

Представлены оценки требуемой “мощности” орбитальной группировки низкоорбитальной системы широкополосного доступа, при которой не нужно применять абонентские терминалы со сканированием луча или его угловое сканирование ограничено. Показано, что за счет увеличения “мощности” орбитальной группировки можно принципиально снизить себестоимость АФАР абонентских терминалов.

Сколько спутников нужно в составе орбитальной группировки низкоорбитальной системы широкополосного доступа?



Валентин Анпилов

Заместитель генерального директора ЗАО “ВИСАТ-ТЕЛ”, к.т.н., доцент

В ряде статей показано [1–5], что ключевой проблемой коммерциализации низкоорбитальных систем широкополосного доступа (ШПД) является создание абонентских терминалов (АТ), приемлемых по ценовым и эксплуатационным параметрам для массового рынка. В финансовых моделях существующих низкоорбитальных систем Starlink и OneWeb цена АТ определена как \$150–300. В частности, в [6] приведены результаты анализа коммерциализации Starlink, выполненного Morgan Stanley, которые показывают, что только при цене \$150 может быть достигнута окупаемость затрат в 2030 г. Сегодня АТ для систем Starlink продаются примерно в диапазоне от \$400 до \$600, а их себестоимость существенно выше (наша оценка на порядок выше, то есть субсидия на



Андрей Гриценко

Генеральный директор АО “Информационный Космический Центр “Северная Корона”, к.т.н.

каждый АТ до \$5000). Причем за счет серийности производства АТ эту задачу решить не получится [5]. Задача достижения цены АТ в \$150–\$300 может быть решена двумя путями. Первый путь связан с поиском новых физических принципов построения АФАР или ФАР. Но пока не удалось найти такие решения [5–7]. Второй путь нетрадиционный и предусматривает высокую “мощность” орбитальной группировки (ОГ) [8–11], то есть ее наращивание до уровня, при котором не нужно сканировать лучом антенны АТ, а можно применить АТ типа VSAT. Стоимость VSAT сегодня примерно \$200–\$300 и даже ниже. Действительно, если в составе ОГ множество спутников и в любом направлении луча АТ всегда имеется хотя бы один спутник в пределах ширины ДН луча, то задача решена, поскольку сканировать лучом

АТ не нужно. Но возможно иметь и меньшее число спутников в составе ОГ, задав углы сканирования луча АТ в небольших пределах. Можно предположить, что по этому пути и развивается система Starlink, запланировав в составе ОГ примерно 42 000 спутников. В новой (Phase 2) модификации OneWeb запланировано почти 48 000 спутников.

Принимая во внимание, что заявляемые высоты орбит всех низкоорбитальных систем ШПД менее 1200 км, уже не требуется применять радиационно стойкую ЭКБ, а производство таких спутников может быть поставлено на поток. Соответственно, и их себестоимость получается низкая (по некоторым оценкам, не выше \$500 000 для КА Starlink). При этом выход из строя 10–30% спутников не приведет к фатальному результату непредоставления услуги.

Более того, новые подходы к групповым запускам низкоорбитальных спутников [8–11] позволяют в разы снизить и стоимость спутника на орбите (по нашей оценке, стоимость пусковых услуг составит примерно \$200 000–250 000 в расчете на одни КА) при запуске тяжелой PH Starship по отношению к традиционным способам.

Число спутников в ОГ, при котором не нужно сканировать лучом антенны АТ или угол сканирования ограничен

В нулевом приближении может быть выполнена оценка на основе



Требуемое число КА в составе орбитальной группировки для исключения необходимости сканирования лучом антенны АТ

