

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

РАДАР

Н. Н. Малов

Громадную роль в успешном развитии крупнейших бомбардировочных рейдов, в охране собственной территории от вражеских самолётов, в обеспечении относительной безопасности морских коммуникаций сыграло применение радиотехнических методов для обнаружения вражеских самолётов, точного определения их местоположения, повышения точности огня зенитной артиллерии, достижения исключительной точности прицельного бомбометания, корректировки стрельбы военно-морского флота и ряда других важных операций.

Выполнение всех этих задач потребовало создания новой отрасли радиотехники — радиолокации; аппараты, применяющиеся при этом, получили в последнее время название радаров (начальные буквы слов «Radio Detection and Ranging», т. е. «обнаруживание и определение расстояния при помощи радио»). О масштабах производства радиолокационной аппаратуры можно судить по данным, приведённым в журнале «Electronics», согласно которым до 1 июля 1945 г. только США «израсходовали на производство радаров 2,7 миллиарда долларов и половину этой суммы на их использование».

По понятным причинам во время войны не было почти никакой информации широких слоёв населения по этим вопросам. Но в ряде последних номеров иностранных научно-технических и популярных журналов ¹⁻⁵ появились статьи, посвящённые радарам (см. список части литературы в конце статьи), которые и использованы в настоящем обзоре, написанном в марте 1946 г. и, естественно, ни в какой мере не претендующем на полноту освещения техники радаров, справедливо называемых некоторыми авторами «чудом нашего времени».

1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАДИОЛОКАЦИИ

Основная идея радиолокации исключительно проста: если электромагнитная волна, посланная в атмосферу, встретит на своём пути самолёт, то она будет им частично рассеяна; отражаемая самолётом энергия может быть воспринята соответствующим приёмником. Радио-

¹ УФН, т. XXIX, вып. 1—2

технический метод обнаруживания самолёта может иметь (и фактически имеет) ряд преимуществ по сравнению с прежними методами — световыми прожекторами и звукоулавливателями. Световые прожекторы имеют ограниченный радиус действия, весьма сокращающийся в туманную погоду; они совершенно неэффективны при облачной погоде; лётчик видит прожектор, может стараться избежать его луча и, во всяком случае, знает, что он обнаружен, попадая в сферу действия луча. Звукоулавливатели также имеют ограниченный радиус действия; эксплуатация их осложняется наличием посторонних шумов, неизбежных в боевых условиях, и трудностью отличать шумы вражеских самолётов от собственных. При массированных налётах и современных скоростях самолётов они оказываются почти непригодными.

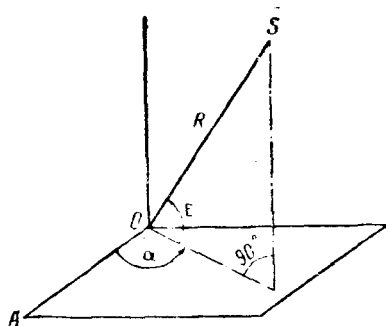


Рис. 1.

Помимо простого обнаруживания самолёта S в воздухе, радиолокационная установка должна обеспечить возможность точного определения его координат, т. е. азимута α (рис. 1), отсчитываемого от некоторого фиксированного направления OA (в точке O находится

наблюдатель), так называемого угла места ϵ , определяющего высоту полёта, и наклонной дальности R (при локации военно-морских судов задача упрощается, так как $\epsilon = 0$).

Эти задачи решаются путём использования направленных антенн и излучения в пространство не непрерывной волны, но весьма кратковременных импульсов, длительность которых (а также разделяющих их пауз) определяется прежде всего тем радиусом, на который рассчитан радар. Так как отражённая от самолёта и достигающая приёмника энергия составляет ничтожно малую долю посылаемой энергии (так, при радиусе действия 150 км она не превышает 10^{-17} части излученной энергии), то в момент регистрации отражённого импульса излучение передатчика должно отсутствовать. С другой стороны, чтобы не создались ошибки, отражённый импульс должен вернуться к приёмнику до излучения следующего импульса. Таким образом, продолжительность паузы между импульсами для радара с радиусом действия R км должна удовлетворять условию

$$\tau \geq \frac{2R}{c}, \quad (1)$$

где c — скорость света.

Что касается самого импульса, то он должен закончиться, прежде чем возвратится сигнал, отражённый от самолёта, находящегося на

минимальном расстоянии $R_{\min}$, так что длительность импульса должна удовлетворять условию:

$$\tau_1 < \frac{2R_{\min}}{c}. \quad (2)$$

Фактически интервал времени, в течение которого приём отражённого сигнала невозможен, превышает длительность импульса излучения из-за наличия в приёмнике неустойчивых процессов, длящихся после прекращения импульса некоторый промежуток времени, зависящий от добротности контуров приёмника. Очевидно, τ и τ_1 составляют (учитывая громадную величину скорости света) ничтожные доли секунды. Так, в американских радарх SCR-268, находившихся на вооружении до 1944 г., продолжительность импульса составляет 5 микросекунд, длительность паузы — 235 микросекунд при радиусе действия радара около 40 км и $R_{\min} \approx 2,5$ км.

Так как доля энергии, отражаемая самолётом, исчезающе мала, то сам импульс должен обладать весьма значительной мощностью, а приёмное устройство громадной чувствительностью. Необходимость же иметь направленное излучение заставляет стремиться к возможно высоким частотам колебаний.

Некоторое представление о выборе параметров, характеризующих радар, могут дать следующие рассуждения. Пусть излучатель, равномерно излучающий по всем направлениям, излучает импульсы мощности P ватт. На мишень, удалённую на R метров от излучателя, попадёт поток энергии плотности

$$S = \frac{P}{4\pi R^2} \text{ ватт/м}^2.$$

Так как практические излучатели имеют направленное действие, то, предполагая, что мишень находится в направлении максимального излучения, получаем для фактического потока энергии

$$S_1 = SG_0,$$

где G_0 — так называемый коэффициент усиления, определяющий, во сколько раз энергия, проходящая через элемент площади, расположенной в направлении максимального излучения, превышает поток, который получился бы от равномерно излучающего излучателя при равной суммарной мощности излучения. Этот коэффициент в радарных антеннах колеблется от 100 до 1200. Таким образом, например, передатчик направленного действия с $G_0 = 500$ и мощностью 100 кВт эквивалентен равномерно излучающему передатчику с мощностью 50 000 кВт.

Мишень, отражающая волну, эквивалентна новому излучателю, мощность которого есть σS_1 ватт, где σ — множитель, зависящий от

размеров и формы отражающей поверхности. Конечно, мишень рассеивает энергию в различных направлениях различно, но ради простоты будем понимать под σ усреднённое значение для равномерно рассеивающего отражателя. Рассеянная волна, проходя к приёмнику, расположенному рядом с передатчиком, имеет плотность потока энергии

$$S_2 = \frac{\sigma S_1}{4\pi R^2} = G_0 \sigma \frac{P}{16\pi^2 R^4} \text{ ватт/м}^2.$$

Если приёмная антенна имеет эквивалентную поверхность $A_2 \text{ м}^2$, то она поглотит мощность

$$P_2 = A_2 S_2 \text{ ватт.}$$

Для антенн, выполненных в виде рефлекторов, имеющих в качестве входного отверстия круг диаметра D метров и питающих диполь, установленный в фокальной плоскости, имеем

$$A_2 = \frac{\pi D^2}{4} \text{ м}^2.$$

Известно, что для подобной антенны усиление $G_2 = \frac{4\pi A_2}{\lambda^2}$, где λ — длина волны, используемой при работе антенны. Если допустить, что передача и приём ведутся на одну и ту же антенну, то, задав минимальную допустимую мощность приёма $P_2 = P_{\min}$, получим из предыдущих уравнений следующее выражение для максимальной дальности действия радара:

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{PA_2^2\sigma}{P_{\min}4\pi\lambda^2}}.$$

Это выражение свидетельствует о том, что при заданных размерах антенны выгодно уменьшать длину волны.

Если же ввести в рассмотрение ширину излучаемого пучка b , т. е. угол между направлениями, в которых излучается соответственно максимальная энергия и энергия, составляющая 50% максимальной, то, как показывает расчёт (при достаточно узких пучках)

$$b \approx \frac{\lambda}{D},$$

и для радиуса действия получаем

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P\pi\sigma\lambda^2}{P_{\min}64b^4}}.$$

так что при заданной ширине пучка предпочтительнее работать на

длинных волнах; но разумеется, размеры антенн, обладающих диаграммами одинаковой ширины, увеличиваются при удлинении волны.

