

УДК 621.391.8

Помехозащищенность наземных абонентских терминалов системы спутниковой связи Starlink

Макаренко С. И.

Актуальность. Обеспечение услугами доступа в сеть Интернет с высокой скоростью и с приемлемой задержкой требует создания многоспутниковых низкоорбитальных систем спутниковой связи (ССС). В настоящее время в России разрабатывается несколько проектов таких ССС, например, проекты «Скиф», «Марафон» и «Мегафон-1440». При этом, обоснование технических решений для этих ССС требует формирования исходных данных для моделирования различных режимов организации связи. Для формирования таких исходных данных может быть использована другая технологически развитая зарубежная многоспутниковая система – Starlink, которая может рассматриваться как высокотехнологичный прототип отечественных ССС. Помехозащищенность является одной из наиболее важных характеристик ССС, в связи с этим ее исследование является актуальной научно-практической задачей. **Целью работы** является предварительная оценка помехозащищенности ССС Starlink в частности – оценка помехозащищенности наземных абонентских терминалов (АТ). Данная оценка может использоваться для разработки исходных данных при моделировании влияния источников помех на отечественные многоспутниковые низкоорбитальные ССС в интересах научно-обоснованного выбора помехозащищенных режимов работы АТ для них. При оценке помехозащищенности АТ Starlink были использованы только открытые источники. **Результаты и их новизна.** Элементом практической новизны работы являются выявленные общие технологические особенности реализации АТ Starlink и предварительная оценка ее помехозащищенности с учетом пространственной, временной и энергетической доступности АТ для потенциальных источников помех. **Практическая значимость.** Представленная работа будет полезна техническим специалистам при обосновании помехозащищенных режимов работы для наземных АТ отечественных многоспутниковых низкоорбитальных ССС. Кроме того, данная модель будет полезна научным работникам и соискателям ученых степеней, ведущим научные исследования в области спутниковой связи и ее помехозащищенности.

Ключевые слова: помехозащищенность, помеха, источник помех, преднамеренная помеха, радиоэлектронное подавление, радиоэлектронная борьба, абонентский терминал, земная станция, система спутниковой связи, многоспутниковая низкоорбитальная система спутниковой связи, Старлинк, Starlink, SpaceX.

Введение

В настоящее время в различных областях экономики важным является использование систем спутниковой связи (ССС), имеющих глобальные зоны покрытия Земли. При этом, особое значение приобретают многоспутниковые низкоорбитальные ССС, способные не только обеспечить связью абонентов на всей поверхности Земли (в том числе и в приполярных районах), но и высокоскоростную связь с низкой задержкой, что является критически важным для доступа к современным мультимедийным информационным ресурсам в сети Интернет. В 2015 г. американская компания SpaceX, возглавляемая И. Маском,

Библиографическая ссылка на статью:

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

Reference for citation:

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

представила революционный проект обеспечения доступом в сеть Интернет всех жителей Земли на основе многоспутниковой низкоорбитальной ССС Starlink собственной разработки. К 2023 г. ССС Starlink прошла этап первоначального развертывания и сейчас находится в режиме тестовой эксплуатации. Необходимо отметить что в ССС Starlink применяется множество передовых технологических решений, ранее не применявшихся в космической связи, что делает актуальным рассмотрение этой ССС как передового прототипа других перспективных многоспутниковых низкоорбитальных ССС, разрабатываемых как в нашей стране, так и за рубежом. К числу таких проектов можно отнести новое поколение отечественной ССС «Гонец», а также ССС, разрабатываемые в рамках проектов «Скиф», «Марафон» и «Мегафон-1440». К зарубежным проектам многоспутниковых низкоорбитальных ССС можно отнести OneWeb и ORBCOMM.

Пропускная способность, своевременность передачи и помехозащищенность являются одними из наиболее важных характеристик любой системы радиосвязи. В связи с тем, что вопросы оценки пропускной способности и своевременности передачи многоспутниковых низкоорбитальных ССС на примере ССС Starlink уже были частично рассмотрены в предыдущей работе автора [1], то данная работа направлена на рассмотрение именно помехозащищенности ССС Starlink. При этом Starlink рассматривается в качестве наиболее технически развитого прототипа систем более широкого класса – многоспутниковых низкоорбитальных ССС. Под *помехозащищенностью* в данной работе понимается способность системы связи обеспечивать связь с требуемым качеством в условиях воздействия на нее преднамеренных помех (ПП) [2]. Показателем воздействия ПП в работе принято отношение мощности сигнала к мощности помехи (ОСП) на входе приемника, при этом сделано допущение что ПП представляет собой аддитивный белый гауссовский шум в полосе полезного сигнала, если не указано иное.

Ранее, вопросы помехозащищенности ССС рассматривались в работах [3-12], однако, вопросы оценки помехозащищенности многоспутниковых низкоорбитальных технически развитых систем, подобных Starlink, в известных работах не рассматривались.

Целью статьи является предварительная оценка помехозащищенности ССС Starlink, при этом, преимущественно, рассматриваются наземные абонентские терминалы (АТ) данной системы. Эта оценка проводится в интересах формирования исходных данных для моделирования связных процессов и обзора новых технологических решений в перспективных проектах отечественных многоспутниковых низкоорбитальных ССС, прототипом которых может служить ССС Starlink. Статья продолжает более раннюю работу автора [1], посвященную формированию описательной модели ССС Starlink.

Статья основана на информации только открытых источников – данных о функционировании ССС Starlink, указанных компанией SpaceX, и со стороны многочисленных специалистов-энтузиастов, исследующих принципы работы этой ССС в инициативном порядке. Эти открытые сведения были обобщены в работе [1], которую автор взял за основу. Автор не отрицает возможности

наличия в системе ССС Starlink недокументированных возможностей или расширенной функциональности. Вместе с тем он рассматривает только проверенные сведения о тех или иных принципах работы данной системы, которые позволяют получить относительно достоверные выводы об уровне помехозащищённости этой ССС.

Все представленные в статье исходные посылки, данные и выводы справедливы с отношении текущей конфигурации ССС Starlink (по состоянию на январь 2023 г.) – в космическом сегменте развернута 1-я фаза орбитальной группировки ССС Starlink на основе космических аппаратов (КА) версии 1.0 и 1.5, в наземном сегменте используются абонентские терминалы (АТ) версий UT-1, UT-2 и ESIM (Earth Station In Motion). На момент написания статьи (март 2023 г.) компанией SpaceX уже запущены КА версии V2mini, которые обладают повышенными тактико-техническими характеристиками (ТТХ) по сравнению с КА версий 1.0 и 1.5. Однако достоверной технической информации для проведения полноценного анализа помехозащищённости КА версии V2mini в настоящее время очень мало, поэтому в статье ТТХ КА данной версии не рассматривались. В процессе развития и модернизации данной ССС какие-то из выводов, представленных в статье, могут потерять свою актуальность.

1. Анализ особенностей работы ССС Starlink, значимых для оценки помехозащищённости ее АТ

В ССС Starlink основными объектами воздействия потенциальных источников ПП наземного и воздушного базирования являются наземные АТ. В настоящее время компания SpaceX представила 3-и типа АТ Starlink: стационарные UT-1, UT-2 и мобильный АТ ESIM. ТТХ этих АТ приведены в таблице 1.

Не вдаваясь глубоко в принципы организации связи в ССС Starlink (они подробно описаны в работе [1]) отметим следующие важные особенности этой системы, значимые при оценке ее помехозащищённости.

1. ССС Starlink является низкоорбитальной системой связи и, как показано в [1], время нахождения одного космического аппарата (КА) Starlink над АТ в зоне покрытия системы является весьма коротким – порядка 250 с (4,1 мин), от момента восхода КА выше 25° по углу места и до момента захода КА ниже 25° над горизонтом (рис. 1).

