

УДК 621.391 DOI 10.30894/issn2409-0239.2019.6.2.98.101

От одного бита до гигабита

(Краткий очерк истории развития пропускной способности цифровых радиолиний
АО «Российские космические системы» и их внедрения)

В. В. Березкин, к.т.н., *petrov_sv@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, *petrov_sv@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье показана эволюция средств передачи информации в радиолиниях АО «Российские космические системы» за более чем полувековой период развития, начиная с объектов дальнего космоса и до наших дней.

Основное внимание уделено освоенным методам увеличения пропускной способности радиолиний начиная с примитивных на сегодняшний взгляд методов кодирования и модуляции и заканчивая современными, спроектированными на базе высокоскоростных сигнально-кодовых конструкций с видами модуляции высокого порядка и современных методов кодирования (TPC и LDPC) с высокими кодовыми скоростями, удовлетворяющими требованиям современным международным стандартам.

Отмечается, что диапазон освоенных скоростей передачи (от 1 бит/с до более чем 1 Гбит/с) определялся развивающимися задачами отрасли вообще и прикладной науки в частности.

Ключевые слова: радиолиния, канал связи, дальний космос, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), модуляция высокого порядка, манчестерское кодирование, когерентные методы передачи информации, сигнальное созвездие, частотно-энергетические ресурсы

From One Bit to Gigabit

(A short sketch of development history of digital radio links capacity
of Joint Stock Company “Russian Space Systems” and their implementation)

V. V. Berezkin, *Cand. Sci. (Engineering)*, *petrov_sv@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, *petrov_sv@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Abstract. The article shows the evolution of information transfer facilities in the radio links of Joint Stock Company “Russian Space Systems” during more than a half a century beginning from the deep space objects and until present days.

The main attention is given to the mastered methods of the increase in radio links capacity starting from primitive, based on the today’s view, coding and modulation methods and finishing with modern ones designed according to the high-speed signal-code constructions with the high-order modulation types and modern coding methods (TPC and LDPC) with high code rates meeting the requirements of modern international standards.

It is noted that the range of the mastered data transmission rate (from 1 bits/s to more than 1 Gbit/s) is determined by the advancing tasks of the field in general and applied science in particular.

Keywords: radio link, communication channel, deep space, Earth remote sensing (ERS), high order modulation, Manchester code, coherent methods of information transfer, constellation diagram, frequency-power resources

Одному из авторов данного материала в 60-х годах прошлого века пришлось начинать работать по программам дальнего космоса со структурой сигналов ΦM_{120° (т.е. с остатком несущей) + ЧМн на двух поднесущих. Заложенные в этом режиме скорости передачи — 1, 4, 16 и 64 бит/с.

Такие скорости позволяли работать на очень низкой по современным понятиям промежуточной частоте — 25 кГц.

При этом использовался примитивный 6-рядный код с дополнением до четности (код Вагнера). По своему классическому определению этот код мог обнаруживать одну ошибку, однако за счет инвертирования символа с минимальным весом, полученным в результате оцифровки уровня символа, в случае обнаружения ошибки уверенно исправлялась одиночная ошибка.

Через несколько лет этот режим был несколько модернизирован — вместо двух ЧМн-поднесущих использовалась одна — с манипуляцией ΦM_{180° и скоростью передачи до 128 бит/с. Таким образом был реализован энергетический выигрыш 3 дБ относительно предыдущего режима.

Эти методы с успехом использовались на объектах дальнего космоса на приземных участках и трассах перелета. Данная структура сигнала (с остатком несущей) в условиях нехватки энергии радиоканала при реализации марсианских программ позволила на 16-м пункте Центра дальней космической связи (под г. Евпаторией) решить задачу когерентного сложения сигналов с пяти антенн [1].

При решении задачи приема сигнала из атмосферы и с поверхности Венеры (1 бит/с) в связи с чрезвычайно сложными условиями приема (турбулентность среды распространения, порывы ветра при снижении спускаемого аппарата, скачки частоты при раскрытии парашюта, резкое торможение при касании поверхности планеты, аварийное переключение ЗГ из-за внутриобъектового повышения температуры) было принято решение отказаться от когерентных методов передачи и перейти на классический метод двоичной ЧМн. Прием осуществлялся на гребенку камертонных фильтров (с выбором максимального сигнала панорамой из 400 штук одногерцевых камертонных фильтров). Этот метод с успехом использовался по программе исследо-

вания Венеры на космических аппаратах «Венера 4–8» с 1967 до 1972 гг. [2, 3].

