

# ОЦЕНКА РЕАЛИЗУЕМОСТИ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ ТЕРМИНАЛА СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ "ЭКСПРЕСС-РВ"

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-8-13-21

Manuscript received 24 March 2021;  
Accepted 12 May 2021

**Алешин Виктор Сергеевич,**  
Московский технический университет связи  
и информатики, Москва Россия,  
[abc082012@yandex.ru](mailto:abc082012@yandex.ru)

**Ключевые слова:** подвижная спутниковая связь,  
"Экспресс-РВ", орбита "Молния", терминал  
транспортного средства, активная фазированная  
антенная решётка, сегментно-купольная антенна

Проведены основные принципы построения перспективной отечественной региональной системы спутниковой связи "Экспресс-РВ", базирующейся на высокоэллиптической орбите "Молния" и предназначенной для широкополосного доступа абонентов гражданского сектора к различным сетям связи общего пользования, в частности, к сети Интернет. Сформулированы основные технические требования, предъявляемые к антенным системам мобильных терминалов подвижной спутниковой связи системы "Экспресс-РВ". Обоснована необходимость использования активных фазированных антенных решёток (АФАР) для ряда типов подобных терминалов. Дан краткий обзор принципов реализации и приведены примеры конструктивного исполнения микрополосковых АФАР, в том числе их элементарных излучателей (ЭИ) и отдельных модулей. Отмечена проблема возникновения эффекта "ослепления", присущего для плоских микрополосковых АФАР, выполненных на диэлектрических подложках; рассмотрены меры для компенсации этого эффекта. Показана возможность расширения максимального угла сканирования узконаправленного луча АФАР за счёт использования магнитоуправляемой рассеивающей диэлектрической линзы, а также создания сегментно-купольных конструкций антенных систем применительно к мобильным терминалам подвижной спутниковой связи системы "Экспресс-РВ". Выведены простые аналитические соотношения, позволяющие оценить число ЭИ, необходимых для реализации приёмо-передающей АФАР с заданными техническими характеристиками: коэффициентом усиления и максимальным углом сканирования; приведены соответствующие зависимости. Оценена себестоимость создания антенной системы на базе АФАР для терминала подвижной спутниковой связи системы "Экспресс-РВ".

#### Информация об авторе:

Алешин Виктор Сергеевич, к.т.н., с.н.с., ведущий научный сотрудник МТУСИ, Москва, Россия

#### Для цитирования:

Алешин В.С. Оценка реализуемости активной фазированной антенной решётки терминала системы спутниковой связи "Экспресс-РВ" // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №8. С. 13-21.

#### For citation:

Aleshin V.S. (2021) Evaluation of the feasibility of an active phased array antenna in the terminal of the Express-RV satellite communication system. T-Comm, vol. 15, no.8, pp. 13-21. (in Russian)

## Введение и постановка задачи

В качестве одного из первых этапов реализации Государственной программы дальнейшего развития спутниковой группировки Российской Федерации (РФ) «Сфера» [1-3] предусмотрено создание новой региональной системы спутниковой связи (ССС) «Экспресс-РВ» [4], базирующейся на высокоэллиптической орбите (ВЭО) типа "Молния" [5-7].

Для этого в 2023-2024 гг. планируется вывести в околоземное космическое пространство четыре космических аппарата (КА), которые, сменяя друг друга на рабочих участках орбит (РУО), будут работать в режиме спутников-ретрансляторов в *Ku*- и более низкочастотном *L*-диапазонах частот спутниковой связи [4]. Причём в *Ku*-диапазоне (11/14 ГГц) предусмотрен высокоэффективный многолучевой режим обслуживания абонентов, в первую очередь, в северных и арктических регионах страны, в том числе, вдоль Северного Морского пути, где использование спутников-ретрансляторов на геостационарной орбите (ГСО) практически невозможно.

Основным назначением СССР "Экспресс-РВ" в *Ku*-диапазоне частот является обеспечение широкополосного доступа (ШПД) абонентов гражданского сектора к различным сетям связи общего пользования, в частности, к сети Интернет. Однако, поскольку в результате происходящего в последние годы бурного и целенаправленного развития в РФ, в том числе и в её арктическом регионе, наземных и подводных телекоммуникационных сетей [8-11] потребность в услугах фиксированной спутниковой связи (ФСС) неуклонно сокращается, то на первый план выступают услуги подвижной спутниковой связи (ПСС), особенно ШПД для различных транспортных средств [12].

При этом следует отметить, что ввиду естественного дефицита радиочастотного спектра, пригодного для спутниковой связи, [13, 14] и ряда других факторов скорости передачи информации с использованием спутникового ШПД намного меньше тех, что обеспечивают наземные средства ШПД, особенно волоконно-оптические линии связи, и для СССР на высоких орбитах находятся, как правило, в пределах 0,5-5 Мбит/с.

Для реализации ШПД ПСС транспортные средства должны оборудоваться терминалами спутниковой связи с самонаводящимися следящими приёмо-передающими антеннами с достаточно высоким коэффициентом усиления (КУ), а, следовательно, и коэффициентом направленного действия (КНД), то есть с узкими диаграммами направленности (ДН). Применительно к СССР "Экспресс-РВ", как и для СССР на ГСО, для обеспечения приемлемых для ШПД скоростей передачи и приёма информации антенны должны иметь КУ не менее 30–35 дБи<sup>1</sup>, соответствующие углам раскрытия ДН луча всего в несколько градусов [15, 16]. При этом в процессе движения транспортного средства перемещающийся по РУО КА должен непрерывно оставаться в пределах указанного угла раскрытия ДН антенны. То есть антенна должна автоматически отслеживать взаимные перемещения транспортного средства и КА в пространстве.

На крупнотоннажных морских и речных судах для спутникового ШПД могут применяться терминалы ПСС, оборудованные,

например, достаточно сложными и крупногабаритными гиросtabilизированными зеркальными антеннами с быстродействующим электромеханическим приводом для слежения за КА [17-19]. Стоимость одного такого терминала измеряется миллионами рублей, а надёжность, особенно в условиях арктического климата, оставляет желать лучшего.