2. АТ Starlink по сути представляют собой фазированные антенные решетки (ФАР) с электронным управлением лучом диаграммы направленности антенны (ДНА), позволяющие сопровождать КА по мере их пролета над АТ и оперативно переключаться с одного КА на другой по мере восхода над горизонтом одних КА и заходом за горизонт других КА. ФАР АТ позволяет формировать ДНА от 25° по углу места и выше (рис. 1). Соответственно рабочими углами ДНА АТ являются углы на КА $\pm 60^\circ$ от вертикали. Кроме того, АТ оснащен механическим приводом, позволяющим наклонять ФАР так, чтобы ее плоскость была близка к перпендикуляру по отношению к направлению на КА (рис. 2).

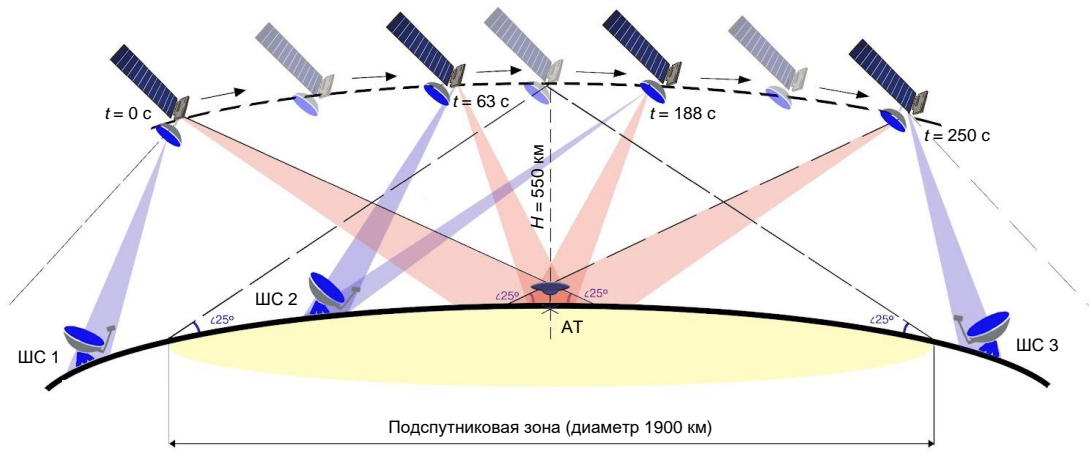


Рис. 1. Сопровождение АТ со стороны КА [1]

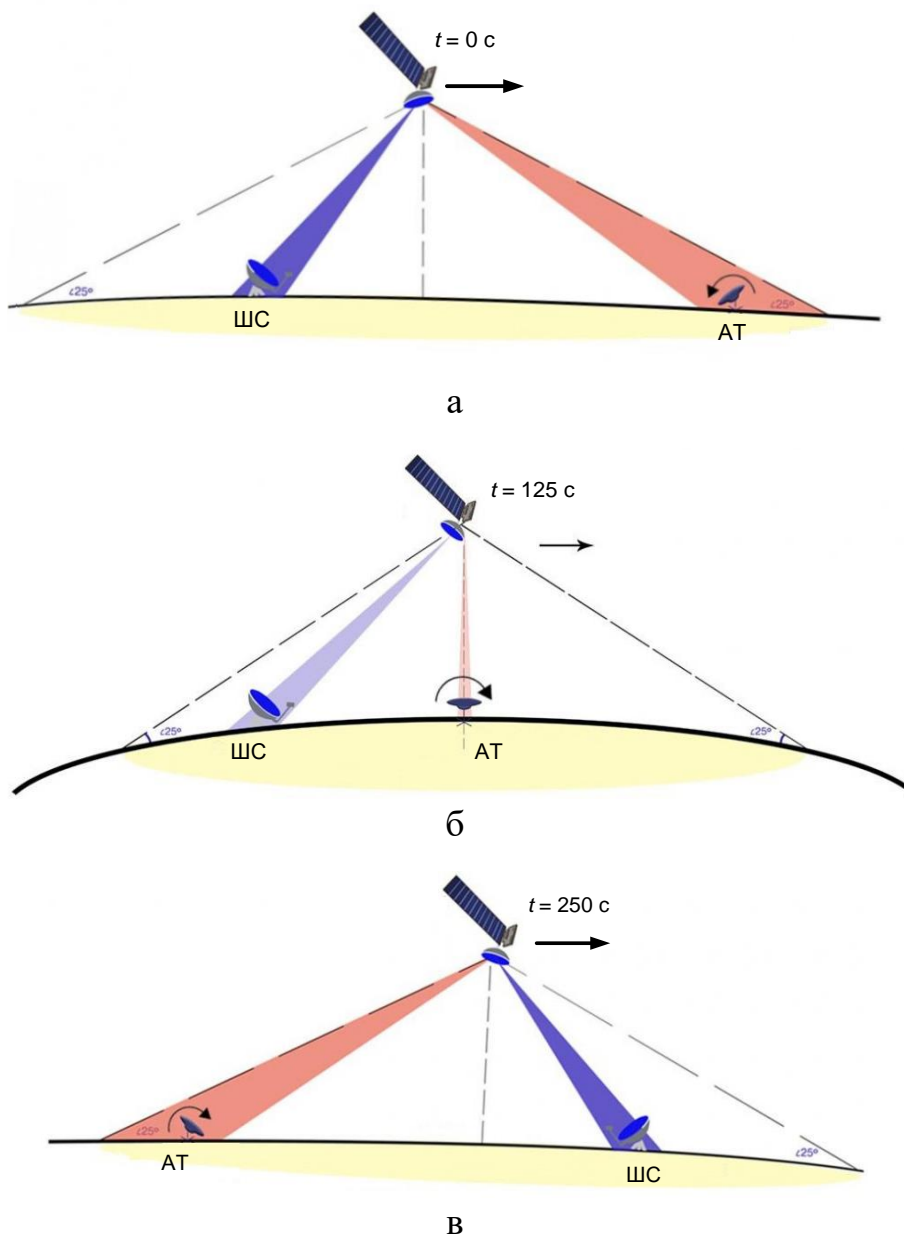


Рис. 2. Изменение по углу места антенны АТ при наведении ее на КА [1]

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

Параметр	UT-1		UT-2		ESIM ¹	
	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 антенны – передающей антенны	0,48 (одна ФАР на прием и передачу) КИП ³ =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 ⁴	
Усиление антенны, дБи: – приемной антенны – передающей антенны	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
ЭИИМ ⁵ , 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					

Примечания:

¹ Информация по ESIM дана по данным из заявки SpaceX в FCC и может отличаться от ТТХ конечного изделия;

² ДНА – диаграмма направленности антенны;

³ КИП – коэффициент использования на передачу;

⁴ н/д – нет данных;

⁵ ЭИИМ – эффективная изотропно излучаемая мощность.

3. ФАР AT Starlink позволяет формировать ДНА с достаточно узким главным лепестком – до $5,5^\circ$, при этом анализ формы ДНА (рис. 3) для различных углов отклонения главного луча ДНА показывает быстрое убывание усиления антенны по боковым лепесткам относительно главного луча. Так для боковых лепестков ДНА, расположенных на $\pm 20^\circ$ от направления главного луча

коэффициент усиления снижается примерно на 24 дБи (с 34 до 10 дБи); для боковых лепестков ДНА, расположенных на $\pm 40^\circ$ и далее от направления главного луча – на 34 дБи (с 34 до 0 дБи) [1].

