

УДК 621.396

Исследование сигнала восходящей линии связи абонентских терминалов системы спутниковой связи Starlink

Куприянов З. П., Куприянов П. В., Петров С. А.,
Терешкин Е. В., Тимофеев С.А.

Постановка задачи: В статье рассматриваются различные аспекты применения абонентских терминалов «Starlink» с акцентом на возможность их обнаружения и пеленгации средствами радиомониторинга. Делается краткий анализ доступных источников информации по теме публикации. Приводятся данные собственного эксперимента по исследованию сигнатуры сигнала восходящей линии связи абонентского терминала Starlink отечественным аппаратурным комплексом. Даются расчетно-экспериментальные оценки дальности обнаружения. **Целью работы** является оценка возможности обнаружения местоположения абонентских терминалов Starlink средствами радиомониторинга по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны восходящей линии связи в K_u диапазоне. **Используемые методы:** в работе применены натурные экспериментальные методы исследования уровней и радиотехнической структуры терминала Starlink. На их основе сделаны расчетные оценки. **Новизна:** представленные натурные экспериментальные исследования такого высокотехнологичного радиоэлектронного средства, которым является абонентский терминал Starlink с применением отечественного средства радиомониторинга проводятся впервые в нашей стране. Зарубежные публикации на эту тему авторам также не известны. **Результат:** в результате проведения эксперимента показана принципиальная возможность наблюдения сигнала восходящей линии связи абонентских терминалов Starlink по боковым лепесткам диаграммы направленности антенн на значимых дальностях. **Практическая значимость:** открывается возможность создания отечественных специализированных комплексов радиомониторинга сигналов абонентских терминалов «Starlink», включая определение их местоположения.

Ключевые слова: абонентский терминал, Starlink, восходящая линия связи, K_u -диапазон, боковые лепестки диаграммы направленности антенны, радиомониторинг.

Введение

Абонентские терминалы (АТ) системы спутниковой связи Starlink благодаря своим высоким потребительским качествам стали одной из основных составляющих зарубежной инфраструктуры связи и управления в самых различных областях применения. Они обеспечивают устойчивую связь с космическими аппаратами системы глобального широкополосного доступа компании SpaceX со скоростью передачи информации порядка 150 Мбит/с по нисходящей и 30 Мбит/с по восходящей линии связи [1]. Терминалы достаточно неприхотливы, имеют степень защиты от неблагоприятных воздействий внешней среды IP54...IP56, что позволяет потребителю использовать их как стационар-

Библиографическая ссылка на статью:

Куприянов З. П., Куприянов П. В., Петров С. А., Терешкин Е. В., Тимофеев С. А. Исследование сигнала восходящей линии связи абонентских терминалов системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 4. С. 287-304. DOI: 10.24412/2410-9916-2024-4-287-304

Reference for citation:

Kupriyanov Z. P., Kupriyanov P. V., Petrov S. A., Tereshkin E. V., Timofeev S. A. Researching the uplink signal of the subscriber Starlink terminals. *Systems of Control, Communication and Security*, 2024, no. 4, pp. 287-304 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2024-4-287-304

но, так и при размещении на подвижных объектах [2]. Внешний вид типовых конфигураций АТ Starlink для стационарного размещения представлен на рис. 1.

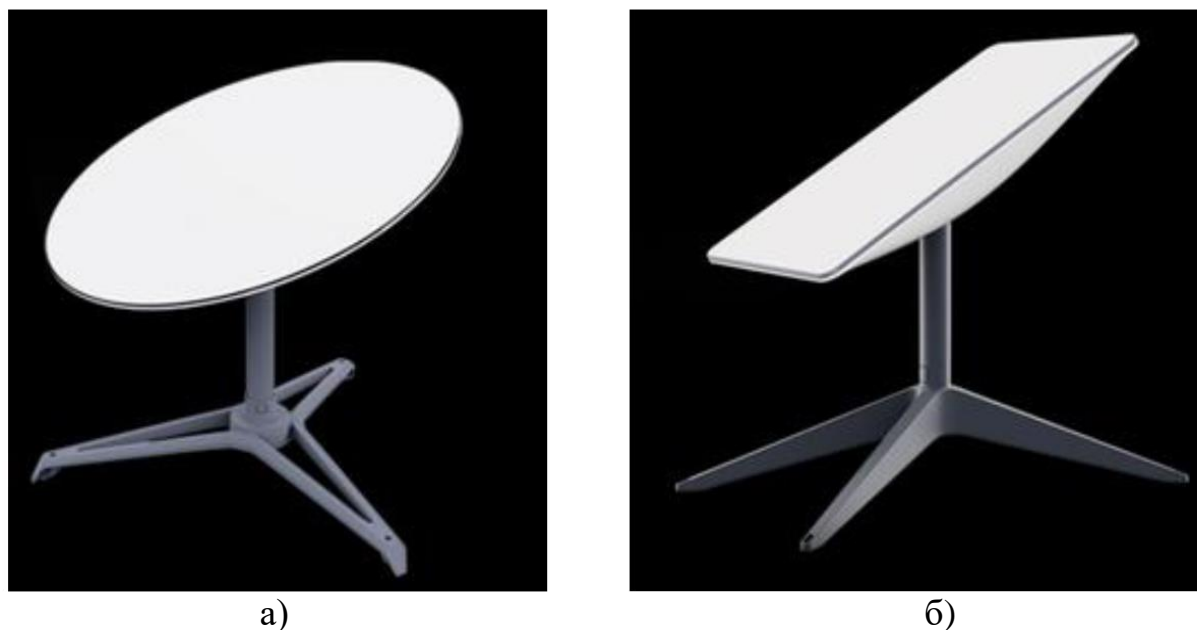


Рис. 1. Внешний вид АТ Starlink: а) первого поколения UT-1;
б) второго поколения UT-2

Основное их применение соответствует прямому первоначальному назначению в качестве стационарных наземных АТ спутниковой связи с высокоскоростным доступом. И таких устройств в мире функционирует более 1 млн штук с тенденцией существенного наращивания количества и качества за счет перехода на новые модели и сервисы, предоставляемые компанией «SpaceX». Соответственно, задача мониторинга данных радиоэлектронных средств является крайне актуальной.

В данной публикации не рассматриваются возможности обнаружения АТ Starlink в оптическом и в инфракрасном диапазонах. Это отдельная задача, решение которой затрудняется малыми габаритами, а также широкими возможностями маскировки АТ Starlink в указанных диапазонах.

Что касается обнаружения АТ Starlink в СВЧ-диапазоне, то эта задача имеет несколько аспектов, на которых мы остановимся подробнее. Необходимо совершенно четко разделять возможность пеленгации АТ Starlink по излучению входящего в его состав WiFi-роутера в диапазонах, например, 2,4...5 ГГц и по излучению восходящей линии связи в диапазоне 14...15 ГГц.

Обнаружение излучения WiFi-роутеров АТ Starlink в диапазонах 2,4 или 5 ГГц может быть осуществлено существующими отечественными средствами радиомониторинга на дистанции около 10 км наземными решениями и на расстоянии более 40 км воздушными средствами. Но при обеспечении ряда мероприятий радиоэлектронной защиты: переход на различные проводные варианты, усиление экранировки излучения, заглубление под землю и т.п., указанная дальность обнаружения может быть существенно снижена. В данной публика-

ции, мы рассматриваем возможность пеленгации излучения только восходящей линии связи AT Starlink в Ku-диапазоне.

Некоторые зарубежные источники утверждают, что по результатам нескольких независимых исследований возможности обнаружения излучения используемая в терминале Starlink активная фазированная антенная решетка (АФАР) ограничена дистанциями, не превышающими 300 м. Под этими утверждениями есть определенные основания, которые обеспечиваются опять-таки, мерами радиоэлектронной защиты. AT Starlink размещаются, как правило, в низинах и в специальных заглоблениях с телесным углом визирования порядка 140 градусов в зенит.

При стационарном размещении такие меры вполне эффективны и вероятно достаточны для надежной маскировки излучения восходящей линии связи, по крайней мере от наземных средств обнаружения.

При применении AT Starlink в качестве мобильного средства, реализация таких мер затруднительна. Можно сравнительно простой доработкой закамouflировать терминал, усилить его механическую защиту, но устранить боковые лепестки излучения восходящей линии связи мобильных AT Starlink в рабочем режиме при сканировании АФАР проблематично.