Минимальная мощность приёма определяется уровнем шумов, возникающих в приёмнике, главным образом, благодаря флуктуациям; расчёт показывает, что должно выполняться неравенство

$$P_{\min} \geq n \cdot k \cdot T \cdot \Delta f \text{ ватт,}$$

где k — постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{ватт. сек}}{\text{градус}}$, T — абсолютная температура, n — множитель, характеризующий шумы, Δf — ширина полосы частот, пропускаемой приёмником.

Оптимальное отношение сигнал/шум для интересующего нас случая приёма электромагнитных импульсов получается при соблюдении условия

$$\Delta f = \frac{1}{\tau_1},$$

где τ_1 — продолжительность импульса. Учитывая это обстоятельство, получаем

$$R_{\max} \leq \sqrt[4]{\frac{P \tau_1 \sigma A^2}{4 \pi n k T \lambda^2}}. \quad (3)$$

Но $P \tau_1$ равно энергии импульса, которая, таким образом, определяет максимальный радиус действия. Так как при больших радиусах действия τ_1 может быть увеличено, то радары дальнего действия по мощности не очень отличаются от радаров ближнего действия.

Из последнего соотношения следует также, что простое увеличение мощности не даёт значительного роста радиуса действия; так увеличение мощности вдвое увеличивает радиус действия только на 19%.

Из уравнения (3) легко получается интересное следствие. Связь между максимальным радиусом действия радара и эквивалентной величиной, отражающей поверхность σ для двух различных по размерам объектов, очевидно, такова:

$$\frac{R_1}{R_2} = \sqrt[4]{\frac{\sigma_1}{\sigma_2}},$$

где индексы 1 и 2 относятся соответственно к первому и второму объекту.

Если принять для самолёта $R_2 = 300 \text{ км}$ и $\sigma_2 = 5 \text{ м}^2$, то объект, находящийся на расстоянии $R_1 = 400 \cdot 10^3 \text{ км}$, может быть обнаружен, если его эквивалентная отражающая поверхность будет равна:

$$\sigma_1 = \sigma_2 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^4 = 15,8 \cdot 10^{12} \text{ м}^2.$$

Считая отражающую поверхность кругом, получаем для её радиуса ρ величину

$$\rho = \sqrt{\frac{c_1}{\pi}} = 2.24 \cdot 10^6 \text{ м} = 2240 \text{ км},$$

что довольно близко совпадает с радиусом Луны (1739 км), находящейся на несколько меньшем расстоянии от Земли (384 400 км). Таким образом, можно надеяться измерить расстояние до Луны, пользуясь существующими радарам. Дальность их действия может быть увеличена за счёт удлинения продолжительности импульсов; так как время запаздывания отражённого сигнала в этом случае будет порядка 2 секунд, то частота импульсов также должна быть значительно уменьшена (см. уравнение 1), а поэтому перегрузки генератора не получатся.

Действительно, зимой 1945—1946 гг. американцы сообщили, что им удалось «обнаружить» Луну при помощи радара и измерить расстояние до неё с точностью, не уступающей астрономическим измерениям. Если произвести аналогичный ориентировочный расчёт для тела, находящегося на расстоянии $150 \cdot 10^6$ км, то оказывается, что можно надеяться обнаружить тело, радиус которого превышает радиус Солнца примерно в 50 раз; поэтому радиолокация Солнца едва ли может быть произведена в настоящее время.

Импульсные генераторы получили широкое применение при исследованиях ионосферы, являющихся по существу также радиолокационными исследованиями. Однако, ионосферная радиотехника оказалась недостаточной для решения задач военной радиолокации, потребовавшей значительного усовершенствования имевшихся ионосферных установок в отношении повышения мощности импульсов, улучшения направленности антенны, значительного увеличения частоты колебания и чувствительности приёмных устройств. Прекрасной иллюстрацией исключительной чувствительности современных приёмных устройств является недавнее сообщение⁶ одного из виднейших американских исследователей в области микроволн Саусворта о том, что ему удалось обнаружить излучение Солнца в области сантиметровых волн (между 1 и 10 см), причём одно из трёх измеренных значений энергии излучения очень хорошо совпало со значением, рассчитанным по формуле излучения Планка (если уподобить Солнце чёрному телу с температурой 6000°), а два других отличались от теоретического значения на 12 и 80% соответственно.

Детали измерений Саусвортом не сообщаются. Но если учесть, что энергия излучения в том диапазоне, где производились эти измерения, почти в миллиард раз меньше, чем в области частот, соответствующих максимальному излучению Солнца, то можно оценить исключительную чувствительность использованной им аппаратуры, которая, повидимому, способна зарегистрировать мощность порядка 10^{-15} ватт.

Задача определения расстояния до самолёта является наиболее простой. Решение её осуществляется схемой рис. 2.

Передатчик излучает импульсы, частота повторения и продолжительность которых регулируется датчиком времени, одновременно подающим на пластины конденсатора электронного осциллоскопа напряжение, линейно меняющееся со временем и смещающее электронный луч по горизонтали. Отражённый от самолёта импульс, пройдя через приёмное устройство, создаёт импульс напряжения на пластинах второго конденсатора осциллоскопа, отклоняющего электронный луч по вертикали. В результате на экране получаются два импульса (рис. 3) — от непосредственно пришедшего и отражённого сигналов. Расстояние между ними определяет время запаздывания отражённого импульса, и, следовательно, расстояние до самолёта. Шкала осциллоскопа может быть проградуирована прямо в километрах расстояния до самолёта.

Для более точного определения расстояния эта простая схема нуждается в усовершенствованиях, дающих весьма значительный эффект.

Одним из простейших весьма эффективных способов повышения точности измерения дальности является следующий: на пластины конденсатора, создающего горизонтальную развёртку, кроме напряжения, пропорционального времени, подаётся постоянное напряжение, позволяющее смещать влево всю линию развёртки. Величина этого напряжения может изменяться непрерывно. Полученный на экране осциллоскопа отражённый сигнал смещают, пользуясь указанным постоянным напряжением, до совмещения с визирной нитью, натянутой перед экраном. Величина смещающего напряжения зависит от величины запаздывания отражённого сигнала, и положения регулировочной ручки могут быть проградуированы прямо в километрах расстояния до цели.

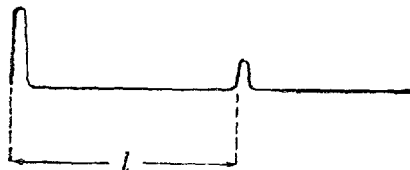


Рис. 3.

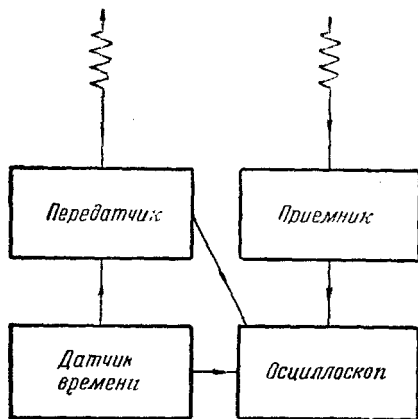


Рис. 2.

Величина этого напряжения может изменяться непрерывно. Полученный на экране осциллоскопа отражённый сигнал смещают, пользуясь указанным постоянным напряжением, до совмещения с визирной нитью, натянутой перед экраном. Величина смещающего напряжения зависит от величины запаздывания отражённого сигнала, и положения регулировочной ручки могут быть проградуированы прямо в километрах расстояния до цели.

