

## **От классической радиолокации к радиолокационной системотехнике (социальный и методологический анализ истории становления и развития современной научно-технической дисциплины) I<sup>1</sup>**

**Горохов В.Г. ([vitaly.gorokhov@mail.ru](mailto:vitaly.gorokhov@mail.ru))**

**Институт философии РАН  
Институт оценки техники и системного анализа  
Исследовательского Центра г. Карлсруэ, ФРГ**

Становление и развитие радиолокации в качестве объекта социального и методологического анализа выбрано нами не случайно. История именно этой области науки и техники, на наш взгляд, дает возможность проследить те общие процессы современного научно-технического прогресса, которые как в капле воды наиболее рельефно отразились в ней и могут стать репрезентантом, демонстрирующим на конкретном примере тенденции устойчивого научно-технического развития. Собственно говоря, именно такого рода исследование истории науки и техники на конкретных примерах (Case Studies, Fallstudien) было провозглашено философами науки в середине двадцатого столетия. Образцы такого исследования мы находим, прежде всего в работах Имре Лакатоса, проводившего рациональную реконструкцию истории научно-исследовательских программ (на материале истории математики), и Александра Койре, мастерски осуществившего в своих работах историко-критический анализ генезиса концептуальных структур науки на материале научной революции 17 века. Томас Кун в своей первой (менее известной российскому читателю) работе «Коперниканская революция. Планетарная астрономия в развитии западной мысли» также демонстрирует такого рода исследование, впрочем, с большим упором на социальные аспекты развития науки. С. Тулмин блестяще реализует развитую им модель эволюционного представления истории науки на конкретном историко-научном материале в книгах «Материя и жизнь» и «Модели космоса» и „Открытие времени“.<sup>2</sup> Однако наибольшее влияние на предлагаемого вниманию

---

<sup>1</sup> Статья подготовлена в рамках проекта РФФИ "Технонаука в обществе знаний: методологические проблемы развития теоретических исследований в технических науках" 09-06-00042

<sup>2</sup> См.: Лакатос И. Доказательства и опровержения. М.: Наука, 1967; Koyre A. Galilei. Die Anfänge der neuzeitlichen Wissenschaft. Berlin: Verlag Klaus Wagenbach, 1988; Koyre A. Newtonian Studies. Chicago: The University of Chicago Press, 1968; Kuhn T. The Copernican Revolution. Planetary Astronomy in the Development of Western Thought. Harvard University Press, 1957; Toulmin S., Goodfield J. The Fabric of Heavens. London: Hutchison & Co., 1961; Toulmin S., Goodfield J. The

просвещенного читателя исследование истории радиолокационной науки и техники оказали работы В.С. Степина по содержательно методологическому анализу становления научной теории в классическом и неклассическом естествознании на примере электродинамики.<sup>3</sup>

Пытаясь преодолеть образовавшийся в философии науки разрыв между экстерналистским и интерналистским подходами, мы будем комбинировать социальную историю радиолокации с внутренней историей радиолокационной теории. Если первая в последнее время достаточно подробно освещается в многочисленных мемуарах и юбилейных статьях ее участников, то вторая практически не проанализирована философами и историками науки и техники. Исключение, пожалуй, составляет докторская диссертация Ульриха Керна «Становление методов радиолокации: об истории радиолокационной техники до 1945 г.»<sup>4</sup>, выполненная в 1984 году в Историческом институте (отдел истории естествознания и техники) университета г. Штутгарта (Германия) на соискание ученой степени кандидата философских наук, где сделана успешная попытка объединить в своем исследовании аспекты социальной и методологической истории радиолокации. Но она заканчивается начальным периодом истории радиолокационной науки и техники. Особый же интерес, на наш взгляд, представляет собой именно послевоенная история радиолокации и ее превращение в радиолокационную системотехнику.

Именно в этот период формируются, с одной стороны, базовые теоретические представления радиолокационной теории как неклассической науки (статистическая радиолокация), основы компьютерного моделирования и сначала аналоговой, а затем и цифровой компьютерной техники, вызванные к жизни необходимостью автоматического управления РЛС в составе сначала зенитно-ракетных, а затем и ракетно-космических комплексов, где человек-оператор не в состоянии принять и реализовать решения по управлению такого рода сложными системами просто даже в силу краткосрочности, почти мгновенности радиолокационных противоракетных действий. С другой стороны, именно организационная основа радиолокационной системотехники явилась предтечей не только современных крупных научно-технических проектов, наряду с атомной и ракетной наукой и техникой, но и всей современной электронной промышленности, поскольку для реализации радиолокационного проекта впервые потребовалось создание совершенно новой элементной базы радиоэлектроники и организация ее серийного производства. Поскольку же радиолокационные системы в рамках систем ПРО стали рассматриваться уже не как чисто технические, а как сложные человеко-машинные системы, то их разработка и практически перманентно продолжающееся совершенствование потребовали развития сопутствующей инфраструктуры, т.е. не только строительства технических

---

architecture of matter. London: Hutchison & Co., 1966; Toulmin S., Goodfield J. The Discovery of time. London: Hutchison & Co., 1965.

<sup>3</sup> См.: Степин В.С., Томильчик Л.М. Практическая природа познания и методологические проблемы современной физики. Минск, 1970; Степин В.С. Становление научной теории. Минск: Изд-во БГУ, 1976; Степин В.С. Теоретическое знание. М.: Прогресс-Традиция, 2000 и др.

<sup>4</sup> Kern U. Die Entstehung des Radarverfahrens: Zur Geschichte der Radartechnik bis 1945. Stuttgart: Historisches Fakultät der Universität Stuttgart, Abteilung Geschichte der Naturwissenschaft und Technik, 1984

объектов и связывающих их коммуникаций, разнообразных специальных транспортных путей и т.п., но и создания связанной сети конструкторских бюро, научно-исследовательских институтов, заводов, армейских подразделений, осуществляющих эксплуатацию и поддержание жизнеобеспечения радиолокационных комплексов, включая поиск и подготовку соответствующих специалистов различных уровней, обеспечение их рабочих мест, их размещение и социальное обустройство, т.е. весь комплекс вопросов, который можно было бы обозначить как социальное планирование и проектирование. Историческая фиксация такого рода опыта создания системотехнических, а фактически социотехнических комплексов является особенно важной, поскольку именно благодаря целевой поддержке государства стало возможным за короткий исторический промежуток в несколько лет создать новую отрасль науки, техники и промышленности, а также систему подготовки ученых, инженеров, техников среднего звена, квалифицированных рабочих, обеспечивших дальнейшее успешное саморазвитие этой отрасли. Учитывая, что все это осуществлялось в рамках оборонной тематики и было связано со строжайшей секретностью проводимых научных, инженерных и организационных мероприятий, такого рода исследование стало возможным провести только в самое последнее время, поскольку в открытой печати появилось множество публикаций и ранее секретных материалов, позволяющих детально восстановить ход исторических событий.

Хотелось бы отметить еще один немаловажный момент, явившийся важной побудительной причиной для данного исследования. Именно личный ангажемент и самоотверженный энтузиазм всех участников радиолокационного проекта от простых рабочих, техников и инженеров до высших государственных чиновников, военачальников и главных конструкторов, оперировавших огромными материальными ресурсами, в условиях послевоенной разрухи сыграли важнейшую роль в его быстрой реализации. При этом участвовавшими в радиолокационном проекте учеными, инженерами, руководителями НИИ, КБ, производств и целых отраслей промышленности и войсковых соединений несомненно и неукоснительно вела вперед подспудная благородная мысль именно *защиты* отечества, а может быть и всего человечества от угрозы новой войны. Эта сверхзадача (в терминологии известного режиссера и бывшего инженера К.С. Станиславского) была особенностью радиолокационного проекта в отличие от двух других одновременно поддерживаемых и даже более приоритетных для государства атомного и ракетного проектов, разработка которых неизбежно предполагала возможность превентивного нападения и уничтожения предполагаемого противника. Сегодня очень много пишут и спекулируют о часто противоречивой роли тех или иных руководителей страны и вышеназванных проектов в целом или же их отдельных частей, приводят многочисленные списки участников этих проектов, оспаривают или подчеркивают их значимость. Но при этом важно не забывать, что реализация таких крупных проектов – это всегда комплексная коллективная задача, в решении которой важны все участники, их социальная установка и общая обстановка проектной организации.

Наука и техника приобрели решающее значение в жизни человеческого общества. Их развитостью определяется сегодня в значительной степени место той или иной страны в мировой цивилизации. На них возлагаются надежды простых

людей и правительств в разрешении многих насущных для человечества проблем. Отношения между наукой, техникой и обществом в последние десятилетия изменилось и теперь самой науке приходится доказывать обществу практическую результативность и необходимость своего существования, что делает невозможным замкнуться ей в узкие академические рамки и откешиваться от неспециалистов ссылкой на сложность и непонятность каждому стоящих перед ней задач и используемых ей методов. Такие изменения характерны для мировой науки в целом, в том числе и для экономически развитых стран, а не только для России, где наука и техника больше не занимают того приоритетного положения, которое они имели ранее в Советском Союзе. В последние годы интенсивно дискутируется вопрос о необходимости проведения различия между классическими фундаментальными и проблемно-ориентированными исследованиями, поскольку появляются новые формы знания, которые по способу своей организации не подпадают более под эту классификацию. Важнейшей организационной формой науки, которая пронизывает сегодня все исследовательские области и научные дисциплины, является «проектная» форма, означающая включение научной деятельности в заранее определенные временные рамки и делающая ее зависимой от других общественных сфер, эпизодической и принципиально незавершенной. Однако это не означает, что фундаментальные исследования исчезают с научно-исследовательского ландшафта.

На Западе сегодня также провозглашается необходимость перехода от научно-технической и социально-экономической политики общества и государства, а также отдельных социальных институтов к политике в области знаний. Становится необходимым долгосрочное планирование, которое должно относиться как к предвосхищению новых технических возможностей, так и к расчету и устранению рисков. А чтобы правильно решить эти задачи, государство будет вынуждено стимулировать научные и технические исследования. При этом недостаточно учитывается уже имеющийся исторический опыт организации такого рода исследований. Наиболее типичным примером такого рода государственной поддержки является, по нашему мнению, развитие радиолокации прежде всего в Великобритании, США, СССР и Германии.<sup>5</sup>

Исследования и разработки, которые были во время второй мировой войны направлены главным образом на создание сотен разного рода радиолокационных станций военного применения, имели своим результатом также новые знания и новое оборудование в области электроники и высокочастотной техники. Эти результаты были долгое время засекречены и стали достоянием научного и инженерного сообществ с определенным временным сдвигом. Немаловажное значение имеют и достижения в организации как самих этих исследований и разработок и производства электронной аппаратуры и ее элементной базы, так и процесса создания сложных радиолокационных комплексов в целом. Эти достижения являются результатом самоотверженной работы сотен ученых и инженеров многих лабораторий, конструкторских бюро, исследовательских институтов, университетских кафедр, армейских подразделений и промышленных предприятий различных стран. В данной статье возможно упомянуть лишь

---

<sup>5</sup> При этом, однако, основное внимание уделяется первоначальному периоду ее развития до конца Второй мировой войны.

некоторые имена, многие из которых стали лишь совсем недавно достоянием широкой общественности в силу требований государственной безопасности и связанной с ней секретности. Поэтому, уделяя внимание лишь некоторым персоналиям, мне хотелось бы посвятить свое исследование всем тем, кто участвовал в этом грандиозном научном, технической и производственном предприятии, связанном с развитием радиолокационной науки и техники в Англии, Германии, СССР, США и других странах, кто осуществил это «научно-техническое чудо» особенно в тяжелые военные и первые послевоенные годы, к которым принадлежали и мои родители и многие их коллеги и знакомые. По справедливому признанию Сноу, которое он сделал в своей книге «Наука и правительство», что ни в одной стране финансируемая государством наука не является «более свободной», чем в другой, однако, «благодаря особым привилегиям и автономии Советской академии наук, российские ученые имели несколько более высокое положение».<sup>6</sup>

## **1. Принципы методологического анализа истории радиолокационной науки и техники как научно-технической дисциплины**

Предметом содержательного методологического анализа в данной работе является теория и практика создания радаров<sup>7</sup> как особой научно-технической дисциплины (в отличие от отрасли промышленности). Такой выбор предопределен следующими факторами.

Во-первых, теоретические основы радиолокации возникают первоначально в рамках развитой к тому времени технической науки, а именно – радиотехники. Поэтому в данном случае можно уже говорить о независимом развитии конкретной научно-технической дисциплины. Именно потому, что радиолокация возникла как отрасль другой технической науки ее появление не было инициировано какой-либо областью естествознания.

Во-вторых, изобретение радара привело к поистине революционным изменениям в радиопромышленности, а также в сфере научно-технических дисциплин, так как радиолокация, как новая область технической науки и инженерной деятельности, которая занималась разработкой и производством мощных импульсных радаров, превращается во второй половине 20 столетия в современную комплексную научно-техническую дисциплину - радиолокационную системотехнику.

В данной работе, однако, мы анализируем теоретическую радиолокацию не столько как конкретную научно-техническую дисциплину, сколько как репрезентативную модель развития современных научно-технических дисциплин.

---

<sup>6</sup> С.Р. Snow. Science and Government. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1961, p. 55.

<sup>7</sup> radar = Radio Detection and Ranging – радио обнаружение (локация) и измерение дальности. «Радиолокация, таким образом, осознается как область науки и техники, которая включает в себя разработку методов и оборудования для выполнения следующих основных операций против мишени: (1) радиолокационное обнаружение, (2) радиолокационное измерение, (3) распознавание, селекция и идентификация вызвавшей интерес цели ... Термин радар применяется к приложениям по решению научных и практических проблем в различных областях человеческой деятельности. При этом упоминают, например, подводные, астрономические или исследовательские географические радары» (David K. Barton, Sergey A. Leonov (Editors). Radar Technology Encyclopedia (Electronic Edition). Boston, London: Artech House, 1998. ISBN 0-89006-893-3).

### *Проблемы исследования*

Что дает возможность квалифицировать новую технологию, как радикально новую? Этим вопросом задается Б. Винстон в своей книге «Мультимедийные технологии и общество. История: от телеграфа до Интернета» и сам же на него отвечает. Термин «революция», - утверждает он, - является риторическим приемом и совершенно неверно его вообще применять для описания развития информационных и коммуникационных технологий. «Действительно, - пишет он далее, - в исторической летописи можно наблюдать не только более медленный темп изменений, чем обычно предполагается, но и такие регулярности в инновационных структурах и их распространении, которые могут быть моделью для всех таких изменений».<sup>8</sup> Такого рода моделью и может стать пример с историей развития радиолокационной науки и техники.

Мы обычно идентифицируем разработку информационных и коммуникационных технологий с компьютерной наукой, но существует великое множество определений и мнений, что же такое компьютерная наука: одни считают ее фундаментальной наукой, другие - междисциплинарным научно-техническим исследованием, третьи - лишь новым названием кибернетики. Однако по отношению к кибернетике компьютер занимает такое же положение, как физические инструменты относительно физики, а современная компьютерная наука объединяет специалистов, работающих в области кибернетики, логики, психологии и лингвистики, математики и т.д., ученых и инженеров, исследователей и проектировщиков. К компьютерной науке относят информационные системы и средства коммуникации, средства автоматизации и контроля, средства математического моделирования и компьютерного эксперимента. Но по сути дела все эти проблемы возникли и решались первоначально в лоне радиолокации. В последнее время особый упор в компьютерной науке делается на имитационном моделировании, поскольку разрабатываемые ей средства компьютерного моделирования находят все более широкое применение в самых разнообразных областях науки и техники. Однако впервые эти проблемы также возникли в связи с развитием радиолокационной науки и техники. Поэтому, исследуя ее историю, мы одновременно рассматриваем и предпосылки того, что называют компьютерной революцией, но своими глубокими корнями уходит в историю развития радиолокации.

Норберт Винер, отец кибернетики, разрабатывал во время Второй мировой войны проблемы управления зенитным артиллерийским огнем и многие понятия и идеи, введенные им в кибернетику пришли именно из этой области, которая и была одним из ранних направлений развития радиолокации. «Вероятно, именно эта последняя работа мотивировала открытие им новой области кибернетики, которую он описал в своей книге «Кибернетика: или управление и связь в животном и машине» (1948). В процессе изучения проблемы управления зенитным огнем в системе противовоздушной обороны Винеру могла прийти в голову мысль о рассмотрении оператора в качестве части управляющего механизма и применения

---

<sup>8</sup> Winston, B. *Media Technology and Society. A History: from the Telegraph to the Internet*. L. and N.Y.: Routledge, 2000, p. 2

к нему таких понятий как обратная связь и устойчивость, которые первоначально были придуманы для механических и электрических систем. ... [Кибернетика] внесла вклад в популяризацию образа мышления в таких терминах теории связи, как обратная связь, информация, управление, вход, выход, устойчивость, гомеостазис, прогнозирование и фильтрация».<sup>9</sup> После Второй мировой войны эти проблемы создания автоматических систем управления, компьютерного моделирования, системотехнического проектирования были решены именно в рамках радиолокационной науки и техники.

### *Основополагающие принципы радиолокации*

Как известно, идея инновационного научно-технического развития «пришла из сферы социально-экономических исследований».<sup>10</sup> Мы знаем, что новые технологии появляются из-за социальной необходимости, что они часто рождаются из опыта, приобретенного за пределами стандартных областей, что они возникают все чаще в культурах, базирующихся на риске, что они реагируют на экономические стимулы (на спрос или фактор изменения цены), что они накапливаются с развитием научно опосредованных коллегиальных сетей. И мы знаем, что в 20-е гг. придавали особое значение тому, что новые технологии появляются в результате новой комбинации уже существующих технологий — что, как утверждал Кэмпферт, они являются «композицией механических элементов, которые аккумулируются как часть социального наследия».<sup>11</sup> Идея такого комбинирования является старой идеей. Она восходит, по крайней мере, к написанному Тарстоном в 1889 г.,<sup>12</sup> повторенному Шумпетером в 1912 г., и к ставшему основной идеей в 20-х гг. И она является несомненно центральной в любой теории изобретения. Но ни один из этих ранних и ни один из современных писателей, не дает удовлетворительного объяснения, каким образом имеет место такого рода комбинирование. Возникновение технологий приобретает мистический характер. ... Технологии всегда развиваются из некоторой центральной идеи или концепции — «метода вещи». ... Таким образом базисное понятие или принцип радара — существенная идея, которая позволяет ему работать — состоит в том, чтобы посылать высокочастотные радиоволны и определять расстояние до объектов с помощью анализа отраженного от поверхности этого объекта сигнала. ... То, что радиоволны отражаются от металлических объектов, является феноменом; идея же использования этого феномена для обнаружения металлических предметов на расстоянии (в радаре) представляет собой принцип. Сам феномен является чисто природным эффектом и как таковой существует независимо от людей и от технологии. Он не имеет прикрепленного к нему «применения». Принцип же, напротив, ... является *идеей*

---

<sup>9</sup> J.J. O'Connor, E.F. Robertson. Norbert Wiener. - [http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Wiener\\_Norbert.html](http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Wiener_Norbert.html). Винер занимался построением детерминированных стохастических моделей по организации и управлению силами противовоздушной обороны США. Он первым предложил отказаться от практики ведения огня по отдельным целям и разработал новую вероятностную модель управления силами ПВО.

<sup>10</sup> См., например, работы: Bijker W. Of Bicycles, Bakelite and Bulbs: Toward a Theory of Socio-technical Change. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1995; David P. Technical Choice, Innovation, and Economic Growth. Cambridge University Press, 1975; Dosi G. Sources, Procedures, and Microeconomic Effects of Innovation. In: Journal of Economic Literature, XXVI, 1120-1171, Sep. 1988; Freeman Ch. The Economics of Innovation. Aldershot, England: Edward Elgar, 1990; Rosenberg N. Inside the Black Box: Technology and Economics. Cambridge Univ. Press., 1982.