Для других транспортных средств, таких как малотоннажные суда, самолёты, поезда и автомобили подобные терминалы как по техническим параметрам, так и по экономическим соображениям, как правило, неприемлемы. Для них необходимы более дешёвые терминалы ПСС с так называемыми низкопрофильными "плоскими" антеннами, которые могли бы размещаться на указанных транспортных средствах не сильно ухудшая при этом аэродинамические характеристики последних. В качестве таких антенн спутниковой связи могут использоваться активные фазированные антенные решётки (АФАР) с электронным управлением сканирующим лучом [20–22].

Разработка АФАР для терминалов спутниковой связи активно ведётся во многих странах мира, в том числе и в РФ [23]. Одно из относительно удачных решений - терминал американской СССР *StarLink* [24, 25]. Однако он предназначен пока лишь для ФСС и ШПД через низкоорбитальную многоспутниковую группировку. То есть сканирующий луч АФАР этого терминала отслеживает только перемещение КА по круговой околоземной орбите, но не движение самого терминала.

Очевидно, что востребованность услуг и рентабельность всего проекта СССР "Экспресс-РВ" в первую очередь зависит именно от возможности создания и освоения в серийном производстве приемлемых по стоимости для массового потребителя терминалов ПСС с АФАР. В связи с этим представляется целесообразным теоретически оценить практическую реализуемость АФАР для терминала ПСС системы "Экспресс-РВ" на современном техническом уровне.

## 1. Основные технические требования к АФАР

Расчёты показывают, что КУ АФАР для терминала ШПД ПСС СССР «Экспресс-РВ» должен составлять не менее 30–35 дБи [4, 5].

Угол места наблюдения КА на РУО для этой СССР на территории России составляет не менее 45°. Поэтому, казалось бы, и максимальный угол отклонения (сканирования) луча АФАР должен быть  $\pm 45^\circ$ . Однако для ПСС этого мало, поскольку перемещающиеся транспортные средства испытывают существенные наклоны – на 15-20° и более во все стороны относительно горизонта. Поэтому максимальный угол сканирования должен быть увеличен до  $\pm 60-65^\circ$ .

Рабочие полосы частот АФАР для *Ku*-диапазона спутниковой связи: на приём – 10,7–12,75 ГГц; на передачу – 13,75–14,5 ГГц.

Кроме того, ввиду неопределённости положения транспортного средства относительно КА АФАР должна быть рассчитана на круговую поляризацию радиосигнала, принятого в данной СССР.

Крайне желательно также, чтобы АФАР была приёмопередающей, то есть приёмная и передающая антенны терминала были выполнены в единой конструкции антенной системы (АС) терминала.

<sup>1</sup>Относительно изотропного излучателя.

Наконец, АС терминала ПСС для большинства практических применений должна быть *низкопрофильной*, чтобы, по возможности, минимально снижать аэродинамическое качество транспортного средства.

## 2. Конструкция АФАР

Современные *фазированные антенные решётки* (ФАР) сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн строятся по микрополосковой технологии (печатные «патч-антенны»<sup>1</sup>) и представляют собой совокупность рядом расположенных нескольких или множества *элементарных излучателей* (ЭИ), питаемых через фазосдвигающие микрополосковые линии (для пассивных ФАР) или управляемые фазоинверторы (для АФАР).

### 2.1. Элементарный излучатель

Каждый ЭИ плоской ФАР на печатной плате содержит *излучающий элемент* (ИЭ) – квадратную, прямоугольную или круглую тонкую металлическую пластинку, расположенную над плоским экраном на расстоянии  $0,01 - 0,1\lambda^2$ . При этом необходимый зазор между ИЭ и экраном обеспечивается *подложкой* – слоем диэлектрика двусторонней печатной платы с низкими собственными потерями (рис. 1).

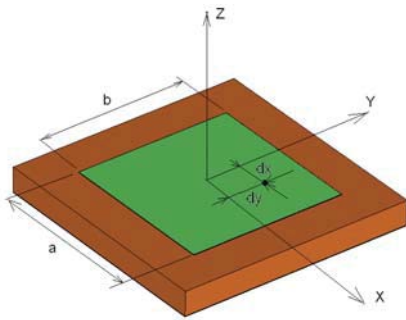


Рис. 1. Элементарный излучатель ФАР [26]

Размеры сторон или диаметр каждого ИЭ близки к половине длины волны радиосигнала:

$$\lambda/2 = c/(2f\epsilon^{0,5}), \quad (1)$$

где:  $c$  – скорость распространения радиоволн в свободном пространстве;  $f$  – рабочая частота;  $\epsilon = 2..3$  – диэлектрическая проницаемость подложки (печатной платы).

Для нижней границы Ку-диапазона ( $f_n = 10,7$ ) ГГц размер каждого ИЭ ФАР с учётом коэффициента укорочения длины волны в диэлектрике подложки составит около 10 мм, для верхней границы ( $f_g = 14,5$  ГГц) – 6-7 мм.

КНД такого ЭИ в первом приближении может быть оценён следующим образом. Поскольку длина стороны ИЭ примерно равна  $\lambda/2$ , его можно представить как *полувольновой диполь*, дающий около 3 дБи усиления в направлении нормали к плоскости ИЭ, а так как ИЭ прямоугольный или круглый, он может рассматриваться как два таких диполя, разнесённых на  $\lambda/4$ , что даёт ещё 3 дБи усиления. Экран подавляет излучение с обратной стороны ИЭ, это добавляет

ещё 3 дБи. Таким образом, КНД каждого ЭИ может составить до 9 дБи.

В сферической системе координат ДН ЭИ в вертикальной плоскости выглядит примерно так, как показано на рисунке 2.

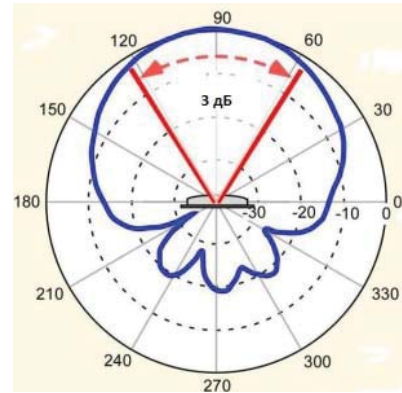


Рис. 2. Диаграмма направленности ЭИ

Учитывая неизбежные потери электромагнитной энергии в диэлектрике подложки, а также паразитные боковые лепестки ДН и другие факторы, КУ такого ЭИ в направлении нормали к плоскости ИЭ не превышает 6-7 дБи.