Определение азимута является более сложной задачей. Так как приёмная антенна обладает направленным действием, характеризующимся полярной диаграммой рис. 4,а, то в простейшем случае оператор вра-

Определение азимута является более сложной задачей. Так как приёмная антенна обладает направленным действием, характеризующимся полярной диаграммой рис. 4,а, то в простейшем случае оператор вра-

щает её до тех пор, пока отражённый самолётом сигнал, наблюдаемый на экране осциллоскопа, не станет наиболее интенсивным. Тогда самолёт находится в направлении OB . Но, поскольку при не слишком коротких волнах ширина диаграммы, т. е. величина угла между максимальным и половинным значением поля излучения (или энергии) довольно велика (β на рис. 4, *a*), точность подобного определения недостаточна. Повышение её возможно различными способами. При наличии двух одинаковых приёмных антенн, оси которых образуют некоторый угол (рис. 4, *b*), применяется автоматический переключатель, подающий на осциллоскоп попеременно напряжение от той и другой антенны и несколько сдвигающий (при одном из переключений) фазу развёртывающегося по горизонтали напряжения. Так как импульсы следуют друг за другом очень часто (в указанном выше радаре число импульсов в секунду равно 4100), то оператор видит на экране осциллоскопа сразу оба расположенные почти рядом отклонения луча, вызванные обеими антеннами.

В случае рис. 4, *b* самолёт находится в направлении OB , правая антенна принимает более сильный импульс (пропорциональный отрезку OF), чем левая (отрезок OG). При вращении антенн вокруг

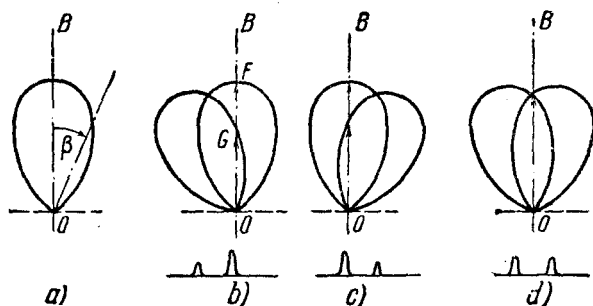


Рис. 4.

вертикальной оси до положения, соответствующего рис. 4, *c*, более сильный импульс будет принят левой антенной. Если же антенны будут установлены так, что оба импульса сравняются, то, очевидно, самолёт будет находиться в направлении OB (рис. 4, *d*). Точность этой установки значительно выше, чем в случае одной антенны.

При сравнительно низких частотах антенны получаются громоздкими, и вращать их трудно. В этом случае определение азимута возможно по принципу радиогониометра.

Радиогониометр в принципе представляет плоскую катушку, вращаемую вокруг оси. Интенсивность приёма подобной катушки имеет максимум, если её плоскость совпадает с направлением распространения радиоволны (так как при этом в сторонах катушки, параллель-

ных вектору электрического поля, наводятся встречные эдс, сдвинутые по фазе на угол, соответствующий расстоянию между этими сторонами). Если же плоскость катушки располагается параллельно волновому фронту, то разность фаз исчезнет и сумма наведённых эдс обращается в нуль. Обычно ориентировка и ведётся по минимуму интенсивности приёма. Для повышения надёжности измерения и увеличения чувствительности приёма пользуются антеннами, расположенными в горизонтальной плоскости во взаимноперпендикулярных направлениях; принятые ими сигналы усиливаются и подводятся к радиогониометру.

Аналогичным способом может быть определён и угол места; впрочем, его определение на больших расстояниях представляет значительные трудности, так как при больших расстояниях значение угла места, очевидно, невелико, а волна, отражённая самолётом, может достигать приёмника как непосредственно, так и путём отражения от поверхности Земли, что может создавать ошибки, если это обстоятельство не учитывается.

В новейших радарх описанная методика значительно усовершенствована и даёт превосходные результаты. Так, например, в некоторых американских радарх для упрощения конструкции антенна, определяющая направление, разделена на две части A , B (рис. 5, a), соединённые фазорегулятором F

(линия, длина которой меньше половины длины рабочей волны). Сигнал принимается поочерёдно с каждой половины антенны, что достигается применением переключателя, работающего с числом переключений, равным числу излучаемых в секунду импульсов. При снятии сигнала с части A антенны сигнал, принятый частью B , запаздывает на некоторый промежуток времени T , который эквивалентен запаздыванию, получающемуся в том случае, если фазорегулятор отсутствует (рис. 5, b), но антенна образует с фронтом приходящей волны некоторый пространственный угол α , благодаря чему часть B возбуждается позже, чем A на промежуток времени, потребный на прохождение волной отрезка l .

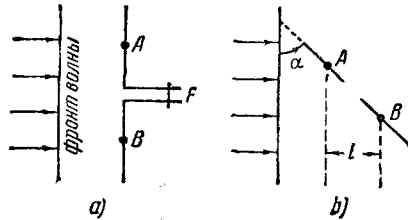


Рис. 5.

При переключении роли антенн меняются, что эквивалентно повороту антенны (без фазорегулятора) в противоположном направлении на тот же самый угол.

Благодаря большой частоте переключений на экране осциллоскопа видны сразу оба принимаемых сигнала, интенсивность которых уравнивается оператором путём вращения антенны.

Меняя длину фазорегулятора, можно изменять угол 2α между осями антенн, что также представляет известные преимущества.

2. РАДАРЫ ДАЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

Радары дальнего действия (станции обнаруживания) предназначены для обнаруживания врага на больших расстояниях, что даёт возможность заблаговременно привести в действие противовоздушную оборону. Поскольку они не должны корректировать стрельбу, точность определения дальности и азимута не должна быть очень значительной. Угол места может вообще не определяться (по крайней мере, при больших дальностях).

В США радары дальнего действия начали конструироваться после освоения радаров ближнего действия (станций орудийной наводки), примерно с 1938 г. Поэтому налаживание производства было прове-

дено в рекордные сроки; от изготовления лабораторной модели до начала серийного производства, поставленного фирмой Вестингауз при участии ряда крупнейших радио- и электротехнических фирм, прошло всего 6 месяцев. К моменту нападения японцев на Пирл-Харбор было выпущено 112 радаров, а общий их выпуск достиг 788 штук.

Радар дальнего действия SCR-270/271 состоит из импульсного передатчика мощностью 100—300 kW, работающего на волне 2,70 м; передатчик излучает 621 импульс в секунду; продолжительность импульса составляет от 10 до 30 микросекунд. Передача и приём ведутся на общую антенну, диаграмма излучения кото-

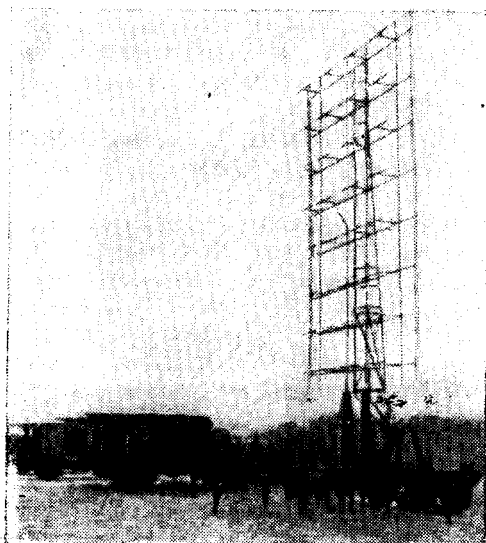


Рис. 6. Общий вид подвижного радара SCR-270/271.

рой имеет ширину 28° (в горизонтальной плоскости) и 10° (в вертикальной). Антенна вращается вокруг вертикальной оси, совершая 6 оборотов в минуту и давая возможность производить круговой обзор местности. Дальность действия радара составляет почти 200 км для бомбардировщиков и около 130 км для истребителей.

Точность определения расстояния составляет 5—7 км, азимут определяется с точностью до 4° .

Общий вид подвижной модели этого радара изображён на рис. 6, на котором хорошо видна вращающаяся антенна, установленная на

повозке. Слева расположен грузовик с силовой установкой и второй грузовик, где помещается оператор с осциллоскопом.

Стационарный радар SCR-271-D, отличающийся от предыдущего более совершенной системой наблюдения (так называемая развёртка кругового обзора, см. ниже), изображён на рис. 7. Антенна, установленная на 35-метровой башне, также вращается вокруг вертикальной оси. На верху башни заметна так называемая опознавательная антенна, позволяющая отличать свой самолёт от вражеского. На своих самолётах устанавливается маленький передатчик, автоматически приводимый в действие сигналом радара, попадающим в самолёт, и излучающий при этом кодированные сигналы, воспринимаемые на радарной установке; эти сигналы, называемые нормальными, позволяют наземным операторам отличать свои самолёты от вражеских. В случае повреждения самолёта тот же передатчик передает другой тип сигнала — сигнал бедствия, привлекающий внимание наземных станций к терпящему бедствие самолёту.

