РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2020, том 7, выпуск 2, с. 11–20

— РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ ——

УДК 621.391 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.2.11.20

Экспериментальное исследование эффективности поляризационного уплотнения для сверхскоростной радиолинии систем ДЗЗ

А.А.Аджибеков, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В. В. Березкин, к. т. н., nkpor@spacecorp.ru АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. Н. Ершов, nkpor@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

С.В. Петров, *petrov_sv@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А.В.Петров, *nkpor@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

П.В.Шишминцев, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Рассматриваются принципы организации стенда для совершенствования и исследования характеристик сверхскоростных радиолиний как систем ДЗЗ в целом, так и отдельных их составляющих, позволяющих в перспективных комплексах выполнить целевые требования для решения необходимых задач народно-хозяйственного значения, которые обозначены в определяющих документах по данной тематике. Основное внимание уделено методам поляризационного уплотнения, позволяющего практически удвоить реализованную ранее пропускную способность реальной радиолинии, что особенно важно для хорошо освоенного и очень загруженного участка X-диапазона, выделенного для систем ДЗЗ (8,025–8,4 ГГц).

Ключевые слова: радиолиния, канал связи, поляризационная развязка, частотно-энергетические ресурсы, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), модуляция с высокой кратностью, корректирующее кодирование, сигнальное созвездие

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2020, том 7, выпуск 2, с. 11–20

— РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ —

Experimental Study of Polarization Multiplexing Efficiency for a Very-High-Speed Radio Link of Earth Remote Sensing Systems

A. A. Adzhibekov, contact@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation V. V. Berezkin, Cand. Sci. (Engineering), nkpor@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation A. N. Ershov, nkpor@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation S. V. Petrov, petrov_sv@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation A. V. Petrov, nkpor@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation P. V. Shishmintsev, contact@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The principles of organizing a test stand for the improvement and research of the characteristics of ultra-high-speed radio links both of Earth remote sensing (ERS) systems as a whole and of their individual components are considered. These principles allow promising complexes to meet the target requirements for solving the necessary tasks of national economic importance indicated in the definitive documentation on this topic. The main focus is on polarization multiplexing methods, which allow us to almost double the capacity of the real radio link achieved previously, which is especially important for a well-developed and very busy section of the *X*-band allocated for ERS systems (8.025–8.4 GHz).

Keywords: radio link, communication channel, polarization isolation, frequency-power resources, Earth remote sensing, high order modulation, correction coding, constellation diagram

Введение

Основные характеристики реализованных и перспективных радиолиний

К целевым функциям систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) прежде всего относятся [1,2]:

 – разрешающая способность (десятки сантиметров) и точность измерений гелиогеофизических характеристик (единицы или доли процента);

- зона охвата (сотни и тысячи километров);

– число спектральных каналов (до нескольких десятков) [2].

Для реализации этих требований должны быть оптимизированы и реализованы следующие характеристики радиолинии:

 – уникальная скорость передачи информации (до нескольких гигабит в секунду);

– виды модуляции высокого порядка (вплоть до 64–256 APSK);

 помехоустойчивые виды кодирования (TPC, LDPC и каскадные коды на их базе);

 методы обеспечения энергетических соотношений (характеристики антенных устройств, мощность передающих и чувствительность приемных устройств);

– методы коррекции погрешностей радиотехнических элементов радиолинии (амплитудных нелинейностей, АЧХ и НГВЗ).

Основная из требуемых характеристик радиолинии — сверхвысокая скорость передачи — определяется объемом информации, поступающей прежде всего от комплекса аппаратуры, обеспечивающей перечисленные выше целевые функции.

Типовая максимальная пропускная способность существующей группировки отечественных спутников ДЗЗ составляет ~300 Мбит/с [3,4].

Наиболее часто используемым методом увеличения скорости передачи информации с эксплуатируемых на текущий момент объектов ДЗЗ является частотное уплотнение, которое в перспективе не представляется соответствующим возросшим требованиям реализации целевых функций в указанном выше участке *X*-диапазона.

Поэтому для реализации радиолиний соответствующих параметрам целевых функций перспективных объектов [5] требуется существенное увеличение пропускной способности [6].

Наилучшие результаты по информативности были реализованы на прошедших недавно успешных испытаниях экспериментальной спутниковой системы передачи информации ДЗЗ с информационной скоростью передачи информации чуть более 850 Гбит/с, символьной скоростью в канале 266,6 МГц, видом модуляции 16 APSK, типом кодирования TPC0,8 (эквивалентная скорость передачи двоичных символов несколько более 1 ГГц/с) [4].