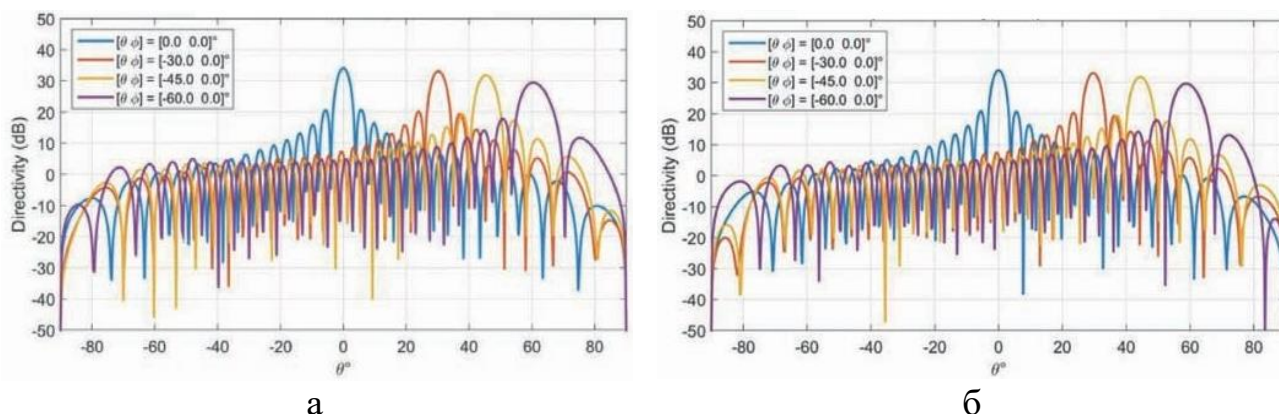


Рис. 3. ДНА АТ UT-2, передающего на частоте 14,125 ГГц, при различных значениях угла места при наведении ДНА на КА: а – «прямое» сечение ФАР; б – «косое» сечение ФАР [1]

4. В АТ Starlink реализована технология АСМ (Adaptive Coding and Modulation) обеспечивающая адаптивную смену используемого сигнала и скорости кодирования помехоустойчивого кода FEC (Forward Error Correction) в зависимости от показателя ОСП на входе АТ [1]. В материалах компании SpaceX точно не раскрываются используемые сигналы и скорости кодирования для схемы АСМ. Однако указывается что при организации абонентских линий используются сигналы от BPSK до 64QAM. Можно предположить, что используемые в ССС Starlink сигнально-кодовые конструкции аналогичны сигнально-кодовым конструкциям, определенным в стандарте DVB-S2x [3], а также сигнально-кодовым конструкциям, используемым в других ССС – см. таблицу 2. При этом, среднее значение ОСП на входе типового приемника АТ Starlink, полученное в ходе опытной эксплуатации системы в нормальных условиях составляет порядка 11,5-12,5 дБ [1].

Таблица 2 – Сигнально-кодовые конструкции, получившие широкое распространение в ССС [3, 4]

Тип сигнала	Кодовая скорость FEC	Минимально требуемое значение ОСП на входе приёмника, дБ
BPSK	0,5	-10
QPSK	0,5	1
8PSK	0,75	7,91
8PSK	0,833	9,35
16APSK	0,666	8,97
16APSK	0,83	11,61
16APSK	0,88	12,89
32APSK	0,75	12,73
64QAM	0,772	более 17
64QAM	0,873	более 17
64QAM	0,948	более 17

5. АТ Starlink типа UT-1 работает с каналами на прием 5 номиналов ширины: в 15, 30, 60, 120 и 240 МГц и с каналами на передачу 3 номиналов ширины: в 15, 30 и 60 МГц в диапазонах каналов «вверх»/«вниз» 14-14,5 / 10,7-12,7 ГГц. При этом назначение конкретных используемых частот и полосы каналов для каждого АТ производится по командам из центра мониторинга и управления сетью NCMC (network control and monitoring center). Центр NCMC опрашивает каждый АТ и шлюзовую станцию (ШС) в CCC Starlink не реже чем один раз в 100 мс, проводит оценку их работоспособности и мощности излучения и, при необходимости, дает команды на изменение режима организации связи. ШС опрашивается через наземную сеть, а АТ посредством передачи служебных пакетов через КА [1].

6. Вся поверхность Земли в CCC Starlink разделена на ячейки диаметром 24 км (рис. 4). Площадь такой ячейки составляет 379,6 км². В каждой такой ячейке, по расчетам SpaceX, предполагается обслуживать 125-130 активных АТ. Количество ячеек в подспутниковой зоне КА, находящегося на орбите с высотой 550 км составляет порядка 7 470 шт. На борту каждого КА Starlink имеется 4 ФАР (одна ФАР работает на прием, а три – на передачу) которые для абонентских каналов «вниз» формирует от 3 до 48 лучей. Эти лучи последовательно обходят ячейки (рис. 5), при этом сначала обслуживаются ячейки, находящиеся с краю подспутниковой зоны, а в дальнейшем – ячейки, расположенные к центру подспутниковой зоны. Это обусловлено тем, что лучи КА, ориентированные на край подспутниковой зоны, покрывают большее количество ячеек, чем лучи, ориентированные в ее центр (рис. 6).

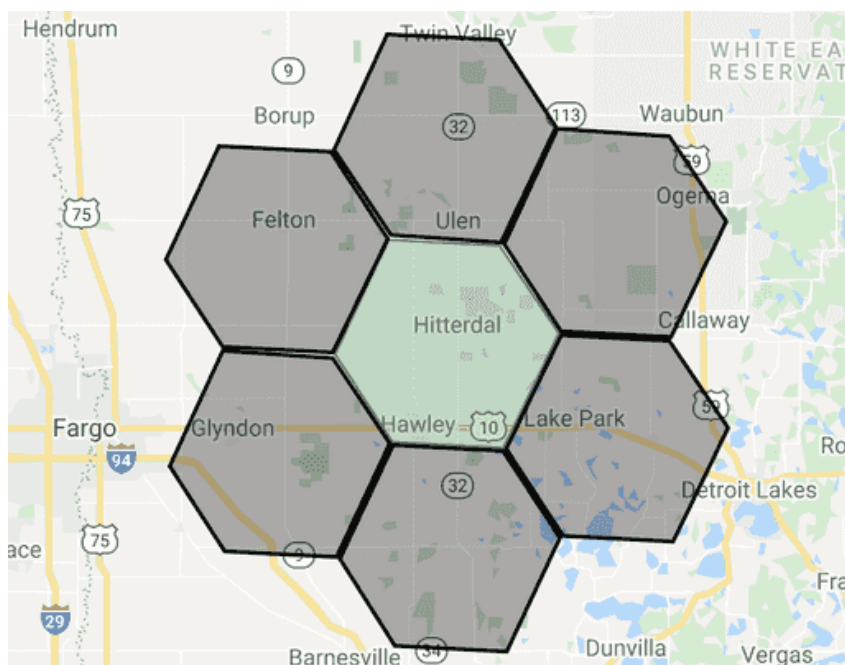


Рис. 4. Ячейки обслуживания («cells») CCC Starlink [1]

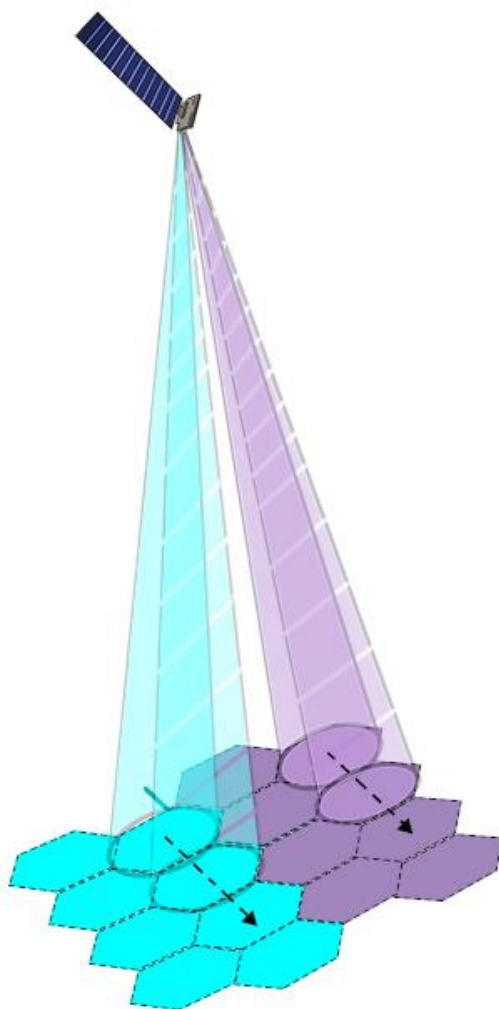


Рис. 5. Переключение лучей КА Starlink при обслуживании ячеек в подспутниковой зоне [1]

