

УДК 621.396

Анализ интермодуляционных искажений сложного радиосигнала в радиофотонной линии передачи¹

^{1,2} Щербинин А. Д., ^{1,2} Белов Л. А., ² Кондрашов А. С.

¹ *Национальный исследовательский университет «МЭИ»*
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250, Российская Федерация
АО «Российские космические системы»
ул. Авиамоторная, д. 53, Москва, 111250, Российская Федерация
belovla@gmail.com, shcherbinin.ad@spacecorp.ru

Получено: 27 декабря 2019 г.

Отрецензировано: 11 января 2020 г.

Принято к публикации: 14 января 2020 г.

Аннотация: *Проведен анализ искажений СВЧ-сигналов в бортовых спутниковых радиофотонных ВОЛС, рассмотрены нелинейные эффекты в источнике лазерного излучения, хроматическая дисперсия в волокне, поляризационная модовая дисперсия, межмодовый разброс значений групповой скорости волн в волокне, нелинейные искажения сигнала в оптическом волокне. Проанализированы также эффект четырехволнового смешения и частотные и нелинейные искажения в фотодетекторе. Сделан акцент на необходимости линеаризации как интермодуляционных амплитудных, так и энергетических характеристик трактов передачи сигналов.*

Ключевые слова: *нелинейные эффекты, источник лазерного излучения, хроматическая дисперсия, поляризационная модовая дисперсия, межмодовый разброс групповой скорости, эффект четырехволнового смешения, фотодетектор.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Щербинин А. Д., Белов Л. А., Кондрашов А. С. Анализ интермодуляционных искажений сложного радиосигнала в радиофотонной линии передачи // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2019. Т. 2, № 4. С. 528—538.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Щербинин, А. Д. Анализ интермодуляционных искажений сложного радиосигнала в радиофотонной линии передачи / А. Д. Щербинин, Л. А. Белов, А. С. Кондрашов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2019. — Т. 2, № 4. — С. 528—538.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Analysis of intermodulation distortion of a complex radio signal in a radio photon transmission line

A. D. Shcherbinin^{1,2}, L. A. Belov^{1,2}, and A. S. Kondrashov²

¹National Research University MPEI

14, Krasnokazarmennaya Str., Moscow, 111250, Russian Federation
JSC “Russian Space Systems”

53, Aviamotornaya Str., Moscow, 111250, Russian Federation
belovla@gmail.com, shcherbinin.ad@spacecorp.ru

Received: December 27, 2019

Peer-reviewed: January 11, 2020

Accepted: January 14, 2020

Abstract: *The analysis of microwave signal distortions in on-board satellite radio-photon FOCLs is carried out, nonlinear effects in a laser source, chromatic dispersion in a fiber, polarization mode dispersion, intermode spread of group wave velocity values in a fiber, nonlinear signal distortions in an optical fiber are considered. The four-wave mixing effect and frequency and nonlinear distortions in the photodetector are also analyzed. Emphasis is placed on the need to linearize both intermodulation amplitude and energy characteristics of signal transmission paths.*

Keywords: *nonlinear effects, laser source, chromatic dispersion, polarization mode dispersion, intermode spread of group velocity, four-wave mixing effect, photodetector.*

For citation (IEEE): A. D. Shcherbinin et al. “Analysis of intermodulation distortion of a complex radio signal in a radio photon transmission line,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 4, pp. 528—538, 2019. (In Russ.).

1. Введение

Требования к РФ ВОЛС для размещения на борту спутника Земли или другого космического аппарата [1—3] отличаются совокупностью дополнительных жестких показателей: по массе, габаритным размерам; эффективности использования энергии источника электропитания; радиационной стойкости; надежности длительного автономного функционирования; уровню внеполосных излучений; стоимости. Поэтому разработка таких устройств является актуальной и востребованной.

Наличие сверхширокой полосы частот приводит к пропуску компонентами волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) при *двухча-*

стотном тестовом входном воздействии дополнительных отсутствовавших во входном сигнале спектральных составляющих интермодуляционных искажений (ИМИ) четного и нечетного порядков в базовой полосе частот, вблизи оптической центральной частоты f_0 и вблизи ее высших гармоник с шагом, равным разнесу тестовых частот. Относительный уровень мощности составляющих ИМИ учитывает компенсацию в модуляторе симметричных компонент из-за баланса фазовых соотношений благодаря четности комбинации по обе стороны от значения оптической центральной частоты f_0 .

