

# Радиофотонные технологии в космической бортовой аппаратуре

Л.А. Белов<sup>1,2</sup>, А.С. Кондрашов<sup>2</sup>, А.Е. Скрытник<sup>2</sup>, К.В. Ромащенко<sup>2</sup>, А.Д. Щербинин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ»

<sup>2</sup>АО «Российские космические системы»

**Аннотация:** Представлен обзор перспективных приложений радиофотонной компонентной базы в космической бортовой аппаратуре: фемтосекундный синтезатор когерентных опорных колебаний микроволнового и терагерцевого диапазонов со сверхнизким уровнем фазового шума; многоканальный широкополосный преобразователь спектра ретранслируемых СВЧ-сигналов; бортовые линии передачи сигналов телеметрии и управления.

**Ключевые слова:** оптоэлектронный опорный генератор СВЧ, фемтосекундный синтезатор радиочастот, электрооптический модулятор, квантоворазмерный лазерный диод, интермодуляционные искажения, фазовый шум, эрбиевый волоконный усилитель, фотодетектор, оптическая линия задержки, терагерцевый диапазон.

## 1. Введение. Радиофотоника в бортовой космической аппаратуре

Применение радиофотонных технических решений в космической аппаратуре связи, дистанционного зондирования Земли, радионавигации и частотно-временного обеспечения земных потребителей прецизионно точными опорными сигналами времени и частоты имеет значительные технико-экономические преимущества перед традиционным использованием радиоэлектронных компонентов. Анализ возможностей таких технологий, узлов и компонентов [1 - 4] показывает возрастающую актуальность научных и технологических усилий разных стран для фундаментальных исследований физики пространства и времени; для создания глобальных средств передачи высокоскоростных потоков информации; для повышения надёжности аппаратуры, снижения их массы и потребляемой электрической энергии; для создания метаматериалов с неизвестными ранее свойствами; для многоканальной фотоэлектронной обработки ретранслируемых радиосигналов и др.

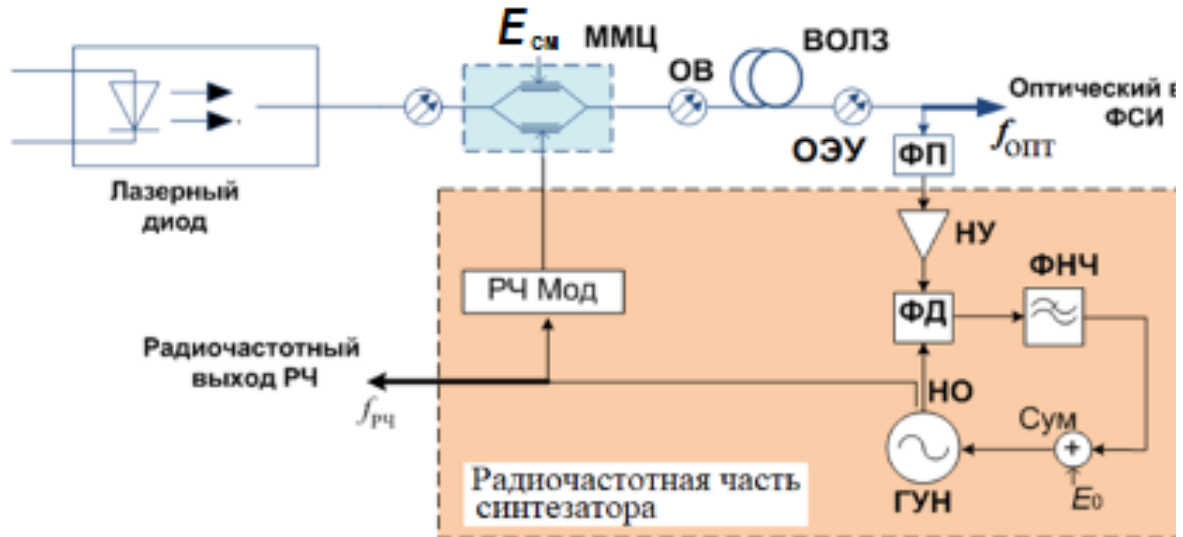
В докладе рассмотрены несколько направлений применения радиофотонных и смежных технологий в бортовой космической аппаратуре, близких к практическому использованию в условиях длительного автономного функционирования аппарата в околоземном пространстве со специфическими условиями окружающей среды.

