



УДК 621.396.99

А. В. Немов

АО "Российский институт радионавигации и времени"

пр. Обуховской Обороны, д. 120, лит. ЕЦ, Санкт-Петербург, 192012, Россия

Д. А. Немов, Д. Л. Минь

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

С. А. Савельев, А. Н. Пластиков

Филиал АО "ОРКК" – "НИИ КП"

ул. Авиамоторная, д. 53, Москва, 111024, Россия

Эффективность применения сверхкомпактной антенной системы в компенсаторе помех

Применение миниатюрных антенн в космических навигационных системах является современной тенденцией развития аппаратуры GPS, Baidow, ГЛОНАСС. Многорезонаторные антенные системы, используемые для интеллектуального управления пространственной избирательностью, рассматриваются как антенные решетки (АР). Отрицательной стороной миниатюризации является ухудшение ряда характеристик антенн, таких как коэффициент усиления, форма диаграммы направленности (ДН), подавление ее обратного лепестка. В миниатюрных АР увеличивается взаимовлияние резонаторов друг на друга, что приводит к искажению ДН отдельных резонаторов и увеличению неравномерности суммарной ДН АР, а также ширины ее лепестков. Принимаемые специальные меры для уменьшения взаимовлияния резонаторов в АР в доступной литературе описываются недостаточно. Авторами настоящей статьи основное внимание уделено изучению свойств выпускаемых промышленностью США миниатюрных АР и их способности выполнять целевую функцию – селекцию радиопомех. В статье приведены декларируемые производителем и полученные при независимом обследовании данные о конструкции и электродинамических характеристиках высокотехнологичных многорезонаторных миниатюрных АР диапазонов частот L1/L2 GPS. Проанализированы экспериментальные данные о взаимовлиянии резонаторов АР при расстояниях между ними существенно менее половины длины волны в свободном пространстве. Представлены предположения относительно мер, предпринятых для уменьшения взаимовлияния резонаторов. Эффективность АР в процессе подавления помех оценена с помощью компьютерного имитационного моделирования компенсатора помех методом Монте-Карло с учетом негативного эффекта взаимовлияния излучателей. Для общности использованы два типа алгоритмов работы компенсатора.

Ключевые слова: сверхкомпактная антенная решетка, электродинамические характеристики, взаимовлияние излучателей, пространственно-временная обработка сигналов, компенсатор помех, КНС, CRPA

Для цитирования: Эффективность применения сверхкомпактной антенной системы в компенсаторе помех / А. В. Немов, Д. А. Немов, Д. Л. Минь, С. А. Савельев, А. Н. Пластиков // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 2. С. 37–46.

A. V. Nemov

JSC "Russian Institute of Radionavigation and Time"

120, Obukhovskoy Oborony Pr., bd. EC, 192012, St. Petersburg, Russia

D. A. Nemov, D. L. Minh

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

5, Professor Popov Str., 197376, St. Petersburg, Russia

S. A. Saveliev, A. N. Plastikov
Branch of JSC "JRSC" – SRI "SI"
53, Aviamotornaya Str., 111024, Moscow, Russia

Efficiency of the Miniature Anti-jam GNSS Antenna Array

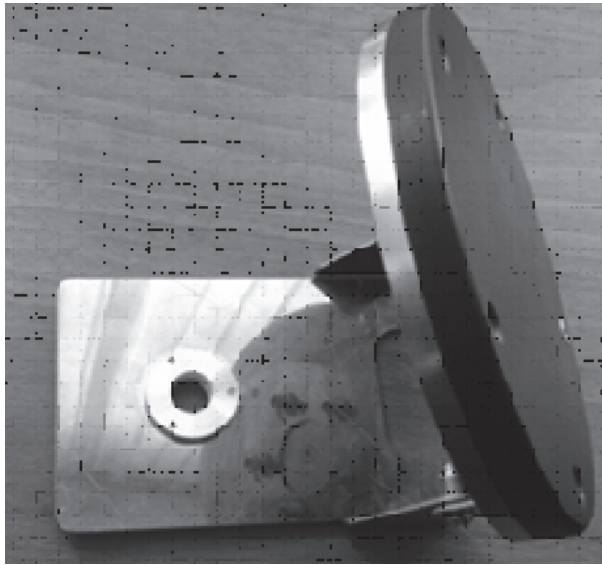
The use of the miniature controlled reception pattern antennas (CRPAs) in GNSS equipment is one of the trends in GPS, Baidow, GLONASS development. A miniaturized GPS antenna array technology reduces the size of the antenna elements and the array dimensions. Miniature CRPAs are in demand not only with mass consumer of GPS/GLONASS house-hold equipment, but with expert users of complex hardware as well, where high-tech multi-sensor miniature antenna systems (AC) can be applied. Such types of AC used for intelligent control of spatial selectivity are considered as antenna arrays. The advantages of miniature CRPAs with anti-jamming capability include possibility to be installed on vehicles where it used to be impossible due to their size. The negative effect of miniaturization is in degradation of some antennas characteristics, such as gain, suppression of the reverse lobe of radiation pattern (RP), a heterogeneity of RP. In miniature antennas, the resonator interinfluence increases, that leads to distortion of individual emitters RP and to the in-crease of the total RP lobe of the antenna array irregularity, as well as the width of RP lobe. Designers take special measures to reduce the interinfluence of the resonators. However, they are not fully described in the available literature. Therefore, the achieved performance of miniature CRPAs is in great interest. The final criterion (from a consumer point of view) is in effective functional of a device containing a miniature CRPA, the degradation of its parameters in compare with traditional CRPA equipment of expert users. The authors focus on property investigation of miniature CRPAs manufactured primarily by US industry. Specifications of two antennas and some expected details of the miniaturized antenna array technology are described along with the test results of their ability to perform the objective function - jammer suppression. The article contains the results obtained from independent testing of electrodynamic parameters of miniature L1/L2 frequency CRPA and its design analysis. The experimental data of sensor interinfluence are outlined. The measures to reduce the sensor interinfluence are take into account. The efficiency of the miniature antenna is estimated in the process of interference suppression by means of computer simulation. The Monte-Carlo method is applied. For the sake of generality, two types of algorithm for interference suppression are used.

