



Рождение спутникового непосредственного вещания

Эдгард Кумыш, научный консультант ФГУП НИИР, к.т.н.

НИИ Радио (НИИ-100) был создан в соответствии с Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР № 3749-1559с от 7 сентября 1949 г. Министерство связи СССР своим приказом определило НИИР как головную организацию отрасли по созданию и развитию спутниковых систем связи и вещания, а также по техническим средствам этих систем. Институт является лидером в области создания систем и средств радиосвязи и телерадиовещания. Благодаря труду выдающихся ученых, многие из которых с мировым именем, были разработаны и созданы такие спутниковые комплексы и оборудование, которыми по праву гордится страна.

Особой вехой в истории НИИР следует признать вклад в дело создания бортовых ретрансляторов (БРТР) для геостационарных искусственных спутников связи и вещания.

СИСТЕМА «ЭКРАН». В январе 1972 г. Постановлением ЦК КПСС и Совета министров СССР НИИР было поручено создание БРТР «Дельта-II» для ИСЗ «Радуга», предназначенного в основном для нужд обороны страны. В том же году решением Государственной комиссии Президиума Совета министров СССР по военно-промышленным вопросам СССР перед институтом была поставлена задача по разработке БРТР «Кадр» для первого в мире спутника непосредственного телевизионного вещания «Экран». Проект спутникового вещания «Экран» стал разрабатываться в связи с тем, что предшествующая система «Орбита» [1], впервые выполнившая задачу обеспечения связью и телевидением жителей крупных промышленных центров Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока, а также регионов с населением не менее 200 тыс. человек, требовала строительства земных станций (ЗС) в виде больших сооружений с диаметром антенн 12 м. Такое строительство в сотнях и тысячах малонаселенных районов, по-прежнему оторванных от жизни страны, было экономически неоправданно. Потребовалось новое техническое средство, которое позволило бы решить эту задачу с помощью более экономных решений. Для этой цели предлагалось использовать искусственные спутники Земли (ИСЗ) с повышенной мощностью

излучения, что позволило упростить и удешевить приемные установки, сделать их доступными для небольших населенных пунктов при сравнительно малых затратах.

Первый ИСЗ такой системы «Экран» с мощностью бортового передатчика 300 Вт был запущен 26 октября 1976 г. на геостационарную орбиту (ГСО) с точкой стояния 99° в.д. Площадь зоны обслуживания системы «Экран» составляла более 9 млн кв. км (около 40% территории СССР). При этом охватывалась территория Сибири, Крайнего Севера и частично Дальнего Востока. Большая часть проживающих там людей вообще не имела возможности приема программ телевидения.

Система «Экран» работала на частоте 714 МГц. Преимуществом этого диапазона являются простота и низкая стоимость приемных устройств. С помощью недорогих транзисторных усилителей можно было получить шумовую температуру приемного устройства около 600 К. Многоэлементные антенны типа «волновой канал» обладали малым ветровым сопротивлением при высоком коэффициенте усиления, что не требовало больших затрат на создание антенно-поворотных сооружений. Все эти соображения легли в основу решения при выборе несущей частоты [2–4].

Вопрос о выделении полос частот для системы спутникового непосредственного телевизионного вещания (СНТВ) «Экран» был остро поставлен на Всемирной административной конференции по радиосвязи (ВАКР), состоявшейся в 1971 г. (ВАКР-71). В результате активной деятельности С.В. Бородича, М.И. Кривошеева и других представителей нашей науки, советская делегация, возглавляемая В.А. Шамшиным (зам. директора НИИР по науке, впоследствии министр связи СССР), добилась включения в Регламент радиосвязи (РР) специального примечания, разрешающего использование полосы частот 620–790 МГц для спутникового вещания. Эти полосы частот, выделяемые ранее наземному ТВ-вещанию, были закреплены за службой спутникового вещания.

Основные энергетические параметры системы «Экран» приведены в табл. 1. В отличие от системы «Орбита», в кото-

рой сигналы телевидения и звукового сопровождения передавались методом временного уплотнения, в системе «Экран» сигнал на центральной частоте 714 МГц модулировался методом с девиацией ± 9 МГц. Девиация частоты сигнала звуковой поднесущей и программ радиовещания, также предусмотренных в системе «Экран» (в отличие от системы «Орбита») и передаваемых на поднесущих частотах 6,5 и 7,5 МГц соответственно, составляла ± 2 МГц. Все это позволило максимально упростить приемные земные станции, которые были разработаны в двух вариантах: 1-го и 2-го классов.