## 2. Оптоэлектронный генератор опорных радиочастот

На борту космического аппарата любого назначения необходим источник опорных колебаний от низких до сверхвысоких частот (СВЧ) с прецизионно низким уровнем фазового шума, снабжённый системой фазовой синхронизации для обеспечения их долговременной когерентности и для сличения контрольных величин с подобными значениями бортовых источников других космических аппаратов в составе их группировки и с наземными средствами шкалы всемирного координированного времени (англ. Universal Time Coordinated, UTC) и международного атомного времени (англ. Temps Atomique International, TAI). Твёрдотельные и волоконные бортовые лазеры способны обеспечить кратковременную относительную нестабильность частоты в оптическом диапазоне на

уровне лучших наземных водородных мазеров и фонтанных атомных стандартов частоты. При помощи системы межспутниковой связи и синхронизации её с национальной шкалой времени UTC(SU) формируется шкала времени [5] глобальной системы навигационных измерений.

На рисунке 1 показана структурная схема одного из вариантов бортового фемтосекундного оптоэлектронного синтезатора опорных колебаний СВЧ диапазона [6].



**Рисунок 1** – Структурная схема оптоэлектронного синтезатора опорной радиочастоты (ММЦ - оптоэлектронный модулятор Маха-Цендера; ОВ - одномодовое оптическое волокно; ОЭУ - оптоэлектронный усилитель; ВОЛЗ - волоконно-оптическая линия задержки; ФП - фотоприёмник; НУ - нелинейный усилитель; ФД - фазовый детектор; ФНЧ - фильтр нижних частот; НО - направленный ответвитель СВЧ сигнала; ГУН - управляемый напряжением по частоте генератор; Сум - сумматор напряжений; РЧ Мод - радиочастотный модулятор)

Синтезатор по схеме рисунка 1 состоит из оптической и радиочастотной подсистем. В оптическую часть входят: а) источник лазерного излучения (квантово-размерный лазерный диод (КЛД) [6] или волоконный лазер с распределённой обратной связью, имеющие низкий уровень фазового шума [7] в диапазоне длин волн 1530-1560 нм; б) одномодовое оптическое волокно ОВ; в) оптоэлектронный модулятор Маха-Цендера ММЦ; г) волоконно-оптическая линия задержки ВОЛЗ; д) оптоэлектронный усилитель ОЭУ; е) фотоприёмник ФП.

Модулятор ММЦ представляет собой [8] конструкцию из двух разветвлённых световодных полосковых каналов, в одном из которых на кристалле ниобата лития производится электрооптическая модуляция скорости распространения световой волны, а в другом – постоянным напряжением рабочей точки  $E_{см}$  устанавливается разность фаз оптических колебаний в точке их когерентного суммирования на выходе ММЦ. Такая интерферометрическая структура, в зависимости от значения  $E_{см}$ , может использоваться как модулятор интенсивности света или как фазовый модулятор оптической волны с шириной информационной полосы частот модулирующего сигнала до 50 ГГц.

Волоконный эрбиевый оптоэлектронный усилитель ОЭУ (англ.: *Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA*) может быть выполнен на основе одномодового волокна с эрбиевым легированием и лазерной диодной накачкой с длиной волны 1420-1462 нм. Коэффициент усиления входного сигнала в ОЭУ достигает 30 дБ, выходная оптическая мощность до 45 дБмВт.

Фотоприёмник ФП является сверхширокополосным точечным оптоэлектронным

преобразователем на *p-i-n*-диоде Шоттки [9], в котором размер зоны фотодетектирования соизмерим [7] с длиной волны лазерного диода КЛД.

Радиочастотная часть синтезатора по схеме рисунка 1 включает в себя: нелинейный усилитель НУ для выделения СВЧ спектральной составляющей из линейчатого спектра сигнала на выходе фотоприёмника ФП; кольцо фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), которое состоит из управляемого напряжением генератора ГУН, частотно-фазового детектора ЧФД, фильтра нижних частот ФНЧ и сумматора Сум для смещения на  $E_0$  рабочей точки по модуляционной характеристике ГУН; направленный ответвитель НО для передачи СВЧ сигнала с частотой  $f_{рч}$  на выход синтезатора; радиочастотный модулятор РЧ Мод для формирования управляющего напряжения оптоэлектронного модулятора ММЦ.