Рабочая ширина полосы частот ЭИ практически линейно зависит от расстояния между ИЭ и экраном, то есть от толщины подложки, и обычно составляет 5% от средней частоты. Причём, чем подложка толще, тем шире полоса.

Однако в микрополосковых АФАР с большим числом ЭИ при этом возникает так называемый *эффект ослепления* [27]. Он проявляется в том, что при отклонении луча от нормали даже на относительно небольшой угол к плоскости решетки (20-30°) в её ДН появляется «провал», глубина которого может доходить до 12-15 дБи, что существенно ограничивает возможный сектор сканирования [28]. Этот эффект обусловлен распространением *поверхностных волн* в диэлектрической подложке и образованием *дифракционных лепестков* в ДН.

Для борьбы с эффектом ослепления применяются различные меры. Например, между ИЭ размещаются токопроводящие перегородки [29] или перегородки из *метаматериалов*<sup>3</sup> [30], препятствующие распространению поверхностных волн в диэлектрической подложке. Из метаматериалов могут изготавливаться также и сами подложки [32]. Используются кольцевые ИЭ, внутренние окружности которых «закорочены» на экран<sup>4</sup>, что также уменьшает возникновение поверхностных волн. Предлагается использовать двухслойные диэлектрические подложки [33], а также конструктивно более сложные многоэлементные ЭИ. При этом питание ИЭ в ЭИ осуществляется либо непосредственно от фазовращателя или фазосдвигающей микрополосковой линии, либо от *неизлучающего резонатора* через отверстие в экра-

<sup>1</sup> От английского слова *patch* — заплатка

<sup>2</sup>  $\lambda$  – длина волны радиосигнала

<sup>3</sup>Метаматериалы (частотно-селективные структуры) – композиционные материалы, свойства которых обусловлены не столько свойствами составляющих их элементов, сколько искусственно созданной периодической структурой, обладающей электромагнитными свойствами, не встречающимися в природе [31]

<sup>4</sup>RSW – *reduced surface wave*



не, то есть по принципу *щелевой антенны*, как показано, например, на рисунке 3.



Рис. 3. Питание ИЭ по принципу щелевой антенны

Чтобы обеспечить круговую поляризацию радиосигнала, квадратному излучающему элементу может быть придана форма с двумя усечёнными противоположными углами (рис. 4) или точка его питания может быть смещена относительно центра; можно также питать обычный квадратный излучающий элемент из двух точек, отстающих по фазе на  $90^\circ$ ; существуют и другие достаточно простые способы.



Рис. 4. Излучающий элемент с круговой поляризацией

Элементарные излучатели могут быть также выполнены модульными, при этом в каждом модуле ЭИ могут размещаться и активные элементы, например, полосовой фильтр, маломощный усилитель (МШУ), усилитель мощности. Пример подобного модуля показан на рисунке 5.



Рис. 5. Пример размещения МШУ в модуле ЭИ [26]

### 2.2. Плоская АФАР

В простейшей плоской АФАР массив ЭИ или их модулей монтируется на одной из сторон многослойной печатной платы прямоугольной или круглой формы. На другой её стороне размещаются фазовращатели и другие электронные компоненты, обеспечивающие формирование узкого радиолуча, а также перемещение последнего в ограниченном те-

лесном угле пространства, обычно не превышающем  $\pm 30-45^\circ$  от нормали к плоскости решётки.

Известен, также, пока мало апробированный на практике способ расширения угла сканирования плоской АФАР путём дополнения последней подмагничиваемой ферритовой купольной линзой сложной формы [34] (рис. 6).



Рис. 6. АФАР с подмагничиваемой ферритовой линзой

Принцип работы такой антенны заключается в том, что плоская АФАР формирует ДН, обеспечивая электрическое сканирование в некотором секторе углов, а ферритовая линза играет роль преломляющей призмы, увеличивая сектор сканирования [36]. При пропускании постоянного тока через расположенные под линзой обмотки электромагнита феррит намагничивается, что приводит к изменению его показателя преломления и, следовательно, дополнительному изменению угла отклонения луча [37].

### 2.3. Купольная АФАР

Другой, более очевидный путь расширения угла сканирования – размещения ЭИ АФАР на сферической поверхности, например, полусфере, как это показано на рис. 7. Такие решётки называются «купольными» и являются разновидностью *конформных* АФАР.



Рис. 7. Макет купольной АФАР [38]

Купольная полусферическая АФАР позволяет обеспечить угол сканирования  $\pm 90^\circ$ . Однако, для формирования узконаправленного луча используются не все её ЭИ, как в плоской АФАР, а только их часть, расположенная на участке той стороны полусферы, которая в данный момент времени направлена на КА, то есть на её активном участке. Активируя и фазирова те или иные группы элементов на поверхности купола, можно обеспечить направление луча в любую точку верхней полусферы пространства без заметного снижения КНД такой АФАР.

Поскольку все, кроме одного, ЭИ активного участка АФАР, расположенные на её сферической поверхности, не находятся под прямым углом к направлению фронта волны, то поверхность сферы того же диаметра, что и круг, получит вдвое меньше энергии падающей на неё электромагнитной волны, а полусферическая поверхность – меньше от 2-х до 4-х раз (в зависимости от угла падения).

Если необходимость в таком широком угле сканирования отсутствует АФАР может быть выполнена в виде сегмента сферы.

Конструктивно сегментно-купольная АФАР может состоять из отдельных шестиугольных сегментов, подобных показанному на рисунке 8.

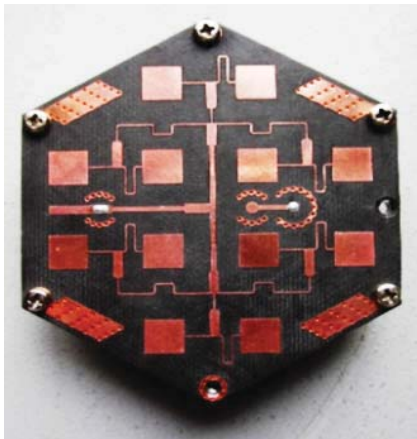


Рис. 8. Конструктивный элемент сегментно-купольной АФАР [39]

### 3. Основные соотношения и зависимости

Как известно [20], коэффициент усиления  $G$ , как и КНД, любой пассивной фазированной антенной решётки (ФАР) с одним фиксированным лучом (без функции сканирования) прямо пропорционален числу её ЭИ  $N$  и КУ каждого из них  $G_0$ :

$$G = N \times G_0; \quad (2)$$

отсюда минимально необходимое число ЭИ

$$N_{\min} = G/G_0. \quad (3)$$

Если, как было показано выше, принять  $G_0 = 6$  дБи, то для  $G = 30$  дБи такая пассивная ФАР должна содержать не менее 250-ти ЭИ (например, иметь размерность  $16 \times 16$  ЭИ), а для  $G = 35$  дБи – не менее 790 ЭИ ( $28 \times 28$ ).