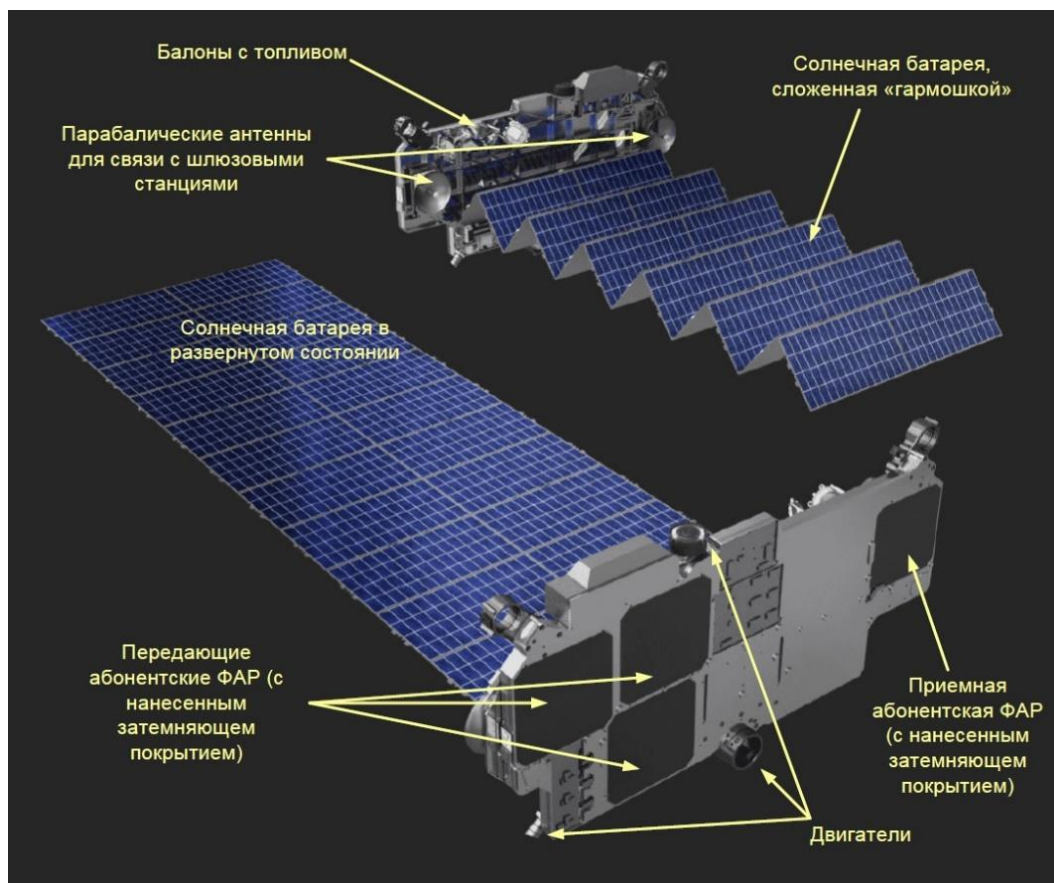
Целью настоящей публикации является исследование различных технических аспектов обнаружения и пеленгации восходящей линии связи мобильных AT Starlink средствами радиомониторинга.

Организационные и технические проблемы исследования сигнала AT «Starlink»

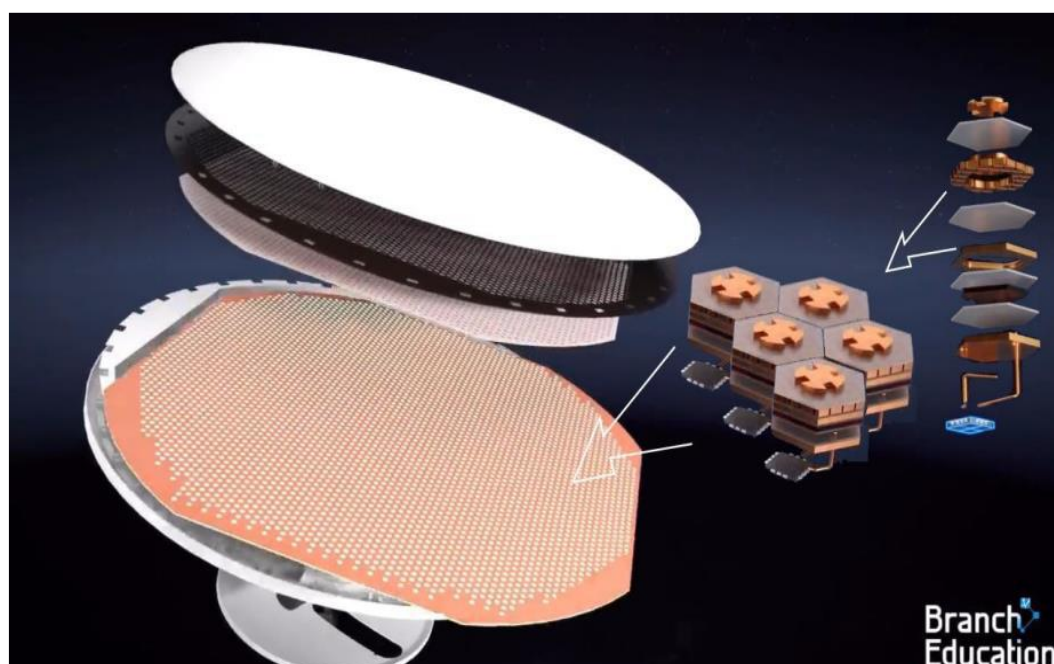
Известно, что даже подключенные к глобальной системе SpaceX AT Starlink на территории Российской Федерации (РФ) не работают. Это реализуется на инфраструктурном уровне космическим сегментом системы SpaceX и является, как правило, главной организационной проблемой проведения исследований радиотехнических параметров данной аппаратуры. Многочисленные публикации [3-6] подробно рассматривают принципы построения системы и организации связи, особенности конструктивного исполнения различных ее элементов, включая космический сегмент и AT рис. 2.

Существует также подробное описание и эпюры огибающей сигналов, но только для нисходящей линии связи (рис. 3).

Что касается сигналов, излучаемых терминалом по восходящей линии связи, то доступной информации на сегодняшний день минимум, кроме данных, приведенных в заимствованной из [7] таблице 1.