На рис. 1 показана структурная схема оценки уровня интермодуляционных искажений радиосигналов в волоконной линии по двухчастотной методике.

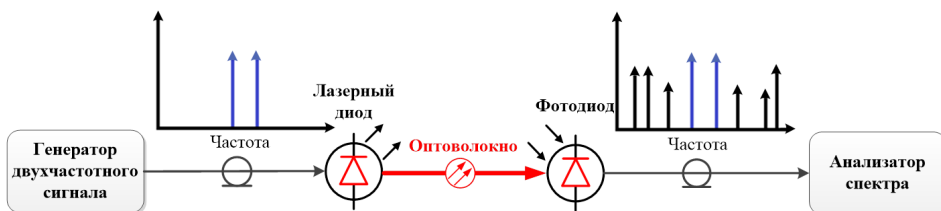


Рис. 1. Структурная схема оценки уровня интермодуляционных искажений радиосигналов в волоконной линии по двухчастотной методике.

Fig. 1. Structural scheme for assessing the level of intermodulation distortion of radio signals in a fiber line using a two-frequency technique

Результаты испытаний показали:

а) для короткой ВОЛС с прямой модуляцией интенсивности света фотодиода красного цвета ($f_0 \approx 294$ ТГц, $\lambda \approx 760$ нм) в малосигнальном режиме глубина свободного от помех динамического диапазона измерений *SFDR* заметно превышает 70 дБ;

б) при повышенном уровне мощности входного тестового двухчастотного сигнала, приводящем вблизи насыщения к компрессии усиления (снижению коэффициента передачи) на 3,5 дБ, относительный уровень составляющих ИМИ третьего порядка с увеличением входной мощности монотонно возрастает;

в) уровень ИМИ второго порядка при указанном значении компрессии усиления составляет недопустимо высокий уровень -15 дБ, а более высокого нечетного порядка пульсирует с увеличением глубины модуляции, достигая значений -35 дБ.

2. Искажения СВЧ-сигналов в бортовых спутниковых РФ-ВОЛС

Разработка ВОЛС для бортовой спутниковой аппаратуры требует учета [4—6] влияния характерных для оптического диапазона проявлений хроматической и поляризационной дисперсии в полосе используемых оптических частот, шумов и применения мер по линеаризации нелинейных амплитудных, фазочастотных и интермодуляционных характеристик передаваемого СВЧ-сигнала в компонентах ВОЛС (лазерный диод, модулятор, волокно, фотодетектор, СВЧ-усилитель мощности).

Перенос информационного СВЧ-сигнала на оптическое несущее колебание и его обратное восстановление в бортовых ВОЛС сопровождаются шумовыми и нелинейными [7] (амплитудными, фазовыми, поляризационными) искажениями и помехами в источнике света, модуляторе, волокне и фотодетекторе.

Бортовые радиофотонные волоконно-оптические линии связи (РФ-ВОЛС) предназначены для:

а) поддержки функционирования на борту космического аппарата опорного источника колебаний с прецизионно малой нестабильностью частоты;

б) формирования в узлах бортовой аппаратуры тактовых сигналов УВЧ- или СВЧ-диапазонов с фазовой ошибкой в единицы градусов и меток времени для глобальных спутниковых навигационных средств;

в) обеспечения частотно-временной синхронизации спутниковой группировки и наземных средств единого точного времени (СЕТВ) с помощью межспутниковых лазерных линий;

г) маршрутизации СВЧ сигналов в бортовых широкополосных ретрансляционных комплексах с большим количеством приемо-передающих стволов;

д) обеспечения надежной передачи сигналов телеметрии, управления и данных внутри космического аппарата и на наземный комплекс управления.

По сравнению с магистральными ВОЛС, бортовые спутниковые волоконные линии отличаются применением внутри космического аппарата:

а) ВОЛС сравнительно небольшой длины (до 30 м);

б) ограниченной шириной спектра частот передаваемой информации (до 40 ГГц);

в) использованием единого для всех подсистем источника опорных частот и тактовых меток времени [4];

г) одноканальной передачей аналоговых радиочастотных или двухуровневых телеметрических сигналов и команд управления.

