

# Абонентские терминалы «Starlink» как источники непреднамеренных помех для отечественных систем спутниковой связи

И. Н. Сиротин, К. Д. Сайфудинов

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

E-mail vka@mil.ru

**Аннотация.** Представлен анализ тактико-технических характеристик системы «Starlink», приведен общий порядок расчета уровня сигнала на входе радиоприемного устройства отечественных систем спутниковой связи.

**Ключевые слова:** спутниковая связь, спутниковый ретранслятор, непреднамеренные помехи, электромагнитная совместимость

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время как в различных областях гражданской деятельности, так и в военной сфере, важным фактором является использование систем спутниковой связи (ССС) имеющих глобальные зоны покрытия Земли. При этом особое значение приобретают многоспутниковые низкоорбитальные СССР, 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, представила проект обеспечения доступом в сеть Интернет всех жителей Земли на основе многоспутниковой низкоорбитальной СССР «Starlink». В начале 2018 г. компанией SpaceX были запущены первые тестовые космические аппараты (КА), а с 2020 г. СССР «Starlink» перешла в режим тестовой эксплуатации. Необходимо отметить, что в СССР «Starlink» применяется множество передовых технологических решений, ранее не применявшихся в космической связи, что делает актуальным рассмотрение этой СССР как передового прототипа других перспективных многоспутниковых низкоорбитальных СССР, разрабатываемых как в нашей стране, так и за рубежом. В Российской Федерации, к числу таких проектов можно отнести новое поколение СССР «Гонец», а также СССР, разрабатываемые в рамках проектов, «Марафон» и «Мегафон-1440». К зарубежным проектам многоспутниковых низкоорбитальных СССР относятся «Starlink» и «OneWeb» [1].

С учетом возросшего количества абонентских терминалов различных систем спутниковой связи и увеличивающейся постоянно нагрузкой радиочастотного спектра, актуальной является задача обеспечения

электромагнитной совместимости зарубежных и отечественных систем спутниковой связи.

Для предварительной оценки влияния абонентских терминалов на отечественные системы связи необходимо провести анализ тактико-технических характеристик системы спутниковой связи «Starlink», привести общий порядок расчета отношения сигнал/шум на входе радиоприемного устройства (РПУ) спутникового ретранслятора.

## II. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СССР «STARLINK»

Архитектура СССР «Starlink» схематично представлена на рис. 1. Вся поверхность Земли разбита на ячейки обслуживания (в оригинальной документации используется термин «cell» – ячейка) диаметром 24 км. Площадь такой зоны составляет 379,6 км<sup>2</sup>, а ее размер, соответствует ширине диаграммы направленности антенны (ДНА) КА при ее направлении строго вниз. В каждой ячейке, по расчетам SpaceX, предполагается обслуживать 125–130 активных АТ. Каждый КА, пролетая над соответствующей ячейкой обслуживания, обеспечивает прием/передачу данных от АТ пользователей в этой ячейке и ретрансляцию их по фидерным линиям на ШС (в оригинальной документации используется термин «Gateway»). При этом GATEWAY не обязательно должна быть расположена в самой ячейке обслуживания, для обеспечен и я ретрансляции данных от АТ этой ячейке, однако она должна обязательно быть в зоне радиовидимости КА.

Gateway, через узлы доступа PoP (Point of Presence), посредством волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), подключаются к наземной сети, а далее – к сети Интернет. В качестве наземной сети СССР «Starlink» используется там, где этой возможно, сеть Google, которая является стратегическим партнером и акционером компании SpaceX. В случае невозможности использования сети Google используются собственные или арендованные ВОЛС [1].