<sup>11</sup> Цит. по: McGee D. The Early Sociology of Invention. In: *Technology and Culture*, 36, 4, 1995, p. 782

<sup>12</sup> Thurston R. A History of the Growth of the Steam Engine. 1889 [Assoc. Faculty Pr Inc. 1971], pp. 2-3

использования феномена с определенной целью и существует в мире людей и применений». <sup>13</sup> Схематически этот принцип изображен на рисунках 1 и 2. <sup>14</sup>

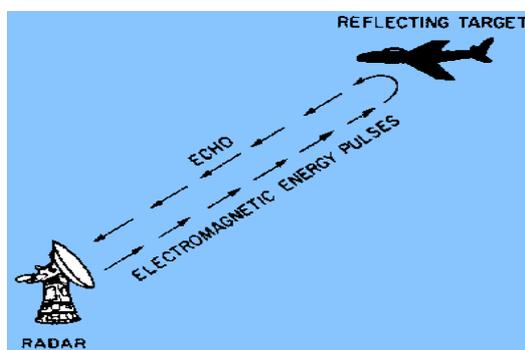


Рис. 1<sup>15</sup>

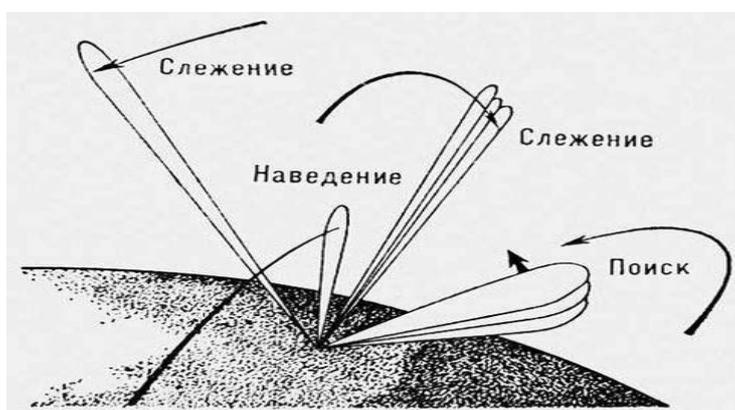


Рис. 2<sup>16</sup>

<sup>13</sup> A.W. Brian. The Logic of Invention. Santa Fe Institute and PARC. December 19, 2005. -

<http://www.santafe.edu/research/publications/workingpapers/05-12-045.pdf>; Arthur, W. Brian. The Structure of Technology. 2006 <http://www.santafe.edu/~wbarthur/documents/Invention-Arthur.pdf>

<sup>14</sup> «Явление отражения радиоволн наблюдал ещё Г. Герц в 1886—89. Влияние корабля, пересекающего трассу радиоволн, на силу сигнала зарегистрировал А. С. Попов в 1897. Впервые идея обнаружения корабля по отражённым от него радиоволнам была четко сформулирована в авторской заявке немецкого инженера К. Хюльсмайера (1904), содержащей также подробное описание устройства для её реализации» (А.Ф. Богомолов. Радиолокационная станция. - <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/094/937.htm>). «30 апреля 1904 г., Христиан Хюльсмайер (Christian Huelsmeyer) в Дюссельдорфе, Германия применил в своем патенте «телемобильскоп» («telemobiloscop»), который был фактически приемо-передающей системой, для определения расстояния до металлических предметов с помощью электромагнитных волн». Он основал также собственную компанию «Telemobiloscop-Gesellschaft Huelsmeyer und Mannheim» и провел первую публичную демонстрацию своего прибора 18 мая 1904 года на мосту в г. Кёльне. Когда на реке появился корабль, можно было слышать сигнальный звонок колокольчика, который прекратился после того, как корабль изменил направление и вышел из зоны действия прибора. Все испытания дали положительные результаты. Пресса и общественное мнение были настроены благоприятно, но никто из среды предпринимателей и морского ведомства не проявил к этому изобретению должного интереса. «Он получил патент 11 ноября 1904 года в Англии. ... Описание на английском языке того, как его радар работает, детально приводится в его американском патенте 810,150 от 16 января 1906 года» (Christian Huelsmeyer, the inventor. In: Radar World - <http://www.radarworld.org/huelsmeyer.html>).

<sup>15</sup> См.: Radarentwicklung. Die technischen Grundlagen des Radar. - [radarstrahlung.de](http://radarstrahlung.de)

Таким образом для того, «чтобы понять технологию требуется понять ее принцип действия и каким образом этот принцип преобразуется в рабочую архитектуру».<sup>17</sup>

В данной работе предполагается на примере радиолокационной науки и техники детально проследить, каким образом появляются радикально новые технологии. Причем речь в данном случае идет не об отдельных изобретениях, открытиях и инновациях, а о новой сфере науки и техники – о возникновении новой научно-технической дисциплины. Однако при этом мы будем концентрироваться главным образом не столько на рассмотрении новых историко-научных фактов, сколько на вскрытии на данном конкретном случае общих социальных и логических механизмов возникновения современных научно-технических дисциплин. Причем мы будем в этой работе не только рассматривать внешние социальные условия возникновения научных исследований и проектно-конструкторских разработок, а также промышленных организационных структур в сфере радиолокации (прежде всего в Советском Союзе), но также анализировать внутреннюю логическую структуру теоретической радиолокации с помощью выработанных философией науки методологических средств.

Выделим две главные фазы в развитии теоретической радиолокации. Первая из них связана с эволюцией нового исследовательского направления в рамках теоретической радиотехники как особой технической теории и выделением ее как новой классической научно-технической дисциплины. Вторая фаза может быть рассмотрена как «революционный» переход от электродинамической картины мира, на которой базировались теоретическая радиотехника и классическая радиолокация, к радикально иным кибернетическим и системным представлениям и методам.

### *Современные научно-технические дисциплины*

Специализация и профессионализация науки и техники с одновременной технизацией науки и сциентификацией техники имели результатом появление множества научных и технических дисциплин, сложившихся в 19-20 веках в более или менее стройное здание дисциплинарной науки и техники. Среди них особое место занимают технические науки.

Становление технических наук связано с приданием инженерному знанию формы аналогичной науке. В результате сформировались профессиональные общества, подобные научным, были основаны научно-технические журналы, созданы исследовательские лаборатории, а математические теории и экспериментальные методы науки были приспособлены к техническим нуждам. Таким образом, инженеры в XX в. заимствовали из науки не просто результаты научных исследований, но также ее методы и социальные институты. С помощью этих средств они смогли сами генерировать специфические, необходимые для их сообщества знания.

Процесс онаучивания техники был бы немислим без научного обучения инженеров и формирования дисциплинарной организации научно-технического знания по образцу дисциплинарного естествознания. Однако к середине 20 века дифференциация в сфере научно-технических дисциплин и инженерной деятельности зашла так далеко, что

---

<sup>16</sup> А.Ф. Богомолов. Радиолокационная станция. - <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/094/937.htm>

<sup>17</sup> Arthur W. Brian. The Logic of Invention. Santa Fe Institute and PARC. December 19, 2005.

дальнейшее их развитие становится невозможным без междисциплинарных технических исследований и системной интеграции самой инженерной деятельности. Формируется множество самых различных научно-технических дисциплин и соответствующих им сфер инженерной практики. Наряду с узкими специалистами, появляются, так называемые, универсалисты. И хотя, статус этих универсалистов в системе дисциплинарной организации науки и в структуре специализированной инженерной деятельности до сих пор четко не определен, без них становится просто невозможно не только решение конкретных научных и инженерных задач, но и дальнейшее развитие науки и техники в целом. Сами инженерные задачи становятся комплексными и при их решении необходимо учитывать самые различные аспекты, которые раньше казались второстепенными, например, экологические и социальные аспекты. В настоящее время научно-технические дисциплины представляют собой широкий спектр от самых абстрактных до весьма специализированных дисциплин, ориентированных не только на использование знаний и методов естественных наук (притом не только физики, но и химии, биологии и т.д.) и математики, но и общественных наук, как, например, в инженерно-экономических или инженерно-психологических исследованиях.

За последние десятилетия в сфере научно-технических дисциплин произошли существенные изменения, позволяющие говорить о становлении качественно нового неклассического этапа их развития, который характеризуется новыми формами организации знаний и деятельности. Отличия неклассических научно-технических дисциплин от классических технических наук заключаются в *комплексности* теоретических исследований, в какой бы форме они не проводились и каким бы способом они не формировались. Если в классических технических науках теория строилась под влиянием определенной базовой естественнонаучной дисциплины и именно из нее заимствовались первоначально теоретические средства и образцы научной деятельности, то многие современные научно-технические дисциплины не имеют такой единственной базовой теории, так как ориентированы на решение комплексных научно-технических задач. В то же время в них разрабатываются новые специфические методы и собственные средства, которых нет ни в одной из синтезируемых дисциплин и которые специально приспособлены для решения данной комплексной научно-технической проблемы. Поэтому если классические технические науки *предметно ориентированы* на определенный класс технических систем (механизмов, машин, радиотехнических устройств, радиолокационных станций и т.д.), то комплексные научно-технические дисциплины являются *проблемно ориентированными* на решение определенного типа комплексных научно-технических задач, хотя объект исследования в них может частично совпадать. Это разграничение на классические и неклассические научно-технические дисциплины коренится в развитии самой инженерной деятельности и проектирования. В определенных рамках традиционные сферы научного исследования и инженерной практики продолжают функционировать и решать стоящие перед ними конкретные научные проблемы и технические задачи, но очень важно представлять себе, каковы эти рамки и налагаемые ими ограничения. Многие классические науки, используемые при исследовании новых исследовательских и проектных задач, меняют свой облик, трансформируются под решение этих задач. С этим процессом связано и осознание проектирующей, программирующей роли науки в целом по отношению к практической деятельности. Одним из наиболее ярких репрезентантов перехода из первого во второй класс такого рода дисциплин является радиолокация.

Рассмотрим теперь, каким образом внутренняя структура радиотехнической теории сначала в процессе формирования нового исследовательского направления, области исследования и новой научно-технической дисциплины затем была радикально трансформирована в современную неклассическую научно-

техническую дисциплину - радиолокационную системотехнику. При этом важно проследить динамику роста числа публикаций в этой области и изменение их структуры, сопровождающиеся соответствующими изменениями в научно-техническом сообществе (организация научно-исследовательских институтов, проектно-конструкторских бюро, кафедр в высших учебных заведениях, выпуск специализированных научных журналов, учебников и монографий и т.д.). Для научно-технических дисциплин, однако, важным является также зафиксировать динамику развития экспериментального, серийного и массового промышленного производства (радаров и их компонентов) и связанной с ними инженерной деятельности в данной области. Именно на фоне изменения динамики этих параметров становятся понятными внутренние структурные перестройки в технической теории.

## **2. Возникновение радиолокации как нового исследовательского направления радиотехники**

Радиолокация по общему признанию историков<sup>18</sup> возникла примерно в одно и то же время в различных странах - СССР, США, Великобритании, Германии - как ответ на четко определенный социальный заказ на создание новых типов радиотехнических систем - „радаров“, или радиолокационных станций (РЛС). Увеличение скоростей военных самолетов и развитие военно-морского флота потребовали и новых способов их обнаружения и навигации. Старая аппаратура - звукоулавливатели и прожекторные системы - для решения новых оперативных задач армии не годились. Поэтому перед инженерами и учеными была поставлена конкретная инженерная задача: проверить возможность использования радиоволн для обнаружения различных объектов и разработать соответствующую экспериментальную аппаратуру. Однако для ее решения необходимо было провести целый ряд новых научных исследований, поэтому были сформулированы сложные научные проблемы, в процессе разработки которых и сформировалось новое исследовательское направление в рамках радиотехники. «Для трансляции принципа в новую работоспособную технологию действительно требуется новый этап: либо принцип достигается путем рассмотрения возможностей феномена или обдумыванием условий определенной потребности. Процесс должен теперь идти от мысленного представления к физическому воплощению и это придает ему все более физический характер. Решениям, которые до сих пор были концептуальными, должна быть придана физическая форма и с подпроблемами, которыми пока отчасти пренебрегали, теперь приходится иметь дело непосредственно ... Этот этап распадается на две частично перекрывающиеся друг

---

<sup>18</sup> Лобанов М.М. Из прошлого радиолокации: Краткий очерк. М.: Воениздат, 1969; Лобанов М.М. Начало советской радиолокации. М.: Сов. радио, 1975; Радар в США: Официальная история. М.: Сов. радио, 1946; Радар: Официальная история. М.: Сов. радио, 1946; Шембель Б.К. У истоков радиолокации. М.: Сов. радио, 1977; Page R.M. The origin of radar. N.Y.: Anchor books douleday and Co., 1962; Skolnik M.I. Introduction to radar systems. N.Y.: McGraw-Hill, 1962; Burns R. (Ed.). RADAR Development to 1945. London: Peter Peregrinus Ltd., 1988; Kern U. Die Entstehung der Radarverfahrens: zur Geschichte der Radartechnik bis 1945. Stuttgart: Historisches Institut der Universitat Stuttgart, 1984.

друга фазы: поиск принципа (выведение его или из феномена или эффекта) и перевод его в физическую реальность».<sup>19</sup>

На этом этапе становления новой дисциплины постепенно формируются новые частные теоретические схемы радиолокации за счет модификации и конкретизации обобщенных теоретических схем радиотехники применительно к новым режимам функционирования новых видов радиотехнических устройств. Радиолокационные устройства пока еще рассматриваются как разновидность радиотехнических устройств, функционирующих в импульсном режиме и на сверхвысоких частотах.

*Формирование новых конструктивных блоков и элементов (приборов) РЛС и связанных с ними частных теоретических схем радиолокации*

К началу 1930-х годов были известны два основных метода определения дальности с помощью радиоволн - импульсный и фазометрический (**рис 3**). Первый метод использовался для зондирования верхних слоев атмосферы - ионосферы (так называемого пятого слоя Хэвисайда). В 1932-33 гг. он специально изучался для целей радиолокации. Второй метод, называемый иногда также интерференционным, или методом „биений“, основывался на эффекте Доплера и заключался в измерении разности фаз излучаемой и принимаемой радиоволн<sup>20</sup> (**рис. 3а**).

---

<sup>19</sup> A.W. Brian. The Logic of Invention. Santa Fe Institute and PARC. December 19, 2005. - <http://www.santafe.edu/research/publications/workingpapers/05-12-045.pdf>; A.W. Brian. The Structure of Technology. 2006 <http://www.santafe.edu/~wbarthur/documents/Invention-Arthur.pdf>

<sup>20</sup> Частота принятого сигнала получает дополнительный сдвиг относительно частоты излучаемых колебаний при перемещении точек приёма и излучения, что позволяет измерять радиальные скорости движения цели относительно РЛС. Эффект Доплера был впервые описан австрийским ученым Христианом Доплером в 1842 г., обратившим внимание на эффект изменения звука проходящего по железнодорожному пути поезда, и заключается в том, что скорость частицы определяется сдвигом ее частоты. «Когда элементарная частица достигает главного лепестка диаграммы направленности антенны РЛС, излучаемая ей волна сжимается в волну более высокой частоты благодаря ее постепенному движению в сторону РЛС. Частица, которая движется от главного лепестка диаграммы направленности антенны РЛС, будет испытывать удлинение волны, которая имеет более низкую частоту» (Basic Radar Theory. - <http://snrs.unl.edu/amet451/marsh/theory.html>).

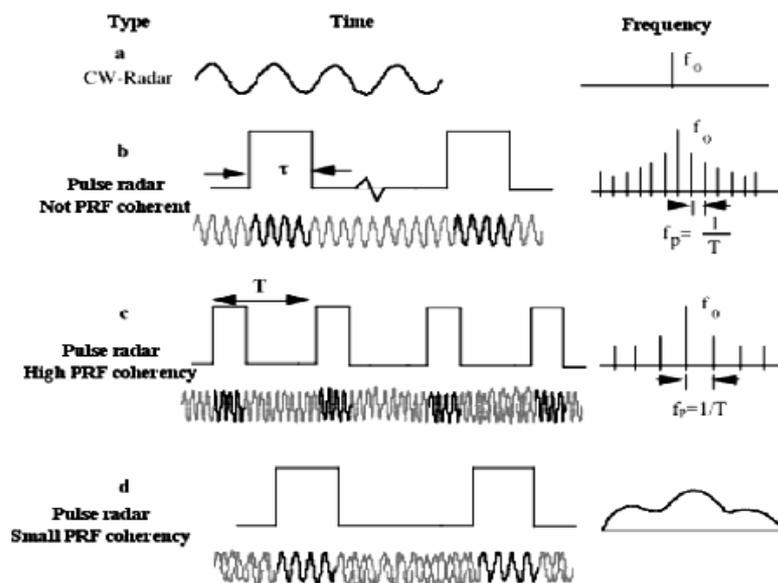


Рис. 3

**a** – доплеровская РЛС непрерывного излучения<sup>21</sup>, **b** – импульсная РЛС (некогерентная, т.е. с произвольной фазой от импульса к импульсу), **c** – когерентно-импульсная РЛС с высокой частотой повторения импульсов, **d** – когерентно-импульсная РЛС с низкой частотой повторения импульсов<sup>22</sup>

Для реализации поставленной задачи первоначально был выбран второй - фазометрический - метод, хотя в дальнейшем наиболее важное значение в развитии радиолокации имел именно импульсный метод.<sup>23</sup> Это было обусловлено прежде всего тем, что ученые и инженеры, занятые разработкой первой радиолокационной аппаратуры, ориентировались еще на традиционные радиотехнические представления, на старую парадигму данной сферы научного и инженерного

<sup>21</sup> Доплеровский радиолокатор «особенно подходит для получения информации о движущихся объектах. Радиолокационная система излучает непрерывный сигнал неизменной частоты. Если объект движется по направлению к радиолокатору, то отраженный сигнал имеет несколько более высокую частоту, а если объект удаляется от радиолокатора, то частота отраженного сигнала оказывается ниже частоты излученного сигнала. Это явление и называется эффектом Доплера» (Радиолокация. В: Кругосвет. Энциклопедия 2005. - [www.rof.ru](http://www.rof.ru)).

<sup>22</sup> PRF – частота повторения импульсов (pulse repetition rate): низкая PRF (< 1000 Hz), высокая PRF (> 30000 Hz). «Первые импульсные РЛС имели очень низкую частоту повторения импульсов. С одной стороны, тогда еще не могли генерировать импульсы с высокой частотой повторения, а с другой – не могли и обрабатывать ее. После Второй мировой войны частоту повторения импульсов уже могли увеличивать настолько, насколько это требовалось ...» (См.: W. Wiesbeck. Lecture Script “Radar System Engineering”. 13th Edition WS 2006/2007. Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik, Universität Karlsruhe: [www.ihe.uni-karlsruhe.de](http://www.ihe.uni-karlsruhe.de)).

<sup>23</sup> Поскольку передающее устройство в импульсном режиме работы РЛС излучает энергию не непрерывно, а периодически повторяющимися импульсами, в паузах между ними происходит приём отражённых импульсов приёмным устройством той же станции. Импульсный метод даёт возможность разделить во времени мощный зондирующий импульс, излучаемый передатчиком, и значительно менее мощный эхо-сигнал. Измерение дальности до цели сводится к измерению отрезка времени между моментом излучения импульса и моментом приёма, т.е. временем движения импульса до цели и обратно.

знания. Новая парадигма еще только начинала формироваться.<sup>24</sup> Для реализации фазометрического метода не требовалось принципиально новой аппаратуры, поскольку генератор дециметровых волн был к тому времени уже разработан, и сложных теоретических исследований. Непрерывное излучение, которое использовалось в данном случае, было уже достаточно хорошо изучено в радиотехнике. Однако проведение работ и в этом направлении встретилось с множеством технических трудностей, последовательное преодоление которых и привело к развитию принципиально новых инженерных и научных решений.

