

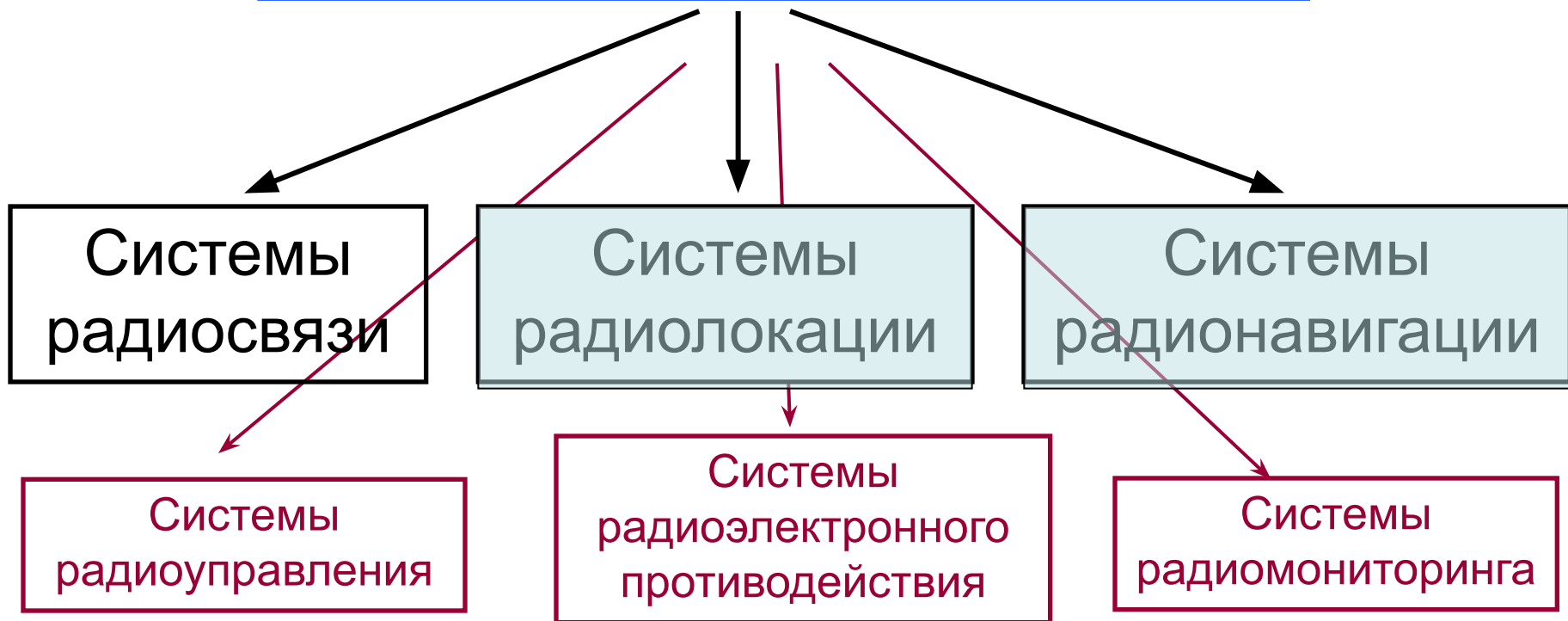
ТЕОРИЯ И ТЕХНИКА РАДИОЛОКАЦИИ И РАДИОНАВИГАЦИИ

Преподаватель:
Митрофанов Александр Михайлович

mitrofanov@spbstu.ru

НИК ауд. В 3.17

Классификация радиосистем



Радиосистемы – информационно-управляющие системы, использующие для выполнения своих функций радиосигналы.

Радиосигнал – электромагнитная волна, несущая информацию.

Основные определения

Радиолокационная система – совокупность технических средств, использующих **радиоволну** для решения следующих задач:

- обнаружение;
- определение местоположения (координат);
- определение параметров (скорость, классификация, распознавание и т.д.)

другого объекта.