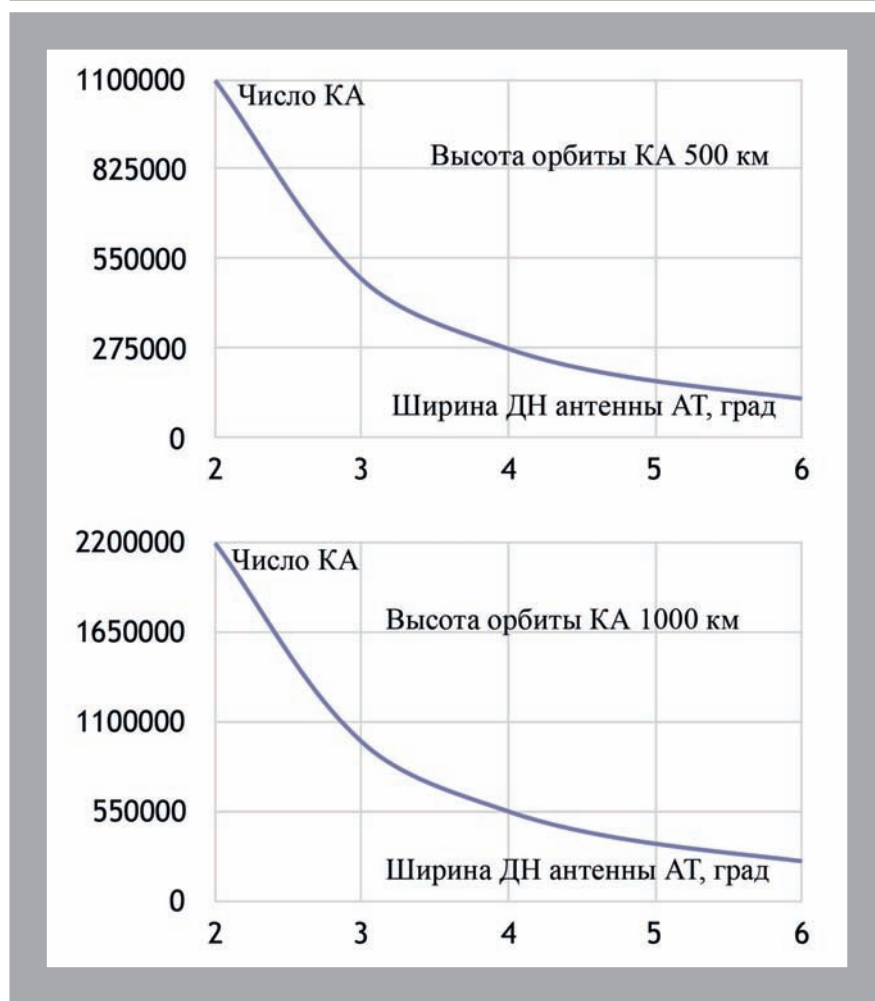


Рис. 1

простых геометрических соотношений, а именно следует определить площадь поверхности сферы, радиус которой равен высоте орбиты от центра Земли, и разделить ее на площадь основания конуса луча, угол которого при вершине равен ширине ДН антенны АТ. Это значение, увеличенное на плотность упаковки в гексагональной сетке (примерно $1/0,74$), и даст нулевое приближение требуемого числа спутников в составе ОГ. Причем предполагается, что АТ может быть расположен в любой географической точке. Применительно к полярным орбитам результат показан на рис. 1 и 2. Если принять типовую ширину ДН (3,50) для антенны абонентского терминала, то получим абсурдное число спутников, не менее 400 000, то есть в 10 раз больше запланированного количества в Starlink или OneWeb (Phase 2).

Можно ограничить угол сканирования луча АТ, тогда спутников нужно будет существенно меньше (рис. 2). При ограничении сектора сканирования ± 5 град уже потребуется примерно 40 000 спутников.