Приемные станции 1-го класса предназначались для подачи ТВ-сигнала с высоким качеством на местные телецентры и мощные ТВ-ретрансляторы. Они, как правило, комплектовались антенной типа «волновой канал» с 32 полотнами, каждое из которых имело вибратор, рефлектор и около 30 скрещенных директоров (для приема сигналов с круговой поляризации), и приемным устройством, выполненным в виде стойки и обеспечивающим прием, демодуляцию и разделение сигналов изображения и звукового сигнала. Приемные установки 2-го класса предназначались для подачи сигнала на маломощные ТВ-ретрансляторы или в кабельную распределительную сеть. Они состояли из упрощенной антенны «волновой канал» с четырьмя полотнами, аналогичными полотнам антенны установки 1-го класса, и малогабаритного приемного устройства, осуществляющего перенос спектра принятого сигнала из дециметрового диапазона в один из первых каналов метрового диапазона. Ведущим производителем приемных станций системы «Экран» был Красноярский завод телевизоров (позднее ПО «Искра»). Основные характеристики спутника «Экран» приведены в табл. 2. Бортовой ретранслятор спутника «Экран» строился по гетеродинному типу. Его отличительной особенностью являлось наличие передатчика большой мощности. Согласно стандартной схеме ретрансляторов этого типа он состоял из приемопередатчика малой мощности, мощного выходного усилителя и устройства питания. Все эти приборы соединялись между собой и антеннами соединительными коаксиально-волноводными трактами, соединительными жгутами, высоковольтными и высокочастотными кабелями.

Принятый антенной космического аппарата (КА) входной сигнал в полосе частот 6200 ± 12 МГц по волноводному тракту поступал через разрывающий вентиль и ферритовый переключатель на

Таблица 1
Энергетические параметры системы «Экран»

Параметры	Характеристики
Мощность передатчика, подводимая к антенне спутника, Вт	300
Коэффициент усиления передающей антенны на оси луча, дБ	33,5
Коэффициент усиления передающей антенны в направлении на край зоны, дБ	26
Потери сигнала на трассе в свободном пространстве, дБ	182
Дополнительные потери сигнала на трассе, дБ	2,5
Напряженность поля на границе зоны обслуживания, мкВ	29
Коэффициент усиления приемной антенны земной станции, дБ	30 (1-й класс); 23 (2-й класс)
Потери в антенно-волноводном тракте, дБ	1,1
Эквивалентная температура шумов приемной станции, К	600
Мощность сигнала на входе приемника, дБВт	-106 (1-й класс); -113 (2-й класс)
Мощность шумов на входе приемника, дБВт	-126,8
Отношение сигнал/шум на входе приемника, дБ	20,8 (1-й класс); 13,8 (2-й класс)
Выигрыш ЧМ в канале изображения, дБ	11,3
Отношение сигнал/шум на выходе приемника в канале изображения, дБ	54–53 (1-й класс); 48 (2-й класс)
Отношение сигнал/шум на выходе приемника в канале звукового сопровождения, дБ	53–56 (1-й класс); 49 (2-й класс)

Таблица 2
Характеристики спутников «Экран», «Экран-М» и «Бонум-1»

Параметр	«Экран»	«Экран-М»	«Бонум-1»
Орбитальная позиция	99°в.д.	99°в.д.	36°в.д. (с 08.2000 – 56°в.д.)
Гарантированный срок службы, лет	1	3 (позднее 5)	12
Точность удержания на орбите в направлении запад–восток в течение срока службы, град	±0,5	±0,5	±0,1
Точность удержания на орбите в направлении север–юг в течение срока службы, град	±2	±2	±0,1
Диапазон частот передачи, МГц	714±12	714±12 (БРТР 1) 754±12 (БРТР 2)	18000*
Диапазон частот приема, МГц	6200±12	6000±12 (БРТР 1) 6200±12 (БРТР 2)	12000*
Ширина полосы пропускания ретранслятора, МГц	24 (по уровню 2 дБ)	24 (по уровню 2 дБ)	33 (по уровню 1,5 дБ)
Поляризация сигнала	Круговая		
Число ретрансляторов	2 (рабочий и резервный)	4 (2 рабочих и 2 резервных)	8 (рабочих)
Добротность, дБ/град	12	12	10
ЭИИМ насыщения, дБ/Вт	49	49	53
<i>Примечание.</i> Частотный план КА «Бонум-1» см. http://www.sat-digest.com/doc/Bonum1.pdf . *300 МГц в двух поляризациях.			