Прежде всего для улучшения работы радиолокационных устройств потребовался переход на все более короткие волны, что, в свою очередь, выдвинуло на первый план развитие еще неосвоенной техники сверхвысоких частот (СВЧ). Поэтому и разработка радиолокационных устройств пошла по пути совершенствования отдельных блоков РЛС - генераторов<sup>25</sup>, приемников, усилителей, антенных устройств и т.д. Для этого было необходимо решать задачи их проектирования, научного обоснования протекающих в них процессов и изготовления входящих в их конструкцию приборов (например, многокамерных магнетронов, различных клистронов с дисковыми выводами для дециметровых волн, ламп бегущей волны, волноводов и т.п.).

**Магнетрон** — «генераторный электровакуумный прибор СВЧ, в котором взаимодействие электронов с электрической составляющей поля СВЧ происходит в

---

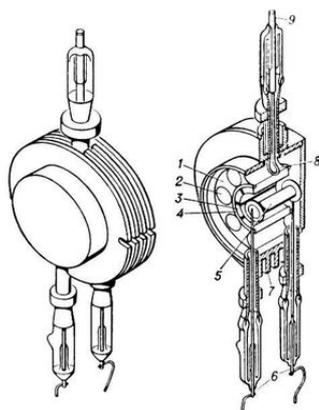
<sup>24</sup> А. Бриан определяет новую технологию, как радикально новую, если она «достигает цели, используя новый или принципиально иной принцип, чем тот, который использовался до этого». Тогда под это определение попадает лишь импульсная радиолокация, что верно лишь отчасти, поскольку непрерывная радиолокация оказалась впоследствии не менее перспективной. Но в тот период, конечно, переход к импульсным методам произвел радикальный переворот во взглядах на радиолокацию как принципиально новую область радиотехники. Однако, - пишет далее Бриан, - если «мы обозначим новую технику как «изобретение», то мы всегда найдем цель, выведенную из нового или иного основополагающего принципа. Например: в 30-х гг. приближающийся самолет мог быть обнаружен за горизонтом прослушиванием акустического излучения. Радар же базировался на ином принципе: фиксирование слабого эха, которое летательный аппарат отражает от посланного радио импульса» (A.W. Brian. The Logic of Invention. Santa Fe Institute and PARC. December 19, 2005).

<sup>25</sup> Например, генератор «предназначен для генерирования высокочастотных колебаний большой мощности. Он включается при прохождении переднего фронта импульса от модулятора и выключается при прохождении заднего фронта импульса. Таким образом передатчик продуцирует высокочастотные импульсы на частоте генератора. ... для производства очень высокой частоты при большой мощности сантиметровый радар нуждается в использовании в генераторе специального микроволнового устройства (магнетрона или клистрона)» ... (Radar Theory. - <http://www.radarpages.co.uk/theory/ap3302/sec1/reqpmr/reqpmr23.htm>). Существует множество различных типов генераторов: скажем, генераторы линейно изменяющегося (пилообразного) напряжения применяют для развертки электронного луча в электроннолучевых трубках радиолокационных устройств (<http://naf-st.ru/main/generator/?glin>). «Блокинг-генератор представляет собой однокаскадный релаксационный генератор кратковременных импульсов с сильной индуктивной положительной обратной связью, создаваемой импульсным трансформатором. Вырабатываемые блокинг-генератором импульсы имеют большую крутизну фронта и среза и по форме близки к прямоугольным. ... Обычно блокинг-генератор работает в режиме большой скважности, т. е. длительность импульсов много меньше периода их повторения. Скважность может быть от нескольких сотен до десятков тысяч. Благодаря большой скважности в блокинг-генераторе можно получить очень большую мощность во время импульсов малой и средней мощности» (<http://naf-st.ru/main/generator/?blok>).

пространстве, где постоянное магнитное поле перпендикулярно постоянному электрическому полю». Этот термин ввел американский физик А. Халл, который в 1921 г. опубликовал результаты теоретических и экспериментальных исследований работы магнетрона в статическом режиме и предложил ряд его конструкций. «В 1921 Альберт Халл (Albert W. Hull) из фирмы *General Electric Co.* исследовал движение электронов в цилиндрическом диоде под влиянием гомогенного осевого магнитного поля. Он заметил, что есть возможность управлять потоком электронов с помощью изменения магнитного поля». Собственно говоря, он собирался разработать для своей фирмы усилитель с магнитным управлением в противовес триоде с управляющей сеткой фирмы-конкуrentки - *Western Electric Co.*, но попутно обнаружил возможность генерации высокой частоты». Новый прибор получил название магнетрона.<sup>26</sup> Генерирование электромагнитных колебаний в дециметровом диапазоне волн с помощью магнетрона «открыл и запатентовал в 1924 чехословацкий физик А. Жачек. В 20-е годы влияние магнитного поля на генерирование колебаний СВЧ исследовали физики: Е. Хабан (1924, Германия), А.А. Слуцкий и Д.С. Штейнберг (1926—1929, СССР), К. Окабе и Х. Яги (1928—1929, Япония), И. Ранци (1929, Италия)». В 30-е годы исследования в этой области велись во многих странах. Задача увеличения «выходной мощности генерируемых колебаний — была решена в 1936—1937 советскими инженерами Н.Ф. Алексеевым и Д.Е. Маляровым под руководством М.А. Бонч-Бруевича». Созданная ими конструкция многорезонаторного магнетрона «оказалась настолько совершенной, что в последующие годы во всём мире разрабатывались и выпускались только» они. В ней применяют катод, имеющий форму полого цилиндра, внутри которого располагается подогреватель. В 40—70-е годы в эту конструкцию инженерами многих стран был внесён ряд улучшений и для радиолокации были разработаны тысячи их типов. «В 1950—1970-е годы на основе многорезонаторного магнетрона был создан ряд приборов для генерации и усиления колебаний СВЧ ... В простейшей конструкции многорезонаторного магнетрона (рис. 4) анодный блок представляет собой массивный медный цилиндр с центральным круглым сквозным отверстием и симметрично расположенными сквозными полостями (от 8 до 40), выполняющими роль объёмных резонаторов. Каждый резонатор соединяется щелью с центральным отверстием, в котором расположен катод. Резонаторы образуют кольцевую колебательную систему. ... В многорезонаторном магнетроне на электроны, движущиеся в пространстве между катодом и анодным блоком, действуют 3 поля: постоянное электрическое поле, постоянное магнитное поле и электрическое поле СВЧ (резонаторной системы). При перемещении электронов в радиальном направлении (от катода к аноду) энергия источника анодного напряжения преобразуется в кинетическую энергию электронов. Под влиянием постоянного магнитного поля, направленного по оси катода (перпендикулярно постоянному электрическому полю), электроны изменяют направление движения ... Так как часть электрического поля СВЧ через щели резонаторов проникает в пространство анод — катод, то электроны ... тормозятся ... и поэтому их энергия, полученная от источника постоянного напряжения, преобразуется в энергию колебаний СВЧ. Поле СВЧ дважды за период колебаний меняет направление. ... синхронизм между перемещением электронов и тормозящим электрическим полем СВЧ является основным принципом» его работы.<sup>27</sup>

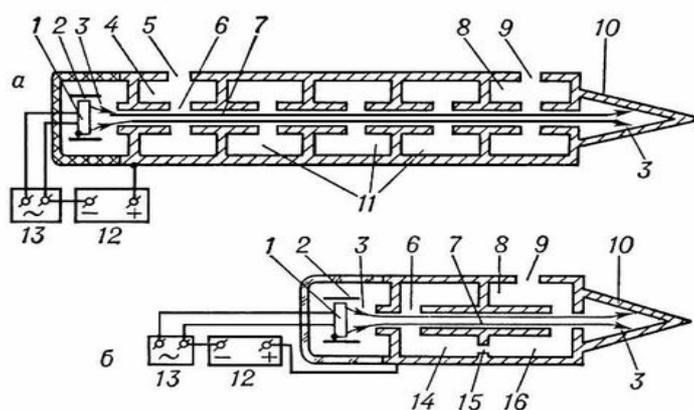
<sup>26</sup> M. Thumm. Historical German contributions to physics and applications of electromagnetic oscillations and waves. - <http://www.radarworld.org/history.pdf>

<sup>27</sup> подробнее см.: В.Ф. Коваленко. Магнетрон. - <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/072/329.htm>



**Рис. 4.** Многорезонаторный магнетрон простейшей конструкции (слева — внешний вид; справа — разрез): 1 — анодный блок с 8 резонаторами типа «щель-отверстие»; 2 — резонатор; 3 — ламель анодного блока; 4 — связка в виде металлического кольца (второе такое же кольцо расположено на другом торце анодного блока); 5 — катод; 6 — выводы подогревателя катода; 7 — радиатор; 8 — петля связи для вывода энергии СВЧ; 9 — стержень вывода энергии СВЧ для присоединения к коаксиальной линии (<http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/072/329.htm>).

**Клистрон** — «электровacuумный прибор СВЧ, в котором преобразование постоянного потока электронов в переменный происходит путём модуляции скоростей электронов электрическим полем СВЧ (при пролёте их сквозь зазор объёмного резонатора) и последующей группировки электронов в сгустки (из-за разности их скоростей) в пространстве дрейфа, свободном от поля СВЧ». Клистроны могут быть пролётными и отражательными. В первом случае «электроны последовательно пролетают сквозь зазоры объёмных резонаторов». Во входном резонаторе происходит модуляция скоростей электронов, в пространстве дрейфа образуются сгустки электронов, которые, проходя сквозь зазор выходного резонатора, «взаимодействуют с его электрическим полем СВЧ, большинство электронов тормозится и часть их кинетической энергии преобразуется в энергию колебаний СВЧ» (см. **рис. 5**).



**Рис. 5.** Схемы конструкции пролётных клистронов: а — усилительного, б — генераторного: 1 — катод; 2 — фокусирующий цилиндр; 3 — электронный поток; 4 — входной объёмный резонатор; 5 — отверстие для ввода энергии сверхвысоких частот; 6 — зазор объёмного резонатора; 7 — пространство дрейфа; 8 — выходной объёмный резонатор; 9 — отверстие для вывода энергии сверхвысоких частот; 10 — коллектор, принимающий электронный поток; 11 — промежуточные объёмные резонаторы; 12 — источник постоянного анодного напряжения; 13 — источник напряжения подогрева катода; 14 — первый объёмный резонатор; 15 — щель связи, через которую

часть энергии сверхвысоких частот проходит из второго резонатора в первый; 16 — второй объёмный резонатор.

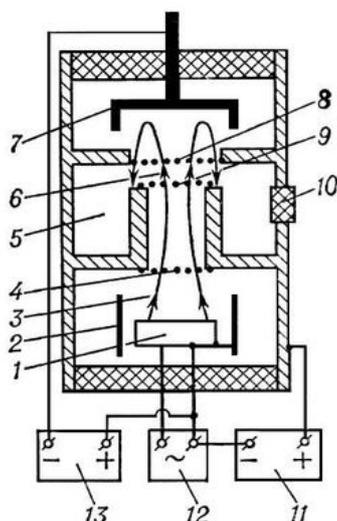
«Идея преобразования постоянного потока электронов в поток переменной плотности за счёт того, что ускоренные электроны догоняют замедленные, рассматривалась советским физиком Д.А. Рожанским в 1932, метод получения мощных колебаний СВЧ, основанный на этой идее, был предложен совместно советским физиком А.Н. Арсеньевой и немецким физиком О. Хайлем в 1935, первые конструкции пролётных клистронов были предложены и осуществлены в 1938 американскими физиками В. Ханом, Г. Меткалфом и независимо от них Р. Варианом и З. Варианом». Большинство их являются многорезонаторными усилительными клистронами. «Основные области их применения: доплеровская радиолокация, связь с искусственными спутниками Земли, радиоастрономия, ... оконечные усилители мощности радиолокационных станций дальнего действия и высокой разрешающей способности» и т.д. «Ханс Хольманн (Hans Erich Hollmann) зарегистрировал 27 ноября 1935 года патент в Германии, а 12 июля 1938 г. - в США, опередив Рандалла (J. Randall) и Бутса (H. Boot), выполнивших свою работу лишь в феврале 1940. Принцип работы отражательного клистрона был использован Хольманном в 1925 году еще до того, как он запатентовал «двухсеточную электронную лампу с тормозящим полем».<sup>28</sup> «Отражательный клистрон «был разработан в 1940 группой советских инженеров — Н.Д. Девятковым, Е.Н. Данильцевым, И.В. Пискуновым, и независимо от них советским инженером В.Ф. Коваленко. Первые работы по теории отражательного клистрона были опубликованы советскими физиками Я.П. Герлецким в 1943 и С.Д. Гвоздовером в 1944». Отражательные клистроны являются самым массовым типом приборов СВЧ и применяются в радиолокации как генератор малой мощности.<sup>29</sup>

В *отражательном клистроне* (см. схему конструкции отражательного клистрона на **рис. 6**) «поток электронов, пройдя зазор объёмного резонатора, попадает в тормозящее поле отражателя, отбрасывается этим полем назад и вторично проходит» зазор в обратном направлении. При первом прохождении зазора его электрическое поле СВЧ модулирует скорости электронов. При втором прохождении (в обратном направлении) электроны прибывают в зазор сформированными в сгустки; поле СВЧ в зазоре тормозит эти сгустки и превращает часть кинетической энергии электронов в энергию колебаний СВЧ. Сгустки электронов образуются в результате того, что ускоренные электроны в пространстве между объёмным резонатором и отражателем проходят более длинный путь и находятся дольше, чем замедленные. При изменении отрицательного напряжения на отражателе меняются время пролёта электронов, фаза прибытия сгустков в зазор и частота генерируемых колебаний», что используется для электронной настройки, позволяющей управлять частотой генерируемых колебаний при частотной модуляции и автоматической подстройке частоты. Применяется также механическая перестройка частоты.

---

<sup>28</sup> M. Thumm. Historical German contributions to physics and applications of electromagnetic oscillations and waves. - <http://www.radarworld.org/history.pdf>

<sup>29</sup> подробнее см. В.Ф. Коваленко. Клистрон. - <http://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/061/991.htm>



**Рис. 6.** Схема конструкции отражательного клистрона: 1 — катод; 2 — фокусирующий цилиндр; 3 — электронный поток; 4 — ускоряющая сетка; 5 — объемный резонатор; 6 — зазор объемного резонатора; 7 — отражатель; 8 — вторая сетка резонатора; 9 — первая сетка резонатора; 10 — вакуумноплотное керамическое окно вывода энергии сверхвысоких частот из объемного резонатора; 11 — источник напряжения резонатора клистрона; 12 — источник напряжения подогрева катода; 13 — источник напряжения отражателя.

Как видно из приведенного даже краткого описания функционирования принципиально новых радиолокационных приборов — магнетрона и клистрона — физическая сущность протекающих в них процессов и их конструктивные особенности не имели почти ничего общего с традиционными теоретическими схемами классической радиотехники. В дальнейшем, конечно, они оказали свое обратное влияние на радиотехнику и привели к корректировке и расширению ее теоретических представлений.

Переход на сверхвысокие частоты потребовал серьезных научных исследований этого нового режима функционирования радиотехнических устройств. Причем ученым и инженерам приходилось ставить и решать проблемы, которые в рамках радиотехники или вообще не возникали или имели второстепенное значение. Одной из таких проблем было подавление внешних помех и внутренних шумов при приеме отраженной от „цели“<sup>30</sup> волны. Это было связано в первую очередь с главной задачей любой РЛС - необходимостью точного измерения параметров отраженной волны для определения характеристик „целей“ - и потребовало огромных усилий и изобретательности от конструкторов. В результате были разработаны специальные схемы и устройства, уменьшающие влияние шумов и помех.

«В аппаратуре системы обнаружения РЛС, отраженный от цели сигнал обрабатывается в условиях наличия шумов приемника». На **рис. 7** показано качественное описание обнаруженной цели в присутствии шумов приемника. Выставление уровня порогового сигнала (threshold level) позволяет отсеять часть шумов, незначительно отклоняющихся от некоего усредненного уровня радиопомех (mean noise level), чтобы не вызвать ложную тревогу (false alarms). Однако, во-первых, при повышении уровня порогового сигнала, хотя

<sup>30</sup> так в радиолокации называется объект обнаружения

и уменьшается количество ложных всплесков, но возникает опасность отсечь и полезный сигнал отраженный от цели сигнал (target return), а, во-вторых, некоторое «допустимое» число ложных сигналов всегда остается. Таким образом, в данном случае возникает дилемма между увеличением ограничения шумов с целью уменьшить количество ложных тревог в единицу времени и возможностью обнаружения целей. «Шумы могут возникать как в самом приемнике, так и быть принятыми через антенну. Та часть шумов, которая возникает внутри приемника, является следствием теплового возбуждения электронов» в электрических цепях и электронных приборах самого приемника.<sup>31</sup>

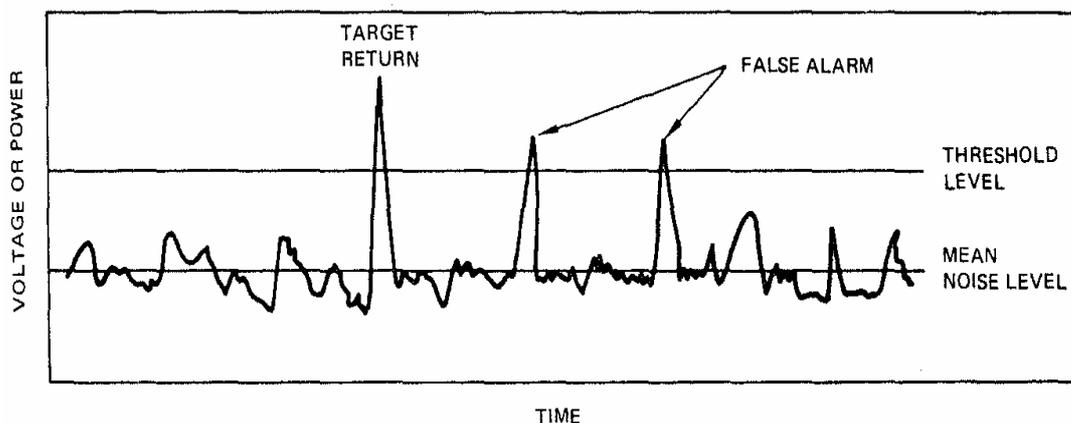


Рис. 7. Выходной сигнал приемника РЛС как функция времени от мощности сигнала

Однако подлинный переворот в традиционном (радиотехническом) представлении радиолокационных устройств вызвало применение импульсного метода. Этот метод выходил за рамки привычных представлений и имел важные преимущества, а именно: позволял резко повысить мощность РЛС, давал возможность отслеживать несколько „целей“, вести прием и передачу на одну антенну и т.п. И хотя принцип здесь использовался тот же самый (передача электромагнитной энергии на расстояние), в рамках электродинамической картины мира формировались отличные от радиотехнических частные теоретические схемы. Значимыми становились другие параметры электромагнитных волн (длительность и скважность импульса, конфигурация его фронта, частота повторения импульсов и т.д.). Эти новые частные теоретические схемы отражали иную реальность, в связи с чем и требовались другие способы ее представления. В радиотехнике по параметрам электромагнитных колебаний расшифровывается текст сообщения, а в радиолокации по параметрам импульсов определяются характер и координаты „целей“, которые регистрируются зрительно (а не слухом) на специальных устройствах совершенного нового типа - радиолокационных трубках (см. рис. 8).

<sup>31</sup> S.A. Hovanessian. Radar system design and analysis. Dedham: ARTECH HOUSE, INC., 1984.