Количество КА в составе полярной ОГ (высота орбиты 500 км) для исключения необходимости сканирования лучом антенны АТ

Ширина луча АТ, град	Диаметр зоны обслуживания КА, км	Число плоскостей для обслуживания экваториальной зоны	Число плоскостей для формирования сотовой структуры	Число КА в одной плоскости	Число КА в ОГ
6	48,6	825	1650	412	679 800
5	40,5	990	1980	495	980 100
4	32,4	1237	2474	818	2 023 732
3	24,3	1649	3298	824	2 717 552
2	16,2	2474	4948	1237	6 120 676
1	8,1	4947	9894	2473	24 467 862

Таблица 1

Результаты имитационного моделирования

Имитационное моделирование на основе программного комплекса “Альбатрос” позволяет решать многие аналитические задачи, в том числе обеспечить оценку требуемого числа спутников в ОГ, при котором АТ не придется выполнять процедуру поиска и сопровождения, так как в любой момент времени в диаграмме направленности луча его неподвижной антенны будет находиться хотя бы один спутник. Или можно принять заданный угол сканирования луча антенны АТ и решить ту же задачу.

Для упрощения примем, что электрическая ось антенны АТ всегда направлена в зенит. Для этого случая можно показать (см. рис. 3), что спутник будет находиться в луче антенны, если угол места на него из точки положения АТ составит не менее $90 \text{ град} - \Theta/2$, где Θ — ширина диаграммы направленности АТ по уровню половинной мощности (град).

Одношелонная полярная орбитальная группировка

Если космический сегмент представлен одношелонной орбитальной группировкой и предполагается глобальное обслуживание, то это означает, что:

- используются полярные орбиты;
- расстановка плоскостей орбит осуществляется на дуге 180 град.

Наиболее проблемный участок — это экваториальная зона, поскольку для его непрерывного обслуживания, например, при использовании антенны АТ с шириной луча 6 град

80 Зависимость между числом КА в составе орбитальной группировки и требуемым полным углом сканирования лучом антенны АТ

