

# Функция Deembedding в осциллографах R&S RTP: учёт и компенсация амплитудно-фазовых искажений для пробников и измерительной оснастки

## Часть 2

**Николай Лемешко** (nlem83@mail.ru),  
**Павел Струнин** (Pavel.Strunin@rohde-schwarz.com),  
**Михаил Горелкин** (Mikhail.Gorelkin@rohde-schwarz.com)

Во второй части проанализирован алгоритм компенсации оснастки, применяемый в новейших осциллографах серии R&S RTP, основанный на использовании аппаратных и программных цифровых фильтров. На примере осциллографии сигналов в шине SuperSpeed интерфейса USB 3.1 gen.1 показана эффективность опций R&S RTP-K121 и RTP-K122.

### РЕАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИИ DEEMBEDDING В ОСЦИЛЛОГРАФАХ СЕРИИ R&S RTP

Реализация функции Deembedding включает в себя следующие этапы:

- калибровка измерительной оснастки для получения её характеристики в требуемом формате;
  - расчёт характеристик компенсирующих виртуальных цепей;
  - встраивание виртуальных цепей в схему измерений;
  - перенормировка опорного импеданса к виртуальному измерительному сечению;
  - введение элементов или дополнительной обработки для разложения сигнала на дифференциальную и общую моды.
- Совершенно очевидно, что такой алгоритм должен выполняться макси-

мально автоматизированно и давать ощутимое улучшение качества результатов измерений. При разработке концепции его реализации в осциллографах серии R&S RTP ставилась цель компенсировать вносимые оснасткой затухание, асимметрию передачи дифференциального сигнала (skew), нелинейность фаз, вызванную зависимостью электрофизических параметров материалов от частоты и погрешности волнового сопротивления, т.е. фактически все факторы, оказывающие определяющее влияние на форму сигнала во временной области.

В осциллографах R&S RTP коррективировка такого рода искажений осуществляется без перехода в частотную область с использованием цифровых фильтров с амплитудно-фазовой харак-

теристикой, рассчитываемой на основе измеренных характеристик оснастки. Если такой фильтр имеет аппаратную реализацию, то компенсация осуществляется в реальном времени.

Такой подход, обладая собственными функциями Deembedding достоинствами, имеет и некоторые недостатки, например одновременное увеличение уровня широкополосного шума. В этом случае целесообразно использовать фильтр низких частот, в достаточной мере ограничивающий полную мощность шума и минимально влияющий на измеряемый сигнал. Если функция Deembedding реализуется в реальном времени, то одним из способов снижения времени обработки является переход к фильтрам более низких порядков, но это одновременно снижает и точность компенсации. Коррекция точки запуска может осуществляться только в случае программного исполнения Deembedding. Но поскольку запуск развёртки осуществляется на аппаратном уровне, то определение нового положения точки запуска может выполняться со значительной погрешностью. В случае программного исполнения Deembedding визуализация результатов измерений в реальном времени невозможна, поскольку программный фильтр может быть применён только после захвата и сохранения первичного массива данных.

Решение, предложенное компанией R&S для выполнения функции Deembedding, в общем случае предусматривает комбинирование аппаратной и программной обработок (см. рис. 3), выполняемых для оцифрованного входного сигнала осциллографа. В аппаратной части фильтр для Deembedding установлен непосредственно после аналого-цифрового преобразователя. При помощи этого фильтра осуществляется первый этап