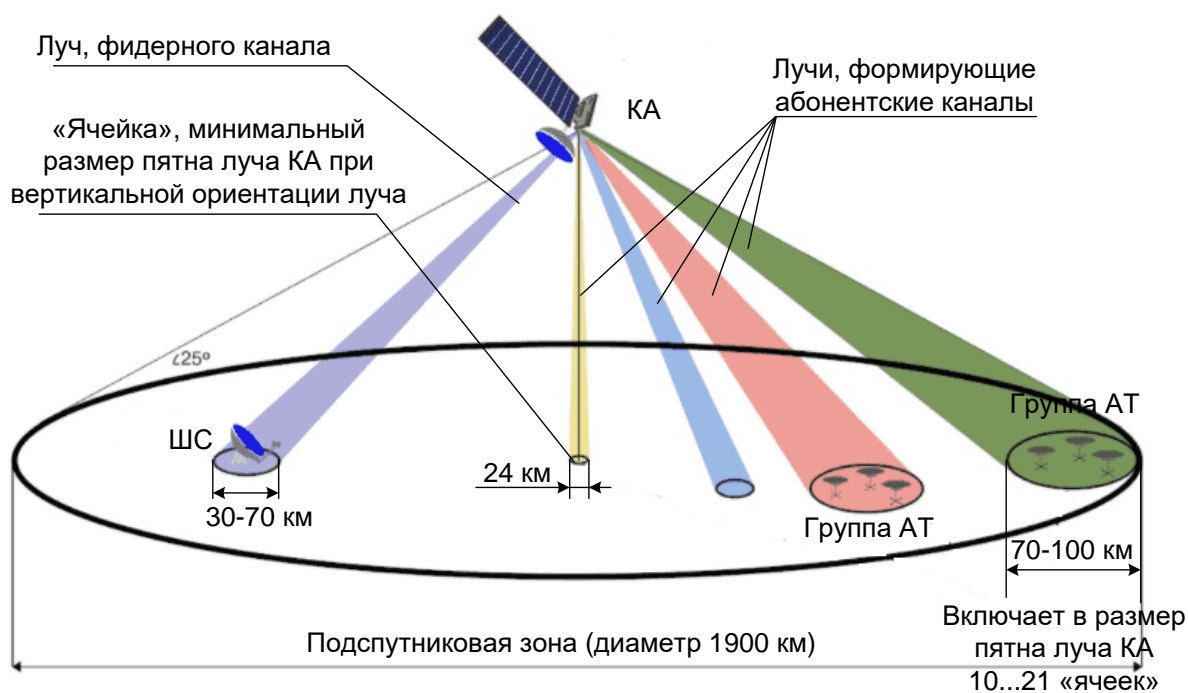


Рис. 6. Формирование лучей КА Starlink в подспутниковой зоне [1]

Такой подход к обслуживанию ячеек и АТ в них, приводит к тому что АТ не обмениваются с КА данными постоянно. Они обмениваются с КА данными только в относительно короткое время, когда луч КА наводится на ячейку в которой размещен этот АТ. Длительность этого времени пропорционально количеству ячеек в подспутниковой зоне, в которых находятся активные АТ. Одним из способов повышения скорости «обхода» ячеек в подспутниковой зоне, компания SpaceX видит в группировании АТ малыми группами, а также приоритетное и более частое обслуживание ячеек с высокой плотностью АТ.

2. Пространственная доступность АТ Starlink для потенциальных источников ПП

Для возможности создания какого-либо затруднения связи в отношении АТ Starlink со стороны потенциальных источников ПП нужно обеспечить пространственную доступность – то есть создать условия в которых излучение источника ПП попадет в главный лепесток ДНА АТ, либо, если это невозможно, в боковые лепестки ДНА АТ, усиление которых достаточно для значимого усиления помехового сигнала и последующего снижения значения ОСП на входе приемника.

Обеспечение пространственной доступности главного лепестка АТ Starlink для потенциального источника ПП осложняется следующими факторами:

- 1) очень узкой шириной главного лепестка ДНА АТ (от $3,5^\circ$ до $5,5^\circ$);
- 2) чрезвычайно быстрым перемещением главного лепестка ДНА АТ по небосклону (250 с «из конца в конец» при углах места видимости КА не менее 25° над горизонтом) вследствие необходимости сопровождения пролетающего над ним КА в процессе организации сеанса связи;
- 3) квази-случайным переключением главного лепестка ДНА АТ с одного видимого КА на другой КА по командам из центра NSMC, передаваемых через КА на АТ.

Совместное влияние факторов 1 и 3 делают чрезвычайно сложным вскрытие направленности главного лепестка ДНА АТ и попадание в него источника ПП, а совместное влияние факторов 2 и 3 делает фактически невозможным удержание источника ПП в главном лепестке, даже при наличии проведенных расчетов радиовидимости АТ и КА с учетом известного местоположения первых и баллистической структуры вторых. В настоящее время отсутствуют какие-либо воздушные или космические носители источников ПП, которые могли бы двигаться с такой же угловой скоростью что и главный луч ДНА АТ продолжая оставаться в нем, за исключением КА находящихся на той же или чуть более высокой/низкой орбите (в пределах нескольких километров) чем и КА Starlink с которым организуется сеанс связи.

Итоговым выводом является следующее – на современном этапе развития средств радиоэлектронного мониторинга и носителей источников ПП невозможно ввести и удержать источник ПП в главном луче ДНА АТ.

Рассмотрим вопрос пространственной доступности через боковые лепестки АТ Starlink. Обеспечение пространственной доступности АТ Starlink че-

рез боковые лепестки для потенциального источника ПП осложняется следующим:

1) вышеуказанными факторами быстрого перемещения главного лепестка ДНА АТ по небосклону, а также квази-случайным переключением главного лепестка ДНА АТ с одного видимого КА на другой КА;

2) быстрым убыванием усиления антенны АТ по боковым лепесткам относительно главного луча – см. рис. 3;

3) оснащением АТ механическим приводом, позволяющим наклонять ФАР так, чтобы ее плоскость была близка к перпендикуляру по отношению к направлению на КА (рис. 2);

4) работой АТ в Ku диапазоне, для которого характерна практически прямолинейное распространение радиоволн в зоне прямой радиовидимости КА, без формирования многолучевости или переотражений при прохождении радиоволн ионосферы Земли.

Анализ коэффициента усиления антенны (рис. 3) АТ UT-2 показал следующее. По боковым лепесткам относительно главного луча для боковых лепестков ДНА, расположенных от 0° до $\pm 5^\circ$ от направления главного луча, коэффициент усиления снижается примерно на 14 дБи; от $\pm 5^\circ$ до $\pm 20^\circ$ от направления главного луча – примерно на 24 дБи; от $\pm 20^\circ$ до $\pm 40^\circ$ от направления главного луча – примерно на 30 дБи, а для боковых лепестков ДНА, расположенных на $\pm 40^\circ$ и далее от направления главного луча – на 34 дБи. Эти значения примерно соблюдаются для отклонения главного луча АТ во всем рабочем диапазоне углов $\pm 60^\circ$.

С учетом этого и вышеуказанных факторов, по всей видимости, типичной будет ситуация, в которой ориентация главного лепестка антенны источника ПП в направлении на АТ Starlink (с учетом быстрого перемещения и квази-случайного перемещения главного лепестка ДНА АТ) будет попадать в боковые лепестки ДНА АТ расположенные за $\pm 40^\circ$ от направления главного луча, что соответствует необходимости эквивалентного повышения мощности ПП на +34 дБ, относительно случая нахождения источника ПП в главном лепестке ДНА АТ. В отдельных случаях, при благоприятном стечении обстоятельств, могут возникать ситуации, когда вследствие сопровождения главным лепестком АТ пролетающего над ним КА, источник ПП кратковременно будет оказываться в зоне от $\pm 5^\circ$ до $\pm 20^\circ$ или от $\pm 20^\circ$ до $\pm 40^\circ$ от направления главного луча. Для таких случаев необходимость эквивалентного повышения мощности ПП составит «всего» на +14 дБ и +24 дБ, относительно случая нахождения источника ПП в главном лепестке ДНА АТ, соответственно.