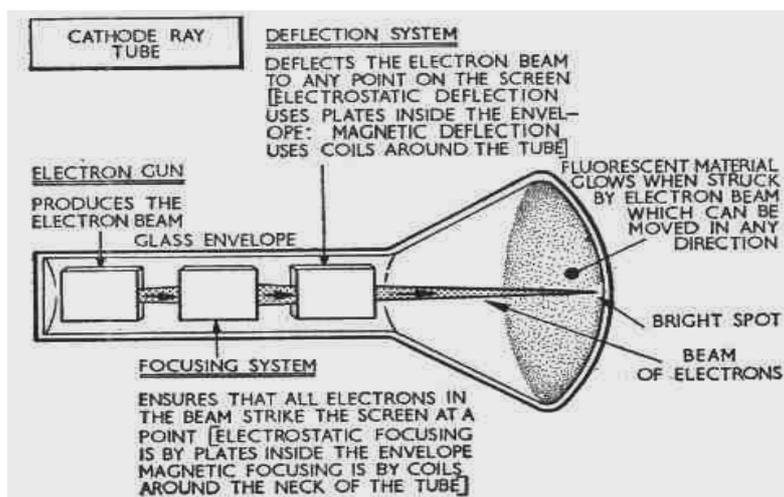


Рис. 8

Как показано на **рис. 8** пучок электронов, произведенный электронной пушкой, сфокусированный специальным фокусирующим устройством и управляемый отклоняющими пластинами, рисует на люминесцентном (т.е. покрытым флуоресцирующим веществом) экране карту местности с указанием на ней движущейся цели (**рис. 9**).<sup>32</sup>

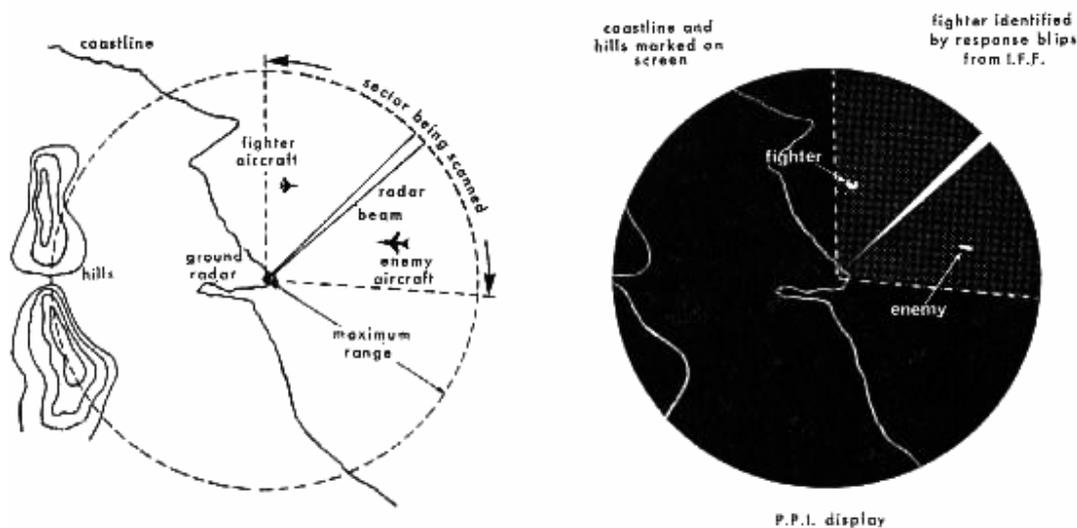


Рис. 9

На экране наземной РЛС береговой охраны сканирующий определенный сектор местности луч радара высвечивает при своем постоянном круговом движении рельеф местности (в данном случае береговую линию и отстоящие от нее на некотором расстоянии холмы) и метку движущейся «цели» - самолет противника (справа от луча локатора) и истребитель собственных ВВС (слева).

Кроме того, с изменением режима функционирования этого нового типа радиотехнических устройств постепенно изменилось и конструктивное оформление РЛС и соответствующие ему теоретические схемы. Если первоначально они строились и изображались по типу разнесенных

<sup>32</sup> оба рисунка из: Radar Theory. - <http://www.radarpages.co.uk/theory/ap3302/sec1/ch4/sec1ch448.htm>

радиотехнических приемников и передатчиков, то позднее при переходе на работу с общей антенной, сформировались иные структурные схемы РЛС (рис. 10). Появились и новые блоки, которых не было в традиционных радиотехнических устройствах: антенный переключатель, синхронизатор и индикаторное устройство. Стали разрабатываться новые импульсные схемы (блокинг-генераторы<sup>33</sup>, мультивибраторы<sup>34</sup>, импульсные усилители, пороговые устройства и т.д.), а затем и методы их анализа и синтеза. Для новых элементов потребовалась разработка и их схематического графического изображения в сфере теории.



Рис. 10<sup>35</sup>

После того, как передатчик послал импульс через антенну, специальное устройство блокирует генератор, а антенный переключатель переводит ее в состояние приема эхо-сигнала, т.е. отраженного от цели импульса, содержащего информацию о местоположении и характере цели. Как видно из схемы на рис. 10, выходной сигнал от приемника отображается на индикаторе. Чтобы определить положение цели, на индикаторное устройство одновременно направляется импульс от передатчика. Расстояние между этими импульсами и дает информацию о расстоянии до цели. Одновременно от антенны поступает информация о том, в каком направлении ориентирован луч локатора при встрече с целью.

Формирование нового исследовательского направления - радиолокации - в рамках радиотехники, как научно-технической дисциплины, сопровождалось выходом в свет многочисленных статей и появлением патентов, описывающих принципы действия, аппаратуру и методы работы РЛС, а также становлением промышленной базы для их изготовления. В 1940-41 гг. были построены и переданы в эксплуатацию несколько опытных образцов РЛС различного назначения, стала осуществляться координация деятельности отдельных исследовательских групп. В СССР, например, в 1938 году была проведена первая научно-техническая конференция по радиообнаружению. В 1940 году между США

<sup>33</sup> «Блокинг-генератор представляет собой однокаскадный релаксационный генератор кратковременных импульсов с сильной индуктивной положительной обратной связью, создаваемой импульсным трансформатором. Вырабатываемые блокинг-генератором импульсы имеют большую крутизну фронта и среза и по форме близки к прямоугольным» (<http://naf-st.ru/main/generator/?blok>).

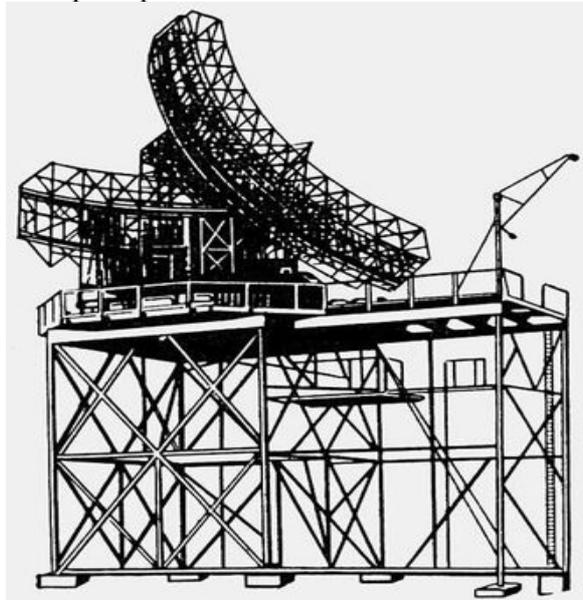
<sup>34</sup> Например, ждущий (или моностабильный) мультивибратор представляет собой электрическую цепь с одним стабильным состоянием. Он используется в РЛС для различных целей, например, для генерирования прямоугольных импульсов с точным временным интервалом. Обычное назначение ждущего мультивибратора – получение одиночного импульса заданной длительности.

<sup>35</sup> А.Ф. Богомолов. Радиолокационная станция. - <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/094/937.htm>

и Великобританией было подписано соглашение о взаимном обмене научно-технической информацией и опытом разработки РЛС.<sup>36</sup> Начал осуществляться быстрый переход к серийному производству радиолокационной аппаратуры. С этого времени радиолокация перерастает в отдельную область исследования. На этом этапе ее развития получили уже достаточно детальную разработку новые теоретические схемы, которые, однако, оставались пока лишь частной разновидностью более общих радиотехнических представлений.

### **Организационные предпосылки и первые практические результаты**

«Хотя первые идеи использования радиолуча для наведения летательных аппаратов относятся к 1904 году, практическое использование таких систем не имело места до 1932 г.», когда на германской фирме *Lorenz A.G.* д-ром Е. Крамаром (E. Krahar) был разработан прибор для посадки самолетов». В 1937 году этой фирмой был запатентован маркерный радиомаяк, в котором Крамаром был спроектирован наземный передатчик с двумя антеннами, расположенными одна над другой (примерно так, как показано, например, на **рис. 11**). «Эта идея была переоткрыта и использована в США в 1940 году».<sup>37</sup>



**Рис. 11.** Наземная РЛС обнаружения и наведения самолётов

РЛС обнаружения самолетов и наведения на них самолётов-перехватчиков обнаруживают самолёты и одновременно измеряют их координаты — дальность, азимут и высоту полёта. «Для реализации этого метода применяют 2 антенны, одна из которых имеет диаграмму направленности, узкую по азимуту и широкую в вертикальной плоскости, а другая — диаграмму направленности такой же формы, но отклоненную от вертикальной плоскости на угол, равный  $45^\circ$ » (рис. 11). «При совместном вращении обеих антенн азимут и дальность объекта определяются посредством первой антенны, а высота — по промежутку времени, через который объект фиксируется второй антенной».<sup>38</sup>

В *Англии* организатором разработки радиолокационного оборудования стал британский физик Роберт Уоттсон-Уатт (Robert Watson-Watt). Им был создан в 1935 году

<sup>36</sup> Радар в США: Официальная история. М.: Сов. радио, 1946

<sup>37</sup> History of radio flight navigation systems. - <http://www.radarworld.org/flightnav.pdf>

<sup>38</sup> А.Ф. Богомолов. Радиолокационная станция. - <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/094/937.htm>

«первый практически применимый радар», а к 1939 году «в Англии была организована цепь радиолокационных станций вдоль южного и восточного побережья для обнаружения агрессора в воздухе и на море».<sup>39</sup> Эта цепь, состоявшая первоначально из пяти РЛС, разнесенных на 40 км друг от друга, сыграла важнейшую роль в начальном периоде войны для защиты Англии от нападения германских самолетов и кораблей. «Возглавляемый им отдел радио в Национальной физической лаборатории был в этой области ведущим. Перед Уотсоном-Уаттом стояла та же важная проблема, что и перед американцами, - как модулировать импульсами передатчик большой мощности. Ему удалось решить ее, и технические характеристики первого же варианта оборудования, разработанного в его лаборатории, оказались настолько хорошими, что после успешной демонстрации в начале 1935 года Уоттсон-Уатт получил денежные средства, позволившие ему организовать опытное производство». Его лаборатория выросла в дальнейшем под его же началом «в Научно-исследовательский институт радиолокации Великобритании ... и вскоре здесь была создана пригодная для использования в военной аппаратуре и относительно технологичная для производства конструкция магнетрона».<sup>40</sup>

«В СССР работы по радиолокации были развернуты с 1933 по инициативе М.М. Лобанова, под руководством Ю.К. Коровина и П.К. Ощепкова. Первые практически использовавшиеся РЛС, действие которых было основано на появлении биений при пересечении самолетом линии передатчик — приемник, разработаны под руководством Д.С. Стогова в 1938». Импульсный метод был разработан в 1937 в Ленинградском физико-техническом институте под руководством Ю.Б. Кобзарева.<sup>41</sup>

В США американские изобретатели Юнг и Тейлор, сначала занимавшиеся методом биений, также переключились на импульсный метод, «исходя из следующих соображений:

- электромагнитное излучение на высоких частотах можно использовать для обнаружения и определения местоположения удаленных отражающих объектов;
- излучение должно вестись импульсами длительностью в несколько микросекунд с промежутками между импульсами во много раз большими длительности самих импульсов;
- отраженные объектами импульсы можно принять и воспроизвести с помощью приемной аппаратуры, находящейся в месте излучения;
- расстояние до отражающего объекта можно определить через измерение времени, которое затрачено на распространение импульса до "цели" и обратно, и, наконец;
- направление на объект может быть определено с помощью остронаправленных антенн.

Работа над импульсным радиолокатором была начата 14 марта 1934 года ... с закупок серийных осциллографических трубок и супергетеродинного приемника». Первый образец был введен в действие «в апреле 1936 года, а уже через три месяца началась эксплуатация радиолокатора меньших размеров с длиной волны 1,5 м, и был успешно испытан антенный переключатель, что позволило использовать общую для приема и передачи антенну. Эти два быстро последовавших друг за другом усовершенствования позволили установить радиолокатор на корабле для испытаний на море, которые успешно прошли в апреле 1937 года». Американское правительство в конце лета 1940 г. учредило Национальный научно-исследовательский комитет по вопросам обороны, который мобилизовал научные кадры «на государственные нужды в специально созданные новые исследовательские центры». Таким новым центром по радиолокационным исследованиям «стала Лаборатория излучения Массачусетского технологического института, где благодаря тесному

<sup>39</sup> Alfred Lee Loomis. - <http://www.ob-ultrasound.net/loomis.html>

<sup>40</sup> Радиолокация (Краткая предыстория). - [http://www.kbpm.ru/Book/Part\\_1/06\\_RadioLocation\\_PredIstoria.htm](http://www.kbpm.ru/Book/Part_1/06_RadioLocation_PredIstoria.htm)

<sup>41</sup> А.Ф. Богомолов. Радиолокация. - <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/094/941.htm>

содружеству ученых, производителей и военных была успешно проведена разработка радиолокатора на сантиметровых волнах».<sup>42</sup>

В Германии д-р Ханс Эрик Хольманн (Hans Eric Hollmann), консультант фирмы GEMA, который помогал ей создавать первые современные РЛС, «зарегистровал на свое имя более 300 патентов. 76 из них были запатентованы в США фирмой «Телефункен», которую он также консультировал. На фирме «Телефункен» была построена РЛС «Вюрцбург», в которой были использованы главным образом изобретения Хольманна. Работая в лаборатории высокой частоты и электромедицины этой фирмы, которая состояла из 20 ученых, Хольманн разрабатывал технику СВЧ, которая привела к созданию радара. ... В 1935 году Хольманн написал первую современную книгу о микроволнах под заголовком «Физика и техника ультракоротких волн». Эта книга получила распространение и использование во всех ведущих странах мира. В его книге приводятся примеры использования микроволн».<sup>43</sup>

Однако особо бурное развитие радиолокация переживала в период войны, поскольку она открывала совершенно новые возможности ведения боя и защиты в особенности воздушного пространства при любых погодных условиях. «Во время Второй мировой войны благодаря РЛС можно было обнаружить и определить место нахождения врага, а существовавшие тогда навигационные системы позволяли летательным аппаратам действовать над собственной территорией и территорией противника без увеличительных приборов визуального наблюдения». Все это стало возможным благодаря почти мгновенной скорости распространения сантиметровых радиоволн сверхвысоких частот (СВЧ). «Решающее преимущество и даже превосходство военно-воздушных и военно-морских сил теперь зависело от того, у кого были лучшие радары и техника СВЧ».<sup>44</sup> Поэтому к началу войны во многих странах было начато множество проектов непосредственно служащих военным целям.

В СССР промышленный выпуск первых РЛС для армии был начат в 1939 году. «Эти станции (РУС-1) с непрерывным излучением, модулированным звуковой частотой, располагались цепочкой вдоль некоторой линии и позволяли обнаруживать самолёт, пересекающий эту линию. Они были применены на Карельском перешейке во время советско-финляндской войны 1939—40 и на Кавказе во время Великой Отечественной войны 1941—45. Первая импульсная радиолокационная установка была испытана в 1937. Промышленный выпуск импульсных РЛС (РУС-2, «Редут») начался в 1940. Эти станции имели одну приёмо-передающую антенну и помещались вместе с источником электропитания в кузове автомашины».<sup>45</sup> Это были прежде всего наземные радиолокационные установки. Разработка, изготовление и принятие на вооружение самолетных радиолокационных станций было начато несколько позже. «Летом 1940 г. под руководством начальника группы отделов спецслужб НИИ ВВС (подразделение, занимавшееся специальным оборудованием самолетов и аэродромов. Позднее выделилось в самостоятельный НИИ спецслужб ВВС) генерала С.А. Данилина состоялось совещание,

<sup>42</sup> Радиолокация (Краткая предыстория). -

[http://www.kbpm.ru/Book/Part\\_1/06\\_RadioLocation\\_PredIstoria.htm](http://www.kbpm.ru/Book/Part_1/06_RadioLocation_PredIstoria.htm)

<sup>43</sup> Dr. Hans E. Hollmann, the Physicist and "Father of Modern Radar and Microwave Technology".

Copyright 2001 Martin Hollmann. In: Radar World - <http://www.radarworld.org/hollmann.html>

<sup>44</sup> G. Нерке. The radar war. Translated into English by Hannah Liebmann, p. 1

<sup>45</sup> А.Ф. Богомолов. Радиолокационная станция. - <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/094/937.htm>.

«В 1939 году Научно-исследовательский институт радиопромышленности и Ленинградский физико-технический институт начали разработку радиолокатора "Редут", в 1940 году он был принят на вооружение. Однако к началу Великой Отечественной войны было изготовлено только 12–14 экземпляров этого радиолокатора, и в войну наша страна вступила без радиолокационных войск» (Ю. Мажоров. ЦНИИРТИ 60 лет. Страницы истории. - ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес 4/2003).

на котором рассматривались разнообразные варианты решения проблемы. Наиболее перспективной признали аппаратуру радиобнаружения ... Именно станция «Редут», разработанная в Ленинградском НИИ радиопромышленности, стала прототипом первой советской самолетной РЛС. Установка этой станции на борту самолета потребовала значительного изменения ее конструкции. Тяжелое и громоздкое оборудование (в наземном варианте оно размещалось на трех автомашинах) не отвечало авиационным требованиям, и начальник отдела НИИ радиопромышленности А.Б. Слепушкин предложил разработать новую аппаратуру сантиметрового диапазона с импульсным режимом работы. Такое решение обещало уменьшить габариты и массу при большей точности обнаружения. Но даже в этом варианте весь комплект оборудования по расчетам весил не менее 500 кг». Эти РЛС получили кодовое название «Гнейс». К концу 1941 г. первый летный образец самолетной РЛС «Гнейс-2» (см. **рис. 12**) был изготовлен. Однако первые летные испытания выявили целый ряд недостатков в ее работе и лишь в 1943 году было принято решение об оснащении этими станциями ВВС красной армии, но до конца войны она не нашла все же массового применения.<sup>46</sup>

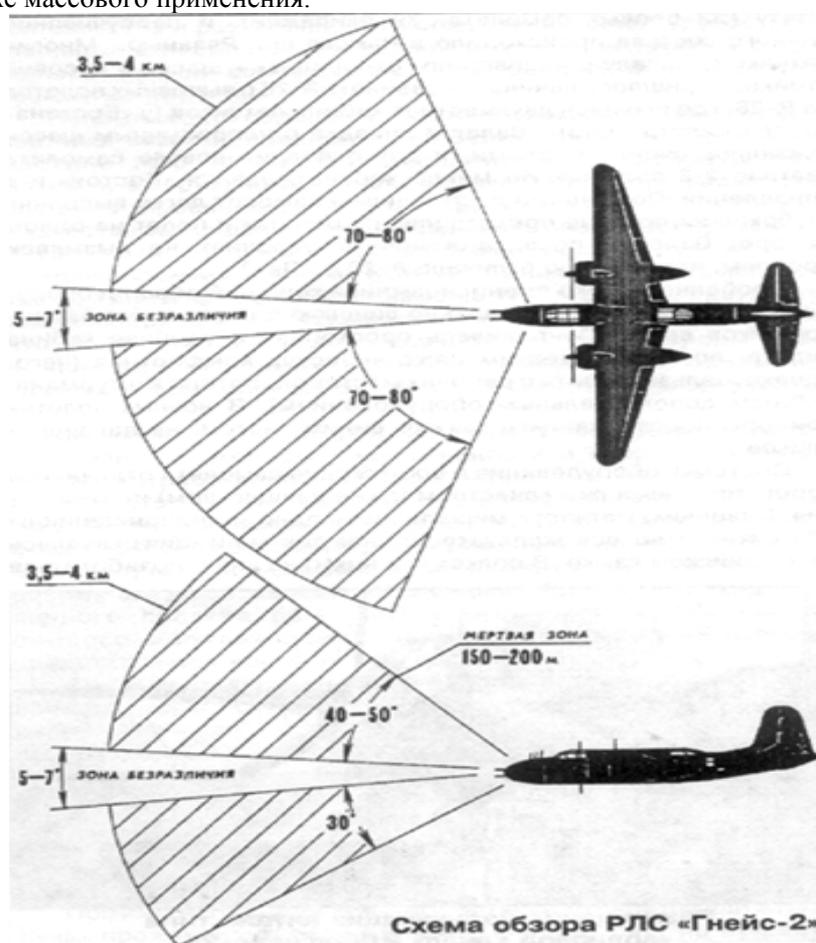


Рис. 12

«Радиолокация, предъявляющая к электронике куда более сложные требования по качеству компонентов и их специфике, чем гражданская связная аппаратура,

<sup>46</sup> А. Медведь, В. Марковский. Радиолокационные истребители ВВС Красной Армии. - <http://www.airwar.ru/history/av2ww/soviet/rls/rls.html>

начинала свое развитие в нашей стране именно при таком уровне слаботочной промышленности, поэтому, несмотря на большой восьмилетний труд многих ученых и инженеров, развернуть серийное производство радиолокационных станций к началу войны не удалось».<sup>47</sup>

### **3. Радиолокация как область исследования в рамках базовой научно-технической дисциплины - радиотехники**

Второй этап развития радиолокации представляет собой формирование новой области исследования в рамках радиотехники. Качественно иной режим функционирования РЛС на сверхвысоких частотах и импульсный режим стимулировал появление новых элементов, блоков и схем. Развитие же импульсной техники и техники СВЧ, в свою очередь, привело к необходимости изучения законов распространения радиоволн дециметрового и сантиметрового диапазона и закономерностей изменения импульсных процессов, разработки методов расчета, анализа и синтеза новых схемных решений. В радиолокации в практической сфере на этом этапе постепенно формируются новый объект исследования и проектирования - РЛС, а в сфере теории - иные, чем в радиотехнике структурные схемы.