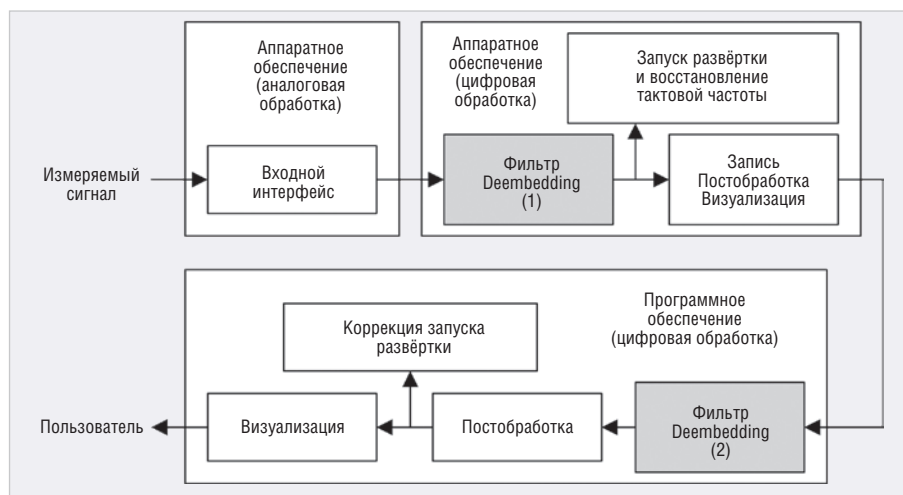


Рис. 3. Архитектура реализации функции Deembedding в реальном времени

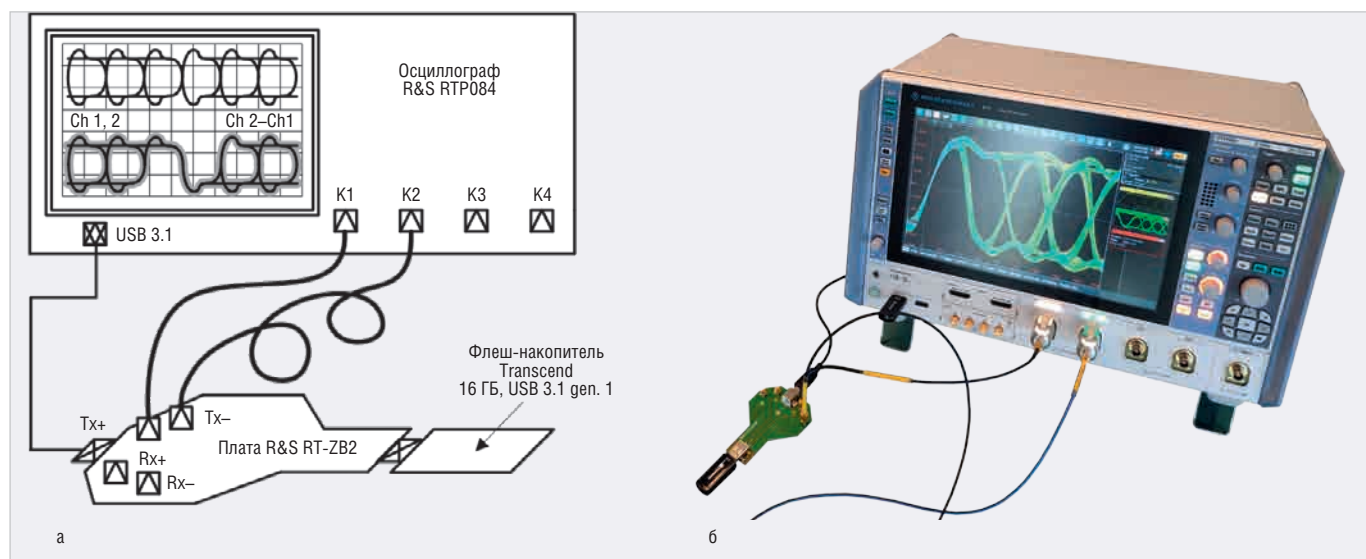


Рис. 4. Установка для проведения измерений: а) схема; б) фотография

компенсации искажений, результат которого оказывается достаточным для коррекции запуска развёртки и правильного восстановления тактовой частоты, необходимого для анализа сигналов цифровых последовательных интерфейсов типа USB 3.1. В осциллографах R&S RTP имеется возможность управления отображением результатов применения аппаратной функции Deembedding к входному сигналу, что позволяет не только оценить её эффект, но и проверить правильность соблюдения условий запуска.

Альтернативная архитектура осциллографа, в которой фильтр Deembedding отсутствует в аппаратной части, предусматривает отображение сигнала после программной коррекции, но запуск развёртки осуществляется по нескорректированному сигналу. Ввиду этого возможно появление расхождения между заданным и наблюдаемым событиями запуска. Таким образом, реализация Deembedding в реальном времени должна считаться приоритетной, в особенности с учётом возможности распределения обработки между аппаратной и программной частью.

