

ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ АНТЕНН с электрическим сканированием луча для абонентских терминалов спутниковых систем связи в Ku- и Ka-диапазонах

В.Анпилов, к.т.н., доцент, заместитель генерального директора
АО "ВИСАТ-ТЕЛ" / avr@cts.ru,

В.Денисенко, к.ф.-м.н., доцент МАИ, начальник отделения
ПАО "Радиофизика",

И.Зимин, к.т.н., ведущий научный сотрудник –
заведующий лабораторией МФТИ,

Ю.Кривошеев, к.т.н., доцент МАИ, преподаватель МФТИ,
старший научный сотрудник ПАО "Радиофизика",

Ю.Чекушкин, старший научный сотрудник МФТИ,

А.Шишлов, к.т.н., доцент МФТИ, начальник отдела ПАО "Радиофизика"

УДК 621.396.94; DOI: 10.22184/2070-8963.2019.80.3.16.27

Анализируются прогнозы развития рынка плоских антенн с электрическим сканированием луча, планируемых для применения в абонентских терминалах систем HTS и LEO/MEO/NEO-HTS. Сформулированы требования к таким антеннам. Приведены простые соотношения для анализа реализуемости этих требований. Рассмотрены примеры физической реализации антенн с электрическим сканированием луча, приведен анализ их структуры и характеристик. Результаты анализа показывают, что цена в 100–300 долл. США для таких антенн может быть достигнута применительно к абонентским терминалам систем типа NEO-HTS; в случае систем HTS и LEO/MEO-HTS заявленные ценовые параметры абонентских терминалов в обозримой перспективе недостижимы.

В настоящее время созданы и продолжают развиваться высокоинформативные системы связи Ku- и Ka-диапазонов на основе геостационарных спутников с высокой пропускной способностью GEO-HTS [1]. Наряду с фиксированными абонентами эти системы предусматривают обслуживание абонентов на транспортных средствах в движении [2]. Активно проектируются и создаются новые спутниковые системы широкополосного доступа Ku- и Ka-диапазонов

на основе группировок негеостационарных спутников связи на низких (LEO-HTS), средних (MEO-HTS) и высокоэллиптических орбитах (NEO-HTS) [3–6]. Учитывая ограниченность спектра Ku- и Ka-диапазонов фиксированной спутниковой службы, в перспективе планируется использование диапазона частот Q/V. Абонентские терминалы указанных систем связи должны иметь сканирующие антенны для слежения за спутниками, движущимися относительно абонентов [4],

или слежения за геостационарными спутниками при перемещении абонентов.

Одно из ключевых условий коммерческой эффективности систем GEO-HTS и LEO/MEO/NEO-HTS – сканирующие антенны абонентских терминалов должны быть дешевыми и удобными в эксплуатации. Большие надежды на решение этой задачи связаны с созданием плоских антенн с электрическим сканированием типа ФАР/АФАР. В зарубежной литературе они получили название flat panel antennas (FPA). Сегодня более 30 зарубежных компаний работают в этой области.

МИРОВОЙ РЫНОК ПЛОСКИХ АНТЕНН С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СКАНИРОВАНИЕМ И ЕГО ПРОГНОЗЫ

По оценкам компании NSR, мировой рынок антенн FPA может достигнуть 11 млрд долл. США в 2028 году. В количественном выражении это составит примерно 1,5 млн таких антенн [7]. Базируясь на представленных компанией NSR данных о динамике развития рынка FPA в 2018–2028 годах, можно оценить усредненную стоимость одной такой сканирующей антенны (рис.1).

Это очень приблизительная оценка, но она показывает, что в ближайшее десятилетие прорывных решений, обеспечивающих снижение стоимости такой антенны до 100–300 долл., компания NSR не прогнозирует [7, 8]. Более того, год назад, в марте 2018 года, компания NSR прогнозировала достижение усредненной стоимости антенны FPA в 2027 году примерно 4,5 тыс. долл. (на 40% ниже, чем в прогнозе-2019), то есть постепенно оптимизм прогнозов снижается. Этот вывод подтверждается и официальными документами, представленными компанией OneWeb в 2019 году [9] при получении разрешения (лицензии) на экспериментальное использование абонентских терминалов на территории США. В лицензии заявлены двухзеркальные полноповоротные антенны 0,6 и 0,8 м. Каждый абонентский терминал должен содержать две такие приемопередающие антенны производства компании Intellian Technologies.

Проблемы создания сканирующих антенн для абонентских терминалов низкоорбитальных систем отмечались и несколько лет назад [10]. Существенных положительных сдвигов в этой области пока нет.

Естественно, что столь неблагоприятный прогноз с одной стороны и многочисленные оптимистические заявления в массовых изданиях о создании дешевых сканирующих антенн – с другой

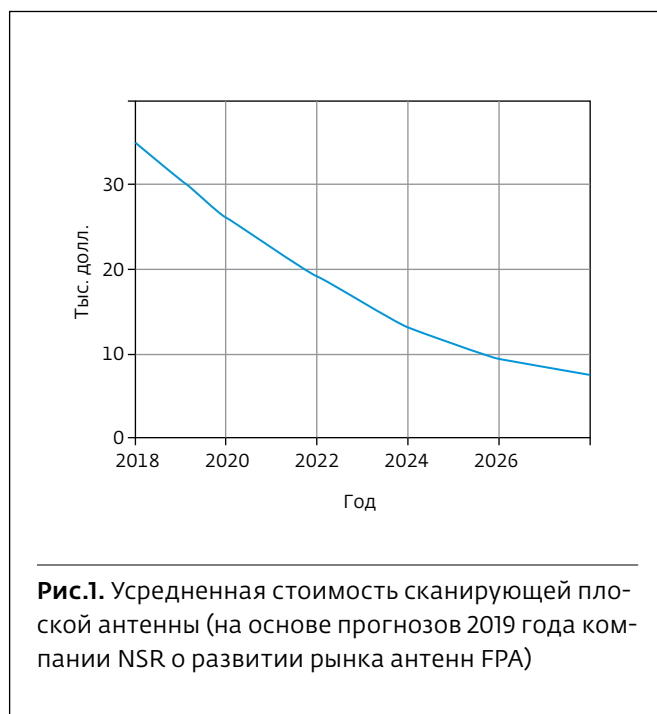


Рис.1. Усредненная стоимость сканирующей плоской антенны (на основе прогнозов 2019 года компании NSR о развитии рынка антенн FPA)