Радионавигационная система – совокупность технических средств, использующих **радиоволну** для решения следующих задач:

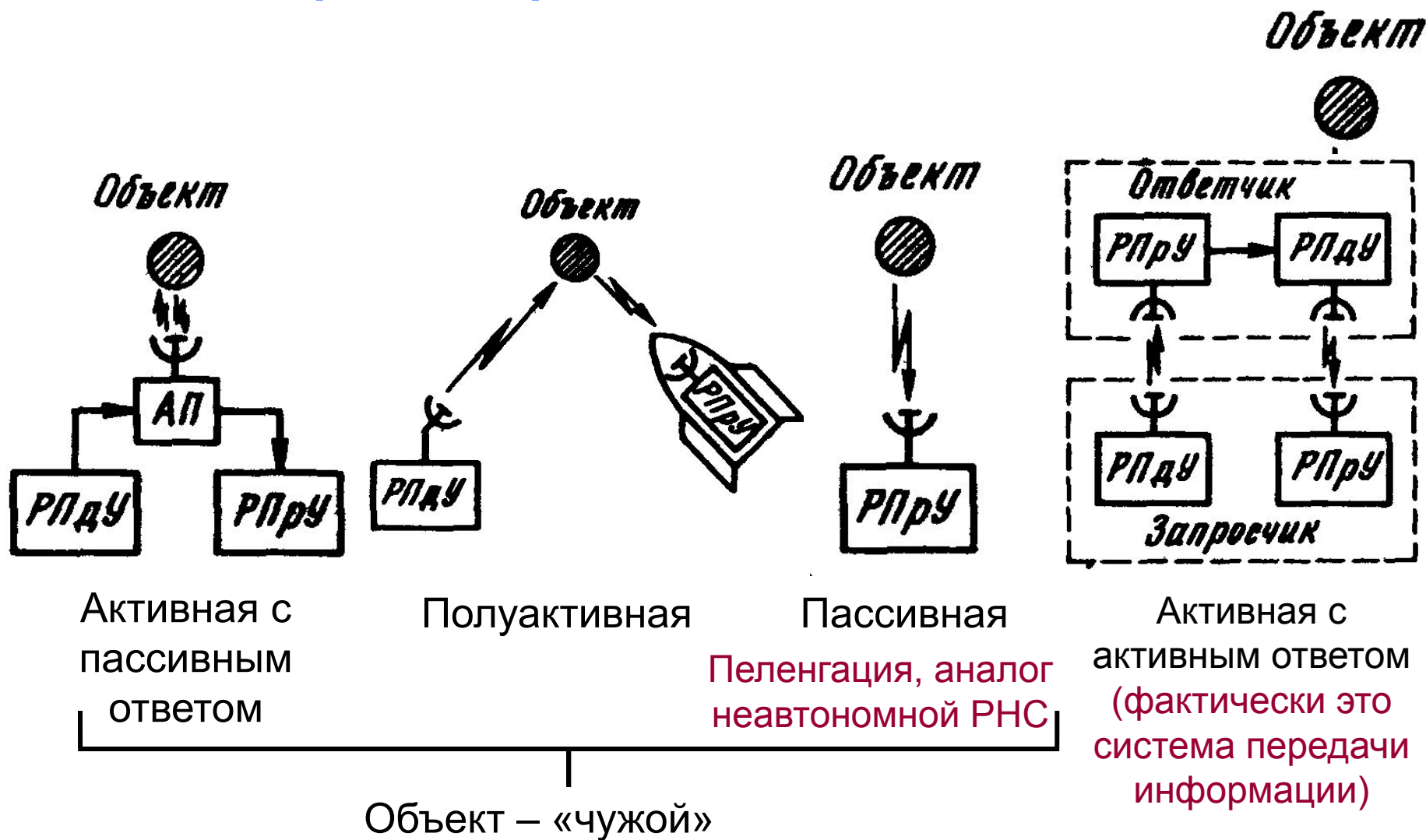
- определение местоположения (координат);
- обеспечение перемещения по заданной траектории

данного объекта.

РЛС и РНС являются **средствами измерения**.

Их показатели качества являются типичными для средств измерения: диапазон измерений, точность (ошибка), время измерения и т.п., причем значения этих показателей качества - случайные величины.

