



УДК 372.853:621.3.01(075.8)

ТЕОРИЯ СВЯЗИ И РАДИОФИЗИКА (О ПРЕПОДАВАНИИ ТЕОРИИ СВЯЗИ И ИНФОРМАЦИИ НА ФИЗИЧЕСКОМ ФАКУЛЬТЕТЕ)

А. В. Хохлов, А. В. Слепнев



Хохлов Артур Вениаминович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, hohlovav@sgu.ru

Слепнев Андрей Вячеславович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиофизики и нелинейной динамики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, a.v.slepnev@gmail.com

В статье обсуждается совершенствование методики преподавания курсов теории связи и информации в Саратовском университете путем введения дополнительных разделов, посвященных анализу радиофизических процессов в различных устройствах систем связи. Предлагается электродинамическое рассмотрение волновых процессов в световодах, особенностей использования новых КМОП-устройств для преобразования сигналов в системах связи и избранных схемотехнических решений.

Ключевые слова: телекоммуникации, теория связи, ИТ-технологии, выборка-хранение, световод, индуцированный канал, одномодовое волокно, многомодовое волокно, КМОП-структуры.

DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2018-18-4-302-312>

Введение

Подготовка бакалавров и магистров по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» предполагает изучение целого комплекса современных естественно-научных дисциплин, среди которых особая роль принадлежит радиофизике. Несмотря на общую направленность подготовки, каждый вуз формирует свой комплекс дисциплин, но в подавляющем большинстве учебников и учебных пособий [1–3] просматривается акцент на компьютерно-программную ориентацию, а изложение основных физических идей осуществляется на уровне общих принципов.

Нам представляется неоправданным, что выпускники физического факультета Саратовского государственного университета (СГУ), где радиофизические исследования проводятся на протяжении 75 лет и создана саратовская радиофизическая школа, породившая разнообразные научные

исследования и промышленные предприятия, используя при обучении литературу, указанную выше, в лучшем случае будут понимать только принципы действия современных систем связи и после изучения теории связи и информатики, телекоммуникационных и цифровых систем, цифрового телевидения и спутниковой связи будут рассматривать отдельные узлы инфокоммуникационных систем как «черные ящики» с набором входов и выходов. Это не отражает специфики физического факультета СГУ и тем более странно, так как основные преобразования в системах связи, в СВЧ и оптических линиях передачи, в полупроводниковых и электронных приборах глубоко и подробно изучаются в курсах теории колебаний и электродинамики СВЧ, физики полупроводников и физической электроники, но практически не связаны с курсами информационного цикла.

При построении современных телекоммуникационных систем широко используется «блочный принцип», когда решение новых задач сводится к выбору готовых изделий с подходящими параметрами и соединению их между собой. При этом создаваемая структура может оказаться неоптимальной и лишает возможности заглянуть внутрь используемых блоков. Этот же принцип используется при чтении лекций. Он не дает возможностей изучить функционирование используемых элементов, исправить или модернизировать вновь разрабатываемые структуры по сравнению с уже существующими.

По-видимому, целесообразно и даже необходимо, используя радиофизический подход к некоторым разделам теории связи, раскрывать динамику преобразований сигналов, состав и структуру отдельных узлов и механизмы их функционирования. Для этого в лекциях желательно расширять знания, полученные в фундаментальных курсах, и дополнительно вводить некоторые простейшие электронные схемы.

Цель работы – совершенствование методики преподавания курсов теории связи и информации путем введения дополнительных



разделов, посвященных анализу форм и методов использования радиофизического подхода в различных системах связи, а также избранных схематических решений различных способов преобразования сигналов.

1. Общий взгляд на теорию связи. Терминология

Связь – понятие многофункциональное. Это и философская категория, отражающая взаимозависимость, взаимообусловленность материальных явлений мира, и социологическое понятие, и возможность передачи информации на расстояние. Поэтому в современной литературе наряду с передачей информации на расстояние часто используется эквивалентное понятие – телекоммуникация (от греч. *tele* – далеко и лат. *communication* – связь) [1–3]. Согласно определению Международного союза электросвязи телекоммуникации – «совокупность средств, обеспечивающих перенос информации в требуемой форме на значительное расстояние посредством распространения сигналов в одной из сред (меди, оптическом волокне, эфире) или совокупности сред», т.е. телекоммуникации и электрическая связь – синонимы. Для теории связи в современной учебной и научной литературе существует разнообразная и иногда плохо совместимая терминология: теория средств и систем связи называется теле- и инфокоммуникационными технологиями [4–6]. Поэтому перед чтением курса желательно построить некую единую и непротиворечивую систему определений и понятий.

К связи как способу передачи информации на значительные расстояния предъявляются требования быстрой и точной (безошибочной) передачи больших объемов информации. Эффективность связи зависит как от способа передачи, так и от вида передаваемых сообщений. Сообщения, т.е. представленные в определенной форме сведения о предметах, фактах, идеях и событиях, предназначенные для передачи, могут быть акустическими, текстовыми, графическими, неподвижными или подвижными изображениями, а также числовыми данными. Для передачи в системах связи сообщения преобразуются в электрические сигналы. Текстовые и числовые сообщения (в том числе научные, включающие графики, неподвижные изображения, мультипликацию), а также аудио- и видеосообщения, записанные на CD или DVD дисках, кодируются и передаются в цифровой, чаще всего двоичной

форме, а телевизионные и радиосообщения являются непрерывными (аналоговыми) функциями времени. Однако во всех перечисленных случаях сигнал, отображающий сообщение, существует в виде функции времени, даже когда сообщение таковым не является.