В отличие от американцев, англичане начали работать по радарам с установок дальнего действия. Они пользовались стационарными довольно громоздкими установками, получившими название СН-станций (chain home — ограда), установленными по побережью. Одна из подобных станций изображена на рис. 8. Определение азимута производилось при помощи радиогониометра; для определения высоты полёта была использована интерференция волн, отражаемых самолётом и достигающих приёмной антенны двумя путями: одна волна приходит непосредственно от самолёта, другая же претерпевает ещё отражение от поверхности моря. Сравнивая интерференционные картины, принятые двумя антеннами, расположенными на различной высоте, можно измерить высоту самолёта, находящегося на расстоянии 100 км с точностью до 500 метров. На больших расстояниях измерение делается ненадёжным; полный радиус действия СН-станции достигает 170 км, а точность определения азимута — 2° .

Однако, эти станции не давали возможности ловить самолёты, летящие очень низко. Дело в том, что интенсивность приёма сигнала, отражаемого от Земли, пропорциональна квадрату произведения вы-



Рис. 7. Стационарный радар SCR-271-D.

соты антенны на высоту полёта самолёта и обратно пропорциональна квадрату длины волны, а длина волны СН-станций была довольно значительна.

Практически оказалось возможным использовать СН-станции для обнаружения самолётов, летящих на высоте от 150 до 5000 м.

Специальные устройства, позволявшие выделять отдельные отражённые сигналы из общей их массы, давали возможность опре-

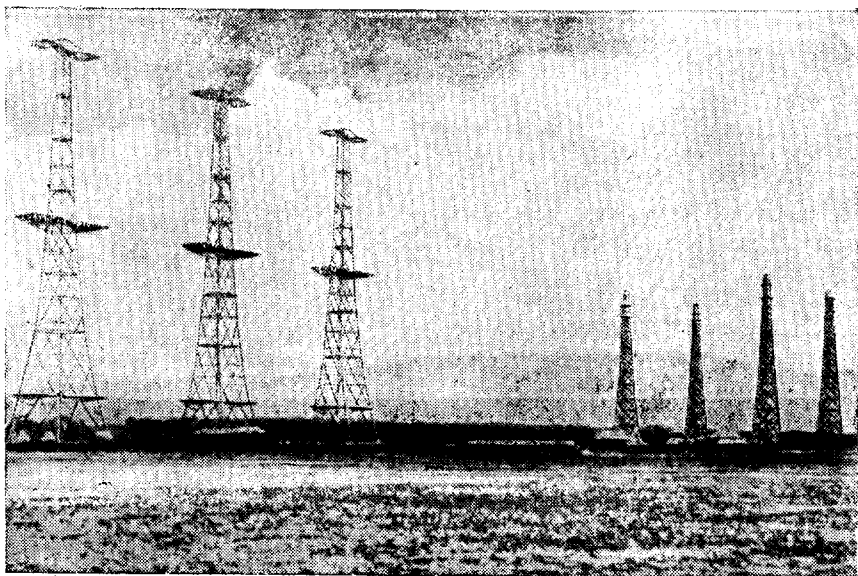


Рис. 8. Стационарная радарная СН-станция.

делять общее число самолётов даже при массированных налётах, в которых участвовало 100—150 машин, с точностью до 10^{0/10} их числа.

В период Мюнхенского соглашения (сентябрь 1938 г.) радарная защита английских берегов находилась в зачаточном состоянии — только район Лондона был снабжён радаром, сфера действия которых показана прямой штриховкой на рис. 9,а. К сентябрю 1939 г. сеть СН-радаров охватила всё восточное побережье Англии; в разгар битвы за Британию (сентябрь 1940 г.) она была распространена на северо-запад и юго-запад и дополнена сетью радаров СНЛ, работающих на повышенной частоте и позволявших ловить низко летящие самолёты. К сентябрю 1941 г. Британские острова были защищены со всех сторон двойной «оградой», изображённой на рис. 9,б, где «ограда» СН-радаров показана прямой штриховкой (внешняя ограда), а станций СНЛ — перекрестной штриховкой (внутренний пояс обороны).

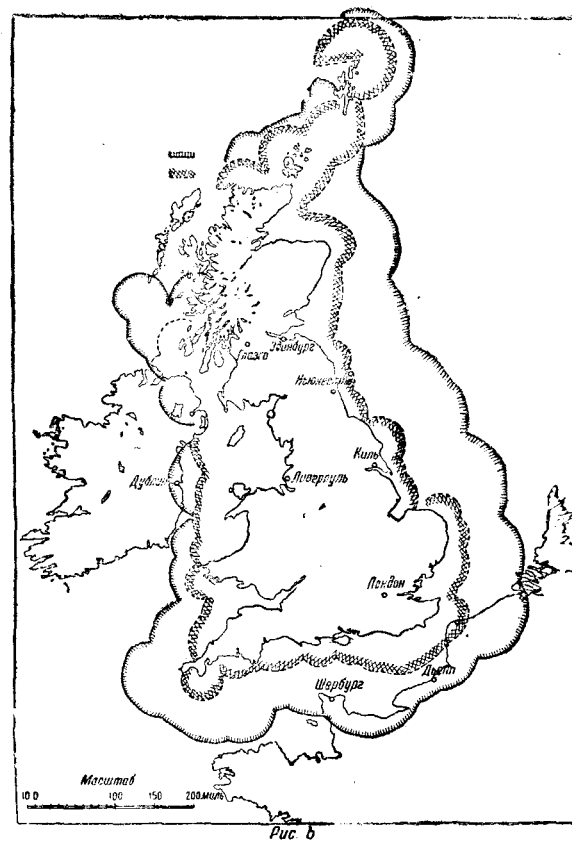
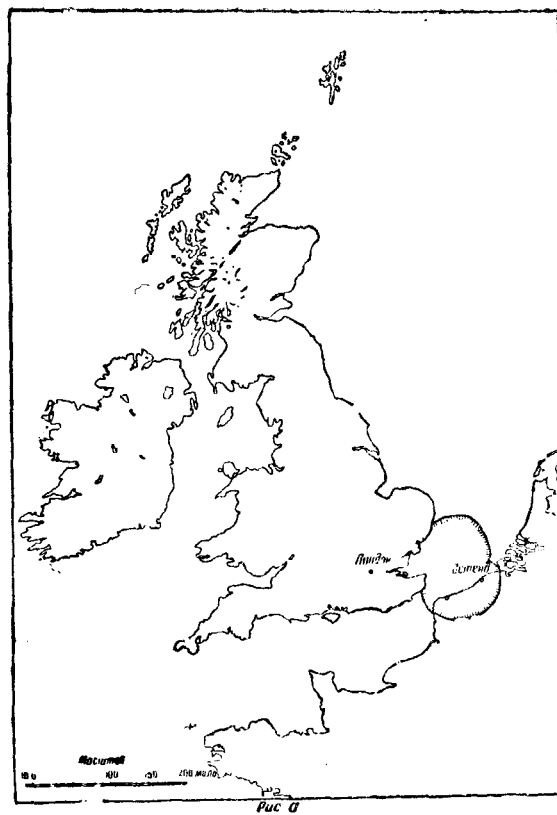


Рис. 9. Сфера действия английских радарных станций.

3. РАЗВЁРТКА КРУГОВОГО ОБЗОРА

Рассмотренная выше система горизонтальной развёртки, очень удобная для наблюдения за движением индивидуального самолёта, летящего в направлении радара, а также за движением нескольких самолётов, азимуты которых близки по величине, оказывается мало пригодной при поисках самолётов на различных азимутах, так как при довольно быстром вращении радиолуча импульсы, наблюдающиеся в данном азимуте, видны на экране осциллоскопа очень недолго, а импульсы из других азимутов в данный момент совершенно не регистрируются.