Key words: Anti-jam miniature CRPA, electrodynamic characteristics, mutual coupling, space-time signal processing, interference compensator, GNSS

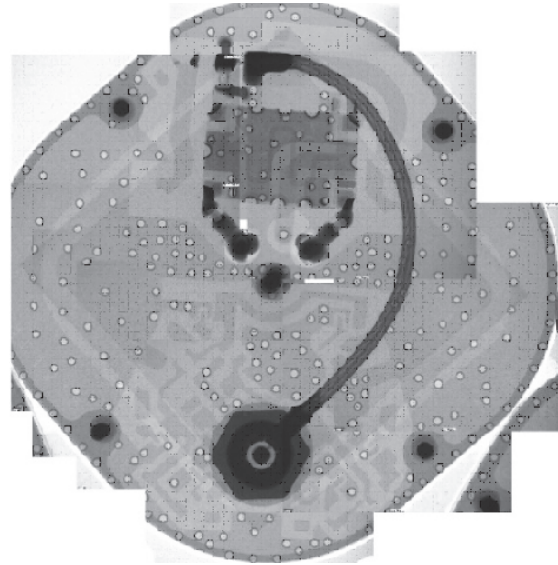
For citation: Nemov A. V., Nemov D. A., Minh D. L., Saveliev S. A., Plastikov A. N. Efficiency of Miniature Anti-Jam GNSS Antenna Array. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2018, no. 2, pp. 38–47. (In Russian)

Понятие миниатюрной антенной решетки и постановка задачи исследования. Актуальным направлением улучшения технических характеристик и функциональности навигационной аппаратуры потребителей (НАП) космических навигационных систем (КНС), которому начали уделять внимание отечественные разработчики, является создание сверхкомпактных (миниатюрных) многорезонаторных антенных систем (АС) с монолитной конструкцией. Если излучателями можно управлять независимо, то АС рассматривается как антенная решетка (АР). Далее, анализируя приемные АР, под излучателями будем понимать приемные резонаторы (ПР), что на основании принципа дуальности не ограничивает общность рассуждений. Сверхкомпактной (или миниатюрной) вне зависимости от геометрических размеров ПР будем называть плоскую или квазиплоскую АР, у которой шаг сетки расположения геометрических центров ПР d_x выбирается существенно меньше, чем половина длины волны $\lambda/2$ в свободном пространстве. Для сравнения компактными назовем плоские АР с треугольной или квадратной сеткой расположения ПР, включая гексагональные АР [1], [2], при $d_x \approx \lambda/2$.

Конструкторами принимаются специальные меры для уменьшения взаимовлияния резонаторов в АР, однако в доступной литературе [3]–[5] они описываются недостаточно. Исключением является доклад [3], в котором дано указание на специфический программный пакет Boeing Company "AGHAST™ (Another GPS High Anti-jam Simulation Tool)", предназначенный для определения характеристик CRPA (Controlled Reception Pattern Antenna – антенна с управляемой диаграммой направленности (ДН)), включая способность подавления помех. Об отечественных сверхкомпактных АР информации в доступной литературе практически нет, кроме работы автора настоящей статьи [5], о зарубежных АР публикации немногочисленны [3], [4], [6]–[8]. Из зарубежных серийных миниатюрных АС известны, например, устройства, производимые фирмами "Sensor Systems, Inc." и "Antcom, Inc.". Методы, технологии и программная среда разработки, детали конструкции и применяемые материалы в публикациях не описываются. В спецификациях на антенны "Antcom, Inc." указываются высокие электродинамические характеристики. В частности, для пятирезонаторной АР ANTCOM 5NF-



а



б

Рис. 1

5.5CL1215P-XS-4 с диаметром 149.86 мм (с. 97 каталога фирмы "Antcom, Inc." [6]) коэффициент усиления ПР в диапазоне углов возвышения от 60° до зенита в диапазонах частот $L1$, $L2$ обеспечивается не ниже 0.5 дБ, коэффициент эллиптичности – не более 2 дБ, КСВН – не более 2.0, угловые границы луча $90...107^\circ$, глубина достигаемого цифрового "нуля" ДН – до 65 дБ (!), а аналогового "нуля" – до 30 дБ. Спецификации АР фирмы "Sensor Systems, Inc." отсутствуют в открытом доступе, они могут быть доступны только при удовлетворении запроса на адрес, указанный в [7].

Указанные характеристики, сами по себе очень высокие, декларируются при сверхкомпактной конструкции. Однако миниатюризация АР неизбежно приводит к увеличению взаимовлияния ПР, искажению фазовой и амплитудной составляющих парциальных ДН ПР, что негативно сказывается на функционировании антенны и оправдывает возникающие сомнения в эффективности сверхкомпактных АР. Поэтому востребована независимая приборная проверка сверхкомпактных АР, равно как интерпретация полученных результатов в части способности выполнения АР целевой функции. Поскольку сверхкомпактные АР диапазонов частот $L1/L2$ предназначены для приема сигналов КНС при одновременном формировании "нулей" ДН в направлениях источников радиопомех (далее помех), качество АР следует характеризовать комплексным критерием. Эффективность АР будем описывать формой парциальных ДН ПР коэффициентом подавления помехи – отношением мощностей помехи на входе и выходе устройства обработки сигналов, выходным отношением мощностей

системного сигнала к суммарной мощности помехи и собственного шума (далее обозначается $c/(p + \pi)$) и ослаблением системного сигнала при использовании в компенсаторе помех (КП). Согласно терминологии спецификации [6] коэффициент подавления идентичен глубине достигаемого цифрового "нуля" ДН АР.

На рис. 1, а представлен внешний вид размещенной на штативе антенны типа ANTCOM 5NF-5.5 CL1215P-XS-4, предназначенной для диапазона частот $L1$, а на рис. 1, б – рентгеновский снимок области одного из пяти резонаторов этой антенны. На последнем снимке видны элементы квадратурной схемы подачи энергии на ПР, выполненный методом объемной печати. Область резонатора, если сделать рентгеновский снимок с другого ракурса, отличается по плотности от остальной части АР.