основной или на резервный комплект ретранслятора, через полосу-фильтр – на вход смесителя. В смесителе происходило понижающее преобразование принятого сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала в сигнал промежуточной частоты (ПЧ) 70 МГц с помощью сигнала гетеродина, образованного путем умножения частоты сигнала от кварцевого генератора. Сигнал промежуточной частоты проходил через фильтр с полосой ±12 МГц и фазовый корректор, предназначенный для линейризации искажений характеристик группового времени запаздывания тракта, через усилитель промежуточной частоты, охваченный контуром автоматической регулировки усиления, и поступал на вход смесителя передатчика, где происходил перенос сигнала промежуточной частоты в область передаваемых частот 714±12 МГц. Далее сигнал усиливался в предварительном усилителе мощности до значения, необходимого для раскачки мощного выходного устройства. Основное усиление до 300 Вт производилось в выходном усилителе на пролетном клистроне. Для повышения надежности в БРТР ИСЗ «Экран» было применено поблочное «холодное» резервирование. Практически каждый самостоятельный прибор или блок был задублирован, и при работе одного блока или прибора второй служил резервным. Выбор рабочего комплекта осуществлялся подачей на этот прибор или блок питающего напряжения по командам с Земли с одновременным переключением необходимых трактов СВЧ или ПЧ с помощью ферритовых или диодных переключателей.

Особенность системы «Экран» состояла в том, что передающая станция, расположенная под Москвой, находилась вне зоны обслуживания ИСЗ «Экран» и не могла принимать его сигналы. Это создавало две проблемы: точной корректировки наведения передающей антенны и контроля качества. Первую проблему удалось решить с помощью контрольной приемной установки высокой чувствительности, обеспечивающей уверенный прием сигнала на передающей станции, хотя и с пониженным качеством. Проблема контроля качества была устранена путем создания опорных контрольных пунктов в зоне обслуживания

с передачей данных оценки качества в центр управления системой. В качестве оконечного усилителя БРТР в системе использовался пролетный клистрон с выходной мощностью 300 Вт с полосой пропускания 24 МГц по уровню -2 дБ. Клистроны в бортовых усилителях применяются достаточно редко, поскольку, как правило, это узкополосные устройства. Однако к их достоинствам следует отнести большую простоту, а также незначительное количество номиналов питающих напряжений и лучшее КПД по сравнению с лампами бегущей волны (ЛБВ), обычно применяемыми в передатчиках БРТР.

Система «Экран» отличалась простотой и экономичностью. В своем первоначальном виде она прослужила около 10 лет. К концу 1987 г. число ЗС системы «Экран» составляло 4500 единиц. За создание этой эффективной и передовой для тех лет системы СНТВ в 1981 г. специалистами НИИР В.А. Шамшин и И.С. Цирлин были удостоены Ленинской премии. Основными исполнителями работ были В.Л. Быков, В.М. Цирлин, А.В. Соколов, В.И. Дьячков, А.И. Островский, Э.И. Кумыш и другие высококвалифицированные инженеры НИИР.

Популярность этой системы была чрезвычайно высока. Ее создание стало настоящим прорывом в приобщении жителей отдаленных уголков Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока к различным областям жизни нашей страны. В то время как в странах Европы и в США уже существовало многопрограммное телевидение, у жителей Москвы и центральных районов СССР была возможность приема двух-трех ТВ-программ, большинство жителей нашей страны не имели доступа к такой же разнообразной информации. Была поставлена задача приобщить их к современному уровню жизни.

«ЭКРАН-М». Срок активного существования (САС) спутника «Экран» составлял всего один год, что существенно сказывалось на эксплуатационных затратах. Требовалось разработать ИСЗ с более длительным САС и большим количеством БРТР. В 1987 г. была создана модифицированная система СНТВ, получившая название «Экран-М». Она была предназначена для передачи двух ТВ-программ на частотах 714 и 754 МГц с теми же параметрами девиации, что и в системе «Экран».