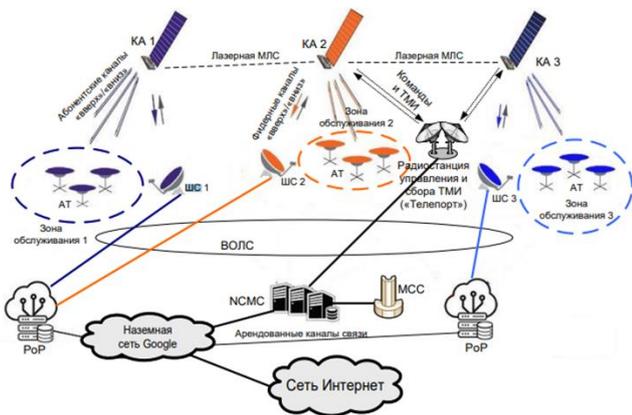


Рис. 1. Архитектура CCC «Starlink»

Частотный план CCC Starlink 1-й фазы развертывания представлен в табл. 1. Повторное использование частот в CCC достигается использованием развязки по поляризации – используется круговая поляризация с левым и правым направлениями вращения [8].

ТАБЛИЦА 1. ЧАСТОТНЫЙ ПЛАН CCC STARLINK 1-Й ФАЗЫ РАЗВЕРТЫВАНИЯ

Тип канала связи и направление приема-передачи	Диапазон рабочих частот, ГГц	Доступно МГц в одной поляризации	Количество поляризаций	Общее количество доступных экв. МГц
Направление связи «АТ-КА»:				
Линия «вверх»	14-14,5	500	1(2)*	500(1000)*
Линия «вниз»	10,7-12,7	2000	1(2)*	2000(4000)*
Направление связи «ШС-КА»:				
Линия «вверх»	27,5-29,1 29,5-30	1600 500	2	4200
Линия «вниз»	17,8-18,6 18,8-19,3	800 500	2	2600
Направление связи «Командная станция (телепорт) КА»:				
Линия управления и ТМИ «вверх»	13,85-14	150	2	300
Линия управления и ТМИ «вниз»	12,15-12,25 18,55-18,6	100 50	2	300

Первоначально для использования в бета-тестировании услуг связи CCC Starlink предоставлялся АТ UT-1. Данный терминал был основан на единой 1675-элементной ФАР, работающей поочередно на прием и на передачу. В настоящее время АТ работают только с одной поляризацией – круговой, правого вращения, однако в документах CCC Starlink, утверждается о возможности наземных АТ использовать 2 типа поляризации – левого и правого вращения. 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. Это позволяет передать соответственно 15, 30, 60, 120 и 240 Мсимв/с, что при использовании сигнала BPSK обеспечивало битовую скорость до 350 Мбит/с на прием и до 130 Мбит/с на передачу. Максимум скорости АТ был зарегистрирован при тестировании в Германии в полностью незагруженной ячейке, когда при ширине полосы «вниз» 240 МГц и 60 МГц полосы «вверх» была обеспечена скорость передачи 542 Мбит/с в канале «вниз» и 39 Мбит/с в канале «вверх». Мощность передатчика АТ UT-1 меняется в зависимости от его наклона относительно линии в зенит. В случае, когда луч ДНА направлен в зенит, мощность, выдаваемая на антенну, составляет 0,76 Вт, при предельном отклонении от вертикали – 4,06 Вт [1].

В июне 2021 г. компания SpaceX представила вторую версию АТ – UT-2 (рис. 2). К настоящему времени именно эта версия АТ является основной. При переходе от АТ UT-1 к UT-2 из основных доработок следует отметить следующее. В UT-2 приемная ФАР и передающая ФАР представляют собой отдельные антенные решетки, в отличие от единой ФАР, работающей на прием и передачу в режиме разделения по времени в АТ UT-1. Это позволяет не только обеспечить одновременный прием и передачу, но и увеличить время непрерывной работы, передающей ФАР, которое в UT-1 было ограничено ее нагревом до +50°C. Кроме того, в АТ UT-2 обеспечивается угол сканирования ФАР в пределах почти ±60° при 4 дБ [1].



