

*Памяти моего учителя  
профессора Евгения Сергеевича Коваленко посвящается*

УДК 654

**А.В. Пуговкин**

## Дороги, которые мы выбираем

Кратко рассматриваются направления исследований, начатых под руководством Е.С. Коваленко и проводимых в период с 1965 г. по настоящее время в ТУСУРе с участием автора: акустооптические методы и устройства обработки радиосигналов, основанные на явлении дифракции лазерного излучения на гиперзвуковых волнах в кристаллах; цифровые телекоммуникационные системы с коммутацией пакетов, являющиеся основой передачи информации и в наше время. Сообщается о подобной системе, построенной в Томской области, и организации обучения студентов для ее обслуживания. Рассказывается о разработанных методиках учета тепловой энергии, потребляемой отдельным субъектом, позволяющих организовать массовое энергосбережение.

**Ключевые слова:** акустооптика, обработка радиосигналов, телекоммуникации, компьютерные сети, энергосбережение, тепловая энергия.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2017-20-3-229-233

Жизнь удалась, если у тебя есть интересная работа. Для этого, на мой взгляд, необходимы следующие условия:

- попасть в хорошую творческую организацию;
- выбрать наставника, учителя, настроенного на поиск и созидание;
- не бояться браться за новые, совершенно незнакомые задачи.

Мне повезло, я после окончания вуза остался работать в ТИРЭТе под руководством заведующего кафедрой СВЧ Е.С. Коваленко. Он-то и привил мне и многим моим коллегам интерес к творчеству и желание заниматься нестандартными проблемами в области передачи информации на основе радиосигналов.

### Лазеры, оптика, акустика

В 60-е гг. прошлого столетия появилась и начала развиваться лазерная техника. Профессор Коваленко предложил мне, как аспиранту, взяться за эту тему. Для этого выпускнику радиотехнического факультета пришлось изучить квантовую механику, статистическую физику, разделы оптики и многие другие мудреные науки. Но радиотехническое образование брало свое. Освоив лазерную технику после защиты кандидатской диссертации с подачи того же Е.С. Коваленко, ряд сотрудников кафедры, среди которых был и я, с группой студентов взялись за новую работу. Она находилась на стыке радиотехники, оптики и акустики и была посвящена оптической обработке радиосигналов.

Основная идея касается создания новых приборов – акустооптических анализаторов спектра. В основе работы акустооптического приемника-анализатора спектра радиосигналов (ПАОАС) лежит эффект дифракции света на упругих колебаниях в твердом теле [1–3].

Принцип работы ПАОАС заключается в следующем. Анализируемый радиосигнал  $U(f, t)$ , принятый антенной, усиливается усилителем, подается на пьезоэлектрический преобразователь, где трансформируется в энергию упругих колебаний той же

частоты и так же ограниченных по времени, что и радиосигнал. Упругие акустические колебания распространяются в прозрачном для света звукопроводе, образуя за счет фотоупругого эффекта дифракционную решетку с периодом, равным длине волны упругих колебаний в звукопроводе:

$$\Lambda = V/f, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость упругих колебаний в среде;  $f$  – частота радиосигнала.

Параллельный пучок света с апертурой  $A$  от лазера дифрагирует на этой решетке.

Угол дифракции  $\theta$  определяется условием

$$\sin\theta \approx \theta = \frac{\lambda}{\Lambda} = \frac{\lambda}{V} f, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны света.

Так как длина волны лазерного излучения и скорость упругих колебаний для выбранных условий – величины постоянные, то угол отклонения  $\theta$  однозначно находится в прямой пропорциональной зависимости от частоты. Звукопровод с преобразователем носит название акустооптического модулятора, на котором записан анализируемый сигнал, исполняя роль динамического фазового транспаранта в системе оптической обработки информации.

Благодаря принципу суперпозиции волн в звукопроводе может распространяться большое число упругих волн в соответствии с числом принятых радиосигналов. Такой транспарант преобразует лазерный луч в набор лучей с различными углами дифракции от радиосигналов с разными частотами. Линза реализует Фурье-преобразование углового спектра в пространственное распределение световых максимумов в фокальной плоскости, при этом расстояние  $\Delta y$  сигнального пятна от нулевого равно

$$\Delta y = F\theta = F \frac{\lambda}{V} f, \quad (3)$$

где  $F$  – фокусное расстояние линзы.