На рис. 2 показана геометрия расположения ПР рассмотренной сверхкомпактной антенны в плоскости направляющих косинусов

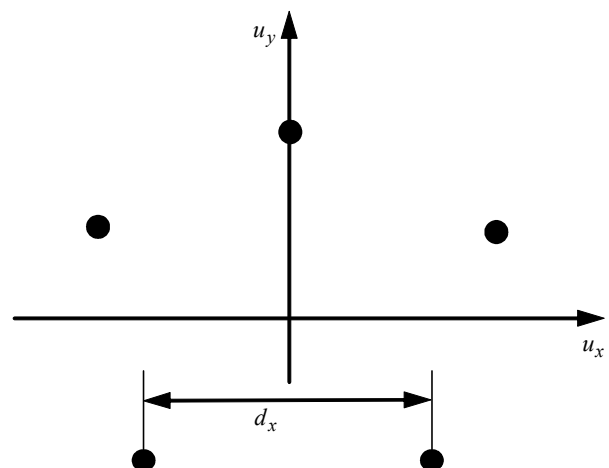


Рис. 2

$$u_x = \sin \varphi / \sin \theta; \quad u_x = \sin \varphi \sin \theta;$$

при шаге треугольной сетки $d_x \approx 0.25\lambda$ (λ – средняя частота диапазона). Для сравнения в компактной гексагональной АР [3], состоящей из семи ПР, шаг треугольной сетки выбирается $d_x \approx 0.57\lambda$.

Электродинамические характеристики сверхкомпактной АР. Тестировалась антенна ANTCOM 5NF-5.5CL1215P-XS-4, резонаторы которой расположены в узлах треугольной сетки согласно рис. 2. Измерения проводились в безэховой камере с коэффициентом безэховости не более –50 дБ. Данные предоставлены «Филиалом АО "ОРКК" – НИИ КТ».

На рис. 3 представлен снимок экрана анализатора цепей E5072A, на котором изображена частотная зависимость КСВН на одном из выходов антенны. В точках установки маркеров 2 и 3, соответствующих диапазонам частот $L2$ и $L1$, КСВН не превосходит 1.8, что является хорошим показателем.

На рис. 4 представлен снимок экрана анализатора цепей E5072A, на котором изображена частотная зависимость модуля коэффициента передачи между выходами соседних ПР. На графике в точках установки маркера в областях диапазонов частот $L1$ и $L2$ GPS четко прослеживается усиление взаимовлияния вплоть до –11 дБ. Взаимовлияние ПР можно характеризовать как значениями коэффициентов матрицы передачи выходов ПР, так и искажением формы амплитудной и фазовой парциальных ДН ПР по сравнению с ДН уединенного одиночного ПР. Далее проанализированы искажения амплитудной ДН.

На рис. 5, 6 приведены парциальные азимутальные ДН одного из ПР в диапазонах частот $L1$ (1.575 ГГц) (рис. 5) и $L2$ (1.6 и 1.611 ГГц) (рис. 6) под различными углами места ψ . Неравномерность парциальных ДН ПР значительна и может при высоких углах места достигать до 13...20 дБ в обоих диапазонах частот. Измерения фазовой ДН ввиду высокой трудоемкости и стоимости эксперимента не проводились.

Сильное взаимовлияние ПР (оценивается значением –10...–13 дБ по мощности), объясняемое малым относительным шагом треугольной сетки, приводит к существенным искажениям характеристик направленности (ХН) отдельных резонаторов как амплитудной, так, очевидно, и фазовой составляющих. При этом, что следует из рентгеновского снимка рис. 1, б, в конструкции антенны предприняты меры для уменьшения взаимовлияния за счет специальной конфигурации печатных проводников вокруг резонаторов. Предположительно, подложка антенны, в ко-

торой размещены резонаторы, выполнена из материала с высокой диэлектрической проницаемостью $\epsilon \geq 81$, в котором распространяемая электромагнитная волна укорачивается. Для сравнения, взаимовлияние ПР компактной АР в зависимости от конструкции оценивается значением –20...–30 дБ.

Казалось бы, обследованная сверхкомпактная АР из-за существенных искажений парциальных ДН не может быть эффективной для применения в компенсаторах мощных помеховых колебаний, т. е. заявляемые "Antcom, Inc." значения глубины "нуля" ДН не достоверны. Такое предположение потребовало дополнительной проверки.

Приведенные далее результаты исследования антенны ANTCOM 5NF-5.5CL1215P-XS-4 хорошо согласуются с результатами изучения сверхкомпактной АР с управляемой диаграммой направленности GPS-антенны типа S67-1575-521 (фирма "Sensor Systems, Inc.") (диаметр 114 мм), состоящей из 4 ПР диапазонов частот $L1/L2$ [7].

Компьютерная имитация работы КП со сверхкомпактной АР. Для анализа эффективности сверхкомпактных АР проведено компьютерное моделирование КП на примере реакции гексагональной АР (ГАР) с конфигурацией размещения ПР, описанной в [1], [2] (рис. 7). Несмотря на то что шаг сетки составляет $d_x \approx 0.57\lambda$, антенне искусственно приданы свойства сверхкомпактных АР по отношению к парциальным ДН.

Взаимовлияние ПР в сверхкомпактной конструкции имитировалось искажениями амплитудных парциальных ДН ПР, характерными для антенны ANTCOM 5NF-5.5CL1215P-XS-4. Взаимовлияние резонаторов друг на друга в первом приближении моделировалось учетом формы ДН двух ПР и ослаблением усиления по отношению к остальным резонаторам. Такие ПР названы взаимовлияющими излучателями (ВИ). Рассмотрение двух ВИ обусловлено методологическими соображениями.

