

В.А. КОТЕЛЬНИКОВ — УЧЕНЫЙ, РУКОВОДИТЕЛЬ, ЧЕЛОВЕК

Н.А. Арманд

1. Введение

Роль В.А. Котельникова в развитии радиофизики и радиотехники является выдающейся и описывать ее детально оказывается не простым делом. Это связано как с многообразием направлений, к становлению и развитию которых он «приложил руку», так и к научным результатам, некоторые из которых были получены более 70 лет тому назад и с современной точки зрения представляются «очевидными». Сложность связана также с тем, что Владимир Александрович не был «любителем» публиковаться. В частности, его знаменитая теорема отсчетов была толком опубликована лишь в настоящее время, а классическая работа по потенциальной помехоустойчивости была опубликована лишь в 1956 г., спустя 10 лет после ее выполнения и защиты в качестве докторской диссертации. К «неопубликованным» можно также отнести работу В.А. Котельникова, посвященную теории параметрических усилителей.

2. Теорема

В 1932–33 г. 25 летний инженер В.А. Котельников задался мыслью, можно ли без искажений передавать сигнал в полосе частот меньшей, чем это позволяет передача «на одной боковой полосе». В современном представлении это означает возможность прохождения без искажения сигналов через канал, чья спектральная пропускная способность меньше спектральной ширины сигнала. Нам это представляется абсурдным, но в то время (1933 г.), когда проблемы спектральной фильтрации для инженеров были не до конца понятны, подобная постановка вопроса представлялась разумной. В связи с этим следует вспомнить споры того времени о том, что представляет собой амплитудно-модулированный сигнал: синусоидальное колебание с медленно меняющейся амплитудой или набор спектральных компонент. Результаты исследований В.А. Котельникова были представлены в виде доклада «О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи» на готовящийся I Всесоюзный съезд по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности. Съезд не состоялся, но труды его были изданы [1], что и явилось официальным подтверждением приоритета В.А. Котельникова в доказательстве знаменитой теоремы отсчетов.

На самом деле работа содержала 7 теорем, но все они в той или иной степени были развитием основной теоремы, которая гласит, что любая функция с ограниченным спектром представима в виде ряда, представляющего отсчеты этой функции через интервалы времени, обратно пропорциональные удвоенной ширине спектра сигнала.

Интересно отметить, что Владимир Александрович в 1936 г. пытался опубликовать свою теорему в журнале «Электричество». Однако ему было отказано в публикации со ссылкой на перегруженность портфеля журнала и на узкий интерес его статьи. Знали бы авторы отказа о чем они говорят! На самом деле теорема имеет более широкое значение по сравнению с задачей, приведшей к ее

доказательству. По существу, она указывала путь представления непрерывных функций в цифровом виде и тем самым стала одним из теоретических фундаментов цифровой техники, бурно развивающейся в последние десятилетия. При постановке вопроса о представлении непрерывной функции в цифровом виде в первую очередь возникает вопрос, как часто следует выбирать значения функции, чтобы достаточно точно отразить ее вид. Первый и наивный ответ гласит: чем чаще, тем лучше. Это означает, что для неискаженной передачи любого сообщения необходимо использовать достаточно частые выборки. Но в системах связи мы имеем дело с сигналами с ограниченной шириной их спектра. Такие сигналы не могут изменяться во времени как угодно быстро. Поэтому выборки сигнала, взятые за слишком короткий интервал времени, могут оказаться мало отличающимися друг от друга и использование их полной совокупности оказывается излишним. Функция с ограниченным спектром может существенно изменяться лишь за интервалы времени, не короче чем обратная величина ширины полосы их спектра. Это понял Найквист, и он, по-видимому, один из первых выразил мысль, что выборки сигнала должны различаться интервалами времени, равными приблизительно обратной полосе его спектральной ширины [2]. Это дает основание часто, особенно западным ученым, употреблять термин «правило выборок Найквиста». Однако рассуждения Найквиста относились к проблеме неискаженной передачи телеграфного (цифрового) сигнала. Эта проблема отличается от проблемы неискаженной передачи аналогового сигнала, хотя между ними есть много общего. На это указывает профессор Люке в своей статье о происхождении теоремы выборок [3]. Он отмечает, что «первым ученым, точно сформулировавшим теорему о выборках и приложившим ее к проблеме теории и техники связи, является, вероятно, В.А. Котельников». Это утверждение дало основание для награждения Владимира Александровича в 1999 г. премией Фонда Эдуарда Рейна за фундаментальные исследования.