Измеряя  $\Delta y$  с помощью позиционно-чувствительного фотоприемника (линейка фотодиодов, ли-

нейка ПЗС), получаем спектры мощности анализируемых радиосигналов [1].

Акустооптический анализатор спектра имеет следующие достоинства в сравнении с электронными анализаторами:

- возможность панорамного спектрального анализа одновременно многих сигналов в реальном масштабе времени;
- возможность определения частоты сигнала по одному импульсу;
- линейку фотодиодов, эквивалентную набору одновременно работающих фильтров, каждый из которых настроен на узкий участок широкого анализируемого спектрального интервала; шумовые характеристики ПАОАС определяются этой узкой полосой.

Рассмотренное устройство использует одну пространственную переменную. Динамический фазовый транспарант (акустооптический модулятор) может быть двумерным, для чего транспарант по оси  $X$  разбивается на ряд параллельных каналов со своими преобразователями, соединенными с соответствующими элементами фазированной антенной решетки (ФАР). При этом световое пятно в фокальной плоскости линзы будет отклоняться по двум координатам. Одна координата, как и прежде, связана с частотой радиосигнала, а вторая – с углом прихода электромагнитной волны на ФАР [3].

#### *Основные характеристики ПАОАС*

1. Чувствительность приемника-спектроанализатора при использовании линейки Si-фотодиодов, включенных в режиме мгновенного фототока (без накопления), определяется так же, как в обычных приемниках шумами входных цепей усилительного тракта и полосой отдельного фильтра в частотной области (в данном случае – размером фотоприемного окна по оси  $Y$ ). Это справедливо в случае, когда световой сигнал от усиленных высокочастотным трактом шумов на входе системы превышает собственные тепловые шумы фотодиода. Для типичных параметров используемых элементов: мощность лазера – 10 мВт; дифракционная эффективность акустооптического модулятора –  $10^{-2}$ ; коэффициент шума приемно-усилительного тракта – 4 дБ; коэффициент усиления приемно-усилительного тракта – 90 дБ; чувствительность устройства составляет – 120 дБ/Вт и выше.

2. Разрешающая способность анализатора спектра  $\Delta f = v/\lambda$  определяется конструктивными параметрами в пределах ограничений, накладываемых длительностью разрешаемых сигналов. Типичные значения разрешающей способности по частоте составляют 0,1–10 МГц.

3. Быстродействие определяется временем заполнения апертуры светового пучка. Типичные значения быстродействия  $10^{-5}$ – $10^{-7}$  для фотоприемных устройств без накопления.

4. Динамический диапазон зависит от уровня боковых лепестков в дифракционном максимуме, а также от нелинейных эффектов, возможных при

распространении упругих волн в звукопроводе. Динамический диапазон может достигать величины 30–40 дБ.

5. Полоса частот панорамного анализа находится в пределах 50–500 МГц в зависимости от требуемой разрешающей способности.

6. Диапазон рабочих частот акустооптических модуляторов 50–2500 МГц. Диапазон анализируемых частот зависит от возможностей частотно-преобразовательной техники.

*Области применения ПАОАС:* радиолокация, системы радиоэлектронной борьбы, радиоастрономия, измерительная техника.

Акустооптические анализаторы, созданные творческим коллективом под руководством автора, были разработаны в ТУСУРе и серийно выпускались в бортовом варианте для летательных аппаратов с выполнением всех требований по климатическим условиям и физическим воздействиям. Экспериментальные образцы проходили испытания на судах в акватории Тихого и Индийского океанов.

В работах по созданию и испытанию акустооптических систем принимали участие большой авторский коллектив ряда кафедр ТУСУРа (СВЧиКР, ТОР, РУУ, РТС), а также предприятия Минрадиопрома, Минпромсвязи. Всех пофамильно перечислить невозможно. Ведущие исполнители: С.М. Шандаров, д.ф.-м.н., профессор, зав. каф. электронных приборов ТУСУРа; Л.Я. Серебренников, к.т.н. зав. лаб. каф. ТОР ТУСУРа; А.Я. Демидов, к.ф.-м.н., с.н.с. каф. ТОР; В.Д. Дмитриев, к.т.н., доцент каф. ТОР; Г.М. Блаер, начальник отдела НИИ автоматического приборостроения, г. Новосибирск.