Электрические сигналы могут быть аналоговыми, дискретными или цифровыми. Пока связь осуществлялась через проводные телефонные линии, по линиям передавались аналоговые сигналы в виде электрического тока от микрофонов домашнего телефона или из концертного зала. Первые сигналы телевизионного вещания тоже были аналоговыми, но из-за широкого частотного спектра не могли передаваться по проводам. Здесь не мешает напомнить, что для принятого в стране стандарта СЕКАМ при формате кадра 4:3 (число строк 625, частота кадров 25 в секунду) полоса частот телевизионного сигнала составляет около 13 МГц. Такую широкую полосу частот оказалось трудно передать, модулируя по амплитуде радиоволны метрового диапазона. В лекции полезно рассказать, какие радиофизические приемы позволили сократить полосу частот модулирующего сигнала до 6 МГц и дополнительно ввести цветоразностные сигналы, не увеличивая общую полосу частот. Итак, получен аналоговый амплитудно-модулированный сигнал. Аналоговое телевидение распространено до сих пор. Возникает вопрос: чем это плохо и почему нужно замещать его цифровым телевидением? При переходе на формат 16:9 полоса частот аналогового телевизионного канала HD (High Definition) возростала бы до 103.7 МГц. Использование цифрового вещания и стандартов сжатия сигнала позволило сократить ширину полосы частот до 18 МГц. Кроме этого резко увеличилось качество изображения и его помехозащищенность.

Теперь о технологиях. Информация уже стала таким же ресурсом, как материальные или энергетические, а процесс ее переработки можно рассматривать как технологию, т.е. формирование новой информации о состоянии объекта или явления по совокупности процессов отбора и обработки данных [5, 7]. Телекоммуникационные и компьютерные (IT, ай-ти) технологии в значительной степени перекрываются, но компьютерные, в отличие от телекоммуникационных, опираются на ЭВМ и программные продукты. При этом решаются задачи хранения и защиты информации, автоматической обработки и кодирования текстов и изображений, но пере-



дача информации остается за телекоммуникационными средствами. Естественно, что многие достижения компьютерных технологий переносятся на телекоммуникации, т.е. проявляются конвергенции (от лат. *convergo* – приближаюсь, схожусь) и возникают сходства в использовании аппаратно-программных средств и совокупности предоставляемых услуг, существующих в различных видах связи. Объединение компьютерных и телекоммуникационных технологий в единый комплекс было естественным и привело к образованию новой высокотехнологичной отрасли экономики – инфокоммуникационных технологий. В последние годы инфокоммуникационные технологии кроме телекоммуникаций включают такие традиционные социальные медиапродукты, как пресса, а одним из важнейших достижений стало превращение телекоммуникационных сетей связи в инфокоммуникационные. Сети связи являются центральным разделом курса теории связи [4, 5, 8], но терминологические противоречия существуют и здесь. Компьютерные, интеллектуальные, поисковые сети называются информационными, а их сочетание с телекоммуникационными – инфокоммуникационными сетями. Такая терминология хорошо согласуется с технологией, но не является общепризнанной. В ряде учебников инфокоммуникационные сети называются обобщенно информационными, и становится непонятным, как входят в их состав телекоммуникационные сети. Видимо, самыми первыми были телеграфные сети (локальные, региональные, междугородные), многие соглашения и протоколы которых были заимствованы в дальнейшем в компьютерных технологиях практически без изменений. Надстройкой над ними стали телефонные, затем радиовещательные и телевизионные.

Современные инфокоммуникационные сети – это полностью цифровые широкополосные сети связи, основанные на микро- и нанoeлектронике и новейших технологиях передачи данных. Они обеспечивают обмен всеми видами информации между множеством территориально удаленных объектов и являются широко разветвленными сетями каналов связи с большой пропускной способностью и высокой сохранностью передаваемой информации. Доступ к информации, ее распределение и коммутация выполняются с помощью специального программного обеспечения, а все инженерно-технические решения достигаются широким использованием радиофизических принципов. В лекции желательно

объяснять (в учебной литературе об этом говорят редко, а анализируют радиофизические приемы и методы еще реже), что Интернет, электронная почта, wi-fi-технологии и, конечно, мобильная связь интенсивно развиваются только потому, что для оперативного решения сложных проблем топологии сети, маршрутизации и коммутации потоков информации разрабатываются новые радиофизические методы и устройства.

Упрощенная структура передающей телекоммуникационной системы содержит блоки форматирования цифровых сигналов из передаваемых сообщений (дискретизации, квантования и кодирования), экономного и избыточного кодирования, импульсно-кодовой модуляции (PCM) высокочастотного или оптического излучения. После этого сигнал через передатчик попадает в канал связи, затем – в приемник, где претерпевает операции, обратные описанным выше: демодуляцию, декодирование и фильтрацию.

При чтении лекций даже кратко представить внутреннюю структуру блоков телекоммуникационной системы и методику использования радиофизического подхода в рамках допустимого объема настоящей статьи невозможно. Поэтому решено ограничиться рассмотрением принципиально нового подхода к блокам форматирования цифровых сигналов и радиофизического толкования явлений ускоренного введения в телекоммуникации КМОП-структур и перевода оптико-волноводных линий связи на одномодовый режим.

2. Преобразование аналоговых сигналов в цифровую форму

Студентам важно объяснить, что переход на цифровую технологию связи актуален по многим причинам: увеличивается максимальная скорость и точность передачи информации, резко возрастает набор информационных и телекоммуникационных услуг, появляется возможность исправлять ошибки, повышается пропускная способность канала связи и многое другое. В настоящее время развитию методов цифровой обработки акустических и телевизионных сигналов уделяется много внимания. В лекциях следует подробнее рассматривать как ранее развитые радиофизические методы дискретизации, квантования и оцифровывания аналоговых сигналов [9], так и последние достижения. Для одномерных сигналов это сделать нетрудно, а для двумерных и многомерных (учитывая цветность изображений), видимо, нужно рассказать о мето-



дах сжатия и кодирования изображений и о том, как почти ежедневно рождаются новые методы сжатия. Чтобы представить аналоговый сигнал в цифровой форме, используется ограниченное число амплитуд, необходимое и достаточное для восстановления сообщения после передачи в соответствии с теоремой Котельникова – Шеннона [10]. В большинстве учебников и учебных пособий процесс трансформации аналогового сигнала в цифровой (форматирование) выполняется в три этапа: дискретизация, квантование полученных значений и кодирование квантованных отсчетов двоичными комбинациями. Это методы классической радиофизики, успешно используемые в цифровой связи на протяжении десятилетий.