Похожая теорема была известна математикам. В частности, ее доказал в 1915 г. Уиттекер, исследуя проблему аппроксимации целых функций конечной степени [4]. В.А. Котельников не был знаком с этой работой. Однако в математике — это одна из многих ординарных теорем. В теории же связи и цифровой технике эта теорема является базовой, и ее доказательство, несомненно, является заслугой В.А. Котельникова. К сожалению проблемы с публикацией долгое время служили препятствием для широкого ознакомления с ней научной общественности. Теорема выборок стала широко известной лишь после того как в 1948 г. Шеннон доказал ее вновь [5]. Сейчас, нередко, эта теорема называется как «теорема выборок Уиттекера–Котельникова–Шеннона» (Whittaker–Kotel'nikov–Shannon sampling theorem) [6].

Теорема Котельникова может быть распространена на любые функции, имеющие ограничения в каком либо пространстве [7]. Имеется сопряженная теорема, относящаяся к функциям, лимитированным по времени [8]. В частности возможно формирование коротких импульсов за счет генерации колебаний на дискретных частотах. Диаграмма направленности антенны представляет собой преобразование Фурье от токов, пространственное распределение которых ограничено апертурой антенны. На этом основании диаграмма направленности также может быть представлена дискретным рядом [9]. При обработке изображений возникает необходимость их представления в цифровом виде, и здесь теорема Котельникова является одним из важнейших инструментов для осуществления указанной операции. Одним из интересных и несколько неожиданных является применение теоремы для описания дисперсии сигналов [10].

3. Теория потенциальной помехоустойчивости

Другой классической работой В.А. Котельникова является работа, посвященная предельной чувствительности приемных систем. В конце тридцатых годов прошлого столетия возник некоторый кризис в повышении помехоустойчивости систем связи. Всякого рода технические ухищрения наталкивались на некоторый предел, препятствующий дальнейшему повышению чувствительности приемников. Возникал естественный вопрос, что это — результат недостаточной изобретательности инженеров или существуют какие-то фундаментальные причины, ставящие предел помехоустойчивости рассматриваемых систем. Ответ на этот вопрос был дан в докторской диссертации В.А. Котельникова «Теория потенциальной помехоустойчивости», написанной в 1946 г. и успешно защищенной в 1947 г. Целью работы было «выявить, можно ли путем усовершенствования приемников при существующих видах сигналов понизить влияние помех? Что может дать в борьбе с помехами изменение формы сигналов? Какие формы сигналов для этого оптимальны?» [11].

В рассматриваемой работе было много принципиально нового и непривычного для инженеров того времени. Прежде всего, это введение ортонормированных функций времени, позволяющие представить сигнал в конечномерном евклидовом пространстве (гильбертовом пространстве) [12]. Сигналы могут рассматриваться в качестве векторов в этом пространстве. При практических расчетах В.А. Котельников пользуется рядами Фурье, что является естественной данью стандартному спектральному представлению сигнала.

Первой задачей, рассмотренной в работе, является задача распознавания. Ее суть в упрощенном виде представляется предположением, что на вход приемника поступает смесь сигнала и шума. При этом возможными сигналами являются сигнал 1 или сигнал 2. Возникает альтернатива ответа на выходе приемника — это сигнал 1 или 2? Ясно, что это будет сигнал 1, если евклидово расстояние между концами векторов пришедшего сигнала и альтернативного сигнала 1 будет меньше соответствующего расстояния до альтернативного сигнала 2. Однако соблюдение или несоблюдение этого неравенства имеет статистический характер, поскольку из-за случайного поведения шума имеется некоторая вероятность, что рассматриваемое неравенство не соблюдается. Поэтому можно говорить о вероятностной природе правильного выделения сигнала на фоне помех. Отсюда следует определение понятия идеального приемника как приемника, дающего минимальное число неправильно воспроизводимых сообщений при наложении помехи. Потенциальная помехоустойчивость характеризуется минимально возможными искажениями. Она равна вероятности неправильного воспроизведения и в случае гауссова шума с равномерным спектром определяется отношением удельной энергии к интенсивности помехи.