Отдельно стоит отметить следующее. Имеются свидетельства того, что в отдельных случаях «военного» использовании АТ Starlink в целях маскировки их зачастую размещают в отверстия в почве, таким образом, чтобы плоскость антенны АТ размещалась на уровне или чуть ниже уровня земли. Такой способ размещения АТ приводит к дополнительному ослаблению усиления по боковым лепесткам ДНА АТ и соответственно затрудняет пространственную доступность АТ Starlink для источников ПП.

3. Энергетическая доступность АТ Starlink для потенциальных источников ПП

При условии наличия пространственной доступности АТ Starlink источник ПП может осуществить снижение уровня ОСП на входе приёмника до уровня ниже которого невозможно осуществить прием какого-либо полезного сигнала от КА.

Ориентируясь на данные из таблицы 1 и схему АСМ стандарта DVB-S2x можно сделать предварительный вывод, что вероятным предельным значением ОСП на входе приемника, при котором АТ Starlink использует наиболее помехозащищенную сигнально-кодую конструкцию (сигнал BPSK с помехоустойчивым кодированием FEC со скоростью кодирования 1/2) является -10 дБ. Таким образом, для подавления АТ Starlink необходимо снизить ОСП полезного сигнала на входе приемника АТ ниже этого значения. С учетом предыдущих выводов о пространственной доступности АТ для источника ПП по боковым лепесткам, для достижения этого надо обеспечить эквивалентное повышение мощности ПП в точке нахождения АТ на входе его приёмника не менее чем на +45 дБ. Для гарантированного преодоления других потенциальных мер помехозащиты в ССС Starlink с эквивалентным энергетическим запасом в 5-10 дБ эквивалентное повышение мощности ПП в точке нахождения АТ на входе его приёмника должно составлять не менее чем +50...+55 дБ.

Обеспечение такого уровня энергетической доступности АТ Starlink для источников ПП осложняется следующими факторами.

1. Низкий уровень пространственной доступности АТ Starlink для средств радиоэлектронного мониторинга (из-за всех тех же факторов, которые рассмотрены в разделе 2 данной статьи) снижает вероятность достоверного определения местоположения АТ Starlink, а, соответственно, и возможность эффективного использования направленных антенн в составе источника ПП, с высокими коэффициентами усиления. Вследствие этого, по всей видимости, в конструкции источника ПП будут применяться всенаправленные антенны, которые не обладают высокой степенью усиления на направлении на АТ и повышение энергетической доступности АТ относительно источника ПП должно будет осуществляться за счет повышения мощности передатчика ПП, что является не совсем рациональным решением.

2. Дополнительно к вышеуказанному надо учесть возможность наличия значительных расстояний и необходимость обеспечения условий прямой радиовидимости между АТ и источником ПП. Это приводит к тому, что, во-первых, источник ПП должен быть размещен на высотной платформе (по всей видимости, авиационной или космической), для которых размещение источника ПП высокой мощности может служить причиной многочисленных проблем электромагнитной совместимости (ЭМС) с штатным бортовым оборудованием, во-вторых, мощность ПП будет убывать пропорционально квадрату расстояния до АТ, что резко ограничивает рабочий радиус подавления АТ. Возможно для размещения источника ПП следует использовать аэродинамические привязные высотные платформы, например такие, как описаны в материалах [15].

3. В соответствии с таблицей 1 указанное выше снижение ОСП нужно произвести в достаточно большой полосе частот полезного сигнала – до 240 МГц включительно, вследствие того, что АТ Starlink работает с приемными каналами 5 номиналов ширины: в 15, 30, 60, 120 и 240 МГц. Необходимость обеспечения эквивалентного повышения мощности ПП в точке нахождения АТ на входе его приёмника на значения +50...+55 дБ в столь большой полосе частот ставит под сомнение возможность применения современных типовых источников ПП [16-18], формирующих преимущественно заградительные шумовые помехи и шумовые помехи, прицельные по частотам полезного сигнала.

4. Вместо подавления всей полосы частот полезного сигнала в 240 МГц более рациональным может быть подавление узкополосных пилот-сигналов, используемых в ССС Starlink для обозначения факта наличия КА над АТ, а также для синхронизации и отслеживания доплеровского сдвига частот в OFDM-конструкции полезного сигнала (рис. 7, 8).

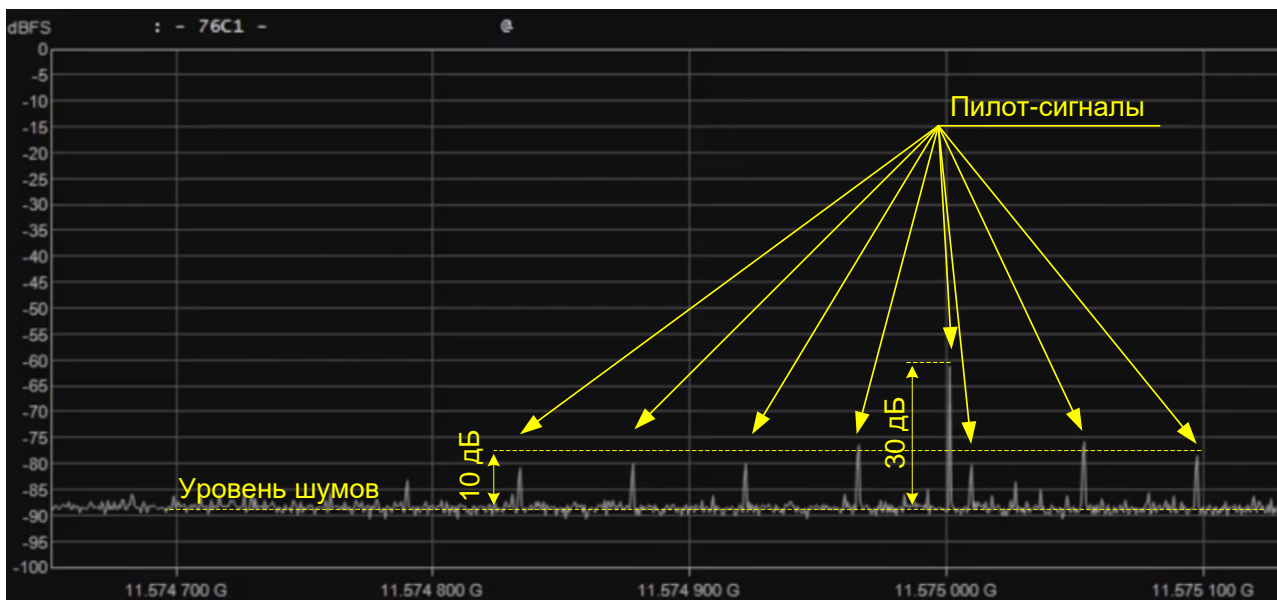


Рис. 7. Пилот-сигналы в абонентских каналах «вниз» в ССС Starlink [19]

Вместе с тем узкополосные пилот-сигналы обладают энергетическим запасом от 10 до 35 дБ по отношению к уровню полезного сигнала (см. рис. 7). Таким образом, для их подавления необходимо обеспечение эквивалентного повышения мощности ПП в точке нахождения АТ на входе его приёмника на значения +85...+90 дБ.

Вышеуказанные факторы свидетельствуют о том, что для гарантированного подавления АТ Starlink по боковым лепесткам нужно обладать мощными источниками ПП с направленными антеннами, размещенными на высотных платформах (желательно, привязных геостационарных стратосферных платформах с штатным источником питания, например таких, какие описаны в [15]) обладающих ЭМС с другим бортовым оборудованием. Эти источники ПП должны обеспечивать эквивалентное повышения мощности ПП в точке нахождения АТ на входе его приёмника на значения порядка +85...+90 дБ в зоне прямой радиовидимости с учетом дальности распространения ПП. Тип формируе-

мых ПП – узкополосные, прицельные по частоте пилот-сигналов абонентских каналов «вниз» ССС Starlink.