Классификация радиолокационных систем



АП – антенный переключатель

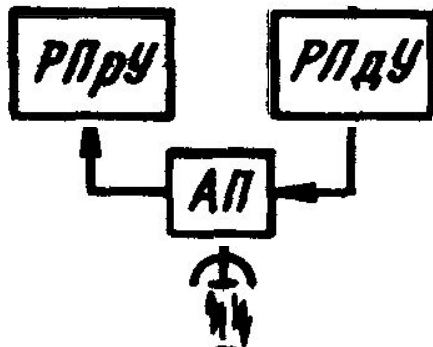
Классификация радионавигационных систем

Радионавигационная точка (РНТ) – пункт с известными координатами



Подвижный объект (определяет свое местоположение, используя излучение радиомаяка)

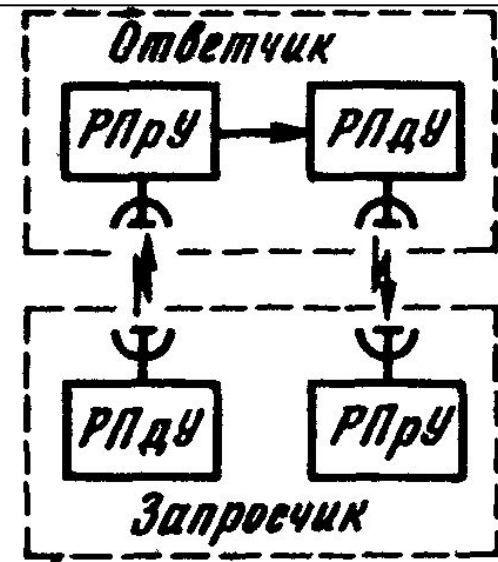
Неавтономная РНС (аналог пассивной РЛС), **пеленгация**



Подвижный объект (определяет свое местоположение самостоятельно)

Подстилающая поверхность

Автономная (аналог активной РЛС с пассивным ответом)



Активная с активным ответом

Физические основы радиолокации

«РЛС» = «Радáр» (*radar* от *Radio Detection and Ranging*)

Физической основой РЛ является рассеяние (отражение) радиоволн при облучении объектов, отличающихся своими электрическими параметрами (ϵ , μ , σ) от окружающей среды (неоднородности).

Факт и количественный результат этого рассеяния (отражения) радиоволн необходимо зафиксировать.

Анализ результата рассеяния (отражения) радиоволн проводится в предположении о **постоянстве скорости** ($3 \cdot 10^8$ м/с) и **прямолинейности** распространения радиоволн.

Объекты радиолокационного наблюдения

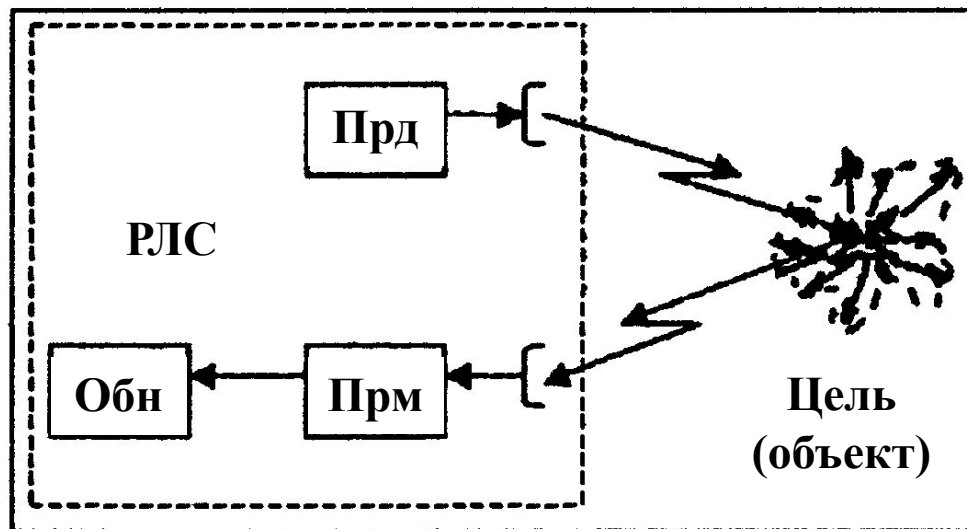
Объекты РЛ-наблюдения (радиолокационные цели):

- летательные аппараты (самолеты, вертолеты, БПЛА и др.),
- гидрометеорообразования (дождь, снег, град, облака и т. д.),
- водный транспорт и военные корабли,
- наземные объекты (строения, автомобили),
- астрономические объекты.