Коэффициент усиления плоской АФАР зависит от угла сканирования, то есть угла между нормалью к плоскости АФАР и направлением её главного лепестка ДН. При сканировании только в одной плоскости КУ изменяется пропорционально косинусу этого угла. Следовательно, для плоской АФАР, сканирующей в определённом телесном угле  $\Omega$  (рис. 9), минимально необходимое число ЭИ  $N_{\min}$  обратно пропорционально квадрату косинуса максимального угла сканирования  $\vartheta_{\max}$ :

$$N_{\min} = G / (G_0 \times \cos^2 \vartheta_{\max}) \equiv 2G / (G_0 (1 + \cos 2\vartheta_{\max})). \quad (3)$$

Отсюда, в частности, следует, что для обеспечения кругового сканирования в угле  $\theta = \pm 45^\circ$  необходимое число ЭИ решётки удваивается: для  $G = 30$  дБи АФАР должна содержать не менее 500 ЭИ (например, иметь размерность  $23 \times 23$  ЭИ), а для  $G = 35$  дБи – почти 1600 ЭИ ( $40 \times 40$ ).

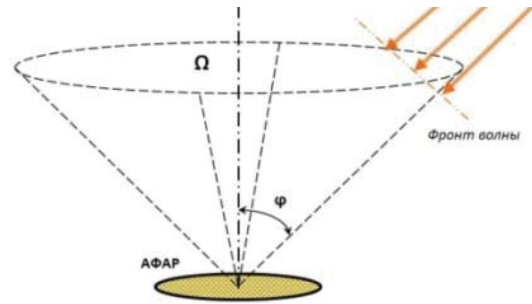


Рис. 9. Схема плоской сканирующей АФАР

В Ки-диапазоне каждый ИЭ приёмной или передающей АФАР площадью около  $1 \text{ см}^2$ , учитывая необходимое расстояние между ИЭ не менее половины длины волны  $-\lambda/2$ , займёт на подложке площадь около  $3\text{-}4 \text{ см}^2$ .

Приёмно-передающая плоская АФАР, созданная по микрополосковой технологии, являясь достаточно узкополосной, должна содержать отдельные группы перемежающихся приёмных и передающих ИЭ, размеры которых соответствуют частотам приёма и передачи<sup>1</sup>. Таким образом, число ЭИ ещё раз удвоится: для  $G = 30$  дБи АФАР должна содержать около 1000 ЭИ ( $32 \times 32$ ), а для  $G = 35$  дБи – 3200 ЭИ ( $56 \times 56$ ); но при правильном размещении они могут быть расположены на подложке плотнее друг к другу. При этом для каждого ЭИ на подложке потребуется площадь  $2,5\text{-}3 \text{ см}^2$ .

Для размещения ИЭ в плоской приёмно-передающей АФАР с усилением 30 дБи и максимальным углом сканирования  $\pm 45^\circ$  понадобится круглая подложка площадью  $2500\text{-}3000 \text{ см}^2$  и диаметром  $55\text{-}65 \text{ см}$ , а для АФАР с КУ 35 дБи – диаметром около метра<sup>2</sup>.

Такие плоские антенны могут быть установлены на транспортных средствах, постоянно эксплуатирующихся в регионах России, где угол места видимости КА "Экспресс-РВ" превышает  $50^\circ\text{-}55^\circ$ .

Для купольной АФАР, чтобы обеспечить такой же КНД, как у плоской решётки, эффективная площадь рабочего участка  $s$  должна равняться эффективной площади поверхности плоской АФАР.

В первом приближении, как показано на рисунке 10, эффективная площадь поверхности рабочего участка (апертура) купольной АФАР представляет собой площадь  $s = \pi r^2$  малого круга радиуса  $r$ , образованного сечением полусферы с радиусом  $R$  под углом  $45^\circ$ .

Радиус  $r = R \sin 45^\circ = 0,707R$ , следовательно, радиус полусферической купольной АФАР должен в 1,41 раза превышать радиус плоской АФАР, с которой ведётся сравнение. Общая площадь поверхности полусферического купола  $S = 2\pi R^2$  – ровно в четыре раза больше площади поверхности плоской АФАР:

$$S/s = 2\pi R^2 / \pi r^2 = 2 / \sin^2 45^\circ = 4. \quad (4)$$

<sup>1</sup>По существу, приёмно-передающая АФАР может представлять собой две «вложенные» друг в друга антенны с перемежающимися группами приёмных и передающих элементов, как это сделано, например, в антенне терминала StarLink [24].

<sup>2</sup>Для сравнения: диаметры современных офсетных зеркальных приёмно-передающих антенн с такими же КУ в этом же диапазоне частот имеют сопоставимые, но несколько меньшие размеры – 35 и 65 см, соответственно.



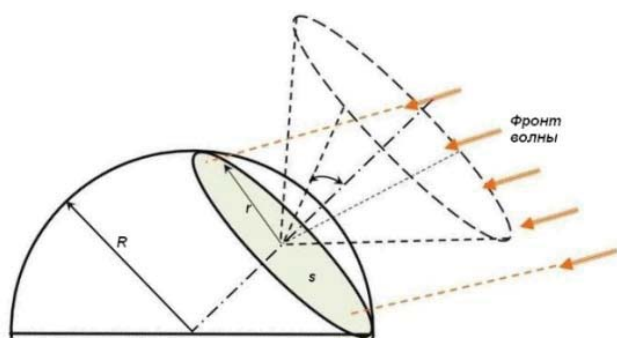


Рис. 10. Схема работы полусферической купольной АФАР

Следовательно, число ЭИ в полусферической купольной АФАР, которое прямо пропорционально площади её поверхности, должно быть в четыре раза больше, чем в рассмотренной выше плоской АФАР.