требуют углубленного анализа проблем создания антенн FPA, предъявляемых к ним требований и примеров их реализации, включая принципы их работы и ожидаемые характеристики.

Предварительно следует дать общие представления о типовых системах GEO-HTS и LEO/MEO/NEO-HTS, поскольку при создании сканирующих антенн абонентских терминалов следует учитывать особенности построения орбитальных группировок таких систем.

СИСТЕМЫ ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА GEO-HTS и LEO/MEO/NEO-HTS

В последнее десятилетие создано и введено в эксплуатацию большое количество геостационарных спутников GEO-HTS. Их особенностью является применение бортовых многолучевых антенн (МЛА) с высокой направленностью лучей. Эти спутники предназначены в первую очередь для широкополосного доступа в интернет (ШПД) [1]. Себестоимость передачи одного бита информации через спутник GEO-HTS более чем на порядок ниже, чем при использовании традиционных спутников с широкими контурными лучами [11]. Пропускная способность одного геостационарного спутника GEO-HTS сегодня составляет примерно 300 Гбит/с, а в ближайшие годы достигнет 1 Тбит/с. Но информационная емкость действующих в настоящее время спутников GEO-HTS востребована в среднем по миру всего на 20–30%.

Таблица 1. Системы ШПД на основе негеостационарных спутников HTS

Система (заявитель)	Тип спутника	Орбиты	Количество спутников
SpaceX (США)	LEO-HTS	550-1325 км, наклонение 53,0–88,1°	4425
One Web (США, Великобритания)	LEO-HTS	1200 км, наклонение 87,9°	648
Telesat (Канада)	LEO-HTS	1000 км, наклонение 99,5° 1248 км, наклонение 37,4°	117
ОЗб (США)	MEO-HTS	8062 км, экваториальные орбиты	12
Скиф (Россия)	MEO-HTS	8000 км, полярные орбиты	12
Экспресс РВ (Россия)	HEO-HTS	39500 км в апогее, наклонение 62,8°	4
Virtual GEO (США)	HEO-HTS	26 172 км в апогее, наклонение 63,4°	15
ASBM (Норвегия)	HEO-HTS	43509 км в апогее, наклонение 63,4°	2

Причина такой низкой утилизации их ресурса обусловлена в первую очередь дороговизной абонентских терминалов. В особенности высоки цены абонентских терминалов на транспортных средствах, обеспечивающих работу в движении [2].

В последние годы вновь активно разрабатываются высокоинформативные системы связи с использованием многоспутниковых группировок негеостационарных спутников [3]. Первый всплеск создания таких систем наблюдался в конце 90-х годов (например, разрабатывались системы Teledesic, SkyBridge и др.) [12, 13]. Группировки новых подобных систем формируются на основе спутников LEO-HTS, MEO-HTS или HEO-HTS [3–5]. Параметры орбит спутниковых группировок и количество спутников в них для некоторых разрабатываемых в настоящее время систем ШПД указаны в табл.1. (проектные данные периодически уточняются, приведенные значения соответствуют февралю 2019 года). Общая потенциальная емкость указанных систем приближается к 100 Тбит/с.

Заявленные в радиочастотных службах Администраций связи группировки LEO-HTS содержат сотни или даже тысячи спутников. Считается, что их ключевые достоинства

обусловлены тем, что расстояния от абонентов до спутников относительно невелики и, следовательно, потери в линиях связи и задержки сигналов существенно меньше, чем при использовании геостационарных спутников.

Ряд специалистов утверждает, что группировки MEO-HTS более эффективны, поскольку для глобального обслуживания необходимо принципиально меньше спутников (чем выше орбита, тем меньше требуется спутников), а энергетические параметры и задержка сигналов остаются заметно лучше, чем при использовании геостационарных спутников.

По состоянию на март 2019 года действует только одна система MEO-HTS ОЗб и начато развертывание спутниковой группировки LEO-HTS OneWeb. В качестве абонентских терминалов этих систем пока применяются обычные полноповоротные зеркальные антенны. Поиски приемлемых решений (по техническим, а главное по ценовым параметрам) физической реализации антенн с электрическим сканированием луча активно ведутся, но достоверных данных о достигнутых результатах практически нет. Ниже предпринята попытка анализа реального состояния в области разработки плоских антенных решеток с электрическим сканированием луча для абонентских

терминалов систем спутникового широкополосного доступа в Ku- и Ka-диапазонах.

ТРЕБОВАНИЯ К СКАНИРУЮЩИМ АНТЕННАМ АБОНЕНТСКИХ ТЕРМИНАЛОВ И ИХ АНАЛИЗ

К сканирующим антеннам абонентских терминалов, планируемых для применения в системах LEO/MEO-HTS, а также при их установке на подвижных средствах для работы через спутники GEO-HTS, предъявляются следующие требования:

- сектор сканирования по углу места до $\pm 75-80^\circ$, а по азимуту до 360° в зависимости от числа спутников в группировке и их орбит;
- коэффициент усиления в пределах 30–40 дБи, но достаточный для обеспечения бюджета радиосвязи;
- низкий профиль конструкции (единицы сантиметров);
- высокая надежность, удобство эксплуатации и соответствие климатическим требованиям;
- быстрое перенацеливание луча или наличие двух или более независимо сканирующих лучей;
- низкая стоимость (целевые значения 100–300 долл. [8]).