При изучении и анализе достижений аналого-цифровых преобразований (АЦП) низкочастотных и радиочастотных сигналов возникла идея объединить все три этапа форматирования цифровых сигналов в едином формирователе. Возможно, эта идея уже реализована за рубежом, так как встречаются сообщения о разработках АЦП, способных выполнять более 1 млрд отсчетов в секунду, но публикации о таких системах нам неизвестны.

Объединенный формирователь цифровых сигналов можно получить, если так называемое устройство выборки-хранения (УВХ) в качестве дискретизатора объединить с быстродействующим параллельным АЦП в качестве квантователя и кодировщика отсчетов двоичными комбинациями. Простейшее УВХ состоит из управляемого электронного ключа (ЭК), запоминающего конденсатора и операционного усилителя (ОУ) с высоким входным выходным сопротивлением для согласования с источником аналогового сигнала, причем возможны два варианта включения: разомкнутый (обеспечивает наибольшее быстродействие выборки) и замкнутый (более медленный, но повышенной точности) [11]. Предложенная нами схема объединенного формирователя цифровых сигналов представлена на рис. 1. Использовались два ОУ в замкнутом или разомкнутом состоянии и самый точный и быстродействующий КМОП-ключ, обладающий наилучшими характеристиками: сопротивление замкнутого ключа $1 \div 2$ Ом, наибольшая частота переключений 200 МГц (часть электрической схемы, ограниченная пунктирной кривой).

До начала выборки на конденсаторе хранилось напряжение последнего отсчета. Замыкание ЭК (положительная полярность управляющих импульсов) вызывает дозаряд или перезаряд С

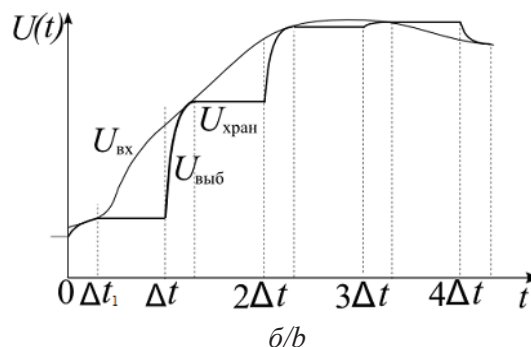
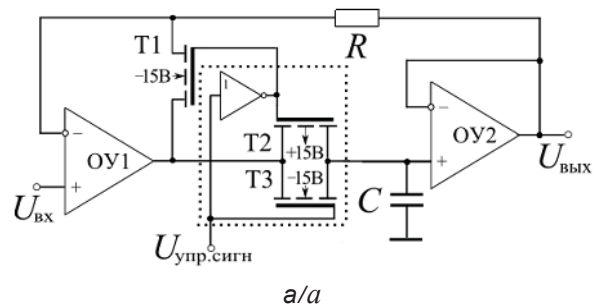


Рис. 1. Электрическая схема УВХ на основе КМОП-ключа (а) и зависимость напряжения на входе и выходе УВХ от времени (б)

Fig. 1. Sample and hold circuit based on a CMOS switch (a) and its dependence of input and output voltages on time (b)

в соответствии с амплитудой нового отсчета. При этом транзисторы Т2 и Т3 замкнуты, а Т1 разомкнут, т.е. УВХ в режиме выборки работает с общей обратной связью. Резистор R предотвращает насыщение усилителя У1, которое может возникнуть из-за размыкания общей обратной связи. Точность выборки напряжения отсчета зависит от величины постоянной времени цепи заряда С. Поскольку выходное сопротивление ОУ1 и сопротивление замкнутого ключа малы, конденсатор С заряжается в течение нескольких наносекунд, и ошибка заряда маловероятна.

По окончании интервала Δt_1 полярность управляющих импульсов изменяется, ключ размыкается, транзистор Т1 закорачивается и накопленное на С напряжение сохраняется практически неизменным. Входное сопротивление ОУ2 составляет десятки МОм, и величина заряда может уменьшаться только из-за утечки в изоляторах емкости С. При этом УВХ работает с изолированными ОУ, и небольшую дополнительную ОС через резистор можно не учитывать. Цикл завершен, и операции повторяются для следующих отсчетов (циклов).

Импульсы, управляющие ЭК, обычно имеют скважность 2, т.е. длительности выборки и



хранения одинаковы. При использовании УВХ для дискретизации такой режим не эффективен. Если период дискретизации Δt , а ЭК замыкается на время Δt_j (выборка), а затем размыкается (см. рис. 1, б), то оставшуюся часть периода можно использовать для квантования и кодирования даже с большим числом разрядов. Далее студенту нужно объяснить, что в современных системах связи все три процедуры успешно выполняются в АЦП с УВХ, которые выпускаются в виде компактных интегральных микросхем (ИМС). На простой транзисторной схеме АЦП с задающим генератором, УВХ и набором компараторов легко показать, как выполняются описанные процедуры. Стоит обратить особое внимание, что дискретизация аудиосигнала с полосой частот до 20 кГц требует более 40 тысяч отсчетов в секунду с интервалом $\Delta t \leq 25$ мкс, и это не предел. Пусть студент только представит себе такие скорости выборки. На этом можно остановиться, а можно

рассказать о сложности задач, которые придется решать радиофизикам и специалистам по физике полупроводников.

