

УДК 621.396.673

## Навигационные антенные модули аппаратуры ГНСС

С. Н. Бойко<sup>1</sup>, А. В. Исаев, С. В. Косякин<sup>2</sup>, Ю. С. Яскин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>к. ф.-м. н., <sup>2,3</sup>к. т. н.

Филиал ОАО «ОРКК» – «НИИ космического приборостроения»

e-mail: npk6@mail.ru

**Аннотация.** В статье предложены оригинальные методы конструирования навигационных антенных модулей для аппаратуры глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Используется бескорпусная технология производства антенных модулей с применением метаматериалов в антенном элементе, улучшающих его характеристики, специальный EBG-метаматериал и метод его установки в геодезическом антенном модуле для снижения эффекта многолучевости, совместное применение бескорпусного антенного модуля с навигационным приемником. Рассматриваемые в статье подходы к проектированию навигационных модулей приводят к минимизации габаритных размеров, снижению стоимости производства, технологичности изделий, улучшению технических и эксплуатационных характеристик.

**Ключевые слова:** антенный модуль, цельнокерамическая технология, метаматериал, стабильность фазового центра

## Navigational Antenna Modules of the GNSS Equipment

S. N. Boyko<sup>1</sup>, A. V. Isaev, S. V. Kosyakin<sup>2</sup>, Yu. S. Yaskin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>candidate of physics and mathematics, <sup>2,3</sup>candidate of engineering science,

Branch of Joint Stock Company "United Rocket and Space Corporation" – "Institute of Space Device Engineering"

e-mail: npk6@mail.ru

**Abstract.** The article describes original design methods of navigational antenna modules for the global navigation satellite system (GNSS) equipment. The uncased technology for antenna modules production using metamaterials in the antenna element improving its characteristics, special EBG-metamaterial and a method for its installation into the geodesic antenna module to reduce the multibeam effect, common application of an uncased antenna module with a navigational receiver are used. The approaches to the design of navigational modules result in overall dimensions minimization, production cost decrease, items manufacturability, and improved technical and operational characteristics.

**Keywords:** antenna module, all-ceramic technology, metamaterial, phase center stability

В настоящее время в мировой практике сформированы стандартные подходы и методы проектирования антенных модулей. В статье описаны методы и решения, которые отличаются от традиционных.

В области проектирования навигационных антенн прослеживается тенденция к интеграции антенного элемента, фильтров, малошумящего усилителя и микросборки приемника в единое устройство, названное активной навигационной антенной или навигационным антенным модулем.

Обычно в качестве антенного элемента навигационного антенного модуля используется микрополосковая (или печатная) антенна, как наиболее компактная [1].

Авторами была предложена оригинальная концепция конструирования навигационных антенных модулей, в соответствии с которой диэлектрическая подложка антенного элемента выполняется из керамики в форме перевернутой чаши с антенным элементом наверху и металлизированной внутренней полостью, в которую помещаются все активные элементы [2]. Такая технология производства антенных модулей получила название «бескорпусной» или «цельнокерамической».

На рис. 1, а представлен антенный элемент чашеобразной формы, а также модуль, выполненный по цельнокерамической технологии на его основе, имеющий геометрические размеры  $48 \times 44 \times 19$  мм (рис. 1, б).

Результатом применения такого подхода к проектированию навигационных антенных модулей явилось существенное увеличение их прочности, минимизация размеров, снижение стоимости производства модулей благодаря их технологичности. Кроме того, антенна в форме перевернутой чаши обладает рядом дополнительных преимуществ по отношению к микрополосковой антенне традиционной формы. А именно, она имеет большую (в 1,5–2 раза) рабочую полосу частот, более высокую (примерно на 6 %) эффективность излучения, более широкую амплитудную диаграмму направленности и, наконец, более широкий (до 1,5 раз) диапазон углов  $\theta$ , в котором сохраняется круговая поляризация поля (на рис. 2 представлены зависимости коэффициента усиления ( $K_y$ ) и коэффициента эллиптичности ( $K_\epsilon$ ) от угла  $\theta$ ). Эти преимущества

дают возможность уменьшить размеры навигационного антенного модуля в целом.