Для ПСС через КА на ВЭО можно ограничиться максимальным углом отклонения луча  $\theta = \pm 65^\circ$ . При этом минимальный угол места для сканирующей АФАР, установленной на транспортном средстве, составит  $\alpha = 25^\circ$ , что для данной орбиты вполне достаточно. Это позволит применить купольную АФАР в виде сферического сегмента (рис. 11) с меньшей площадью поверхности, чем у полусферы, и меньшим числом необходимых ЭИ<sup>1</sup>.

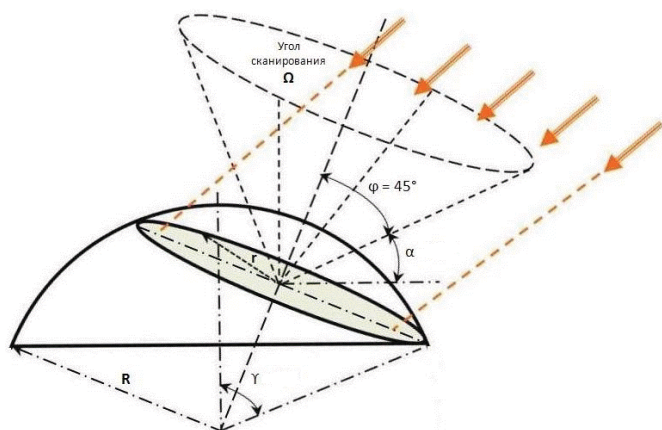


Рис. 11. Схема работы сегментно-купольной АФАР

Как видно из рисунка 11, центральный угол сегмента сферической поверхности антенны составит  $\gamma = 90^\circ - \alpha$ .

Площадь поверхности такого сегмента

$$S = 2\pi R^2 (1 - \cos \gamma); \quad (5)$$

где  $R = r / \sin 45^\circ$ , а площадь поверхности плоской АФАР  $s = \pi r^2$ . Следовательно,

$$S = 4s (1 - \cos \gamma). \quad (6)$$

Зависимости рассчитанного таким образом минимально го числа ЭИ от максимального угла сканирования плоской и сегментно-купольной передающей (или приёмной) АФАР приведены на рисунке 12.

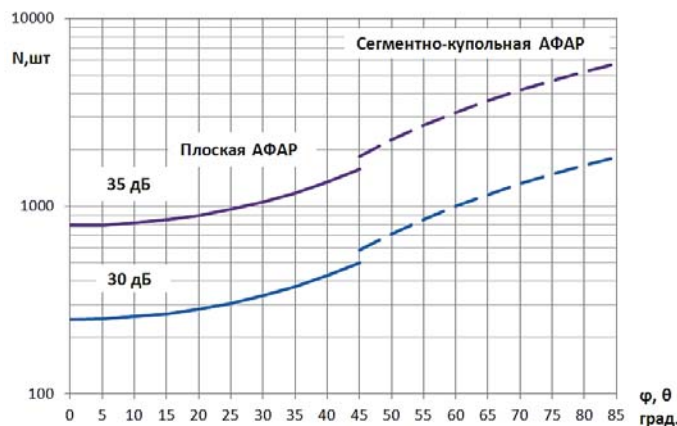


Рис. 12. Зависимости минимально необходимого числа элементарных излучателей от максимального угла сканирования для плоской и сегментно-купольной АФАР

Таким образом, площадь поверхности и минимально необходимое число ЭИ сегментно-купольной приёмно-передающей АФАР, обеспечивающей круговое сканирование в угле  $\pm 65^\circ$ , лишь 2,6 раза больше, чем для плоской АФАР с таким же КУ в луче и круговым сканированием в угле  $\pm 45^\circ$ .

Для  $G = 30$  дБи сегментно-купольная приёмно-передающая АФАР должна содержать  $N_{\min} = 2300$  ЭИ, а для  $G = 35$  дБи –  $N_{\min} = 7350$  ЭИ.

Диаметр основания купола в 1,4 раза больше диаметра равной по усилению плоской АФАР: для  $G = 30$  дБи – около 0,9 м, а высота купола  $h = R(1 - \cos \gamma) \approx 0,66 R$ , составляет 1/3 от диаметра его основания, то есть около 30 см. Такая антенна будет низкопрофильной, с существенно лучшей обтекаемостью воздушным потоком, чем полусферическая).

### Заключение

Таким образом, антенна терминальной станции ПСС для ШПД через SeCC "Экспресс-РВ" в любом случае не может быть компактным изделием и пригодна для установки только на достаточно крупных транспортных средствах: автомобилях-кроссоверах; грузовых автомобилях; трейлерах; железнодорожных вагонах; авиалайнерах; больших яхтах и других морских и речных судах.

Кроме элементарных излучателей, для построения АФАР необходимы фазовращатели, например, на основе микро-электромеханических систем (МЭМС) [35], а также достаточно сложное цифровое устройство управления процессом фазирования ЭИ антенны.

Если допустить, что себестоимость каждого ЭИ АФАР с фазовращателями составит при крупносерийном производстве всего 15 долл. [21], то только себестоимость всей АФАР с КУ 30 дБ и углом сканирования  $\pm 65^\circ$ , необходимой для создания терминала для ПСС, составит не менее 40 000 долл.

Кардинальное снижение стоимости, по-видимому, возможно только при переходе на другие физические принципы построения следящих антенн [40], ни один из которых пока не освоен на практике.

<sup>1</sup>Для сканирования в этом телесном угле плоской АФАР не хватает отклонения луча всего на  $20^\circ$ .