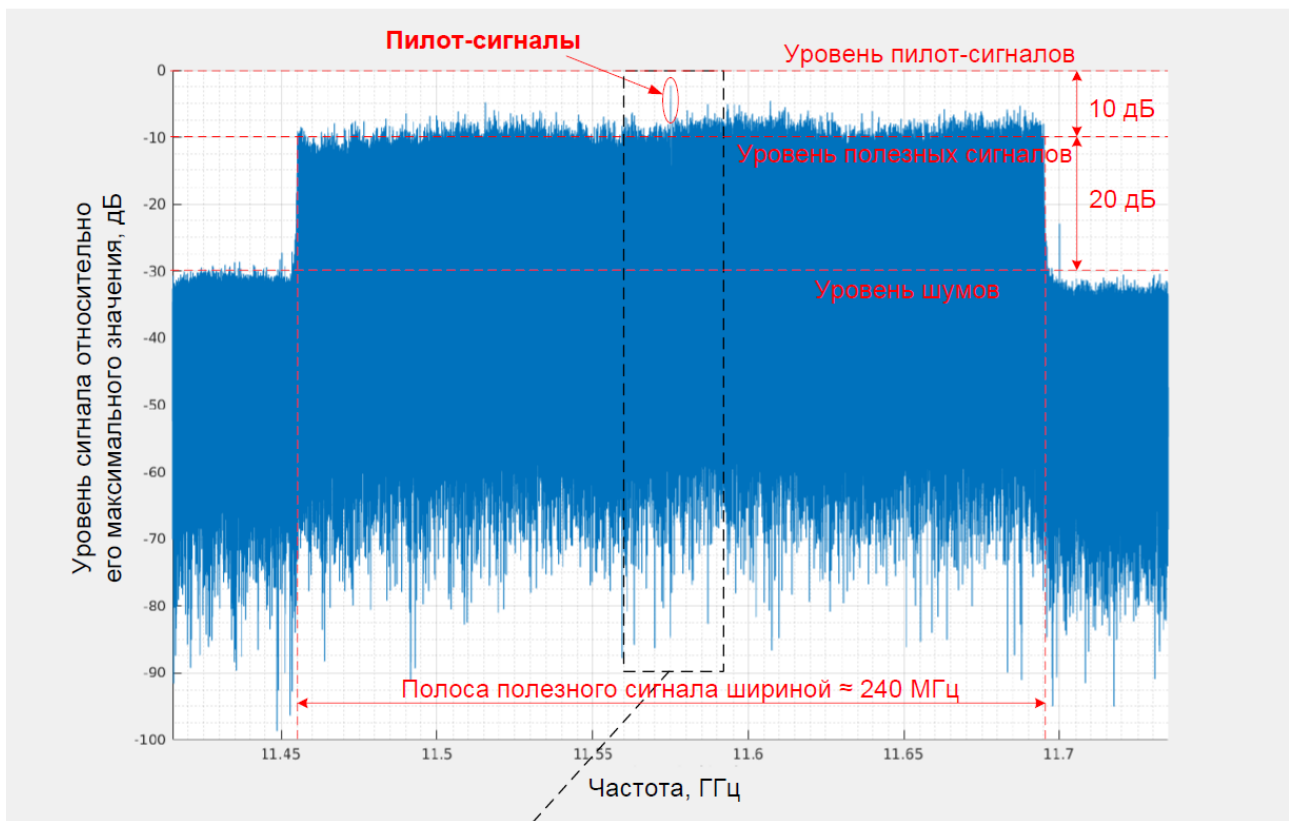


а)

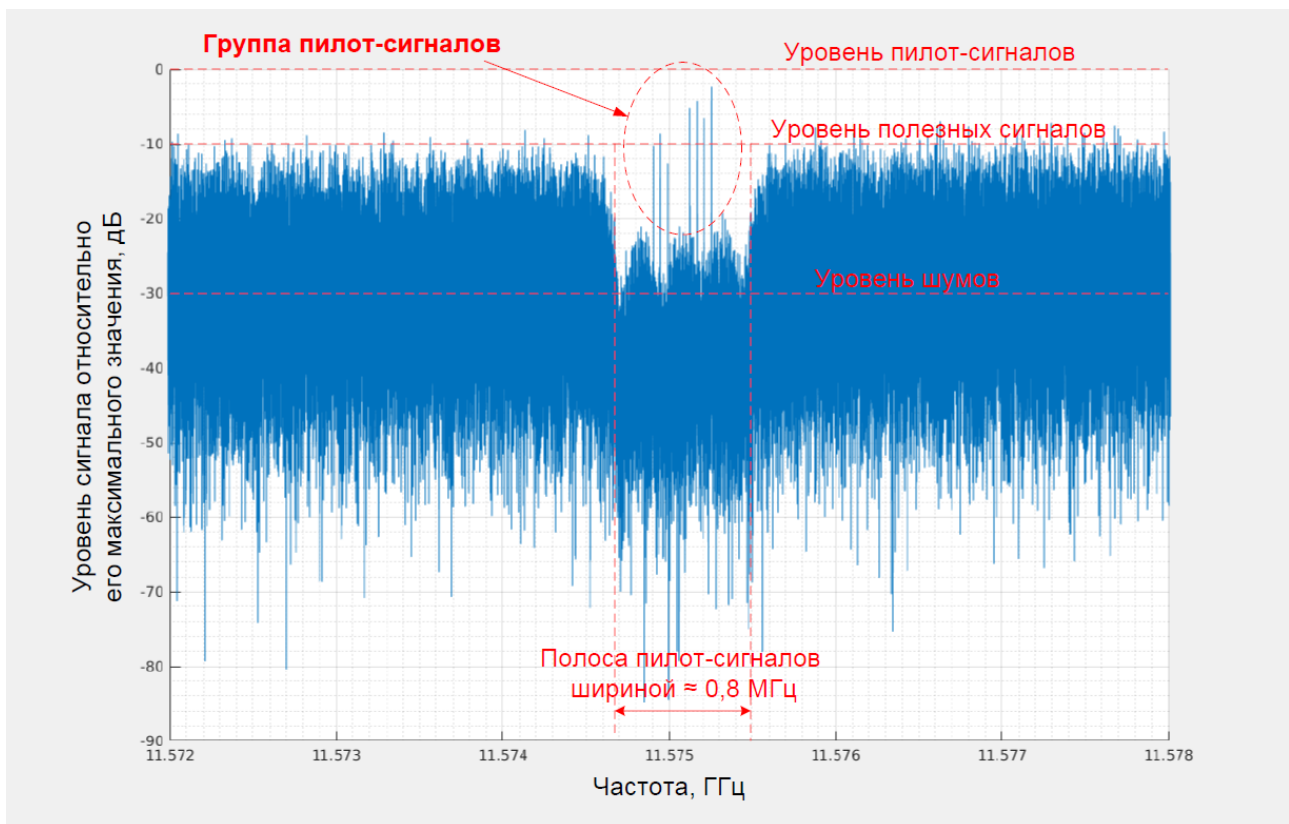


б)

Рис. 2. Конструктивное исполнение космического аппарата (а) и AT Starlink (б)



а)



б)

Рис. 3. Один из вариантов OFDM-сигнала в абонентском канале «вниз», принимаемый АТ: а) полосе частот 240 МГц; б) в полосе частот 6 МГц

Таблица 1 – ТТХ терминалов UT-1, UT-2 и ESIM [7]

Параметр	UT-1		UT-2		ESIM1	
	Луч в зенит	Отклоненный луч	Луч в зенит	Отклоненный луч на $\pm 60^\circ$	Луч в зенит	Отклоненный луч на $\pm 60^\circ$
Диапазон частот, ГГц: – прием – передача	10,7-12,7 14-14,5		10,7-12,7 14-14,5		10,7-12,7 14-14,5	
Ширина полосы частот, МГц – прием – передача	2000 500		2000 500		2000 500	
Эквивалентный диаметр антенны, м: – приемной – передающей	0,48 (одна ФАР на прием и передачу) КИПЗ=0,57		0,31×0,31 м 0,31×0,31 м		0,37×0,37 м 0,31×0,31 м	
Время работы на передачу	11%		14%		н/д	
Усиление антенны, дБи: – приемной – передающей	33,2 34,6	30,6 32	34,2 34,2	30 30	36,1 34,2	32 30
Ширина ДНА, – прием – передача	3,5° 2,8°	5,5° 4,5°	3,4° 3,5°	5,5° 5,5°	3,5° 3,5°	5,5° 5,5°
Кросс-поляризационная развязка в пределах сканирования, дБ	н/д	11				
Мощность излучения, Вт	0,76	4,06	1,2	3,2	1,2	3,2
ЭИИМ5, дБВт	33,4	38,2	35	39,1	35	39,1
Коэффициент G/T, дБ/К	7,8	3,8	9,2	5	11,1	7
Классы излучений	240M8D7W; 120M8D7W; 62M5D7W; 31M3D7W; 15M6D7W					
Тип используемых сигналов	BPSK ... 64QAM					
Используемые полосы частот, МГц – прием – передача	240; 120; 60; 30; 15 60; 30; 15					
Скорости передачи данных, Мсимв./с – прием – передача	240; 120; 60; 30; 15 60; 30; 15					

Это связано с тем, что проведение натуральных радиотехнических экспериментов в зоне действия AT Starlink сопряжено со значительными организаци-

онными трудностями, что и является первопричиной отсутствия информации о радиотехнической структуре сигнала восходящей линии связи AT Starlink.

Другой, но не менее значимой является техническая проблема приема сигнала, излучаемого терминалом в рабочем режиме. Как нетрудно предположить, сигнал восходящей линии связи AT Starlink имеет сложную радиотехническую структуру. Она характеризуется быстрыми и непредсказуемыми для стороннего наблюдателя изменениями всех параметров сигнала: амплитуды, частоты и фазы. Адекватное наблюдение такого сигнала возможно только средствами соответствующего частотного диапазона при наличии в аппаратной части спектроанализатора реального масштаба времени с мгновенной полосой не менее 500 МГц. Программное обеспечение должно быть адаптировано к работе с квазинепрерывными сигналами и иметь возможность записи треков для последующего анализа.

Наблюдение сигнала восходящей линии связи возможно осуществить практически только по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны. Типовая диаграмма уровня боковых лепестков AT Starlink приведена на рис. 4 [8].