Условия моделирования. На вход ГАР действует одна плоская электромагнитная волна системного сигнала, излучаемого навигационным спутником КНС, расположенным в зените, и одна широкополосная шумоподобная помеха, источник которой расположен под углами $\theta = -10^\circ$, $\psi = 60^\circ$. Все процессы стационарные. Проводится анализ коэффициента подавления (компенсации) помехи алгоритмом цифровой обработки сигналов с учетом характерного для сверхкомпактных АР сильного взаимовлияния излучателей. Коэффициенты усиления всех сигналов (как систем-

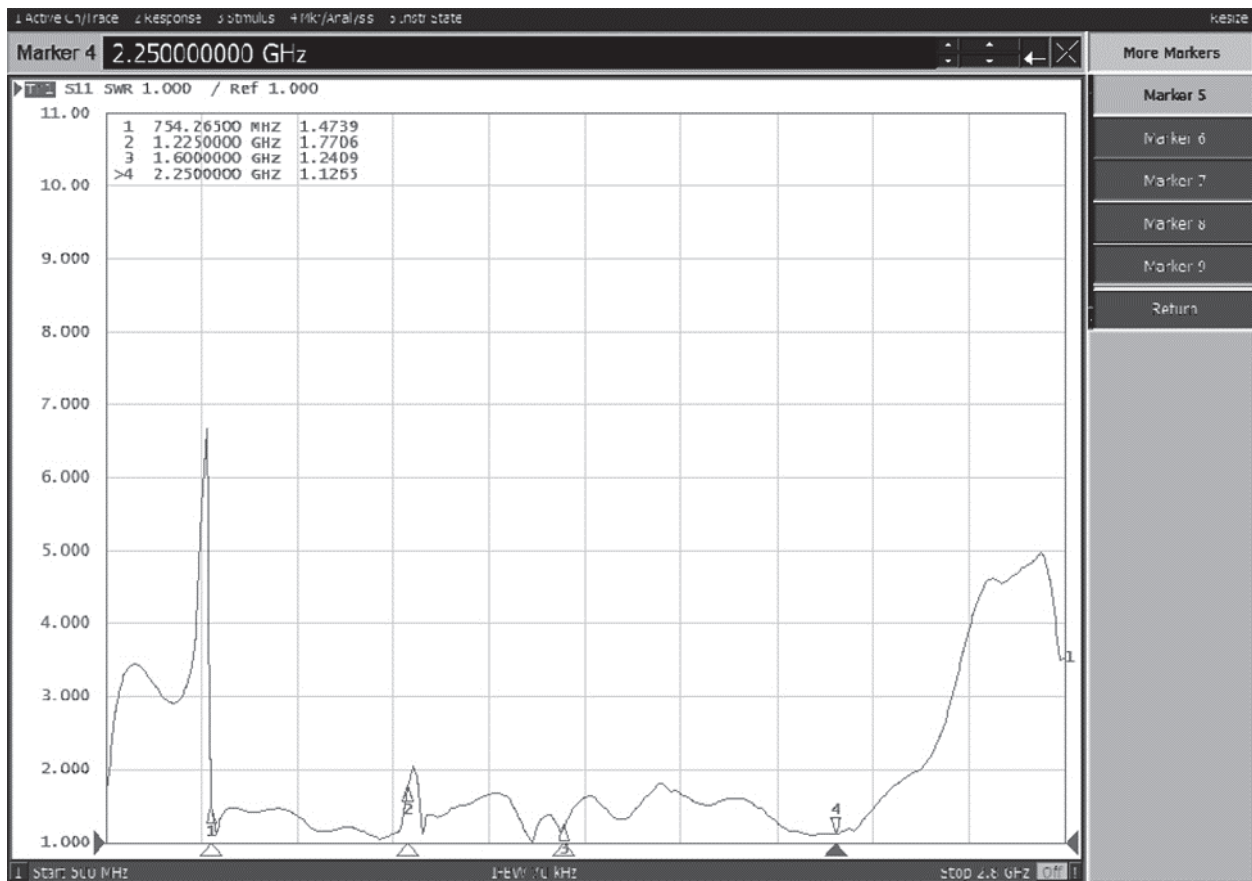


Рис. 3

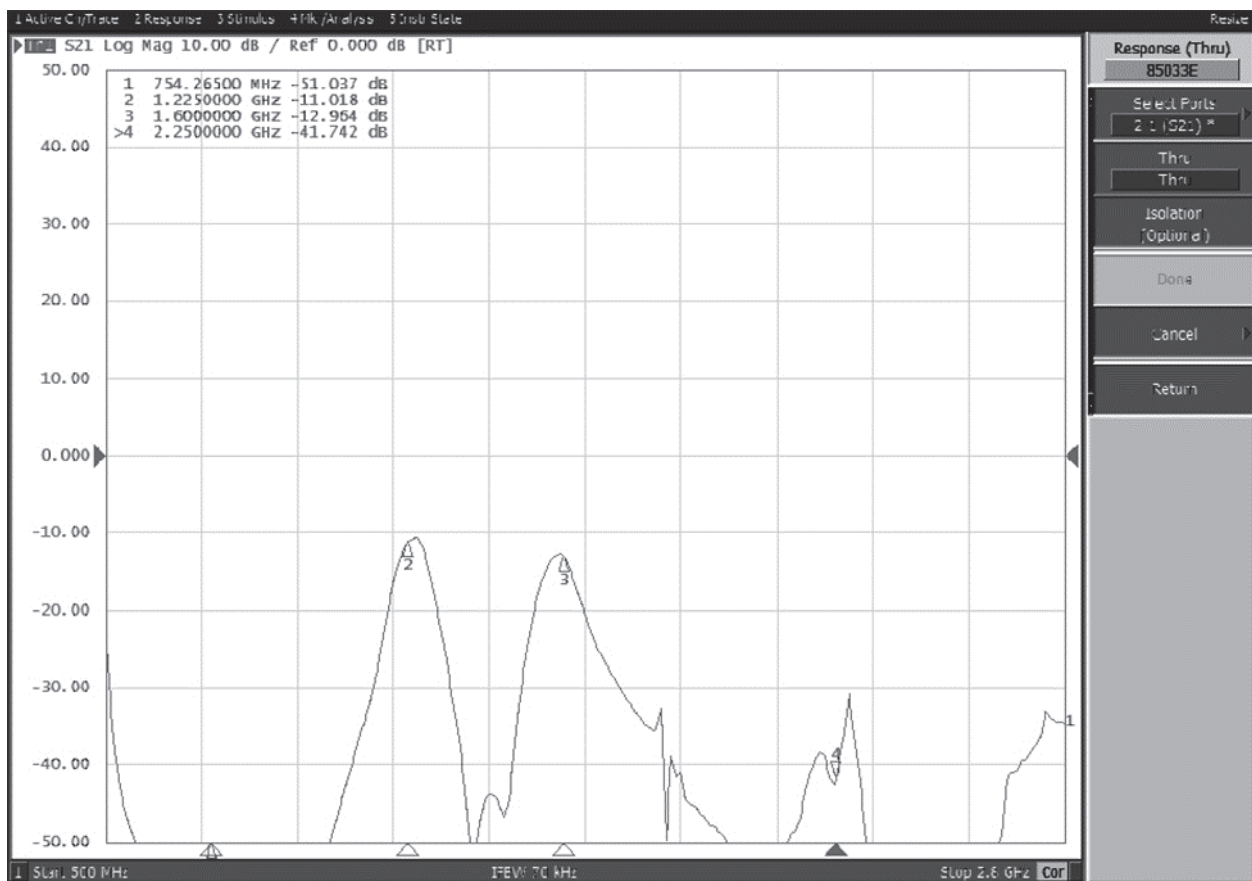
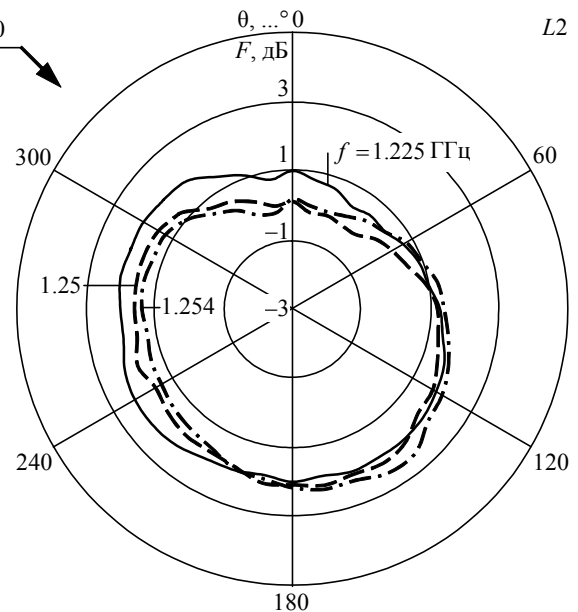
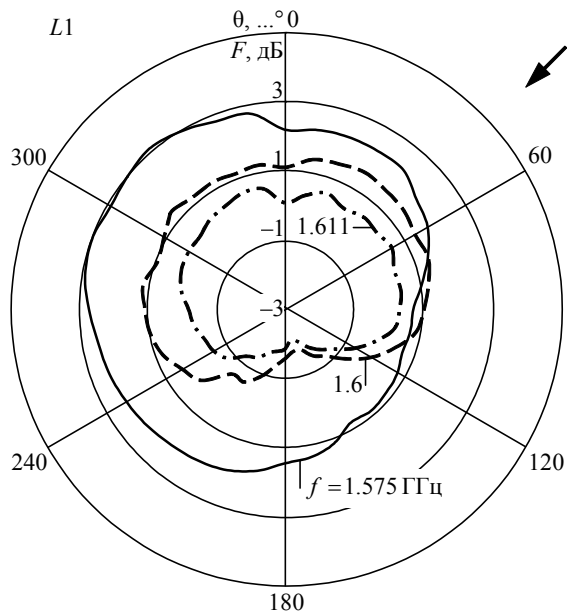
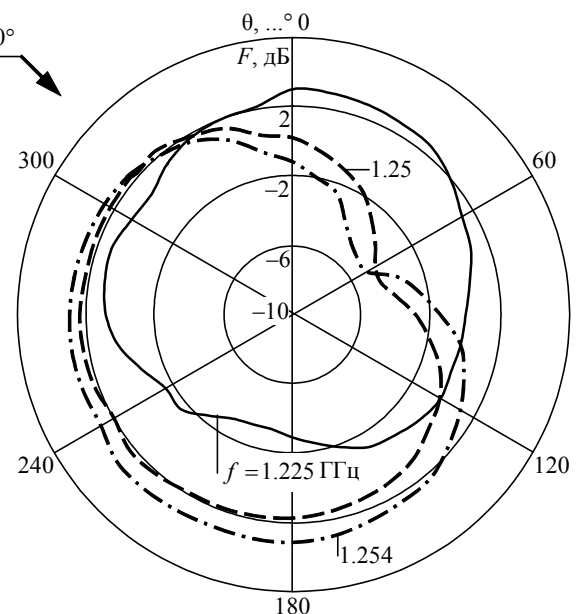
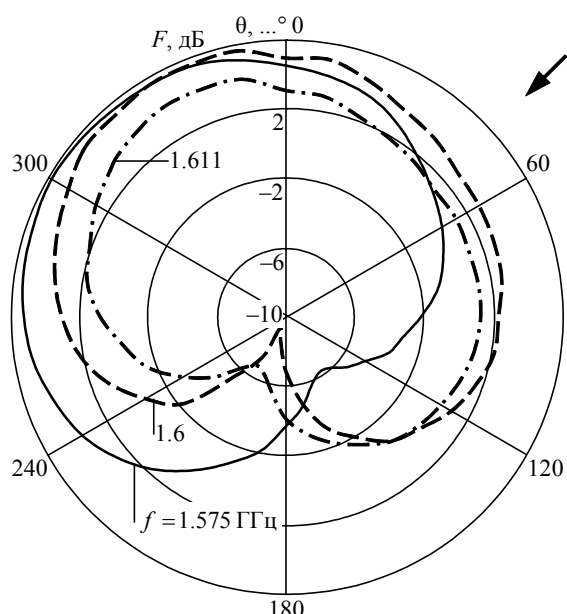