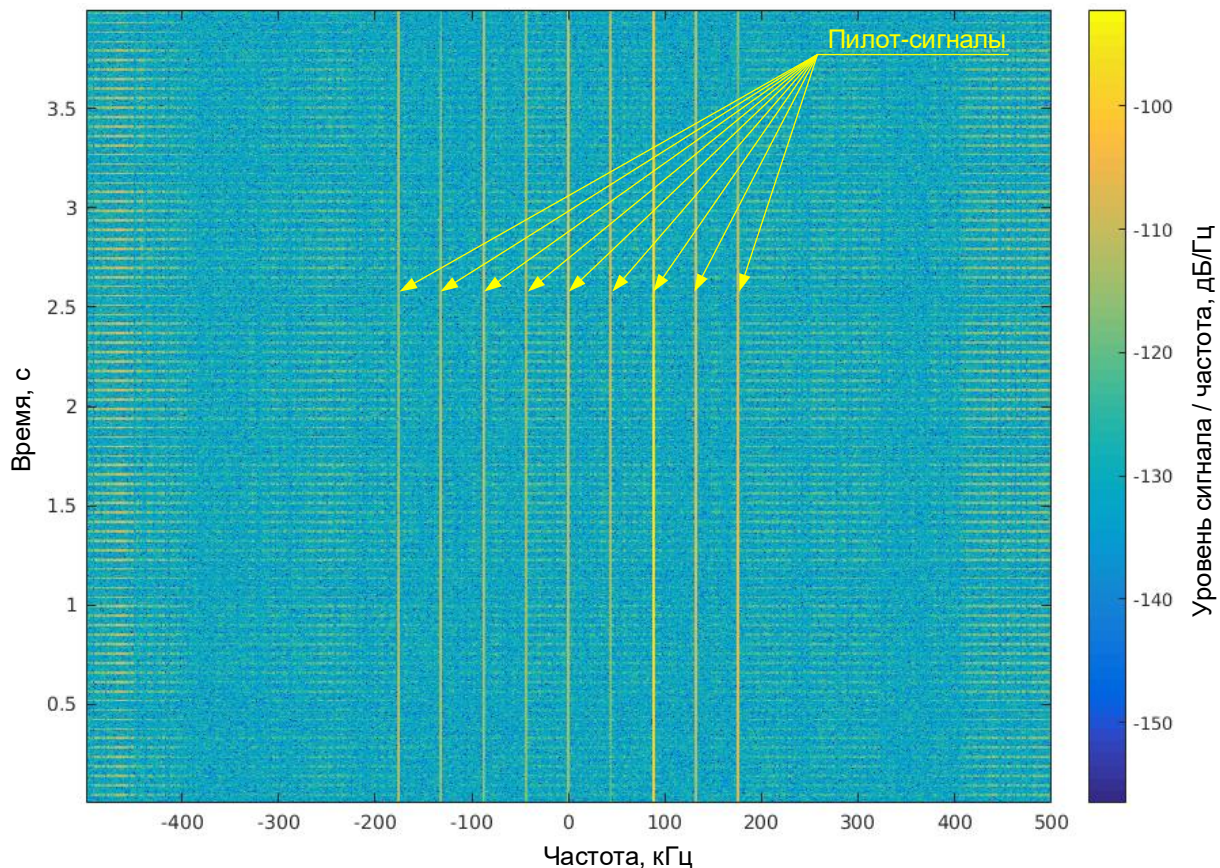


Рис. 8. Спектрограмма с пилот-сигналами в абонентских каналах «вниз» ССС Starlink после коррекции доплеровского сдвига и смещения несущей частоты [20]

4. Временная доступность АТ Starlink для потенциальных источников ПП

Особенностью ССС Starlink является то, что КА не обслуживают всю подспутниковую зону целиком, за то время пока они пролетают над ней. Вместо этого лучи, формируемые КА, поочередно обслуживают отдельные группы ячеек, от края подспутниковой зоны к ее центру. При этом отдельная ячейка может быть обслужена лучами нескольких КА (рис. 5, 6). Как следствие – информационный обмен между АТ и КА ведется не постоянно, а только в то время, когда луч КА обслуживает ту ячейку в которой находится этот АТ. Длительность информационного обмена между АТ и КА зависит от:

- количества ячеек с активными АТ в подспутниковой зоне;
- количества лучей, формируемых каждым КА;
- регламента последовательности обхода лучами ячеек подспутниковой зоны;
- количества ячеек, попадающих в размер пятна луча (у края подспутниковой зоны – таких ячеек больше, в центре – одна ячейка);
- количества КА, которые могут обслуживать ячейку одновременно.

Приняв допущение, что количество ячеек в подспутниковой зоне равно 7 470 шт [1], что все ячейки имеют в своем составе активные АТ, что лучи КА равномерно и безприоритетно обслуживают все ячейки в подспутниковой зоне, а размер пятна луча равен 10 ячейкам, получим примерный процент времени связи произвольного АТ с КА в зависимости от количества лучей, формируемых КА, и от количества КА, которые могут обслуживать ячейки одновременно.

Таблица 2 – Процент доли времени, в течении которого АТ обменивается данными с КА в зависимости от количества лучей, формируемых КА, и количества КА, которое может обслуживать ячейки одновременно

		Кол-во КА, которые могут обслуживать ячейки одновременно			
		1	2	3	4
Кол-во передающих лучей «вниз», формируемых одним КА	3	0,4%	1%	1%	2%
	6	1%	2%	2%	3%
	8	1%	2%	3%	4%
	9	1%	2%	4%	5%
	16	2%	4%	6%	9%
	24	3%	6%	10%	13%
	48	6%	13%	19%	26%

Анализ данной таблицы показывает, что помимо сложности с пространственной и энергетической доступностью АТ Starlink характерны затруднения и с временной доступностью в отношении постановки ПП, т.к. подавляющую часть своего времени функционирования АТ не принимает и не передает данные, а фактически простаивает в ожидании пока луч КА обслужит его ячейку.

Для повышения временной доступности источника ПП в отношении АТ целесообразно использовать средства радиомониторинга, размещенные в той же группе ячеек, покрываемых одним пятном луча, что и подавляемые АТ. Средства радиомониторинга будут фиксировать моменты времени, когда лучи КА начинают обслуживать ячейки с этими АТ. После этого источник ПП должен переводиться в режим активного излучения. Момент начала обслуживания тех или иных ячеек можно фиксировать по росту уровня пилот-сигналов КА (см. рис. 7) в этих ячейках, а момент окончания – по их затуханию.

Выводы

Подводя итог вышесказанному можно сделать вывод о довольно высокой помехозащищённости АТ Starlink ввиду их низкой пространственной, энергетической и временной доступности для потенциальных типовых источников ПП [16-18]. На современном уровне развития теории и практики радиотехники задача постановки высокоэффективных ПП гарантировано подавляющих ССС Starlink является сложной и нетривиальной научно-технической задачей не имеющей простого решения.

Вместе с тем указанный вывод в своем большинстве относится к «классическим» ПП, представляющим собой помеховые радиосигналы. Глубокий

анализ ССС Starlink [1] показывает, что эта система может оказаться более «восприимчивой» к новому типу ПП, которые являются прицельными по особенностям функционирования внутренних протоколов связи и уязвимостям системы. Именно такие типы ПП и возможности их использования против сетей цифровой радиосвязи, в том числе и против ССС, рассмотрены в работах [7, 12, 21-28]. К наиболее простым типам таких ПП относятся следующие.

1. Создание большого количества виртуальных/реальных копий или ложных АТ в подавляемых ячейках с целью их перегрузки активными абонентами.

2. Создание виртуальных/реальных копий АТ, передающих «пустую» информацию, подключаемых к КА его в подспутниковой зоне с целью исчерпания связного ресурса КА.

3. Формирование ПП, прицельных по структуре сигнала и процедурам установления соединения с КА, с целью нарушения процессов подключения АТ к КА, а также процедур хэндовера АТ между КА.

4. Формирование динамически изменяемой сигнально-помеховой обстановки с целью формирования нестационарных и переходных режимов функционирования соединения КА–АТ, в которых услуги связи оказываются с низкой эффективностью.

5. Запись и ретрансляция ложных пилот-сигналов с дальнейшей инициацией подключения АТ к ложным имитаторам КА.

6. Запись и ретрансляция с большей энергетикой ПП, прицельных по структуре сигнала штатного соединения КА–АТ, с целью навязать ложный информационный обмен в соединении.