Радиочастотная часть с оптоэлектронными компонентами представляет собой замкнутую автоколебательную систему с запаздывающей обратной связью. При выполнении условия баланса амплитуд для самовозбуждения этой системы происходит одновременное генерирование в радиочастотной подсистеме СВЧ-колебаний с частотой  $f_{рч}$ , а в оптической – высококогерентных колебаний вынужденного излучения в лазерном диоде КЛД с частотой  $f_{опт}$ , причём ширина спектральной линии оптического колебания много меньше значения  $f_{рч}$ . В результате фазовой самосинхронизации этих процессов на оптическом выходе синтезатора возникает модулированная периодическая последовательность одинаковых по форме и когерентных по фазе оптической несущей импульсов света фемтосекундной длительности ФСИ. В спектральном представлении такая последовательность представляет собой гребёнку (сетку частот) с шагом, равным частоте повторения  $f_{рч}$ , и с устранимым фиксированным смещением значений частоты. Фактически такой синтезатор является делителем оптической частоты сверхвысокой кратности  $N = f_{опт}/f_{рч}$ , достигающей значений до  $N \approx 10^5$ .

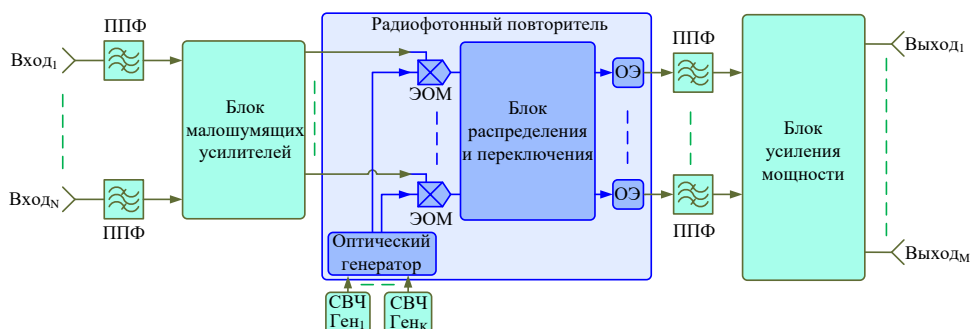
В книге В. И. Григулевича и В. Я. Иммореева [10] были изложены технические детали функционирования близкого по принципу работы и запатентованному в тот период времени радиоимпульсного умножителя частоты высокой кратности на сосредоточенных компонентах цепей. В конце 20-го века принцип формирования сетки частот с постоянным шагом по частоте ударным возбуждением колебаний в высокодобротной колебательной системе был вновь открыт и использован в лазерной физике. В 2005 году Дж. Л. Холл [11] и Т. В. Хэнш [12] за успехи в новом направлении прецизионной оптической метрологии и за создание оптических часов были отмечены Нобелевской премией. В этот и последующий периоды в России были развёрнуты работы [13 – 14] по построению фемтосекундных лазеров, компонентов оптических цепей, нелинейной спектроскопии и их применениям.

Радиофотонные источники опорных колебаний для частотно-временного обеспечения разных сфер деятельности страны [1 - 4, 15] демонстрируют более высокую долговременную точность и воспроизводимость реперных значений шкалы времени по сравнению с используемыми сейчас цезиевыми атомными стандартами частоты [1]. Долговременная относительная нестабильность частоты опорных источников в оптическом диапазоне может быть уменьшена [16] до уровня единиц  $10^{-21}$ . Готовится переход к новым мировому и национальному стандартам частоты, времени и физической длины на основе "оптических часов" [2].

### **3. Бортовые линии передачи информационных и служебных сигналов телеметрии и управления**

Замена на борту космического аппарата традиционных проводных, кабельных и волноводных линий, их соединителей и коммутаторов для передачи радиочастотных сигналов, команд управления и телеметрии внутри него на волоконно-оптические

решения [17] даёт многократный технико-экономический выигрыш по массе, потреблению ими электрической энергии на борту, стоимости изготовления, габаритным размерам, внутриблочной электромагнитной совместимости и стойкости по отношению специфическим факторам окружающей среды космического пространства. Эти меры позволяют значительно увеличить срок активного функционирования космического аппарата в условиях окружающей среды. На рисунке 2 показана структурная схема бортового многоканального спутникового ретранслятора с использованием радиопотонных компонентов [18].