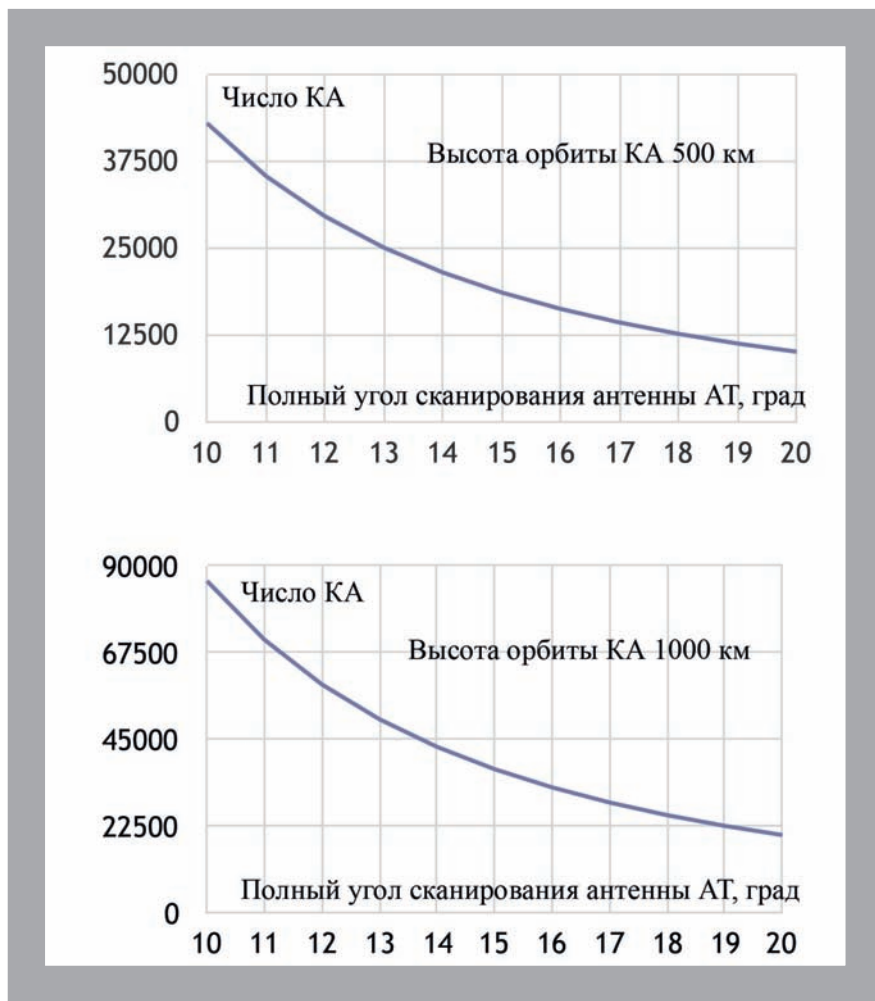


Рис. 2

потребуется 825 плоскостей. Этот пример иллюстрируется на рис. 4. Для формирования гексагональной структуры число плоскостей придется удвоить. При этом в каждой плоскости должно быть число спутников, равное половине числа спутников над экватором.

Результаты моделирования для разных значений ширины ДН луча антенны АТ представлены в табл. 1. Полученные значения отличаются от данных рис. 1, к сожалению, в большую сторону. Но в целом результаты имитационного моделирования подтверждают результаты нулевого приближения.

Очевидно, что проекты, предусматривающие “сверхмощные” орбитальные группировки, то есть образованные из спутников в количестве от сотен тысяч до двух десятков миллионов, не реализуемы ни технически, ни финансово. Тупи-

ковым становится и решение вопросов обеспечения безопасности, в том числе исключения физического столкновения спутников эшелона.

Одноэшелонная наклонная орбитальная группировка

В данном случае предполагается, что используется эффект пространственной “концентрации” спутников на широте, численно равной наклонению орбиты. В этом случае число спутников в ОГ должно быть таким, чтобы та часть спутников, которая расположена на широтах, близких к наклонению орбиты, обеспечивала работу АТ без процедуры наведения и сопровождения.

В общем случае очевидно, что при использовании этого эффекта целесообразно строить многоэшелонные ОГ, где каждый эшелон отличается прежде всего наклонением орбиты. В данном случае проанализируем пример одного эшелона, развернутого на круговых орбитах высотой 500 км с наклонением 60 град. В качестве начального приближения выбрана ОГ, параметры которой представлены в табл. 2.

На рис. 5 представлены мгновенные зоны радиовидимости (кружки синего цвета) спутников на наклонных орбитах (высота 500 км, наклонение 60 град, минимальный УМ = 87 град).

То, как это будет выглядеть для АТ, размещенного на широте 65 град и 55 град, представлено на рис. 6.

Иллюстрация условия нахождения КА в луче антенны абонентской станции при ее ориентации в зенит

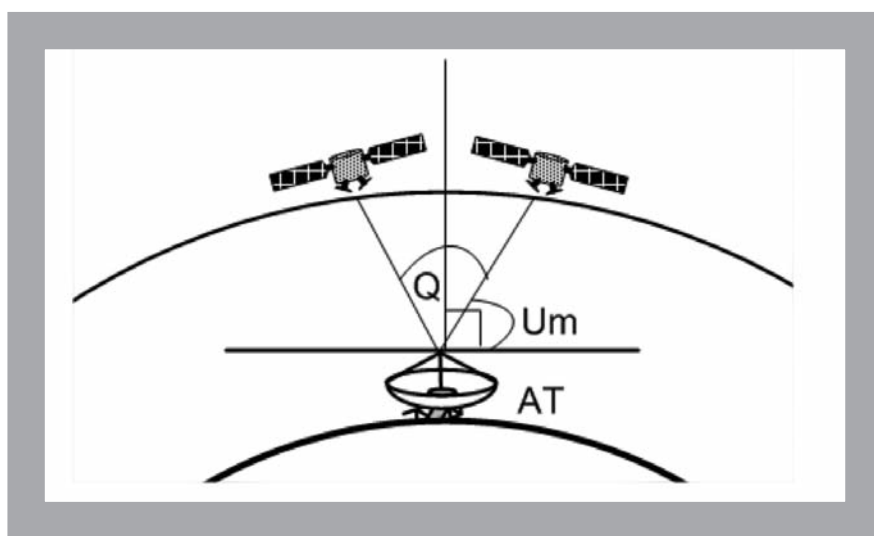


Рис. 3



Обслуживание экваториальной зоны предполагает условие непрерывного наблюдения (без сопровождения) хотя бы одного КА