7. Срыв синхронизации приема, за счет постановки ПП, прицельной по времени прихода синхронизирующих сигналов, заголовка кадров и т.д.

Общей особенностью этих новых типов ПП является то, что они рассматривают ССС Starlink, прежде всего, не как радиотехническую систему, а как компьютерную систему, которой характерны определенные протоколы аутентификации абонентов, протоколы адресации и установления соединений, протоколы роуминга и хэндовера АТ между КА и т.д. Необходимо отметить, что способы формирования подобных ПП лежат в большей степени ближе к области информационного противоборства, чем к области радиотехники и в данной работе, по отношению к решению задачи оценки помехозащищенности ССС Starlink, не рассматриваются.

Литература

1. 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

2. Макаренко С. И. Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2020. – 337 с.

3. Белов С. П., Белов А. С., Белов А. С., Коськин А. В., Маторин С. И., Рачинский С. А. О применении сигнальных методов помехозащищенности в

спутниковых системах связи // Информационные системы и технологии. 2018. № 6 (110). С. 95-105.

4. Белов С. П., Белов А. С., Белов А. С., Маторин С. И., Рачинский С. А. О повышении помехозащищенности спутниковых телекоммуникационных систем связи // Информационные системы и технологии. 2020. № 2 (118). С. 13-19.

5. Михайлов Р. Л. Помехозащищенность транспортных сетей связи специального назначения. Монография. – Череповец: ЧВВИУРЭ, 2016. – 128 с.

6. Паршуткин А. В., Святкин С. А., Бучинский Д. И. Оценка влияния непреднамеренных нестационарных помех на функционирование системы спутниковой связи с частотновременным разделением каналов // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 7-8. С. 28-33. DOI: 10.21778/2218-5453-2020-7-8-28-33

7. Паршуткин А. В., Бучинский Д. И. Модель функционирования канала спутниковой связи в условиях искажений служебной части кадров нестационарными помехами // Информатика и автоматизация. 2020. Т. 19. № 5. С. 967-990. DOI: 10.15622/ia.2020.19.5.3

8. Паршуткин А. В., Маслаков П. А. Помехоустойчивость каналов связи с амплитудно-фазовой модуляцией к воздействию непреднамеренных нестационарных помех // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2019. № 11-12 (137-138). С. 96-101.

9. Паршуткин А. В., Маслаков П. А. Исследование помехоустойчивости современных стандартов спутниковой связи к воздействию нестационарных помех // Труды СПИИРАН. 2017. № 4 (53). С. 159-177.

10. Пантенков Д. Г. Оценка помехоустойчивости бортовых ретрансляторов космических аппаратов и земных станций спутниковой связи при воздействии преднамеренных помех // Успехи современной радиоэлектроники. 2021. Т. 75. № 7. С. 48-63.

11. Агиевич С. Н., Борисов В. В., Дворников С. В., Луценко С. А. Предложения по оценке эффективности преднамеренных помех элементам синхронизации сигналов спутниковых систем // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2019. № 5-6 (131-132). С. 114-120.

12. Луценко С. А. Подход к расчету энергетического выигрыша при постановке помех системе цикловой синхронизации спутниковых линий связи // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 3. С. 3. DOI: 10.30898/1684-1719.2019.3.14

13. EN 302 307-2 – V1.3.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2: DVB-S2 Extensions (DVB-S2X). 2021. – URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/30230702/01.03.01_20/en_30230702v010301a.pdf (дата обращения 03.05.2023).

14. Пехтерев С. В. Пропускная способность группировки StarLink в США и оценка ее потенциальной абонентской базы // Технологии и средства связи. 2022. № S1. С. 69-74.

15. Гиrolёт – летательный аппарат с инерциальным вертикальным взлётом и посадкой // Гиронавтика [Электронный ресурс], 2022. – URL: <https://gyronautica.ru/rnd/platforms/> (дата обращения 03.05.2023).

16. Оружие и технологии России: Энциклопедия XXI век. Том. 13. Системы управления, связи и радиоэлектронной борьбы / Под общ. ред. С. Иванова. – М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2006. – 686 с.

17. Перунов Ю. М., Куприянов А. И. Методы и средства радиоэлектронной борьбы. – М.: Инфра-Инженерия, 2021. – 376 с.

18. Михайлов Р. Л. Радиоэлектронная борьба в Вооруженных силах США: военно-теоретический труд. – СПб.: Научное издание, 2018. – 131 с.

19. Observed Starlink Beacons 11.575 GHz, is there any info on what sort of information these contain? // reddit.com [Электронный ресурс], 2022. – URL: https://www.reddit.com/r/StarlinkEngineering/comments/wldlnz/observed_starlink_beacons_11575ghz_is_there_any/ (дата обращения 03.05.2023).

20. Receiving starlink satellite beacons // AMSAT-DL [Электронный ресурс], 2021. – URL: <https://forum.amsat-dl.org/index.php?thread/3981-receiving-starlink-satellite-beacons/> (дата обращения 03.05.2023).

21. Макаренко С. И. Подавление пакетных радиосетей со случайным множественным доступом за счет дестабилизации их состояния // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 9. С. 2. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep11/4/text.pdf> (дата доступа 03.05.2023).

22. Макаренко С. И. Проблемы и перспективы применения кибернетического оружия в современной сетевцентрической войне // Спецтехника и связь. 2011. № 3. С. 41-47.

23. Макаренко С. И. Оценка качества обслуживания пакетной радиосети в нестационарном режиме в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов // Журнал радиоэлектроники. № 6. 2012. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun12/9/text.pdf> (дата обращения 03.05.2023).

24. Перегудов М. А., Уманский А. Я., Храмов В. Ю., Ханов Э. Б. Способ синтеза воздействия и его реализации на информационно-техническое средство // Патент на изобретение 2789753 С2, 07.02.2023.

25. Перегудов М. А. Вероятностная модель функционирования канального уровня сети цифровой радиосвязи в условиях деструктивных воздействий // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 1. С. 64-89. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-1-64-89.

26. Перегудов М. А., Семченко И. А. Оценка эффективности случайного множественного доступа к среде типа Aloha при голосовых соединениях, передаче служебных команд, текстовых сообщений и мультимедийных файлов в условиях деструктивных воздействий // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18. № 4. С. 887-911. DOI: 10.15622/sp.2019.18.4.887-911

27. Бойко А. А., Дьякова А. В., Храмов В. Ю., Яковлев Р. С., Перегудов М. А. Способ функционального поражения информационно-технических средств // Патент на изобретение RU 2591050 С2, 10.07.2016.

28. Бойко А. А., Перегудов М. А., Дьякова А. В. Способ подавления сети связи // Патент на изобретение RU 2549352 С1, 27.04.2015.

References

1. 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

2. Makarenko S. I. *Modeli sistemy svyazi v usloviyah prednamerennyh destabilizirujushchih vozdeystvij i vedenija razvedki. Monografija [Models of communication systems in conditions of deliberate destabilizing impacts and intelligence. Monograph]*. Saint Petersburg, Naukoemkie Tehnologii Publ., 2020. 337 p. (in Russian).

3. Belov S. P., Belov Al. S., Belov An. S., Koskin A. V., Matorin S. I., Rachinskij S. A. On the application of signal methods of noise immunity in satellite communication systems. *Information systems and technologies*, 2018, vol. 110, no. 6, pp. 95-105 (in Russian).

4. Belov S. P., Belov Al. S., Belov An. S., Matorin S. I., Rachinskij S. A. On increasing satellite interference protection telecommunication communication systems. *Information systems and technologies*, 2020, vol. 118, no. 2, pp. 13-19 (in Russian).

5. Mikhailov R. L. *Pomekhozashchishchennost' transportnykh setei svyazi spetsial'nogo naznachenii. Monografiia [Noise immunity of transport networks for special purposes. Monograph]*. Cherepovets, The Cherepovets higher military engineering school of radio electronics, 2016. 128 p. (in Russian).