Интенсивность рассеяния (отражения) радиоволн зависит от:

- степени различия электрических характеристик цели и среды;
- формы цели, положения цели относительно падающей радиоволны;
- соотношения размеров цели l и длины волны λ ;
- поляризации радиоволн.

Техническая реализация РЛС



Радиотехнические дисциплины в основе РЛ:

- ПРД
- АФУ
- ЭДиРРВ
- ПРМ
- ЦОС

Антенна радиопередатчика излучает радиоволну в направлении цели.

Цель рассеивает (отражает) падающую радиоволну.

В приемном устройстве происходит усиление и преобразование входного колебания и, далее, **обнаружение** отраженного сигнала и **определение** его **параметров**.

Проблемы при реализации РЛС:

- присутствие отраженного радиосигнала носит случайный характер;
- крайне малый уровень отраженного сигнала в точке приема.

Факторы, определяющие выбор длины волны в РЛС

- Желательно обеспечить отсутствие зависимости мощности вторичного излучения от длины волны $\rightarrow l \gg \lambda$. (l - размер объекта)

Для радиолокационного наблюдения целей типа самолетов, автомашин и т. п. указанное условие будет выполнено в диапазонах дециметровых ($f = 300$ МГц ... 3 ГГц, $\lambda = 1$ м ... 10 см), сантиметровых радиоволн ($f = 3$ ГГц ... 30 ГГц, $\lambda = 10$... 1 см) и т.д.

- Желательно обеспечить узкую ДН:

\rightarrow разрешение (разделение) целей по угловым координатам,
 \rightarrow улучшение энергетических характеристик передатчика

$$\Theta_{0,5} [\text{град.}] \approx 65 \lambda / D_A$$

- Необходимо также учитывать и фактор, ограничивающий укорочение волны – затухание радиоволн в атмосфере, которое в диапазонах СМВ и ММВ значительно, а также учитывать технические трудности создания мощных передатчиков в диапазоне ММВ.

