

В статье представлены результаты сопоставления полноповоротных зеркальных антенн и активных фазированных антенных решеток с электрическим сканированием луча применительно к системам спутниковой связи, основанных на негеостационарных и геостационарных спутниках. Прогнозируется долговременная востребованность полноповоротных антенных систем на рынке связи при некотором смещении традиционных областей применимости.

Поворотные антенны и АФАР – взаимовлияние, конкуренция и место на рынке



Владимир Бобков

Генеральный директор
ООО “Технологии Радиосвязи”, к.т.н.



Николай Званцов

Технический директор
ООО “Технологии Радиосвязи”, к.т.н.



Александр Бобков

Инженер
ООО “Технологии Радиосвязи”



Максим Голубов

Генеральный директор
ООО “СВВ”

Спутниковая связь – востребованная и динамично развивающаяся область человеческой деятельности и коммерческих интересов. После “взрыва” доступности абонентских терминалов на рубеже 2000-х гг., связанного с активным развитием систем на ГСО, на рубеже 2020-х гг. мы наблюдаем явления, связанные со следующим качественным скачком в спутниковой связи – активным освоением низких круговых орбит (НКО) и новым этапом освоения систем связи с космическими аппаратами (КА) на высокоэллиптических орбитах (ВЭО). За последние два десятилетия был развит технологический потенциал различных решений, обеспечивающих появление на этих орбитах группировок современных КА спутниковых систем связи (ССС) с широкими информационными возможностями.

Техника земных станций спутниковой связи (ЗС) также значительно шагнула вперед. Основным драйвером этого развития стал ввод в эксплуатацию системы Starlink и разработка и постановка на массовое производство абонентских терминалов с АФАР (активной фазированной антенной решеткой) с электрическим сканированием луча (ЭСЛ) в рамках этой системы. Под термином “сканирование” мы будем понимать угловое перемещение максимума диаграммы направленности (ДН) антенной системы (АС). Справедливости ради надо отметить, что АФАР со сканированием разрабатывают и разработали достаточно много фирм, но серийное производство реализовано только для СССР Starlink.

Развитие системы Starlink показало рекордную для СССР скорость набора абонентской базы, относительно низкие ценовые показатели за абонентский терминал, рекордно высокие скорости передачи информации, рекордное количество спутников на орбите и т.д.

Развитие системы Starlink показало рекордную для СССР скорость набора абонентской базы, относительно низкие ценовые показатели за абонентский терминал, рекордно высокие скорости передачи информации, рекордное количество спутников на орбите и т.д.

Развитие системы Starlink показало рекордную для СССР скорость набора абонентской базы, относительно низкие ценовые показатели за абонентский терминал, рекордно высокие скорости передачи информации, рекордное количество спутников на орбите и т.д.

Развитие системы Starlink показало рекордную для СССР скорость набора абонентской базы, относительно низкие ценовые показатели за абонентский терминал, рекордно высокие скорости передачи информации, рекордное количество спутников на орбите и т.д.

Ключевые слова:
антенная система, АФАР, спутниковая связь





Таким образом, рассматривая вопрос технологии изготовления ЗС, можно отметить тренд актуальности АФАР-терминалов. В связи с этим необходимо сравнение и понимание взаимосвязи развития новых технологий, в первую очередь АФАР с ЭСЛ и традиционных антенных систем — в основном АС параболического типа.

Смогут ли АФАР полностью вытеснить традиционные антенны с рынка?

Для начала отметим наиболее важные особенности АФАР.

1. Основное преимущество — полное отсутствие механически движущихся частей.

2. Как следствие пункта 1:

- повышение надежности работы изделия (примерно на порядок по сравнению с электромеханическими изделиями);
- возможность значительного снижения цены антенны при серийном массовом изготовлении (как это наблюдается во всей электронной технике, начиная от спутниковых ресиверов до смартфонов) за счет:

— возможности минимизации ручного труда;

— возможностей серийного изготовления на основе печатных плат.