Очевидно, что низкий профиль конструкции может быть достигнут при использовании плоских антенных решеток с электрическим сканированием луча типа ФАР/АФАР (FPA). Но решение традиционной задачи антенной техники – обеспечение широкоугольного сканирования луча – порождает проблемы, которые в итоге не позволяют выполнить требование низкой стоимости такой антенны, приемлемой на массовом рынке. Анализ этой ситуации применительно к системам широкополосного доступа на основе многоспутниковых группировок сегодня особенно актуален, поскольку количество проектов LEO/MEO/NEO-HTS растет, в том числе такие проекты заявлены и в России (например, проекты "Эфир" (АО РКС), "Скиф" (АО "Зонд-Холдинг"), "Экспресс РВ" (ГПКС)).

Связь между количеством спутников в группировке N (при условии их "равномерного" распределения по орбитам) и требуемым сектором сканирования луча абонентского терминала $2\theta_c$ для спутников LEO-HTS [4] приведена на рис.2 для высоты круговой орбиты 600 и 1200 км.

При больших N требуемый сектор сканирования $2\theta_c$ (в радианах) может быть оценен с помощью формулы:

$$\theta_c \approx 2\sqrt{2} \frac{R_3 + H}{H} \frac{1}{\sqrt{N}}, \quad (1)$$



Рис.2. Связь числа спутников в группировке N и требуемого сектора сканирования абонентского терминала

где R_3 – радиус Земли, H – высота спутника над поверхностью Земли. *Примечание:* погрешность расчета θ_c по формуле (1) составляет 13% при $N=648$, $H=1200$ км и растет при уменьшении N . Погрешность расчета N с помощью (1) при $\theta_c = 35^\circ$ и $H=1200$ км составляет 27% и растет с увеличением θ_c .

В данном случае требуется установить взаимосвязь между требованием к сектору сканирования луча антенны и ее ценовыми параметрами. Себестоимость C_A сканирующей антенной решетки может быть определена как:

$$C_A = C_0 + C_k \times M, \quad (2)$$

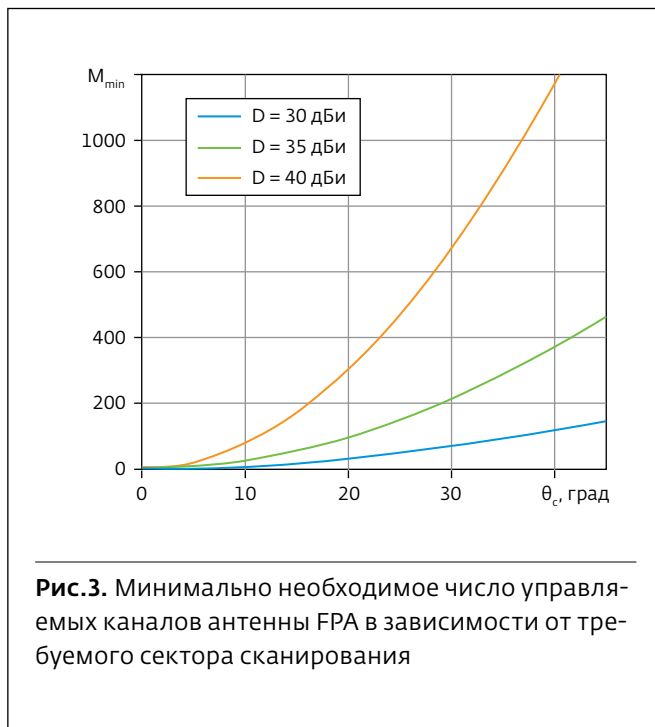
где C_0 – стоимость общей аппаратуры антенной решетки и ее конструкции, M – число управляемых каналов решетки, C_k – стоимость одного управляемого канала решетки.

Минимальное число управляемых каналов решетки M_{\min} зависит от ее направленности и сектора электрического сканирования антенны $2\theta_c$. Число M_{\min} определяется соотношением [14]:

$$M_{\min} \approx \Omega / (\Delta\theta_x \times \Delta\theta_y) \quad (3)$$

или эквивалентным ему соотношением [15]:

$$M_{\min} = \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} D(\theta, \phi) d\Omega \approx \frac{\Omega \times D_{\text{med}}}{4\pi}, \quad (4)$$



где Ω – телесный угол, занимаемый сектором сканирования (в стерadiansах), $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y$ – ширина луча в главных плоскостях, $D(\theta, \phi)$ – коэффициент направленного действия антенны (КНД) как функция угла отклонения луча, D_{med} – среднее значение КНД в секторе сканирования (в линейных единицах), которое находится в пределах между D_{\min} (КНД на границе сектора сканирования) и D_{\max} (максимальный КНД антенны).

Для оценки минимального числа управляемых элементов при требовании получить заданное усиление антенны для центрального (неотклоненного) луча следует принять D_{\max} . При этом уровень снижения усиления при сканировании луча $D_{\max} - D_{\min}$ будет определяться диаграммой направленности отдельного излучателя решетки.

Соотношения (2) и (3) справедливы для сектора Ω произвольной формы. Если этот сектор представляет собой круговой конус с углом при вершине $2\theta_c$ (рис.2), то

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos\theta_c). \quad (5)$$

На рис.3 представлены зависимости минимально необходимого количества управляемых каналов (излучателей) решетки от максимального угла отклонения луча в секторе θ_c для трех типичных значений КНД антенны.