Более совершенна развёртка кругового обзора (по английской терминологии PPI — plan-position indicator), сущность которой заключается в следующем: при отсутствии сигнала электронный пучок попадает в центр экрана осциллоскопа; в момент посылки импульса он начинает перемещаться в радиальном направлении с постоянной скоростью и движется так во всё время существования паузы между импульсами, а затем с очень большой скоростью возвращается обратно в центр. По мере вращения антенны, луч которой «освещает» различные азимуты, радиальная развёртка осциллоскопа также вращается в плоскости экрана с той же угловой скоростью. Таким образом, электронный пучок при своём движении заполняет площадь круга с центром в середине экрана осциллоскопа. Отражённый от самолёта сигнал поступает на модулятор электронного луча и изменяет его скорость или интенсивность, как это делается в электронных телевизионных приёмниках. Благодаря этому в отдельных участках поля зрения получают более яркие (или более тёмные) места, свидетельствующие о присутствии самолёта (или другой цели). Время послесвечения экрана осциллоскопа подбирается таким, чтобы оператор видел одновременно всю картину. В результате на экране видна плоская проекция пространства, окружающего радар, с изображениями всех мишеней, пойманных радаром. Изображения мишеней удалены от центра на расстояния, пропорциональные дальностям мишеней, азимуты мишеней определяются при помощи круговой шкалы, окружающей светящийся круг на экране осциллоскопа. Различие в яркости фона и мишеней удаётся сделать весьма значительным, благодаря чему изображения мишеней хорошо заметны на фоне экрана. Рядом располагается обычный индикатор с управляемой горизонтальной развёрткой; на его экране можно выделить одну или несколько мишеней, за движением которых по тем или иным причинам требуется вести особенно тщательное наблюдение.

При метровых волнах, антенны которых дают довольно тупую диаграмму излучения, контуры предметов получаются в значительной степени смазанными; но при работе с сантиметровыми волнами излучаемый антенной пучок может быть сделан очень острым, и изображения мишеней на развёртке приобретают большую резкость. В ка-

честве примера приведём рис. 10, представляющий фотографию экрана осциллографа сантиметрового радара, установленного на самолёте. Фотография была снята в юго-западной части Уэльса вблизи городов Пемброк и Мильдорф-Хэвен и воспроизведена без всяких изменений, кроме добавления подписей названий и тонкой линии, харак-

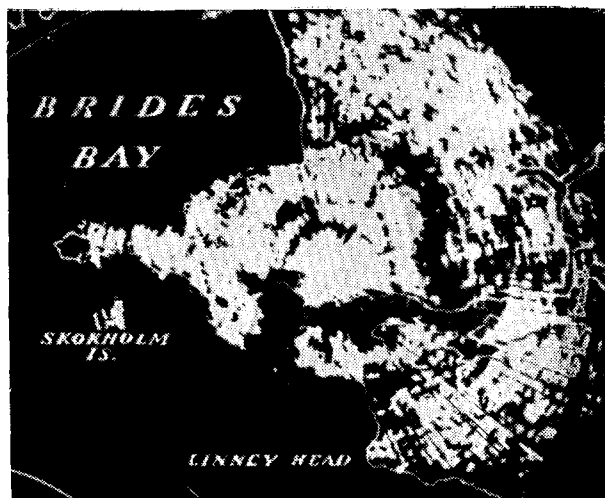


Рис. 10. Изображение, полученное на экране, сантиметрового самолётного радара с развёрткой кругового обзора.

теризующей положение истинных границ береговой линии участка, над которым находился самолёт в момент снимка.

Появление развёртки кругового обзора и радаров сантиметрового диапазона открыло необъятные перспективы использования радаров в военных и мирных условиях (см. ниже).

4. РАДАРЫ БЛИЗКОГО ДЕЙСТВИЯ

(станции орудийной наводки)

В отличие от радаров дальнего действия, которые должны заблаговременно заметить удалённый самолёт и сравнительно грубо определить его местоположение, радары ближнего действия должны определить координаты самолёта с большой степенью точности. С другой стороны, так как радиус действия их гораздо меньше, чем предыдущих, то меньшей может быть и мощность генератора; поэтому можно работать на более высоких частотах, что позволяет уменьшать габариты антенн. Англичане, как указывалось выше, пошли по этому пути, создав сеть радарных станций CHL, использовавшихся при

небольших дальностях. Антенна станции CHL видна на рис. 11. Рис. 12 показывает антенну для измерения угла места самолёта, применяющуюся в английских радарх ближнего действия, работающих в сантиметровом диапазоне. На рис. 13 изображена антенна, обслуживающая приёмник с развёрткой кругового обзора, и на рис. 14 — антенна станции наведения на самолёт, служащая для определения положения вражеского самолёта и сообщения его координат ноч-



Рис. 11. Антенна станции CHL.

нóму истребителю, который таким образом наводится на цель и приближается к ней на 3—5 км, после чего следит за ней уже при помощи собственного радара, установленного на истребителе и имеющего малый радиус действия. Известно, что эти последние установки, называемые англичанами соответственно GCI (Ground Control Interception, т. е. наземное контрольное наведение) и AI

(Airborn Interception, воздушное перехватывание), появившиеся в 1941 г., быстро обеспечили англичанам превосходство в воздухе. Так, во время одного из налётов немецкой авиации на Лондон из 500 бомбардировщиков было сбито 185.

Английские радары развивались в направлении от радаров дальнего действия к ближкодействующим. Напротив, американцы начали работать



Рис. 12. Антенна угла места радара ближко действия, работающего на сантиметровых волнах.

над радары ближко действия, и лишь позже были разработаны радары дальнего действия, описанные выше. В результате работ исследовательских учреждений вооружённых сил США, к ноябрю 1938 г. был создан радар SCR-268, который работал при частоте колебаний от 110 до 240 мегациклов (разные модели) и позволял обнаруживать самолёты на расстоянии до 40 км, определять азимут с ошибкой до 4° , угол места с точностью до $2,5$ и расстояние до самолёта с точ-

ностью до 0,2 км. Эта модель после некоторых усовершенствований была пущена в серийное производство. На рис. 15 изображена антенна передатчика, вращающаяся вокруг вертикальной оси, на

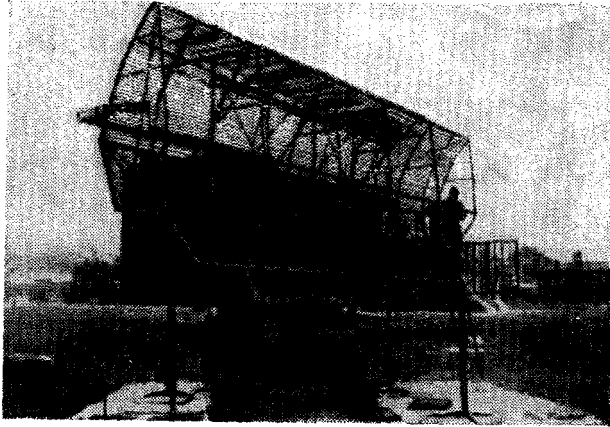


Рис. 13. Антенна приёмника с развёрткой кругового обзора.

рис. 16 — система для измерения угла места, вращающаяся вокруг горизонтальной и вертикальной осей, на рис. 17 — азимутальная

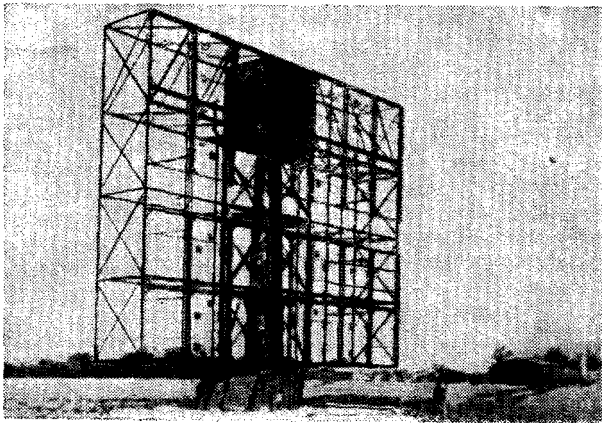


Рис. 14. Антенна станции наведения на самолёт.

антенна, способная вращаться в горизонтальной плоскости. Обе последние антенны двойные, причём оси их диаграмм образуют некоторый угол, и для точного определения координат [самолёта при-

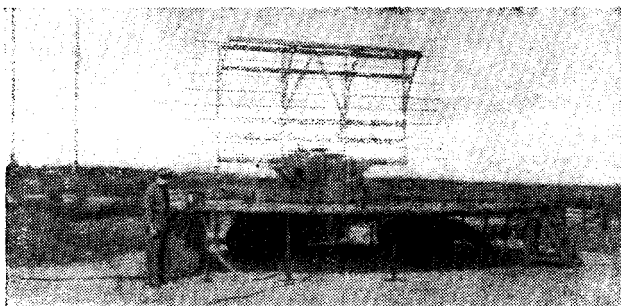


Рис. 15. Антенна передатчика радара SCR-268.

