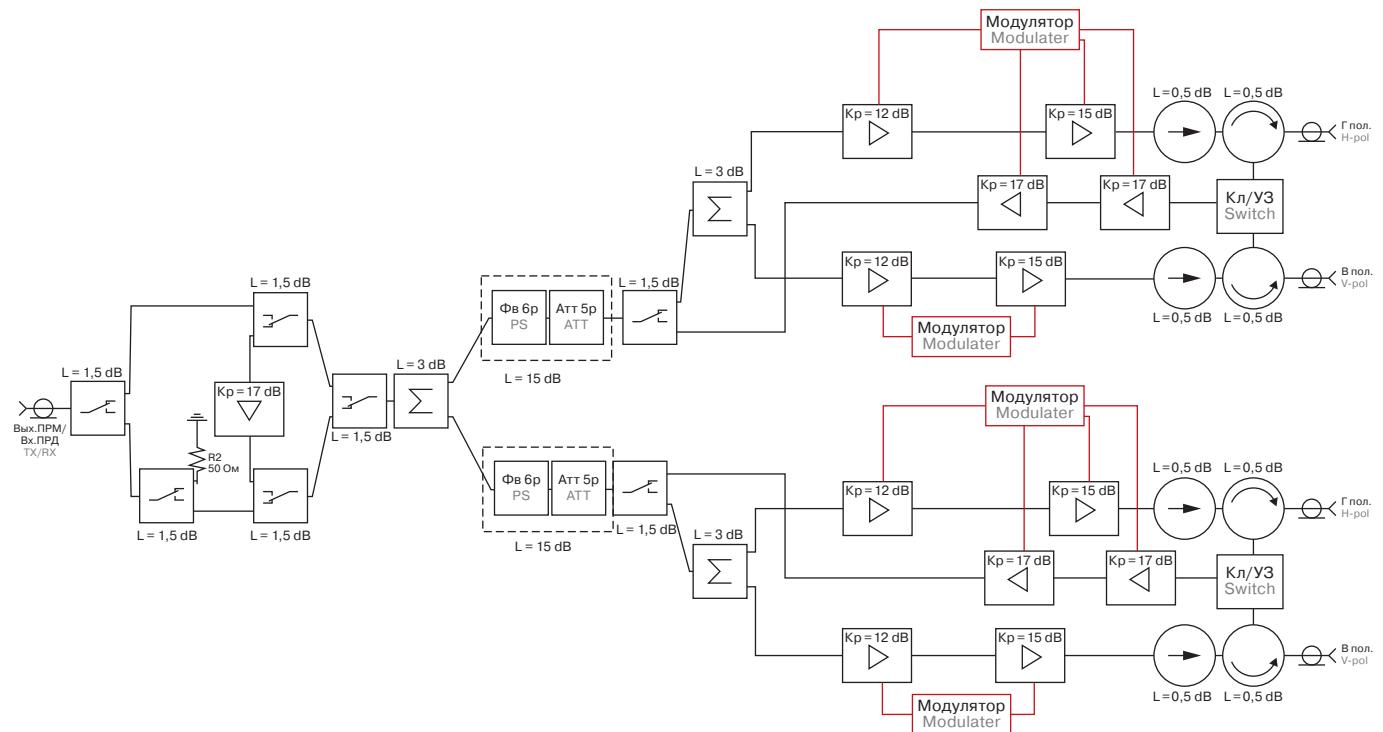


Рис. 3. Блок-схема ППМ (Тип 1)