На текущий момент проведены стендовые испытания режима 32 APSK с кодированием типа LDPC 7/8. Анализ энергетических потерь, проведенный по комплексным результатам, показывает достаточно высокое качество реализации основных звеньев радиолинии (эксперимент проводился на серийно выпускаемой аппаратуре [7] и позволяет положительно оценить возможность проектирования реальной (одноканальной) радиолинии со скоростью передачи до 1500 Мбит/с).

В ближайшее время дальнейшее уплотнение канала связи предполагается производить путем реализации двухканального поляризационного уплотнения и модуляции высокого порядка (вплоть до 64 APSK) в сочетании с мощными современными видами корректирующего кодирования, а также с использованием адаптивного режима работы.

Уплотнение радиолинии методами поляризационного разделения каналов

Уплотнение радиолинии методами поляризационной развязки с использованием видов модуляции и кодирования, приведенными в табл. 2 (до 64 APSK и LDPC 7/8), в пределе может обеспечить скорость передачи в канале до $300 \cdot 6 \cdot 2 =$ = 3,6 Гсимв/с.

С учетом величины кодовой скорости и погрешностей реализации можно ставить задачу натурного эксперимента для реализации информативности радиолинии в одном канале до 3 Гбит/с.

К настоящему времени проведены испытания с видом модуляции 32 APSK и LDPC (7/8) кодом.

Упрощенная структурная схема аппаратуры, обеспечивающей поляризационную развязку радиолинии, приведена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда для исследования эффективности поляризационного уплотнения в сверхскоростной радиолинии ДЗЗ. Состав аппаратуры: 1 — поляризационный селектор, 2 — источник сигнала канала левой поляризации, 3 — источник сигнала канала правой поляризации, 4 — приемник сигнала канала левой поляризации, 5 — приемник сигнала канала правой поляризации, 6 — передающая антенна, 7 — приемная антенна

Экспериментальный стенд для исследования эффективности поляризационного уплотнения в сверхскоростной радиолинии ДЗЗ представляет собой наведенные друг на друга приемную и передающую антенны, размещенные в безэховой камере. Обе антенны включают поляризационные селекторы, позволяющие антеннам излучать (принимать) независимо электромагнитные волны с левой и правой поляризацией. В качестве приемной и передающей антенн используются зеркальные антенны диаметром 300 мм (рис. 2).

Поляризационный селектор представляет собой облучатель в виде открытого конца квадратного волновода со ступенчатым поляризатором (рис. 3). Поляризатор выполнен в виде перегородки, плоскость которой перпендикулярна одной из стенок волновода. По мере удаления от открытого конца волновода высота перегородки ступенчато увеличивается и квадратный волновод переходит в два прямоугольных волновода. При возбуждении одного из этих прямоугольных волноводов волна Н10, распространяясь в сторону открытого конца волновода, взаимодействует с перегородкой, порождая две ортогональные линейно поляризованные волны в квадратном волноводе. Параметры ступенчатой структуры выбраны таким образом, чтобы обеспечить равенство амплитуд двух этих линейно поляризованных волн при фазовом сдвиге между ними в 90°.

Характеристики облучателей приемной и передающей антенн (КСВН и КЭЛ по каждому ка-



Диапазон частот, ГГц	8,025-8,4			
Диаметр зеркала, мм	300			
Коэффициент усиления с учетом потерь в фидере, дБ	Не менее 22			
Круговая поляризация	Правая и левая			
Коэффициент эллиптичности	Не менее 0,92			
Углы поворота:				
по оси 1	$\pm 75^{\circ}$			
по оси 2	$\pm90^{\circ}$			
Масса, кг	$\sim \! 4$			
Летная квалификация прототипа	На 2 КА ДЗЗ			

Рис. 2. Двухканальная остронаправленная антенна (OHA) X-диапазона с двуугломестным приводом и поляризационной развязкой

налу, развязки между каналами) представлены на рис. 4-11 и в таблице 1.

Как видно из рис. 4–11 и табл. 1, КСВН обоих облучателей в рабочей полосе частот не превышает 1,26–1,27, значение КЭЛ облучателей в рабочей полосе частот не опускается ниже 0,92–0,93.

В табл. 2 приведены величины уровней поляризационной развязки каналов передачи в зависимости от реализованных коэффициентов эллиптичности наземных и бортовых антенн [8].