В этом случае «потенциальная помехоустойчивость будет определяться лишь энергией сигнала и не будет совершенно зависеть от его формы» [11]. Современные специалисты по радиолокации сказали бы, что речь идет об отношении сигнал/шум, которое определяет вероятность ложной тревоги. При большом отношении сигнал/шум вероятность правильного выделения сигнала близка к единице, а вероятность ложной тревоги стремится к нулю. Несколько позже (1948 г.) К. Шеннон получил соответствующие результаты для более широкого класса помех. Характерно, что решающую роль для потенциальной помехоустойчивости играет энергия, а не мощность сигнала. Это обстоятельство не всеми всегда понимается. Современные методы формирования сигнала часто

рассчитаны на его небольшую мощность, а сам процесс его выделения опирается на сжатие (оптимальную фильтрацию) в приемном устройстве [8]. Окончательный ответ на заданный в начале работы вопрос сводится к утверждению, что для повышения помехозащищенности системы связи необходимо увеличивать соотношение сигнал/шум. Оно оказывается решающим параметром, определяющим вероятность верного выделения сигнала на фоне помех.

В последующих частях работы задача распознавания, о которой мы только что говорили, дополняется задачами оценки параметров и фильтрации. Тем самым охватываются основные проблемы статистической радиотехники. Это и является основой для утверждения о фундаментальном характере диссертации В.А. Котельникова.

Отметим, что ко времени написания работы В.А. Котельникова в теории вероятности и теории случайных процессов математиками были получены ряд важнейших результатов в теории фильтрации, теории оценки параметров, теории статистических решений и т.п. Здесь мы сталкиваемся с ситуацией, аналогичной теореме отсчетов. Результаты математиков еще не нашли своего потребителя, и нужны были усилия других специалистов, чтобы они приобрели практический смысл. В 1998 г. была опубликована статья Верду, посвященная пятидесятилетию теории Шеннона [12]. В ней, в частности, говорилось, что наибольший вклад во внедрение теории случайных процессов в инструментарий инженеров связи внесли Винер [13] и Райс [14]. Однако работа Винера была опубликована в 1949 г. и не могла быть известна В.А. Котельникову в 1946 г. Что касается работы Райса, то она была опубликована в 1944 г., и это единственная работа, на которую В.А. Котельников ссылается в своей диссертации. Остальных ссылок нет потому, что не было предшественников. В связи с этим Владимир Александрович с полным основанием может считаться одним из основоположников статистической радиофизики и радиотехники. Эта его выдающаяся роль почему-то не очень широко отражается в научной печати. То, что статистическое мышление не овладело радиоинженерами в те годы достаточно широко, показывает и само содержание работы В.А. Котельникова. Хотя в ней все время идет речь о случайных процессах, но там не встретишь термины: корреляция, спектральная плотность и др., хотя неявно они присутствуют в изложении. Сама процедура принятия решений строится на байесовской стратегии, но это не упоминается в тексте, а формула для априорной вероятности просто выводится, исходя из «разумных» соображений.

Как уже отмечалось «Теория потенциальной помехоустойчивости» была опубликована лишь в 1956 г., когда широкое признание получили работы многих других авторов. Поэтому эта работа хорошо известна лишь тем, «кто знает», и в последнее время иногда цитируется в основном российскими учеными. Это в общем-то естественно. Наука не стоит на месте.