Полученный опыт работы позволил в дальнейшем создать радиолинию со скоростями передачи сначала 3,072 Кбит/с (черно-белое видео) и далее 30,720 Кбит/с (цветное видео), осуществляющую связь как с поверхности Венеры, так и через орбитальный ретранслятор, установленный на пролетном по орбите Венеры объекте. Таким образом была обеспечена передача видеоизображений с поверхности планеты. Причем здесь оказалось целесообразным вернуться к структуре $\Phi M_{120^\circ}/\Phi M_{180^\circ}$, но уже с «манчестерским кодированием»* поднесущей.

(*Примечание: понятие «манчестерский код» не относится к общепринятому классу корректирующих кодов, как это достаточно часто пытаются интерпретировать некоторая часть состава инженеров-разработчиков. По своей физической сущности «манчестерское» кодирование есть вырожденный случай модуляции ФМ2, когда частота модулируемого сигнала равна символьной частоте. Это делается по двум причинам:

- с целью очистить спектральные составляющие в области «несущей» модулированного сигнала для уверенной работы ФАП;
- с целью создать максимально возможное число переходов из единичного состояния в нулевое и наоборот для оптимизации условий работы системы символьной синхронизации, поскольку при этом число переходов становится независимым от статистики переходов исходного информационного сигнала.)

В дальнейшем резкий скачок роста пропускной способности каналов связи потребовался в связи с началом и развитием программы ДЗЗ.

Задача передачи видеоизображений с видеосканеров малого, среднего и высокого разрешения потребовала разработки радиолиний 15,36, 30,72, 61,44 и 122,88 Мбит/с. Эта задача была успешно решена методами модуляции ОФМ и ДОФМ. Однако в связи с разработкой в коллективе А. С. Селиванова электронного сканера на ПЗС-структурах (приборах с зарядной связью) производительностью 8 Мбит/с (который на много лет по своим параметрам устроил большинство

потребителей информации ДЗЗ) под эту скорость была адаптирована радиолиния с видом модуляции ДОФМ. Электронный сканер был установлен на объекте «Ресурс-О», а наземная часть была развернута на региональных пунктах Гидрометцентра в городах Обнинске, Новосибирске и Хабаровске.

Кроме того, в 1995 г. аппаратура для приема, демодуляции, регистрации и первичной обработки этой информации была также установлена и эксплуатировалась на шведском пункте приема спутниковой информации Esrange в г. Кируне (за полярным кругом).

Не могу не остановиться на трагикомической ситуации, сложившейся с историей поставки и ввода в эксплуатацию нашей аппаратуры. Дело в том, что шведская сторона предложила нам не очень большую оплату за эту работу. И наша сторона объяснила им, что за предлагаемые средства мы можем собрать комплекс средств из ранее разработанных блоков и, как следствие, аппаратура будет иметь несовершенные габариты и соответственно вес (наша стандартная стойка), но при этом параметры, заданные в ТЗ, мы им гарантировали. Шведы согласились на такой вариант.

Однако где-то в аэропорту при перегрузке оборудования не выдержали стропы подъемного крана и наша стойка рухнула на жесткое покрытие летного поля. Удар был такой силы, что оказались срезанными шпильки крепления трансформаторов источников питания.

В результате первое время пребывания в Esrange нам до глубокой ночи пришлось восстанавливать работоспособность аппаратуры.

Напряжение было столь велико, что на третий день у одного из молодых шведских инженеров, приставленных к нам в помощь, случился обморок, а у второго пошла кровь из носа.

Но все в конце концов закончилось хорошо — мы сдали аппаратуру по всем параметрам ТЗ и запустили ее в эксплуатацию.

Дальнейший опыт работы с созданными нами на тот момент высокоскоростными радиолиниями мы получили при сотрудничестве с коллективом специалистов из Германии, который создал видеокамеру, установленную на обитаемой космической станции «Мир» (модуль «Природа»), а наше

предприятие обеспечило бортовую и наземную аппаратуру для формирования, модуляции, передачи, приема, демодуляции и «распаковки» информации (пункт приема г. Нойштрелиц, 1996 г.). Параметры видеокамеры были адаптированы под скорость передачи 61,44 Мбит/с (ОФМ), однако когда немецкие специалисты узнали, что у нас имеется режим $2 \times 61,44$ (ДОФМ), они очень жестко настояли, чтобы мы включили и этот вариант в ТЗ.