## Литература

1. Указание Президента Российской Федерации от 18.07.2018 № Пр-1256 о формировании и реализации федеральной целевой программы «Сфера».
2. Урличич Ю., Прохоров С. Цели и задачи программы «Сфера» // Сборник статей «Спутниковая связь и вещание – 2020». М.: Гротек, 2020. С. 26-32.
3. Эйдус А., Гриценко А., Кукк К., Локишин Б., Тимошенко О., Алешин В., Приходько В. Обсуждение целесообразности комплексной программы «Сфера» // Технологии и средства связи. 2016. № 6-2, Спецвыпуск «Спутниковая связь и вещание – 2019». С. 22-31.
4. Локишин Б.А. "Экспресс-РВ" – Перспективная система связи со спутниками на высокоэллиптических орбитах // Технологии и средства связи. 2018. № 6-2, Спецвыпуск «Спутниковая связь и вещание – 2019». С. 62-71.
5. Камнев Е.Ф., Гриценко А.А., Анпилогов В.Р. Системы широкополосного доступа на основе высокоэллиптических спутников: российский проект // Технологии и средства связи. 2018. № 6-2, Спецвыпуск «Спутниковая связь и вещание – 2019». С. 72-75.
6. Камнев Е.Ф., Аболиц А.И., Акимов А.А. Системы спутниковой связи с эллиптическими орбитами, разнесением ветвей и адаптивной обработкой. М., Глобсатком, 2009. 724 с.
7. Акимов А.А., Гриценко А.А., Степанов А.А., Чазов В.В. Особенности построения и эксплуатации орбитальных группировок систем спутниковой связи // Технологии и средства связи. Спецвыпуск «Спутниковая связь и вещание – 2016». 2015. № 6-2, С.72-87.
8. Высокоскоростной интернет в Арктике. Режим доступа: [https://www.rbc.ru/technology\\_and\\_media/18/11/2020/5fb529779a79472176dda8ed](https://www.rbc.ru/technology_and_media/18/11/2020/5fb529779a79472176dda8ed) (дата обращения 20.11.2020).
9. «Мегафон» начал строить сеть на дне Северного Ледовитого океана. Режим доступа: <https://www.cnews.ru/news/top/2020-07-20> (дата обращения 30.07.2020).
10. Завершился первый этап морских исследований в рамках проекта Arctic Connect. Режим доступа: <https://rg.ru/2020/11/07/reg-dfo/> (дата обращения 10.11.2020).
11. Якутия присоединилась к проекту Arctic Connect. Режим доступа: <https://lenta.ru/news/2021/01/29/mgfnasakha/> (дата обращения 31.01.2021).
12. Алешин В. Оценка реальных потребностей России в услугах подвижной спутниковой связи // Электросвязь, 2021, № 2. С. 60-63.
13. Мысев М., Уваров С. Проблемы радиочастотного обеспечения низкорбитальных спутниковых систем широкополосного доступа // Сборник статей «Спутниковая связь и вещание – 2020». М.: Гротек, 2020. С. 66-72.
14. Электромагнитная совместимость систем спутниковой связи. Под ред. Л.Я. Кантора и В.В. Ноздрина. М.: НИИР, 2009. 280 с.
15. Немировский М., Локишин Б., Аронов Д. Основы построения систем спутниковой связи / Под ред. д.т.н., проф. М.С. Немировского. М.: Горячая линия – Телеком, 2016. 432 с.
16. Анпилогов В., Денисенко В., Зимин И., Кривошеев Ю., Чекушкин Ю., Шишилов А. Проблемы создания антенн с электрическим сканированием луча для абонентских терминалов спутниковых систем связи в Ки- и Ка-диапазонах // Первая миля. 2019. № 3 (80). С. 16-27.
17. Якубович В. «ВизКом» – ставка на антенны сверхмалой апертуры // Сборник статей «Спутниковая связь и вещание – 2020». М.: Гротек, 2020. С. 56-57.
18. Бобков В., Званугов Н. Готовые решения для наземного сегмента ССС "Экспресс-РВ" // Сборник статей «Спутниковая связь и вещание – 2020». М.: Гротек, 2020. С. 34-36.
19. Якубович В. Большие перспективы маленьких антенн // Технологии и средства связи. 2018. № 6-2, Спецвыпуск «Спутниковая связь и вещание – 2019». С. 58-59.
20. Хансен Р. Сканирующие антенные системы СВЧ. В 3 т. Т. 2 / под ред. Р. К. Хансена; пер. с англ. под ред. Г. Т. Маркова, А.Ф. Чаплина. М.: Советское радио, 1969. 496 с.
21. Анпилогов В., Шишилов А., Эйдус А. Анализ систем LEO HTS и реализуемости фазированных антенных решеток для абонентских терминалов // Технологии и средства связи, Спецвыпуск «Спутниковая связь и вещание – 2015». 2014. № 6 (2). С. 14-26.
22. Анпилогов В., Шишилов А., Эйдус А. Многолучевые антенные системы HTS // Технологии и средства связи. 2013, № 6-2 (99). С. 54-67.
23. Шишилов А., Левитан Б., Топчиев С., Анпилогов В., Денисенко В. Многолучевые антенны для систем радиолокации и связи. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul18/6/text.pdf> DOI 10.30898/1684-1719.2018.7.6
24. Alireza Mahanfar, Javier Rodriguez De Luis, Nil Apyaydin, Ersin Yetisir, Shaya Karimkashi Arani. Antenna aperture in phased array antenna systems / Patent US 2019/0252801 A1. Aug.15, 2019.
25. Анпилогов В., Пехтерев С., Шишилов А. Антенная решетка и терминал Starlink. // Сборник статей «Спутниковая связь и вещание – 2021». М.: Гротек, 2021. С. 69-77.
26. Режим доступа: <http://www.cplire.ru/rus/electrodynamics/Bankov-2.html> (дата обращения 11.10.2020).
27. Hansen R.C. Phased array antennas. 2nd ed.
28. Ястребцова О.И. Метод улучшения электрических характеристик в широком диапазоне углов микрополосковых антенных решеток // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. М.: 2019, т. 171, №4. С. 39-44.
29. Liu, Y., Yang, H.P., Jin, Z., Zhu, J. An Improvement Approach for Wide-Angle Impedance Matching Using ELC Metasurface Slabs for SIW Slot Array Antennas. International Journal of Antennas and Propagation, 2018. P. 1-8.
30. Tang, M., Xiao, S., Wang, B., Guan, J., Deng, T. Improved Performance of a Microstrip Phased Array Using Broadband and Ultra-Low-Loss Metamaterial Slabs. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 53, 2011. P. 31-41.
31. Engheta, N, Ziolkowski, R.W. Metamaterials: Physics and Engineering Explorations. Wiley-IEEE Press. 440 p.
32. Воскресенский Д., Волков А., Гринева А. Периодические СВЧ композитные структуры в бортовых антенных системах // Сборник трудов 26-й Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016), 2016. С. 6-17.
33. Ястребцова О.И. Оптимизация диэлектрической подложки микрополосковых антенных решеток для борьбы с эффектом «ослепления». Доклады VII Всероссийской микроволновой конференции «Московская микроволновая неделя», 25-27 ноября 2020 г., Москва, ИРЭ РАН, 2020. С. 169-173.
34. Бей Н., Захаров Е., Ильинский А., Медведев Ю., Харланов Ю. Антенна с управляемой купольной линзой. Патент РФ № 2214658, МКИ 7 Н 01 Q 15/08. Приор. 20.03.2002; Опубл. 20.10.2003, Бюл. № 29.
35. Кочемасов В., Майстренко А. Фазовращатели на основе МЭМС // Компоненты и технологии. 2016, № 12. С. 20-24.
36. Захаров Е., Ильинский А., Медведев Ю., Перфилов О., Сажухин А., Скородумов А., Харланов Ю. Гибридные диэлектрические линзовые антенны средств связи сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Обзор. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb20/3/text.pdf> DOI 10.30898/1684-1719.2020.2.3
37. Медведев Ю., Харланов Ю. Характеристики сканирования купольных линзовых антенн, используемых в мобильных средствах спутниковой и радиорелейной связи диапазонов ММВ и СМВ // Антенны. М., 2004. Вып. 2(81). С. 20-25.
38. Режим доступа: <https://radiorf.ru/en/faziki> (дата обращения 11.10.2020).
39. Режим доступа: <http://www.nano-pulse.com/ru/producty/antenna> (дата обращения 30.12.2020).
40. Космыкин А., Шашаев И., Лемберг К. Обзор технологий построения плоских сканирующих антенн для наземных терминалов спутниковой связи // Сборник статей «Спутниковая связь и вещание – 2021». М.: Гротек, 2021. С. 56-61.