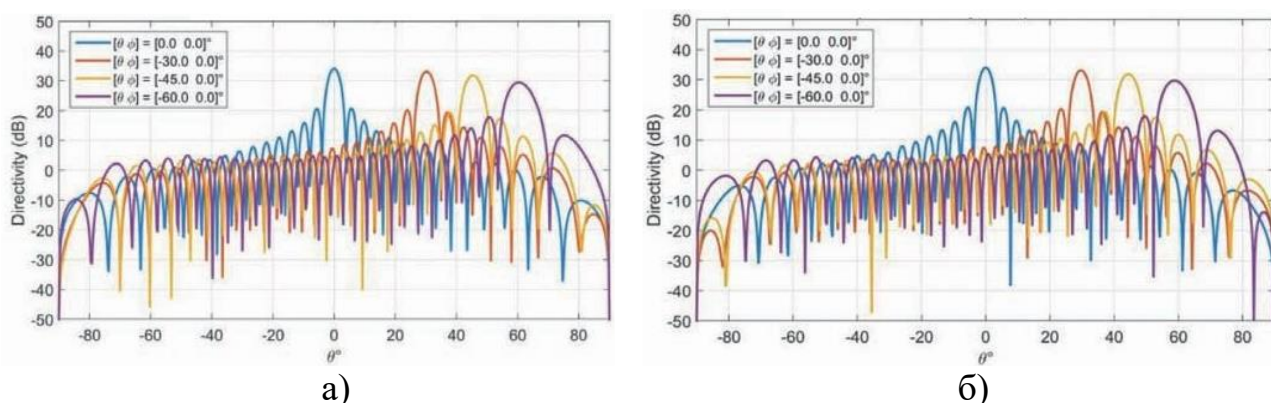


Рис. 4. Диаграммы направленности антенн AT Starlink UT-2, передающего на частоте 14,125 ГГц при различных значениях угла места: а) «прямое» сечение АФАР; б) «косое» сечение АФАР

Видно, что антенная система AT Starlink, построенная по принципу АФАР с планарными излучателями является довольно качественной. В зависимости от угла визирования средства радиомониторинга, направленного на антенную систему AT Starlink, типовой уровень подавления боковых лепестков диаграммы направленности последнего может составлять от 20 до 50 дБ. При этом средний уровень боковых лепестков существенно спадает по мере увеличения угла визирования от нормали к плоскости антенны AT. Также понятно, что уровень боковых лепестков будет существенно изменяться в ходе работы AT при сопровождении спутников связи и переключениях между ними.

Понимание реальных возможностей существующей отечественной аппаратуры по обнаружению, идентификации и пеленгации требует максимально полной информации о радиотехнической структуре сигнала восходящей линии связи AT Starlink. Для решения этой задачи был проведен натурный радиотех-

нический эксперимент по исследованию сигнатуры сигнала подключенного терминала в рабочем режиме при передаче данных на спутник.

Описание эксперимента

В эксперименте по определению сигнатуры АТ Starlink использовались аппаратура и программное обеспечение из состава отечественного комплекса радиомониторинга. Аппаратура включала в себя приемное устройство, устройство управления и обработки сигналов. Приемное устройство состояло из антенного усилителя диапазона 12...18 ГГц [9, 10] и преобразовательного устройства с полосой мгновенного обзора 500 МГц на промежуточной частоте 1750 МГц [11].

Устройство управления и обработки сигналов включало в себя все необходимые компоненты для управления приемником и модуль цифровой обработки сигналов. Модуль цифровой обработки сигналов позволял вести непрерывную запись усредненных обнаруженных спектров в выбранном рабочем диапазоне, а также осуществлять кратковременные записи квадратурных сигналов в полосе 500 МГц длительностью до двух секунд с частотой дискретизации 625 МГц.

В качестве антенны для создания исследовательского стенда был использован прямоугольный рупор с коэффициентом направленного действия 23 дБ. Ближняя зона указанной антенны заканчивалась на расстоянии около трех метров, что позволяло проводить исследования на ограниченных пространствах. С помощью этого стенда были проведены исследование сигнатур сначала неподключенного, а затем и подключенного АТ Starlink в режиме передачи потокового видео.

Исследование неподключенного АТ Starlink

Непосредственно перед первым включением АТ в него должны быть загружены актуальные траектории спутниковой группировки. АТ после включения питания проводит самотестирование, определяет собственные координаты и связывается со спутниковой группировкой для выяснения, находится ли он в разрешенной зоне. Если зона запрещена, АТ прекращает работу. Процесс определения разрешенной зоны после включения питания АТ Starlink однократный и продолжается не более 30...40 с.

Как уже сообщалось выше, территория РФ не обслуживается компанией SpaceX и подключение АТ к спутнику невозможно. Тем не менее АТ временно включается на излучение в рабочем диапазоне частот, как показано на рис. 5. Сначала виден амплитудно-модулированный гармонический сигнал на центральной частоте, а затем поочередное включение каналов передачи данных. По оси абсцисс отложено время в секундах, по ординате – частота в мегагерцах.

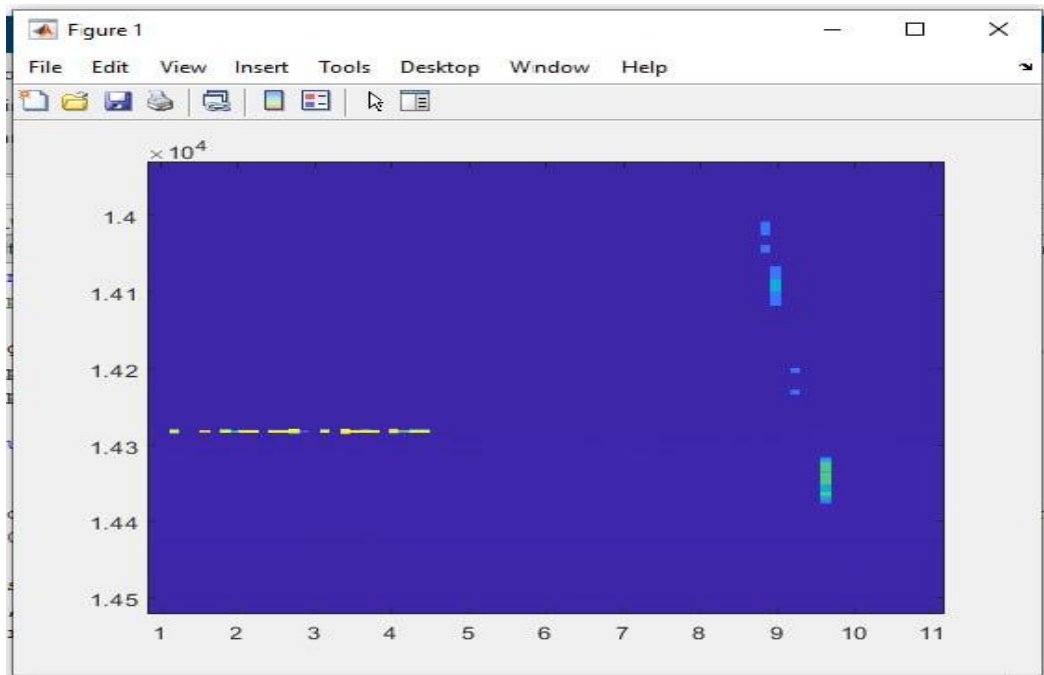


Рис. 5. Частотно-временная зависимость процесса включения неподключенного AT Starlink

Задача этого этапа эксперимента состояла исключительно в тестировании оборудования приемного канала и получения необходимой информации для доработки программного обеспечения.

Исследование сигнатуры сигнала подключенного AT Starlink

Натурный эксперимент по исследованию сигнатуры сигнала AT Starlink был проведен весной 2024 г. Эксперимент состоял в организации наблюдения средствами радиомониторинга подключенного терминала в штатном режиме функционирования при передаче цифрового видео 30 Мбит/с. Исследовательский стенд представляющий собой специализированный спектроанализатор реального масштаба времени с мгновенной полосой 500 МГц был описан выше.

AT Starlink располагался на ровной поверхности. Наклон плоскости антенны относительно горизонта составлял около 15 градусов. Прием сигнала осуществлялся на уровне центра антенного полотна AT Starlink последовательно с двух направлений: со стороны излучающей поверхности АФАР и с противоположной стороны. Расстояние до терминала составляло 13 м, что обеспечивало дальнюю зону приема. Сигнал был устойчивым с хорошим избыточным отношением сигнал/шум в обоих ракурсах – со стороны излучающей поверхности около 50 дБ, а с обратной стороны около 30 дБ.