Далее следует показать, как рассмотренные радиофизические принципы используются в цифровом представлении двумерных аналоговых сигналов (изображений), когда картину, фотографию или рисунок дискретизируют разбиением на малые квадратные элементы, отличающиеся однородностью внутри элемента и получившие название пикселей (от англ. *picture element* – элемент изображения или кадра), т.е. интервал дискретизации становится двумерным. Каждому элементу присваивается значение или код цвета. От размера пикселей зависит возможность сжатия изображений и разрешение. Для оптимального кодирования изображение обычно разбивается на блоки размером 8×8 ppi = 64 ppi² (ppi – пиксел на дюйм). Затем с помощью двумерного дискретного преобразования Фурье

$$D(u, v) = \sqrt{2/N} \sum_{i,j=0}^{N-1} E(x_i, y_j) \cos \frac{(2i+1)\pi u}{2N} \times \cos \frac{(2j+1)\pi v}{2N}, \quad N = 8,$$

каждый из блоков преобразуется в набор 64 спектральных гармоник (по числу пикселей в блоке) и размещается в таблице, причем амплитуда самой низкочастотной гармоники с индексами (0,0) – в левом верхнем углу, а самой высокочастотной гармоники – в правом нижнем углу. При нормировании амплитуд гармоник многие высокочастотные гармоники отбрасываются из-за малых значений (спектр сжимается), а оставшиеся после зигзагообразного чтения матриц и сокращения числа ненулевых гармоник участвуют в восстановлении сжатого изображения обратным преобразованием Фурье. Зигзагообразное чтение матриц и построение одномерного временного сигнала – это не просто красивая идея, а важнейший радиофизический метод оцифровки двумерных изображений.

3. КМОП-структуры в технике связи

Новые радиоэлементы и устройства для преобразования сигналов быстро и активно внедряются в телекоммуникационные системы. Сначала усилители и генераторы, потом модуляторы, фильтры, наконец, различные цифровые схемы обеспечили их нынешнее состояние [12]. До недавнего времени в качестве цифровых логических элементов (ЛЭ) использовались биполярные транзисторы (БТ), обладающие высоким быстро-

действием, но потребляющие до 10 мВт на ЛЭ. Более популярные МДП- или МОП-структуры, обладающие низким энергопотреблением и простотой изготовления, имеют низкие скорости переключения из-за больших емкостей. Когда были созданы первые микросхемы, объединяющие МОП-транзисторы с индуцированными n - и p -каналами (*комплементарные* пары – КМДП или КМОП) и получены недостижимые в БТ-технологиях скорости переключения и плотности монтажа, КМОП-структуры заняли ведущее место в различных системах связи (от мобильной до спутниковой). И для этого есть несколько причин. Прежде всего, простота изготовления и компактность интегральных микросхем. Технология настолько простая, что даже небольшие предприятия начали изготавливать КМОП-микросхемы [13]. Другая причина – низковольтное энергопитание (от 2.7 до 0.8 В). Наконец, переходные процессы удалось сократить до 2 нс. Студенту важно показать, как работают КМОП-элементы, какие телекоммуникационные устройства можно на них создать и как их использовать.

При изучении КМОП-структур студенту следует напомнить, что в МОП-транзисторах проводящий канал может быть индуцированным, т.е. пропускающим ток при определенном управляющем напряжении или встроенным (про-



пускающим ток даже при нулевом управляющем напряжении) и изобразить конструкцию комплементарной пары МОП-транзисторов.

Упрощенная структура комплементарной пары транзисторов представлена на рис. 2, а. Здесь в кристалле из чистого или слабо легированного полупроводника p -типа (подложка Π_2) встроены области истока и стока n^+ -типа и карман с проводимостью n -типа (подложка Π_1), в котором встроены свои зоны истока и стока с проводимостью p^+ -типа. Затем поверхность кристалла между истоками и стоками покрывается диэлектриком, формируются затворы транзисторов и выводы остальных электродов. Из КМОП-транзисторов можно построить любые цифровые устройства, необходимые для телекоммуникационных систем, причем их функционирование оказывается проще и доступнее для понимания, чем элементов с другими транзисторами. Простейшие КМОП-структуры можно сделать из двух транзисторов с каналами разной проводимости. Если n - и p -канальный

транзисторы соединить последовательно, получим КМОП-инвертор, если параллельно – управляемый КМОП-ключ.

Принципиальная электрическая схема КМОП-инвертора представлена на рис. 2, б, а соединение электродов КМОП-структуры, соответствующее инвертору, – на рис. 2, а. Выводы истоков обычно объединяются с подложками и соединяются с полюсами источника питания. Объединение затворов образуют вход x , а объединение стоков – выход y инвертора. Если напряжение на входе равно нулю, то $U_{зИ2} = 0$, канал транзистора T_2 отсутствует и он закрыт. У транзистора T_1 между подложкой и затвором подано напряжение $U_{пит}$ ($U_{зИ1} = -U_{пит}$), в T_1 индуцируется p -канал, и он открывается. Напряжение $U_{СИ1} \rightarrow 0$, а выход инвертора оказывается под напряжением источника питания $y = U_{СИ2} \rightarrow U_{пит}$. Так как в цифровых системах за логическую единицу принимается высокий уровень напряжения U_1 , близкий к напряжению питания $U_{пит}$, налицо инверсия низкого уровня в высокий. Когда напряжение