Частотные диапазоны РЛС американского стандарта IEEE

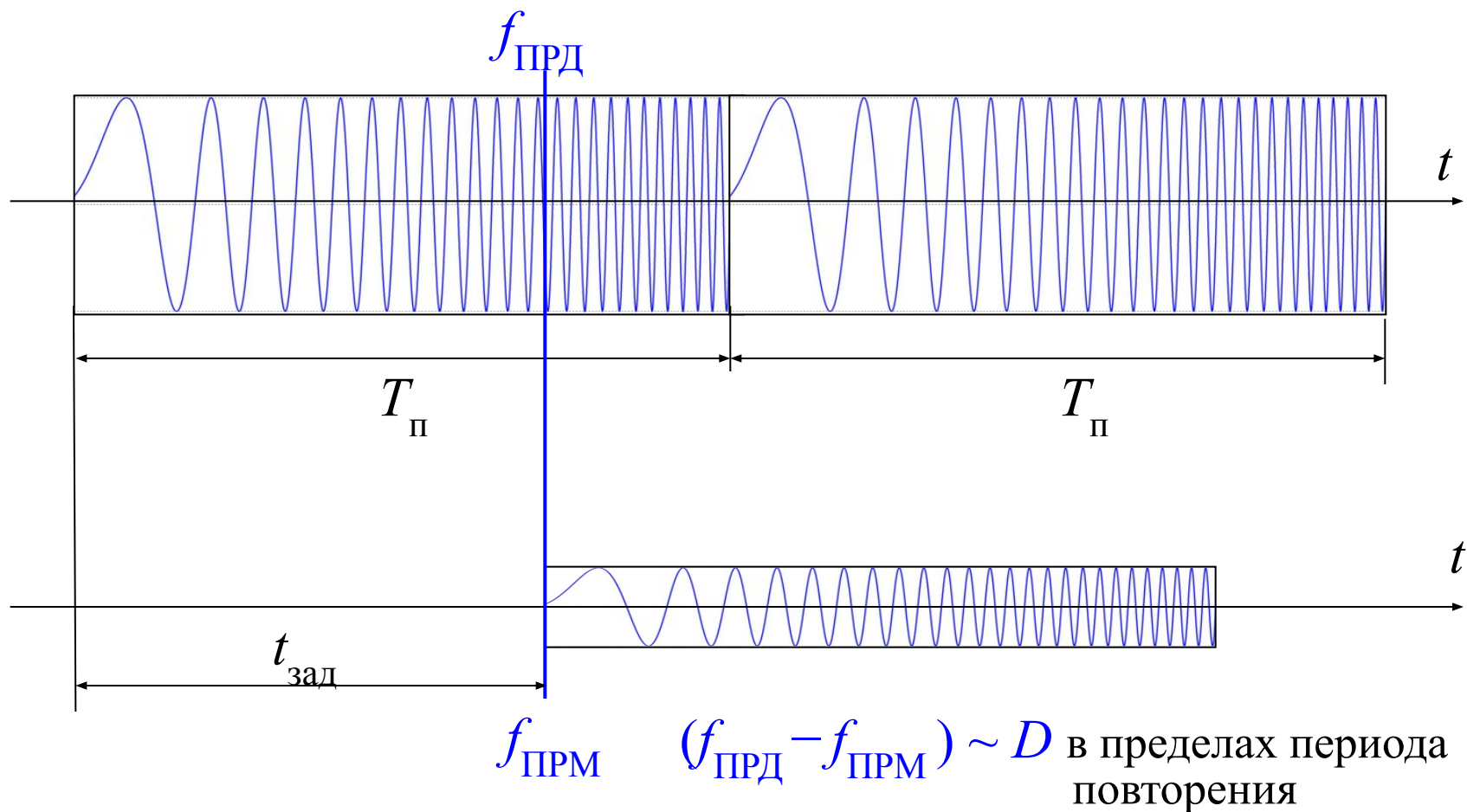
| Диапазон | Наименование | Частота | Длина волны | Примечания |
|----------------|-----------------------------|--------------|--------------|---|
| HF | <i>high frequency</i> | 3–30 МГц | 10–100 м | Радары береговой охраны, загоризонтные РЛС |
| VHF | <i>very high frequency</i> | 50–330 МГц | 0,9–6 м | Обнаружение на больших дальностях, исследования Земли |
| UHF | <i>ultra high frequency</i> | 300–1000 МГц | 0,3–1 м | Обнаружение на больших дальностях, исследования лесов, поверхности Земли |
| L | <i>Long</i> | 1–2 ГГц | 15–30 см | Управление воздушным движением |
| S | <i>Short</i> | 2–4 ГГц | 7,5–15 см | Управление воздушным движением, метеорология, морские радары |
| C | <i>Compromise</i> | 4–8 ГГц | 3,75–7,5 см | Метеорология |
| X | | 8–12 ГГц | 2,5–3,75 см | Управление оружием, наведение ракет, морские радары, погода, картографирование среднего разрешения; диап. 10,525 ± 0,025 ГГц используется в США в РЛС аэропортов |
| K _u | <i>under K</i> | 12–18 ГГц | 1,67–2,5 см | Картографирование высокого разрешения, спутниковая альтиметрия |
| K | <i>kurz – «короткий»</i> | 18–27 ГГц | 1,11–1,67 см | В полицейских дорожных радарх (24,150 ± 0,100 ГГц). [Поглощение водяным паром] |
| K _a | <i>above K</i> | 27–40 ГГц | 0,75–1,11 см | Картографирование, управление воздушным движением на коротких дистанциях, специальные радары, управляющие дорожными фотокамерами (34,300 ± 0,100 ГГц) |

Какую информацию несет радиосигнал, отраженный от цели?