Для осциллографов серии R&S RTP функция Deembedding может быть реализована при помощи двух опций разной функциональности:

- опция R&S **RTP-K121** предназначена для реализации компенсации типовых искажений, в первую очередь потерь в линиях передачи, пробниках, зондах и элементах измерительной оснастки;
- опция R&S **RTP-K122** представляет собой функциональное расширение для опции R&S RTP-K121 и обеспечивает

повышение скорости захвата и запуск по скорректированным сигналам.

К настоящему времени эффективность и полезность функции Deembedding подтверждена для анализа цифровых сигналов со скоростями гигабитного диапазона, а также радиосигналов со сложными видами модуляции [9]. Рассмотрим примеры её практического применения для анализа цифровых и аналоговых сигналов во временной области.

### ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИИ DEEMBEDDING В ОСЦИЛЛОГРАФЕ СЕРИИ R&S RTP ДЛЯ СИГНАЛА СТАНДАРТА USB 3.1 GEN.1

*Оборудование и средства измерений.* Одной из важнейших проблем современных цифровых систем является обеспечение синхронности сигналов в параллельных шинах, необходимой для их правильного захвата и обработки, т.е. тайминга [3, 6]. Соблюдение тайминга важно и для сигналов в дифференциальных парах, особенно при скоростях передачи выше 100 Мбит/с. Представленный ниже пример демонстрирует возможности функции Deembedding по исправлению проблем тайминга, вызванных измерительной оснасткой.

Для выполнения измерений была применена схема (см. рис. 4), предназначенная для измерений дифференциальных сигналов в линиях Tx хоста шины SuperSpeed интерфейса USB 3.1 gen.1. Схема измерений включала в себя осциллограф R&S RTP084 с полосой рабочих частот до 8 ГГц и четырьмя каналами, а также установленными опциями R&S RTP-K121 и RTP-K122. Работой шины управлял хост

USB 3.1 в составе аппаратной платформы осциллографа. В качестве периферийного устройства USB использовался флеш-накопитель Transcend объёмом 16 Гб. Для согласованного соединения хоста, каналов осциллографа и флеш-накопителя применялась специальная плата R&S RT-ZB2 (USB 3.1 Demo Board 1). Сигналы Tx+ и Tx- подавались на каналы 1 и 2 осциллографа через коаксиальные кабели и адаптеры R&S RT-ZA (прецизионный BNC/SMA), причём длина кабеля, соединяющего выход Tx-платы с каналом 2 осциллографа, была существенно больше, чем второго кабеля. Выходы Rx+ и Rx- платы R&S RT-ZB2 при измерениях оставались неподключёнными.

Перед проведением измерений для длинного и короткого кабелей при помощи векторного анализатора цепей типа R&S ZVA были сняты зависимости S-параметров от частоты, сохранённые в стандартные файлы «.S2P», которые могут быть использованы опциями R&S RTP-K121 и RTP-K122 для реализации функции Deembedding. К настоящему времени компания Rohde&Schwarz готовит к представлению на рынке аппаратно-программную опцию для осциллографов R&S RTP, которая позволит снимать характеристику компонентов измерительной оснастки без привлечения других средств измерений.

*Осциллограмма сигналов в шине SS без активации функции Deembedding* получена на основе пакетов, которые хост передаёт флеш-накопителю. На рисунке 5а показаны осциллограммы сигналов в линиях Tx+ (канал 1) и Tx- (канал 2) при синхронизации по фрон-