## EVALUATION OF THE FEASIBILITY OF AN ACTIVE PHASED ARRAY ANTENNA IN THE TERMINAL OF THE EXPRESS-RV SATELLITE COMMUNICATION SYSTEM

Victor S. Aleshin, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, [abc082012@yandex.ru](mailto:abc082012@yandex.ru)

### Abstract

The basic principles of building a promising domestic regional satellite communication system "Express-RV", based on the highly elliptical orbit "Molniya" and intended for broadband access of civil sector subscribers to various public communication networks, in particular to the Internet, are considered. The main technical requirements for the antenna systems of mobile mobile satellite communication terminals of the Express-RV system are formulated. The necessity of using active phased array antennas for a number of types of such terminals is justified. A brief overview of the principles of implementation and examples of the design of microstrip active phased array antennas, including their elementary emitters and individual modules, are given. The problem of the occurrence of the blinding effect inherent in flat microstrip gratings made on dielectric substrates is noted; measures to compensate for this effect are considered. The possibility of expanding the maximum scanning angle of a narrowly directed beam of an active phased array antenna by using a magnetically controlled scattering dielectric lens, as well as creating segment-dome structures of antenna systems in relation to mobile terminals of mobile satellite communications of the "Express-RV" system, is shown. Simple analytical relations are derived that allow us to estimate the number of elementary emitters required for the implementation of a receiving-transmitting active phased array antenna with specified technical characteristics: gain and maximum scanning angle; the corresponding dependencies are given. The cost of creating an antenna system based on an active phased array is estimated.

**Keywords:** mobile satellite communications, Express-RV, Molniya orbit, vehicle terminal, active phased array antenna, segment-dome antenna.

### References

1. Decree of the President of the Russian Federation No. Pr-1256 of 18.07.2018 on the formation and implementation of the federal target program "Sphere". (in Russian)
2. Urlichich, U, Prokhorov, S. (2020) Goals and objectives of Sphere program. Collection of articles "Satellite communication and broadcasting-2020". Moscow, Groteck, 2020, pp. 26-32. (in Russian)
3. Eydus, A., Gritsenko, A., Kukuk K., Lokshin, B., Timoshenko, O., Aleshin, V., Prihod'ko, V. (2018) The discussion of Sfera program. Technologies and means of communication. *Special issue "Satellite communication and broadcasting - 2019"*, No. 6-2, pp. 22-31. (in Russian)
4. Lokshin, B. (2018) "Express-RV" as a forward-looking communications system with satellites in highly elliptical orbits. Technologies and means of communication. *Special issue "Satellite communication and broadcasting - 2019"*, No. 6-2, pp. 62-71. (in Russian)
5. Kamnev, V., Gritsenko, A., Anpilogov, V. (2018) Broadband access systems based on highly elliptical satellites: Russian projects. Technologies and means of communication. *Special issue "Satellite communication and broadcasting - 2019"*, no. 6-2, pp. 72-75. (in Russian)
6. Kamnev, V. and other (2009). Satellite communication systems. Moscow, Globatcom, 724 p. (in Russian).
7. Akimov, A., Gritsenko, A., Stepanov, A., Chazov, V. (2015). Features of construction and operation of the orbital constellation of satellite communications systems. Technologies and means of communication. *Special issue "Satellite communication and broadcasting-2016"*, no. 6-2, pp. 72-87. (in Russian)
8. High-speed internet in the Arctic. Available at: [https://www.rbc.ru/technology\\_and\\_media/18/11/2020/5fb529779a79472176dda8ed](https://www.rbc.ru/technology_and_media/18/11/2020/5fb529779a79472176dda8ed) (accessed 20.11.2020) (in Russian)
9. "Megafon" began to build a network on the bottom of the Arctic Ocean. Available at: <https://www.cnews.ru/news/top/2020-07-20> (accessed 30.07.2020) (in Russian)
10. The first stage of marine research under the Arctic Connect project has been completed. Available at: <https://rg.ru/2020/11/07/reg-dfo/zavershilsia-pervyj-etap-morskih-issledovaniy-v-ramkah-proekta-arctic-connect.html> (accessed 10.11.2020) (in Russian)
11. Yakutia joined the MegaFon project Arctic Connect. Available at: <https://lenta.ru/news/2021/01/29/mgfnzakha/> (accessed 31.01.2021) (in Russian)
12. Aleshin, V., Dogaev, S. (2021) Assessment of Russia's real needs for mobile satellite communications services. *Electrosvyaz*. 2021. No. 2, pp. 60-63. (in Russian)
13. Mysev, M., Uvarov, S. (2020) Issues of frequency resource for low earth orbit high throughput satellite systems. *Collection of articles "Satellite communication and broadcasting-2020"*. Moscow, Groteck, pp. 66-72 (in Russian).
14. Electromagnetic compatibility of satellite communication systems. Edited by L. Ya. Kantor and V. V. Nozdryn. Moscow, NIIR, 2009. 280 p. (in Russian)
15. Nemirovsky, M., Lokshin, B., Aronov, D. (2016). Basics of building satellite communication systems. Moscow, Gorjachaja liniya – Telecom, 432 p. (in Russian)
16. Anpilogov, V., Denisenko, V., Zimin, I., Krivosheev, Yu., Chekushkin, Yu., Shishlov, A. (2019) Problems of creating antennas with electric beam scanning for subscriber terminals of satellite communication systems in the Ku - and Ka-bands. *The first mile*, 2019. No. 3 (80), pp. 16-27. (in Russian)