Фактор серийности, как часто утверждается, приводит к теоретической возможности снижения стоимости антенн данного типа до “целевых” и ожидаемых всеми операторами спутниковой связи показателей от \$200.

Для сравнения: в поворотных антеннах по определению имеются как минимум следующие движущиеся части: двигатели, редукторы, подшипники, датчики углового положения, а для станций типа SOTM (Satcom-On-The-Move) дополнительно — вращающееся РЧ-соединение (Rotary Joint), вращающееся контактное соединение (Slip Ring). Это приводит к значительному снижению показателей надежности, так как каждый из этих элементов — “слабое звено” в схеме надежности. И что самое главное, для изготовления таких изделий необходим ручной труд сборщика РЭА, что по определению исключает достижение указанных выше целевых показателей по стоимости терминала.

3. Еще один плюс АФАР — чисто технический, но важный: электрическое, а значит, “быстрое” сканирование луча дает возможность не

только следить за КА при перемещениях спутника или терминала, но и реализовывать различные алгоритмы автосопровождения КА для работы в максимуме диаграммы направленности (ДН) антенны.

Недостатки АФАР со сканированием

1. АФАР из-за сложности изготовления имеют ограничения по размерам. Антенны в виде АФАР для Ku-диапазона изготавливаются (серийно) только до размера апертуры 0,6–0,8 м и не изготавливаются для больших типоразмеров (например, 1,2 м и более). Это связано с большей сложностью в реализации схем сложения единичных излучателей (элементов), которых, для примера, в антенне 1,2 x 1,2 м Ku-диапазона при расположении элементов в сетке с шагом около $\lambda/2$ (где λ — длина волны) составит более 10 000 штук, а также с возрастающей пропорционально количеству элементов стоимостью.

Печатное исполнение излучающей структуры АФАР, наряду с плотной компоновкой модулей каналов на RF-ASICS микросхемах, приводит к проблемам отвода тепла, с которыми сталкиваются и АФАР с разреженной структурой, как в ССС Starlink. По этой причине некоторые компании отказываются от полного сканирования лучом антенны Ka-диапазона, а оставляют только сканирование по одной оси, вторую оставляя с механическим перемещением. Но общий запрос на двумерное сканирование ДН и исполнение антенн без механических элементов на практике приводит к более или менее классическому построению АФАР.

Таким образом, существует вполне обоснованное с технологической и экономической точки зрения

ограничение размеров апертуры АФАР, особенно для высоких диапазонов частот, что приводит к ограничениям по скорости передачи информации.

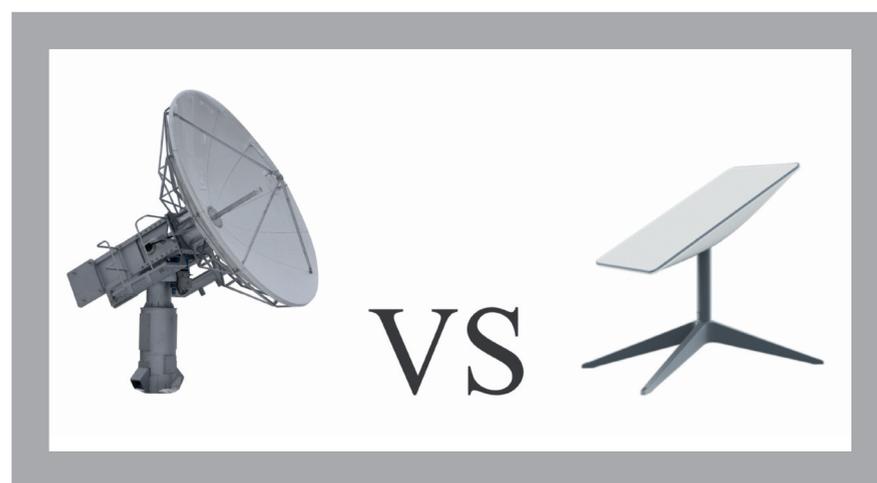
2. АФАР с ЭСЛ имеют ограничения сектора сканирования луча ± 60 град от нормали к апертуре и поэтому не обеспечивают работу со всеми КА (на любых орбитах — ГСО, ВЭО, НКО) на подвижных объектах. Так, для КА на ГСО они применимы только для областей, где спутник виден под углом места более 30 град.