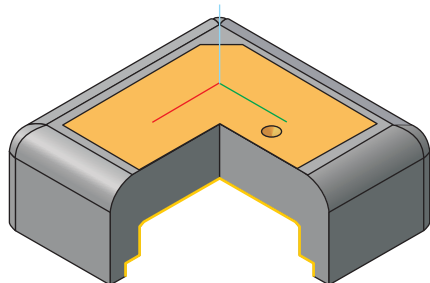
Кроме того, параметры антенного элемента в форме перевернутой чаши намного меньше зависят от размеров экрана, на который он может быть установлен. Антенный модуль, выполненный по цельнокерамической технологии, может быть использован даже без дополнительного экрана.

Дополнительные возможности дает использование метаматериала в конструкции антенного элемента и цельнокерамического антенного модуля в целом. В общем случае использование метаматериалов в антенном элементе улучшает такие его параметры, как ширина полосы согласования, усиление, избирательность, отсечка заднего излучения. На рис. 3, а представлена конструкция антенного элемента на основе метаматериала, а на рис. 3, б цельнокерамического антенного модуля, выполненного на его базе.

Конструкция представленного антенного элемента позволяет использовать подложки с меньшей диэлектрической проницаемостью и тем самым обеспечить большую эффективность излучения. Кроме того, вследствие применения в качестве подложки материалов с более низкой диэлектрической проницаемостью антенный элемент имеет минимальный вес и стоимость. Антенный модуль АСНК-3 (рис. 3, б), спроектированный на его базе, имеет очень широкую диаграмму направленности и круговую поляризацию поля при углах  $\theta$  от минус  $80^\circ$  до плюс  $80^\circ$  (рис. 4), плоскую и компактную конструкцию.

На рис. 5 представлены встраиваемый приемный антенный модуль с микросборкой приемника, выполненный по цельнокерамической технологии (а), и аналог этого модуля иностранного производства, выполненный по традиционной технологии (б). Преимущества цельнокерамического модуля заключаются в его полной герметичности, работе в диапазонах частот L1 ГЛОНАСС/GPS, E1 GALILEO и B1 BEYDOU одновременно (в отличие от аналога, работающего только в диапазоне L1 GPS) и лучшем уровне приема спутниковых сигналов, что обусловлено чашеобразной формой антенного элемента.

Преимущества цельнокерамических антенных модулей в качестве приема сигналов ГНСС иллю-

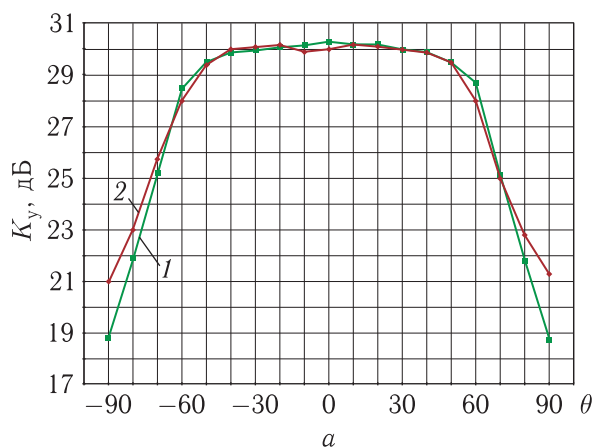


а

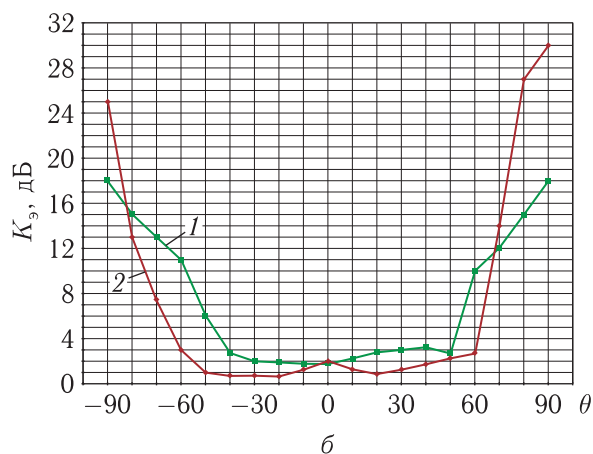


б

Рис. 1. Конструкция антенного элемента чашеобразной формы (а) и навигационный антенный модуль АСНК-1, выполненный на ее основе (б)

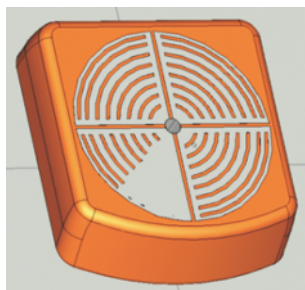


а



б

Рис. 2. Амплитудные (а) и поляризационные (б) ДН антенного модуля традиционного типа (1) и бескорпусного антенного модуля (2)