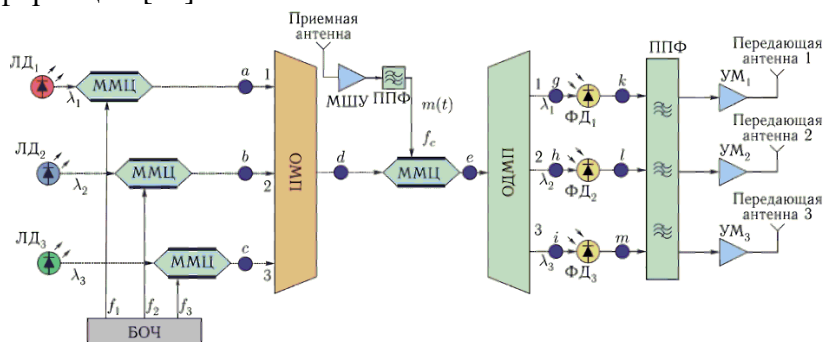


**Рисунок 2** – Схема радиопотонного преобразователя частот в составе спутникового ретранслятора (ППФ — радиочастотные полосно-пропускающие фильтры; ЭОМ - электрооптические модуляторы ММЦ; ОЭ – оптоэлектронные преобразователи)

Дополнительные качественные преимущества радиопотонных технических решений возникают в связи с возможностью в сотни раз поднять скорость обработки информационных потоков.

#### 4. Многоканальный программируемый преобразователь спектра ретранслируемых СВЧ-сигналов

Для ретрансляционной спутниковой аппаратуры, выполненной по традиционной радиочастотной технологии, существенным является ограничение ширины информационной полосы частот канала связи в модуляторе несущего колебания. Применение широкополосных радиопотонных модуляторов ММЦ по схеме, показанной на рисунке 3, позволяет дополнительно упростить и сделать программно переключаемым процесс преобразования широкополосных сигналов из одних входных радиочастотных диапазонов в другие при увеличении скорости ретрансляции потоков информации [19].



**Рисунок 3** – Схема радиопотонного преобразователя частоты в составе спутникового ретранслятора (ЛД — лазерные диоды; ММЦ — оптоэлектронные модуляторы; БОЧ — блок опорных частот; ОМП — оптический мультиплексор; ОДМП — оптический демультиплексор; ФП — фотоэлектронный преобразователь; МШУ — малошумящий усилитель; ППФ —полосно-пропускающие фильтры, УМ — усилители мощности)

Кроме рассмотренных выше направлений представляется перспективной возможность радиифотонного расширения информационной полосы частот подсистемы предусаждающей коррекцией интермодуляционных искажений в усилителе мощности на лампе бегущей волны ЛБВ, которая позволяет повысить энергетическую эффективность бортового радиопередающего устройства при заданном уровне нелинейных искажений в ограниченной полосе радиочастот с соблюдением жёстких требований к электромагнитной совместимости. Применение в бортовой аппаратуре тонкоплёночной магнитоэлектрической технологии передачи вариаций намагниченности с железо-иттриевым гранатом на композитной пьезоэлектрической подложке [20] позволяет создать малошумящий генератор СВЧ-диапазона для выбора нужного значения выходной частоты оптоэлектронного синтезатора [7].

## Заключение

Радиифотонные технологии в космическом приборостроении способны значительно повысить точность навигационных измерений, увеличить скорость ретрансляции информационных потоков и продолжить освоение диапазона крайне высоких и терагерцовых частот электромагнитных волн.