#### ***Формирование оригинальных теоретических схем радиолокации***

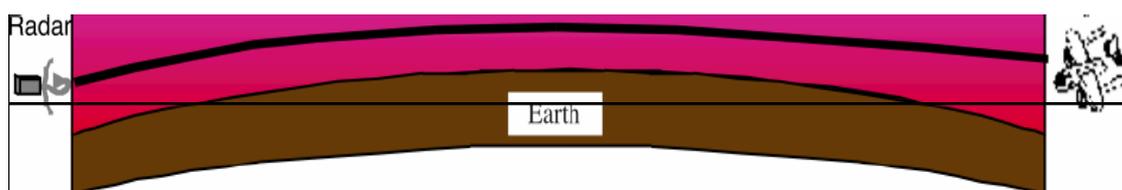
Новые теоретические схемы как бы подслаиваются под схемы базовой технической теории с одновременной их модификацией и развитием. Поэтому в радиолокации имеются три слоя взаимосогласующихся теоретических схем, которые могут быть условно названы электротехническими, радиотехническими и собственно радиолокационными. В радиотехнике же были развиты лишь два первых слоя.

*Электротехнические* теоретические схемы связаны с исследованием тех физических процессов, протекающих внутри элементов и блоков радиотехнических и радиолокационных устройств, которые связаны с расчетом параметров и отображением процессов протекания электрических токов в стандартных электротехнических элементах: сопротивлениях, конденсаторах, катушках индуктивности. Конечно, они могут быть лишь условно электротехническими. Для описания физических процессов в новых физических элементах таких, например, как электронные лампы или полупроводниковые приборы используется электронная теория. Однако, для расчета схем, в которые они включены, как правило, применяются традиционные их электротехнические эквиваленты (резисторы, емкости и индуктивности). Поскольку же в элементах и схемах радиолокационных устройств (клинтонах, магнетронах, электронно-лучевых трубках, антенных устройствах, различных импульсных схемах и т.д.), работающих в новых для радиотехники режимах, протекают иные физические процессы, потребовалась модификация старых или разработка совершенно новых методов их расчета и способов представления, привлечение новых математических средств. Это стимулировалось, кроме того, необходимостью исследования и разработки способов подавления внутренних шумов элементов радиолокационной аппаратуры (скажем, дробового эффекта в электронных лампах).

---

<sup>47</sup> Радиолокация (Краткая предыстория). - [http://www.kbpm.ru/Book/Part\\_1/06\\_RadioLocation\\_PredIstoria.htm](http://www.kbpm.ru/Book/Part_1/06_RadioLocation_PredIstoria.htm)

В радиолокации были трансформированы также и *радиотехнические* схемы прежде всего за счет расширения диапазона применяемых на практике радиоволн. Изучение законов распространения электромагнитных колебаний сантиметрового и дециметрового диапазонов, стимулированное радиолокацией, позволило выявить новые аспекты электродинамической картины мира, на которую опирается радиотехника. Поскольку же для радиолокации существенным является учет шумов и помех в окружающей среде, то отождествление последней со свободным пространством уже не было адекватным задачам, решаемым в радиолокации. Важно было учитывать влияние этой среды на распространение радиоволн, например, явление рефракции (искривления направления радиоволн - см. **рис. 13**), дисперсии (зависимости фазовой скорости от частоты), поглощения или рассеяния волн в разных средах и т.п. Необходимость обнаружения и опознавания "целей" по характеру влияния их на радиоволны стимулировали исследование рассеивающих свойств различных объектов - зеркальное отражение, диффузное рассеяние, резонансное вторичное излучение. Это привело к формированию новых понятий, способов графического представления данных процессов и их математического описания. Развитие импульсного метода радиолокации и импульсной радиотехники также оказало существенное влияние на формирование новых представлений импульсных процессов (разворачивание исходной радиотехнической схемы) - представлений об их распространении в окружающей среде и о методах формирования, усиления, анализа в импульсных схемах.



**Рис. 13.** Рефракция радиоволн в неоднородной атмосфере и увеличение дальности действия РЛС за счет эффекта огибания Земли электромагнитными волнами<sup>48</sup>

Создание собственно *радиолокационных* теоретических схем было связано с разработкой и систематизацией различных методов обнаружения «целей» и измерения их координат, прежде всего выявления движущихся «целей» на карте местности. Поэтому многие понятия и представления радиолокации были заимствованы из геодезии, картографии, навигации (см., например, **рис. 14**). Вводятся специальные понятия поверхности и линии положения, точечной, объемной и распределенной "цели", координат (дальности, азимута и угла места), траектории и радиальной скорости "цели", эффективной площади рассеяния, метки дальности, разрешающей способности радиолокационной станции (по дальности и угловым координатам), точности отсчета, сектора и границы обзора, телесного угла луча и т.п.

<sup>48</sup> W. Wiesbeck. Lecture Script "Radar System Engineering". 13th Edition WS 2006/2007. Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik, Universität Karlsruhe: [www.ihe.uni-karlsruhe.de](http://www.ihe.uni-karlsruhe.de)

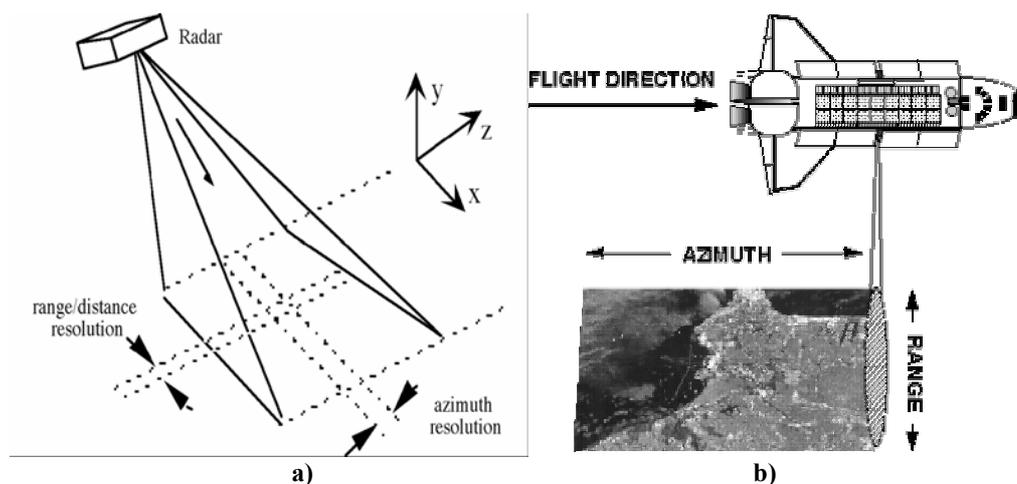


Рис. 14<sup>49</sup>

К данному слою теоретических схем относятся изображения направленного луча различной формы (см. рис. 15), например, многолипесткового, и способов его сканирования (слежения за "целью"), основные методы определения местоположения и т.д.

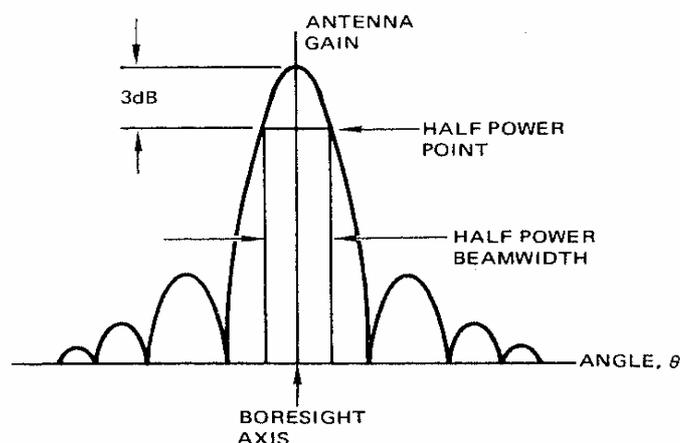


Fig. 15. Типичная диаграмма радиолокационной антенны: antenna gain - коэффициент направленного действия антенны, beamwidth - ширина луча, angle - угол, boresight axis - ось симметрии диаграммы антенны, power – мощность.<sup>50</sup>

Одна из важнейших задач в радиолокации - специальное исследование ошибок измерения, возникающих под влиянием помех, и методов борьбы с ними. Для решения такого рода задач разрабатываются различные типы математических средств и соответствующие им теоретические схемы.

<sup>49</sup> Рис. 6 а) взят из: W. Wiesbeck. Lecture Script "Radar System Engineering". 13th Edition WS 2006/2007. Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik, Universität Karlsruhe: [www.ihe.uni-karlsruhe.de](http://www.ihe.uni-karlsruhe.de); а рис. 6 б) - из: T. Freeman. What is Imaging Radar? - <http://southport.jpl.nasa.gov/desc/imagingradarv3.html>

<sup>50</sup> S.A. Hovanessian. Radar system design and analysis. Dedham: ARTECH HOUSE, Inc., 1984, p. 5

На этапе развития радиолокации в особую область исследования в рамках радиотехники осуществляется создание первых промышленных образцов РЛС, отработка и обобщение их структурных схем. К этому времени ясно осознается общность структуры различных станций: РЛС могут иметь различные конструктивные формы, но все они построены по общему принципу. Одновременно РЛС осознается как особый тип технической системы, качественно отличный от других радиотехнических устройств.<sup>51</sup> Специфика данных систем как объекта исследования радиолокации определяется, во-первых, изменением роли старых и появлением новых блоков и, во-вторых, иным режимом их функционирования.

В РЛС появились новые блоки, которых раньше не было в радиотехнических системах или же традиционные блоки приобретают совершенно новое значение. Для выполнения основной функции РЛС - обнаружения и измерения координат „целей“ оператором - необходимы различного рода индикаторные устройства (прежде всего электронно-лучевые трубки). С ними связаны разнообразные технические средства и приспособления для обработки отраженного от „цели“ импульса или непрерывного электромагнитного колебания, а также специальные схемы, элементы и устройства для подавления помех. Сложность управления и обеспечения слаженной работы всех блоков РЛС потребовала создания особого блока синхронизации.

Основной функцией радиолокационных теоретических схем является идентификация изображения на индикаторе радиолокационной станции с реальными объектами на фоне местности, выделение (обнаружение) "целей" и определение (измерение) их параметров. Для этого разрабатываются специальные индикаторные (см. **рис. 16 и 17**<sup>52</sup>) и антенные устройства - прежде всего для получения определенной формы луча и вида изображения на индикаторе - и различные методы измерения и расчета координат "целей" (методы минимума и максимума, равносигнальный метод и другие).

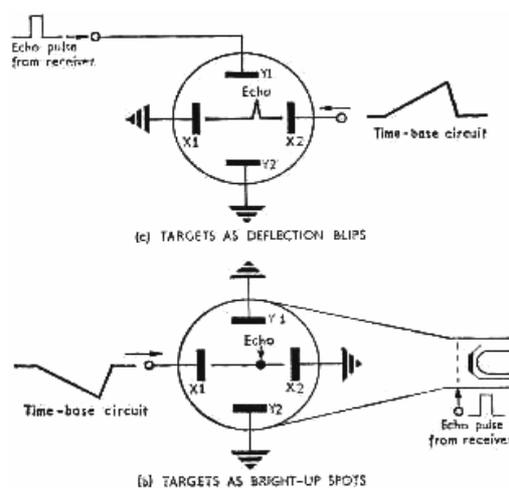


Рис. 16

<sup>51</sup> С 1941 г. входит в обиход сам термин «радиолокация» (Радар: Официальная история. М.: Сов. радио, 1946, с. 16).

<sup>52</sup> оба рисунка из: Radar Theory. - <http://www.radarpages.co.uk/theory/ap3302/sec1/ch4/sec1ch448.htm>

На рисунке показаны методы индикации цели: в верхнем случае как отклоняющаяся отметка, а в нижнем - как более темная точка

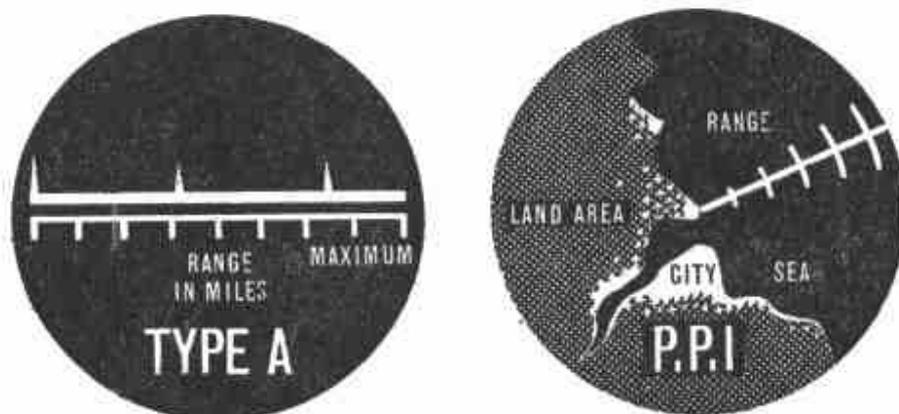


Рис. 17

На рис. показаны разные типы радиолокационных дисплеев, но как на простом (тип А - слева), так и на сложном индикаторном устройстве (рисунок справа) по экрану движется только одна точка.

Одним из неперенных компонентов любого радиоприемника или радиопередатчика является антенна. Однако в радиолокации антенным устройствам придается особенно важное значение. Они становятся весьма сложными и технически изощренными (рис. 18).

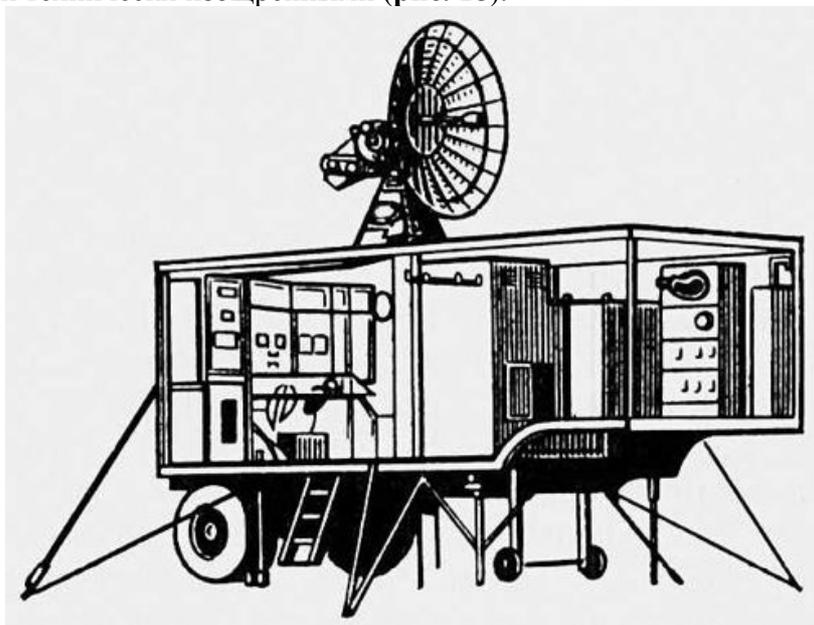


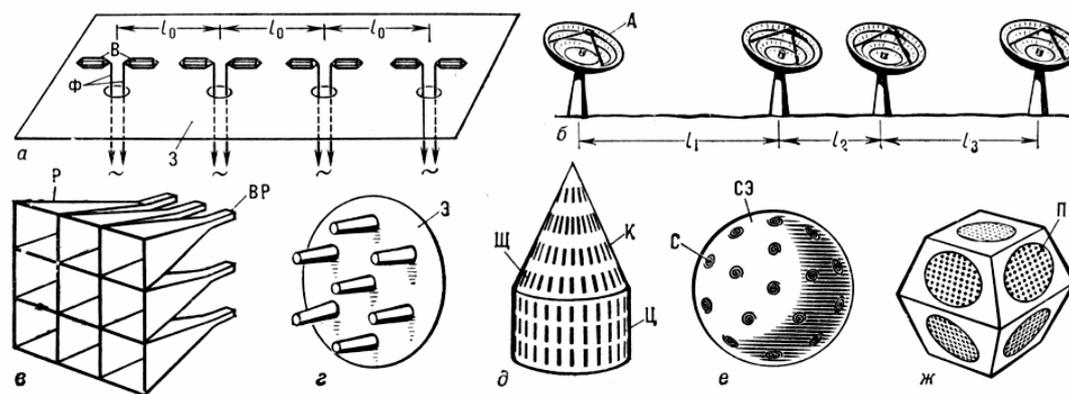
Рис. 18<sup>53</sup>

Появляются совершенно новые типы антенных устройств, как, например, фазированная антенная решётка<sup>54</sup>, расчет которых требует новых методов и становится

<sup>53</sup> А.Ф. Богомолов. Радиолокационная станция. - <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/094/937.htm>

<sup>54</sup> антенная решётка с управляемыми фазами или разностями фаз (фазовыми сдвигами) волн, излучаемых (или принятых) её элементами (излучателями)

достаточно сложным. В радиотехнических устройствах антенна играет важную, но все подчиненную роль. Обычно это просто кусок провода достаточной длины. Немецкий инженер Слаби, например, подвешивал антенные провода на воздушных шарах. Маркони и другие производители и изобретатели первых радиопередающих и радиоприемных устройств не имели почти никакого представления о том, какие физические процессы происходят в антенне. Благодаря исследованиям Фердинанда Брауна и изобретению им рамочной антенны в начале прошлого столетия стала возможной передача сообщений через океан. Но только в радиолокации антенное устройство, наряду с индикаторными устройствами приобретает решающее значение. Во-первых, при работе на совмещенную антенну в импульсном режиме антенное устройство становится сложной электромеханической системой, предназначенной для слежения за целью и поэтому находящейся в постоянном движении. Она становится фактически сложным антенным блоком, в котором важную роль играет, например, особый антенный переключатель, обеспечивающий переход от передающего к приемному режиму и обратно. Во-вторых, соединение ее с системами управления зенитным огнем, а затем и противоракетной обороны выдвинули перед учеными и инженерами задачи автоматического управления их движением, что привело к развитию сначала аналоговой, а затем и цифровой вычислительной техники. В-третьих, сама конструкция антенны стала достаточно сложной и потребовались специальные исследования для разъяснения физических процессов, происходящих в ней, и для разработки типовых методов расчета различного рода антенных конструкций, разнообразие которых диктовалось различными типами РЛС предназначенных для кругового обзора, прицельного бомбометания, для установки на автомобилях или же на самолетах и кораблях. На **рис. 19** приведены некоторые конструкции только одного типа таких антенн, что дает представление об их действительном многообразии и сложности.