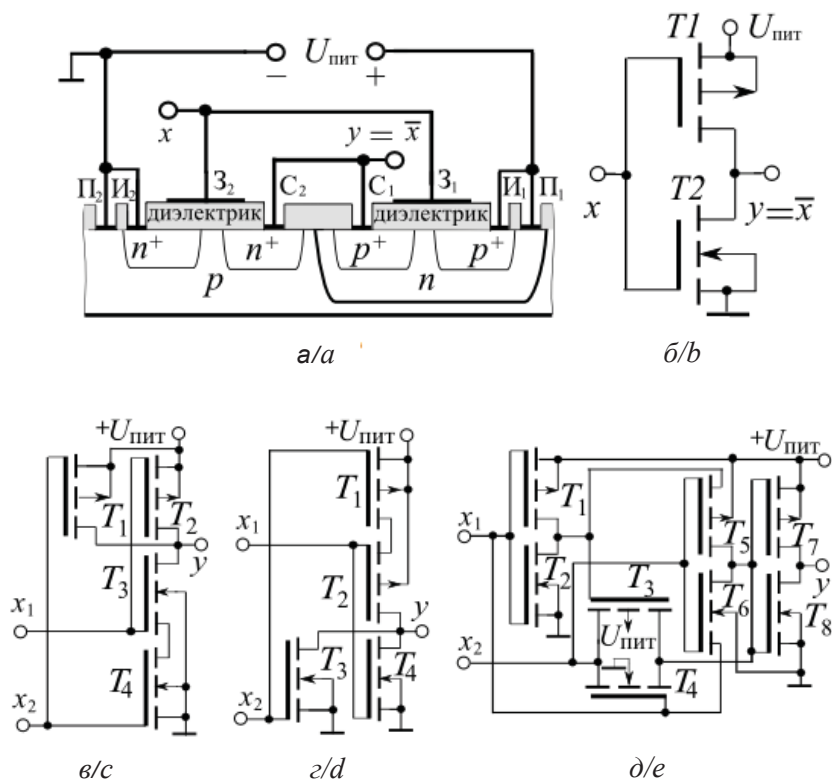


Рис. 2. Структура комплементарной пары МОП-транзисторов (а) и электрические схемы КМОП-инвертора (б), конъюнктора (в), дизъюнктора (г) и элемента «ис-ключающее ИЛИ» (д)

Fig. 2. Structure of the complementary pair of MOSFETs (a) and the electrical circuits of the CMOS inverter (b), the conjuncture (c), the disjunctive element (d), and the exclusive-OR element (e)



на входе $x = U_1$, транзистор T_1 закрывается, в транзисторе T_2 индуцируется n -канал и напряжение $y = U_{\text{СИ2}} \rightarrow 0$. Таким образом, высокий уровень входного сигнала x инвертируется в низкий уровень выходного сигнала y , и наоборот. В любом из устанавливаемых режимов один из транзисторов закрыт, и инвертор не потребляет ток. Структура и режим транзисторов подбираются так, чтобы даже при переходных процессах T_1 и T_2 не были открытыми одновременно.

Цифровые логические элементы, выполняющие базовые операции И-НЕ (конъюнкции, логического умножения) и ИЛИ-НЕ (дизъюнкции, логического сложения), можно считать обобщениями схемы КМОП-инвертора на случай двух или большего числа входов. Если p -канальные транзисторы соединены последовательно, а n -канальные – параллельно (рис. 2, в), то выполняется операция «логическое сложение», если наоборот (рис. 2, з) – операция «логическое умножение» [14]. Электрическая схема КМОП-ключа в виде параллельного соединения транзисторов с индуцированными каналами n - и p -типа изображена на рис. 1, а. В ключе используется парафазное управление с помощью ОУ, обеспечивающее одновременное открытие и закрытие транзисторов и коммутацию сигналов положительной и отрицательной полярности. Очень важно объяснить, что сопротивление замкнутого ключа КМОП-типа мало. Так, например, сопротивление замкнутого ключа MAX4715 компании Maxim составляет всего 0.4 Ома при напряжении питания 1.6÷3.6 В и скорости переключений 18÷20 нс. Такие параметры полупроводникового элемента даже трудно представить. Лучшим сопротивлением обладают только герконовые реле, но их скорости переключения составляют десятки миллисекунд. Отметим, что каскадное включение трех инверторов и ключа представляет собой распространенный элемент «исключающее ИЛИ» (рис. 2, д).

Настолько подробное описание принципов работы КМОП-элементов позволяет студенту без затруднений создавать электрические схемы

различных элементов телекоммуникационных устройств (сумматоров, мультиплексоров, кодеров и регистров сдвига). В качестве дополнительного задания студенту можно поручить составить электрическую схему ЛЭ, например, И-НЕ-типа, или D-триггера.

4. Электродинамика оптоволоконных систем

Развитию телекоммуникаций, и особенно телекоммуникационных сетей, значительно способствовали достижения оптоволоконных технологий и широкое применение перспективных волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), обеспечивших резкое увеличение объема и скорости передачи информации [15]. В лекциях по различным курсам теории связи обычно только упоминают об этих достижениях, о видах оптических световодов и режимах волн. Электродинамика распространения электромагнитных волн терагерцовых частот в учебной литературе не рассматривается, а без нее трудно разобраться с физикой современных световодов и с характеристиками ВОЛС. На физическом факультете СГУ этот недостаток легко устранить, если методологию СВЧ-колебаний распространить на оптический диапазон.

Если круглый диэлектрический цилиндр радиуса a с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{a1} = \epsilon_1 \epsilon_0$ расположен в диэлектрике с $\epsilon_{a2} = \epsilon_2 \epsilon_0 < \epsilon_{a1}$ (оболочка), то внутри цилиндра реализуется полное внутреннее отражение волн [15], а у поверхности стержня формируется медленная *поверхностная* волна, экспоненциально затухающая в направлении нормали и как будто «прижимающаяся» к более плотному диэлектрику (отсюда название – *поверхностная*), т.е. диэлектрический цилиндр становится линией передачи оптических волн или *световодом*. При этом внутренняя и поверхностная волна не являются поперечными и содержат продольные компоненты. Используя граничные условия при $r = a$, в лекции можно вывести трансцендентное характеристическое уравнение [16]:

$$(\beta m a)^2 \left[\frac{1}{g^2 a^2} + \frac{1}{p^2 a^2} \right] = (\omega a)^2 \left[\frac{\epsilon_0 \epsilon_1 J'_m(ga)}{ga J_m(ga)} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_2 K'_m(pa)}{pa K_m(pa)} \right] \cdot \left[\frac{\mu_0 J'_m(ga)}{ga J_m(ga)} + \frac{\mu_0 K'_m(pa)}{pa K_m(pa)} \right]$$