Прецизионно высокий уровень стабильности частоты опорного источника необходим для осуществления связи с удаленными космическими аппаратами, для решения задач ретрансляции больших потоков информации, телевизионного вещания и организации дальней связи. При передаче опорных сигналов для частотно-временной синхронизации спутниковой группировки и наземных служб эталонных сигналов времени и частоты сетей связи 5G, средств радионавигации и специального назначения необходимо обеспечивать возможность [8] сличения шкал точного времени с погрешностью не более 100 нс на интервалах времени до суток. С этой целью на борту космического аппарата размещают атомный или оптический стандарт частоты со средней квадратической относительной нестабильностью частоты около 10^{-17} при времени усреднения до 10^4 с. Сигналы точного времени по межспутниковым оптическим линиям синхронизируют процессы на всех аппаратах космической группировки и передаются на наземные пункты СЕТВ.

Нелинейные эффекты в компонентах ВОЛС [4] определяются выбором типа и уровня мощности лазерного источника, а также способа ввода информационного модулирующего сигнала. Структурная схема радиофотонной бортовой линии передачи информации, вносящая нелинейный искажения в радиосигнал показана на рис. 1.

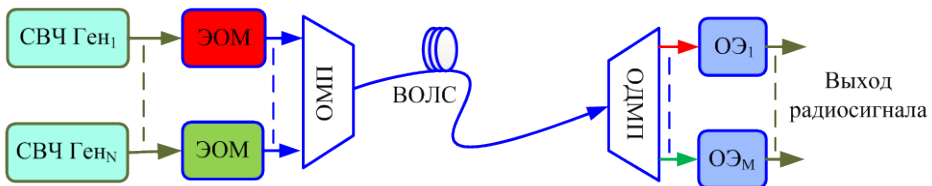


Рис. 2. Радиофотонная линия передачи радиосигнала преобразователя (СВЧ Ген — сверхвысокочастотный генератор, ЭОМ — электрооптический модулятор, ОЭ — оптоэлектронный приемник, ОМП — оптический мультиплексор, ОДМП — оптический демультиплексор, ВОЛС — волоконно-оптическая линия связи).

Fig. 2. The radio-photon line of the radio signal converter (СВЧ Ген – microwave generator, ЭОМ – electro-optical modulator, ОЭ – optoelectronic receiver, ОМП – optical multiplexer, ОДМП – optical demultiplexer, ВОЛС – fiber optic communication line)

В качестве причин появления недопустимого уровня шумовых, дисперсионных и нелинейных интермодуляционных искажений передаваемых СВЧ-сигналов можно выделить следующие.

а) **Источник лазерного излучения.** Для обеспечения формирования одномодового оптического излучения в условиях бортовой спутниковой аппаратуры целесообразно применение полупроводникового компактного и надежного лазера с распределенной обратной связью (*Distributed Feedback Laser, DFB*), резонатор которого состоит из активной среды со встроенной периодической структурой (рис. 3).

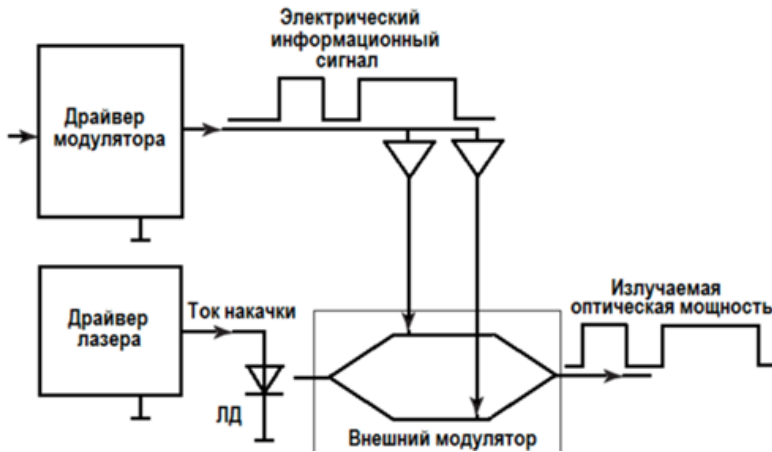


Рис. 3. Структурная схема формирования оптического сигнала с аналоговой СВЧ модуляцией по интенсивности на основе *DFB*-лазера и внешнего модулятора Маха — Цендера для бортовой ВОЛС.