Новый ИСЗ «Экран-М» был запущен 27 декабря 1987 г. Его полезная нагрузка была рассчитана на использование двух стволов. Благодаря тому что выходные каскады передатчиков ретранслятора были выполнены на транзисторах, гарантийный САС спутника увеличивался с года до трех, а в последующем и до пяти лет. Реально аппараты «Экран-М» работали по девять лет – пока хватало емкости аккумуляторных батарей для

питания систем ориентации ИСЗ на орбите.

Требуемая мощность на выходе передатчика БРТР «Экран-М» обеспечивалась путем сложения мощностей 16 транзисторных усилителей с выходной мощностью каждого 40 Вт. Учитывая потери при сложении около 2 дБ, на выходе передатчика ИСЗ «Экран-М» получалось несколько выше 300 Вт (см. табл. 2).

Несмотря на то что «Экран-М» был спроектирован для двухствольной СНТВ, в реальности использовался только один ствол с центральной частотой 714 МГц, так как на другой частоте создавались помехи в системе распознавания «свой-чужой» в военной и гражданской авиации.

Последний запуск КА «Экран-М» (№ 18) состоялся 7 апреля 2001 г. К этому времени число ЗС системы составляло около 10000.

«ГАЛС». Однако, как следует из сказанного, «Экран-М» не решил задачи выхода на многопрограммное ТВ-вещание. Более того, продолжение работ в диапазоне 714 МГц становилось нецелесообразно, так как выделяемая при этом полоса частот составляла всего 100 МГц и даже при двух поляризациях сигнала полосы было недостаточно. Очевидно, что для работы в расширенной полосе частот спутнику требовалась большая мощность, а суммарная мощность, развиваемая двумя стволами БРТР «Экран-М», не превышала 600 Вт и увеличить ее (по крайней мере вдвое) не представлялось возможным из-за опасности возникновения высоковольтных пробоев в выходных коаксиальных трактах.

Все это требовало перехода в более перспективный диапазон частот, где можно было бы развить большую мощность, получить более широкую рабочую полосу и решить обозначенные проблемы, используя технические средства с меньшими массогабаритными характеристиками.

Следует напомнить, что с 1 января 1979 г. был введен в действие утвержденный ВАКР-79 «План распределения частотных каналов и орбитальных позиций для Района 1 (страны Европы, Азии, Африки, СССР и Монголия)», разработанный для спутниковой передачи сигналов изображения и звукового сопровождения телевидения, а также сигналов звукового вещания. Согласно плану, для указанных районов выделялась полоса 11,7–12,5 ГГц в диапазоне 14/11 ГГц. Для фидерных линий этого назначения в России используется диапазон 17,3–18,1 ГГц.

Начиная с 1990 г. в этих выделенных диапазонах в Советском Союзе началась разработка спутников «Галс-1» и «Галс-2». КА создавался в НПО ПМ (ныне «ИСС имени академика М.Ф. Решетнёва») на

базе платформы «КАУР-4». В качестве полезной нагрузки для каждого из них в НИИР были разработаны 3-ствольные бортовые ретрансляторы «Дракон». Эти БРТР изготавливались на российской элементной базе, за исключением входных маломощных усилителей (МШУ), в которых использовались зарубежные НЕМТ-транзисторы с шумовой температурой $T_{ш} = 220...240$ К. Выходные усилители мощности стволы были выполнены на лампе бегущей волны (ЛБВ) мощностью 80, 80 и 40 Вт соответственно. Срок службы ИСЗ «Галс» составлял 5 лет. Первый КА «Галс-1» был выведен на орбиту в точку стояния 44° в.д. в январе 1994 г. «Галс-2» запущен в точку стояния 71° в.д. в ноябре 1995 г. Впоследствии оба КА были переведены в точку 36° в.д. По ряду причин эти спутники вскоре были выведены из эксплуатации.

В 1998 г. предпринята попытка создания ретранслятора «Галс-16Р», рассчитанного на 16 стволы, для которого за рубежом приобрели МШУ и мощные ЛБВ с КПД 65% для выходных усилителей мощности бортовых передатчиков. К сожалению, из-за отсутствия финансирования работу над этим БРТР пришлось приостановить и больше она не возобновлялась.