При приеме на открытый конец волновода измеренная по модулированному, широкополосному



Рис. 3. Облучатель для приемной и передающей антенн



Рис. 4. Частотная зависимость КСВН по каналу левой поляризации двухканального облучателя *Х*-диапазона частот круговой поляризации передающей антенны



Рис. 5. Частотная зависимость КСВН по каналу правой поляризации двухканального облучателя *Х*-диапазона частот круговой поляризации приемной антенны



Рис. 6. Частотная зависимость развязки между каналами левой и правой поляризации двухканального облучателя *X*-диапазона частот круговой поляризации передающей антенны



Рис. 7. Частотная зависимость развязки между каналами левой и правой поляризации двухканального облучателя X-диапазона частот круговой поляризации приемной антенны

сигналу величина поляризационной развязки оказалась равной около -27 дБ. Однако для получения уровня, необходимого для нормальной работы приемно-демодулирующего тракта оказалось необходимым смонтировать на приемной стороне «зеркало», не вполне согласованное с приемным облучателем, и коэффициент развязки упал до величины -21.6 дБ (выделено курсивом в табл. 2).

Анализ результатов эксперимента показал, что при специальном проектировании приемной антен-



Рис. 8. Частотная зависимость КЭЛ по каналу левой поляризации двухканального облучателя *X*-диапазона частот круговой поляризации передающей антенны



Рис. 9. Частотная зависимость КЭЛ по каналу правой поляризации двухканального облучателя *X*-диапазона частот круговой поляризации передающей антенны

ной системы эта величина может быть улучшена на 3-4 дБ.

В табл. З представлены данные, позволяющие оценить возможности информативности реальных радиолиний с использованием антенн различного диаметра (оценка проводилась для орбиты высотой 700 км).



Рис. 10. Частотная зависимость КЭЛ по каналу левой поляризации двухканального облучателя *Х*-диапазона частот круговой поляризации приемной антенны



Рис. 11. Частотная зависимость КЭЛ по каналу правой поляризации двухканального облучателя *Х*-диапазона частот круговой поляризации приемной антенны

Измерение эффективности поляризационного уплотнения

Общая структурная схема экспериментального стенда для измерения эффективности поляризационного уплотнения представлена на рис. 12.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО УПЛОТНЕНИЯ 17

Таблица 1. Характеристика двухканальных облучателей *Х*-диапазона частот круговой поляризации передающей и приемной антенны

Параметры	Облучатель передающей антенны	Облучатель приемной антенны		
Диапазон частот, МГц	8025-8400			
Направление вращения поляризации	Левая/Правая			
КСВН в полосе частот, не более	1,26	1,27		
Коэффициент эллиптичности по полю в максимуме диаграммы направленности	0,93	0,92		

Таблица 2. Соответствие коэффициента эллиптичности БА и НА величинам поляризационной развязки

Коэффициент эллиптичности	Развязка, дБ								
БА / НА	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91
0,99	-40,0	-36,4	-33,9	-31,9	-30,3	-28,9	-27,7	-26,6	-25,7
0,98	-36,4	-33,9	-31,9	-30,3	-28,9	-27,7	-26,7	-25,7	-24,9
0,97	-33,9	-31,9	-30,3	-29,0	-27,8	-26,7	-25,8	-24,9	-24,1
0,96	-31,9	-30,3	-29,0	-27,8	-26,7	-25,8	-24,9	-24,2	-23,4
0,95	-30,3	-28,9	-27,8	-26,7	-25,8	-25,0	-24,2	-23,4	-22,8
0,94	-28,9	-27,7	-26,7	-25,8	-25,0	-24,2	-23,5	-22,8	-22,2
0,93	-27,7	-26,7	-25,8	-24,9	-24,2	-23,5	-22,8	-22,2	-21,6
0,92	-26,6	-25,7	-24,9	-24,2	-23,4	-22,8	-22,2	-21,6	-21,1
0,91	-25,7	-24,9	-24,1	-23,4	-22,8	-22,2	-21,6	-21,1	-20,5

Таблица 3. Возможности реальных радиолиний с использованием антенн различного диаметра

Параметр		Угол места						
		5	15	30	60	90		
Ø3,5 м	1 канал	900	1200	1200	1500	1800		
	2 канала	2×600	2×900	2×1200	2×1200	2×1200		
Ø4,8 м	1 канал	900	1200	1500	1800	1800		
	2 канала	2×900	2×1200	2×1200	2×1200	2×1200		
Ø7,0 м	1 канал	1200	1500	1800	1800	1800		
	2 канала	2×1200	2×1200	2×1200	2×1500	2×1500		
Ø9,0 м	1 канал	1500	1800	1800	1800	1800		
	2 канала	2×1200	2×1200	2×1500	2×1500	2×1500		



Рис. 12. Структурная схема экспериментальной установки 32 APSK, LDPC 7/8, $f_{\text{симв видео}} = 300$ МГц, $f_{\text{симв эфир}} = 1500$ Мсимв/с, $f_{\text{инф}} = 1312,5$ Мбит/с

Как видно из рисунка, при проведении эксперимента использовались:

– два высокоскоростных модулятора с видом модуляции до **32 APSK, LDPC 7/8,** $f_{\rm симв\ видео}=300\ {\rm M}\Gamma$ ц;

– два переносчика спектра 1,2 МГц в *X*-диапазон;

- два приемных устройства;

- два высокоскоростных демодулятора;

 передающий и приемный комплексы с поляризационной развязкой;

- анализатор спектра;

 управляющий компьютер с программным обеспечением (ПО) оценки качества принятого сигнала (сигнал/шум, сигнальное созвездие и вероятность ошибки).