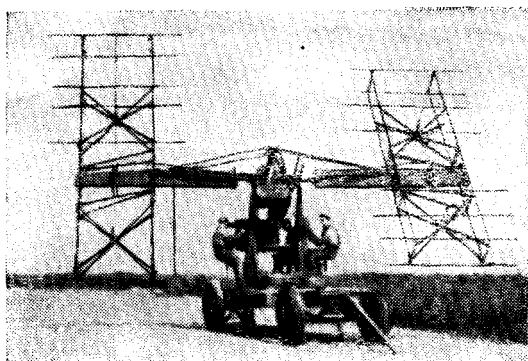


Рис. 16. Антенна для измерения угла места.

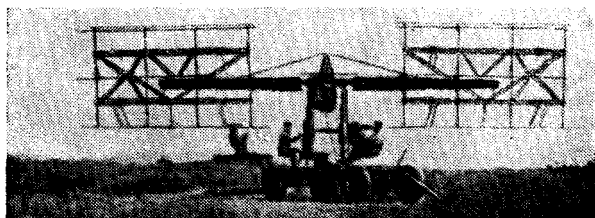


Рис. 17. Азимутальная антенна.

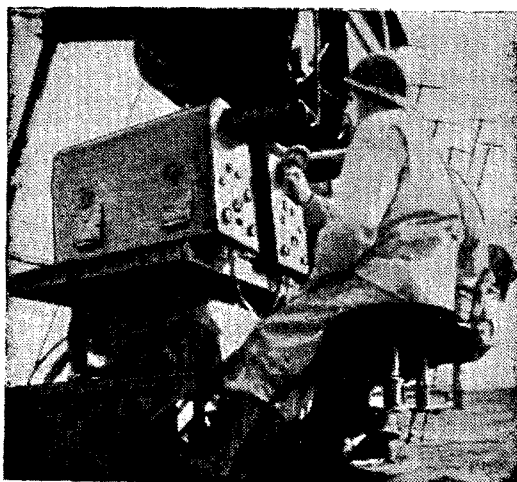


Рис. 18. Осциллоскопы для определения трёх координат (радар SCR-268).

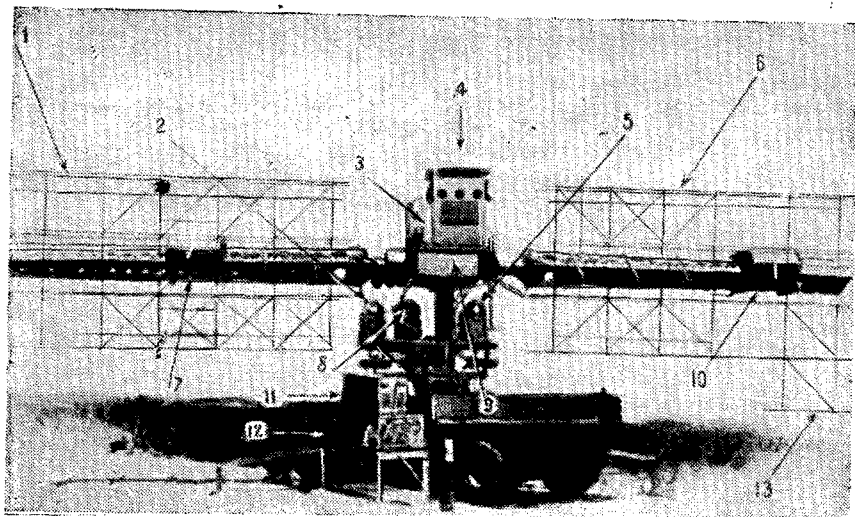


Рис. 19. Подвижный радар SCR-268: 1—антенна азимута, 2—осциллоскоп дальности, 3—трансформатор накала, 4—передатчик, 5—осциллоскоп угла места, 6—излучающая антенна, 7—приёмник азимута, 8—осциллоскоп азимута, 9—соединительная корсбка, 10—приёмник угла места, 11—манипулятор, 12—модулятор, 13—антенна угла места.

меняется «двухлепестковый метод», описанный выше (рис. 4, 5). Радар имеет три осциллоскопа для определения трёх координат. Осциллоскопы хорошо видны на рис. 18. Общее число электронных ламп в подобном радаре равно 110. Более поздняя модель того же радара смонтирована на общем подвижном основании (рис. 19). Та же установка в действии изображена на рис. 20. Она обслуживается пятью операторами.

Координаты, измеряемые радаром, передаются на расположенный по соседству прожектор, который в нужный момент зажигается и сразу же освещает вражеский самолёт, а также на зенитную батарею, где сейчас же устанавливаются надлежащие прицельные данные.

При испытаниях в 1938 г. подобный радар не только был в состоянии непрерывно следить за самолётом, но позволял регистри-

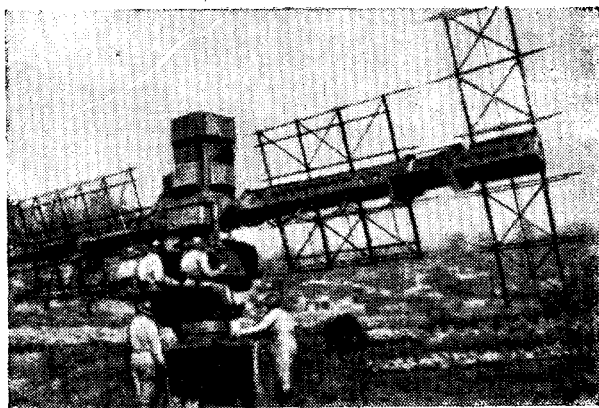


Рис. 20. Радар SCR-268 в действии.

ровать разрывы 3-дюймовых зенитных снарядов на расстоянии нескольких километров. Скелетная схема радара SCR-268, на которой сплошными линиями показаны электрические соединения отдельных блоков установки, а пунктиром — механические связи, изображена на рис. 21. Ручные штурвалы, при помощи которых операторы вращают соответствующие антенны, механически связаны с автоматами, управляющими прожекторами и зенитными орудиями. Таким образом, радиооператоры, поймав самолёт, удерживают его в поле зрения радара, а прожекторы и орудия непрерывно следуют за движением самолёта и в нужный момент приводятся в действие.

Радары SCR-268 были испытаны в 1941 г. на маневрах на юге Панамского канала; в августе 1941 г. два радара были установлены в Исландии для охраны северного пути, связывавшего Америку с Англией и СССР; в декабре 1941 г., во время налёта японцев на

Пирл-Харбор, там работало 16 радаров. В дальнейшем они действовали на всех фронтах. Общее число изготовленных радаров SCR-268