а



б

Рис. 3. Конструкция антенного элемента на основе метаматериала (а); цельнокерамический антенный модуль АСНК-3, выполненный на его базе (размеры  $30 \times 30 \times 12$  мм) (б)

стрируются на рис. 6. На рисунке приведены номограммы принимаемых навигационными модулями сигналов в диапазоне L1 ГЛОНАСС/GPS: для модуля, выполненного по традиционной технологии (рис. 6, а), и модуля, выполненного по цель-

нокерамической (рис. 6, б) технологии. Оба модуля находились в одинаковых условиях. Из графиков видно, что цельнокерамический модуль имеет лучшее отношение сигнал/шум и принимает сигналы от большего числа спутников.

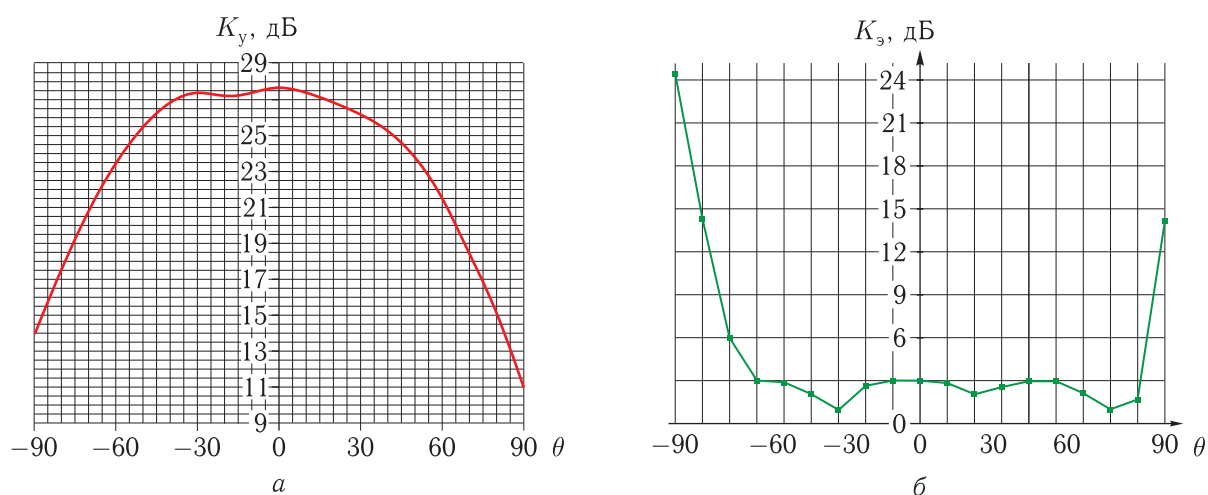


Рис. 4. Измеренные амплитудная (а) и поляризационная (б) диаграммы направленности навигационного антенного модуля АСНК-3

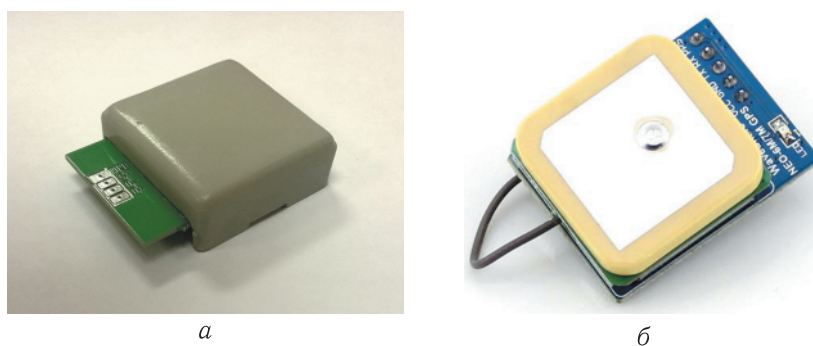


Рис. 5. Цельнокерамический антенный модуль ПАМ-2 (размеры  $30 \times 30 \times 10$  мм) (а) и аналог, выполненный по традиционной технологии (размеры  $22 \times 22 \times 8$  мм) (б)