Подставляя в (4) соотношения (1) и (5), получим оценку для минимально необходимого числа

управляемых каналов ФАР абонентского терминала с КНД D в зависимости от количества спутников $N \gg 1$ в группировке (применительно к LEO-HTS) и их радиуса орбиты:

$$M_{\min} \approx 2 \times \left(\frac{R_3 + H}{H} \right)^2 \times \frac{D}{N}, \quad (6)$$

где $D = \max D(\theta, \phi)$ – максимальный КНД в секторе сканирования.

Ориентируясь на данные табл.1 (применительно к системам LEO/MEO-HTS), можно выполнить экспресс-оценку требуемого значения M_{\min} в случае известного КНД антенны, или решить обратную задачу, то есть определить максимально возможный КНД антенны для заданной цены одного управляемого канала при известном их числе M_{\min} .

Анализ данных рис.2 и 3 и оценочных соотношений (1) и (6) показывает, что антенная решетка с электрическим сканированием может стоить сотни долларов, как требует ситуация на рынке, лишь при условии, если один канал решетки будет стоить менее одного доллара. При этом спутниковая группировка системы LEO-HTS должна состоять из тысяч космических аппаратов.

В [16] показано, что в системах НЕО-HTS космический сегмент обладает свойствами квазигеостационарности, и можно применить абонентские терминалы с одномерным электрическим сканированием и, следовательно, малым числом управляемых каналов. Там же представлен пример антенны с КНД $D = 38$ дБи и одномерным сканированием луча в секторе $\theta_c = \pm 6^\circ$. Для такой антенны требуется $M_{\min} = 12$ управляемых каналов. Антенны могут быть выполнены на основе ФАР с одномерным сканированием или на основе гибридных зеркальных антенн с одномерными облучающими ФАР [17–19].

Таким образом, анализ закономерностей физической реализуемости антенн с эклектическим сканированием показывает, что достижение ценового диапазона в 100–300 долл. возможно, но только для систем НЕО-HTS.

Обратим внимание, что соотношения (3), (4), (6) указывают минимально необходимое количество управляемых каналов. При практической реализации антенн это число может быть существенно больше.

ПРИМЕРЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПЛОСКИХ АНТЕНН С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СКАНИРОВАНИЕМ ТИПА ФАР

История создания классических ФАР с ферритовыми и полупроводниковыми фазовращателями

Таблица 2а. Параметры антенны KuWay-1 на передачу, заявленные в описательной части лицензии FCC

Параметр	Значение	Примечание авторов статьи
Подводимая мощность, Вт	25	Полное потребление терминала 500–600 Вт
Коэффициент усиления, дБи	32.9	Эквивалентно зеркальной антенне диаметром 37 см с КИП = 0,6
Диаметр антенны, см	70	Эквивалентный физический размер
Рабочая частота, ГГц	14,5	Линия "Земля – Космос"
Полный КИП антенны (неотклоненный луч)	0,172	Примерно в 4 раза ниже, чем в зеркальной антенне диаметром 70 см
Коэффициент редукции КИП при отклонении луча на край сектора сканирования $\pm 75^\circ$	0,151	На границе сканирования усиление снижается на $10\lg(0,151) = -8\text{дБ}$

Таблица 2б. Сводка параметров антенны KuWay-1 из формы FCC Form 488 (file SES-LIC-20170223-00195)

Параметр (максимальные значения)	Значение
Диапазон частот приема, ГГц	10,95–11,2 11,45–11,7 11,7–12,2
Диапазон частот передачи, ГГц	14,0–14,5
Эквивалентный диаметр, м	0,7
Усиление в максимуме на прием, дБи: 12,20 ГГц 11,45 ГГц 10,95 ГГц	32,8 32,3 26,5
Усиление в максимуме на передачу, дБи: 14,0 ГГц 14,5 ГГц	32,4 33,0
Передатчик, Вт на входе антенны	8
ЭИИМ максимум, дБВт	43
Класс излучения, передача	От 611KG1D до 6M96G1D
Класс излучения, прием	1M50G1D и 36M0G1D

в последние полвека показывает, что стоимость таких фазовращателей, несмотря на отработку технологий крупносерийного производства для РЛС, так и не стала меньше десятков и даже сотен долларов США [20]. Стоимость каналов модулей классических АФАР (brick), как правило, составляет единицы тысяч долларов США [20]. Прямое применение такой технологии не приведет к созданию дешевых абонентских антенн FPA для систем спутниковой связи в Ku- и Ka-диапазонах.

Kymeta. Современные разработки FPA идут по пути поиска новых технических решений. Так, компания Kymeta Corp. (США) в период с 2012 по 2018 год разработала и заявила о серийном производстве планарной сканирующей антенны. Инвестиции в проект за эти годы составили примерно 220 млн долл. США. Технические описания антенны в открытой литературе отсутствуют. Имеющаяся на сайте компании информация носит рекламный характер. В ряде обзорных публикаций обсуждаются возможные

технические решения, примененные в антенне [21–23]. Анализ этих отрывочных сведений позволяет предположить, что антенна представляет собой пассивную плоскую решетку, например, на основе волноводов с резонансными щелями в широких стенках волноводов. По-видимому, для управления лучом свойства излучения резонансных щелей регулируются жидкокристаллическими ключами. Эти ключи обеспечивают открытие на излучение тех щелей, фазы возбуждения которых соответствуют формированию плоской волны в заданном направлении. При этом имеется возможность и управления фазой излучения каждой щели за счет изменения диэлектрической проницаемости жидкокристаллического диэлектрика (определяется подводимым электрическим потенциалом) в области каждой такой щели. Соответственно, для управления такой антенной решеткой необходим достаточно мощный процессор. Какие технические решения применены компанией в окончательной версии антенны – неизвестно. В 2015 году

компания Kymeta заключила соглашение с компанией Sharp с целью апробирования технологии LDC-мониторов для производства антенн FPA.