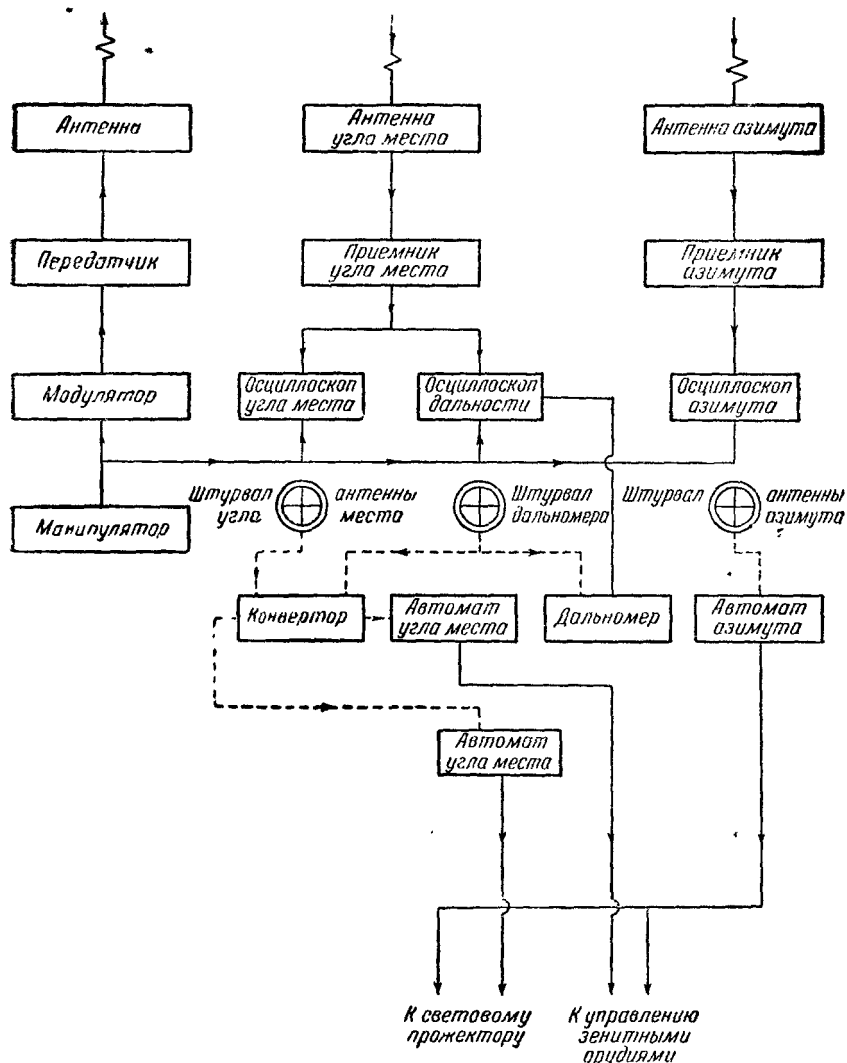


Рис. 21. Скелетная схема радара SCR-268.

достигло внушительной цифры — 2974 экземпляра. Конечно, их конструкция не могла остаться тайной, и в середине 1944 г. японцы полностью скопировали этот радар, но позже выяснилось, что уже в марте 1944 г. он был снят американцами с производства и заменён более совершенной моделью.

Радарные установки аналогичного типа устанавливались на судах военно-морского флота и обеспечивали нахождение цели в полной темноте или в тумане, а также надёжную корректировку стрельбы, поскольку они регистрировали фонтаны воды, получавшиеся при попадании артиллерийских снарядов в воду.

Американские радарные установки подобного типа (SCR-584 и др.), работавшие на волнах длиной около 10 см, позволяли определять дальность с точностью до 10—12 м; точность определения направления достигла 0,06; максимальный радиус действия составлял 30—40 км (в зависимости от размеров мишени). Число радаров этого типа, выпущенных за время войны, составляло 1710 штук. Эти установки резко повысили боевую мощь военно-морского флота союзников. Радары обеспечивали разгром итальянского флота в Средиземном море, ликвидацию немецкого линкора «Шарнгорст» в темноте полярной ночи в Норвежском море и успех ряда крупных операций на Тихоокеанском театре военных действий.

Судовые и самолётные радары явились мощным средством борьбы с подводными лодками.

В заключение следует упомянуть о весьма остроумном способе уменьшения эффективности вражеских радаров, применявшемся англичанами. При приближении самолётов к намеченной цели англичане сбрасывали с них полосы металлизированной бумаги; отражения от этих полос были настолько многочисленны, что операторы немецких радаров совершенно терялись — им казалось, что всё небо сплошь покрыто самолётами союзников.

5. РАДАРЫ КАК НАВИГАЦИОННОЕ СРЕДСТВО

Совершенно очевидно, что радар, установленный на земле, может служить прекрасным навигационным средством, так как позволяет определять координаты самолёта или судна и давать ему указания о направлении дальнейшего полёта (или плавания).

Война показала, однако, что можно сделать гораздо больше. При первых массированных налётах союзной авиации на Германию возникли трудности, связанные с необходимостью концентрации на небольшом участке большого количества самолётов. Необходимо было обеспечить возможность безошибочного и быстрого нахождения цели, своевременной бомбёжки и срочного ухода отбомбившихся соединений.

Союзниками была разработана система наведения самолётов на цель, получившая (повидимому, из-за исключительной эффективности) своеобразное название «Гее» (чорт возьми!) и заключающаяся в следующем. На земле располагаются три передающие станции А, В, С, одновременно посылающие импульсные сигналы (рис. 22). Штурман самолёта, принимая два из этих сигналов (напр. А и В) на осциллоскоп, не может, конечно, определить расстояние самолёта до станций, но легко определяет, насколько одна станция дальше от него,

чем другая. Так как кривые, соответствующие данной разности расстояний до станций A и B , являются гиперболами (ради простоты будем рассматривать плоскую задачу), фокусы которых совпадают со станциями, то, располагая заранее изготовленной картой, штурман определяет, на какой из гипербол находится самолёт (пусть это будет гипербола ab); однако он ещё не может определить, в какой

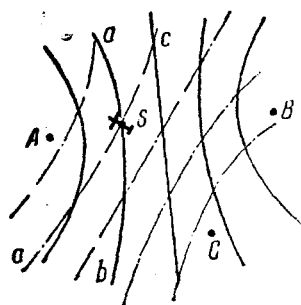


Рис. 22. Система «Гее» наведения самолётов на цель.

именно точке гиперболы находится самолёт. Но, производя аналогичное наблюдение за сигналами станций A и C (или B и C), штурман определяет гиперболу ac , проходящую через положение самолёта. Очевидно, пересечение найденных гипербол однозначно определяет положение самолёта (точка S).

Точность этого метода оказалась исключительно высокой.

В настоящее время Гее-станции и аналогичные американские станции «Logan» покрывают значительную часть карты мира навигационной сеткой, которая намного облегчит воздушную и морскую навигацию и делает её независимой от состояния погоды, так как штурману уже не нужно будет «ловить» солнце или звёзды для определения положения корабля.

Американские навигационные станции «Logan» работают на частоте от 1,7 до 2,0 мегациклов и способны обеспечить навигацию на расстоянии до 2500 км.

В этих станциях радиопередатчик A (рис. 22) является сдвоенным: один из передатчиков (A_1) даёт 25 импульсов в секунду. Эти импульсы приводят в действие автоматическую станцию B , которая в свою очередь начинает посылать импульсы, очевидно, запаздывающие относительно первых на некоторый постоянный промежуток времени. Штурман корабля, принимая оба импульса на осциллоскоп, частота горизонтальной развёртки которого равна 25 герц, определяет своё положение на одной из гипербол ab . Другой передатчик A_2 станции A аналогичным образом возбуждает станцию C , но с несколько иной частотой импульсов (25,062 импульса в секунду). Благодаря различию в частоте импульсов, последние не видны на экране осциллоскопа (так как они всё время смещаются); но если штурман изменит частоту развёртки и сделает её равной 25,067 герц, то на экране будут видны импульсы станций A_2 и C , благодаря чему штурман определит гиперболу ac , на которой находится корабль. Оба измерения дают возможность определить истинное положение корабля (точка пересечения гипербол).

Точность локации, даваемая Гее-установками на расстоянии 500 км от станций, составляет в среднем несколько квадратных километров,

повышаясь для случаев, когда самолёт находится вблизи середины прямой, соединяющей две станции, до 0,75 км.

Однако даже эта удивительно высокая точность оказалась недостаточной для массовых прицельных бомбардировок малых объектов, и был создан шедевр современной радарной техники, система «гобой» (обое). В этой системе также имеются 2 наземные станции и заранее заготовленная навигационная сетка.

Они одновременно посылают импульсы, принимаемые самолётной радиоустановкой и автоматически приводящие в действие передатчик опознавательного сигнала самолёта; этот опознавательный импульс принимается станциями и передаётся на осциллоскоп, благодаря чему удаётся определить его относительное запаздывание по сравнению с импульсами наземных станций и, следовательно, местоположение самолёта. Самолёт получает указания о дальнейшем курсе и приводится на гиперболу, проходящую через объект бомбардировки. По мере приближения к объекту станции извещают самолёт о том, что до цели осталось 5 минут, 3 минуты, 1 минута (так как на станциях известны координаты самолёта и его скорость).

В нужный момент даётся сигнал сбросить бомбы (что, впрочем, может быть осуществлено и автоматически при посредстве телеуправляемого бомбосбрасывателя). При всей этой операции работники наземных станций знают положение самолёта более точно, чем его экипаж.

На расстоянии 350 км от станций ошибка в определении координат самолёта при этой системе наведения на цель не превышает 200 м (в боевых условиях), в мирной же обстановке она может быть снижена ещё в несколько раз.