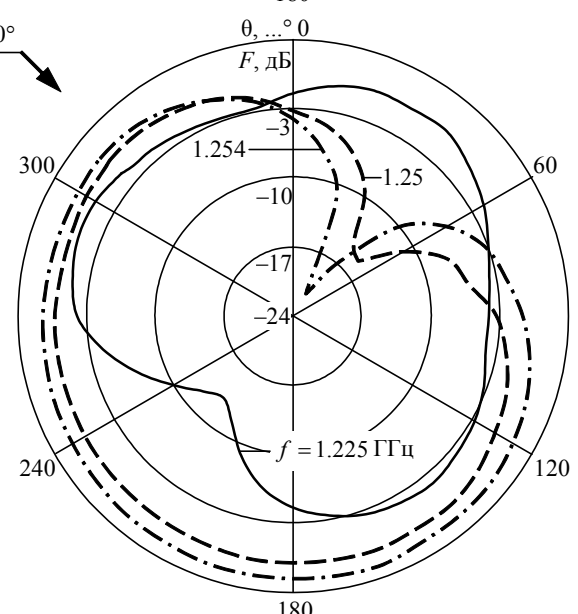
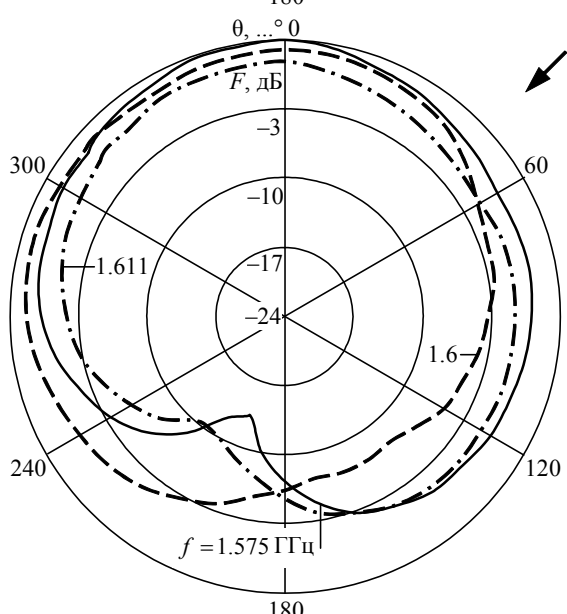
Рис. 4



$\psi = 0$



$\psi = 30^\circ$



$\psi = 60^\circ$

Рис. 5

Рис. 6

ного, так и помехового) ВИ ПР установлены равными -20 дБ, для остальных ПР установлены коэффициенты усиления 0 дБ. Отношение $c/(n + \pi)$ на входе каждого излучателя составляет -85 дБ, что характерно для КНС при радиопротиводействии. В отсутствие помех отношение c/π на входе составляет -30 дБ, что также характерно для функционирования КНС.

Устройства КП различных типов с пространственно-временной итеративной обработкой сигналов описаны в [9]. В [10] приведены требования к функционированию отдельных узлов КП.

Качество компенсации помеховых колебаний в КП определено для обработки сигнала двумя алгоритмами пространственно-временной обработки:

- на основе цифрового фильтра Винера (ФВ) [11] (опорный канал 1, рис. 7);
- на основе итеративного алгоритма, минимизирующего мощность процесса (ММП) на выходе при линейных ограничениях [12].

Полученные параметры указанных алгоритмов представлены в таблице. Порядок временных фильтров при пространственно-временной обработке сигналов выбран равным 4.

Коэффициент подавления помехи в КП может превышать значение $c/(n + \pi)$ на входе излучателя АР ввиду особенностей методики расчета: системный сигнал, помеховые колебания и колебания собственных шумов аппаратуры при моделировании пропускаются по раздельности через настроенный КП. Сам КП предварительно адаптируется в итеративной процедуре по смеси системного сигнала, помеховых колебаний и собственных шумов до установления выходных процессов.

Согласно таблице наличие "взаимовлияющих" излучателей, особенно рядом расположен-

Параметр, дБ	Алгоритм	ВИ ПР (рис. 7)			
		Нет	4, 7	5, 7	6, 7
Выходное отношение $c/(n + \pi)$	ФВ	-28.1	-30.6	-27.4	-38.9
	ИИП	-29.3	-31.8	-28.7	-32.0
Коэффициент подавления помехи	ФВ	90.1	90.4	87.6	82.0
	ИИП	93.5	93.8	72.7	67.9
Деградация мощности системного сигнала	ФВ	-1.2	1.6	-1.6	10.3
	ИИП	0.6	3.4	0.2	3.3
Подавление собственных шумов	ФВ	0.	1.0	1.1	1.5
	ИИП	1.3	1.6	1.6	1.6

ных, приводит к ухудшению качества приема системных сигналов, заключающееся в уменьшении коэффициента подавления, уменьшении выходного отношения $c/(n + \pi)$ относительно расчетного и деградации мощности системного сигнала. Величина подавления мощности собственных шумов в таблице приведена для справки.

На рис. 8 представлены графики мощности процессов на выходе алгоритма пространственно-временной обработки сигналов (1 – помеха, 2 – полезный сигнал, за ноль на оси мощности принят уровень собственных шумов приемника) для наихудшего случая (расположение ВИ ПР на соседних позициях). В этом случае подавление помехи наименьшее, а системного сигнала – наибольшее. Системный сигнал деградирует по мощности на 10 дБ, что находится на грани допустимого.

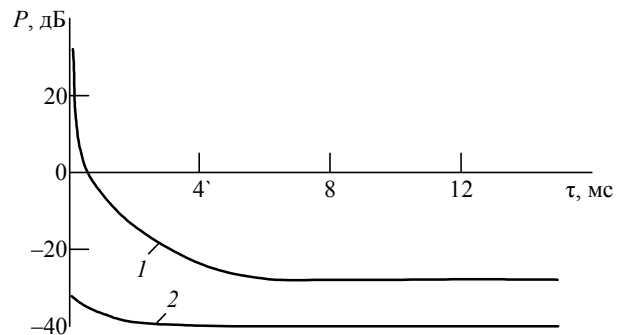


Рис. 8

На рис. 9 представлена контурная ДН АР при использовании пространственного алгоритма, на рис. 10 – ДН при использовании алгоритма пространственно-временной обработки. Обе ДН получены для АР с ВИ ПР 6 и 7 (рис. 7). Расположение источника помехи отмечено квадратным маркером, источника системного сигнала – круглым маркером. Области "нуля" ДН соответствует сгущение контурных линий вокруг маркеров помехи. Для пространственно-временного алгоритма эта область более компактна.