Антенна названа словом mTenna, чтобы отразить принципиальную новизну продукта. Действительно, в отличие от обычных ФАР/АФАР, число потенциальных (закрытых и открытых) излучающих элементов в антенне значительно больше минимально необходимого числа (4), расстояния между ними существенно меньше $\lambda/2$.

Факт выдачи лицензии FCC США [24] свидетельствует о том, что боковое излучение антенны и уровень кросс-поляризации, по-видимому, не соответствуют нормам FCC, что косвенно подтверждается в [21]. Технические характеристики антенны, приведенные в [24, 27] (табл.2а и 2б), весьма посредственные. Как следует из табл.2а, полный КИП антенны составляет всего 0,17 без сканирования (примерно в четыре раза ниже, чем у типичной зеркальной антенны), то есть внутренние диссипативные потери составляют примерно 6 дБ (экспертная оценка). По-видимому, такой низкий КИП может быть результатом совмещения в решетке диапазонов приема и передачи, управления ориентацией плоскости поляризации и применения жидкокристаллической пленки, которая имеет высокие диссипативные потери [25], что усугубляется нанесенными тонкопленочными транзисторами (TFT). Но по каналу приема в рекламных материалах (сеть KALO, антенна Kuway u7) заявлено значение $\max G/T = 9,5$ дБ/К при усилении 33 дБи. Соответственно, T шума примерно 224 К, что существенно ниже 865 К (соответствует величине тепловых потерь 6 дБ). Отметим, что в предыдущей экспериментальной лицензии для работы через спутники "Ямал 300К" указана ширина диаграммы направленности по приему 2° (соответствует КНД зеркальной антенны примерно 39 дБи), по передаче $1,75^\circ$ (соответствует КНД зеркальной антенны примерно 40 дБи). Это подтверждает очень низкий КИП, указанный в табл.2а, и не стыкуется с рекламными данными для антенны Kuway u7, поскольку получается оценка $T_{ш} = 891$ К.

Технические параметры новой модификации антенны (KuWay u7) в основном повторяют данные, приведенные в таблицах. Дополнительно указана скорость автосопровождения (tracking), она относительно невысока – $20^\circ/\text{с}$, что, по-видимому, обусловлено большим временем переключения луча, определяемым временем переориентации длинных молекул жидкокристаллического диэлектрика под воздействием электрического

потенциала. Ограничением является и эксплуатационная температура, которая заявлена в диапазоне от -25°C до 55°C .

В марте 2019 года стоимость абонентского терминала KyWay с модемом iDirect заявлена 36150 долл. [26]. В ноябре 2018 года стоимость антенны составляла 33 тыс. долл. Отметим, что в 2013 году компания Kymeta заявляла о выходе на рынок в 2015-м при цене антенны 5–6,5 тыс. долл. США.

Alcan Systems. В этом же направлении работает компания Alcan Systems GmbH (ФРГ), которая заявила о планах создания приемной антенны для спутникового ТВ с электрическим сканированием луча с использованием свойств жидких кристаллов. В 2018 году компания получила на эти работы 9 млн долл. инвестиций. Компания проводит работы в сотрудничестве с фирмой Philips, имеющей заводы по производству жидкокристаллических дисплеев. Технические описания антенны в литературе отсутствуют. Компанией заявлено, что в перспективе планируется создать сканирующие антенны для абонентских терминалов систем LEO/MEO-HTS в Ku- и Ka-диапазонах.

hiSky и SatCube. Имеются заявления ряда компаний (hiSky, SatCube) о том, что они создали абонентские терминалы с антеннами FPA для работы фиксированных абонентов со спутниками GEO-HTS и продолжают поиски приемлемых решений для создания антенн FPA с электронным сканированием луча. Пока имеются очень скудные сведения о технических решениях. Но очевидно, что скорость канала связи низкая.

ЛЭТИ. В ЛЭТИ (Санкт-Петербург) разработаны экспериментальные образцы планарных пассивных ФАР на основе нелинейных диэлектриков [28, 29], а также на основе MEMS [30], но эти образцы еще очень далеки от продукта, требуемого на рынке.

ПРИМЕРЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПЛОСКИХ АНТЕНН С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СКАНИРОВАНИЕМ ТИПА АФАР

Другим разрабатываемым классом FPA для спутниковой связи являются АФАР, то есть активные ФАР.

SatixFy. Компания SatixFy Ltd. (Израиль/Англия/Болгария) предлагает наращиваемую конструкцию АФАР из подрешеток в виде панелей, содержащих $4 \times 4 = 16$ излучателей [31, 32]. АФАР имеет цифровое диаграммоформирование. Приемо-передающие активные радиочастотные каналы 16-элементной подрешетки представляют собой 16 специализированных микросхем (ASIC) на основе сплавов кремния как для Ku-,

Таблица 3. Параметры АФАР Ku-диапазона компании Phasor

Диапазон частот приема, ГГц	10,7–12,75
Диапазон частот передачи, ГГц	14,0–14,5
Поляризация	Линейная или круговая, переключаемая
Сектор сканирования	Не указан
Мгновенная полоса, МГц	125
Точность установки луча, °	0,2
Скорость автосопровождения, °/с	200
Уровень боковых лепестков, дБ	Не хуже 29–25lgθ
Диапазон рабочих температур, °С	-55 – +85
Потребляемая мощность (6 подрешеток), Вт	500
Вес, кг	12

так и для Ka-диапазона. Микросхемы содержат усилители, преобразователи частоты вверх/вниз и приемопередатчики цифровых I/Q-сигналов. Радиочастотные выходы микросхем подключены к излучателям, а цифровые – к диаграммоформирователю (ЦДФ) подрешетки, который выполнен в виде специализированной цифровой микросхемы, формирующей до 32 независимых лучей.