17. Yakubovich, V. (2020) VisCom – bet on ultra-small aperture antennas. *Collection of articles "Satellite communication and broadcasting-2020"*. Moscow, Groteck, pp. 56-57. (in Russian)
18. Bobkov, V., Zvantsugov, N. (2020) Ready solutions for the ground segment of the satellite communication system "Express-RV". *Collection of articles "Satellite communication and broadcasting-2020"*. Moscow, Groteck, pp. 34-36. (in Russian)
19. Yakubovich, V. (2018) Big prospects of small antennas. *Technologies and means of communication. Special issue "Satellite communication and broadcasting - 2019"*, No. 6-2, pp. 58-59 (in Russian).
20. Hansen, R. (1969) Scanning antenna systems of the microwave. Vol. 2. Moscow: Sovetskoe radio. 496 p. (in Russian)
21. Anpilogov, V., Shishlov, A., Eydus, A. (2015). Analysis LEO-HTS systems and feasibility of phased array antennas for the subscriber terminals. *Technologies and means of communication. Special issue "Satellite communication and broadcasting-2016"*, No. 6-2, pp. 14-26 (in Russian)
22. Anpilogov V., Shishlov A., Eidus A. (2013) Multipath antenna systems HTS. *Technologies and means of communication*. No. 6-2 (99), pp. 54-67. (in Russian)
23. Shishlov A., Levitan B., Topchiev S., Anpilogov V., Denisenko V. (2018) Multipath antennas for radar and communication systems. *Journal of Radio Electronics [electronic journal]*. 2018. No. 7. Access mode: <http://jre.cplire.ru/jre/jul18/6/text.pdf> DOC 10.30898/1684-1719. 2018. 7. 6 (in Russian)
24. Alireza Mahanfar, Javier Rodriguez De Luis, Nil Apaydin, Ersin Yetisir, Shaya Karimkashi Arani. Antenna aperture in phased array antenna systems. Patent US 2019/0252801 A1. Aug.15, 2019.
25. Anpilogov V., Pekhterev S., Shishlov A. (2021) Antenna array and Starlink subscriber terminal. *Collection of articles "Satellite communication and broadcasting-2021"*. Moscow, Groteck, pp. 69-76. (in Russian)
26. Available at: <http://www.cplire.ru/rus/electrodynamics/Bankov-2.html> (accessed 11.10.2020) (in Russian)
27. Hansen R.C. (2009) Phased array antennas. 2nd ed.p. cm.
28. Yastrebtsova O. (2019) Method of enhancing wide-angle properties of microstrip antenna arrays. *Matters of Electromechanics. VNIIEМ Proceedings*. Moscow, 'VNIIEМ Corporation', vol.171, No. 4, pp. 39-44 (in Russian)
29. Liu, Y., Yang, H.P., Jin, Z., Zhu, J. (2018) An Improvement Approach for Wide-Angle Impedance Matching Using ELC Metasurface Slabs for SIW Slot Array Antennas. *International Journal of Antennas and Propagation*, pp. 1-8.
30. Tang, M., Xiao, S., Wang, B., Guan, J., Deng, T. (2011) Improved Performance of a Microstrip Phased Array Using Broadband and Ultra-Low-Loss Metamaterial Slabs. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 53, 2011. - pp. 31-41.
31. Engheta, N, Ziolkowski, R.W. (2016) *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*. Wiley-IEEE Press. 440 p.
32. Voskresensky, D., Volkov, A., Grinev, A. (2016) Periodic microwave composite structures in onboard antenna systems. *Proceedings of the 26th International Conference "Microwave Technology and Telecommunications Technologies"*, 2016, pp. 6-17. (in Russian)
33. Yastrebtsova, O. (2020) Optimization of the dielectric substrate of microstrip antenna arrays to combat the "blinding" effect. *Reports of the VII All-Russian Microwave Conference "Moscow Microwave Week"*, November 25-27, 2020, Moscow, IRE RAS, pp. 169-173. (in Russian)
34. Bey, N., Zakharov, E., Ilinsky, A., Medvedev, Yu., Kharlanov, Yu. Antenna with a controlled dome lens. Patent of the Russian Federation No. 2214658, MKI 7 H 01 Q 15/08. Priority 20.03.2002; Published 20.10.2003, Bulletin No. 29.
35. Kochemasov V., Maistrenko A. Phase shifters based on MEMS. *Components and technologies*. 2016. No. 12, pp. 20-24. (in Russian)
36. Zakharov, E., Ilinsky A., Medvedev V., Perfilov Yu., Samokhin B., Skorodumov A., Kharlanov Yu. (2020) Hybrid dielectric lens antennas of communication means of centimeter and millimeter ranges. *Review. Journal of Radio Electronics [electronic journal]*. No. 2. Access mode: <http://jre.cplire.ru/jre/feb20/3/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-719.2020.2.3 (in Russian)
37. Medvedev Yu., Kharlanov Yu. (2004) Characteristics of scanning of dome lens antennas used in mobile satellite and radio relay communications of the MMV and SMV bands. *Antennas*. Issue 2 (81), p. 20-25. (in Russian)
38. Access mode: <https://radiorf.ru/en/faziki> (accessed 11.10.2020). (in Russian)
39. Access mode: <http://www.nano-pulse.com/ru/producty/antenny> (accessed 30.12.2020). (in Russian)
40. Kosmynin, A., Shashaev, I., Lemberg, K. (2021) Review of technologies for constructing flat scanning antennas for ground-based satellite communication terminals. *Collection of articles "Satellite communications and broadcasting-2021"*, Moscow, Groteck, pp. 56-61. (in Russian)

#### Information about author:

**Victor S. Aleshin**, Ph.D, senior scientific researcher, leading scientific employee of MTUCI, Moscow, Russia