И том и другом случае прием сопровождался существенными временными флуктуациями сигнала глубиной около 40 дБ, связанными с алгоритмами работы терминала и приемной аппаратуры исследовательского стенда. Основные причины указанных флуктуаций сигнала следующие:

- 1) общая полоса излучения сигнала AT Starlink за несколько минут наблюдения превысила 500 МГц. Средняя несущая частота радиоимпульсов в процессе работы каждые 10...20 с изменялась по псевдослу-

чайному закону в диапазоне 13,9...14,6 ГГц. Так как полоса мгновенного обзора используемой аппаратуры составляла ровно 500 МГц, это не позволило обойтись без сканирования по частоте. Для обеспечения просмотра всей полосы приемник последовательно настраивался с некоторым периодом сканирования на три частотные точки с шагом перестройки 280 МГц, на каждой из которых время перестройки составляло 20 % от времени наблюдения, что обуславливало первый механизм пропуска сигналов;

- 2) возможности используемой аппаратуры позволяли накапливать спектр сигналов довольно кратковременно. Скважность наблюдения составляла не менее 4, что в сочетании с большой скважностью исследуемого сигнала ~ 50 и достаточно короткой длительностью одиночного импульса 100 мкс также приводило к снижению вероятности обнаружения;
- 3) качание луча АФАР при слежении АТ Starlink за спутниками должно было бы быть главным фактором, приводящим к флуктуациям амплитуды вплоть до пропадания сигнала, но в силу изложенного выше, эта зависимость в явном виде обнаружена не была.

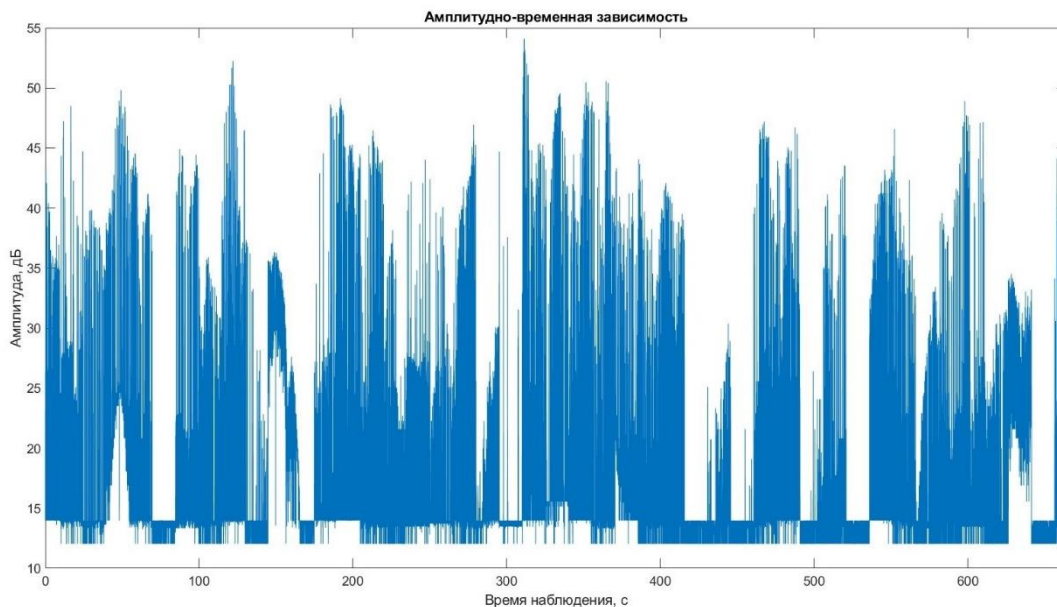
Иллюстрацией сказанного является верхняя осциллограмма, приведенная на рис. 6, представляющая собой амплитудно-временную зависимость сигнала восходящей линии связи АТ Starlink. Она получена путем стробоскопической оценки мгновенных амплитуд сигнально-шумовой смеси, как побочный продукт обработки сложного широкополосного сигнала, показанного на нижней эпюре рис. 6. В этой частотно-временной зависимости амплитуда обозначена цветовой интенсивностью.

Радиотехническая структура сигнала АТ Starlink в режиме передачи потокового видео, представляла собой последовательность радиоимпульсов со сложной внутриимпульсной модуляцией и переменной скважностью. Длительность одиночного радиоимпульса составляла около 100 мкс, причем изменений длительности самого импульса в процессе наблюдений зафиксировано не было.

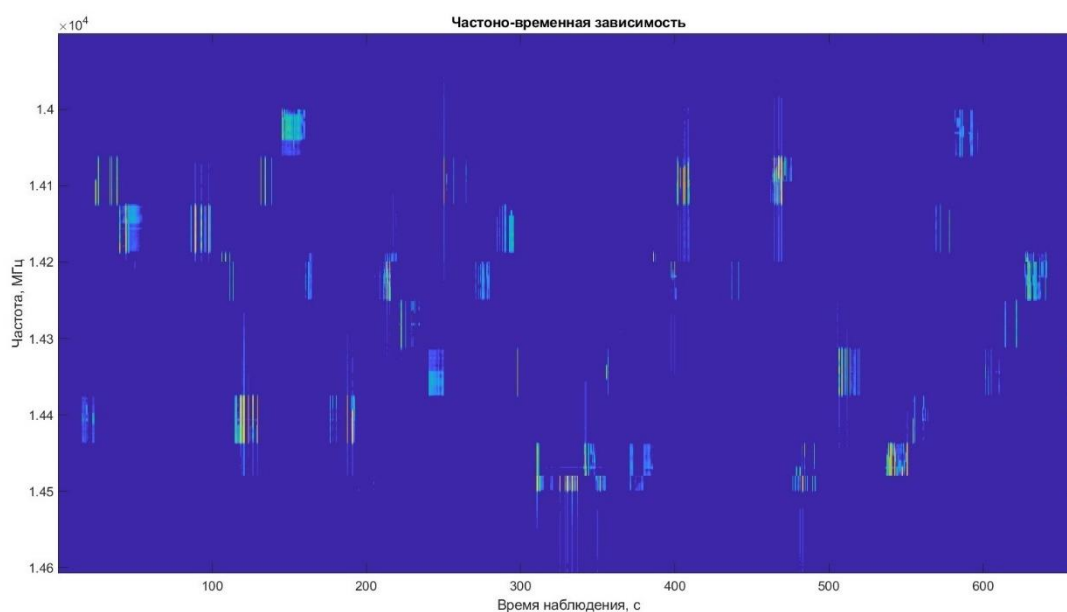
Средний межимпульсный интервал был оценен в 5200 мкс. Величина межимпульсного интервала изменялась по псевдослучайному закону, т. е. по результатам предыдущего измерения было невозможно предсказать время появления следующего импульса.

На рис. 7 представлены осциллограммы одиночного радиоимпульса АТ Starlink (см. верхнюю осциллограмму) и его огибающей (нижняя осциллограмма). На рис. 8 представлена пара передаваемых АТ импульсов.

Ширина спектра внутриимпульсной модуляции в пределах длительности импульса также не являлась константой. По результатам наблюдений максимальная ширина спектра внутриимпульсной модуляции составила около 70 МГц. На рис. 9 представлен частотно-временной анализ сигналов АТ Starlink после компьютерной обработки. На верхней эпюре дана осциллограмма, на средней – спектр внутриимпульсного сигнала, а на нижней – частотно-временная зависимость, где амплитуда обозначена цветовой интенсивностью. На рис. 10 показана та же зависимость, но в объемном изображении.