Fig. 3. Structural diagram of the formation of an optical signal with analogue microwave modulation in intensity based on a *DFB* laser and an external Mach-Zehnder modulator for an onboard FOCL

Примеры структурных схем подобной линии приведены в [5, 6]. В [6] лазерный *DFB*-диод генерирует одномодовое оптическое излучение с фиксированной длиной волны вблизи значения $\lambda=1550$ нм, шириной спектра фазового шума вблизи центральной частоты 10 МГц, оптической мощностью до +10 дБмВт. В [5] отмечено, что нелинейные интермодуляционные искажения оптической огибающей на выходе модулятора третьего порядка могут быть вызваны несимметрией преобразования боковых полос в модуляторе Маха — Цендера (ММЦ) и преобразованием фазовой модуляции поляризованных компонент в вариации интенсивности. Там же авторы обращают внимание на проявления гистерезиса в характеристике модулятора ММЦ, которые приводят к появлению дополнительных интермодуляционных искажений передаваемого сигнала. В [6] использован двухполосный вариант ММЦ с подавлением несущей, который формирует

СВЧ-огibaющую в полосе частот до 22 ГГц с пониженной относительной интенсивностью шума (*Relative Intensity Noise*) $RIN \approx -140$ дБ/Гц.

б) **Хроматическая дисперсия в волокне** (зависимость показателя преломления материала линии n от частоты оптических волн f). Ее уровень обычно определяют значением коэффициента дисперсии D_{xp} при длине волны света в вакууме $\lambda = c/f$, где $c \approx 3 \cdot 10^9$ м/с — скорость света. Различают [4] ее волноводный $D_{вол}$ и материальный $D_{мат}$ составляющие $D_{xp} = D_{мат} + D_{вол}$ с соответствующими коэффициентами дисперсии. Материальная вызвана зависимостью показателя преломления оптического стекла от длины волны, волноводная определяется изменением длины пути распространения волны внутри волокна с учетом профиля изменения показателя преломления внутри волокна. Параметр $D_{вол}$ в диапазоне длин волн λ от 800 до 1600 нм отрицателен, а значение $D_{мат} \approx 122 (1 - \lambda_{zd} / \lambda)$ [пс·нм⁻¹·км⁻¹] изменяет знак в зависимости от отношения λ/λ_{zd} , где λ_{zd} — длина волны нулевой дисперсии материала. Для чистого кварцевого стекла $\lambda_{zd} = 1276$ нм, при использовании легирования ее значение смещается в область вблизи $\lambda = 1550$ нм ($f = 193,55$ ТГц), для которой имеются недорогие лазерные источники; при этом происходит минимальное уширение импульса света на конце ВОЛС. Для уменьшения влияния хроматической дисперсии используют волокно с заданным смещением длины волны нулевой дисперсии λ_{zd} .

в) **Поляризационная модовая дисперсия** (*Polarization Mode Dispersion, PMD*) [8]. В одномодовом волокне она вызвана небольшими отклонениями сердцевинки волокна или его оболочки от идеальной центральной симметрии или возникновением механических напряжений, которые ведут к распространению ортогонально поляризованных компонентов световых импульсов с немного различными скоростями. Для длинных ВОЛС, наряду с компенсаторами хроматической дисперсии, разработаны также технические решения по компенсации *PMD* или сохранения исходной ее поляризации.

г) **Межмодовый разброс значений групповой скорости волн в волокне** [9]. Этот параметр имеет значение только для многомодового режима распространения. Перспективным для применения в составе бортовых радиофотонных линий при высокой скорости передачи потока информации является одномодовое волокно класса *OS2 (Low Water Peak, LWP)*, для использования которого, однако, необходимо применение более сложного и дорогого лазерного источника и модулятора.