или
$$\left[\frac{\epsilon_1 J'_m(ga)}{ga J_m(ga)} + \frac{\epsilon_2 K'_m(pa)}{pa K_m(pa)} \right] \cdot \left[\frac{J'_m(ga)}{ga J_m(ga)} + \frac{K'_m(pa)}{pa K_m(pa)} \right] = \left(\frac{\beta m}{k_0} \right)^2 \left[\frac{1}{g^2 a^2} + \frac{1}{p^2 a^2} \right] = \left(\frac{\beta m}{k_0} \right)^2 \frac{V^2}{(ga)^2 (pa)^2},$$



устанавливающее связь постоянной распространения β с поперечными волновыми числами g и p и допускающее численные решения, соответствующие различным (симметричным и несимметричным) модам колебаний в световоде. Здесь m – число волн по азимуту, J_m (gr), K_m (pr) – функции Бесселя и Макдональда m -го порядка, $V = 2\pi a NA / \lambda_0$ – нормированная частота излучения или характеристическое число отсечки, NA – числовая апертура волокна.

Симметричные волны ($m = 0$) имеют одну продольную компоненту поля и обладают структурой волноводных E_{0n} - и H_{0n} -волн. Чтобы простейшая E_{01} - и H_{01} -волна могла распространяться, частота излучения должна удовлетворять соотношению частот

$\xi_{io} / 2\pi a NA \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} < f > 2.405c / 2\pi a NA \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$, где c – скорость волн в воздухе. Несимметричные E- и H-волны существуют только совместно и называются гибридными (HE_{mn} с преобладанием продольной составляющей электрического поля или EH_{mn} с преобладанием продольной составляющей магнитного поля). Среди гибридных волн особую ценность имеет мода HE_{11} с нулевым значением числа отсечки. Зависимости фазовых скоростей пяти мод колебаний от V , полученные на РС, представлены на рис. 3, а, а распределение полей волны HE_{11} в поперечном и продольном сечении световода – на рис. 3, б и рис. 3, в соответственно. В лекции важно показать, почему возникает нулевая частота отсечки и, как следствие, одномодовый режим световода.

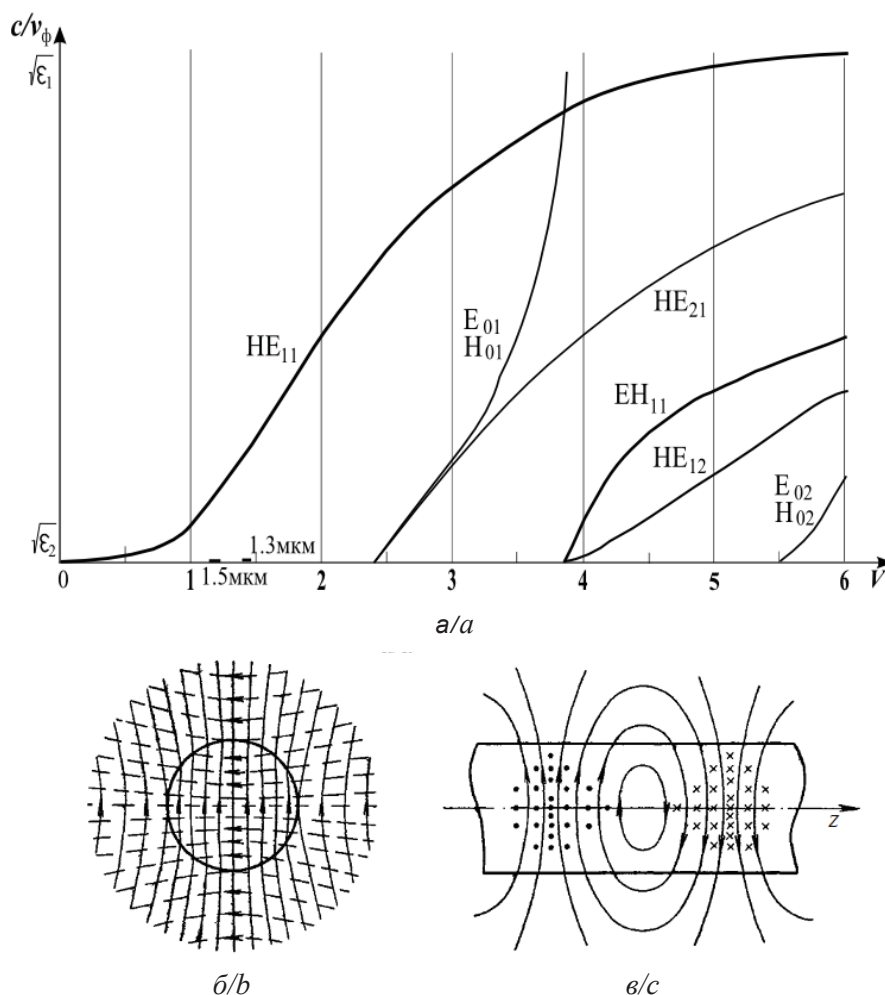


Рис. 3. Зависимости фазовых скоростей пяти нижних мод колебаний от характеристического числа отсечки $V(a)$ и распределение полей волны HE_{11} в поперечном (б) и продольном (в) сечении световода

Fig. 3. Dependences of the phase velocities of the five lower modes of oscillations on the characteristic cutoff number $V(a)$ and the distribution of the fields of the HE_{11} wave in the transverse (b) and longitudinal (c) sections



Удалось показать, что в так называемых «слабо направляющих волокнах ($\varepsilon_1 - \varepsilon_2 \ll \varepsilon_1$)» для волны HE_{11} существует приближенное решение в элементарных функциях, так как сомножители в левой части характеристического уравнения становятся одинаковыми, для гибридных волн получаем упрощенное характеристическое уравнение:

$$\frac{J'_m(ga)}{gaJ_m(ga)} + \frac{K'_m(pa)}{paK_m(pa)} = \pm m \left[\frac{1}{ga} + \frac{1}{pa} \right],$$

а для гибридной волны HE_{11} имеем:

$$\frac{gaJ_1(ga)}{J'_1(ga)} + \frac{paK_1(pa)}{K'_1(pa)} = \frac{1}{1/ga + 1/pa}.$$

При $p = 0$ правая часть уравнения обращается в нуль и получаем $J_1(ga) = 0$. Это условие отсечки моды HE_{11} . Первый корень функции Бесселя $J_1(ga)$ равен нулю, и отсечка наступает при $ga = 0$, т.е. *одномодовый режим* волны HE_{11} в световодах может существовать в диапазоне частот $0 < f < \frac{2.405/2\pi a}{NA\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$.