Таким образом, суммарная информационная скорость равнялась — $f_{\rm инф \Sigma} = 2625$ Мбит/с, соответственно суммарная символьная скорость в эфире — $f_{\rm симв \ эфир \Sigma} = 3000$ МГсимв/с (при отсутствии корректирующего кодирования равна информационной).

Организация эксперимента основывалась на оптимизации в использовании частотно-энергетических ресурсов проектируемой радиолинии по результатам [9, 10].

Полученная в результате эксперимента достоверность приведена на рис. 13. Величина $E_{\rm bit}/N_0$ измерялась на выходе приемника и представляет собой отношение сигнала к сумме шума выставленного на выходе имитатора и помехи от второго поляризационного канала.

Как видно из рис. 13, энергетические потери при использовании кодирования из-за влияния второго поляризационного канала составляют 0,2–0,3 дБ, что можно считать вполне приемлемой величиной для реальной радиолинии.

Заключение

Таким образом, в соответствии с постановкой задачи [1, 2] и последних результатов в части использования поляризационного уплотнения, в статье изложены предварительные результаты анализа возможностей построения сверхскоростной радиолинии (вплоть до 3 Гбит/с) с ориентацией на выделенные частотные ресурсы в Х-диапазоне. Для оценки таких возможностей использовались ланные успешных испытаний (более 1 Гбит/с) [4,7], а также данные стендовых испытаний (несколько менее 3 Гбит/с). Очевидно, что для выполнения требований [1,2] по реализации информативности более 10 Гбит/с необходимо использовать рассмотренные в статье методы и оценки, однако с ориентацией на свободные частотные



Рис. 13. Зависимость вероятности ошибки от энергетики в канале $\log P_{err} = f(E)$

ресурсы в *Ка*-диапазоне в сочетании с методом частотного уплотнения.

Ожидается, что при решении этой задачи будут существенно превышены характеристики сходного по назначению объекта WorldView-3 (США), обеспечивающего максимальную на текущий момент скорость передачи информации с КА ДЗЗ (до 1200 Мбит/с) [6].

Список литературы

- Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года. М.: Федеральное космическое агентство, 2006. 82 с. www.gisa.ru file766.doc.
- Райкунов Г., Любченко Ф., Карелин А. Векторы развития космической системы дистанционного зондирования Земли в России // Аэрокосмический курьер, 2012, № 6.
- 3. Бахтин А.А., Омельянчук Е.В., Семенова А.Ю. Анализ технических характеристик, ограничиваю-

щих пропускную способность радиолинии Космос-Земля // VIII Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь»: Сб. трудов. М., 2014.

- 4. Березкин В.В., Ершов А.Н., Петров С.В., Петров А.В. От одного бита до гигабита (Краткий очерк истории развития пропускной способности цифровых радиолиний АО «Российские космические системы» и их внедрения) // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2019, т. 6, вып. 2. С. 98–101.
- 5. Бакланов А.И., Блинов В.Д., Горбунов И.А. и др. Аппаратура высокого разрешения для перспективного космического аппарата «Ресурс ПМ» // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 2016, т. 15, № 2. С. 30–35.
- 6. WorldView-3 (WV-3) // Sharing Earth Observation Recources: https://directory.eoportal.org/web/ eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/worldview-3 (Дата обращения 05.06.2020).
- 7. Ершов А.Н., Березкин В.В., Петров С.В. и др. Экспериментальная отработка комплексов высокоскоростной передачи информации для КА ДЗЗ //

Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2018, т. 5, вып. 4. С. 56-64.

- 8. Киселев А., Нагорнов В., Бобков В., Ефимов М. Поляризационная развязка: Взгляд эксперта // Сопnect! Мир связи. 2004. № 2. https://pro-connect.ru/ article.asp?id=4488 (Дата обращения 05.06.2020).
- 9. Ершов А.Н., Березкин В.В., Петров С.В. и др. Особенности расчета и проектирования высокоско-

ростных радиолиний космических аппаратов ДЗЗ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2018, т. 5, вып. 1. С. 52–57.

 Ершов А.Н., Березкин В.В., Петров С.В. и др. Методы проектирования и аппаратной реализации цифровых фильтров для высокоскоростной радиолинии в системах ДЗЗ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2017, т. 4, вып. 1. С. 25–31.