Fig. 3. Type 1 TRM block-diagram

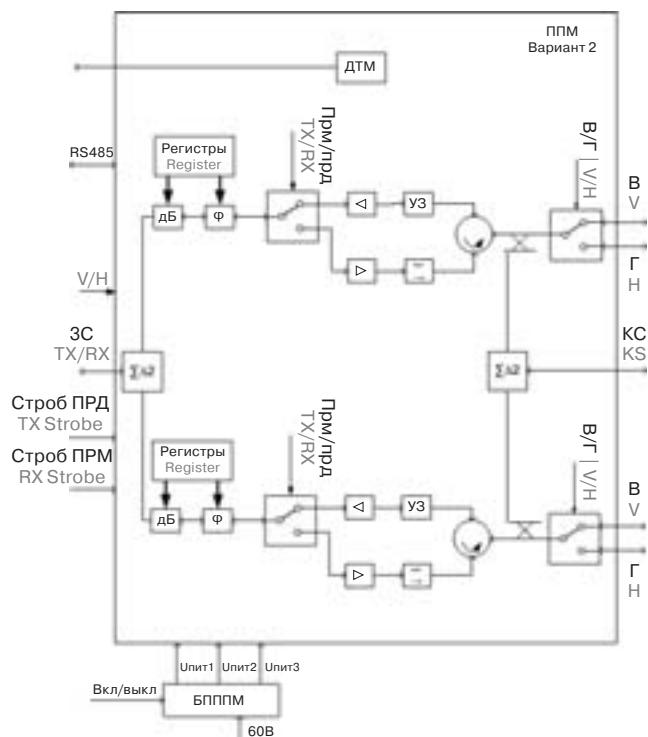


Рис. 4. Блок-схема ППМ (Тун 2)
Fig. 4. Type 2 TRM block-diagram

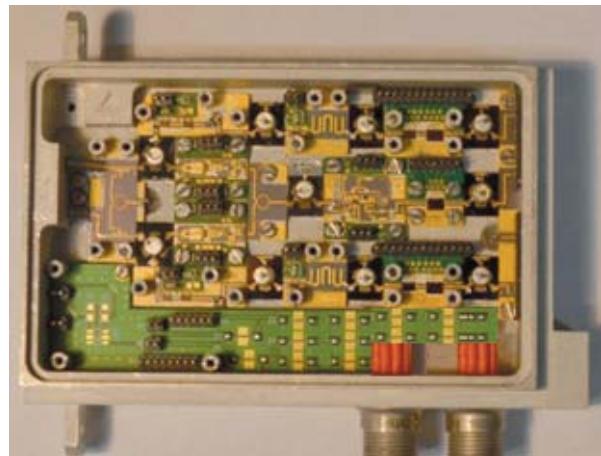


Рис. 5. Внешний вид ППМ (Тун 1)
Fig. 5. TRM view (type 1)

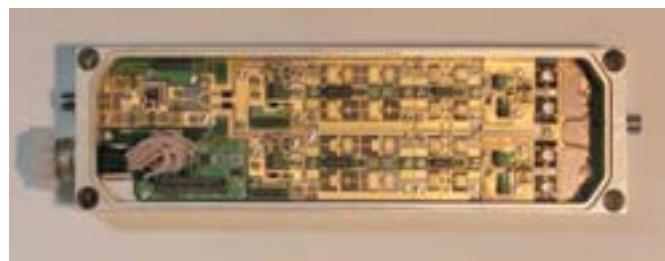


Рис. 6. Внешний вид ППМ (Тун 2)
Fig. 6. TRM view (type 2)

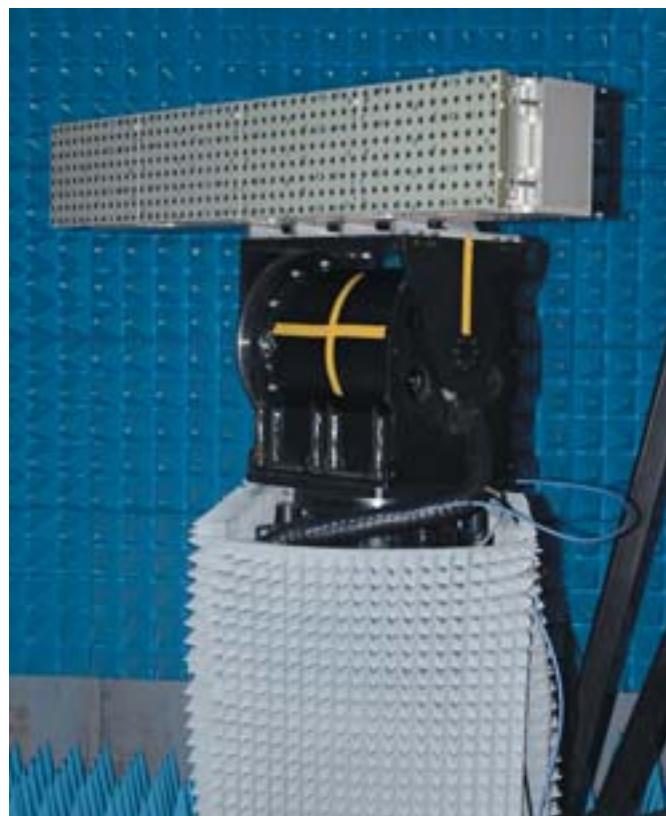


Рис. 7. Модуль антенный на опорно-поворотном устройстве безэховой камеры
Fig. 7. Antenna module on the rotary support in the anechoic chamber

При разработке модуля стояла задача реализации функции контроля, обеспечивающей сквозные проверки приемного и передающего каналов, схемы защиты по цепям питания, управления, модуляции, а также обеспечение контроля температуры и автоматического отключения ППМ в случае превышения максимально-допустимого значения температуры. Блок-схема ППМ представлена на рис. 3.