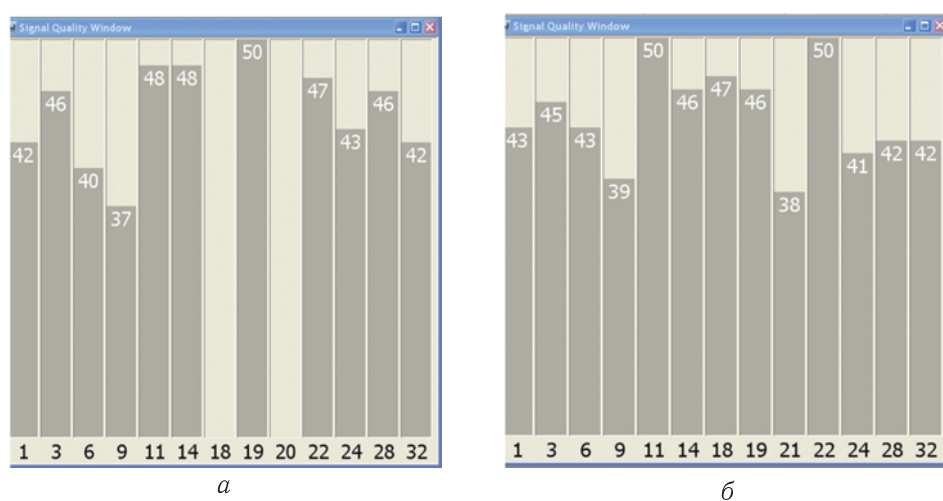


Рис. 6. Уровни приема спутниковых сигналов при помощи традиционного (а) и цельнокерамического (б) антенных модулей с одинаковыми размерами

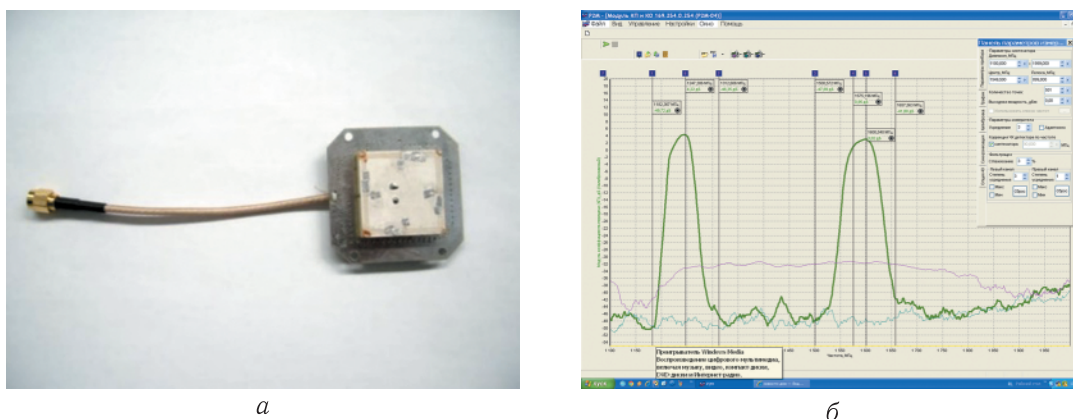


Рис. 7. Двухчастотный навигационный антенный элемент (размеры  $30 \times 30 \times 10$  мм) (а) и АЧХ активного антенного модуля АСНП-4, спроектированного на его основе (б)

В настоящее время происходит увеличение числа ГНСС за счет ввода в эксплуатацию GALILEO и BEYDOU и т.п., а также добавления новых частотных диапазонов уже существующих ГНСС. Поэтому возникает необходимость в создании многофункциональной аппаратуры, работающей одновременно с максимальным числом ГНСС в различных (в идеале во всех) диапазонах частот. Это обстоятельство влечет за собой необходимость создания печатных антенн с расширенным диапазоном рабочих частот либо многодиапазонных микрополосковых антенн. Обычно широкая полоса согласования печатной антенны с малошумящим усилителем достигается за счет применения так называемого распределенного питания антенны [4]. Однако этот метод приводит к необходимости создания многослойных печатных плат.

Для работы в расширенном диапазоне частот (с большим числом функционирующих сейчас ГНСС) авторами был предложен антенный элемент, который имеет два планарных сегмента, расположенных симметрично относительно центра микрополосковой антенны (рис. 7, а). Первый сегмент, расположенный в центре подложки, — квадрат, а второй выполнен в виде квадратной рамки вокруг первого сегмента. Между сегментами существует распределенная взаимосвязь, которая позволяет добиться согласования антенны с питающим 50-омным трактом и сохранения формы диаграммы направленности в полосе частот L1 ГЛОНАСС/ GPS, E1 GALILEO и B1 BEYDOU. На рис. 7 приведена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) этого антенного модуля.