В феврале 2019 года компания продемонстрировала работающий образец АФАР Ku-диапазона, состоящий из четырех подрешеток (всего 256 излучателей), формирующий лучи в секторе $\pm 45^\circ$. В марте 2019 года на сайте компании появилась информация о продажах АФАР, называемой AMBER, по индивидуальным заявкам. Сведения о характеристиках антенны и ее стоимости на сайте отсутствуют.

Phasor. Принципы, подобные SatixFy, заложены в концепции АФАР с цифровым диаграммобразованием компании Phasor Solutions Ltd. (США/Англия). Краткое техническое описание и характеристики антенны Ku-диапазона приведены на сайте компании (табл.3 и 4), а также в докладе [33]. Основными элементами антенны являются активные каналы АФАР, выполненные

Таблица 4. Параметры трех модификаций АФАР Ku-диапазона компании Phasor

Количество подрешеток в антенне, шт.	Размеры апертуры, см	Энергетические характеристики	
		G/T, дБ/К	ЭИИМ, дБВт
6	54 × 72	14,3	53,6
12	72 × 108	17,4	59,6
27	126 × 144	21,0	66,6

в виде специализированных микросхем (ASIC) фирмы Phasor. Эти микросхемы расположены на обратной стороне платы с печатными излучателями. Цифровой диаграммоформирователь также выполнен на специализированных микросхемах (ASIC), расположенных на второй (нижней) плате. Микросхемы выполнены из сплава SiGe, что потенциально позволяет обеспечить их низкую стоимость при серийном производстве.

Планируется создание абонентских терминалов для низкоорбитальной системы Kepler в Ku-диапазоне с сектором сканирования $\pm 70^\circ$. Предполагается, что абонентские терминалы будут стоить примерно 5 тыс. долл. и появятся на рынке в 2019 году. Производство антенн планируется на заводе STI Poynnton (Великобритания).

В августе 2018 года на сайте компании Phasor появилось сообщение о том, что портфель заказов компании на поставку абонентских терминалов с цифровыми АФАР для станций спутниковой связи уже превысил 300 млн долл. США. В основном это заказы министерства обороны, компаний гражданской авиации и морского флота. Информация о стоимости терминалов отсутствует.

Gilat. Компания Gilat Satellite Networks (Израиль) также разработала антенный терминал АФАР с цифровым диаграммобразованием на основе созданных для этого микросхем ASIC собственной разработки. По-видимому, концепция построения этой АФАР и ее характеристики аналогичны продукции SatixFy и Phasor. Представители компании заявляют, что созданные АФАР применяются в терминалах SOTM, используемых авиакомпаниями, государственными организациями и министерством обороны.

Isotropic. Компания Isotropic Systems (Великобритания) заявляет о предложении

принципиально новой концепции плоской антенны с электрическим сканированием в секторе $\pm 75^\circ$. Антенна имеет модификации для Ku- и Ka-диапазонов и выполнена в виде набора модулей шестиугольной формы.

В литературе отсутствуют научно-технические публикации с описаниями структуры и технических характеристик этой антенны. В рекламной статье, помещенной на сайте компании, утверждается, что разработка антенны совершит революцию на рынке спутниковой связи. Подчеркивается, что в антенне применен оптический диаграммоформирователь, обеспечивающий ее широкополосность, которая больше, чем у известных ФАР и других сканирующих FPA. Кроме того, утверждается, что антенна дешевле на 70–95% по сравнению с аналогами и имеет энергопотребление на 90% ниже. Масштабируемость за счет модульной конструкции позволяет создавать антенны разных размеров. На сайте компании указано, что разработанная технология позволит серийно производить 10^4 – 10^5 антенных терминалов в год при стоимости 300–400 долл. США.

КРАТКИЕ ИТОГИ

Исходя из эксплуатационных условий, очевидно, что наиболее приемлемым вариантом реализации антенн абонентских терминалов систем GEO-HTS и LEO/MEO/NEO-HTS являются плоские антенны с электрическим сканированием луча типа ФАР/АФАР. Создание таких антенн для систем спутникового широкополосного доступа в Ku- и Ka-диапазонах, которые одновременно сочетали бы в себе требуемые технические параметры и ценовые параметры, приемлемые на массовом рынке, является ключевой задачей. Без решения этой задачи коммерциализация любой из заявленных сегодня многоспутниковых систем не может быть достигнута. Это утверждение подтверждается историей развития подобных многоспутниковых систем, например, таких как Teledesic, Skybridge и др. [12, 13, 35].

Анализ рынка показывает, что потребность в таких сканирующих антеннах типа FPA сегодня очень высока. Уже начались запуски спутников системы OneWeb, но ценовая проблема антенн абонентских терминалов не решена. По косвенным сведениям, нет окончательной ясности и технического решения, что следует из запросов FCC. Причем, как показано выше, варианты антенн FPA с электрическим сканированием для создания компактных низкопрофильных абонентских терминалов известны уже давно,

и разработчики разных западных компаний продолжают их совершенствовать. Преградой выхода на рынок стала уже не их техническая реализуемость, а цена.

Представленный в статье анализ показывает, что существуют физические ограничения достижения ценового диапазона абонентских терминалов 100–300 долл. США (на основе этого ценового диапазона были сформированы бизнес-планы OneWeb, SpaceX и др.).