Контурные диаграммы подтверждают, что с помощью сверхкомпактной АР удастся формировать выраженные "нули" ДН.

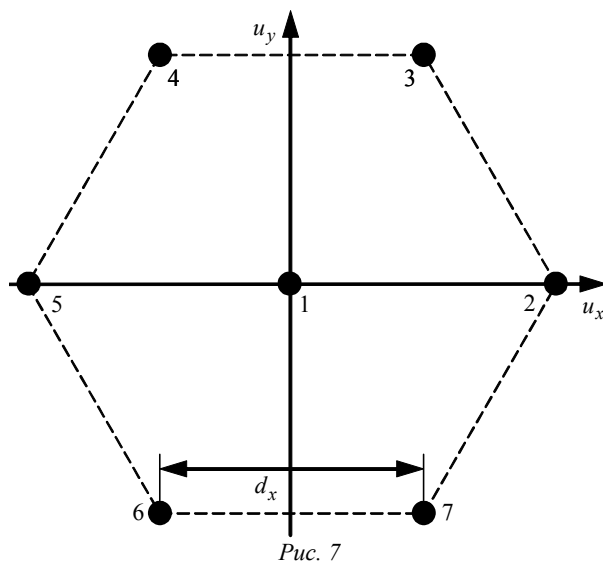


Рис. 7



Рис. 9



Рис. 10

Выводы:

1. Результаты проведенных экспериментов подтверждают указанные в спецификации антенны ANTCOM 5NF-5.5CL1215P-XS-4 технические характеристики.

2. Для исследованной серийной сверхкомпактной АР КНС производства США характерно сильное взаимовлияние излучателей.

3. Взаимовлияние ПР минимально при их расположении симметрично относительно центрального элемента АР. В этом случае подавление помехи уменьшается всего на 0.3 дБ по сравнению с АР без учета взаимовлияния. Системный сигнал подавляется на 1.6 дБ по сравнению с усилением на 1.2 дБ в АР без учета влияния.

4. Как и следовало ожидать, наиболее деструктивный вклад ВИ имеет место для их расположения на соседних позициях в АР. В такой конфигу-

рации подавление помехи ухудшается на 8.1 дБ по сравнению с обычной АР, системный сигнал подавляется на 10.3 дБ, выходное отношение $c/(n + \pi)$ ухудшается на 10.8 дБ. Если излучатели АР имеют провалы ДН в несовпадающих направлениях, деградация характеристик КП не существенна. Данное обстоятельство следует учитывать при конструировании сверхкомпактных АР.

5. Как показывает компьютерный эксперимент, сильное взаимовлияние излучателей в АР приводит к возрастанию времени адаптации алгоритма компенсации помехи до 15 мс относительно долей миллисекунд в обычном случае (оценка дана в [9]).

6. В сверхкомпактных АР взаимовлияние излучателей несущественно сказывается на глубине нуля ДН, однако можно предположить, что формирование ее луча происходит менее эффективно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладышева М. А., Немов А. В. Модификация метода ESPRIT для обработки данных в плоских фазированных антенных решетках // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2016. № 4. С. 56–62.
2. Alison B., David M. Test Results of a 7-Element Small Controlled Reception Pattern Antenna // Proc. of the 14th Int. Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2001). Salt Lake City, UT, September, 2001. P. 2022–2029.
3. Reynolds D., Braun A., Reynolds Al. Miniaturized GPS Antenna Array Technology and Predicted Anti-Jam Performance // Proc. of the 12th Int. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1999). Nashville, TN, September 1999. P. 777–786.
4. Miniaturization of L1/L2 Anti-jam GPS Antenna Array / Z-B. Lin, R. Castillo, J.-Q. Lin, S. Robin // Proc. of the 15th Int. Technical Meeting of the Satellite Division of the

Institute of Navigation (ION GPS 2002). Portland, OR, September 2002, P. 2093–2102.

5. Гладышева М. А., Немов А. В. Некоторые аспекты применения свехкомпактных антенных решеток // Радионавигационные технологии: сб. ст. под ред. А. И. Перова. М.: Радиотехника, 2017. С. 62–66. (Науч.-техн. сер. Сер. "Радиосвязь и радионавигация". Вып. 6).

6. ANTCOM 5NF-5.5CL1215P-XS-4: URL: http://geoobchod.cz/resources/products_documents/1449181822_05_antcom_crpa_l1l2_gps_antenna_array_for_e_mailing.pdf (дата обращения: 16.03.2018).

7. SEA S67-1575-521: URL: www.seaerospace.com/sales/product/Sensor%20Systems/S67-1575-521/S67-1575-521 (дата обращения: 16.03.2018).

8. Falcone K., Dimos G., Yang C. Small Affordable Anti-jam GPS Antenna (SAAGA) Development // Proc. of the 12th Int. Technical Meeting of the Satellite Division of

The Institute of Navigation (ION GPS 1999), Nashville, TN, September, 1999. P. 1149–1156.

9. Немов А. В. Цифровые антенные решетки: новое качество спутниковых радионавигационных систем. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2014. 160 с.

10. GPS Receiver Architecture Effects on Controlled Reception Pattern Antennas for JPALS / D. S. De Lorenzo, J. Gautier, P. Enge, D. Akos // Proc. of the 17th Int. Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2004), Long Beach, CA, September, 2004. P. 2010–2020.

Статья поступила в редакцию 20 марта 2018 г.