В настоящее время работы в области оптической обработки информации продолжают на кафедрах СВЧиКР, ЭП, РЗИ, а также в ОАО «Кристалл Т» (резидент Томской особой экономической зоны).

#### **Телекоммуникации, сети передачи данных**

После защиты докторской диссертации в 1985 г. автор был избран заведующим кафедрой теоретических основ радиотехники (ТОР) ТУСУРа.

Принципы административной и научной работы, усвоенные за годы работы под руководством Е.С. Коваленко, пригодились на новом направлении деятельности.

В 1998 г. я, не прекращая работы на кафедре, стал директором нового филиала ОАО «Томсктелеком» – «Цифровые информационные сети». Вместе с созданным мной коллективом в Томской области была построена сеть передачи данных, которая является в настоящее время основой корпоративных сетей и сетей доступа в Интернет. Строительство и эксплуатация этой сети приблизили учебный процесс к реальной ситуации в области телекоммуникаций.

Поскольку телекоммуникации в это время переходили на цифровые технологии, то и учебный процесс необходимо было существенно модернизировать. Следует заметить, что в ТУСУРе, да и в Томске в целом, в вузах не проводилась подготовка специалистов по телекоммуникационным направлениям.

Здесь можно выделить 2 направления: цифровые системы передачи и сети передачи данных с коммутацией пакетов [4, 5].

Ниже приведены краткие базовые теоретические основы и особенности этих направлений.

*Цифровые системы передачи*

Переход к цифровым сигналам обеспечивает высокую помехоустойчивость передачи, повышает ее качество и надежность, существенно сокращает вес и габариты оборудования. Поскольку представление цифрового сигнала одинаково для всех видов трафика, то это создает реальную платформу для их объединения в одном канале передачи.

Рассмотрим кратко формирование цифрового сигнала.

Сформулируем основные принципиальные отличия аналоговых и цифровых сигналов. Аналоговый сигнал представляет собой бесконечную последовательность значений во времени. Поскольку число значений аналогового сигнала бесконечно во времени и по амплитуде, то его можно назвать бессчетным. Теперь ясно, какие требования нужно предъявить к цифровому сигналу. Число его возможных значений как во времени, так и по амплитуде должно быть конечным. Цифровой сигнал должен быть счетным.

На первом этапе вместо непрерывной функции времени  $S_C(t)$  формируется совокупность дискретных отсчетов  $S_C(t - k\tau_d)$ , взятых в равноотстоящих друг от друга моментах времени с интервалом  $\tau_d$ .

В соответствии с теоремой Котельникова этот интервал определяется верхней частотой в спектре сигнала  $f_B$

$$\tau_d \leq \frac{1}{2f_B}. \quad (4)$$

Второй этап – квантование по уровням. Амплитудное значение отсчета сравнивается с системой уровней. При этом амплитудное значение отсчета округляется до некоторой дискретной величины. Чаще всего этой величиной является среднее значение между двумя соседними уровнями. При равномерном квантовании возникает ошибка, которая пропорциональна квадрату шага квантования.

На третьем этапе сигнал, дискретный во времени и по амплитуде, с помощью импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) преобразуется в двоичный цифровой код.

К достоинствам цифровых методов передачи относятся:

- высокая помехоустойчивость – обеспечивается наличием в двоичном цифровом сигнале всего двух состояний. В связи с этим воздействие импульсной помехи на цифровую линию передачи не так эффективно, как в случае аналоговой линии;

- нечувствительность цифровой системы передачи к искажениям сигнала – позволяет реализовать еще одно важное свойство – возможность регенерации цифрового сигнала. При этом в отличие от усиления сигнала в тракте не происходит накопление шумов и помех.