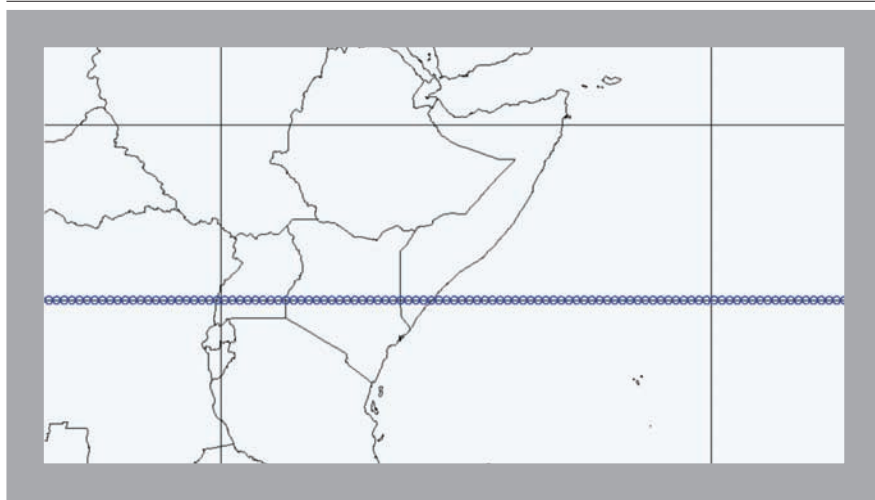


Рис. 4

Параметры орбитальной группировки

Параметр	Значение
Тип орбиты	Низкая, круговая
Высота орбиты, км	500
Наклонение, град	60
Число плоскостей	309
Число КА в плоскости	180
Всего спутников	55 620
Угол между плоскостями, град	1,165
Фазовый угол между КА в смежных плоскостях, град	1,0

Таблица 2

Из рис. 6 следует, что в любой момент времени в диаграмме направленности антенны АТ находится хотя бы один спутник.

Следовательно, для обслуживания широтной полосы в 10 град (от 55 град с.ш. 65 град с.ш.), при использовании АТ с шириной диаграммы направленности 3 град, в принципе достаточно 55 800 спутников.

В табл. 3 представлены результаты, полученные в ходе имитационного моделирования. Они показывают требуемое число спутников в ОГ с наклонной орбитой, формирующей один эшелон, при котором будет обеспечено обслуживание АТ с раз-

личным значением ДН в широтной полосе от 55 град в.д. до 65 град в.д. Естественно, при большем числе эшелонов потребуется и большее число спутников.

Отметим, что значения требуемой “мощности” ОГ примерно приближается к максимальному количеству спутников, заявленных для систем Starlink или OneWeb (при ширине ДН луча АФАР АТ в пределах 3–4 град).

Ограничение угла сканирования луча антенны АТ

Выполним оценку потребной “мощности” одноэшелонной орби-

тальной группировки, развернутой на наклонных орбитах (высота 500 км, наклонение 60 град), при различных углах сканирования лучом (шириной 3 град) антенны АТ. Результаты, полученные в ходе моделирования, представлены в табл. 4.

Зависимость себестоимости АФАР от угла сканирования луча

В [1–3] показано, что себестоимость АФАР АТ зависит от требуемого угла сканирования ($2\Theta_c$) и ширины ДН луча АФАР. Максимально реализуемый угол сканирования плоской АФАР, при котором еще сохраняются приемлемые ее радиочастотные параметры, составляет примерно не более ± 65 град, то есть $2\Theta_c = 130$ град. Снижение себестоимости АФАР достигается уменьшением требуемого угла сканирования (уменьшается число управляемых элементов). Снижение себестоимости АФАР при уменьшении угла сканирования определяется простым соотношением $\xi = (2\Theta_c / 2\Theta_{сх})^2$, где $2\Theta_{сх}$ — угол сканирования. Например, при ограничении угла сканирования в пределах ± 10 град ее себестоимость снизится примерно в 42 раза.