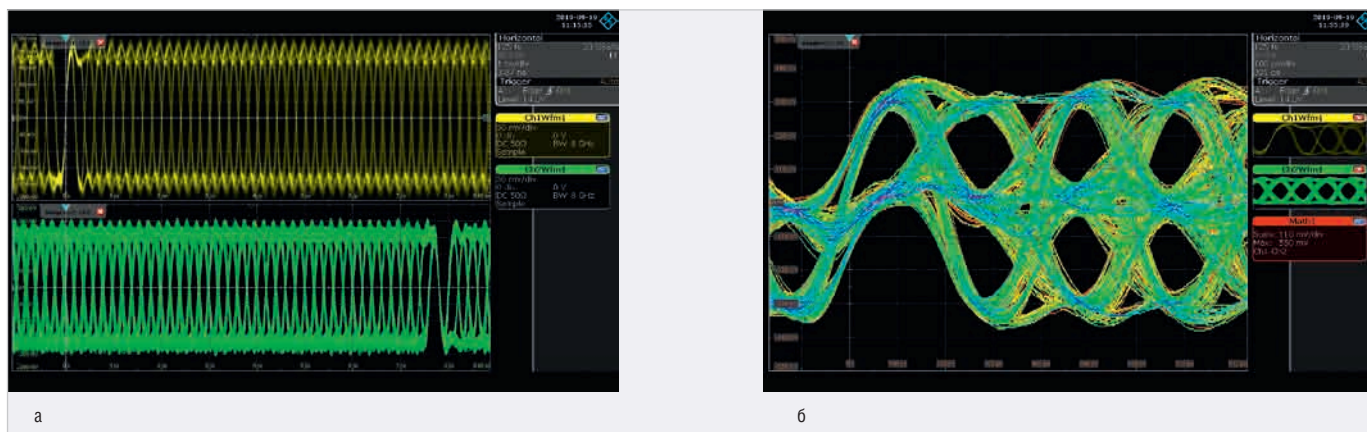


Рис. 5. Осциллограммы, полученные без активации функции Deembedding: а) сигналов в линиях Tx+ и Tx-; б) дифференциального сигнала