Одним из замечательных свойств цифровых сигналов является возможность количественной оценки любых самых различных видов информации. Количество информации – это энтропия или мера неопределенности в поведении источника дискретных (счетных) данных. Раскрывая эту неопределенность с помощью переданных нам сообщений, мы и получаем информацию. В простейшем случае количество информации определяется как  $C = \log_2 l$ , где  $l$  – количество возможных значений сигнала (уровней). Так, для основного цифрового канала обычно  $l = 256$ .

*Коммутация каналов и коммутация пакетов*

При распределении цифровых потоков преимущественно используются две технологии коммутации:

1. Коммутация каналов (КК). Здесь между двумя абонентами с помощью цифровых коммутационных устройств устанавливается непосредственное физическое соединение по сквозному каналу, проходящему через систему узлов. На время этого постоянного соединения весь ресурс первичного канала закрыт для других абонентов. К достоинствам технологии коммутации каналов следует отнести стабильность соединения и фиксированную (постоянную) малую задержку сигнала в канале связи, потому что коммутаторы работают с высоким быстродействием. Это способствует высокому качеству передачи речи.

Недостатки способа коммутации каналов: отсутствие возможности многоадресной передачи и низкая загрузка каналов. Поскольку абоненты ведут диалог и занимают дуплексный канал, то 50% времени уходит на то, что один из абонентов молчит, слушая собеседника. Другие потери приходятся на паузы и высокую избыточность речи. Общая загрузка канала составляет 10–30%.

2. Коммутация пакетов (КП). Здесь сообщение сначала преобразуется в цифровую форму, а потом разбивается на части (пакеты). Каждый пакет может передаваться самостоятельно, поскольку в его составе содержится адресная информация пункта назначения (MAC-адрес, IP-адрес). Рисунок 1 иллюстрирует один из способов коммутации пакетов (дейтаграммный).

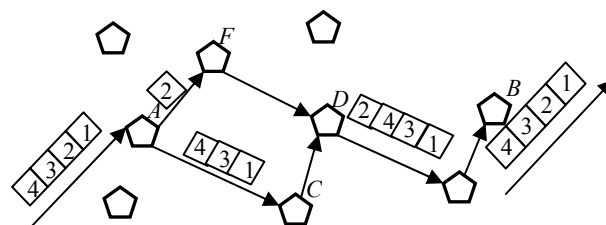


Рис. 1. Коммутация пакетов

Здесь пакеты с номерами 1–4 поступают на узел коммутации А, который определяет оптимальный (кратчайший) путь ACDB и отправляет по нему пакет 1. При поступлении пакета 2 ситуация в сети может измениться, путь ACDB не обеспечивает быстрого прохождения, и узел А отправляет пакет 2 по

другому пути (*AFDB*). К моменту окончания пакета 2 ситуация в сети восстанавливается, и пакеты 3, 4 снова идут по пути *ACDB*. Может получиться так, что к узлу В пакеты придут не в той последовательности, в которой были отправлены. Узел В восстанавливает порядок следования пакетов.

Основные процедуры при передаче пакетов:

- разбиение сообщения на пакеты;
- запись пакетов в узлах;
- маршрутизация пакетов в соседние свободные узлы.

Достоинства технологии коммутации пакетов:

- высокая загрузка канала (до 100%) обеспечивается тем, что любые паузы в сообщении одного абонента могут быть заполнены пакетами информации других абонентов;
- возможность многоадресной передачи, так как в заголовке пакета может содержаться разное количество адресов.

Недостатки способа коммутации пакетов:

- перезапись информации в узлах, что увеличивает задержку передаваемых сигналов;
- переменная скорость передачи и переменная задержка, что также связано с буферизацией информации, ограниченным объемом памяти запоминающих устройств и с возможностью различных путей распространения информации.

Рассмотренные телекоммуникационные технологии успешно внедрены в учебный процесс по дисциплинам «Основы построения телекоммуникационных систем и сетей», «Сети передачи данных» и др.

Рассмотренные телекоммуникационные технологии успешно внедрены в учебный процесс по дисциплинам «Основы построения телекоммуникационных систем и сетей», «Сети передачи данных» и др. Телекоммуникационное направление на кафедре «Телекоммуникации и основ радиотехники» (ТОР) успешно развивается и по сей день, выпускаются специалисты, востребованные в производстве, защищаются магистерские и кандидатские диссертации, ведется научная работа. Большой вклад в развитие этого направления внесли профессор кафедры ТОР В.М. Винокуров, Н.А. Каратаева, доцент С.И. Богомолов.