6. Parshutkin A. V., Svyatkin S. A., Buchinsky D. I. Evaluation of influence of unintentional non-stationary interference on functioning of satellite communication system with multifrequency time-division multiple access. *Questions of radio-electronics*, 2020, no. 7-8, pp. 28-33 (in Russian). DOI: 10.21778/2218-5453-2020-7-8-28-33

7. Parshutkin A. V., Buchinsky D. I. Model of satellite communication channel functioning under conditions of disturbances of service part of frames by unsteady interference. *Informatics and Automation*, 2020, vol. 19, no. 5, pp. 967-990 (in Russian). DOI: 10.15622/ia.2020.19.5.3

8. Parshutkin A. V., Maslakov P. A. Noise stability of satellite communication channels with amplitude-phase modulation to exposure to urged unsteady interference. *Enginery Problems. Series 16. Anti-Terrorist Engineering Means*, 2019, vol. 137-138, no. 11-12, pp. 96-101 (in Russian).

9. Parshutkin A. V., Maslakov P. A. Study of the noise immunity of modern standards of satellite communications to the impact of non-stationary interference. *SPIIRAS Proceedings*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 159-177 (in Russian).

10. Pantenkov D. G. Estimating the noise immunity of spacecraft on-board repeaters and satellite earth stations under the influence of intentional interference. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2021, vol. 75, no. 7, pp. 48-63 (in Russian).

11. Agiyevich S. N., Borisov V. V., Dvornikov S. V., Lutsenko S. A. Suggestions for evaluating the effectiveness of jamming to satellite signal synchronization elements. *Enginery Problems. Series 16. Anti-Terrorist Engineering Means*, 2019, vol. 131-132, no. 5-6, pp. 114-120 (In Russian).

12. Lutsenko S. A. The approach to calculating the energy gain in the formulation of interference to the frame alignment system of satellite communication lines. *Radio Electronics Journal*, 2019, no. 3. pp. 3. (in Russian). DOI: 10.30898/1684-1719.2019.3.14

13. EN 302 307-2– V1.3.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2: DVB-S2 Extensions (DVB-S2X). 2021. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/30230702/01.03.01_20/en_30230702v010301a.pdf (accessed 03 May 2023).

14. Pekhterev S. V. The bandwidth of the StarLink constellation and the assessment of its potential subscriber base in USA. *Tekhnologii i sredstva svyazi [Technologies and means of communication]*, 2022, no. S1, pp. 69-74 (in Russian).

15. Giroljot – letatel'nyj apparat s inercial'nym vertikal'nym vzljotom i posadkoj [Gyrolet – an aircraft with inertial vertical takeoff and landing]. *Gironavtika*, 2022. Available at: <https://gyronautica.ru/rnd/platforms/> (accessed 03 May 2023) (in Russian).

16. *Russia's Arms and Technologies: The XXI Century Encyclopedia. Volume 13. Control, Communication and Radio Electronic Warfare Systems*. Moscow, Oruzhie i tehnologii Publ., 2006. 686 p. (in Russian).

17. Perunov Ju. M., Kuprijanov A. I. *Metody i sredstva radiojelektronnoj borby [Methods and means of electronic warfare]*. Moscow, Infra-Inzhenerija Publ., 2021. 376 p. (in Russian).

18. Mikhailov R. L. *Radioelektronnaya borba v vooruzhennyh silah SSHA: voenno-teoreticheskij trud [Electronic warfare in the US armed forces: military-theoretical work]*. Saint Petersburg, Naukoemkie tekhnologii Pabl., 2018, 131 p. (in Russian).

19. Observed Starlink Beacons 11.575 GHz, is there any info on what sort of information these contain? *reddit.com*, 2022. Available at: https://www.reddit.com/r/StarlinkEngineering/comments/wldlnz/observed_starlink_beacons_11575ghz_is_there_any/ (accessed 03 May 2023).

20. Receiving starlink satellite beacons. *AMSAT-DL*, 2021. Available at: <https://forum.amsat-dl.org/index.php?thread/3981-receiving-starlink-satellite-beacons/> (accessed 03 May 2023).

21. Makarenko S. I. The countermeasures of the radio networks with the random multiple access by changing the radionet state to non-stable. *Radio Electronics Journal*, 2011, no. 9. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/sep11/4/text.pdf> (accessed 03 May 2023) (in Russian).

22. Makarenko S. I. Problemy i perspektivy primeneniia kiberneticheskogo oruzhiia v sovremennoi setetsentricheskoi voine [Problems and prospects for the use

of cyber weapons in today's network-centric warfare]. *Specialized Machinery and Communication*, 2011, no. 3, pp. 41-47 (in Russian).

23. Makarenko S. I. Estimation of quality of service in radio network with package transmitting in unstationary mode under influence of external destructive factors. *Journal of Radio Electronics*, 2012, no.6. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jun12/9/text.pdf> (accessed 03 May 2023) (in Russian).

24. Peregudov M. A., Umanskij A. Ja., Hramov V. Ju., Hanov Je. B. Sposob sinteza vozdeystvija i ego realizacii na informacionno-tehnicheskoe sredstvo [The method of synthesis of the impact and its implementation on the information technology tool]. Patent Russia 2789753 C2, 07.02.2023.

25. Peregudov M. A. The probabilistic model of the functioning data link layer digital radio networks. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 1, pp. 64-89 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-1-64-89

26. Peregudov M. A., Semchenko I. A. evaluation of efficiency of random multiple access to Aloha type environment with voice connections, transfer of service commands, text messages and multimedia files in destructive impact conditions. *SPIIRAS Proceedings*, 2019, no. 4 (18), pp. 887-911 (in Russian). DOI: 10.15622/sp.2019.18.4.887-911

27. Bojko A. A., D'jakova A. V., Hramov V. Ju., Jakovlev R. S., Peregudov M. A. Sposob funkcional'nogo porazhenija informacionno-tehnicheskikh sredstv [The method of functional destruction of information and technical means]. Patent of Russia RU 2591050 C2, 10.07.2016.

28. Bojko A. A., Peregudov M. A., Djakova A. V. Sposob podavlenija seti svjazi [Method of suppressing the communication network]. Patent of Russia RU 2549352 C1, 27.04.2015.

Статья поступила 10 апреля 2023 г.

Информация об авторе

Макаренко Сергей Иванович – доктор технических наук, доцент. Проректор по научной работе. Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени проф. М.А. Бонч-Бруевича. Область научных интересов: сети и системы связи; радиоэлектронная борьба; информационное противоборство. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Адрес: 193232, Россия, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1.

Noise Immunity of Starlink User Terminals

S. I. Makarenko

Relevance. Providing Internet access services at high speed and with acceptable latency throughout the Earth requires the creation of low-orbit multi-satellite communication systems (SATCOM). Currently, several projects of such SatComm, for example, the Russian projects "Skif", "Marathon" and "Megafon-1440" are being developed in Russia. To substantiate technical solutions for these SATCOM, the Starlink

system can be used, which can be considered as a prototype of this Russian SATCOMs. Noise immunity is one of the most important characteristics of SATCOM, therefore, its study is an important scientific and practical task. **The aim of the paper** is to analyze noise immunity of Starlink user terminals (UT). This assessment can be used to develop initial data when modeling the influence of interference sources on Russian multi-satellite low-orbit SATCOMs and for choice of noise-proof modes of UT. Only open sources were used to make analysis noise immunity of Starlink UT. **Results and their novelty.** The element of practical novelty of the paper is the revealed general technological features of Starlink system and a preliminary assessment of its noise immunity, taking into account the spatial, temporal and energy availability of Starlink UT for potential noise sources. **Practical significance.** Technical specialists who make noise-proof modes of UT for Russian SATCOMs could use this paper. In addition, the paper will be useful to scientists who conduct research in the field of noise immunity of SATCOM.

Keywords: noise immunity, interference, interference source, intentional interference, electronic jamming, electronic warfare, user terminal, Earth station, SATCOM, multi-satellite low-orbit satellite communication system, Starlink, SpaceX.

Information about Author

Sergey Ivanovich Makarenko – Dr. habil. of Engineering Sciences, Docent. Vice-Rector for Research. The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications. Field of research: stability of network against the purposeful destabilizing factors; electronic warfare; information struggle. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Address: 193232, Russia, Saint Petersburg, Bolshevnikov prospect, d. 22, k. 1.