Для решения указанной проблемы имеются варианты реализации АФАР на базе нескольких неподвижных АФАР с переключением, а также варианты реализации механических поворотных в азимутальной плоскости ОПУ, что в любом случае приводит к значительному повышению стоимости ЗС.

При работе с КА на ВЭО также имеются географические ограничения по применению на краях зоны обслуживания при работе АФАР в составе терминалов типа SOTM.

В общем случае антенные системы для ЗС ССС с КА на ВЭО должны иметь полноповоротное опорно-поворотное устройство (ОПУ). Только тогда обеспечивается работа в любой географической точке зоны обслуживания КА на ВЭО. К тому же выводу приходят авторы статьи [3]. При работе с КА на ГСО в Москве в лучшем случае максимальный угол места составляет 26 град, что делает невозможным применение АФАР, установленной на транспортном средстве.

3. Коэффициент усиления (КУ) снижается пропорционально уменьшению проекции площади апертуры антенны в направлении на КА. Этот недостаток принципиально отсут-



ствует у поворотных антенн — в них КУ всегда одинаковый и максимальный в направлении на КА.

Из-за очевидных проблем АФАР только с электрическим сканированием луча при работе на малых углах места (невозможность работы или значительное снижение коэффициента усиления) много предлагаемых на рынке решений включают в себя комбинацию электронного сканирования и механического вращения по одной из осей.

4. Смена частотного диапазона или его модернизация приводит к полной переработке или новой разработке антенны. У некоторых видов АФАР имеются также ограничения и по поляризационным характеристикам.

Данный фактор не существенен для малых терминалов, но достаточно важен для комплексов, обеспечивающих многодиапазонную связь или использующих сменные облучающие устройства (ОУ).

В целом перечисленные выше факторы объективно сужают область использования АФАР и требуют для их массового применения иного подхода к построению систем спутниковой связи. Повсеместное же их использование требует группировку на НКО, состоящую из десятков тысяч КА.

При таком построении ССС весь “центр тяжести” перенесен на космос, за счет этого терминал маленький и дешевый. В принципе, это аналогично сетям VSAT, основная идея которых — большой и дорогой Hub гарантирует простые и дешевые VSAT-терминалы. Starlink пошел еще дальше и перенес всю технологическую и информационную сложность не на наземное средство, а на космический сегмент.

Поворотные антенны

Рассматривать тенденции развития поворотных АС в связи с влиянием АФАР целесообразно в едином поле задач. Определим, что фиксированные АС малых размеров, применяемые в стационарных абонентских станциях для работы с КА на ГСО, будут и далее востребованы в этом сегменте, и значимых изменений в их технике не ожидается. Подробного рассмотрения заслуживают неполноповоротные и полноповоротные системы с зеркальными антеннами (или антеннами другого типа — плоскими антенными решетками, например), обладающие функционалом наведения луча, как и АФАР.

Неполноповоротные АС строятся на основе опорно-поворотного устройства (ОПУ), обеспечивающего перемещение антенны в ограниченном секторе углов. Подобные системы востребованы при необходимости работы по нескольким КА на ГСО с перенацеливанием, а также для подстройки линии визирования ЗС — КА ГСО. Такая ситуация возникает при использовании рефлекторов больших электрических размеров (100λ и более) с остроуправленной диаграммой направленности (ДН), когда колебания антенны и нестабильность КА в точке стояния на ГСО начинают сказываться на качестве связи. Как правило, для неполноповоротных антенн считается достаточным диапазон перемещения по азимуту в пределах ± 60 град, по углу места $0\text{...}80$ град. Ограниченные углы наведения позволяют применять приводы-толкатели, что положительным образом сказывается на цене ОПУ. С другой стороны, подобные ОПУ не могут обеспечить работу по КА на НКО в области зенитных углов, а при работе с КА на ВЭО — не во всех случаях и с сокращением сеанса связи. Полноповоротные АС строятся на ОПУ, обеспечивающем перемещение антенны в пределах полусферы или близком к полусфере секторе углов с повышенными угловыми скоростями. Динамика и пределы сканирования обеспечивают таким АС полный функционал и обеспечивают работу в любой ССС со спутниками на любой орбите, как на ВЭО и НКО, так и ГСО. Подобные ОПУ также применяются в ЗС на динамических объектах транспорта, например на кораблях, для работы с КА на ГСО. Работа же полноповоротных антенн по КА на ВЭО и НКО с объектов транспорта рассматривается как одна из приоритетных задач развития систем спутниковой связи.