При первых тестах обнаружилось, что из-за обрыва кабеля принятый видеосигнал не соответствует заложенной разрядности оцифровки, и космонавты его поменяли, восстановив тем самым исходное качество изображения.

К этой работе немецкие коллеги отнеслись очень серьезно, с должным системным подходом, синхронизировав сеансы космической связи с вылетом авиации со средствами многоспектральной аэрофотосъемки в районы с «опорной» структурой подстилающей поверхности для верификации и валидации качества принятых из космоса видеоизображений и методов их обработки.

Вышеупомянутые методы модуляции до сих пор активно используются на объектах «Метеор», «Канопус», «Кондор», причем в двухканальном режиме с частотным уплотнением, повышающим информативность примерно до 250 Мбит/с (потенциальная возможность до 320 Мбит/с).

В последние годы у нас в стране и за рубежом резко возросла потребность в еще более высокоинформативных радиолиниях. Так, в середине 2000-х гг. по настоятельным просьбам специалистов из КНР были организованы достаточно плотные контакты по построению спутниковой радиолинии 800 Мбит/с. В результате взаимных поездок делегаций специалистов в КНР и РФ было согласовано ТЗ и подписан контракт, однако дальше этого дело не пошло.

Тем не менее к настоящему времени нашим предприятием была создана и реализована (прошла натурные испытания) радиолиния с видами модуляции QPSK, 8PSK и 16APSK на одной несущей со скоростью передачи несколько более 1 Гбит/с в режиме 16APSK. При этом использовался турбокод с кодовой скоростью $R = 0,8$ [4]. Зарубежные аналоги получили подобные результаты только с использованием поляризационной раз-

вязки (WorldView-3 [5]). Структура сигнала в нашей радиолинии оптимизирована с точки зрения использования частотно-энергетических ресурсов и полностью удовлетворяет требованиям международного стандарта CCSDS [6].

В настоящее время предприятие имеет реальный задел средств для построения радиолинии с информативностью 1500 Мбит/с с видом модуляции 32APSK и кодированием LDPC $R = 7/8$, а также реальные планы по удвоению этих результатов с помощью поляризационного уплотнения.

Заключение

В статье подведен исторический итог развития космических радиолиний дальнего космоса и ДЗЗ, спроектированных и эксплуатировавшихся в АО «Российские космические системы» за период от начала 60-х гг. прошлого века по настоящее время.

Основным результатом развития за этот период можно считать увеличение производительности радиолиний предприятия АО «Российские космические системы» **на девять порядков**.

Созданная предприятием сверхскоростная радиолиния к настоящему времени по своим параметрам соответствует самым высоким требованиям международных стандартов.

Обозначен вектор развития и имеющийся задел для последующего продвижения разработок в этой области.

Список литературы

1. Курбатов А. В. Мы родились в нужное время. М.: Капитал и культура, 2017. С. 286–288.
2. Березкин В. В. «Однобитовая» эпопея в дальнем космосе // Т-Сотт. Телекоммуникации и транспорт, 2013, №2. С. 11–13. <http://media-publisher.ru/content-2-2013/> (Дата обращения 06.06.2019).
3. Березкин В. В. Однобитовая эпопея в дальнем космосе // Газета ОАО «Российские космические системы» «Навигатор», 2014, №5(5).
4. Ершов А. Н., Березкин В. В., Петров С. В., Петров А. В., Почивалин Д. А., Ковалев С. В., Смирнов Д. А. Экспериментальная отработка комплексов высокоскоростной передачи информации для КА ДЗЗ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2018, т. 5, вып. 4. С. 56–64.
5. www.ecoruspace.me/?name=WorldView-3 (Дата обращения 07.06.2019).
6. TM Synchronization and Channel Coding, Recommended Standard CCSDS 131.0-B-2, Issue 2, Blue Book, Consultative Committee for Space Data Systems, August 2011. <https://public.ccsds.org/Pubs/131x0b2ec1s.pdf> (Дата обращения 06.06.2019).