а)



б)

Рис. 6. Изменение амплитуды (а) и частоты (б) сигнала AT Starlink во время одного из сеансов наблюдения

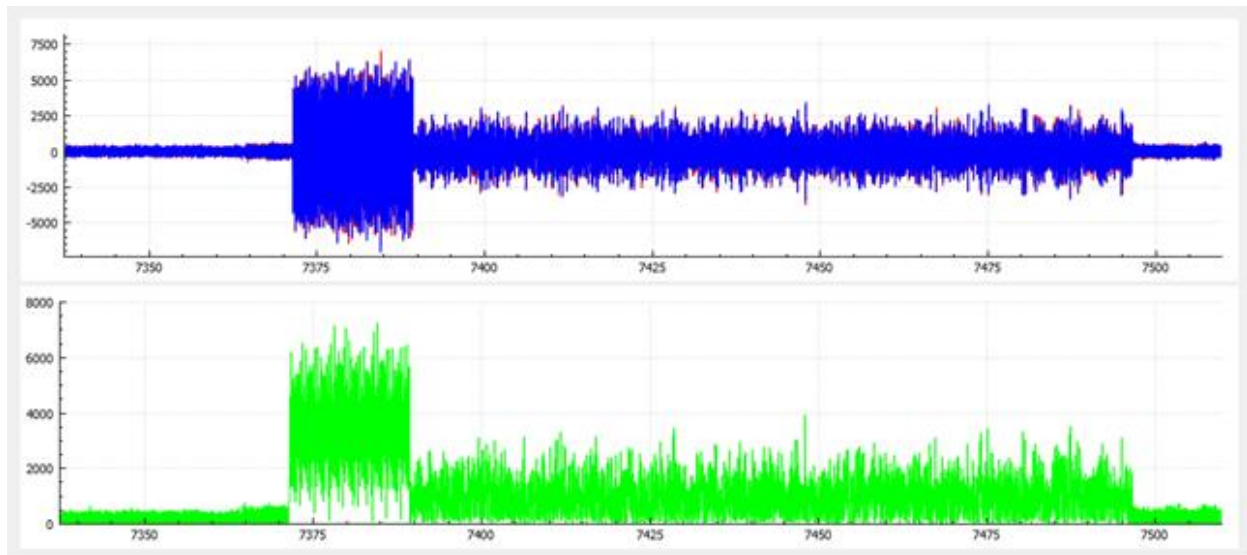


Рис. 7. Осциллограммы одиночного импульса восходящей линии связи АТ Starlink, шкала времени в миллисекундах, амплитуда – в относительных единицах

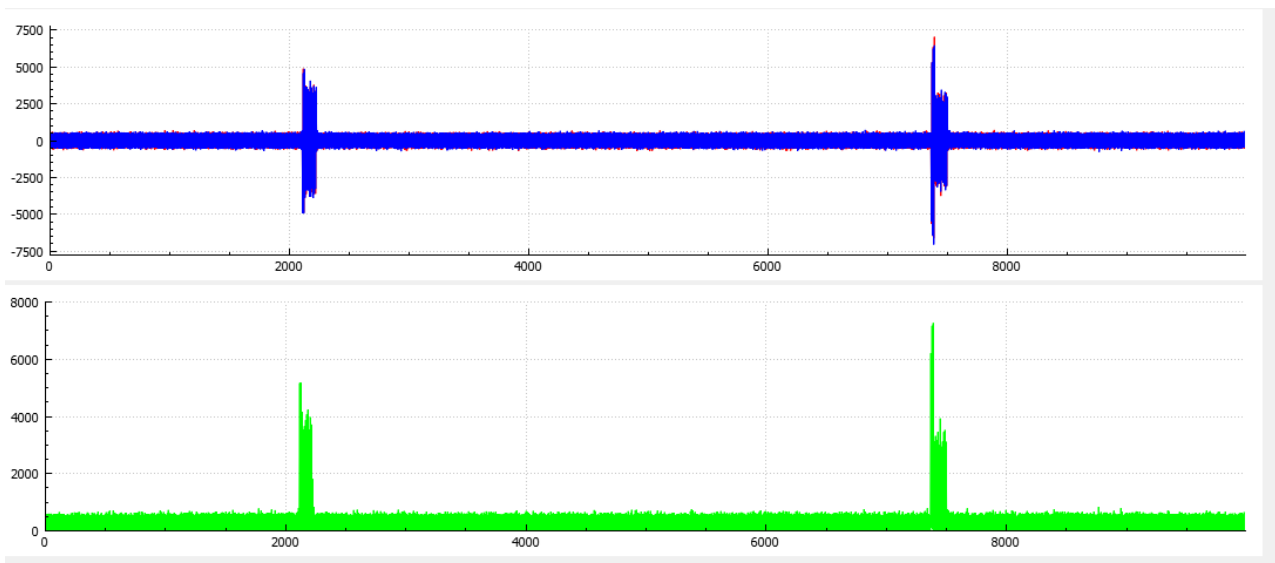


Рис. 8. Осциллограммы пары импульсов восходящей линии связи АТ Starlink, шкала времени в миллисекундах, амплитуда – в относительных единицах

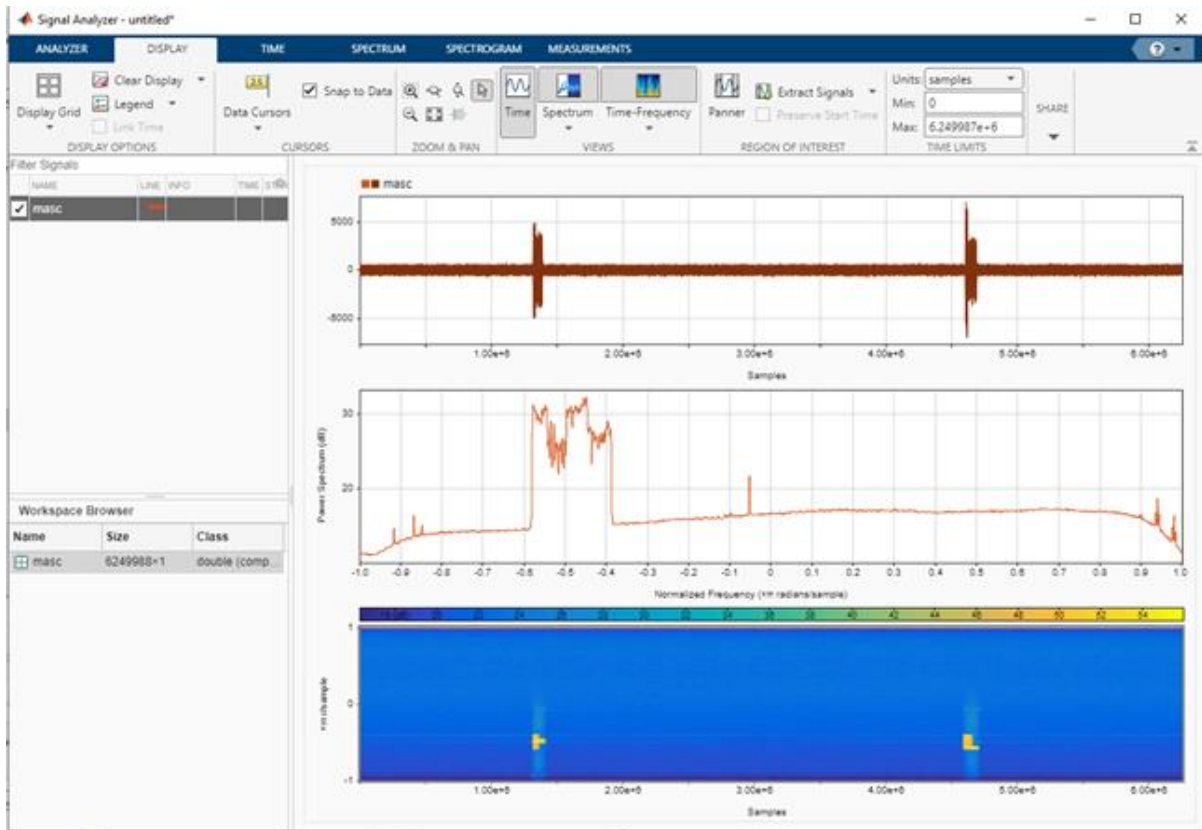


Рис. 9. Результаты компьютерной обработки сигналов AT Starlink.
Шкалы времени и частоты в относительных единицах

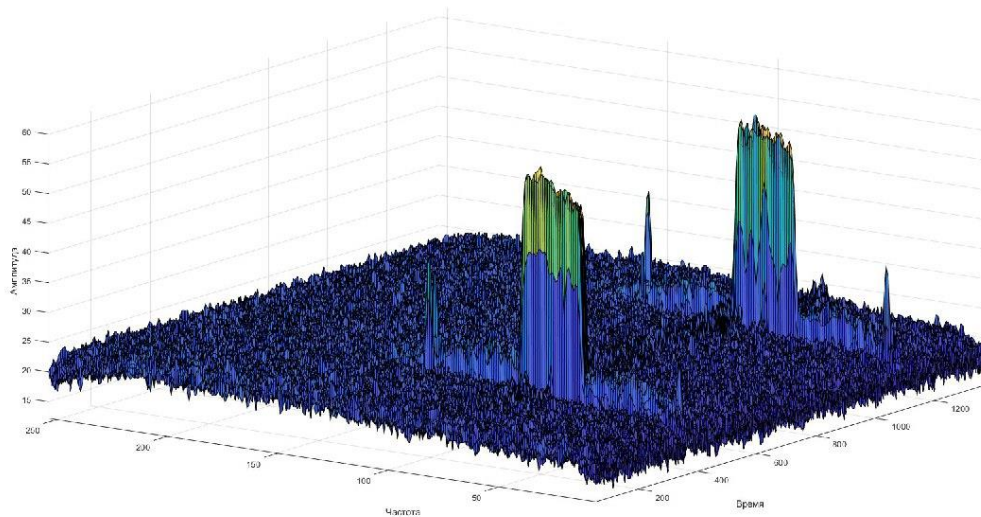


Рис. 10. Объемное изображение сигнатуры сигнала AT Starlink

Летный эксперимент

Летом 2024 г. состоялся полет вертолета с установленной на нем аппаратурой для обнаружения сигналов AT Starlink в береговой зоне. Аппаратура представляла собой описанный выше исследовательский стенд. Обнаружение сигналов не являлось основной целью полета, поэтому целенаправленный выход в предполагаемую зону скопления AT Starlink и их предметный поиск не