4. Радиолокация планет

Радиолокация планет является еще одним величайшим достижением в научном творчестве В.А. Котельникова. В 60-х годах прошлого столетия развитие ракетно-космической техники открыло возможность посылки космических аппаратов к другим планетам солнечной системы. Для управления полетами этих аппаратов необходимо было достаточно полное знание положения планет. Астрономические наблюдения, проведенные к тому времени, давали достаточно хорошие знания об относительных размерах солнечной системы, в то время как

для успешной межпланетной навигации необходимо было хорошее знание абсолютных размеров системы. Основной масштабной величиной, характеризующей размеры солнечной системы, является астрономическая единица (а.е.), равная большой полуоси эллиптической орбиты Земли или среднему расстоянию Земли от Солнца (ок. 150 млн км). Она может быть рассчитана, если известно расстояние между двумя планетами. Радиолокация и представляет такую возможность. За ее осуществление и взялся коллектив, возглавляемый В.А. Котельниковым. При этом Владимир Александрович проявил себя не только как выдающийся ученый, но и как талантливый организатор. В то время в Евпатории создавался центр дальней космической связи, в состав которого входил мощный передатчик (≈ 10 кВт) на длине волны 39 см и крупные передающая и приемные антенны АДУ-1000 с эффективной площадью около 1000 м². Для успешной реализации радиолокации требовалось создать большое количество аппаратуры для фильтрации сигналов, измерения их спектра, частоты и др. Заметим, что на первых порах вычислительных машин не было, и реализация многих алгоритмов не могла быть осуществлена программными методами. Единственным способом было создание соответствующих устройств собственными силами.

То, что в ту пору радиолокация планет была непростым делом, свидетельствовал зарубежный опыт. Первые попытки радиолокации Венеры были предприняты в США в 1958 г. [16] и Англии в 1959 [17]. Однако результаты этих экспериментов оказались ошибочными. Это подтвердил и первый опыт группы В.А. Котельникова. В начале работы потенциал радиолокатора был настолько мал, что для выделения сигнала приходилось производить его накопление в течение нескольких часов. Однако по мере развития техники (увеличение мощности передатчика, оснащение приемника малошумящими парамагнитными усилителями, введение линейной частотной модуляции, совершенствование методов выделения сигнала и т.п.) позволили реализовать точность измерения межпланетных расстояний до относительной величины порядка 10^{-8} . Это обусловило определение астрономической единицы с точностью порядка 1 км. Точность определения времени распространения радиоволн была достигнута столь большой, что при ее пересчете на расстояние существенным оказалось точность знания скорости света. Следует заметить, что радиолокационные исследования планет проходили одновременно в СССР и США. Существовало некоторое соперничество соответствующих научных групп. Естественно, что многие результаты были аналогичными.

Помимо Венеры проводилась радиолокация Марса, Меркурия и Юпитера. Данные этих измерений также использовались для уточнения величины астрономической единицы. Высокая точность радиолокационных измерений позволила построить теорию движения планет, более точную, нежели теория, построенная на оптических данных. Для построения этой теории пришлось учитывать эффекты общей теории относительности. Тем самым радиолокация планет стала одним из способов, позволяющих проверять выводы этой теории.

Радиолокационные наблюдения позволили уточнить другие параметры планет. Особенно это относится к Венере, для которой удалось уточнить ее радиус, период и направление ее вращения. В частности, было установлено, что вращение Венеры является обратным (по отношению к ее направлению движения вокруг Солнца) и период равен 243,04 суток. Интересно отметить, что это значение весьма близко к синодическому резонансу с периодом вращения 243,16 суток, когда при каждом нижнем соединении Венера была бы обращена к Земле одной и той же стороной. Более подробное описание результатов радиолокации планет можно найти, например, в [18].

5. Радиолокационное картографирование Венеры

При осуществлении этой работы, принесшей славу советской космической программе, В.А. Котельников не был формальным руководителем. Однако без его активного участия программа радиолокационного картографирования Венеры вряд ли была бы осуществлена. Здесь помимо ИРЭ РАН необходимо было «синхронизировать» работу НПО им. С.А. Лавочкина, ОКБ МЭИ и ряда других промышленных и академических организаций. Это было под силу лишь такой мощной и авторитетной личности, какой был В.А. Котельников.