Рис. 2. АТ Starlink: а – UT-1; б – UT-2



Рис. 3. Внешний вид самолетного АТ ESIM

В настоящее время данный терминал еще официально не представлен, но о его ТТХ можно судить по заявкам, которые SpaceX направила в FCC для получения разрешения на экспериментальную отработку

ESIM. Обращает на себя внимание, что, в отличие от AT UT-2, в ESIM увеличен размер приемной ФАР (площадь апертуры увеличена в 1,45 раза). Но угол сканирования аналогичен углу сканирования в UT-2, то есть не более  $\pm 60^\circ$ . По всей видимости, это отражает то, что проблема SpaceX в деле создания дешевой ФАР с сектором сканирования более  $60^\circ$  пока далека от своего практического разрешения. По заявлению SpaceX терминалы ESIM будут иметь возможности измерения и контроля своего излучения каждые 100 мс. Если оно выходит за допустимые пределы, ESIM будет самостоятельно уменьшать свой уровень излучения. Кроме этого, будет вестись дополнительный мониторинг параметров излучения ESIM со стороны центра мониторинга и управления сетью NCMC. Компания SpaceX, в документации на ESIM, дало гарантию, что будет постоянно определять местонахождение ESIM-терминала и в случае, если он попадет в воздушное пространство или территориальные воды другого государства, система автоматически перенастроит допустимые параметры излучения согласно действующим нормам для данного государства [1].

ТАБЛИЦА II. ТТХ ТЕРМИНАЛОВ UT-1, UT-2 и ESIM

Параметр	UT-1		UT-2		ESIM	
	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	
Длина волны, м	0,02		0,02		0,02	
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=0,57		0,31x0,31 м 0,31x0,31 м		0,37x0,37 м 0,31x0,31 м	
Площадь рефлектора, м <sup>2</sup>	0,18		0,14		0,18	
Апертурная эффективность, %	54		73		56	
Время работы на передачу	11%		14%		11-33%	
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				

Параметр	UT-1		UT-2		ESIM	
	Луч в зенит	Отклоненный луч	Луч в зенит	Отклоненный луч на $\pm 60^\circ$	Луч в зенит	Отклоненный луч на $\pm 60^\circ$
Мощность излучения, Вт	0,76	4,06	1,2	3,2	1,2	3,2
ЭИИМ, 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
Класс 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					
Скорость передачи данных, Мсимв/с -прием -передачи	240; 120; 60; 30; 15 60; 30; 15					

### III. ПОРЯДОК РАСЧЕТА УРОВНЯ СИГНАЛА НА ВХОДЕ РАДИОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Для расчета отношения сигнал/шум используются следующие исходные данные:  $\lambda$  – длина волны излучения ИНП, м;  $P_{изл}$  – мощность излучения ИНП, Вт;  $G_{прд}$  – коэффициент усиления передающей антенны ИНП,  $G_{прм}$  – коэффициент усиления приемной антенны СР,  $d$  – расстояние от РЭС-ИНП до текущего положения СР;  $F(\theta, \gamma, f)$  – функция ослабления (по мощности);  $F(\theta, \gamma)$  – функция ослабления, характеризующая прием сигнала от ИНП по боковому лепестку диаграммы, соответствующему по азимуту углу  $\theta$ , по углу места  $\gamma$ ,  $F_{ли}(f)$  – функция ослабления, характеризующая затухание энергии электромагнитной волны при ее распространении через ионосферу и атмосферу,  $F_{п}$  – коэффициент поляризационных потерь.

Для расчета уровня сигнала на входе РПУ СР  $P_{с вх}$  применяются следующие математические выражения:

$$h = 10 * \lg(P_c), \quad (1)$$

$$P_{с вх} = \frac{P_{изл} * G_{прд} * G_{прм} * \lambda^2}{(4 * \pi)^2 * d^2} * F(\theta, \gamma, f), \quad (2)$$

$$F(\theta, \gamma, f) = F(\theta, \gamma) * F_{ли}(f) * F_{п}, \quad (3)$$

Частные результаты расчетов

При расчетах использовались следующие исходные данные:

- по отечественному средству связи:  $G_{прд} = 20$  дБ.
- по абонентскому терминалу:  $P_{изл} = 5,2$  кВт;  $F = 14$  ГГц;  $G_{прд} = 34,6$  дБ;  $F_{ли}(f) = 5$  дБ;  $F_{п} = 3$  дБ.