Различают следующие типы ОПУ для полноповоротных АС:

- 2-осевое (азимут ± 270 град, угол места $0\text{...}180$ град) для работы по КА на ВЭО, в том числе планируемые для стационарных ЗС “Экспресс-РВ”;
- 3-осевое (азимут ± 270 град, угол места $0\text{...}180$ град, ось наклона ± 14 град) для работы по КА на НКО или по всем типам орбит при размещении на динамическом объекте. К этому же типу относятся и ОПУ корабельных

антенн, с несколько расширенными углами работы по оси кросс-азимута. Подобные ОПУ применены в шлюзовых станциях системы Starlink.

Приведенные кинематические схемы и углы сканирования позволяют ограничиться угловыми скоростями по отдельным осям около $6\text{...}10$ град/с для большинства применений, что позволяет упростить приводы ОПУ за счет применения двигателей с меньшими моментами и стоимостью. Отметим, что реализация крупноапертурных АС с остроуправленной ДН (например, $0,2$ град для Ка-диапазона) накладывает повышенные требования к точности изготовления конструкций и приводов, а также приводит к необходимости реализации систем автосопровождения для наведения на КА.

Общепринятые принципы работы системы наведения по целеуказанию (программный способ) при развитии полноповоротных АС уже не могут решить задачу удержания динамического канала связи с должным качеством и могут рассматриваться только как начальное приближение для процесса поиска и захвата КА на автосопровождение, а затем как данные для выверки и экстраполяции траектории наведения. Вообще опыт применения систем автосопровождения, начавшийся с крупноапертурных антенн для КА ГСО, показал эффективность и целесообразность повсеместного его применения, особенно при нестационарном размещении антенных платформ, а также при работе по движущимся КА.

Как было показано в статье [2], применение электрического качания луча допустимо в сравнительно малоапертурных системах, в крупноапертурных АС целесообразно применение многолучевых схем, с основным каналом приема-передачи и дополнительными четырьмя лучами на прием. Метод сравнения амплитуд в дополнительных лучах обеспечивает стабильность работы алгоритма, избирательность по выбранному КА, а самое главное — устойчивость наведения основного луча антенны на КА с сохранением стабильного потенциала канала связи. Весьма целесообразно также использовать преимущество зеркальных антенн в реализации одновременной работы на ортогональных поляриза-



Оборудование для спутниковых сетей Со склада в Москве и под заказ

+ 7 495 221 5854, www.race.ru

Реклама



- ВУС Ka-, Ku- и C- диапазонов различной мощности;
- Антенны диаметром от 0.6 до 7.0 м;
- Носимые и возимые спутниковые комплексы DriveAway и FlyAway, с ручным и автоматическим наведением для C-, Ku- и Ka- диапазонов частот;
- Изделия для оснащения ЗССС: МШУ, ортофлексоры, сумматоры/делители и др.;
- Спутниковые маршрутизаторы для работы в сетях TDM/TDMA, SCPC, MESH.

циях и применять все возможные схемы по расширению диапазонности облучающих систем.

Анализ современного и прогнозируемого рынка АФАР-решений на основе зарубежного опыта, а также узкого круга российских поисковых работ в этой области позволяет очертить облик и основные области применения терминалов на их основе в ближайшее время:

1. Серийно воспроизводятся технологии модулей АФАР X-, Ku- и Ka- диапазонов, модули совмещенных диапазонов только в проектах.