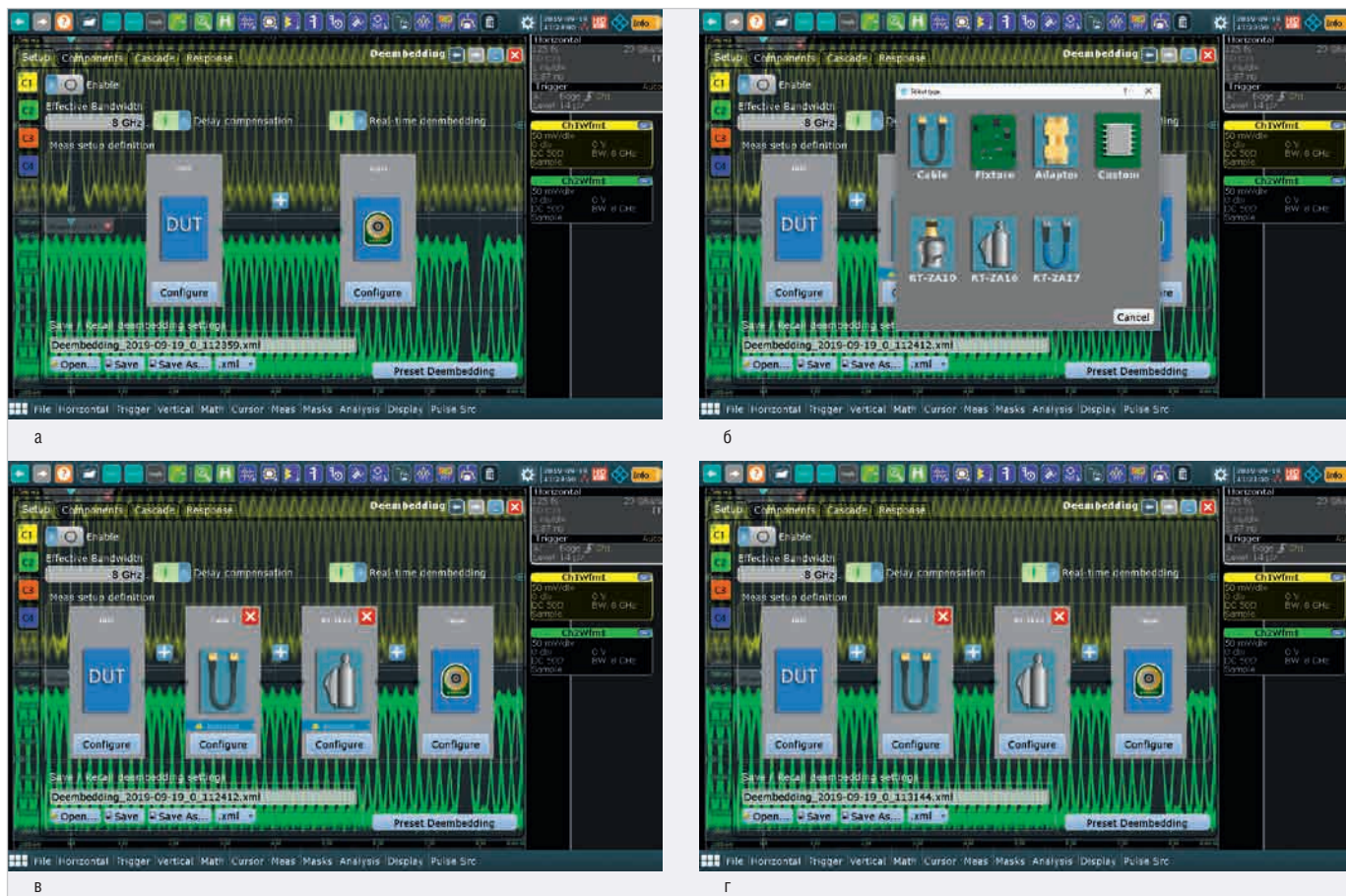


Рис. 6. Добавление элементов измерительной оснастки при конфигурировании опций R&S RTP-K121 и RTP-K122 для реализации функции Deembedding: а) первоначальное окно; б) окно выбора элементов оснастки; в) окно после выбора элементов оснастки; г) окно после загрузки файлов с S-параметрами для элементов измерительной оснастки

ту в канале 1. Из-за разного времени запаздывания сигналов в длинном и коротком кабелях сигнал в канале 2 оказывается смещённым на 7,8 нс, что категорически неприемлемо, поскольку номинальная длительность битового интервала для сигналов в шине SuperSpeed составляет 200 пс [10]. На осциллограммах заметно и проявление ослабления сигналов в кабеле: максимальное напряжение на входе канала 1 составляет около 225 мВ, а на входе канала 2 – 200 мВ. Диффе-

ренциальный сигнал (см. рис. 5б), полученный как разность сигналов в каналах 1 и 2, не соответствует требованиям спецификации [10] по конфигурации глазковой диаграммы из-за пересечений на нулевом уровне, и поэтому не может быть декодирован. Глазковая диаграмма должна иметь раскрыв не менее 62,5% длительности битового интервала от 100 до 1200 мВ. Таким образом, выделение отдельных бит в цифровом сигнале оказывается невозможным только из-за проблем

тайминга, вызванных измерительной оснасткой.

Функция Deembedding в типовых случаях реализуется при помощи специальной вкладки (см. рис. 6а) для каждого канала осциллографа в отдельности, на которой могут быть активированы компенсация задержки и режим реального времени. Для выбора дополнительного элемента оснастки достаточно нажать пиктограмму с символом «+», в результате чего откроется окно, показанное



Рис. 7. Загрузка файла с S-параметрами для кабеля в составе измерительной установки: а) первоначальное окно; б) окно после загрузки файла с S-параметрами



Рис. 8. Осциллограммы, полученные после активации функции Deembedding: а) сигналов в линиях Tx+ и Tx-; б) дифференциального сигнала

в середине на рисунке 6б. В нижнем ряду перечислены стандартные переходники и кабели, которые поставляет компания Rohde&Schwarz, причём их характеристика уже записана в памяти осциллографа. Основными типами оснастки являются кабели, переходники и платы, при необходимости можно сконфигурировать описание элемента со специальными свойствами. После добавления адаптера R&S RT-ZA и кабеля вкладка конфигурирования функции Deembedding для отдельного канала приобретает вид, показанный на рисунке 6в. Метка bypassed означает, что при реализации функции Deembedding данный элемент оснастки будет игнорироваться, поскольку не загружен файл с его S-параметрами. После их загрузки конфигурирование завершается (см. рис. 6г).

Для загрузки файла с характеристикой элемента измерительной оснастки следует нажать кнопку Configure, после чего откроется окно, представленное на рисунке 7а. Загрузка файла с S-параметрами осуществляется путём

выбора соответствующего файла в его левой нижней части, после чего в правой части окна в виде графика отображается зависимость значения выбранного S-параметра и соответствующей ему фазы от частоты (см. рис. 7б). При необходимости она может быть масштабирована для улучшения отображения.

В соответствии с описанной последовательностью действий для каждого канала было сформировано описание использовавшейся измерительной оснастки, после которого для активации функции Deembedding достаточно переключить движок в окне, показанном на рисунке 6г.