ППМ Тип 2 представляет собой герметичный двухканальный модуль с возможностью переключения поляризации излучаемого и принимаемого сигналов «1 вход — 4 выхода». Особенность модуля заключается в том, что структурная схема построена таким образом, что используемые в передающем канале цифровые аттенюаторы и фазовращатели, а также предварительный усилитель мощности, также являются элементами приемных трактов ППМ. Блок-схема ППМ представлена на рис. 4.

Особенностью приемопередающих модулей является «привязка» входных и выходных разъемов модуля к конструкции излучающей части модуля антенного, что требует дополнительное тепловое, конструкторское и радиотехническое макетирование ППМ для реализации заданных характеристик МА. Внешний вид разработанных ППМ представлен на рис. 5 и рис. 6, соответственно.

Измерения электродинамических характеристик модулей антенных проводятся в безэховой камере. В состав безэховой камеры входит автоматизированный стенд измерений, включающий в себя два опорно-поворотных устройства, сканер ближней зоны, а также оборудование для проведения измерений характеристик МА с апертурой до 0,5 метра в дальней зоне. На рис. 7 представлен модуль антенный (Тип 1) на опорно-поворотном устройстве безэховой камеры.



Электронное сканирование проводится в угломестной плоскости с шагом перестройки 1° . Сектор сканирования ± 20 градусов. Полученные результаты измерений показывают хорошее совпадение с расчетами, что, в свою очередь, говорит о правильности выбранных конструкторских и технологических решений построения модулей антенных. На рис. 8 представлено семейство диаграмм направленности $\frac{1}{4}$ МА (Тип I) в угломестной плоскости. Диаграмма направленности модуля антенного (Тип 2) представлена на рис. 9.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов О. В., Герасимов А. О., Колковский Ю. В., Миннебаев В. М., Никольская Ю. О., Редька Ал. В., Редька Ан. В. 2-х канальный нитридгалиевый приемопередающий модуль X-диапазона частот // Материалы XIV научно-технической конференции, 2015 г. — С. 137–140.
2. Колковский Ю. В., Миннебаев В. М., Никольская Ю. О., Редька Ал. В. Двухканальный приемопередающий модуль для АФАР X-диапазона на широкозонных полупроводниковых приборах // Материалы Международной конференции «Микроэлектроника-2015», 2015 г. — С. 192–195.
3. Белолипецкий А. В., Борисов О. В., Колковский Ю. В., Легай Г. В., Миннебаев В. М., Крохин А. П., Савкин Ю. П., Редька Ал. В., Редька Ан. В. Антенный электронный блок для спутниковой АФАР X-диапазона // Материалы XV научно-технической конференции, 2017 г. — С. 60–62.

GaN HEMT with $W_{gl} = 250\mu\text{m}$ at $F = 10\text{GHz}$ equals $K_n \leq 1.9\text{dB}$.

Depending on the system using TRM, there are additional requirements for the amount of channels per single module. Performance characteristics of designed modules are given in Table 1.

Type 1 transmit/receive module is a sealed single-channel dual-polarization module with coaxial input/output. TRM provides amplification and transmission of signal in one of the two polarization modes (H or V), as well as receiving and amplification of reflected signal in two polarization modes (HV, H or V). The module operates in simplex mode. The module has a function of independent control of receiving and transmitting channel phase response, as well as receiving channels frequency response. For that purpose, the