В 1983 г. на орбиту вокруг Венеры были запущены искусственные спутники «Венера-15» и «Венера-16», на борту которых находился радиолокатор с синтезированной апертурой и высотомер. Радиолокатор позволил получить изображение поверхности планеты, перманентно закрытой облаками, и потому невидимой в оптическом диапазоне. Таким образом, удалось получить карту поверхности планеты с пространственным разрешением 1–2 км, а высотомер обеспечил получение данных о рельефе с разрешающей способностью по высоте 230 м. Тем самым человечество впервые узнало, как «устроена» поверхность северной части Венеры на площади 115 млн км² (25% общей площади Венеры). Результат, несомненно, был выдающимся. Спустя несколько лет эти исследования были продолжены в США во время миссии «Magellan», когда удалось получить изображения почти всей поверхности Венеры с пространственным разрешением порядка 100 м. Планирование этой миссии проводилось уже с учетом результатов советской космической программы. Более подробное описание результатов миссии «Венера-15, -16» можно найти в [19].

Заметим, что помимо самой радиолокационной съемки проблемой являлось обработка данных радиолокатора и построение изображения планеты. Одной из самых сложных операций обработки в то время являлся Фурье-анализ. ЭВМ, имевшиеся в руках исследователей, были слишком маломощны для осуществления этой операции в разумное время. Недаром тогда еще использовались оптические процессоры для обработки данных радаров с синтезированной апертурой, в которых Фурье-преобразование радиолокационной голограммы осуществлялось с помощью линзы. Участниками проекта был разработан и создан специальный Фурье-процессор, который позволил довести скорость ЭВМ СМ-4 по этому алгоритму до $5 \cdot 10^7$ оп./с, и тем самым произвести полностью цифровую обработку радиолокационных данных и построение изображения поверхности. Это был первый в СССР опыт цифровой обработки радиолокационного изображения. Он был использован для создания программ обработки данных радара «Алмаз».

6. В.А. Котельников как руководитель

Владимир Александрович тщательно подбирал себе помощников. Это позволяло ему работать со своими подчиненными на основе широкого доверия. Подчиненные (зам. директора, ученый секретарь института, зав. отделом, зав. лабораторией и т.д.) довольно четко представляли круг своих обязанностей, области ответственности и права в принятии решений. Это позволяло им действовать с инициативой и не бояться возможного мелкого вмешательства в их дела.

В.А. Котельников строго подходил к решению проблемы должностного роста сотрудников. Ни один сотрудник не выдвигался на должность старшего научного сотрудника без его одобрения. Это мотивировалось со стороны В.А. желанием лично знать ведущие научные кадры института.

Характерна высокая организованность В.А. Котельникова. Несмотря на сильную занятость на посту Вице-президента Академии наук, он дважды в неделю (по вторникам и пятницам) появлялся в институте. Все его замы знали, что в 10 часов утра в эти дни они должны придти на директорское совещание в кабинет В.А. Котельникова. На это время никто из нас не назначал никаких встреч и совещаний. Если по каким-либо причинам он не мог быть в институте, то все оповещались Антониной Васильевной, что могут быть свободны. Этим, в частности, демонстрировалось уважение к своим коллегам.

В.А. Котельников уделял большое внимание к появлению и развитию новых направлений исследований. Так по его инициативе были начаты и успешно проведены исследования по радиолокации планет, исследования по освоению миллиметрового диапазона, работы по параметрическим усилителям, программа исследований в области волоконно-оптических систем связи. При этом на начальной стадии реализации программ исследований В.А. брал руководство работой на себя. Так было с радиолокацией планет, параметрическими усилителями, волоконно-оптической связью и др. Это позволяло на старте придать работам достаточно широкий размах и глубину.