#### Энергосбережение, тепловая энергия

Еще одна выбранная дорога также связана с совершенно новым для кафедры направлением – учет и управление тепло- и электроснабжением зданий и помещений.

Вначале было проведено математическое моделирование теплового режима отдельного помещения. Эта модель представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений для средних температур воздуха помещения, отопительного прибора и внутренних ограждений [6]. Основной задачей является нахождение коэффициентов теплоотдачи отопительного прибора и коэффициента теплопередачи во внешнюю среду, с помощью которых измеряются потребляемая тепловая мощность и каче-

ство теплозащиты помещения. При этом решается обратная задача, когда измеряются средние температуры воздуха помещения и отопительного прибора и затем находятся необходимые коэффициенты как функции температурного напора.

Рассматривается вначале тепловой режим отопительного прибора. Процесс измерения потребляемой тепловой энергии осуществляется в три этапа. Первый этап – калибровка. На этом этапе считается, что тепловой режим является нестационарным, температура отопительного прибора изменяется во времени [7]. С помощью температурных датчиков в ключевых точках измеряются температуры поверхности отопительного прибора и воздуха помещения. Математическая модель теплового баланса для отопительного прибора описывается дифференциальным балансным уравнением

$$C \cdot \frac{dT_{\text{и}}}{dt} = P_{\text{вх}} - G \cdot (T_{\text{и}} - T_{\text{в}}), \quad (5)$$

где  $C$  – теплоемкость отопительного прибора, Дж/С;  $G$  – коэффициент теплоотдачи;  $P_{\text{вх}}$  – поступающая тепловая мощность.

Если прекратить подачу теплоносителя ( $P_{\text{вх}} = 0$ ), то из уравнения (5) можно найти коэффициент теплоотдачи:

$$G = C \cdot \frac{dT_{\text{и}}}{dt} / (T_{\text{и}}^{\text{к}} - T_{\text{в}}^{\text{к}}), \text{ Вт/}^{\circ}\text{С}. \quad (6)$$

Процедура измерения заключается в следующих действиях: нахождение температуры остывающего отопительного прибора как функции времени  $T_{\text{и}} = f(t)$ ; измерение температуры воздуха, которая в пределах интервала наблюдения является постоянной величиной; нахождение скорости изменения температуры отопительного прибора во времени  $dT_{\text{и}}/dt$  в заданной точке с последующим вычислением коэффициента теплоотдачи (6) при известной теплоемкости отопительного прибора.

Второй этап – измерение тепловой мощности. На этом этапе отопительная система находится в рабочем состоянии (режим эксплуатации). С помощью тех же самых средств производится измерение температур воздуха и поверхности отопительного прибора. Эти данные поставляются в уравнение Ньютона–Рихмана, в котором коэффициент теплоотдачи представляется выражением (7):

$$P_{\text{тепл}} = \left( C \cdot \frac{dT_{\text{и}}}{dt} / (T_{\text{и}}^{\text{к}} - T_{\text{в}}^{\text{к}}) \right) \cdot (T_{\text{и}} - T_{\text{в}}). \quad (7)$$

Нетрудно заметить, что поскольку измерение температур на этапах калибровки и эксплуатации производятся одними и теми же температурными датчиками, погрешности при измерении и калибровке будут частично друг друга компенсировать. Поэтому систематические погрешности измерения тепловой мощности могут быть существенно уменьшены.

На третьем этапе происходят вычисления потребляемой тепловой энергии: все мгновенные значения мощности суммируются, полученная сумма умножается на интервал взятия временных отсчетов

$\Delta t$ . При этом также будет суммироваться и систематическая погрешность. Поскольку она имеет переменный знак в зависимости от мгновенного значения температуры источника, то при суммировании эта погрешность будет существенно снижаться.

Для реализации данного способа на поверхности отопительного прибора в определенной точке располагается температурный датчик, другой датчик измеряет температуру воздуха. Данные этих датчиков с помощью проводной или беспроводной линии связи передаются на устройство сбора и передачи данных (УСПД) и затем на центральный сервер, на котором производится расчет коэффициента теплоотдачи, тепловой мощности и тепловой энергии.