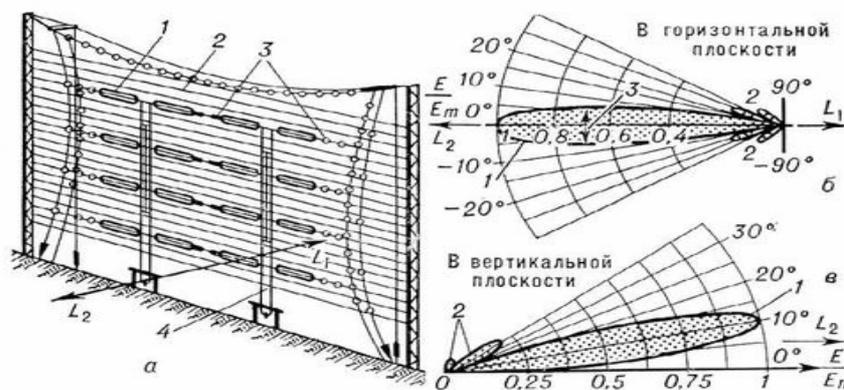


**Рис. 19.** Структурные схемы некоторых фазированных антенных решеток (ФАР) — линейной эквидистантной с симметричными вибраторами и общим зеркалом (а); линейной неэквидистантной с полноповоротными зеркальными параболическими антеннами (б); плоской с прямоугольным расположением рупорных излучателей (в); плоской с гексагональным расположением диэлектрических стержневых излучателей (г); конформной с щелевыми излучателями (д); сферической со спиральными излучателями (е); системы плоских фазированных антенных решеток (ж); В — вибраторы; Ф — линии возбуждения (фидеры); З — токопроводящее зеркало (рефлектор); А — зеркальные антенны; Р — рупоры; ВР — возбуждающие радиоволны; Э — металлический экран; Щ — щелевые излучатели; К — коническая ФАР; Ц — цилиндрическая ФАР; С — спиральные излучатели; СЭ — сферический экран; П — плоские фазированные антенные решетки (точками обозначены излучатели);  $L_0$  — расстояние между В;  $l_1, l_2, l_3$  — расстояния между А<sup>55</sup>

<sup>55</sup> М.Б. Заксон. Фазированная антенная решётка. <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/115/152.htm>

Все эти антенны не только имели разные конструкции, но и рассчитывались по-разному, что требовало развития новых теоретических представлений. Для конструирования антенного переключателя (при работе на совмещенную антенну), механических и электромеханических блоков, обеспечивающих движение антенны, отражательных зеркал, излучателей различных типов и т.п. требуется проведение специальных весьма сложных расчетов, т.е. создание особого блока частных теоретических схем.

Применяемое, например, в фазированных антенных решетках управление фазами «позволяет: формировать (при ... разнообразных расположениях излучателей) необходимую диаграмму направленности ... (например, остронаправленную – луч); изменять направление луча неподвижной фазированной антенной решеткой и таким образом осуществлять быстрое ... сканирование – качание луча ...; управлять в определенных пределах формой диаграммы направленности – изменять ширину луча, интенсивность (уровни) боковых лепестков и т.п.». Возможность применять для управления этими антеннами «современные средства автоматики и ЭВМ обусловили их перспективность и широкое использование в радиосвязи, радиолокации, радионавигации, радиоастрономии и т.д.»<sup>56</sup> Другой пример - синфазная антенна, т.е. «антенна в виде решётки из излучателей — чаще всего симметричных или щелевых вибраторов, возбуждаемых высокочастотными токами одинаковой фазы», демонстрирует особенность связанных с антенными устройствами теоретических представлений. «В направлении, перпендикулярном плоскости решётки, интенсивность излучения максимальна, т.к. поля всех излучателей в этом направлении складываются синфазно. Диаграмма направленности синфазной антенны в любой плоскости, перпендикулярной плоскости решётки, состоит из главного лепестка и множества боковых, ширина которых зависит от линейных размеров антенны (см. **рис. 20**)».<sup>57</sup>



**рис. 20.** Синфазная антенна коротких волн: а — схема: 1 — излучающий элемент в виде диполя Надененко; 2 — аperiодический рефлектор; 3 — изоляторы; 4 — линия питания (снижения), идущая к передатчику; б — диаграмма направленности в горизонтальной плоскости: 1 — основной лепесток; 2 — боковые лепестки; 3 — ширина диаграммы направленности на уровне 0,7 от максимального; в — диаграмма направленности в вертикальной плоскости (при идеальной проводимости земли): 1 — основной лепесток; 2 — боковые лепестки;  $E$  — напряжённость поля;  $E_m$  — максимальная напряжённость поля.

<sup>56</sup> М.Б. Заксон. Фазированная антенная решётка: <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/115/152.htm>

<sup>57</sup> Г.А. Клигер. Синфазная антенна: <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/102/473.htm>

Стремительный рост промышленности, развитие массового производства стимулировали унификацию и стандартизацию аппаратуры и схемных решений, а также технической документации. Это оказало сильное влияние на совершенствование структурных схем теоретической радиолокации, формирование в ней нового однородного идеального объекта, облегчающего теоретический анализ и синтез различных технических систем типовыми методами, - идеальной РЛС.<sup>58</sup>

### ***Развитие организационных основ радиолокации в военных условиях***

Для формирования научно-технических дисциплин большое значение имеет развитие серийного и массового производства данного типа технических систем (в случае радиолокации - РЛС). Такое производство оказывает огромное влияние на развитие слоя структурных схем технической теории, их стандартизацию и унификацию. В рассматриваемый период становления радиолокации как новой области исследования радиотехники начинается тиражирование РЛС различных типов и повсеместное их использование. Такого рода тиражирование непосредственно связано с разработкой и совершенствованием технологии изготовления аппаратуры для РЛС, освоением новых технологических приемов, связанных, например, с созданием металлокерамических ламп, повышением качества комплектующих изделий РЛС.

Во время второй мировой войны появляются первые специализированные радиолокационные заводы: происходит переключение старых радиотехнических заводов на выпуск новой продукции и организация новых заводов и фирм. Однако этот процесс осложняется тем, что довоенная радиопромышленность в основном выпускала радиовещательную аппаратуру, для чего не требовалось больших производственных и людских затрат. С появлением же радиолокации положение меняется: во-первых, возникает необходимость параллельной организации сопутствующих и вспомогательных производств, например, крупносерийного производства электровакуумных приборов; во-вторых, требуется более четкая, чем раньше, кооперация научных исследований, промышленного производства и сферы эксплуатации РЛС, включая ремонт и техническое обслуживание, а также постоянную оценку их работы, выявление и устранение недостатков. «Техника развивалась так быстро, что производственники часто были принуждены делать серьезные изменения в структуре станций в процессе (уже налаженного - В.Г.) производства для того чтобы поспеть за новыми открытиями и учесть уроки боевых испытаний. Инженеры, проводившие испытания станций часто находились непосредственно в зоне боев и работали совместно с представителями армий, решали задачи ремонта и обслуживания аппаратуры».<sup>59</sup>

Производство первых самолетных РЛС было налажено в Англии уже в 1939 году. От нее не отставали и США. «Радиационная лаборатория Массачусетского технологического института, работавшая в этом направлении с 1940 по 1945 гг., обеспечила успех союзническим войскам успех, сделав фундаментальный вклад в

---

<sup>58</sup> Бартон Д. Радиолокационные системы. М.: Сов. радио, 1967, с. 156

<sup>59</sup> Радар в США: официальная история. М.: Сов. радио, 1946, с. 17.

проектирование и развертывание микроволновых радиолокационных систем».<sup>60</sup> И хотя в начале войны германская техника в этой области лидировала, США и Англия к 1942 году догнали немцев прежде всего благодаря массивной финансовой государственной поддержке развития радиолокационной науки и техники. «Одна только Радиационная лаборатория Массачусетского технологического института получила более двух миллиардов долларов в течение пяти военных лет». Лишь затраты на разработку атомной бомбы в течение Второй мировой войны могут приблизительно быть сравнимыми с финансированием радиолокации.<sup>61</sup> Микроволновый комитет Национального исследовательского комитета обороны принял решение о создании специальной лаборатории - Радиационной лаборатории, укомплектовав ее штатом физиков из различных университетов, и передав в административное управление Массачусетскому технологическому институту в ноябре 1940 года. Эта лаборатория сконцентрировала свое внимание на разработке радиолокационных систем.<sup>62</sup> К началу войны большинство ее проектов имели военную направленность.

Интересной и важной фигурой для начального развития радиолокационных исследований в США был известный ученый и предприниматель А. Лумис (Alfred Lee Loomis). Будучи сам довольно известным ученым, он создал в своем поместье (Tuxedo Park) недалеко от Нью-Йорка частную лабораторию, где работал сам и приглашал готовых к сотрудничеству с ним ученых для совместных исследований, в частности для разработки микроволнового генератора. Альберт Эйнштейн назвал эту лабораторию дворцом науки. Когда Лумис узнал, что британские ученые приехали в США для проведения совместных исследований в области радиолокации, он пригласил их в свою лабораторию. После того, как они показали ему свою последнюю разработку – магнетрон, Лумис сразу же распознал его огромное преимущество для дальнейшего развития радиолокации в военных целях. 15 физиков, часть из которых была рекрутирована из американских университетов и с которыми Лумис имел уже до этого хорошие рабочие контакты, были привлечены им для участия в начальной фазе нового проекта, которую профинансировал лично Лумис, а именно покупку оборудования для новой лаборатории и переезд в новое здание. Это и положило начало известной Радиационной лаборатории Массачусетского технологического института. Целью данного проекта стала разработка бортовой РЛС перехвата, защищенной от нападения с воздуха системы наведения зенитных орудий и навигационной системы дальнего обнаружения.<sup>63</sup>

«Правительство США, понимая значение электроники в начавшейся войне, переключило на военные нужды всю американскую радиоэлектронную промышленность, насчитывающую в то время более 110 тыс. работающих. 27 июня 1940 года был создан Национальный исследовательский комитет по вопросам обороны. Из мобилизованных по всей стране ученых и инженеров формировались исследовательские центры, работавшие на военные цели. На это же были переориентированы крупнейшие американские университеты. ... Электронная промышленность США за военный период превратилась в мощную отрасль. В истории американского Комитета по военному производству приводятся красноречивые цифры: «Если в 1941 году общий объем заводских продаж для основных 55 изготовителей радиоаппаратуры составлял 240 млн. долл., то в 1944 году объем продаж аппаратуры радиосвязи и радиолокации с учетом производства деталей

<sup>60</sup> Robert Hanbury Brown 1916 – 2002. Radar Personalities. –

[http://www.radarpages.co.uk/people/hanbury\\_brown/hanbury\\_brown.htm](http://www.radarpages.co.uk/people/hanbury_brown/hanbury_brown.htm)

<sup>61</sup> Gerhard Hepcke. The radar war. Translated into English by Hannah Liebmann, p. 52

<sup>62</sup> L.N. Ridenour (Ed.). Radar System Engineering. N.Y. and L.: McGraw- Hill Book Co., Inc., 1947, p. 16

<sup>63</sup> См.: Alfred Lee Loomis: <http://www.ob-ultrasound.net/loomis.html>; Die Tizard Mission.

Radarentwicklung:

[http://www5.in.tum.de/lehre/seminare/math\\_nszeit/SS03/vortraege/radar/tizardmission.html](http://www5.in.tum.de/lehre/seminare/math_nszeit/SS03/vortraege/radar/tizardmission.html)

(электронных приборов) достиг 4,5 млрд. долл., что составило рост в 1875%. Число работающих в отрасли достигло 550 тысяч» ...<sup>64</sup>

«Еще до окончания 1940 года работа американских и британских радиолокационных лабораторий была скоординирована в результате соглашения между правительствами этих двух стран об обмене информацией в военной сфере. Британская техническая миссия<sup>65</sup> в сентябре 1940 г. прибыла в Вашингтон и с этого времени началось взаимное раскрытие британских и американских достижений в области радиолокации. Члены британской миссии посетили Военно-морскую исследовательскую лабораторию, лабораторию войск связи и Радиолобораторию военно-воздушных сил США, а также производственные предприятия, вовлеченную в работу по созданию радара. Они же продемонстрировали свою версию многорезонаторного магнетрона и снабдили (американцев – В.Г.) проектной документацией, которую промышленные предприятия США смогли сразу же скопировать».<sup>66</sup>

10 февраля 1942 года вышло постановление ГКО СССР «О промышленной базе для производства приборов радиобнаружения и пеленгации самолетов». В результате «в Москве было создано новое предприятие, способное вести новые разработки и выпуск радиолокационной аппаратуры». Сюда же из Ленинграда доставили оборудование для полного цикла производства электровакуумных приборов.<sup>67</sup> «В восьмимесячный срок были созданы два опытных образца СОН-2от - отечественных аналогов английской станции орудийной наводки. ... Постановлением ГКО от 20 декабря 1942 года СОН-2от была принята на вооружение и поставлена на серийное производство. В Новосибирске продолжал разработки радиолокационной техники и выпуск небольших серий радиолокационных станций типа РУС-2 и ее модификаций НИИ-20<sup>68</sup>. Довольно успешно шла здесь разработка авиационного радиолокатора. Самолетная станция "Гнейс-2" ... была принята на вооружение Постановлением ГКО от 16 июня 1943 года. Чтобы создать условия для изготовления институтом большой партии станций, было принято решение возвратить его из эвакуации».<sup>69</sup>

### *Совет по радиолокации*

---

<sup>64</sup> В. Пролейко. О значении электроники. Военный аспект. В: ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 4/2003

<sup>65</sup> Эта британская миссия получила название миссии Тризарда по имени ее руководителя (Sir Henry Thomas Tizard). См: С.Р. Snow. Science and Government. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1961; и [http://www5.in.tum.de/lehre/seminare/math\\_nszeit/SS03/vortraege/radar/tizard.html](http://www5.in.tum.de/lehre/seminare/math_nszeit/SS03/vortraege/radar/tizard.html).

<sup>66</sup> L.N. Ridenour (Ed.). Radar System Engineering. N.Y. and L.: McGraw- Hill Book Co., Inc., 1947, p. 15

<sup>67</sup> «Из блокадного Ленинграда в октябре 1941 года была вывезена в Москву группа специалистов НИИ-9 во главе с М.Л. Слиозбергом. 10 февраля 1942 года на основе этой группы был создан завод № 465 с целью воспроизводства и изготовления аналога СОН *GL-MK II*. К ноябрю 1942 года разработку завершили, при этом под руководством Н.Д. Девяткова было воспроизведено около 30 типов электровакуумных приборов – основы СОН» (В. Пролейко. О значении электроники. Военный аспект. 2005. - <http://www.electronics.ru/197.html>).

<sup>68</sup> «НИИ-20 Министерства электропромышленности, затем - Министерства промышленности средств связи в 1954 году был переименован в НИИ-244 Министерства радиотехнической промышленности, ныне это - Всероссийский НИИ радиотехники» (Первов М.А. Зенитное ракетное оружие противовоздушной обороны страны. Интернет издание книги. Издательский Дом «АвиаРус-XXI», 2003 - <http://www.aviarus-21.com/books/pvo/rus>).

<sup>69</sup> Радиолокация (Краткая предыстория).

[http://www.kbpm.ru/Book/Part\\_1/06\\_RadioLocation\\_PredIstoria.htm](http://www.kbpm.ru/Book/Part_1/06_RadioLocation_PredIstoria.htm)

4 июля 1943 года, за день до начала битвы на Курской дуге, председатель Государственного комитета обороны (ГОКО) Иосиф Сталин подписал постановление «О мероприятиях по организации производства радиолокационной аппаратуры», в соответствии с которым был образован Совет по радиолокации при ГОКО, приступивший к созданию радиолокационной промышленности СССР, начато создание Всесоюзного института по радиолокации, Всесоюзного электровакуумного института, Центрального проектно-конструкторского бюро. «Постановлением от 4 июля 1943 года ГОКО № 3683сс был создан Совет по радиолокации, сформулированы важнейшие первоочередные задачи и меры по созданию радиолокационных систем и средств». <sup>70</sup> Главной стратегической задачей этого Совета было создание промышленной базы для оснащения армии и флота радиолокационной аппаратурой. «В условиях тяжелой войны, при совершенно неразвитой электронной промышленности и слабом приборостроении решением задач концентрации и специализации военных, научных и промышленных предприятий и организаций разных ведомств, выработкой и воплощением в жизнь неординарных организационных мер мог заниматься только такой орган, каким стал Совет по радиолокации при ГКО. ... В итоге в сентябре 1943 года ГКО было принято развернутое постановление об организации выпуска средств радиолокации на некоторых заводах авиационной и судостроительной промышленности, о создании новых научно - исследовательских институтов, КБ, главного управления в НКЭП (радиолокационного) и по ряду других, относившихся к радиолокации вопросов. Это постановление положило начало развертыванию производства радиолокационной техники и очень скоро сказалось на увеличении выпуска РЛС и дополнительно вовлекло в сферу их разработок значительный круг научных, инженерных и производственных кадров». Становилось ясно, что без повышения технического уровня элементной базы и роста мощностей по ее производству, организовать выпуск радиолокационной аппаратуры в количествах, необходимых армии будет невозможно. «Для решения всех этих задач необходимо было резко увеличивать число проводимых НИОКР по созданию аппаратуры и готовить промышленность к ее выпуску. Для этого требовалась продукция той отрасли промышленности, которая в Советском Союзе практически (как именно промышленность) отсутствовала – электронной». <sup>71</sup>

В постановлении Государственного комитета обороны в частности было записано: «Возложить на Совет по радиолокации при ГОКО следующие задачи: а) подготовку проектов военно-технических заданий ГОКО для конструкторов по вопросам системы вооружения средствами радиолокации Красной Армии и Военно-Морского Флота; б) всемерное развитие радиолокационной промышленности и техники, обеспечение создания новых средств радиолокации и усовершенствования существующих типов радиолокаторов, а также обеспечение серийного выпуска промышленностью высококачественных радиолокаторов; в) привлечение к делу радиолокации наиболее крупных научных, конструкторских и инженерно-технических сил, способных двигать вперед радиолокационную технику; г) систематизацию и обобщение всех достижений науки и техники в области радиолокации, как в СССР, так и за границей, путем использования научно-технической литературы и всех источников информации; д) подготовку предложений для ГОКО по вопросам импорта средств радиолокации». <sup>72</sup>

«Постановление фактически создавало новую для страны комплексную отрасль промышленности – радиоэлектронику. Речь шла именно о создании новой отрасли как

---

<sup>70</sup> Ю. Мажоров. ЦНИИРТИ 60 лет. Страницы истории. - ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес 4/2003

<sup>71</sup> Совет по радиолокации при ГКО. - [http://www.kbpm.ru/Book/Part\\_1/07\\_Sovet\\_RadioLocation.htm](http://www.kbpm.ru/Book/Part_1/07_Sovet_RadioLocation.htm)

<sup>72</sup> В. Пролейко. О значении электроники. Военный аспект. 2005. - <http://www.electronics.ru/197.html>

единой структуры – отдельные НИИ, КБ, заводы существовали и ранее. Теперь же в одном Главном управлении наркомата электропромышленности объединялись системный радиоэлектронный институт ВНИИ-108, электро-вакуумный институт НИИ-160, проектно-конструкторское бюро ПКБ-170 (последние два образованы Постановлением), а также пять уже существующих заводов №№ 465, 747, 498, 208 и 830. Впервые были объединены два традиционных направления электроники – компоненты и аппаратура».<sup>73</sup>

Значимость и эффективность работы этого органа управления объяснялась тем, что постоянными его членами стали народные комиссары оборонных отраслей промышленности. «Заместителем председателя Совета был утвержден Аксель Иванович Берг<sup>74</sup> (см. фото<sup>75</sup> на **рис. 21**), который и осуществлял каждодневное научное и организационное руководство. До октября 1944 года Аксель Иванович, оставаясь в должности замнаркома, осуществлял и руководство всей радиопромышленностью, которая входила в Наркомат электропромышленности. В аппарате Совета постоянно работали специалисты высокого класса, их авторитет в среде советских радиоинженеров был общепризнан».<sup>76</sup>



А. И. Берг

Рис. 21

Становление радиолокации как новой области исследования в рамках радиотехники может быть охарактеризовано следующим образом. Если на стадии формирования исследовательского направления радиолокацией занимались лишь отдельные разрозненные исследовательские группы и лаборатории, то в рассматриваемый период происходит стремительный количественный рост числа исследователей и разработчиков РЛС. Разработки, которые проводились ранее,

<sup>73</sup> В. Пролейко. О значении электроники. Военный аспект. 2005. - <http://www.electronics.ru/197.html>

<sup>74</sup> Аксель Иванович Берг был наиболее знаменательной фигурой в истории радиолокации и радиотехники в целом. Он бы глубоким ученым и прекрасным администратором, действительным членом Академии наук СССР и адмиралом, заместителем председателя Совета по радиолокации, министром и в то же время директором ведущего научно-исследовательского института. Его учебник по теоретической радиотехнике был одним из первых в России: Берг А.И. Общая теория радиотехники. Ленинград, 1925. Его отец был швед, а мать итальянка. (См.: Chertok V.E. Rockets and People: Creating a Rocket Industry (Volume II) / by Boris E.(NASA History Series). Washington, DC: NASA History Division, Office of External Relations, 2006, p. 3; J. Erickson. The air defence problem and the Soviet radar programme 1934/35-1945. In: R. Burns (Ed.). RADAR Development to 1945. London: Peter Peregrinus Ltd., 1988, p. 234).