Кварцевые волокна световодов [14] имеют три окна прозрачности (локальные минимумы затухания на $\lambda=0.78\div 0.9$, $1.26\div 1.36$ и $1.52\div 1.62$ мкм, частоты $f=330\div 380$, $220\div 240$ и $185\div 200$ ТГц). Было показано, что для $\lambda=1.26\div 1.62$ мкм одномодовый световод – это волокно диаметром 5-6 мкм из кварцевого стекла со стандартной числовой апертурой $NA=0.1$, и его окнам прозрачности соответствуют нормированные частоты $V=1.13\div 1.23$ и $1.39\div 1.47$ (см. рис. 3, а, две выделенные области V). Таким образом, окна прозрачности одномодового световода занимают лишь часть возможной области существования моды HE_{11} .

В окне прозрачности $0.78\div 0.9$ мкм одномодовый режим возможен только при диаметре центрального волокна меньше 1 мкм, а затухание возрастает почти в 30 раз по сравнению с другими окнами прозрачности. Поэтому в диапазоне $0.78\div 0.9$ мкм световоды используются в многомодовом режиме. Для стандартного многомодового волокна с диаметрами 50/125 мкм при $NA=0.2$ на $\lambda=0.85$ мкм нормированная частота $V=37$, и согласно графика рис. 3, а в световоде оказывается большинство симметричных и гибридных мод, так как у самых длинных из них EH_{11} и HE_{12} частоты отсечки составляют всего

3.83. Общее число мод в многомодовом световоде определяется как $N=V^2/2$ и в данном случае равно 680. Хотя различные моды ортогональны, между ними возникает дисперсия и скорость передачи падает. Поэтому многомодовые световоды оптимальны только для малых расстояний, а для многокилометровых линий передачи используются одномодовые световоды.

Заключение

Кратко резюмируем сказанное. Рассмотрена методика расширенного использования физических принципов и методов при чтении курса теории связи. Признаемся, что за границами рассмотрения оказались многие разделы курса, и такие актуальные радиофизические явления, как многоступенчатая и квадратурная модуляция, методы модуляции оптического излучения, расширение спектров сигналов на основе псевдослучайных последовательностей, особенности распространения волн в системах мобильной связи, использование в телекоммуникациях МОП-транзисторов с плавающим затвором и другие. Надеемся, что статья поможет преподавателям донести до студентов, какую роль играет радиофизика в развитии теории связи, и они научат выпускников вузов использовать радиофизические методы при модернизации существующих и создании новых телекоммуникационных систем.

Список литературы

1. Нефедов В. И., Сигов А. С. Общая теория связи : учебник для бакалавриата и магистратуры. М. : Юрайт, 2016. 495 с.
2. Tomasi W. Electronic Communication Systems. Fundamental Through Advanced. Pearson Higher Ed USA, 2003. 1184 p. (Russ. ed. : Томаси У. Электронные системы связи. М. : Техносфера, 2007. 1360 с.).
3. Биккенин Р. Р., Чесноков М. Н. Теория электрической связи: учеб. пособие для студ. высших учеб. заведений. М. : Академия, 2010. 336 с.
4. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей / под ред. В. Н. Гордиенко и В. И. Крухмалева. М. : Горячая линия Телеком, 2008. 510 с.
5. Костров Б. В., Ручкин В. Н., Калинин Т. И. Телекоммуникационные и вычислительные сети. Архитектура, стандарты и технологии. СПб. : БХВ-Петербург, 2010. 288 с.
6. Величко В. В., Катунин Г. П., Шувалов В. П. Основы инфокоммуникационных технологий. М. : Горячая линия Телеком, 2009. 712 с.
7. Васин В. А., Власов И. Б., Дмитриев Д. Д., Калмыков В. В., Кузнецов А. А., Николаев А. И., Пудлов-



- ский В. Б., Родзивилов В. А., Себекин Ю. Н., Сенин А. И., Слукин Г. П., Федоров И. Б. Информационные технологии в радиотехнических системах : учеб. пособие / под ред. И. Б. Федорова ; 2-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 846 с.
8. *Olifer N., Olifer V. Computer Networks : Principles, Technologies and Protocols for Network Design.* Wiley India Pvt. Limited, 2006. 1000 p. (Russ. ed.: *Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети : Принципы, технологии, протоколы: учебник.* СПб. : Питер, 2010. 958 с.).
 9. *Котельников В. А. О пропускной способности «эффира» и проволоки в электросвязи // Успехи физических наук . 2006. Т. 176, № 7. С. 753–762.*
 10. *Хохлов А. В., Вадивасова Т. Е., Шабунин А. В. Сигналы. Методы описания, модели, информационные возможности : учеб. пособие для студ. физ. спец. / под ред. В. С. Анищенко. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2011. 256 с.*
 11. *Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. М. : Додэка-XXI, 2011. 528 с.*
 12. *Никитин В. А. Схемотехника интегральных схем ТТЛ, ТТЛШ и КМОП : учеб. пособие. М. : НИИЯУ МИФИ, 2010. 64 с.*
 13. *Строгонов А. В. Проектирование логических элементов заказных КМОП БИС. Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. техн. ун-та, 2003. 214 с.*
 14. *Хохлов А. В., Вадивасова Т. Е., Шабунин А. В. Элементная база радиоэлектроники. Тенденции и перспективы развития : учеб. пособие для студ. физ. спец. / под ред. В. С. Анищенко. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2014. 320 с.*
 15. *Gowar J. Optical communication systems.* Prentice ; Hall International, 1984. 577 p. (Russ. ed. : *Гауэр Дж. Оптические системы связи. М. : Радио и связь, 1989. 504 с.*)
 16. *Барыбин А. А. Электродинамика волноведущих систем. Теория возбуждения и связи волн. М. : Физматлит, 2007. 512 с.*