Заключение

Себестоимость АТ в \$150, заложенная в финансовой модели Starlink, действительно может быть достигнута, но не за счет минимизации ценовых параметров АФАР АТ, а за

Мгновенные зоны радиовидимости (кружки синего цвета) спутников группировки на наклонных орбитах (высота 500 км, наклонение 60 град, минимальный УМ = 87 град)

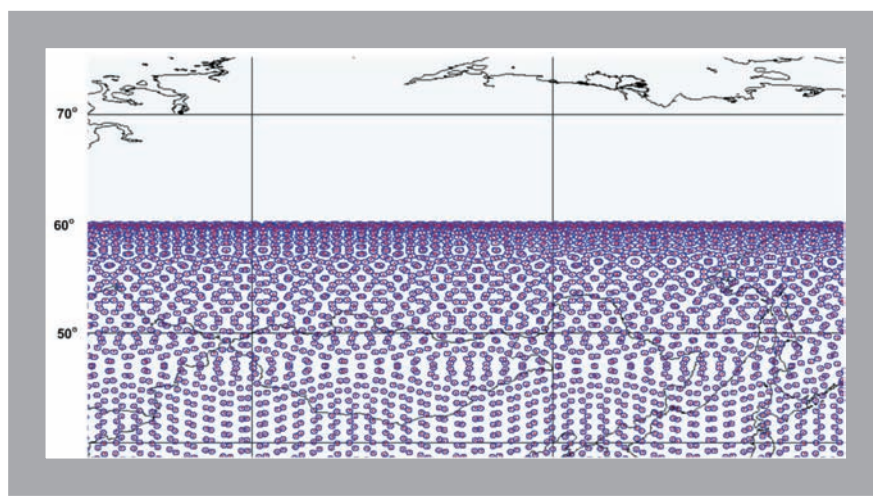


Рис. 5

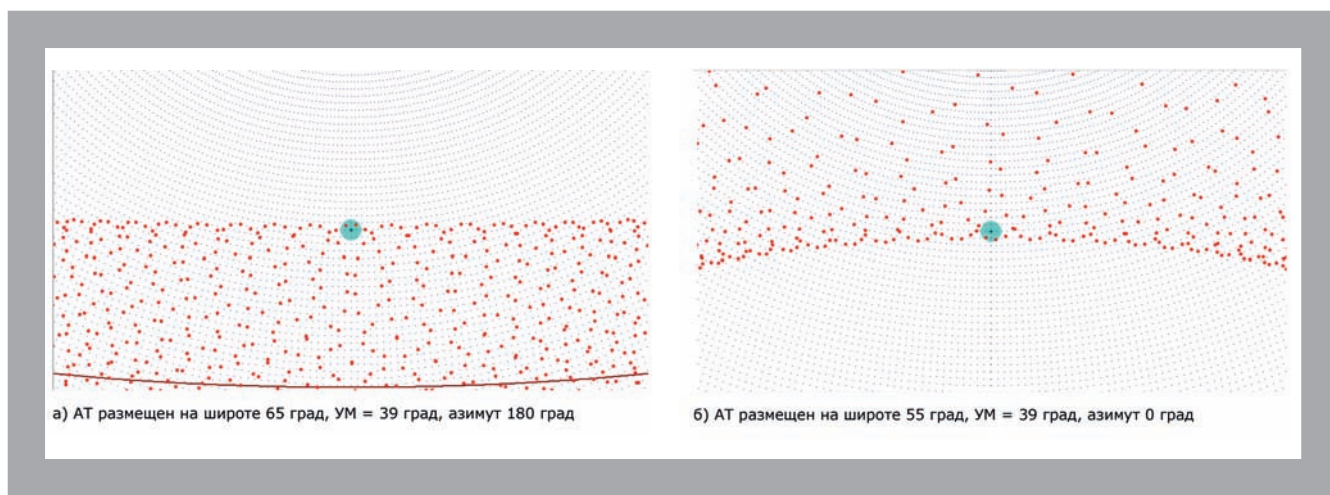


Рис. 6

Количество КА в составе наклонной ОГ (высота орбиты 500 км, наклонение 60 град), обеспечивающее исключение необходимости сканирования лучом антенны АТ

Ширина луча антенны АТ, град	Число КА в составе ОГ
6	18 000
5	22 000
4	32 000
3	55 800
2	86 000
1	320 000

Таблица 3

счет увеличения “мощности” ОГ системы до нескольких тысяч спутников для каждого из эшелонов. Но очевидно, что такое решение с позиции коммерциализации системы является абсурдным, поскольку увеличивается амортизация космического сегмента. В статье “текущие расходы” следует дополнительно учитывать потерю ценности ОГ, поскольку требуются средства для обновления ОГ (применительно к системе Starlink это примерно \$2–3 млрд в год, если принять во внимание срок службы спутника пять лет).

Литература:

1. Анпилогов В., Шишлов А., Эйбус А. Анализ систем LEO – HTS и реализуемости фазирован-

Количество КА в составе наклонной ОГ (высота орбиты 500 км, наклонение 60 град), при различных углах сканирования лучом антенны АТ

Полный угол сканирования луча (ширина 3 град) антенны АТ, град	Число КА в составе ОГ
10	12 000
12	7 600
14	5 800
16	4 700
19	3 900
20	3 200

Таблица 4

ных антенных решеток для абонентских терминалов // Технологии и средства связи. 2015. № 6. Специальный выпуск “Спутниковая связь и вещание – 2016”. С. 14–26.