<sup>75</sup> Фото взято из: Альперович К.С. Годы работы над системой ПВО Москвы — 1950-1955. Записки инженера. М.: НПО «Алмаз», 2003, с. 4. - <http://www.vko.ru/books/006-020.pdf>

<sup>76</sup> Черток Б.Е. Ракеты и люди. 2-е изд. - М.: Машиностроение, 1999 - <http://epizodsspace.testpilot.ru/bibl/chertok/kniga-1/4-3.html>

характеризовались тем, что они осуществлялись разрозненными группами инженеров в различных странах, относительно изолированных друг от друга. С ростом их числа возникает необходимость централизованной координации проводимых ими исследований и разработок (по крайней мере в национальном масштабе).

В США уже в 1940 году организуется Научно-исследовательский комитет обороны (National Defense Research Committee = NDRC), в задачу которого входит координация исследовательской работы по механизмам и устройствам военного применения, который в 1941 году был переименован в Управление научных исследований и разработок (Office of Scientific Research and Development = OSRD). Это Управление – федеральная служба правительства США, специально созданная в мае/июне 1941 года для координации научных исследований в оборонных целях в течение Второй мировой войны и распущенной в декабре 1947 года. Оно имело почти неограниченный доступ к капиталам и ресурсам под покровительством Ванневару Буша, который бы подотчетен только лично президенту Франклину Рузвельту. В 1940 г. учреждается также Микроволновый комитет для изучения и применения микроволн в радиолокации.<sup>77</sup>

Уже постановлением о создании Совета по радиолокации предписывалось создать Всесоюзный научно-исследовательский институт радиолокации (НИИ-108 – ныне ЦНИРТИ), который и был создан в сентябре 1943 года с непосредственным подчинением Совету и директором которого стал А.И.Берг. «В 1944 году в институт перевели 29 сотрудников из ОКБ при Всесоюзном энергетическом институте, создателей первого импульсного радиолокатора П.А. Погорелко и Н.Я. Чернецова, группу ученых МГУ, академиков Б.А. Введенского и В.А. Фока, а также член-кор. АН СССР М.А. Леонтовича, доктора физ.-мат. наук С.Г. Калашникова и других специалистов-радиотехников. К 1 декабря 1944 года в институте числилось уже 542 сотрудника, из них 247 – инженерно-технического состава. ... С 1943 по 1945 годы в институте было выполнено 64 НИР и ОКР».<sup>78</sup> Таким образом в этот институт были собраны «видные ученые и инженеры, имевшие за плечами опыт научных исследований и разработок в области радиофизики и радиотехники высоких частот. Их силами велись работы в области распространения, генерирования и приема ультракоротких волн, исследовались и разрабатывались элементы радиоаппаратуры, начиная от антенных устройств и кончая источниками питания, создавалась радиоизмерительная техника, испытывались новые образцы. Шла также интенсивная работа в области электроники, а впоследствии и полупроводников». Для выработки научно-технической программы развития радиолокации было необходимо

---

<sup>77</sup> См.: Радар в США: официальная история. М.: Сов. радио, 1946. См. также: [http://en.wikipedia.org/wiki/Office\\_of\\_Scientific\\_Research\\_and\\_Development](http://en.wikipedia.org/wiki/Office_of_Scientific_Research_and_Development).

<sup>78</sup> Ю. Мажоров. ЦНИРТИ 60 лет. Страницы истории. - ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес 4/2003. «Решением Совнаркома СССР от 25 ноября 1943 года в НИИ-108 была переведена лаборатория ЛФТИ Юрия Кобзарева. Здесь же разместилось Центральное проектно-конструкторское бюро, которому поручена разработка общих систем применения радиолокационной техники». Основными задачами НИИ-108 стали: разработка образцов новых РЛС, освоение техники сантиметровых волн и разработка аппаратуры работающей на этих волнах, проведение научно-теоретических и экспериментальных работ по изучению распространения, отражения и рассеивания ультракоротких и сантиметровых волн, изучение всех процессов, происходящих в радиолокационных устройствах, и разработка теоретических основ и методов расчетов, освоение дециметровой и сантиметровой вакуумной техники (М. Первов. Зенитное ракетное оружие противозенитной обороны страны. - <http://www.aviarus-21.com/books/pvo/rus/017.htm>).

изучать зарубежный опыт. «Использовались как возможности изучения техники, поступавшей от союзников по ленд-лизу, так и работа научно-технической разведки. ... от нескольких агентов из числа инженерно-технического персонала, занимавшего руководящие должности на заводах и в лабораториях компаний RCA, Western Electric, Westinghouse, General Electric США советская разведка получила более двадцати тысяч страниц секретной документальной научно-технической информации по электронике, в том числе по новейшим в то время типам радаров, гидролокаторам, системам наводки, радиовзрывателям, компьютерам и многим другим устройствам. Были получены секретные материалы о технологии производства и образцы клистронов, магнетронов и других электровакуумных приборов. ... Материалов, полученных по открытым и закрытым каналам, было так много, что для их обработки при Совете был создан специальный отдел, после войны преобразованный в Бюро новой техники. В начале 1945 года был также создан Научно-технический совет, главной задачей которого было определять научно-техническую политику в развитии радиолокации, отвечающую, с одной стороны, нуждам армии и флота, а с другой - возможностям науки, техники и промышленности».<sup>79</sup>

К середине сороковых годов решается также задача систематической подготовки кадров для радиолокации, главным образом операторов и технического обслуживающего персонала. Были созданы кафедры радиолокации в различных высших учебных заведениях.

Ю.Б. Кобзареву, возглавившему научный отдел Совета по радиолокации при Государственном Комитете Обороны, летом 1943 года было поручено организовать в Московском энергетическом институте на Радиотехническом факультете учебную кафедру по радиолокации. Ю.Б. Кобзарев (см. фото<sup>80</sup> на **рис. 22**) – один из основоположников отечественной радиолокационной техники - заведовал этой кафедрой в 1944—55 гг. и был создателем ее центрального курса - «Теоретические основы радиолокации».<sup>81</sup> 16 декабря 1944 года была организована кафедра радиолокации в МАИ, заведующим кафедрой стал А.Г. Сайбель.<sup>82</sup> В сентябре 1945 года была организована кафедра радиолокации (сейчас - кафедра радиосистем) в ЛЭТИ – Ленинградском электротехническом институте. Первым заведующим кафедрой с 17 сентября 1945 года стал В.А. Гуров, а первый учебный план по специальности кафедры был подготовлен профессором И.В. Бреневым, который внес большой вклад в становление и развитие этой кафедры.<sup>83</sup>

---

<sup>79</sup> Совет по радиолокации при ГКО. - [http://www.kbpm.ru/Book/Part\\_1/07\\_Sovet\\_RadioLocation.htm](http://www.kbpm.ru/Book/Part_1/07_Sovet_RadioLocation.htm). «Совет по радиолокации сводил в единый план заявки заказчиков на исследования и разработки, оставляя в нем наиболее важные, одобренные Научно-техническим советом (НТС), и определял научно-техническую политику развития радиолокации, отвечающую, с одной стороны, нуждам армии и флота, а с другой – возможностям науки, техники и промышленности» (Лобанов М.М. Развитие советской радиолокационной техники. - <http://hist.rloc.ru/lobanov/index.htm>).

<sup>80</sup> «Юрий Борисович Кобзарев – один из основоположников отечественной радиолокационной техники ... С 1950 по 1960 гг. Ю.Б. Кобзарев работал начальником отдела в НИИ-20. В 1954 году в лаборатории Юрия Борисовича была разработана первая в стране когерентная радиолокационная станция дальнего обнаружения с защитой от пассивных помех (РЛС «Тропа»). РЛС находилась на вооружении армии до 1980 года ...» (фото взято также из: Кобзарев Юрий Борисович (1905-1992). <http://www.mpei.ru/lang/rus/main/aboutuniversity/science/scienceschools/radioeng/kobzarevjub.asp>).

<sup>81</sup> [http://www.hrono.ru/biograf/bio\\_k/kobzarev.html](http://www.hrono.ru/biograf/bio_k/kobzarev.html)

<sup>82</sup> <http://www.pfrmr.ru/~frela2000/h401.htm>

<sup>83</sup> <http://pc.h12.ru/?about&history>



Рис. 22

Однако действительная организация подготовки исследователей и разработчиков относится к следующему этапу развития радиолокации как самостоятельной научно-технической дисциплины.

#### 4. Радиолокация как самостоятельная научно-техническая дисциплина

К началу 1950-х гг. сформировалось целое семейство научно-технических дисциплин, ориентированных на электродинамическую картину мира. „В начале 50-х годов получил всеобщее признание термин „радиоэлектроника“ ... Радиоэлектроника объединяет комплекс многих отраслей знания, родившихся из радиотехники и электроники. К радиотехнике относят радиосвязь во всех ее видах: радиовещание, телевидение, радионавигацию, инфракрасную сигнализацию, радиоастрономию, радиометеорологию, радиоспектроскопию, радиотелемеханику, промышленную электронику, ЭВМ, электровакуумную и полупроводниковую технику и т.д.“<sup>84</sup> Именно в рамках радиоэлектроники и сформировалась радиолокация как новая научно-техническая дисциплина.

Наиболее важным достижением данного этапа является развитие специфического математического аппарата - статистической радиолокации. Потребность в создании теории радиолокации, которая устанавливала бы основные закономерности и критерии качества любых радиолокационных станций, привела к развитию вероятностного подхода к решению ее задач, к разработке на ее основе новых методов обработки и синтеза сигналов. Задача выделения сигнала в шумах является статистической и может быть решена только методами теории вероятностей. Прием сигналов стал рассматриваться как статистическая задача сначала в радиолокации, а затем и в радиотехнике. В теоретической радиолокации были сформулированы статистические критерии обнаружения, а для описания свойств радиолокационных целей стали использоваться статистические методы.<sup>85</sup>

Главный вклад в развитие статистической радиолокации внесли американский ученый К. Шэннон и советский ученый Котельников.

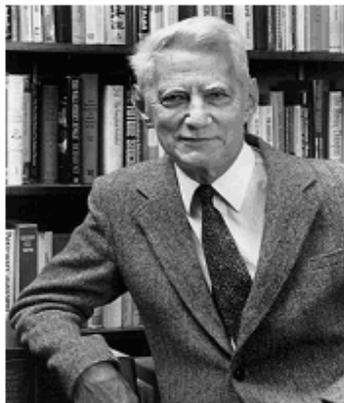
<sup>84</sup> Минц А.Л. Радиотехника, радиофизика, радиоэлектроника. В: Известия вузов, 1974, т. 18, № 5, с. 645-646

<sup>85</sup> Вопросы статистической теории радиолокации. М.: Сов. радио, 1963; Вудворт Ф.М. Теория вероятностей и теория информации с применением в радиолокации. М.: Сов. радио, 1955; Пороговые сигналы. М.: Сов. радио, 1952; Прием импульсных сигналов в присутствии шумов. М.: Госэнергоиздат, 1960; Теория информации и ее приложения. М.: Физматгиз, 1959; Котельников В. А. Теория потенциальной помехоустойчивости. М.: Госэнергоиздат, 1958; R.M. Page. The Origin of Radar. N.-Y.: Anchor books douleday and Co, 1962

**Claude Shannon**

(1916-2001)

*Father of Information Theory*



Shannon joined the mathematics department at Bell Laboratories in 1941 and remained affiliated with the Labs until 1972. He became a visiting professor at MIT in 1956, a permanent member of the faculty in 1958, and a professor emeritus in 1978.

a)

**В.А. Котельников**

(1908-2005)



профессор МЭИ, вице-президент РАН, директор Института радиотехники и электроники РАН

*«Over the years the West had its Shannon; and the East had its Kotelnikov»* (President EEEE)

b)

**Fig. 23**<sup>86</sup>

В 1948 году Шэннон опубликовал свою знаменитую книгу по математической теории коммуникаций. Свои исследования в этой области он начал с исследования фундаментальной проблемы как возможно точно или приблизительно воспроизвести в одном пункте приема сообщение, высланное из другого пункта. Построенная им теория нашла непосредственное применение у инженеров и стимулировала развитие современных коммуникационных технологий, с которыми мы связываем развитие современного информационного общества. Эта задача наиболее важное значение приобрела в связи с необходимостью отделения полезного сигнала от шума в процессе работы радиолокационных станций и обнаружения целей на фоне помех. Естественно, что многие теоретические проблемы, рассматриваемые в это время Шэнноном, были связаны с практическими задачами военного времени организации надежной и недоступной противнику связи.<sup>87</sup> Аналогичные задачи решал и В.А. Котельников в СССР. В этот период он разрабатывает методы борьбы с помехами в системах радиосвязи и вносит существенные усовершенствования в методы приема слабых сигналов. Результаты этих исследований и развитые им новые идеи в области приема радиосигналов были обобщены им еще в 1947 году в докторской диссертации, в которой были развиты ставшие классическими представления и основополагающие идеи по теории помехоустойчивости. Им было введено понятие потенциальной помехоустойчивости. «Теория потенциальной помехоустойчивости определяет предельные возможности приема сигналов при наличии

<sup>86</sup> Рис. 23 а) из: <http://www.bell-labs.com/news/2001/february/26/1.html>; а рис. 23 б) из: Ю.В. Гуляев.

Краткая научная биография В.А. Котельникова. <http://www.cplire.ru/koi/Kotelnikov/index.html>

<sup>87</sup> Кроме того «Шэннон опубликовал в 1949 году статью под названием «*Communication Theory of Secrecy Systems*». Эту работу рассматривают сегодня как основополагающую с точки зрения превращения криптологии из искусства в науку» (Claude Shannon. *Father of Information Theory*. - <http://www.bell-labs.com/news/2001/february/26/1.html>). См. также: J.J. O'Connor and E.F. Robertson Claude Elwood Shannon. - <http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Shannon.html>.

шумов, она раскрывает природу физических ограничений на чувствительность приемных устройств ... и сегодня является одним из основополагающих трудов при разработке новых помехоустойчивых средств радиосвязи, систем радиолокации, телеуправления и других радиоустройств».<sup>88</sup> В.А. Котельников был одним из первых, кто применил теорию вероятностей для решения практических задач радиолокации (например, исследования эффективности систем разнесенного приема сигналов в многолучевом канале).<sup>89</sup> «Один из фундаментальных разделов современной теории связи основан на классической работе В.А. Котельникова «Теория потенциальной помехоустойчивости». Эта работа была представлена в декабре 1946 г. в Ученый совет МЭИ в виде докторской диссертации и была успешно защищена в январе 1947 г. ... ее рукопись находилась в библиотеке НИИР с момента образования института (1949 г.)».<sup>90</sup> Но опубликована в широкой печати по-русски она была лишь в 1956 г, а по-английски – в 1959 г.<sup>91</sup> Эта работа указывала инженерам совершенно новый подход к созданию новой техники, поскольку в ней применялся новый для инженеров математический аппарат теории вероятности. Одним из ее разделов была теория оптимальной оценки параметров передаваемых сигналов. В.А. Котельниковым была показана «принципиальная возможность повышения помехоустойчивости приема сигналов без увеличения их энергии, длительности и ширины спектра. В.А. Котельников дал геометрическое толкование полученных им результатов и сделал весьма важный в теоретическом и практическом отношении вывод, что при любых видах модуляции «... чрезмерное увеличение помехоустойчивости для малых помех без увеличения удельной энергии сигнала, ширины его спектра и длительности должно обязательно сопровождаться увеличением вероятности аномальных ошибок ...».<sup>92</sup>

Таким образом, к этому времени в теоретической радиолокации сформировались два слоя взаимоскоррелированных теоретических схем, отражающих соответственно электродинамические процессы и их статистические

---

<sup>88</sup> Краткая научная биография академика В. А. Котельникова. Директор ИРЭ РАН академик Ю.В.

Гуляев. <http://www.cplire.ru/koi/Kotelnikov/index.html>

<sup>89</sup> «В.А. Котельниковым, были использованы для решения ряда важных практических задач, связанных с оценкой параметров сигналов в системах, где прием сигналов ведется по нескольким каналам. К данному классу задач относятся как радиолокационные задачи, связанные с оптимальной пространственно-временной обработкой сигналов Развитие теории оптимального приема непрерывных сигналов В. А. Котельникова» (М. А. Быховский. Развитие теории оптимального приема непрерывных сигналов В. А. Котельникова. В: Электросвязь: история и современность, №2, 2005 г., стр. 3. - <http://computer-museum.ru/galglory/koteln6.htm>).

<sup>90</sup> М.А. Быховский, П.Н. Муравчик, Е.З. Сорока, В. Н. Троицкий. В. А. Котельников и его влияние на научные исследования и разработки ученых НИИР. В: Электросвязь, №11, 2003, с. 79 - <http://computer-museum.ru/galglory/koteln4.htm>.

<sup>91</sup> Котельников В. А. Теория потенциальной помехоустойчивости. М.: Госэнергоиздат, 1956. «В 1959 г. в США был издан перевод книги В. А. Котельникова "Теория потенциальной помехоустойчивости". В рецензии на нее профессор Стенфордского университета Н. М. Абрамсон отметил приоритет Котельникова в создании теории оптимального приема сигналов, в применении методов многомерной геометрии для интерпретации проблем, связанных с приемом сигналов на фоне шума, а также в исследовании проблем нелинейной фильтрации сигналов на фоне шума с неравномерным спектром» (М.А. Быховский. Жизнь, наполненная умпостижением и действием. К 95-летию Владимира Александровича Котельникова. В: Электросвязь, №9, 2003, с. 43. - <http://computer-museum.ru/galglory/koteln3.htm>). См.: Kotel'nikov V.A. The Theory of Optimum Noise Immunity. McGraw-Hill Book Co., 1959.