д) **Нелинейные искажения сигнала в оптическом волокне**. Уровень этих проявлений резко возрастает с увеличением интенсивности из-

лучения (мощности на единицу площади поперечного сечения) сверх установленного порога. Они связаны с эффектами: вынужденного рассеяния света на акустических фонах кристаллической решетки волокна (эффект Бриллюена (Мандельштама), *Stimulated Brillouin Scattering – SBS*); комбинационного (рамановского) рассеяния света на оптических фонах (*Stimulated Raman Scattering – SRS*); эффектом Керра — зависимостью коэффициента преломления среды от напряженности электрического поля. В результате действия нелинейных искажений могут возникать дополнительные помехи и искажения: комбинационные компоненты четырехволнового (*Four-Wave Mixing, FWM*) смешения; фазовая самомодуляция [*Self-Phase Modulation, SPM*]; паразитная частотная модуляция импульсов (чирпирование); перекрестная межканальная модуляция (подавление и блокирование соседних каналов); модуляционная нестабильность (*Modulation Instability – MI*); формирование солитона (оптического импульса, который распространяется по волокну без изменения его формы при равенстве между дисперсией фазовой скорости и фазовой самомодуляции); дрожание фазы (джиттер, *Jitter*) нестабильность переднего фронта импульса света и его положения относительно границ тактового интервала.

По данным [10], ослабление интенсивности волны света в результате проявления эффекта Бриллюена для длины волны $\lambda = 1550$ нм при длине линии $L = 22$ км составляет около -40 дБ с пороговой мощностью односторонней компрессии 3 дБмВт. Поэтому для длины ВОЛС не более нескольких десятков метров, характерной для бортовой космической аппаратуры, эффектом SBS можно пренебречь. Ослабление интенсивности в результате проявления комбинационного рамановского рассеяния *SRS* не превышает -60 дБ для пороговой мощности 30 дБмВт при тех же параметрах длин линии и волны света. Расчеты и результаты измерений для других нелинейных эффектов в оптическом волокне (фазовой самомодуляции, модуляционной нестабильности) показывают, что относительный уровень переходных и комбинационных помех в бортовых ВОЛС не превышает -70 дБ.

Эффект четырехволнового смешения *FWM* в волоконных световодах генерирует спектральные боковые полосы, отстоящие от частоты накачки вплоть до 100 ТГц. Он возникает в ВОЛС при многочастотном сигнале частотами f_i, f_j, f_k из-за появления комбинационных компонент с частотами $f_i + f_j - f_k$, создающих помехи по побочным каналам. Такой параметр удобен для учета перекрестных межканальных искажений при распространении по ВОЛС сигнала с мультиплексированием по длине волны *WDM* или с оптическим ортогональным частотным мультиплексировани-

ем *O-OFDM* [4, 7, 10]. Уровень помех от эффекта *FWM* не связан существенно с длиной линии и может оказаться сопоставимым с доставляемым другими механизмами в случае фазового согласования источников накачки для ВОЛС с кратным межканальным частотным разносом, когда значения комбинационных частот даже второго порядка попадают на один из действующих каналов. Таким образом, механизм четырехволнового смешения *FWM* не имеет заметного значения для бортовых ВОЛС с малым количеством каналов.

Частотные и нелинейные искажения в фотодетекторе детально рассмотрены в [11]. Там установлено, что для уменьшения их относительного влияния целесообразно обеспечивать на его входе высоким значением отношения сигнал/шум. В частности, показано, что частотная зависимость коэффициента передачи по частоте в *p-i-n*-фотодетекторе имеет пульсирующий характер с размахом в несколько децибел, а его эффективная полоса пропускания заметно уменьшается при росте уровня падающей оптической мощности. Это вызвано инерционными процессами в полупроводниковой структуре фотодиода. Для повышения чувствительности фотодетектора, уменьшения нелинейных проявлений и расширения полосы пропускаемых фотодетектором частот необходимо использовать широкополосное согласование дифференциального сопротивления фотодиода с линией передачи, что производится с помощью трансимпедансных каскадов.

В качестве источников несущих колебаний оптического диапазона для бортовых радиофотонных линий связи наиболее перспективными представляются [3] лазеры с распределенной обратной связью (*Distributed Feedback laser, DFB*). Для ввода информации рекомендуется способ аналоговой модуляции по интенсивности с помощью внешнего электрооптического модулятора ММЦ на основе интерферометра Маха — Цендера (*Modulator Mach–Zehnder*) [7]. Разработаны и представлены в [10] меры по минимизации в магистральных ВОЛС мешающих проявлений дисперсионных и нелинейных искажений передаваемых сигналов при помощи предыскажающих каскадов.