2. Модули АФАР обычно позволяют работать только на одной заранее определенной поляризации, но при использовании чипов beam-forming можно изменять поляризацию, однако максимальный сектор сканирования у полнофункциональных модулей составляет, как правило, не более ± 60 град.

3. Апертуры предлагаемых модулей АФАР образованы, как правило, от 64 до 256 элементов, со стоимостью порядка \$15...25 за элемент, пусть и с тенденцией к значительному снижению. Производители предлагают компоновать из модулей системы с количеством элементов по-

рядка 1000...2000, большее количество элементов приводит к высокой стоимости, что в большинстве случаев неприемлемо или неоправданно.

4. Полнодуплексные терминалы спутниковой связи на модулях АФАР строятся из модулей двух типов – приемного (Rx) и передающего (Tx), что увеличивает стоимость и размеры терминала.

5. Серийно воспроизводятся пока только АФАР-терминалы Starlink, представляющие собой полудуплексную систему с временным разделением сигналов приема/передачи с жестко заданной поляризацией, с узким сектором сканирования и электромеханическим ОПУ для начального наведения. При этом стоимость терминала составляет \$600, что при порядка 128 активных элементов дает стоимость примерно \$4...10 за элемент по различным методикам оценки.

6. Модули АФАР обеспечивают автосопровождение КА за счет качания луча и сопоставления амплитуд сигнала при таком сканировании, при этом значительную часть времени связь реализуется не на

максимуме ДН, а на ее боковом спаде.

Основные вышеуказанные черты однозначно характеризуют АФАР-терминалы именно как малогабаритные абонентские станции, жестко завязанные на достаточно обширную низкоорбитальную группировку КА с ограниченными по поляризациям и плотности сигнала информационными линиями. Преимущества АФАР-терминалов потенциально позволят закрыть нишу абонентских станций на малогабаритных динамических объектах транспорта (автомобили, автобусы, поезда, катера), вытесняя малоапертурные зеркальные абонентские терминалы за счет еще меньших габаритов, удобства установки и повышенного потенциала связи в одинаковых ценовых категориях. Однако в нишах средне- и крупноапертурных зеркальных полноповоротных антенн, обеспечивающих широкополосные линии связи с более или менее высокими орбитами, альтернативы со стороны АФАР-терминалов в ближайшее время не возникнет. Критерий “эффективность/стоимость” в случае значимых по апертуре антенн однозначно трактует ситуацию в пользу

60 Распределение антенных систем земных станций при работе в системах связи

Тип КА	Тип АС					
	Фикс. VSAT	Фикс. с США	Фикс. п/пов.	SOTM	АФАР фикс.	АФАР SOTM
ГСО	√	√	-	√	√	√ в широтах +/-40°
ВЭО	-	-	√	√	√	√
СКО	-	-	√	-	√	√
НКО	-	-	√	√	√	√

Таблица 1

зеркальных систем или им подобных.

Однако производителям полноповоротных АС следует работать над повышением качества и снижением стоимости антенн. Так, основными направлениями развития целесообразно считать:

1. Уменьшение весовых и моментных характеристик АС для улучшения динамики, снижения материалоемкости, энергопотребления приводов путем применения современных композиционных материалов и совершенствования конструкций.

2. Внедрение и широкое применение наиболее функциональных облучающих систем для автосопровождения КА и обеспечения работы с наиболее полным набором поляризацій в широком диапазоне частот.

3. Совершенствование алгоритмов управления, наведения, гиросtabilизации, а также уменьшение стоимости аппаратуры управления и антенн.

Возможное распределение на спутниковом рынке

В качестве общего заключения можно сделать прогнозный вывод о некотором смещении ниш, занятых разными типами антенн (пассивных зеркальных и разнообразных АФАР) в пользу АФАР, при одновременном наращивании функционала тех и других систем. Тем не менее ниша полноповоротных зеркальных антенн при сочетании их высоких электродинамических и оптимальных стоимостных характеристик останется за ними.