Предложенный антенный элемент может быть также спроектирован для работы в двух отдельных диапазонах, например L1 и L2 ГЛОНАСС/ GPS или L1 GPS и E5 GALILEO. На базе такого антенного элемента был спроектирован активный модуль АСНП-4 с малошумящим усилителем с фильтрами и защитой от перегрузки для работы в диапазонах частот L1 и L2 ГЛОНАСС/ GPS, описанный в статье [5]. Данный антенный модуль может быть использован как независимый встраиваемый элемент навигационного приемника ГЛОНАСС/ GPS/ GALILEO, так и в качестве базового элемента внешних антенн, а также антенных решеток для навигационной аппаратуры с режекцией помех.

Однако при проектировании антенного модуля, способного работать одновременно во всех без исключения рабочих диапазонах частот ГНСС ГЛОНАСС/ GPS/ GALILEO/ BEYDOU возможно применение более сложного антенного элемента, а именно микрополосковой антенны этажерочного

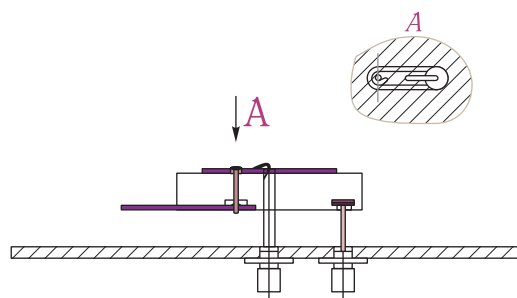


Рис. 8. Антенна этажерочного типа со встречной запиткой антенных элементов



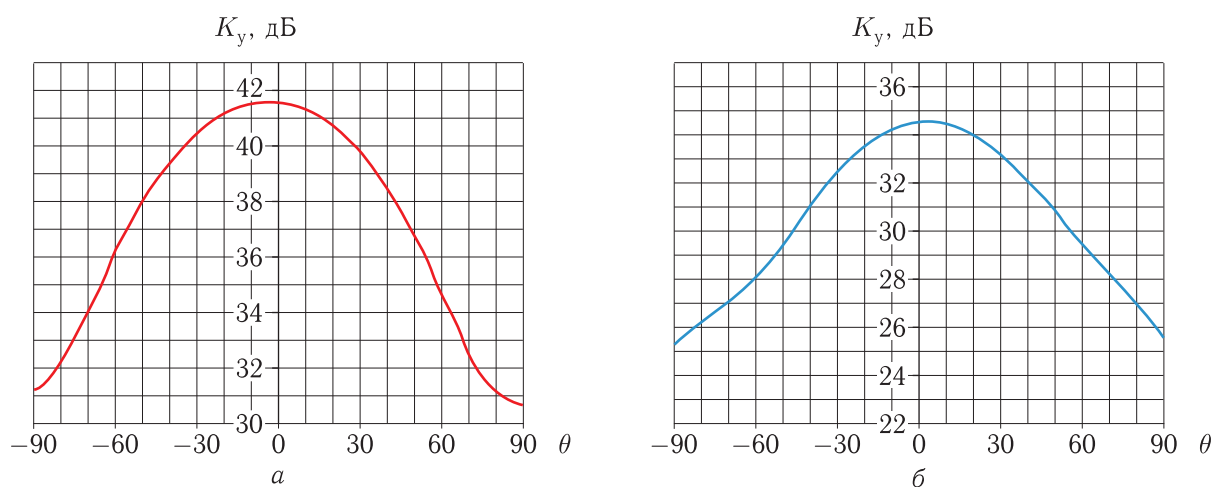


Рис. 9. Диаграммы направленности модуля АА2-ККС на базе антенны этажерочного типа со встречной запиткой антенных элементов на частотах 1600 МГц (а) и 1247 МГц (б)