## Список литературы

1. Пономарёв, А. К. Фотонные технологии в космическом приборостроении / А. К. Пономарёв, А. А. Романов, А. Е. Тюлин // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2016. – Том 3. – Вып. 2. – С. 4–23.
2. Колачевский, Н. Н. Перспективные квантово-оптические технологии для задач спутниковой навигации / Н. Н. Колачевский, К. Ю. Хабарова, И. В. Заливако и др. // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2018. – Том 5. – Вып 1. – С. 13-27.
3. Миноли, Д. Инновации в технологиях спутниковой связи / пер. с англ. – М.: Техносфера, 2019. – 446 с.
4. Корсон, Дж. Л. Радиочастотные микроволновые фотонные системы. Современные решения для оборонных проектов / Дж. Л. Корсон, Р. Дж. Стюарт // Фотоника, 2018. – Том 12. – № 3 (71). – С. 336–342.
5. Рыжков, А. В. Пути формирования прецизионной шкалы времени национальной сети связи / А. В. Рыжков, М. Л. Шварц // Т-Comm – Телекоммуникации и транспорт, 2020. – Том 14. – № 2. – С. 17-24.
6. Bortsov, A. A. Laser Optoelectronic Oscillators / A. A. Bortsov, Y. B. Il'in, S. M. Smolskiy // – Cham: Springer. –Series in Optical Sciences, 2020. – Vol. 232. – 522 p.
7. Устинов, А. Б. Экспериментальное исследование фазового шума перестраиваемого спинволнового радиифотонного генератора / А. Б. Устинов, А. В. Кондрашов, А. А. Никитин [и др.] // Сб. ст. 8-ой Всеросс. науч. конф. "Электроника и микроэлектроника СВЧ", Санкт-Петербург, Россия, – 28-30 мая 2019. – С. 214–217.
8. Афанасьев, В. М. Определение величины полуволнового напряжения электрооптического модулятора интенсивности излучения на основе интерферометра Маха-Цендера / В. М. Афанасьев, Р. С. Пономарёв //Прикладная фотоника, 2020. – Том 7. – № 1. – С. 16–24.
9. Чиж, А. Л. Амплитудно-фазовое преобразование в мощных СВЧ-фотодиодах Шоттки / А. Л. Чиж, К. Б. Микитчук, К. С. Журавлёв [и др.] // Сб. ст. 7-ой Всеросс. науч. конф."Электроника и микроэлектроника СВЧ". – С. -Петербург, Россия. – 28-30 мая 2019. – С. 49–53.
10. Григулевич, В. И. Радиоимпульсное преобразование частоты / В. И. Григулевич, И. Я. Иммореев // – М.: Советское радио, 1966. – 335 с.
11. Холл, Дж. Л. Определение и измерение оптических частот: перспективы оптических часов – и не только. Нобелевская лекция // Успехи физических наук. – 2006. – Том 176, № 12. – С. 1353–1367.
12. Хэнш, Т. В. Страсть к точности. // Успехи физических наук. – 2006. – Том 176. – № 12. – С. 1368–1380.
13. Желтиков, А. М. Да будет белый свет: генерация суперконтинуума сверхкороткими лазерными импульсами // Успехи физических наук. – 2006. – Том 176. – № 6. – С. 623–649.

14. Крюков, П. А. Лазеры ультракоротких импульсов и их применения // –Долгопрудный: Изд. дом "Интеллект", 2012. – 248 с.
15. Хабарова, К. Ю. Передача точных сигналов частоты и времени в оптическом диапазоне / К. Ю. Хабарова, Е. С., Калганова, Н. Н. Колачевский // Успехи физических наук. – 2018. –Том 188. – № 2. – С. 221 – 231.
16. Xu, Dan [et al.] Studying the fundamental limit of optical fiber links to the  $10^{-21}$  level / Optical express. – Vol. 26. – № 8. – 16 Apr. 2018. – P. 9515–9527.
17. Емельянов, А. А. Особенности построения бортовой волоконно-оптической синхросети / А. А. Емельянов, М. Е. Белкин, Н. В. Топорков [и др.]//Радиотехника, 2017. –№ 8. – С. 121–125.
18. Щербинин, А. Д. Радиофотонный многодиапазонный преобразователь частот для бортового спутникового ретранслятора // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2020. – Том 7. – Вып. 3. – С. 28–35.
19. 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.
20. Фетисов, Ю. Магнитоэлектрические устройства электроники на основе мультиферроидных гетероструктур / Электроника: Наука, технология, бизнес, 2021. – № 2 (00203). – С. 132–144.