В.А. много внимания уделял укреплению связей с промышленностью и с другими научными учреждениями. Это, в частности, осуществлялось приглашением различных крупных деятелей для посещения института, в особенности его фрязинскую часть. Гостями были президенты АН СССР М.В. Келдыш, А.П. Александров, академик-секретарь ООФА А.М. Прохоров, Первый секретарь Московского областного комитета КПСС В.И. Конотоп, председатель ГКНТ Г.И. Марчук, министры радиопромышленности, электронной промышленности, промышленности средств связи, промышленности приборостроения и автоматизации и др. Результаты обсуждений тематики института во время этих визитов нередко приводили к развитию новых направлений работы. Так, например, рекомендации В.И. Конотопа способствовали развитию работ по разработке дистанционного измерения влажности почв методами СВЧ радиометрии. Результаты исследований по этому направлению в последующем были удостоены Государственной премии СССР. Обсуждения с Г.И. Марчуком проблем генерации случайных колебаний привели к созданию устройств по защите вычислительных центров от дистанционного перехвата их информации. Эта работа была отмечена премией Совета министров СССР. Можно привести и ряд других примеров.

Весьма сложные вопросы В.А. умел упростить до такой степени, что становились ясными способы решения проблемы. Это умение сказывалось в удивительной способности находить простые и наглядные механизмы описания довольно запутанных явлений. По-видимому, у него был особый дар качественного мышления, что позволяло ему приходить быстро к решению, минуя промежуточные результаты. В частности, В.А. невозможно было «повесить лапшу на уши». Сколь бы правдоподобным ни выглядело то или иное объяснение, он легко обнаруживал некорректность рассуждений собеседника. Я несколько раз был свидетелем того, как В.А. ловил на ошибках весьма квалифицированных людей.

7. В.А. Котельников как человек

Владимир Александрович любил добираться до мелочей. Он любил работать руками. Это приводило к интересу к различного вида инструментам. Анна Ивановна говорила мне, что наилучшим подарком для Владимира Александровича

ровича являлся какой-либо инструмент. При совместных поездках за границу по линии программы «Интеркосмос» нашим обычным занятием было посещение инструментальных магазинов. Там особый интерес вызывали какие-либо «хитрые» устройства.

Внешне В.А. выглядел несколько суховатым. Насколько я знаю, в институте у него не было друзей или, по крайней мере, лиц, которым он демонстрировал бы открыто свое особое расположение. Однако, если он знал, что человек нуждался в помощи, то включалась вся мощь его авторитета и знакомств для реализации этой помощи.

Однажды мы праздновали юбилей академика Б.А. Введенского в ресторане гостиницы «Москва». Мы очень любили юбиляра и в его честь организовали нечто вроде капустника с шутками-прибаутками, со стихами и песнями. Это очень понравилось Владимиру Александровичу. Он подошел к А.В. Соколову и с некоторым сожалением сказал приблизительно следующее: «Андрей Владимирович, почему у нас в институте так плохо обстоит дело с самодеятельностью? Смотрите, как много у нас талантов». Пришлось А.В. Соколову, с его активностью, заняться организацией самодеятельности в ИРЭ.

В людях В.А. ценил прежде всего профессионализм, независимо от того, имел ли он дело с академиком или шофером. Поэтому он никогда не боялся консультироваться у «знающих людей» по тому или иному вопросу. Это приводило к тому, что в коллективе института были люди, чьему мнению он доверял безальтернативно, но были и те, к суждению которых он относился настороженно. При этом он с особой симпатией относился к людям с неординарным мышлением. С другой стороны, с неодобрением относился к людям типа «как изволите».

В.А. был весьма скромным человеком. Никогда не требовал к себе особого отношения. В этом также проявлялся присущий ему демократизм. Говорят, что однажды с ним случился следующий курьез. Он, когда стал вице-президентом АН, продолжал пользоваться автомобилем «Волга», на котором ездил со времен своего директорства в ИРЭ. Однажды на территории ВДНХ было организовано «высокое совещание». Министров, ехавших на «Чайках», на это совещание пустили, а Владимира Александровича с его «Волгой» развернули назад. После этого пришлось В.А. пересесть на полагающуюся ему по штату «Чайку».