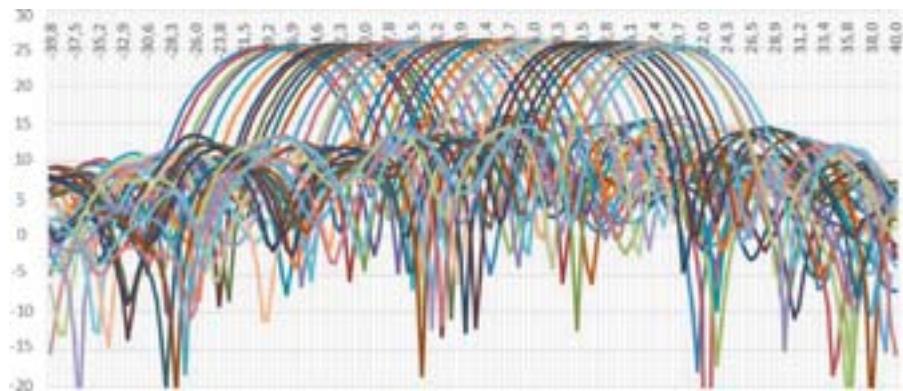


Рис. 8 Диаграмма направленности $\frac{1}{4}$ МА (Тип I) в угломестной плоскости

Fig. 8. Beam pattern of $\frac{1}{4}$ antenna module (type I) in elevation plane

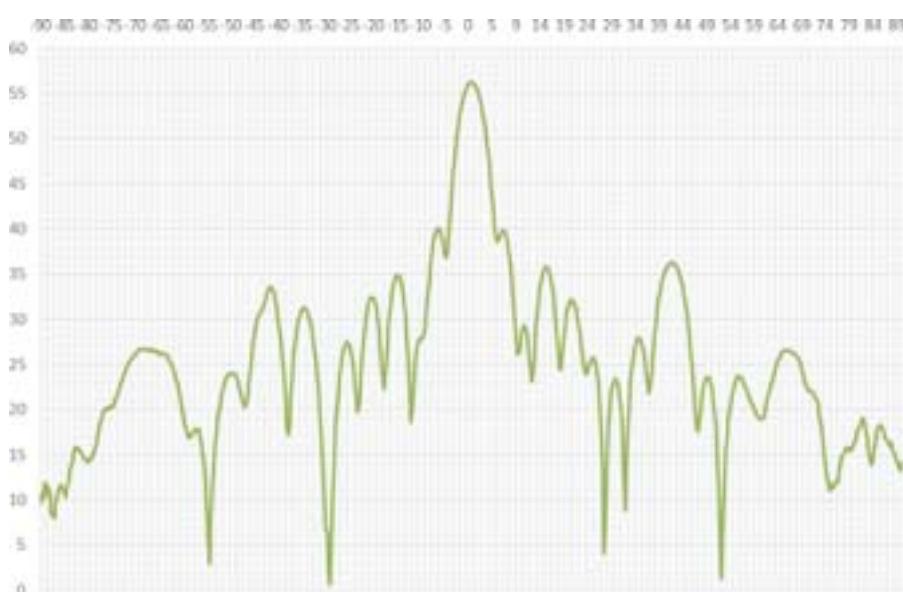


Рис. 9. Диаграмма направленности (Тип 2)

Fig. 9. Type 2 antenna module beam pattern

module includes digital six-digit phase shifters, five-digit attenuators, and control board comprising power supply and control circuit. Monitoring function has been implemented during the module development, providing through monitoring of receiving and transmitting channels, power supply, control and modulation protection circuits, as well as controlling the temperature levels and providing an emergency shut-down of the TRM in case of overheat. Fig. 3 presents TRM block-diagram.

Type 2 TRM is a sealed dual-channel module with a transmitting and receiving signal polarization switching function “1 in — 4 out”. The module is designed in such a way that digital attenuators and phase shifters in transmitting channel and power preamplifier are components of TRM receiving channels. TRM block-diagram is given in Fig. 4.

Transmitting/receiving modules feature is linking input and output ports to the structure of transmitting part of antenna module, which requires additional thermal, structural and radioengineering design of TRM to implement the desired characteristics of antenna module. Figs 5 and 6 present the TRMs developed within the research.

Antenna module electrical parameters measurements have been carried out in an anechoic chamber. The anechoic chamber comprises an automated test board with two rotary supports, near-field scanner and equipment for measuring antenna module parameters with an aperture up to 0.5 meter in the far-field. Fig. 7 shows the type 1 antenna module on the rotary support of the anechoic chamber.

Electronic scanning is performed in elevation plane with adjustment increment of 1° .