В таблице 1 приведена оценка возможного распределения «обычных» антенн и АФАР с ЭСЛ при работе в

ССС на базе КА с различными орбитами. Все антенны распределены функционально на следующие типы:

- фиксированные типа VSAT (терминалы);
- фиксированные с системой наведения антенн (США) — для антенн больших диаметров;
- фиксированные полноповоротные, включая 2- и 3-осные ОПУ;
- SOTM, обеспечивающие связь в движении, в том числе к данному классу отнесены и антенны корабельного типа. Как правило, исключая корабельные антенны, SOTM имеют апертуру, не превышающую 0,8–0,9 м, что сравнимо с АФАР с ЭСЛ;
- АФАР фиксированные;
- АФАР SOTM, обеспечивающие связь в движении.

Для СССР с КА на ГСО:

- массово используются VSAT-терминалы и SOTM, для антенн больших диаметров используются фиксированные АС с США;
- полноповоротные антенны не используются, за исключением случаев, когда требуется оперативная перенастройка с одного КА на другой;
- фиксированные АФАР технически могут быть использованы, но при условии более низкой цены по сравнению с VSAT-терминалами. При требовании по апертуре антенны от 0,9...1,2 м АФАР теряет конкурентоспособность;
- АФАР SOTM могут быть использованы только для географических мест с широтой не более +/-40 град, так как имеют ограничения по углу сканирования луча в углометной плоскости. (Для справки: самые южные города России — Дербент, Сочи и

Евпатория расположены на 42, 43 и 45 град с.ш. соответственно.) Для СССР с КА на ВЭО:

- массово используются полноповоротные антенны;
- фиксированные АФАР технически могут быть использованы. Однако учитывая, что в апогее расстояние до КА на ВЭО сравнимо с расстоянием до КА на ГСО, для обеспечения значительных скоростей передачи информации полноповоротные антенны с большими диаметрами более предпочтительны по сравнению с АФАР;
- использование АФАР SOTM более предпочтительно по сравнению с SOTM (апертуры одинаковые, система слежения за КА электронная).

Для СССР с КА на СКО и НКО:

- полноповоротные антенны используются для СССР с малым количеством спутников в группировке при требовании обеспечить работу с угла места 5...30 град и выше;
- использование АФАР SOTM более предпочтительно по сравнению с SOTM (апертуры одинаковые, система слежения за КА электронная) — так же, как и для ВЭО;
- массово используются фиксированные АФАР — при условии, что спутниковая группировка в СССР включает сотни/тысячи КА на НКО.

Краткий итог

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. АФАР заняли прочно свое место в СССР с КА на НКО с количеством аппаратов на орбите, исчисляемых минимум тысячами единиц.
2. АФАР имеют ограничения для решения многих задач — как по энергетическим параметрам, так и по технической реализации.
3. Полностью необходимость в поворотных антеннах может отпасть в том гипотетическом случае, если все СССР будут построены на базе КА на НКО и при условии, что в этих СССР количество КА будет достаточно велико (как в Starlink), что не потребует работы с малыми углами места и большими секторами сканирования. Такая ситуация вряд ли произойдет в принципе, так как у разных орбит есть свои достоинства и КА на всех орбитах будут востребованы. Во всяком случае, в обозримом будущем в несколько десятков лет —





точно. И антенны с поворотными ОПУ будут иметь свое, и значительное, место на рынке аппаратуры спутниковой связи. Такая тенденция сохранится, по нашим оценкам, еще несколько десятилетий.

Литература:

1. Бобков В., Званцугов Н. Системы наведения "Технологии Ра-

диосвязи" — рубеж в 500 комплектов пройден // Специальный выпуск "Спутниковая связь и вещание — 2022". 2021.

2. Бобков В., Званцугов Н., Бобков А., Голубцов М., Будкин А. Многолучевые облучатели моноимпульсного типа для следящих антенн спутниковой связи. Специальный выпуск "Спутниковая связь и вещание — 2023".