8. Отношение коллег к В.А. Котельникову

Авторитет В.А. был непререкаем. Причем не только в решении узкопрофессиональных вопросов, но и в решении организационных проблем, считая государственные. Этому способствовал ряд обстоятельств. Во-первых, высокий научный уровень и глубина мышления В.А. Во-вторых, государственный подход ко многим проблемам, и, в-третьих, умение в любой проблеме выделить главное, отсечь несущественные детали и тем самым четко прояснить смысл обсуждаемой проблемы.

9. Заключение

В столь коротком изложении довольно трудно описать все результаты деятельности человека, подобного В.А. Котельникову по масштабу и глубине мышления. Мы, в частности, не коснулись его фундаментальных работ в области криптографии, его роли в проектировании и создании в довоенное

время системы радиосвязи Москва — Хабаровск, его вклада в теорию параметрических усилителей, его роли в создании систем связи с глубоко погруженными подводными лодками и многое другое. Следует указать, что он не раз был инициатором новых направлений исследований, проводимых как в ИРЭ РАН, где он многие годы был директором, так и в других организациях. Особо следует отметить его роль в развитии космических исследований, которую он осуществлял, будучи вице-президентом Академии наук СССР и председателем совета «Интеркосмос».

Подводя итог, можно сказать, что Владимир Александрович Котельников являлся выдающимся ученым и инженером XX века. Он является одним из основоположников цифровой техники анализа сигналов, одним из основоположников теории информации, одним из основоположников статистической радиофизики и радиотехники, одним из основоположников радиолокационной астрономии. Один только этот краткий перечень ясно указывает, что мы имели дело с крупнейшей в истории страны и науки личностью, внесшей огромный вклад в развитие мировой науки.

Литература

1. Котельников В.А. Материалы к I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности. М., 1933. Переиздано. М.: Институт радиотехники и электроники МЭИ (ТУ), 2003.
 2. Nyquist H. AIEE Trans. Apr. 1928. Vol.47. P. 617–644.
 3. Lüke D. IEEE Commun. Magazine. 1999. Vol. 37, N 4. P. 106–108.
 4. Whittaker E.T. Proc. Roy. Soc. Edinburgh, 1915. Vol. 35. P. 181–194.
 5. Shannon C.E. Bell Sys. Tech. J. 1948. Vol. 27. P. 379–423, 623–656.
 6. Petersen D.P., Middleton D. Information and Control. 1962. Vol. 5, N 4. P. 279–323.
 7. Хуртин Я.И., Яковлев В.П. Методы теории целых функций в радиофизике, теории связи и оптике. М.: ГИФ-МЛ, 1962.
 8. Вайнштейн Л.А., Зубаков В.Д. Выделение сигналов на фоне случайных помех. М.: Советское радио, 1960.
 9. Минкович Б.М., Яковлев В.П. Теория синтеза антенн. М.: Советское радио, 1969.
 10. Арманд Н.А. Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49, № 10.
 11. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости. М.: Радио и связь, 1998.
 12. Левитан Б.М. Гильбертово пространство. Математическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1977. Т. 1. С. 978–985.
 13. Verdu S. IEEE Trans. Inform. Theory. Vol. 44, N 6. P. 2057–2078.
 14. Wiener N. Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series. N.Y.: Wiley, 1949.
 15. Rice S.O. Bell Syst. Tech. J. 1944. Vol. 23–24. P. 282–332, 46–156.
 16. Price R., Green P.E. et al. Science. 1958. Vol. 129. P. 751.
 17. Evans J.V., Taylor G.N. Nature. 1959. Vol. 184. P. 1358.
 18. Котельников В.А. Б Ржига О.Н. и др. Развитие радиолокационных исследований планет в Советском Союзе: В сб. «Проблемы современной радиотехники и электроники». М.: Наука, 1980. С. 32–57.
 19. Александров Ю.Н., Базилевский А.Т. и др. Вновь открытая планета (радиолокационные исследования Венеры с космических аппаратов Венера-15 и Венера-16): В сб. «Итоги науки и техники». Сер. Астрономия. 1987. Т. 32. С. 201–234.
- См. также: Котельников В.А. Собрание научных трудов. Т. 1, 2. М.: Физматлит, 2009.