Осциллограмма сигналов в шине SS при активированной функции Deembedding при тех же условиях запуска показана на рисунке 8а. Компенсация свойств используемой оснастки позволила устранить разность по времени запаздывания сигналов, приходящих на каналы 1 и 2 осциллографа, как это видно из сопоставления с рисунком 5а. Кро-

ме того, компенсированы и потери в кабеле: теперь максимальное напряжение для каналов 1 и 2 составляет около 245 и 253 мВ. На рисунке 8б показан полученный дифференциальный сигнал, для которого установленные спецификацией требования по минимальному раскрытию глазковой диаграммы оказываются выполненными.

При необходимости сигналы в шине SuperSpeed после реализации функции Deembedding могут быть подвергнуты более глубокому анализу с выделением пакетов в передаваемом битовом потоке и декодированием содержимого их полей. Такой анализ может быть выполнен с использованием программной опции R&S RTP-K61.

Таким образом, представленный пример подтвердил эффективность применения функции Deembedding при анализе цифровых сигналов высокоскоростных протоколов передачи данных со скоростями выше 1 Гбит/с для компенсации потерь и временной задержки в измерительной оснастке.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Компенсация свойств измерительной оснастки с использованием опции R&S RTP-K121 и RTP-K122 выполняется автоматически, с минимальным участием пользователя. Это не только упрощает использование Deembedding, но и позволяет избежать ошибок, связанных с самостоятельным построением моделей компенсируемых цепей. Планируемый выпуск специальной аппаратно-программной опции для осциллографов серии R&S RTP, позволяющей измерять S-параметры для элементов измерительной оснастки, в будущем сделает использование функции Deembedding полностью независимым от вспомогательных средств измерений.

Функция Deembedding, реализованная в осциллографах R&S RTP, может использоваться и для решения некоторых проектных и исследовательских задач. В частности, с её помощью можно осуществлять выбор элементов для последующего физического введения в существующие радиочастотные тракты. Для такого применения файлы должны содержать информацию о свойствах цепей с обратными передаточными функциями.

ми. Результатом реализации функции Deembedding станет их виртуальное добавление к имеющимся трактам.

Несомненно, что дальнейшее развитие цифровой электроники будет следовать по пути увеличения скоростей и расширения полос частот, необходимых для передачи сигналов. Этой закономерности подчинена и эволюция средств измерений, находящаяся в прямой зависимости от потребностей разработчиков. Можно ожидать, что для осциллографов и многих других классов средств измерений, работающих в гигагерцевом диапазоне, компенсация таких свойств измерительной оснастки, как задержка, рассогласование и потери, станет одним из основных условий обеспечения точности измерений, а функция Deembedding будет привычным и полезным инструментом при разработке и отладке цифровых устройств современного уровня быстродействия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Девяткин Е.Е., Кечиев Л.Н., Степанов П.В.* Радиочастотный ресурс и его использование. Учебное пособие. М.: МИЭМ, 2002. 188 с.
2. *Дансмор Д.П.* Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передо-

вых методик векторного анализа цепей. Серия книг «Мир электроники». М.: Техносфера, 2018. 753 с.

3. *Кечиев Л.Н.* Печатные платы и узлы гигабитной электроники. М.: Грифон, 2017. 424 с.
4. *Афонский А.А., Дьяков В.П.* Измерительные приборы и массовые электронные измерения. Серия книг «Библиотека инженера». М.: СОЛОН-Пресс, 2017. 540 с.
5. *Ефимов Е.И., Остапкович Г.А.* Радиочастотные линии передачи. Радиочастотные кабели. М.: Связь, 1977. 408 с.
6. *Кечиев Л.Н.* Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. 616 с.
7. *Хибел М.* Основы векторного анализа цепей. Глава 4. Линейные измерения. М.: Издательский дом МЭИ, 2018. 65 с.
8. *Алексеев О.В., Головкин А.А., Пивоваров И.Ю. и др.* Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств. Учебное пособие для вузов. Под ред. Алексеева О.В. М.: Высшая школа, 2000. 400 с.
9. Realtime deembedding with the R&S®RTP. Application Card | Version 01.00.
10. Universal Serial Bus 3.2 Specification. Rev.1, 22.09.2017. Интернет-ресурс <http://www.usb.org> (дата обращения 01.05.2019). ©