Немов Андрей Васильевич – кандидат технических наук (1989), старший научный сотрудник (1996), руководитель проектного направления АО "Российский институт радионавигации и времени" (Санкт-Петербург). Автор более 70 научных работ. Сфера научных интересов – адаптивные фазированные антенные решетки, спутниковая радионавигация; системы посадки.
E-mail: an.nilov2011@yandex.ru

Немов Денис Андреевич – магистр по направлению "Информатика и вычислительная техника" (2014), аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), старший инженер АО "Российский институт радионавигации и времени" (Санкт-Петербург). Автор 5 научных работ. Сфера научных интересов – спутниковая радионавигация; сетевая; синхронизация телекоммуникационных сетей; распределенные вычисления.
E-mail: mcnemov@gmail.com

Данг Ле Минь – магистр техники и технологии по направлению "Телекоммуникации" (2006, Вьетнам), инженер Вьетнамской академии наук и технологий, аспирант кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 1 научной работы. Сфера научных интересов – радионавигация; пространственно-временная обработка сигналов.
E-mail: leminh2882@gmail.com

Савельев Сергей Аполлинариевич – начальник НПК-2, филиал АО "Объединенная ракетно-космическая корпорация" – "Научно-исследовательский институт космического приборостроения". Сфера научных интересов – адаптивные антенные решетки ГНСС, системы спутниковой радионавигации.
E-mail: tmpager@yandex.ru

Пластиков Андрей Николаевич – кандидат технических наук (2013), инженер-исследователь 1-й категории филиала АО "ОРКК" – "НИИКИП" (Москва). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и антенные решетки ГНСС.
E-mail: plastikovan@mail.ru

REFERENCES

1. Gladysheva M. A., Nemov A. V. ESPRIT Method Modification for Plane Antenna Array Data Processing. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2016, no. 4, pp. 56–62. (In Russian)

2. Alison B., David M. Test Results of a 7-Element Small Controlled Reception Pattern Antenna. Proc. of the 14th Int. Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2001), Salt Lake City, UT, September, 2001, pp. 2022–2029.

3. Reynolds D., Braun A., Reynolds A. Miniaturized GPS Antenna Array Technology and Predicted Anti-Jam Performance. Proc. of the 12th Int. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1999), Nashville, TN, September, 1999, pp. 777–786.

4. Lin Z.-B., Castillo R., Lin J.-Q., Robin S. Miniaturization of L1/L2 Anti-jam GPS Antenna Array. Proc. of the 15th Int. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 2002), Portland, OR, September, 2002, pp. 2093–2102.

11. Айфичер Э. С., Джервис Б. У. Цифровая обработка сигналов, практический подход / пер. с англ. 2-е изд. М.: Изд. дом "Вильямс", 2004. 992 с.

12. Немов А. В., Тюфяков Д. Ю. Электронные методы управления диаграммой направленности антенных систем в приложении для навигационной аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2010. Вып. 3. С. 67–75.

5. Gladysheva M. A., Nemov A. V. *Nekotorye aspekty primeneniya svekhkompaktnykh antennykh reshetok* [Some Aspects of Supercompact Antenna Array Application]. Radio Navigation Technologies: Collection of Scientific Articles. *Radiotekhnika*. 2017, pp. 62–66. (Scientific and technical series. "Radio Communication and Radio Navigation" series, vol. 6). (In Russian)

6. ANTCOM 5NF-5.5CL1215P-XS-4: Available at http://geoobchod.cz/resources/products_documents/1449181822_05_antcom_crpa_l1l2_gps_antenna_array_for_emailing.pdf (accessed: 16.03.2018).

7. SEA S67-1575-521: Available at: www.seaerospace.com/sales/product/Sensor%20Systems/S67-1575-521/S67-1575-521 (accessed: 16.03.2018).

8. Falcone K., Dimos G., Yang C. Small Affordable Anti-Jam GPS Antenna (SAAGA) Development. Proc. of the 12th Int. Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1999), Nashville, TN, September, 1999, pp. 1149–1156.

9. Nemov A. V. *Cifrovie antennnye reshetki: novoe kachestvo sputnikovyykh radionavigatsionnykh sistem* [Digital Antenna Arrays: New Quality of GNSS]. SPb, izd-vo SpbGETU "LETI", 2014, 160 p. (In Russian)

10. De Lorenzo D. S., Gautier J., Enge P., Akos D. GPS Receiver Architecture Effects on Controlled Reception Pattern Antennas for JPALS. Proc. of the 17th Int. Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2004), Long Beach, CA, September, 2004, pp. 2010–2020.

Received March, 20, 2018

Andrei V. Nemov – Ph.D. in Engineering (1989), senior researcher of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Head of design department of RIRT (Saint Petersburg). The author of more than 70 scientific publications. Area of expertise: satellite radio navigation; landing systems; adaptive antenna array systems.

E-mail: an.nilov2011@yandex.ru

Denis A. Nemov – Master in Computer Science and Engineering (2014), postgraduate student of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", senior engineer of RIRT (Saint Petersburg). The author of 5 scientific publications. Area of expertise: radio navigation; network centric; synchronization of telecommunication networks; distributed computing.

E-mail: mcnemov@gmail.com

Dang Le Minh – Postgraduate student of Radio Systems Department of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Master's Degree in engineering and technology in "Telecommunications" (2006, Vietnam), engineer of Vietnam Academy of Science and Technology. The author of 1 scientific publication. Area of expertise: radio navigation; space-time signal processing.

E-mail: leminh2882@gmail.com

Sergey A. Saveliev – Dipl.-Ing in Automatic Electric Drive of Industrial Units and Technological Complexes, Chuvash State University (1996), Head of the branch of Research and Production Company of NIIKP (Moscow). The author of more than 10 scientific publications. Area of expertise: adaptive arrays of GNSS antennas, satellite radio navigation systems.

E-mail: tmpager@yandex.ru

Andrey N. Plastikov – Ph.D. in Engineering (2013), research engineer of NIIKP (Moscow). The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: GNSS antennas and antenna array.

E-mail: plastikovan@mail.ru

11. Ifeachor E. C., Jervis B. W. Digital Signal Processing – A Practical Approach. 2nd ed. Upper Saddle River, NY, Prentice Hall, 2002, 960 p.

12. Nemov A. V., Tyufiyakov D. Yu. The Electronic Methods of Antenna Arrays Control for Navigation Equipment of GNSS Users. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2010, no. 3, pp. 67–75. (In Russian).