<sup>92</sup> М.А. Быховский. Жизнь, наполненная умпостижением и действием. К 95-летию Владимира Александровича Котельникова. В: Электросвязь, №9, 2003, с. 43. - <http://computer-museum.ru/galglory/koteln3.htm>

модели (математические схемы). „В первом случае изучаются законы вторичного излучения конкретных излучателей в зависимости от соотношения их размеров и длины волны, поляризации облучающего поля, ориентации относительно радиолокатора, геометрической формы и материала облучаемой поверхности. Во втором случае исследуются статистические характеристики поля вторичного излучения при случайной ориентации одного или совокупности вторичных излучателей с учетом особенностей их движения. Эти характеристики существенно влияют на статистическую оценку предельной дальности изменения координат и параметров движения цели“.<sup>93</sup> Скажем, так называемая "релеевская цель", с одной стороны, представляет собой объект математической статистики (т.е. определенную математическую схему, в соответствии с которой дается классификация различных "целей"), адекватный определенному виду вероятностного распределения - распределению Релея, а с другой - имеет четкий электродинамический коррелят. „Физически такую цель можно представить в виде одного большого рефлектора, дополненного другими небольшими объектами, отраженные сигналы от которых взаимодействуют с основным отраженным сигналом, усиливая или ослабляя его. Релеевскую цель можно представить как бы состоящей из большого количества отражающих элементов сравнимых размеров“.<sup>94</sup> Точно также строятся математические модели ошибок и шумов. Скажем, „нормальный шум“ используется в качестве основной модели помехи в силу простоты его математического описания.

В рассматриваемый период в теоретической радиолокации были разработаны процедуры анализа и синтеза теоретических схем РЛС. Задача анализа качества работы различных конкретных видов радиолокационных устройств сводится к исследованию сложных процессов их функционирования при воздействии на них сигнала, смешанного с шумами и помехами. „Задача синтеза радиолокатора сводится к нахождению оптимальной с точки зрения того или иного применяемого статистического критерия математических операций над принимаемым сигналом и к построению функциональной схемы, выполняющей эти операции“.<sup>95</sup> Например, для характеристики зондирующего сигнала часто используется функция автокорреляции, которая позволяет выбрать его параметры и методы обработки. Разработка методов анализа и синтеза многопараметрических РЛС осуществляется на основе обобщенной функции неопределенности.

Примененные в радиолокации методы позволили сравнивать РЛС, отличающиеся по назначению, параметрам и конструктивному оформлению с единых позиций. С этой целью строится однородный абстрактный объект радиолокации - "идеальная РЛС", относительно которой формулируется основное

---

<sup>93</sup> Теоретические основы радиолокации. М.: Сов. радио, 1970, с. 24

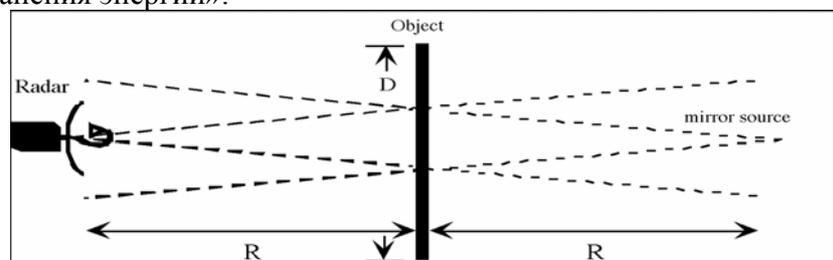
<sup>94</sup> Бартон Д. Радиолокационные системы. М.: Сов. радио, 1967, с. 32

<sup>95</sup> Вопросы статистической теории радиолокации. М.: Сов. радио, 1963, с. 3. Например, В.А. Котельниковым в его докторской диссертации «была поставлена и решена совершенно новая для теории связи проблема синтеза оптимального устройства приема (которая заключается в нахождении оптимального алгоритма обработки принимаемого сигнала), исходя из известной формы переданного сигнала и статистических характеристик воздействующих на прием шумов» (М.А. Быховский. Жизнь, наполненная умопостижением и действием. К 95-летию Владимира Александровича Котельникова. В: Электросвязь, №9, 2003, с. 43. - <http://computer-museum.ru/galglory/kotelin3.htm>).

уравнение дальности радиолокации, а также уравнения, определяющие ее рабочие характеристики. Данный шаг в развитии технической теории является очень важным.

Основное уравнение дальности радиолокации как правило сначала формулируется для точечной цели, которая является одной из важнейших идеализаций теоретической радиолокации: точечной целью называется такая цель, которая является намного меньшей, чем облучаемая радаром поверхность. Однако затем основное уравнение радиолокации формулируется относительно расширенной цели или их группы (см. **рис. 24**).

С помощью посланного от радара сигнала и/или серии сигналов может быть получена следующая информация: расстояние или дальность до цели, вектор скорости или скорость ее движения, направление движения цели<sup>96</sup>, азимут и изменение азимута во времени, размер цели и т.д. Измерение этих параметров осуществляется с помощью различных процедур. Например, дальность «измеряется по временному сдвигу между эхо-сигналом и эталонным сигналом. В качестве эталона берется маркированный сигнал от передатчика, время посылки которого запоминается в приемнике».<sup>97</sup> «Уравнение дальности РЛС «для активной радиолокации является математическим выражением таких отношений параметров РЛС, в их базисной форме, как мощность передатчика, коэффициент усиления антенны, длина волны, эффективная площадь отражения цели, расстояние до цели и выходная мощность приемника. Основное уравнение радиолокации может быть модифицировано с учетом других факторов, таких как чувствительность приемника, обработка сигнала, затухание из-за обтекателя антенны, затухание из-за атмосферных потерь или выпадения осадков, и различных иных потерь и эффектов распространения энергии».<sup>98</sup>



**Fig. 24.** «Отражение от поверхности, расширенной цели. ... Зеркальное отражение является отношением «виртуального» источника энергии к расстоянию  $R$  за пределами цели».<sup>99</sup>

Еще одной важной идеализацией в теоретической радиолокации является идеализированное представление сигнала. В импульсной РЛС вы всегда получаете искаженный выходной импульс. Теоретическая радиолокация всегда исходит из

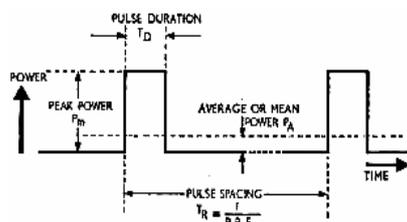
<sup>96</sup> эти три параметра являются наиболее важными и наиболее часто с их помощью оценивается информация о цели

<sup>97</sup> См.: W. Wiesbeck. Lecture Script “Radar System Engineering”. 13th Edition WS 2006/2007. Institut für Höchsthfrequenztechnik und Elektronik, Universität Karlsruhe, p. 13, 15, 19: [www.ihe.uni-karlsruhe.de](http://www.ihe.uni-karlsruhe.de)

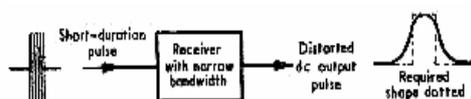
<sup>98</sup> D.K. Barton, SA. Leonov (Eds). Radar Technology Encyclopedia (Electronic Edition). Boston, London: Artech House, 1998. ISBN 0-89006-893-3

<sup>99</sup> W. Wiesbeck. Lecture Script “Radar System Engineering”. 13th Edition WS 2006/2007. Institut für Höchsthfrequenztechnik und Elektronik, Universität Karlsruhe, p. 13, 15, 19: [www.ihe.uni-karlsruhe.de](http://www.ihe.uni-karlsruhe.de)

необходимости компромисса с инженерной практикой, что вообще характерно для технических наук. «Большая дальность действия РЛС является несовместимой с ее хорошей разрешающей способностью по дальности, высокой точностью и высокой скоростью сканирования. Крутизна и малая длительность импульса являются необходимыми, но это одновременно означает увеличение ширины полосы пропускания и возрастания фактора шума. Если же сузить полосу пропускания, то приведет к искажению импульса. Все эти конфликтующие между собой требования рассматриваются в процессе проектирования РЛС. В результате РЛС, спроектированная для выполнения одной роли, имеет мало ценности для исполнения другой. Каждое приложение требует различных вариаций всех изменяемых факторов ...» Форма сигнала, показанная на **рис. 25**, является «идеальной», т.е. имеет нулевое время нарастания и затухания. На практике любой импульс имеет несколько закругленную форму, поскольку у него конечное время нарастания и затухания» (см. **рис. 26**). Однако идеальная форма сигнала является адекватной для целей теоретического представления и проведения математических расчетов.<sup>100</sup>

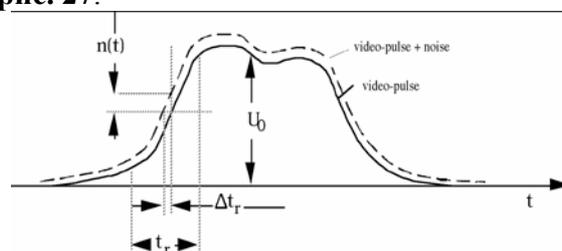


**Рис. 25.** Идеальная форма сигнала («идеальный импульс»).



**Рис. 26.** Реальный импульс имеет несколько закругленную форму сигнала.

Но уже в теории радиолокации очень важно рассчитывать шумы радиоприемника (термический или омический шум его электрических цепей, космические и фоновые шумы в форме плоской волны из космического пространства, атмосферное поглощение и промышленные шумы). «Для расчета точности измерения дальности гармоническую волну заменяют видеоимпульсом», как это показано на **рис. 27**.<sup>101</sup>



**Рис. 27.** Видеоимпульс (video-pulse) и вносимый шум (noise)

<sup>100</sup> Radar Theory. - <http://www.radarpages.co.uk/theory/ap3302/sec1/ch3/sec1ch340.htm>

<sup>101</sup> W. Wiesbeck. Lecture Script “Radar System Engineering”. 13th Edition WS 2006/2007. Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik, Universität Karlsruhe, p. 25: [www.ihe.uni-karlsruhe.de](http://www.ihe.uni-karlsruhe.de)

Принимая во внимание различные потери, имеющие место в реальных условиях, такого рода базовые математические представления (математические расчеты для идеальной РЛС) дают возможность быстро оценить параметры существующих РЛС и дать их операционное описание, чтобы различить в ней фиксированное количество стандартных блоков (умножитель частоты, интегратор, пороговое устройство, согласованный фильтр, временной селектор и др.), соответствующие определенным математическим операциям.<sup>102</sup> Все эти блоки являются в то же самое время операциями над сигналом (в данном случае импульсной формы). На **рис. 28** показаны виды сигналов, получающихся на выходе соответственно (1) временного селектора, одновременно направляющего синхронизирующий импульс на индикаторное устройство – слева внизу, (2) модулятора<sup>103</sup> и (3) генератора, направляющего модулированный импульс к антенне.

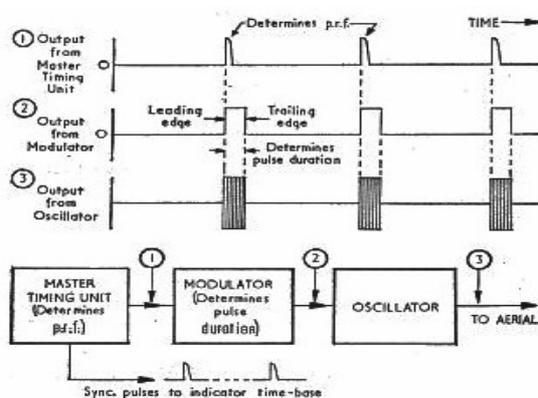


Рис. 28

В соответствии с правилами, разработанными в теории радиолокации, эти блоки могут быть использованы для построения различных структурных схем РЛС и могут быть реализованы в самых разнообразных типах реальных радиолокационных станций (см., например, такую структурную схему на **рис. 28 а и 28 б**).<sup>104</sup> Блоки общей структурной схемы РЛС могут быть реализованы по-разному, но выполняют одну и ту же функцию.

<sup>102</sup> Обработка сигнала с целью получения требуемых данных о цели является одной из важнейших функций любых РЛС и включает в себя целый ряд таких основных операций над сигналом, как детектирование, измерение и распознавание. «Элементы РЛС, выполняющие эти операции получили наименование процессора обработки сигналов» (D.K. Barton, S.A. Leonov (Eds). Radar Technology Encyclopedia (Electronic Edition). Boston, London: Artech House, 1998).

<sup>103</sup> «Из-за высокой скорости переключения (несколько сотен импульсов в секунду) и очень короткого временного интервала между ними ... работа передатчика не может управляться нормальными переключателями или реле». Для этой цели и используется специальная электронная схема, называемая модулятором, продуцирующая импульсы регулируемой длительности, которые повторяются через точные интервалы времени, задаваемые синхронизирующим устройством, и используются для того, чтобы включать и выключать передатчик. (См.: Radar Theory. - <http://www.radarpages.co.uk/theory/ap3302/sec1/reqpmr/reqpmr23.htm>)

<sup>104</sup> С.П. Лукьянов. Исследование помехоустойчивости алгоритмов обработки поляризованно-манипулированных радиолокационных сигналов с помощью устройств череспериодной компенсации. В: Журнал радиоэлектроники, 2001, № 1. - <http://jre.cplire.ru/mac/jan01/3/text.html>

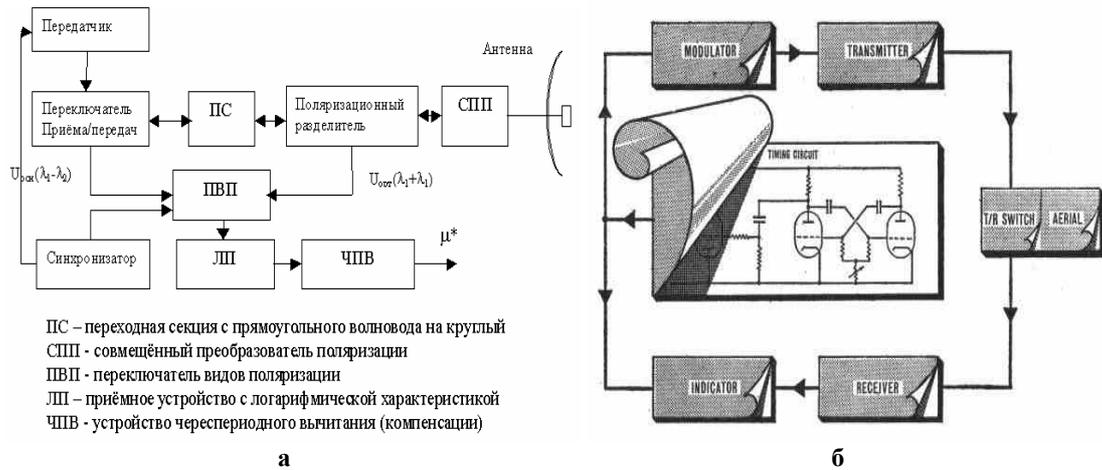


Рис. 28

На рис. 28 б наглядно показан переход от блочной структуры радиолокационной системы (включающей стандартный набор блоков – модулятор, передатчик, приемник, индикатор, антенный переключатель и синхронизатор) к реализующим их электрическим цепям. В РЛС используются самые различные типы электронных схем.

Например, генератор линейно изменяющегося ( пилообразного) напряжения, который применяют в частности для развертки электронного луча в электроннолучевых трубках радиолокационных устройств, может быть выполнен в виде простейшей схемы (рис. 29 а), состоящей из конденсатора С и сопротивлений  $R_2$  (через которое конденсатор заряжается при разомкнутом ключе К) и  $R_p$  (через которое конденсатор разряжается при замкнутом ключе К), или же на транзисторах (рис. 29 б).

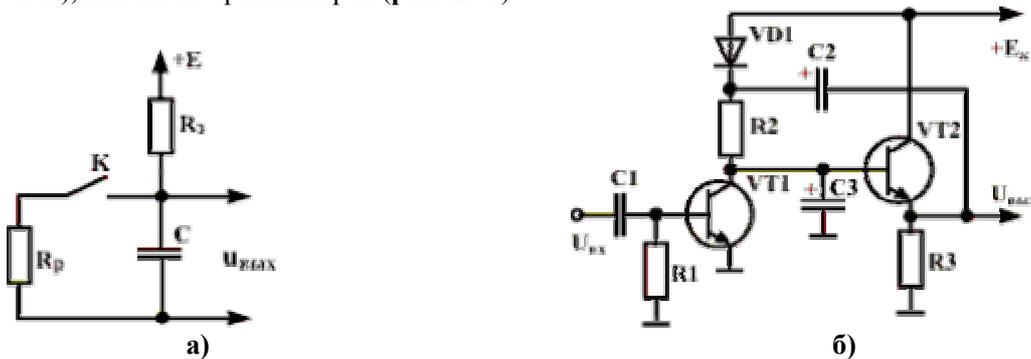
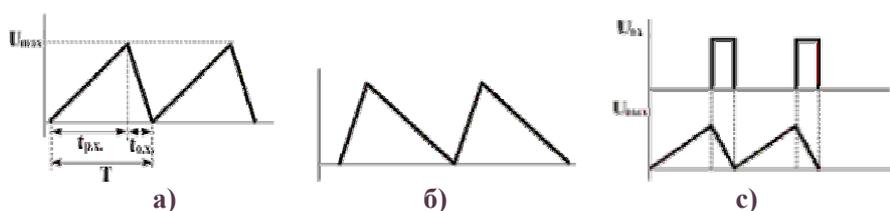


Рис. 29. Генератор пилообразного напряжения а) простейший и б) на транзисторах

«Принцип получения пилообразного напряжения заключается в медленном заряде (или разряде) конденсатора через большое сопротивление во время прямого хода и в быстром его разряде (или заряде) через малое сопротивление во время обратного хода. ... Пилообразное напряжение может быть линейно нарастающим (рис. 30 а) или линейно падающим (рис. 30 б).



**Рис. 30.** Линейно изменяющееся нарастающее (а) и падающее (б) напряжение

Схема на **рис. 29 а)** не позволяет получить напряжения высокой линейности, поскольку повышение напряжения на конденсаторе уменьшает зарядный ток. Чтобы получить его и строится схема на транзисторах (**рис. 29 б**). Транзистор VT1 представляет собой электронный ключ, который «управляется импульсами положительной полярности, а транзистор VT2» является следящей связью. «В исходном состоянии, когда на входе отсутствует прямоугольный импульс, транзистор VT1 закрыт и конденсатор С3 заряжается» и формируется рабочий ход пилообразного напряжения. «При воздействии входного импульса транзистор VT1 открывается и конденсатор С3 быстро через него разряжается. Формируется обратный ход пилообразного напряжения» (**рис. 30 в**).<sup>105</sup>

Рассматриваемый этап развития радиолокации может быть охарактеризован следующими показателями. Прежде всего в 1950-е годы наблюдается стремительный рост литературы по радиолокации: выходит в свет целый ряд учебников и монографий, в которых развиваются ее теоретические основы. Налаживается планомерная и систематическая подготовка специалистов - разработчиков и исследователей - в данной области. В то же время уже организованы не только специальные курсы по радиолокации, но и специальные кафедры в технических вузах.

Радиолокация формируется как новая научно-техническая дисциплина, тесно связанная с нуждами и запросами инженерной практики и промышленного производства. На этом этапе происходит расширение сферы применения радиолокации не только в военной технике, но в радионавигации, радиоастрономии, для решения геодезических задач и т.д. В самой же радиолокации все более четко выделяются отдельные области исследования: активная и пассивная локация, анализ радиолокационных сигналов и разработка систем автоматического управления РЛС и другие. Кроме того, развитие радиолокации стимулировало появление некоторых смежных научно-технических дисциплин. Например, теория антенно-фидерных устройств получила новое развитие в связи с возникновением радиолокации. Радиолокация способствовала также быстрому и массовому распространению телевидения.

<sup>105</sup> <http://naf-st.ru/main/generator/?glin>