НИИР – РАЗРАБОТЧИК БРТР. За неполные 35 лет в НИИ Радио было разработано семь типов БРТР для связных и вещательных ИСЗ: «Дельта-И», «Кадр», «Диполь», «Доступ», «Дракон», «Луч» и «Экспресс-АМ». Эти БРТР успешно функционировали на КА «Экран», «Экран-М», «Галс», «Горизонт» и продолжают работать на спутниках связи «Радуга», «Экспресс», «Луч». Для КА «Горизонт» по документации НИИР в РНИИ КП (ныне АО «Российские космические системы») был создан БРТР, который обеспечил связь во время Олимпийских игр 1980 г. в Москве. Следует отметить, что на собственной производственной базе НИИР изготовил 23 БРТР, отработка и испытания которых осуществлялись на созданной специально для этих целей испытательной базе, а в кооперации с другими промышленными предприятиями было изготовлено еще 52 БРТР.

В целом в отечественной группировке спутников связи и вещания функционировало 75 бортовых ретрансляторов разработки НИИР. За эти годы в институте накоплен уникальный опыт по созданию, наземной отработке и испытаниям БРТР, построена испытательная база, в коллективе трудятся высококвалифицированные специалисты, за плечами которых большой опыт разработок и создания бортовой ретрансляционной аппаратуры.

В НИИР функционируют: испытательное оборудование, включающее климатические камеры, эксклюзивная вакуумная камера Weiss-Technik, вибростенды, помещения с чистой зоной, комплекс

Таблица 3

Число ТВ-каналов, передаваемых в спутниковом стволе 36 МГц в цифровых форматах при различных методах сжатия и кодирования видеосигнала

Период времени, годы	Формат ТВ-сигнала	Стандарт цифровой передачи	MPEG-2	MPEG-4	HEVC
1900-е	Стандартное телевидение	DVB-S	12	20	-
2000-е		DVB-S2	-	26	-
2000-е	Телевидение высокой четкости	DVB-S	2–3	5	-
2010-е		DVB-S2	3–4	6–8	12–15
2020-е	Телевидение ультравысокой четкости	DVB-S2X		1–2	3–4

контрольно-проверочной аппаратуры (КПА), а также система качества на соответствие требованиям ГОСТ ИСО 9001–2011, ОТК, приемка заказчика 474 ВП МО РФ.

За последние годы НИИР выполнил свыше 10 НИР по совершенствованию приборов БРТР и формированию принципов построения и облика современных БРТР связи и вещания. Это позволило сохранить ведущих специалистов, технологическое оборудование, испытательный комплекс. Отличительной чертой предприятия является то, что создаваемые ретрансляторы всегда проектируются и выполняются с учетом имеющихся и перспективных потребностей отрасли связи, знание и особенности которых – профильная задача НИИР. В процессе решения этих уникальных задач силами НИИР в течение полувека (с начала 1960-х годов и по первое десятилетие XXI века) непрерывно совершенствовались системы БРТР спутников связи и вещания. Под руководством организаторов и выдающихся специалистов на предприятии разработано значительное количество спутниковых систем связи и непосредственного телевизионного вещания: «Орбита», «Экран», «Москва», «Москва-Глобальная», «Интерспутник», действовавших на ИСЗ типа «Молния-3», ГСО-спутниках типа «Экран», «Радуга» и «Горизонт».

В работах по созданию спутниковых систем участвовали многие активные и талантливые специалисты НИИР. Некоторые из них стали лауреатами Ленинской, Государственной и Правительственной премий, были отмечены другими высокими наградами. В их числе и Л.Я. Кантор, дважды лауреат Государственной премии СССР (за создание системы «Орбита» и за комплекс работ «двойного назначения»), лауреаты Государственной премии за разработки различных отечественных спутниковых систем связи Н.В. Талызин, М.З. Цейтлин, А.Д. Фортушенко, С.В. Бородич, А.В. Соколов, Ю.М. Фомин, В.М. Цирлин, В.Л. Быков, И.Э. Мач, А.И. Цукублин, М.И. Кривошеев, С.С. Шлюгер [5].