Образец для цитирования:

Хохлов А. В., Слепнев А. В. Теория связи и радиофизика (о преподавании теории связи и информации на физическом факультете) // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2018. Т. 18, вып. 4. С. 302–312. DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2018-18-4-302-312>

Communication Theory and Radiophysics (on the Teaching of the Theory of Communication and Information at the Department of Physics)

A. V. Khokhlov, A. V. Slepnev

Arthur V. Khokhlov, <https://orcid.org/0000-0001-6307-4961>, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, khokhlovav@info.sgu.ru

Andrei V. Slepnev, <https://orcid.org/0000-0003-0273-6473>, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, a.v.slepnev@gmail.com

The paper discusses the improvement of the methods of teaching the courses of the theory of communication and information at Saratov State University by introducing additional sections on the analysis of radiophysical processes in various devices of communication systems. We propose the electrodynamic analysis of wave processes in a fiber optic line, features of the use of new CMOS devices for signal conversion in communication systems and selected schematic solutions.

Key words: telecommunications, communication theory, IT of technology, signal sampling and hold, fiber optic line, induced channel, one mode fiber, multimode fiber, CMOS-structure.

References

1. *Nefedov V. I., Sigov A. S. Obshchaya teoriya svyazi [General communication theory].* Moscow, YUrajt Publ., 2016. 495 p. (in Russian).
2. *Tomasi W. Electronic Communication Systems. Fundamental Through Advanced.* Pearson Higher Ed USA, 2003. 1184 p.
3. *Bikkenin R. R., Chesnokov M. N. Teoriya ehlektricheskoy svyazi [Theory of electrical communication].* Moscow, Akademiya Publ., 2010. 336 p. (in Russian).
4. *Osnovy postroeniya telekommunikacionnyh sistem i setej [Bases of construction of telecommunication systems and networks].* Eds. V. N. Gordienko, V. I. Kruhmaleva. Moscow, Goryachaya liniya Telekom, 2008. 510 p. (in Russian).
5. *Kostrov B. V., Ruchkin V. N., Kalinkina T. I. Telekommunikacionnye i vychislitel'nye seti. Arhitektura, standarty i tekhnologii [Telecommunication and computer networks. Architecture, standards and technologies].* St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2010. 288 p. (in Russian).
6. *Velichko V. V., Katunin G. P., Shuvalov V. P. Osnovy infokommunikacionnyh tekhnologij [Bases of infocommunication technologies].* Moscow, Goryachaya liniya Telekom, 2009. 712 p. (in Russian).
7. *Vasin V. A., Vlasov I. B., Dmitriev D. D., Kalmykov V. V., Kuznecov A. A., Nikolaev A. I., Pudlovskij V. B., Rodzivilov V. A., Sebeкин Yu. N., Senin A. I., Slukin G. P., Fedorov I. B. Informacionnye tekhnologii v radiotekhnicheskikh sistemah [Information technologies in radio engineering systems. Ed. by I. B. Fedorova].* Moscow, Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Bauman, 2011. 846 p. (in Russian).
8. *Olifer N., Olifer V. Computer Networks: Principles, Technologies and Protocols for Network Design.* Wiley India Pvt. Limited, 2006. 1000 p.



9. Kotel'nikov V. A. On the transmission capacity of 'ether' and wire in electric communications. *Phys. Usp.*, 2006, vol. 49, pp. 736–744.
10. Hohlov A. V., Vadivasova T. E., SHabunin A. V. *Signaly. Metody opisaniya, modeli, informaci-onnye vozmozhnosti* [Signals. Methods of description, models, information capabilities. Ed. by V. S. Anishchenko]. Saratov, Izdatel'stvo Saratovskogo universiteta, 2011. 256 p. (in Russian).
11. Volovich G. I. *Skhemotekhnika analogovyh i analogo-cifrovyyh elektronnyh ustrojstv* [Circuitry of analog and analog-digital electronic devices]. Moscow, Dodehka-XXI Publ., 2011. 528 p. (in Russian).
12. Nikitin V. A. *Skhemotekhnika integral'nyh skhem TTL, TTLSH i KMOP* [Circuitry of integrated circuits TTL, DTL and CMOS]. Moscow, NIIYAU MIFI, 2010. 64 p. (in Russian).
13. Strogonov A. V. *Proektirovanie logicheskikh ehlementov zakaznyh KMOP BIS* [Designing Logic Elements of Custom CMOS IC]. Voronezh, Izdatel'stvo Voronezhskogo tekhnicheskogo universiteta, 2003. 214 p. (in Russian).
14. Hohlov A. V., Vadivasova T. E., Shabunin A. V. *Elementnaya baza radioelektroniki. Tendencii i perspektivy razvitiya* [Element base of radio electronics. Trends and Prospects. Ed. by V. S. Anishchenko]. Saratov, Izdatel'stvo Saratovskogo universiteta, 2014. 320 p. (in Russian).
15. Gowar J. *Optical communication systems*. Prentice, Hall International, 1984. 577 p.
16. Barybin A. A. *Elektrodinamika volnovodushchih sistem. Teoriya vzbuzhdeniya i svyazi voln* [Electrodynamics of waveguide systems. Theory of excitation and coupling of waves]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 512 p. (in Russian).

Cite this article as:

Khokhlov A. V., Slepnev A. V. Communication Theory and Radiophysics (on the Teaching of the Theory of Communication and Information at the Department of Physics). *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2018, vol. 18, iss. 4, pp. 302–312 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2018-18-4-302-312>