4. Заключение

При построении бортовой спутниковой аппаратуры целесообразно использовать радиофотонные ВОЛС и компоненты оптического диапазона [11], учитывая обширный опыт по линеаризации интермодуляционных амплитудных и энергетических характеристик трактов передачи сигналов, накопленный при создании СВЧ-усилителей мощности космического назначения.

Список литературы

1. Емельянов А. А., Белкин М. Е., Топорков Н. В., Масной В. А. Особенности построения бортовой волоконно-оптической синхросети // Радиотехника. 2017. № 8. С. 121—125.
2. Ciminelli, C. Armenise C. M., Dell’Olio F. Photonics in space : advanced photonic devices and systems // New Jersey : World Scientific, 2016. 224 p.
3. Shcherbinin A. D., Belov L. A. Microwave Optics Technologies in Satellite Repeaters. In : 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). July 1—3, 2019. Yaroslavl, Russia. Pp 1—4.
4. Портнов Э. Л., Сенявский А. Л., Хромой Б. П. Метрология в оптических телекоммуникационных системах. М. : Горячая линия — Телеком, 2019. 272 с.
5. Иванов С. И., Лавров А. П., Саенко И. И., Иванов Д. В., Одноблюдов М. А., Царук А. А. Исследование характеристик модулей передатчиков с внутренней и внешней модуляцией в аналоговых волоконно-оптических линиях передачи СВЧ радиосигналов // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2016. Т. 2. С. 69—73.
6. Афанасьев В. М., Пономарев Р. С. Электрооптические амплитудно-оптические модуляторы Маха — Цендера на основе ниобата лития, их модификации и форматы модуляции // Прикладная фотоника. 2017. Т. 5., вып. 4. С. 337—360.
7. Урик-мл. В. Дж., МакКинли Д. Д., Вильямс К. Дж. Основы микроволновой фотоники. М. : Техносфера, 2016. 276 с.
8. Shcherbinin A.D., Belov L.A. Microwave optics technologies in satellite repeaters. В сб.: 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2019. С. 8813963.
9. Портнов Э. Л. Поляризационная модовая дисперсия на волоконно-оптической линии передачи // Т-Comm, 2014. № 9. С. 62—64.
10. Листвин А. В., Швырков Д. В. Оптические волокна для линий связи // М. : ЛЕСАРарт, 2003. 288 с.
11. Фокин В. Г., Ибрагимов Р. З. Оптические системы с терабитными и петабитными скоростями передачи. М. : Горячая линия — Телеком, 2017. 180 с.
12. Devgan P. S. Applications of Modern RF Photonics. Norwood : Artech House, 2019. 236 p.

Информация об авторах

Щербинин Андрей Дмитриевич, аспирант кафедры формирования и обработки радиосигналов Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»), ведущий инженер-исследователь АО «Российские космические системы» (АО РКС), г. Москва, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-4949-0771.

Белов Леонид Алексеевич, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры формирования и обработки радиосигналов Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»), ведущий инженер-исследователь АО «Российские космические системы» (АО РКС), г. Москва, Российская Федерация. ORCID 0000-0001-5374-4933.

Кондрашов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, заместитель генерального конструктора АО «Российские космические системы» (АО РКС), г. Москва, Российская Федерация. ORCID 0000-0003-4192-4480.

Information about the authors

Andrey D. Scherbinin, graduate student, Department of Radio Signal Formation and Processing, National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (NRU “MPEI”), Leading Research Engineer, JSC «Russian Space Systems» (JSC RSS), Moscow, Russian Federation. ORCID 0000-0002-4949-0771.

Leonid A. Belov, PhD in Technical Sciences, Professor, Department of Radio Signal Formation and Processing, National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (NRU “MPEI”), Leading Research Engineer, JSC «Russian Space Systems» (JSC RSS), Moscow, Russian Federation. ORCID 0000-0001-5374-4933.

Alexander S. Kondrashov, PhD in Technical Sciences, Deputy General Designer of JSC “Russian Space Systems” (JSC RSS), Moscow, Russian Federation. ORCID 0000-0003-4192-4480.