С сожалением следует отметить, что начиная с 2000 г. все БРТР для спутников СНТВ создавались иностранными производителями по техническим заданиям, разрабатываемым в НИИР и передаваемым зарубежным изготовителям. На смену спутникам «Галс», закончившим работу в 1998 и 1999 гг., был приобретен созданный в США спутник «Бонум-1» (см. табл. 2), первоначально (в 1999 г.) запущенный в точку стояния 36° в.д. В 2000 г. российский оператор спутниковой связи ФГУП «Космическая связь» арендовал 16 стволов на ИСЗ «Евтелсат-4», созданном французской компанией Eutelsat. В связи с тем что этот спутник также был запущен в точку стояния 36° в.д., «Бонум-1» был переведен в точку 56° в.д. Созданием этого спутника на коммерческой основе занимались возникшие в тот период акционерные предприятия. В скором времени они прекратили свое существование, а спутник был передан в руки государства. В первый год своего существования БРТР «Бонум-1» принимал сигналы аналогового ТВ. При этом в качестве модуляции использовалась уже не ЧМ, а ФМ, что позволяло передавать в стволе с полосой 33 МГц до восьми ТВ-программ. Позднее был осуществлен переход на цифровые методы модуляции и эффективные алгоритмы сжатия (MPEG-2, MPEG-4) ТВ-сигнала. В табл. 3 показано число ТВ-каналов стандартной (SD), высокой (HD, или ТВЧ) и сверхвысокой (UHD, или ТСВЧ) четкости, которое может быть передано в полосе частот ствола 36 МГц при разных сочетаниях стандартов передачи DVB-S и DVB-S2 (Digital Video Broadcasting) с форматами сжатия видео MPEG-2, MPEG-4 (H.264) и HEVC (H.265).

В связи с окончанием срока службы КА «Бонум-1» были заменены на ИСЗ ТВ-вещания «Экспресс-АТ1», «Экспресс-АТ2», запущенные в 2014 г., и «Евтелсат-36А/36В».

ИСЗ «Экспресс-АТ1» и «Экспресс-АТ2» диапазона 14/11 ГГц также строились в России с использованием зарубеж-

ной комплектации. Целевые задачи при создании этого нового поколения спутников заключались в обеспечении более высокой надежности в течение гарантированного САС 15 лет, в принятии мер по внедрению на КА бортовых антенн с улучшенной пространственной избирательностью, в повышении емкости и ограничении взаимных помех между российскими и иностранными КА, расположенными в близких орбитальных позициях ГСО. Эти спутники представляют собой следующий шаг в развитии систем СНТВ. Они работают не только в стандарте цифрового ТВ-вещания DVB-S, но и в стандартах, позволяющих осуществлять передачу и прием ТВЧ и ТСВЧ. Передовые методы сжатия видеоизображения MPEG-2, MPEG-4 (H.264) и последний их вариант HEVC (H.265) позволяют достичь исключительно высоких степеней сжатия видеосигнала. Благодаря внедрению и развитию этой группы стандартов становится возможной передача телевидения высокой и сверхвысокой четкости в системах СНТВ. Теперь основным стандартом формирования сигналов становится уже DVB-S2, позволяющий увеличить частотную эффективность до 4,5 раза. Внедряются и более эффективные конструкции этого семейства, например DVB-S2X, дополняющие первую версию стандарта методами модуляции, что позволяет повысить частотную эффективность почти до 6 бит/Гц. В заключение следует добавить, что участие НИИР в развитии российского спутникового телевизионного вещания – необходимое условие будущих успехов отрасли, поскольку институт по-прежнему способен решать важнейшие и самые насущные задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Быховский, М.А.** История создания и развития отечественных спутников связи и вещания / М.А. Быховский, М.Н. Дьячкова // Электросвязь: история и современность. – № 1. – 2007.
- 2. Кантор, Л.Я.** Спутниковое вещание // Л.Я. Кантор, В.П. Минашин, В.В. Тимофеев. – М.: Радио и связь, 1981.
- 3. Кантор, Л.Я.** «Экран» – первая в мире спутниковая система РТВ // Электросвязь. – 1996. – № 10.
- 4. Бартенев, В.А.** Спутниковая связь и вещание: справочник под ред. Л.Я. Кантора // В.А. Бартенев, Г.В. Болотов, В.Л. Быков и др. – М.: Радио и связь, 1997.
- 5. Создание современных систем радиосвязи и телерадиовещания в России / Под ред. М.А. Быховского. – Ч. 1 и 2. – Серия «История электросвязи и радиотехники». – М.: ЛКИ, 2008.**