Описанная система была проверена, в частности, во время битвы за Рурский бассейн.

Самолёт, снабжённый радарной установкой с развёрткой кругового обзора, работающей на сантиметровых волнах, имеет возможность видеть на экране осциллоскопа такие незначительные по размерам объекты, как подводные лодки и отдельные наземные сооружения. Благодаря этому, возможна исключительно надёжная прицельная бомбардировка.

Известен случай, когда при необходимости дать возможность лицам, заключённым в тюрьму, бежать из заключения, самолёты разбомбили карзальное помещение и стены, оставив в целости ту часть здания, в которой находились заключённые.

Описываются также случаи успешной прицельной бомбардировки заданных домов при сохранении в относительной целостности соседних зданий. Весьма точное определение координат летящего предмета в комбинации с наведением на цель истребителей сыграло большую роль в успешной борьбе английской авиации с летающими бомбами.

Следует, наконец, упомянуть о радарных снарядах. В конце войны англичане выпустили зенитные артиллерийские снаряды, снабжённые

миниатюрной радарной установкой; импульсы этого радара, отражавшиеся от обстреливаемого самолёта и воспринимавшиеся радаром снаряда, приводили в действие взрыватель, обеспечивавший разрыв снаряда на заданном расстоянии от самолёта, рассчитанном таким образом, что вероятность поражения самолёта осколками снаряда была весьма велика.

В заключение небезынтересно привести некоторые данные, характеризующие различные типы радарных установок, выпускавшихся американской промышленностью за годы войны. Эти данные прекрасно

Тип	SCR-270	SCR-268	RN/TPS-3	SCR-584	AN/MPG
Вес (тонн)	37	13	0,61	9,1	12,7
Частота (мегагерц) . .	110	195—215	600	2700—2900	10 000
Волна (см)	270	154—140	59	11—10	3
Мощность импульса kW	100—300	50—75	200	300	60
Длительность импульса (микросек) . . .	10—30	5—9	1,5	0,8	0,25
Число импульсов (1/сек)	621	4098	200	1707	4098
Усиление G_0	140	100	220	1200	?
Ширина диаграммы азимута	28	12	12	?	?
угла антенны (°) ста . . .	10	9	11	?	?
Максимальная дальность (для бомбардировщика на высоте 3 км) (км) . . .	130—200	40	170	30	48
Минимальная дальность (м)	9000	2700	9000	450	?
Точность определения дальности (м) . . .	7200	180	3600	12	?
Точность определения направления (°) . .	4	1	2	0,05	?

иллюстрируют разнообразие типов и исключительные качества этих замечательных установок. Из 10 типов, которые описаны в печати, мы приводим сведения только о 5 типах, наиболее отличающихся друг от друга.

6. РАДИООБСЛУЖИВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ БОЕВЫХ САМОЛЁТОВ

Многообразные применения радиотехнических установок на современных боевых самолётах обуславливают усложнение радиооборудования самолётов и требуют создания целой сети наземных радиостанций, обслуживающих самолёт в полёте. Сложность радиооборудования тяжёлого самолёта может быть проиллюстрирована следующими данными: число радиотехнических узлов (передатчики, приёмники, усилители и т. д.) на самолёте типа «Ланкастер» достигает 50,

число ламп в них — более трёхсот, число различных антенн — более 10.

На рис. 23 схематически показана система радиообслуживания самолёта «Ланкастер».

1 — Под опознавательным знаком, изображённым на фюзеляже самолёта, расположен радар с развёрткой кругового обзора для детального обследования местности, над которой производится полёт.

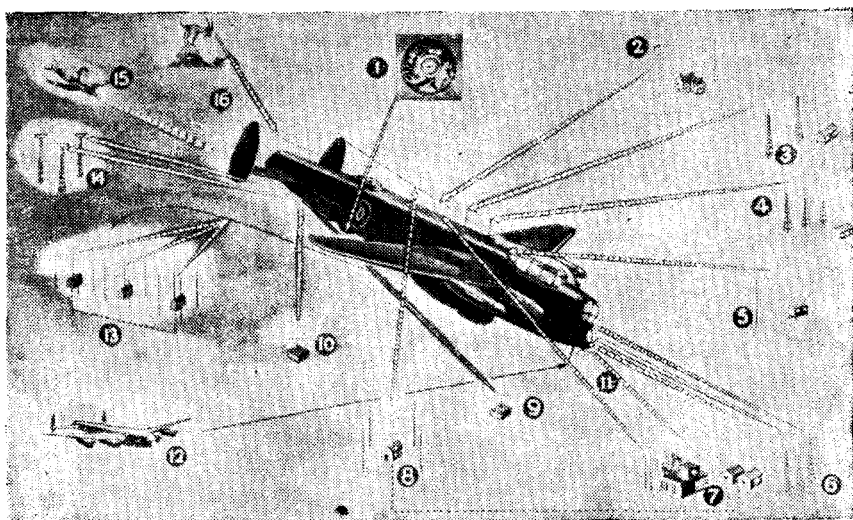
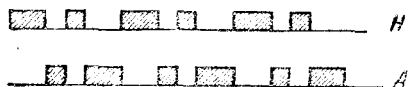


Рис. 23. Система радиообслуживания самолёта «Ланкастер».

2 — Самолёт поддерживает телеграфную связь с командованием.
3 — «Gee»-установка, позволяющая руководить движением самолёта с земли.

4 — Радиомаяки, обслуживающие самолёт при его возвращении.

5 — Радиомаяк, работающий на средних волнах, облегчает самолёту грубое определение направления полёта; приём его сигналов ведётся на рамочную систему.



6 — Радиомаяк, регулирующий движение самолёта при приближении к аэродрому. Он состоит из двух радиопередатчиков направленного действия, один из которых передаёт в пространство телеграфные сигналы, соответствующие букве А, другой — букве Н, причём передача одного передатчика происходит во время пауз другого (рис. 24). Если самолёт летит правее или левее, чем следует, то лётчик слышит более громкую передачу той или иной буквы; если же

Рис. 24.

лётчик слышит более громкую передачу той или иной буквы; если же

курс правилен, то самолёт попадает в «равносигнальную» зону, где обе буквы принимаются одинаково интенсивно, так что лётчик воспринимает непрерывный звук постоянной силы (этот метод указания пути по существу совпадает с двухлестковым методом, описанным выше, рис. 4).

7 — Сигнализация, регулирующая посадку самолёта при посредстве антенны 11; земной передатчик микроволн связан телефонной связью со вспомогательной высокочастотной станцией 8. Если эта связь нарушается из-за повреждения самолёта, то действует вспомогательная система, работающая на более низкой частоте, принимаемая самолётом на антенну, расположенную над фюзеляжем.

9 и 10 — Радиомаркеры, один из которых устанавливается, примерно, в 3 км от аэродрома, другой на границе аэродрома. Посылаемые ими сигналы позволяют лётчику определить границы аэродрома и начать посадку по правильной глиссаде, совпадающей с равносигнальной зоной радиомаркеров.

12 — Связь между самолётами, находящимися в полёте.

13 — Станция средневолнового диапазона с большим радиусом действия (1000—1200 км), принимаемая самолётом на свисающую антенну, сматываемую в нужные моменты со специального барабана.

14 — Система опознавательных сигналов самолёта — нормальных и аварийных (см. § 2).

15 — Предохранительный радар, извещающий о появлении вражеского истребителя в хвосте самолёта.

16 — Система звуковой сигнализации, приводящейся в действие наземными радиостанциями, установленными в гористой местности, если самолёт приближается к горам. Англичане образно называют её «горный козёл».

Этот перечень наглядно показывает, сколь разнообразны виды применения радиоустановок в современной воздушной навигации и позволяет оценить широту необходимой организационной работы.

Таковы те краткие сообщения об успехах техники радаров, которые стали ныне достоянием широкой гласности. Несомненно, радары имеют ещё целый ряд ценных свойств, открывающих широкие перспективы применения их не только в боевых, но и в мирных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Colton — *PIRE*, 33, 740, 1945.
2. Watson — *Watt-Discovery*, 6, 281, 1945.
3. *Electronics*, 4, 9, 10 и 11, 1945.
4. *Radio News*, 6, 8, 1945.
5. *Aviation*, 6, 1945.
6. Southworth, *Journ. Frankl. Inst.*, 6, 239, 285, 1945.