выполнялся. Тем не менее, в процессе полета состоялся и поддерживался в течение примерно трех минут контакт с сигналами, которые с высокой вероятностью могут быть идентифицированы как сигналы AT Starlink. Спектрограмма одного из моментов контакта представлена на рис. 11.

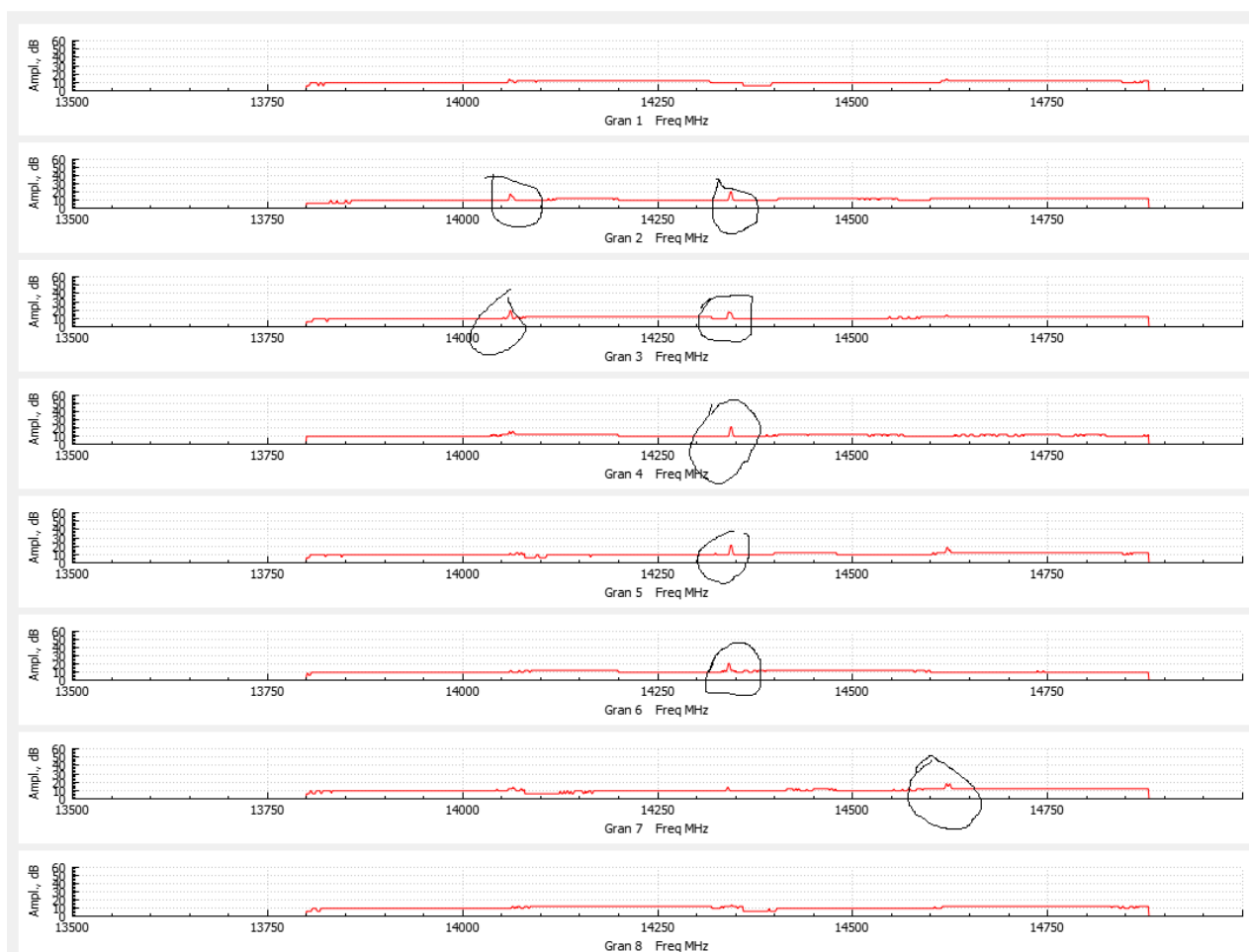


Рис. 11. Спектрограмма сигнала, похожего на AT Starlink

Крайне незначительное соотношение сигнал/шум и прерывистость контакта не дали возможности записать осциллограммы и подробно проанализировать обнаруженные сигналы. Однако следующие признаки позволяют идентифицировать их как сигналы AT Starlink:

- 1) сигналы обнаружены в относительно свободном рабочем диапазоне AT Starlink;
- 2) сигналы обнаружены в полете на высоте 500...1000 м, а всю предшествующую полету неделю наземный мониторинг диапазона 13,8...14,8 ГГц не выявил наличия каких-либо сигналов в этом диапазоне;
- 3) наблюдаемые сигналы изменяли свою несущую частоту во времени подобно зависимости, приведенной на рис. 6.

Отличие обнаруженных сигналов от ранее рассматриваемых состоит в том, что они относительно узкополосные. Этот факт может быть связан с небольшим объемом передаваемой информации в момент контакта. Можно пред-

положить, что носитель AT Starlink находился в дежурном режиме и потоковое видео не передавалось. В остальном все указывает именно на обнаружение восходящей линии связи AT Starlink по боковым лепесткам диаграммы направленности АФАР.

Заключение

Сигналы AT Starlink являются весьма трудной целью для обнаружения и пеленгования из-за узкой диаграммы направленности антенны, направленной в зенит, малого уровня боковых лепестков и сложной радиотехнической структуры излучаемого сигнала. В то же время AT Starlink широко применяются за рубежом в качестве стационарного и мобильного средства широкополосного доступа. Сервисы компании Space-X постоянно совершенствуются, так что можно уверенно прогнозировать существенное расширение сферы их применения. Отсюда следует актуальность и целесообразность создания эффективного обнаружителя сигналов AT Starlink, обеспечивающего достижение максимальных показателей дальности и вероятности пеленгования.

Предварительные оценки показывают возможность достижения дальности обнаружения AT Starlink от 10 до 20 км. Конечно, это довольно грубая оценка, основанная на пересчете результатов эксперимента с учетом измеренного отношения сигнал-шум и диаграммы направленности антенны. Для получения более точных оценок, экспериментальные работы необходимо продолжать.

Литература

1. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 3. Наземный комплекс // Хабр [Электронный ресурс], 04.11.2020. – URL: <https://habr.com/ru/post/526386/> (дата доступа 14.09.2022).
2. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 4. Абонентский терминал // Хабр [Электронный ресурс], 05.11.2020. – URL: <https://habr.com/ru/post/526512/> (дата доступа 14.09.2022).
3. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 1 // Хабр [Электронный ресурс], 02.11.2020. – URL: <https://habr.com/ru/post/526154/> (дата доступа 14.09.2022).
4. Пехтерев С. Всё о проекте «Спутниковый интернет Starlink». Часть 2. Сеть Starlink // Хабр [Электронный ресурс], 03.11.2020. – URL: <https://habr.com/ru/post/526204/> (дата доступа 14.09.2022).
5. Observations of Starlink Satellite-to-User Downlink / Software Defined Radio // Starlink Engineering [Электронный ресурс], 20.09.2022. – URL: https://www.reddit.com/r/StarlinkEngineering/comments/qwm1v5/observations_of_starlink_satellite_to_user/ (дата доступа 25.09.2022).
6. Receiving Starlink Beacons with an RTL-SDR and LNB [Электронный ресурс], 20.09.2022. – URL: <https://sgcderek.github.io/blog/starlink-beacons.html> (дата доступа 25.09.2022).