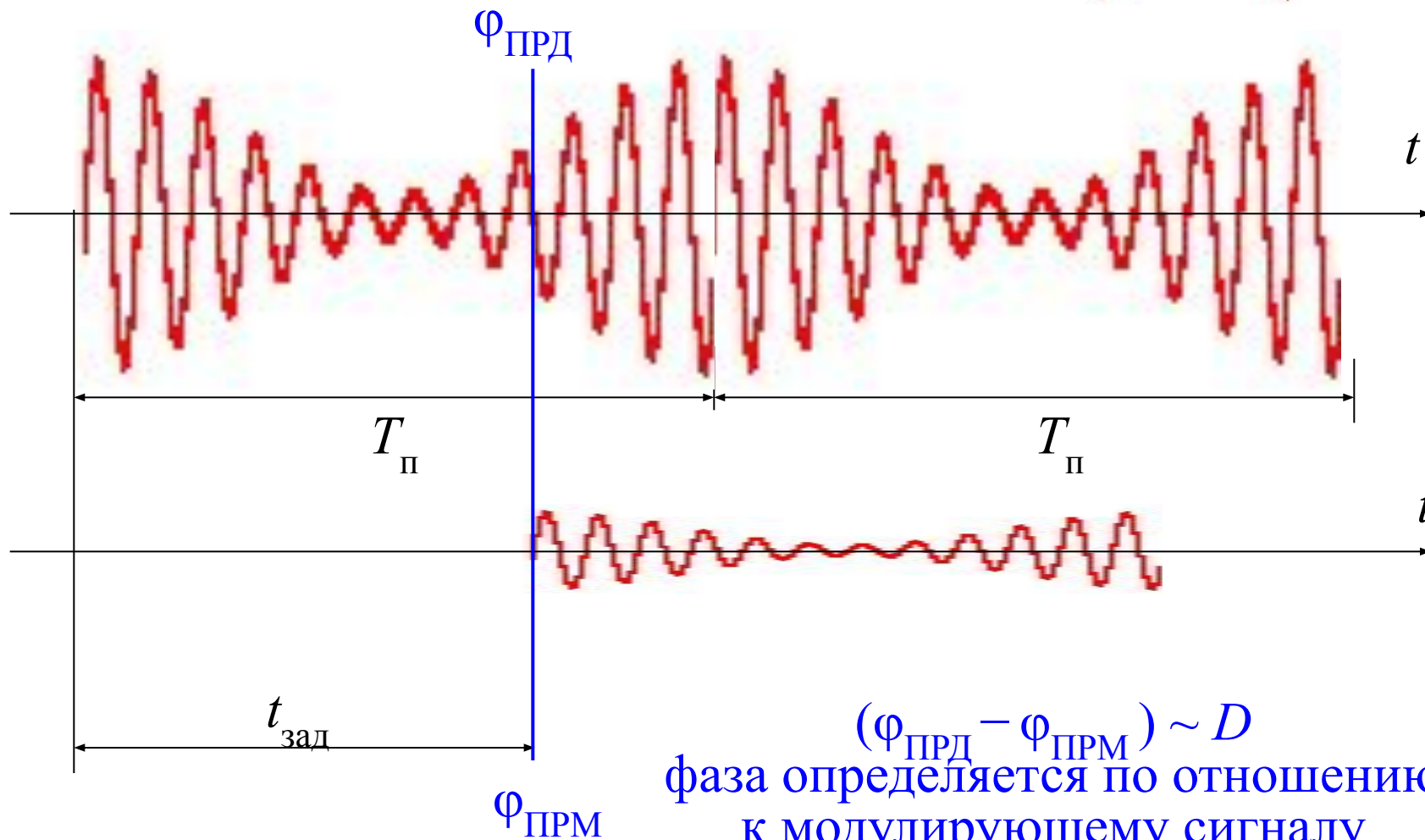
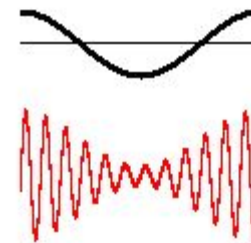
- Наличие отраженного сигнала **определяет** наличие цели;
- Задержка отраженного сигнала относительно излученного позволяет **определить** расстояние до цели;
- Амплитуда отраженного сигнала позволяет **оценить (?)** размер цели и (или) ее отражающие свойства;
- Частота отраженного сигнала позволяет **определить** радиальную скорость цели;
- Направление прихода отраженного сигнала позволяет **определить** угловое положение цели.