Мониторинг теплового режима помещения и знание коэффициента теплоотдачи отопительного прибора позволяют провести непрерывный мониторинг (инструментальный контроль) теплового режима каждого отдельного помещения и здания в целом как в режиме ввода его в эксплуатацию, так и в процессе эксплуатации [6]. Это следует из уравнения теплового баланса помещения в стационарном режиме. Для мониторинга применяются те же аппаратно-программные средства, что и для измерения тепловой энергии. Таким образом, автоматизированная система позволяет решить эти задачи одними и теми же недорогими техническими средствами.

Предложенные методы мониторинга теплового режима помещения получили достаточное экспериментальное подтверждение как в лабораторных условиях, так и в условиях эксплуатации на объектах ЖКХ.

Большой вклад в организацию и проведение работ в этом направлении внесли сотрудники: С.В. Купреков, Д.В. Абушкин, Н.И. Петрова (Муслимова), В.С. Степной, С.И. Абрамчук.

#### **Заключение**

Можно считать, что жизнь удалась по всем направлениям – работы продолжают, осуществляется подготовка специалистов, выпускается научная и производственная продукция, защищаются кандидатские и докторские диссертации. Есть, кому передать эстафету. Инновационные методы исследований, проводимые в прошлом столетии, продолжают развитие и сегодня.

Акустооптические методы и устройства обработки радиосигналов, основанные на явлении дифракции лазерного излучения на гиперзвуковых волнах в кристаллах, исследуются, изучаются и широко применяются.

Цифровые телекоммуникационные системы с коммутацией пакетов по настоящее время являются основой передачи информации. Нами построена

такая система в Томской области, организовано обучение студентов.

Учет тепловой энергии, потребляемой отдельным субъектом, позволит организовать массовое энергосбережение.

#### *Литература*

1. Pugovkin A.V. Acoustooptical interferometers // Радиотехника. – 1995. – № 3. – С. 84–95.
2. Шандаров С.М. Дифракция света на гиперзвуковых колебаниях в акустических резонаторах / С.М. Шандаров, А.В. Пуговкин, Л.Я. Серебренников // Изв. вузов. Физика. – 1974. – Т. 17, № 3. – С. 106–112.
3. Acousto-optic signal processing technology at Tomsk / A.V. Pugovkin, A.J. Demidov, S.M. Shandarov, L.J. Serebrennikov // Advances in optical Information Processing, Proc. SPIE. – 1992. – Vol. 1704. – P. 324–342.
4. Пуговкин А.В. Основы построения инфокоммуникационных систем и сетей: учеб. пособие. – Томск: Эль-Контент, 2014. – 156 с.
5. Пуговкин А.В. Сети передачи данных: учеб. пособие. – Томск: ТУСУРа, 2015. – 138 с.
6. Пуговкин А.В. Автоматизация мониторинга и управления теплоснабжением зданий и помещений / А.В. Пуговкин, Н.И. Муслимова, С.В. Купреков. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2013. – 291 с.
7. Динамический метод измерения эффективности отопительных приборов / А.В. Пуговкин, С.В. Купреков, В.А. Медведев и др. // Приборы. – 2014. – № 7 (169). – С. 10–14.

---

#### **Пуговкин Алексей Викторович**

Д-р техн. наук, профессор каф.  
телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУРа  
Тел.: +7 (382-2) 41-33-98  
Эл. почта: pugovkinav@ngs.ru

Pugovkin A.V.

#### **The ways that we choose**

The directions of research conducted in the period from 1965 to the present time in TUSUR with the participation of the author are examined: Acousto-optical methods and devices for processing radio signals based on the phenomenon of laser radiation diffraction at hypersonic waves in crystals; Digital telecommunications systems with packet switching, which still represent the basis for information transfer even nowadays. A similar system built in the Tomsk region is described, as well as the organization of a study process to prepare students to work with the system. The methods developed for accounting thermal energy consumed by a single entity is presented. The method allows mass energy savings.

**Keywords:** acousto-optics, radio signal processing, telecommunications, computer networks, energy saving, thermal energy.