На состоявшейся в октябре 2018 года конференции по новым направлениям спутниковой связи было организовано обсуждение перспектив снижения стоимости абонентских терминалов с плоскими сканирующими антеннами [34]. В этой дискуссии приняли участие руководители девяти ведущих компаний, занимающихся разработкой и производством таких антенн. Шестеро из них считают нереальным в обозримой перспективе создание сканирующих FPA стоимостью 100–300 долл. Трое респондентов (руководители компаний Alcan, Isotropic и Kymeta) заявили, что цены менее 1000 долл. и даже менее 700 долл. за антенный терминал будут достигнуты в ближайшие несколько лет. Правда, они не аргументировали свои обещания и не объяснили, почему такие же прогнозы, сделанные 5–7 лет назад, так и не сбылись. По-видимому, решение этой задачи – перспектива отдаленного будущего. Этот вывод подтверждают и прогнозы компании NSR [7]. В соответствии с ними, средняя стоимость терминала с FPA в 2028 году снизится до 7,5 тыс. долл. США. Конечно, нельзя исключать возможность появления прорывного решения – и в этом случае развитие рынка будет скачкообразным, а не плавным. Но пока нет оснований для прогноза такого скачка.

В России скоординированное целенаправленное финансирование разработок абонентских терминалов со сканирующими плоскими антеннами для связи через спутники GEO-HTS (для связи в движении SOTM) и LEO/MEO/NEO-HTS не ведутся. Известны отдельные попытки решить эту задачу для связи в движении SOTM (например, активно исследует этот вопрос компания "Небо ГК"), но практических решений пока не представлено. В связи с этим планы создания отечественных систем широкополосной связи на основе негеостационарных спутниковых группировок типа LEO/MEO-HTS в Ku-, Ka-, Q/V-диапазонах представляются весьма рискованными, даже при ориентации на применение импортных абонентских терминалов.

Результаты анализа показывают, что решение задачи достижения приемлемых ценовых показателей абонентских терминалов возможно для систем типа НЕО-НТС, поскольку построение космических группировок дает возможность создать в северных широтах эффект квазигеостационарности и обеспечить работу абонентских терминалов при высоких углах места. Это свойство, в свою очередь, позволяет принципиально уменьшить требуемый сектор сканирования луча и, соответственно, сократить число управляемых элементов сканирующей решетки, а в пределах для фиксированных абонентов использовать антенны без сканирования луча.

В качестве задела для решения этой задачи могут рассматриваться различные варианты, в том числе плоские пассивные [28–30] и активные ФАР, разработанные в последние годы с использованием модулей, имеющих архитектуру brick [36, 37], но с адаптацией для применения в связанных системах.

Результаты исследований, представленные в статье, позволяют выполнить объективный экспресс-анализ реализуемости антенн с электрическим сканированием луча и их достижимых

ценовых показателей при использовании в составе абонентских терминалов систем GEO-НТС и LEO/MEO/NEO-НТС.

Авторы благодарны Козыреву А.Б., Урличичу Ю.М., Эйдусу А.Г. за предоставленные материалы и полезные обсуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (договор № 03.G25.31.0269) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218 "О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства".

ЛИТЕРАТУРА

1. Анпилов В.Р., Шишлов А.В., Эйдус А.Г. Многолучевые антенные системы НТС // Технологии и средства связи. 2013. № 6–2. С. 54–67.
2. Борисов С.Н., Денисенко В.В., Левитан Б.А., Шишлов А.В. Антенны для широкополосной спутниковой связи на движущемся транспорте. Аналитический обзор // Радиотехника. 2015. № 10. С. 17–32.