Какой радиосигнал следует излучить: непрерывный или импульсный?

- непрерывный (обязательно модулированный), например:
 - ЛЧМ-сигнал



– АМ-сигнал



Преимущества непрерывного метода РЛ:

- Простота реализации – исторически реализован первым;
- Сравнительно узкий спектр излучения (нет проблемы ЭМС);
- Отсутствие «мертвой зоны»

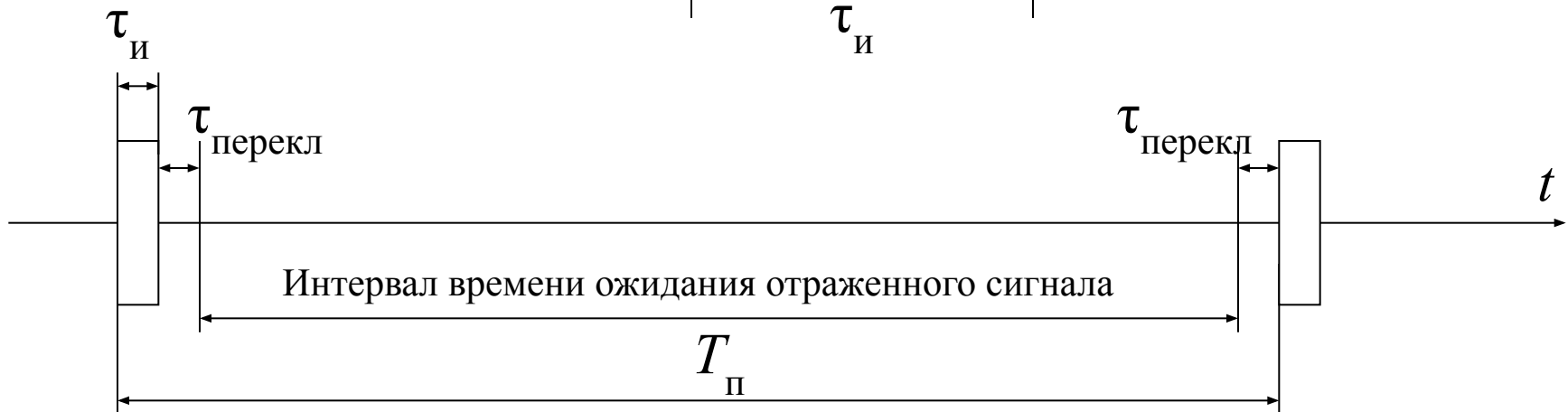
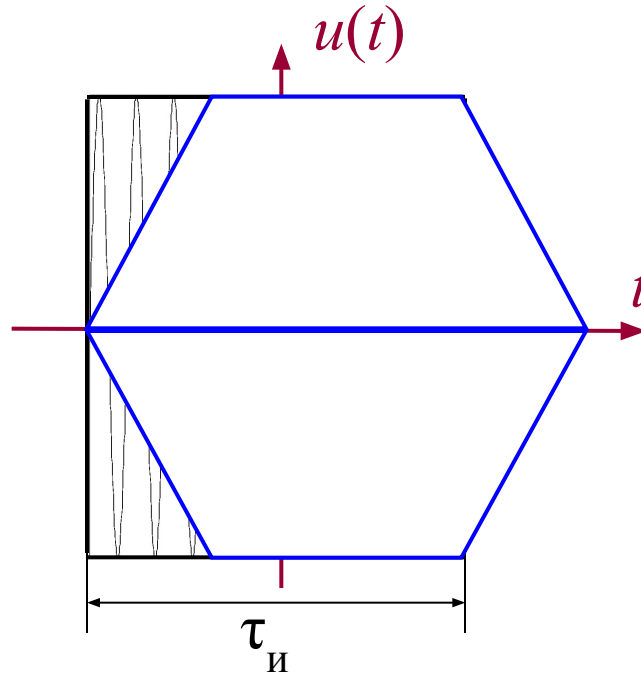
Недостатки непрерывного метода РЛ:

- Сравнительно небольшая мощность излучения;
- Необходимость использования двух отдельных антенн;
- Сравнительно низкая точность определения дальности.