 2. Анпилогов В., Пехтерев С., Шишлов А. Анализ терминалов, планируемых для применения в системах Starlink и OneWeb // Специальный выпуск “Спутниковая связь и вещание – 2022”. С. 30–36.
 3. Анпилогов В., Пехтерев С., Шишлов А. Антенная решетка абонентских терминалов Starlink // Специальный выпуск “Спутниковая связь и вещание – 2021”. С. 69–76.
 4. Анпилогов В., Денисенко В., Зимин И., Кривошеев Ю., Чекушкин Ю., Шишлов А. Проблемы соз-

дания антенн с электрическим сканированием луча для абонентских терминалов спутниковых систем связи в Ku- и Ka-диапазонах // Первая миля. 2019. № 3. С. 16–27.
 5. Урличич Ю. Легенды о Starlink // Первая миля. 2023. № 6. С. 64–71.
 6. Анпилогов В. Стагнация рынка спутниковой связи и новые проекты // Беспроводные технологии. 2021. № 1. С. 6–9 <https://wireless-e.ru/wp-content/uploads/6206.pdf>
 7. Анпилогов В. О фазированных антенных решетках Ka-диапазона на основе метаматериала // Технологии и средства связи. 2013. № 5. С. 66–67.
 8. Анпилогов В., Гриценко А. Способ построения орбитальной группировки: заявление о выдаче патента Российской Федерации на изобретение № 2022111889 от 29.04.2022 г.
 9. Анпилогов В., Гриценко А. О построении орбитальных группировок большой мощности на LEO для телекоммуникационных систем // Специальный выпуск “Спутниковая связь и вещание – 2023”. С. 48–52.
 10. Анпилогов В., Гриценко А. Пути снижения стоимости пусковых услуг при формировании многоспутниковых группировок на низких орбитах // “Спутниковая связь и вещание – 2023”. С. 80–85.
 11. Анпилогов В., Гриценко А. Оптимальные низкоорбитальные группировки // Специальный выпуск “Спутниковая связь и вещание – 2022”. С. 44–47.