3. Анпилогов В., Фуркан М., Донианц В., Эй-дус А., Шестаков А., Кулк К. Многоспутниковые системы LEO-HTS: "подрывная инновация" в области спутниковой связи или мыльный пузырь? // Технологии и средства связи. 2015. № 6-2, специальный выпуск "Спутниковая связь и вещание – 2016". С. 32-36.
4. Анпилогов В.Р., Шишлов А.В., Эйдуc А.Г. Анализ систем LEO-HTS и реализуемости фазированных антенных решеток для абонентских терминалов // Технологии и средства связи. 2015. № 6-2, специальный выпуск "Спутниковая связь и вещание – 2016". С. 14-26.
5. Локшин Б. "Экспресс-РВ" – перспективная система связи со спутниками на высокоэллиптических орбитах // Специальный выпуск "Спутниковая связь и вещание – 2019". Изд-во "Гротек", ISBN 978-590-1061-077. С. 62-71.
6. Камнев Е., Гриценко А., Анпилогов В. Системы широкополосного доступа на основе высокоэллиптических спутников: российские проекты // Специальный выпуск "Спутниковая связь и вещание – 2019". Изд-во "Гротек", ISBN 978-590-1061-077. С. 72-75.
7. Flat Panel Satellite Antennas, 4th edition. Northern Sky Research. Published: February 2019 // <https://www.nsr.com/research/flat-panel-satellite-antennas-4th-edition/>
8. Caleb Henry. Wyler claims breakthrough in low-cost antenna for OneWeb, other satellite system // Space News. January 25, 2019. <https://spacenews.com/wyler-claims-breakthrough-in-low-cost-antenna-for-oneweb-other-satellite-systems/>
9. OneWeb. Experimental License Application Narrative Statement // OET File № 0111-ex-cn-2018, OneWeb, 2018.
10. Анпилогов В.Р. Эффективность низкоорбитальных систем спутниковой связи на основе малых космических аппаратов // Технологии и средства связи. 2015. № 4. С. 62-67.
11. Урличич Ю.М. Высокоинформативные системы связи и вещания HTS и LEO/MEO-HTS: бумажные проекты или прорывное направление космической индустрии // Технологии и средства связи. 2016. № 6-2, специальный выпуск "Спутниковая связь и вещание – 2017". С. 44-48.
12. Анпилогов В.Р. Сверхинформативные системы спутниковой связи XXI века // Технологии и средства связи. 1998. № 6. С. 74-80.
13. Анпилогов В.Р. Система спутниковой связи и передачи данных TELEDISIC – глобальные планы // Broadcasting. 2001. № 4.
14. Вендик О.Г. Синтез линейки излучателей с немеханическим качением луча // Известия ВУЗов. Радиотехника. 1960. Т. 3. № 1. С. 77-86.
15. Конторович М.И., Петрунькин В.Ю. О наименьшем числе элементов в антенне с электрическим качением луча // Радиотехника и электроника. 1961. Т. 6. № 12. С. 1982-1988.
16. Анпилогов В., Гриценко А., Зимин И., Чекушкин В. Результаты анализа совместной работы систем OneWeb и "Экспресс-РВ" в Ku-диапазоне // Специальный выпуск "Спутниковая связь и вещание 2019". Издательство Гротек, ISBN 978-590-1061-077. С. 48-54.
17. Reutov A.S., Shishlov A.V. Focuser-Based Hybrid Antennas For One-Dimensional Beam Steering // Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology, Dana Point, California 2000, P. 411-414.
18. Реутов А.С., Шишлов А.В. Конструктивный синтез и оценки эффективности гибридных зеркальных антенн с профилированными рефлекторами // Антенны. 2005. Вып. 1. С. 63-67.
19. Jung Y., Eom S., Jeon S., Shishlov A.V., Kim C. Novel Hybrid Antenna Design having A Shaped Reflector for Mobile Satellite Communication Applications // 2010 IEEE Antennas and Propagation International Symposium. P. 1-4.
20. Толкачев А.А., Егоров Е.Н., Шишлов А.В. О некоторых тенденциях развития радиолокационных и связных систем // Радиотехника. 2006. № 4. С. 5-11.
21. Johnson M.C., Brunton S.L., Kundtz N.B., and Kutz J.N. Sidelobe canceling for reconfigurable holographic metamaterial antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, no. 4, part 2. P. 1881-1886. 2015. View at Publisher · View at Google Scholar · View at MathSciNet.
22. Brookner E. Metamaterial Advances for Radar and Communications // Microwave Journal. November 2016. P. 22-42.
23. Hindle P. Antenna Technologies for the Future // Microwave Journal. October 2018. P. 16-21.
24. Federal Communication Commission. FCC Selected Application. Report WR07 // File number: FCC SES-LIC-20170223-00195.
25. Анпилогов В., Зимин И., Чекушкин В. Диссипативные потери в микрополосковых линиях и микрополосковых антеннах // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. Т. 5. Вып. 3. С. 60-69.
26. Kymeta: The Future of VSAT is Flat. Электронный ресурс <https://www.satphonestore.com/tech-browsing/vsat-satellite-internet-land-sea-157/kymeta>.

- html, <https://www.satphonestore.com/application-browsing/satellite-internet-89/satellite-internet-marine/satellite-internet-marine-large-craft/kymeta-mntenna-flat-panel-vsatsystem.html>
27. Federal Communication Comission, Radio Station Authorozation. Электронный ресурс https://licensing.fcc.gov/cgi-bin/ws.exe/prod/ib/forms/attachment_menu.htm?id_app_num=110963&acct=60079&id_form_num=13&filing_key=-292632
 28. Вендик О.Г., Козырев А.Б. Применение сегнето-электриков в антеннах с электрическим сканированием // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2005. Вып 1. С. 20-23.
 29. Алтынников А.Г., Козырев А.Б., Котельников И.В. Дефлекторное устройство для электромагнитного излучения (варианты) // Патент РФ, № 2526770, 27.08.2014 г.
 30. Косьмин Д.М., Котельников И.В., Осадчий В.Н., Лучинин В.В., Козырев А.Б. Фазовращатели для связанных фазированных антенных решеток диапазона частот 2 ÷ 30 ГГц // VIII Всероссийская научно-техническая конференция "Электроника и микроэлектроника СВЧ". 2012. Сборник трудов. Электронный ресурс <http://mwelectronics.ru/>
 31. Rainish D., Freedman A. Low Cost Digital Beamforming Array Structure and Architecture // 22nd Ka and Broadband Communications Conference, Cleveland, Ohio, October 17-20, 2016.
 32. Rainish D., Freedman A. DBF ASIC Measurements and Application // 24th Ka and Broadband Communications Conference / 36th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC), Niagara Falls, Canada, October 15-18, 2018.
 33. Mayo R., Harmer S. A Cost-Effective Modular Phased Array // 2013 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. P. 93-96
 34. Henry C. Satellite Antenna Companies divided on Near-Term feasibility of Cheap Flat Panels // Space News. October 24, 2018. Электронный ресурс <https://spacenews.com/satellite-antenna-companies-divided-on-near-term-feasibility-of-cheap-flat-panels>
 35. Farrar T., ViaSatellite, 25.03.2015, LEO-HTS: Once again, a Distraction. Электронный ресурс <http://interactive.satellitetoday.com/leo-hts-once-again-a-distraction/>
 36. Антенны и радары с электронным управлением лучом // Под ред. А.И.Синани, Г.В.Кауфмана. – М.: Радиотехника, 2016.
 37. Технологии радиолокации / Под ред. Б.А.Левитана; 2-е изд. – М.: Вече, 2015.