а

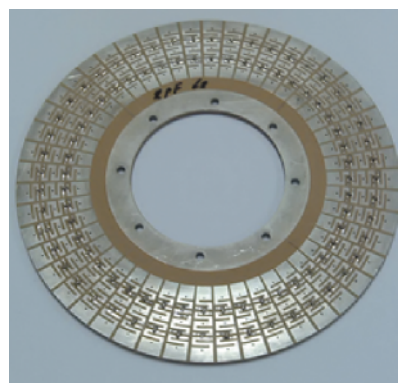


б

Рис. 10. Модули АА2-ККС (размеры  $140 \times 140 \times 55$  мм) (а) и АА2-НКС (размеры  $175 \times 175 \times 100$  мм) (б) на базе антенны этажерочного типа со встречной запиткой антенных элементов



а



б

Рис. 11. Навигационный антенный модуль АСНГ-3 (размеры: ширина 180 мм, высота 93 мм) (а) и специальный EBG-метаматериал отсечки многолучевости (б)

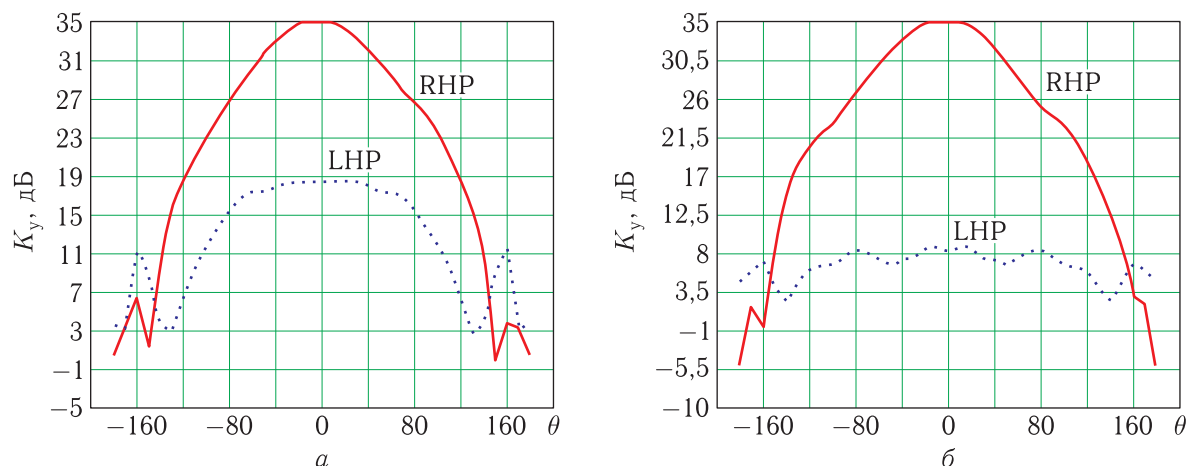


Рис. 12. Диаграммы направленности антенного модуля АСНГ-3 на частотах 1236 МГц (а) и 1590 МГц (б)

типа [6]. В микрополосковых антеннах этажерочного типа антенные элементы разных диапазонов помещаются один на другой таким образом, чтобы более высокочастотный антенный элемент устанавливался на низкочастотный антенный элемент. Каждый из нижних антенных элементов служит земляной плоскостью для антенного элемента, расположенного над ним.

Основной недостаток многочастотной микрополосковой антенны этажерочного типа — сильное взаимное влияние антенных элементов, что приводит к искажениям диаграмм направленности в каждом частотном диапазоне и низкой взаимной развязке между входами антенных элементов. Взаимная развязка входов антенных элементов в ряде случаев может быть улучшена при условии использования специальных многочастотных цепей запитки микрополосковой антенны, но кардинально решить проблему ранее не удавалось.

Авторами предложен способ проектирования многдиапазонных антенн этажерочного типа со встречной запиткой антенных элементов (рис. 8), которая обеспечивает развязку антенных элементов не менее 25 дБ и идентичность диаграмм направленности в отдельных диапазонах частот (рис. 9).

На рис. 10 представлены навигационные модули, выполненные на основе антенн этажерочного типа со встречной запиткой антенных элементов.

При специальных применениях ГНСС-антенн очень важно избавиться от приема сигналов, отраженных от земной поверхности или от окружающих

антенну конструкций (эффекта многолучевости). Эффект многолучевости приводит к возникновению фазовых шумов, которые увеличивают ошибку определения координат.

Обычно для подавления отраженных сигналов используются кольцевые дроссели. Но их недостатками являются большой размер и вес. Более компактную конструкцию экрана для подавления многолучевости позволяет получить применение в нем EBG (Electromagnetic Band-gap Structure)-метаматериалов [7].