**LUMINEO**  
POWERED BY VEPEQ

**ДИСПЛЕИ ДЛЯ**  
**ОТ -50°C**

**PROSOFT®**  
WWW.PROSOFT.RU

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

НОВОСТИ МИРА

**МТС, «ЭЛЕМЕНТ» И СКОЛТЕХ  
БУДУТ СОТРУДНИЧАТЬ  
В РАЗРАБОТКЕ РОССИЙСКОГО  
5G-ОБОРУДОВАНИЯ**

ПАО «МТС», группа компаний «Элемент», объединяющая ведущие российские предприятия микроэлектроники, и Сколковский институт науки и технологий (Сколтех), подписали трёхстороннее соглашение о сотрудничестве в разработке и производстве в России оборудования для сетей 5G на основе международных открытых стандартов радиодоступа проекта Open RAN.

В рамках соглашения МТС и «Элемент» намерены содействовать лидирующему исследовательскому центру Сколтеха в реализации проекта по разработке сквозного цифрового решения Open RAN для сетей 5G и последующей локализации производства в России разработанных решений с использованием отечественной компонентной базы «Элемента».

«Мы надеемся, что сотрудничество операторов связи, производителей элементной базы, системных интеграторов, научных центров и стартапов в России выльется в создание широкой экосистемы поставщиков оборудования и ПО за счёт эффективной локализации

перспективных решений радиодоступа. Разработчики и производители получат мощный импульс в инновационном развитии, а операторы связи – возможность снижать затраты, сокращать сроки вывода на рынок новых технологий, быть гибкими в создании кастомизированных решений, в том числе с использованием элементов собственной разработки», – отметил руководитель по развитию цифровых технологий RAN МТС Алексей Маслянкин.

«Являясь технологическими лидерами отрасли микроэлектроники в России, мы уверены, что объединение наших компетенций с МТС и Сколтехом позволит существенно ускорить внедрение технологий 5G в России. Синергия между участниками проекта станет безусловным драйвером в расширении спектра отечественных решений 5G и доступности сервисов «цифровой экономики». Развитие внутреннего рынка для российского телеком-оборудования и появление конкурентоспособной продукции даст сильный позитивный эффект. Важно, что от данного партнёрства выиграют, в первую очередь, потребители конечных услуг мобильной связи и Интернета вещей», – прокомментировал соглашение директор по проектам «Элемента» Юрий Халиф.

«Смена парадигмы построения беспроводных сетей в сторону открытых архитектур и интерфейсов – новый мощный тренд в глобальной телеком-индустрии. Теперь к внедрению концепции Open RAN подключаются и отечественные компании», – отметил руководитель Центра компетенций НТИ по беспроводной связи и Интернету вещей при Сколтехе Дмитрий Лаконцев.

Соглашение предполагает сотрудничество МТС, «Элемента» и Сколтеха в следующих направлениях:

- исследования новых принципов и архитектур построения мобильных сетей новых поколений;
- оценка параметров и вариантов применения мобильных сетей новых поколений;
- оценка влияния мобильных сетей новых поколений на новые бизнес-модели операторов связи в рамках цифровизации экономики РФ;
- анализ компонентной базы изделий с целью формирования стратегии их локализации;
- оценка возможностей создания отечественного оборудования с характеристиками не хуже иностранных аналогов.

Группа МТС

**ЖЁСТКИХ УСЛОВИЙ**

**до +85°C**



**Основные свойства  
электролюминесцентных дисплеев**

- Кристальная чёткость изображения. Отсутствует размытость изображения движущегося объекта при температуре –60°C
- Широкий угол обзора – свыше 160°
- Время отклика менее 1 мс
- Средний срок безотказной работы более 116 000 часов
- Срок эксплуатации не менее 11 лет при потере яркости 25–30%
- Устойчивость к ударным и вибрационным воздействиям
- Низкий уровень электромагнитного излучения
- Компактный корпус и обрамление

**Области применения**

- Специальная техника
- Транспортные средства
- Промышленное оборудование
- Медицинские приборы
- Аппаратура морской техники

**LUMINEQ**  
POWERED BY **BENEQ**

МОСКВА  
(495) 234-0636  
info@prosoft.ru

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
(812) 448-0444  
info@spb.prosoft.ru

ЕКАТЕРИНБУРГ  
(343) 356-5111 (912) 620-8050  
info@prosoftsystems.ru ekaterinburg@regionprof.ru



PHOTO: S. KAMINSKIY