4. Белолипецкий А. В., Борисов О. В., А. О. Герасимов, Колковский Ю. В., Лычагин А. Ю., Миннебаев В. М., Осиповский А. А., Редька Ал. В., Редька Ан. В., Хабаров И. А. Модуль антенный АФАР X-диапазона // Материалы XV научно-технической конференции, 2017 г. — С. 288–289.
5. Белолипецкий А. В., Борисов О. В., Колковский Ю. В., Легай Г. В., Миннебаев В. М., Крохин А. П., Савкин Ю. П., Редька Ал. В., Редька Ан. В. Антенный электронный блок для спутниковой АФАР X-диапазона // Электронная техника, Серия 2 Выпуск 3 (246). 2017 г. — С. 15–25.
6. Васильев А. Г., Колковский Ю. В., Корнеев С. В., Дорofeev A. A., Миннебаев В. М. SiGe и GaN приборы для приемопередающих и передающих модулей // Электронные техника, Серия 2. Полупроводниковые приборы, 2009 г., № 2. — С. 5–10.
7. Груздов В. В., Герасимов А. О., Миннебаев В. М., Переvezentsev A. V. Вопросы устойчивости ППМ на GaN к входной СВЧ мощности // Мокеровские чтения. Труды 7-й Международной научно-практической конференции по физике и технологиям наноструктурной СВЧ электроники — НИЯУ МИФИ, 2016. — С. 41–42
8. Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. // Радиолокационные системы землеобзора космического базирования // Под ред. В. С. Вербы. М. Радиотехника, 2010.
9. Колковский Ю. В., Миннебаев В. М. Применение GaN устройств в условиях космического пространства // Электронные техника, Серия 2. Полупроводниковые приборы, 2014 г., № 2 (233). — С. 20–27.
10. Вендинк О. Г., Парнес М. Д. // Антенны с электрическим сканированием.

Scan sector is ± 20 degrees. Measured results testify to a good match with simulations, which indicates the appropriate design and technological decisions made while developing the antenna module. Fig. 8. shows beam patterns of $\frac{1}{4}$ antenna modules (type 1) in elevation plane. Beam pattern of type 2 antenna module is shown in Fig. 9.

REFERENCES

1. Borisov O. V., Gerasimov A. O., Kolkovskiy Yu. V., Minnebaev V. M., Nikolskaya Yu. O., Redka Al. V., Redka An. V. *X-band 2-channel GaN transmit/receive module*. Proceedings of the 14th Scientific and Technological Conference, 2015, pp. 137–140. (In Russian).
2. Kolkovskiy Yu. V., Minnebaev V. M., Nikolskaya Yu. O., Redka Al. V. *2-channel transmit/receive module for X-band AESA based on wideband-gap semiconductor devices*. Proceedings of “Mikroelektronika-2015” International Conference, 2015, pp. 192–195. (In Russian).

3. Belolipetskiy A. V., Borisov O. V., Kolkovskiy Yu. V., Legai G. V., Minnebaev V. M., Krokhin A. P., Savkin Yu. P., Redka Al. V., Redka An. V. *Electronic antenna block for X-band satellite AESA*. Proceedings of the 15th Scientific and Technological Conference, 2017, pp. 60–62. (In Russian).
4. Belolipetskiy A. V., Borisov O. V., Gerasimov A. O., Kolkovskiy Yu. V., Lychagin A. Yu., Minnebaev V. M., Osipovskiy A. A., Redka Al. V., Redka An. V., Khabarov I. A. *X-band AESA antenna module*. Proceedings of the 15th Scientific and Technological Conference, 2017, pp. 288–289. (In Russian).
5. Belolipetskiy A. V., Borisov O. V., Kolkovskiy Yu. V., Legai G. V., Minnebaev V. M., Krokhin A. P., Savkin Yu. P., Redka Al. V., Redka An. V. *Electronic antenna block for X-band satellite AESA*. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*. Issue 3 (246). 2017, pp. 15–25. (In Russian).
6. Vasilyev A. G., Kolkovskiy Yu. V., Kornev S. V., Dorofeev A. A., Minnebaev V. M. *SiGe and GaN devices for transceiver and transmitting modules*. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*. No. 2. 2009, pp. 5–10. (In Russian).
7. Gruzov V. V., Gerasimov A. O., Minnebaev V. M., Perevezentsev A. V. *Issues of GaN TRM input microwave power stability. Mokerovskie chteniya*. Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference on Physics and Technology of Microwave Nanoelectronics — NRNU MEPhI, 2016, pp. 41–42. (In Russian).
8. Verba V. S., Neronskiy L. B., Osipov I. G., Turuk V. E. *Space radar systems for Earth sensing applications*. Ed. by Verba V. S., M.: Radiotekhnika, 2010. (In Russian).
9. Kolkovskiy Yu. V., Minnebaev V. M. *GaN devices space applications*. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2014, No. 2 (233), pp. 20–27.
10. Vendik O. G., Parnes M. D. *Electronically scanned antennas*. (In Russian).