3. Анпилогов В., Шишлов А., А.Эйдус А. Анализ систем LEO-NTS и реализуемости фазированных антенных решеток для абонентских терминалов // Технологии и средства связи. 2015. № 6—2. Специальный выпуск "Спутниковая связь и вещание — 2016".

61

К вопросу о сверхнизкоорбитальных системах

Особый интерес к коммерческим спутниковым системам на сверхнизких круговых орбитах (СНКО) стал активно проявляться примерно с 2020 г. В России внимание к использованию СНКО было акцентировано в июне 2023 г., когда в ходе пленарного заседания форума Агентства стратегических инициатив "Сильные идеи для нового времени" президенту России сообщили о возможности создания спутников на сверхнизкой орбите.

Сверхнизкими орбитами условно принято считать орбиты с высотой выше 100 км и менее 400 км. Одним из существенных стимулов снижения высоты орбиты является тот факт, что на орбитах выше 400 км уже очень много действующих спутников и число заявок в ИТУ все возрастает. В перспективе не хватит места всем желающим, а опасность столкновений с переходом этого процесса в цепную реакцию будет все более реальной. Применение

систем на СНКО может решить эту проблему, поскольку время захоронения отработавших спутников будет составлять месяцы, то есть орбиты будут самоочищаться.

Функциональные задачи систем на СНКО предусматривают в основном ДЗЗ и связь. Очевидно, что чем ближе спутник в поверхности Земли, тем проще обеспечить высокое разрешение съемки для систем ДЗЗ. Для систем связи на СНКО не все так однозначно. Не подлежит сомнению то, что уменьшение потерь распространения электромагнитной волны пропорционально квадрату отношения высот орбит. Снижая орбиту с 1000 км до 200 км, получается экономия примерно 14 дБ. Эти дБ можно использовать для уменьшения ЭИИМ КА, приходящейся на канал (плотность потока мощности на Земле нормативно ограничена), а на линии "вверх" применять малопотребляющие абонентские устройства. Достоинства

и недостатки применения СНКО иллюстрируются в таблице применительно к системам связи.

Но чем ниже орбита, тем больше КА нужно для непрерывного обслуживания абонентов и тем меньше время сеанса связи с КА. Эти недостатки не являются критическими. Критический недостаток систем на основе СНКО — торможение КА за счет остаточной атмосферы. Для преодоления этого торможения требуются большие энергетические затраты для удержания спутника на заданной орбите в пределах срока его активного существования (САС).

Если обратиться к данным, представленным в ГОСТ 25645.301-83, который устанавливает методику расчета затрат топлива на маневрирование КА с целью поддержания заданных параметров их орбиты, то массы топлива для спутника на орбите 120 км нужно в десятки миллионов раз больше, чем для орбиты 1200 км (при идентичном САС и миделе КА). Существуют суточные и сезонные колебания плотности частиц, что сильно зависит от солнечной и геомагнитной активности. Изменение плотности частиц влечет за собой изменение силы торможения КА и расхода рабочего тела.

Решение этой задачи предлагается на основе прямоточного ионного двигателя, который в качестве топлива использует остаточную атмосферу. Для этого следует создать ловушку для остаточной атмосферы, что увеличивает массу и мидель спутника и, соответственно, линейно увеличивает требуемую эквивалентную массу топлива. Возможно ли разрешить это противоречие — пока неизвестно. Но очевидно, что такие спутники не могут быть маленькими.

Сообщение подготовлено главным научным экспертом сборника "Спутниковая связь и вещание" В.Р. Анпиловым

Особенности спутниковой системы на сверхнизкой орбите

Снижение мощности передатчика КА	😊
Использование абонентских устройств с низкой ЭИИМ	😊
Формирования маленьких рабочих зон на Земле	😊
Быстрое очищение орбиты	😊
Низкая радиация и применение коммерческой ЭКБ	😊
Стоимость КА на орбите	😊
Количество КА для непрерывного обслуживания абонентов на Земле	😞
Время сеанса связи	😞
Энергия на коррекцию и удержание КА на орбите	😱