7. Пехтерев С. В., Макаренко С. И., Ковальский А. А. Описательная модель системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 4. С. 190-255. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-190-255
8. Макаренко С. И. Помехозащищенность наземных абонентских терминалов системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 2. С. 81-101. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-81-101
9. Гутенко С. В., Петров С. А., Федонин Ю. А., Куприянов П. В., Андросов А.В. О возможности расширения динамического диапазона широкополосных приемников сверхвысоких частот // Радиотехника и электроника. 2018. Т. 63. № 3. С. 257–261.
10. Входной линейный модуль широкополосного приемного устройства СВЧ с расширенным динамическим диапазоном // Патент на изобретение. Заявка №2019112107/08(023531).
11. Куприянов П. В. Широкополосные приемные устройства СВЧ с расширенным динамическим диапазоном // Радиотехника. 2008. № 3. С. 8-13.

References

1. Pehterev S. Vsyо o proekte Sputnikoviy internet Starlink. Chast 3. Nazemniy complex. [About the Starlink Satellite Internet project. Part 3. Ground complex]. *Habr* [Electronic resource], 04.11.2020. Available at: <https://habr.com/ru/post/526386> (accessed 14.09.2022) (in Russian).
2. Pehterev S. Vsyо o proekte Sputnikoviy internet Starlink. Chast 4. Abonentskiy terminal [About the Starlink Satellite Internet project. Part 4. Subscriber terminal]. *Habr* [Electronic resource], 05.11.2020. Available at: <https://habr.com/ru/post/526512> (accessed 14.09.2022) (in Russian).
3. Pehterev S. Vsyо o proekte Sputnikoviy internet Starlink. Chast 1. [About the Starlink Satellite Internet project. Part 1]. *Habr* [Electronic resource], 02.11.2020. Available at: <https://habr.com/ru/post/526154> (accessed 14.09.2022) (in Russian).
4. Pehterev S. Vsyо o proekte Sputnikoviy internet Starlink. Chast 2. Set Starlink. [About the Starlink Satellite Internet project. Part 2. Starlink network. *Habr* [Electronic resource], 03.11.2020. Available at: <https://habr.com/ru/post/526204> (accessed 14.09.2022) (in Russian).
5. Observations of Starlink Satellite-to-User Downlink / Software Defined Radio. *Starlink Engineering*, 20.09.2022. Available at: https://www.reddit.com/r/StarlinkEngineering/comments/qwm1v5/observations_of_starlink_satellite_to_user/ (accessed 25.09.2022).
6. Receiving Starlink Beacons with an RTL-SDR and LNB [Electronic resource], 20.09.2022. Available at: <https://sgcderek.github.io/blog/starlink-beacons.html> (accessed 25.09.2022).
7. Pehterev S. V., Makarenko S. I., Kovalsky A. A. Descriptive Model of Starlink Satellite Communication System. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 4, pp. 190-255 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-190-255

8. Makarenko S. I. Noise Immunity of Starlink User Terminals. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 2, pp. 81-101 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-81-101.

9. Gutenko S.V., Petrov S.A., Fedonin Y.A., Kupriyanov P.V., Androsov A.V. On the possibility of expanding the dynamic range of broadband ultrahigh frequency receivers. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 257-261 (in Russian).

10. Input linear module of a broadband microwave receiver with an extended dynamic range. Patent Russia, no. 2019112107/08(023531).

11. Kupriyanov P.V. Broadband microwave receivers with extended dynamic range. *Radiotekhnika*, 2008, no. 3, pp. 8-13 (in Russian).

Статья поступила 12 ноября 2024 г.

Информация об авторах

Куприянов Захар Павлович – инженер. АО НПК «Тристан». Область научных интересов: обработка радиолокационных сигналов; проектирование и применение комплексов активной и пассивной радиолокации. E-mail: kllb0y@ya.ru
Адрес: 107014, Россия, г. Москва, ул. 2-я Боевская, д. 2.

Куприянов Павел Васильевич – доктор технических наук. Заместитель начальника научно-производственного комплекса по научной работе. АО «НПП «Исток» им. Шокина». Область научных интересов: активная и пассивная радиолокация. E-mail: kupriyanov@istokmw.ru

Адрес: 141100, Россия, Московская обл., г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а.

Петров Сергей Александрович – кандидат технических наук. Начальник сектора. АО НПК «Тристан». Область научных интересов: радиоэлектронные устройства СВЧ для активной и пассивной радиолокации. E-mail: s_petrov@mail.ru

Адрес: 107014, Россия, г. Москва, ул. 2-я Боевская, д. 2.

Терешкин Евгений Валентинович – кандидат технических наук. Начальник научно-производственного комплекса. АО «НПП «Исток» им. Шокина». Область научных интересов: радиоэлектронные компоненты и устройства СВЧ для активной и пассивной радиолокации. E-mail: evtereshkin@istokmw.ru

Адрес: 141100, Россия, Московская обл., г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а.

Тимофеев Сергей Александрович – ведущий инженер. АО НПК «Тристан». Область научных интересов: радиолокационные системы и комплексы, обработка радиолокационных сигналов. E-mail: serg-timofeev@yandex.ru

Адрес: 107014, Россия, г. Москва, ул. 2-я Боевская, д. 2.

Researching the uplink signal of the subscriber terminals Starlink

Z. P. Kupriyanov, P. V. Kupriyanov, S. A. Petrov,
E. V. Tereshkin, S. A. Timofeev

Problem statement: The article considers various aspects of the application of subscriber terminals "Starlink" with an emphasis on the possibility of their detection and direction finding by means of radio monitoring. A brief analysis of available sources of information on the topic of the publication is made. The research of our own experiment on the study of the signature of the uplink signal of the subscriber terminal «Starlink» by a domestic hardware complex are given. Calculated and experimental estimates of the detection range are given. **Objective:** the aim of this research is to assess the possibility of detecting the location of Starlink subscriber terminals by means of radio monitoring along the side lobes of the uplink antenna directivity diagram in the K_u -band. **Methods:** in-situ experimental methods for studying the levels and radio structure of the Starlink terminal are changed. **Novelty:** the presented full-scale experimental studies of such a high-tech electronic device, which is the Starlink subscriber terminal using a domestic radio monitoring device, are being carried out for the first time in our country. Foreign publications on this topic are also not known to the authors. **Result:** as a result of the experiment, the fundamental possibility of observing the uplink signal of Starlink user terminals along the side lobes of the antenna pattern at significant ranges was shown. **Practical relevance:** the possibility of creating domestic specialized complexes for radio monitoring of signals from Starlink subscriber terminals, including determining their location, is being disclosed.

Key words: subscriber terminals "Starlink", K_u -band uplink signal, side lobes of the antenna pattern, radio monitoring.

Information about Authors

Zakhar Pavlovich Kupriyanov – Engineer. JVC SPC «Tristan». Field of research: radar signal processing; design and application of active and passive radar systems. E-mail: kllb0y@ya.ru

Address: 107014, Russia, Moscow, 2-aya Boevskaya St., 2.

Pavel Vasilievich Kupriyanov – Dr. Habil. of Engineering Sciences, Deputy Head of The RPC for Research. JSC «RPC «Istok» named after Shokin». Field of research: active and passive radar. E-mail: kupriyanov@istokmw.ru

Address: 141100, Russia, Moscow Region, Fryazino, Vokzalnaya St., 2a.

Sergey Aleksandrovich Petrov – Ph.D. of Engineering Sciences, Head of Sector. JSC RPK «Tristan». Field of research: microwave electronic devices for active and passive radar. E-mail: s_petrov@mail.ru

Address: 107014, Russia, Moscow, 2-aya Boevskaya St., 2.

Evgeny Valentinovich Tereshkin – Ph.D. of Engineering Sciences, Head of the Research and Production Complex. JSC RPC Istok named after Shokin. Field of research: microwave electronic components and devices for active and passive radar. E-mail: evtereshkin@istokmw.ru

Address: 141100, Russia, Moscow Region, Fryazino, Vokzalnaya St., 2a.

Sergey Aleksandrovich Timofeev – Leading Engineer. JSC RPK «Tristan». Field of research: radar systems and complexes; radar signal processing. E-mail: serg-timofeev@yandex.ru

Address: 107014, Russia, Moscow, 2-aya Boevskaya St., 2.