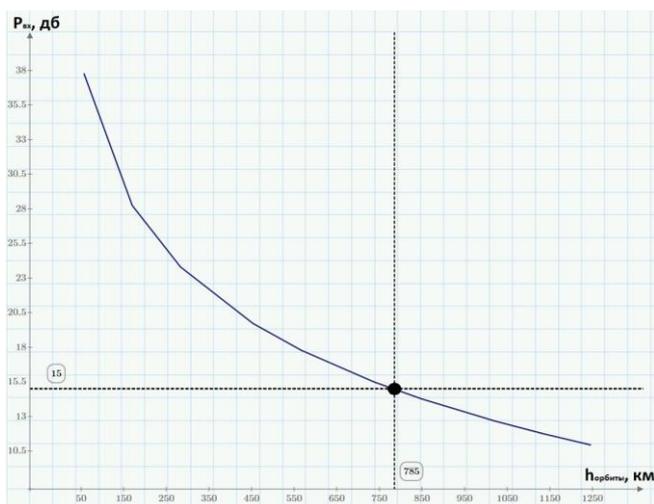


Рис. 4. Графическое представление преднамеренных помех на отечественные системы спутниковой связи

Анализ, приведенного на рис. 4 графика, показал: уровень сигнала от АТ на входе РПУ СР с высотой орбиты от 250 до 1250 км составляет от 12 до 24 дБ/Вт. При значении чувствительности РПУ СР порядка -100 дБ/Вт, АТ может оказывать негативное влияние на СР отечественных ССС, работающих в тех же или смежных частотных диапазонах.

Построенные таким образом графики для рассматриваемых АТ и СР могут использоваться следующим образом: при известной высоте орбиты СР проводится вертикальная линия, соответствующая  $h_{орбСР}$ , пересечение которой с графиком позволяет установить предварительное отношение уровня сигнала на входе РПУ СР и сравнить его с чувствительностью приемного устройства  $P_{чувст.}$ .

Если уровень сигнала  $P_{свх}$  больше  $P_{чувст.}$ , то делается вывод о том, что электромагнитная совместимость не обеспечивается и необходимо принимать организационные и (или) технические меры для устранения эффекта влияния абонентского терминала на СР.

Предварительные расчеты носят грубый характер и относятся к предварительному анализу по обеспечению электромагнитной совместимости двух радиоэлектронных средств (РЭС).

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ литературы [1]–[8] позволил определить тактико-технические характеристики ССС «Starlink», провести предварительные расчеты по обеспечению электромагнитной совместимости двух РЭС. Важно отметить, что расчеты являются грубой оценкой, которая проводится на начальном этапе при рассмотрении вопросов электромагнитной совместимости. Направлением дальнейших исследований является разработка баз данных отечественных и зарубежных систем спутниковой связи и создание программного комплекса оценки электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Описательная модель системы спутниковой связи Starlink. Пехтерев С.В., Макаренко С.И., Ковальский А.А. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sccs.intelgr.com/archive/2022-04/07-Pehterev.pdf> (дата обращения 11.01.2023).
- [2] Роскосмос и проект «Сфера» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ixbt.com/live/sw/roskosmos-i-proekt-sferasostavit-konkurenciyu-starlink-ot-ilona-maski-nedorogo.html> (дата обращения 11.01.2023).
- [3] Система безопасности ССС «Starlink» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.starlink.com> (дата обращения 11.01.2023).
- [4] Starlink или OneWeb — какой из проектов лучше и перспективнее? [Электронный ресурс]. – Режим доступа [https://club.dns-shop.ru/blog/t-326-internet/69218-starlink-ili-oneweb-kakoi-iz-proektov-luchshe-i-perspektivnee/?utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F](https://club.dns-shop.ru/blog/t-326-internet/69218-starlink-ili-oneweb-kakoi-iz-proektov-luchshe-i-perspektivnee/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F) (дата обращения 11.01.2023).
- [5] Энциклопедия Starlink [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.comnews.ru/projects/encyclopedia-starlink> (дата обращения 11.01.2023).
- [6] Эксперимент американских ученых Калифорнийского университета в Ирвине [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9541006> (дата обращения 11.01.2023).
- [7] Описательная модель системы спутниковой связи Starlink [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sccs.intelgr.com/archive/2022-04/07-Pehterev.pdf> (дата обращения 11.01.2023).