Но все экраны для подавления многолучевости имеют общий недостаток: они обужают ДН и ухудшают стабильность фазового центра антенного элемента. В спроектированном нами геодезическом антенном модуле, показанном на рис. 11, использован специальный EBG-метаматериал для отсеки многолучевости и специальный метод его установки, который позволяет избавиться от этого недостатка [8].

Диаграммы направленности антенного модуля на частотах L1 и L2 представлены на рис. 12.

На графиках видны широкие диаграммы направленности в верхней полусфере и максимальные уровни подавления многолучевости минус 40 дБ в диапазоне L1 и минус 35 дБ в диапазоне L2.

Используя два антенных модуля АСНГ-3, установленных стационарно на базовой линии длиной 0,538 м, провели измерение контролируемой точки маршрута с накоплением в течение 24 ч. На рис. 13 приведены данные отклонений широты и долготы контролируемой точки.

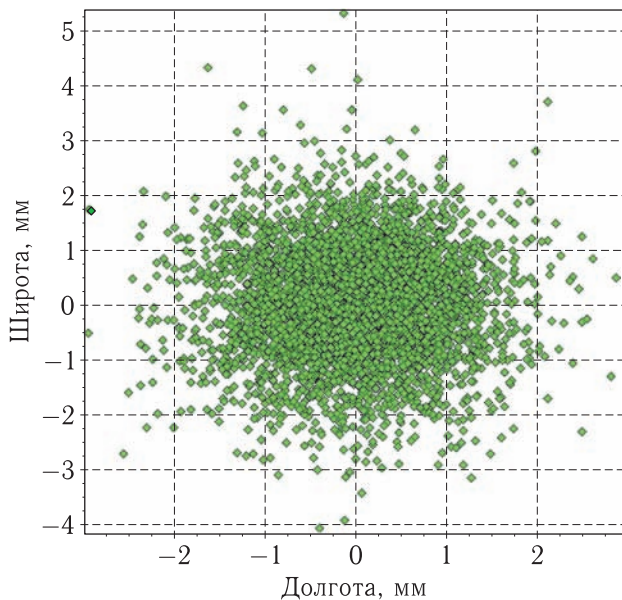


Рис. 13. Отклонения контролируемой точки по широте и долготе

Из диаграммы видно, что большая часть отклонений укладывается в диапазон  $\pm 2$  мм, что означает, что стабильность фазового центра антенного модуля не превышает 2 мм.

Таким образом, рассмотренные в статье инновационные подходы к конструированию навигационных антенных модулей позволяют, комбинируя их, создать устройства с практически любым набором параметров и эксплуатационных характеристик для применений в различной приемной аппаратуре ГНСС.

## Список литературы

1. Панченко Б.А., Нефедов Е.И. Микрополосковые антенны. М.: Радио и связь, 1986. 145 с.
2. Бойко С.Н., Косякин С.В., Кухаренко А.С., Яскин Ю.С. Миниатюризация антенных модулей навигационной аппаратуры спутниковых навигационных систем // Антенны, 2013, № 12. С. 38–44.
3. Boyko S.N., Kosiakin S.V., Kukhareenko A.S., Yaskin Y.S. Metamaterial-made GNSS Antenna, 2014 Loughborough Antennas & Propagation Conference, 2014, UK. P. 410–411.
4. Zhou Y., Chen C.C., Volakis J.L. Dual band proximity-fed patch antenna for tri-band GPS applications // IEEE Transactions on AP, 2007, vol. 55, No. 1. P. 220–223.
5. Авдонин В.Ю., Бойко С.Н., Исаев А.В. Двухдиапазонная активная микрополосковая антенна круговой поляризации // Антенны, 2012, № 8. С. 38–45.
6. Li J., Shi H., Li H., Zhang A. Quad-band probe-fed stacked annular patch antenna for GNSS application // IEEE Antennas and Wireless Propagation, 2014, vol. 13. P. 372–375.
7. Baggen R., Martinez-Vazquez M., Leiss J., Holzwarth S., Drioli L.S., Peter de Maagt. Low profile GALILEO antenna using EBG technology // IEEE Transactions on AP, 2008, vol. 56, No. 3. P. 667–674.
8. Boyko S.N., Kukhareenko A.S., Yaskin Y.S. EBG Metamaterial Ground Plane Application for GNSS Antenna Multipath Mitigating // IEEE International Workshop on Antenna Technology, Seoul, 2015. P. 178–181.