Какой радиосигнал следует излучить: непрерывный или импульсный?

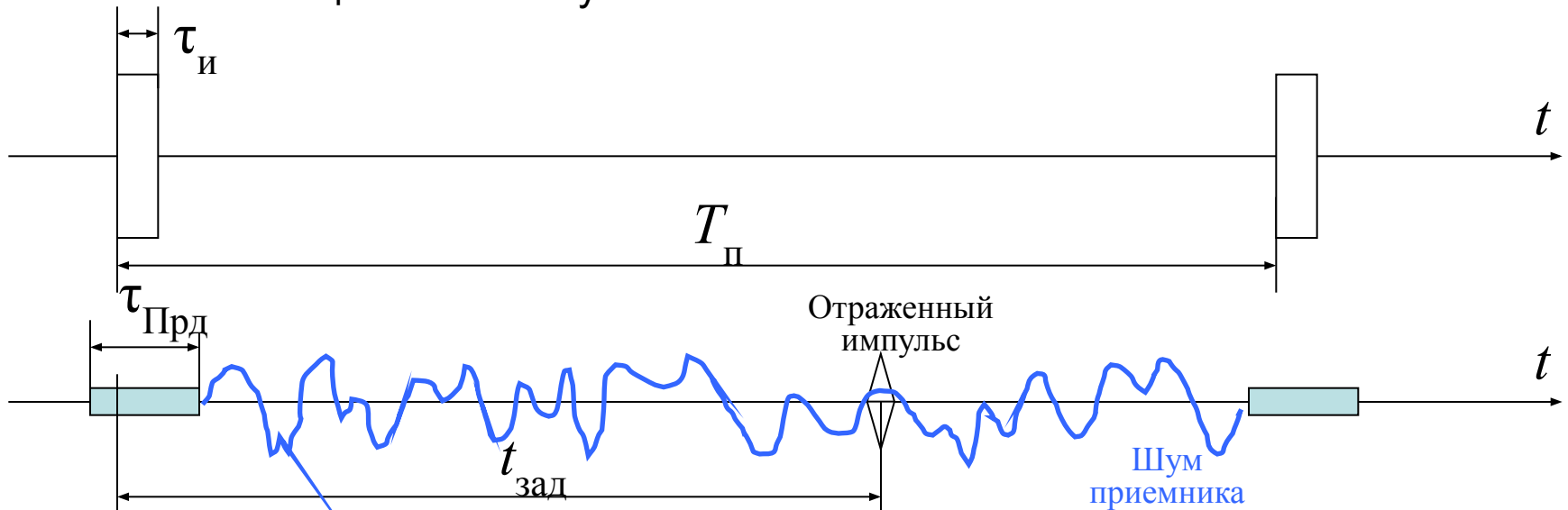
- ИМПУЛЬСНЫЙ

$$u(t) = A_0 \sin 2\pi f_0 t, \\ -\tau_{\text{И}}/2 < t < \tau_{\text{И}}/2$$



Преимущества импульсного метода РЛ:

- можно использовать совмещенную антенну на передачу и прием;
- большая мощность в импульсе.



Недостатки импульсного метода РЛ:

- «мертвая зона» вблизи РЛС;
- короткий прямоугольный радиоимпульс \rightarrow широкий спектр излучения \rightarrow проблема ЭМС;
- широкий спектр излучения \rightarrow широкая полоса приемника \rightarrow высокий уровень помех.

В дальнейшем при обсуждении РЛ-систем будем использовать следующие «учебные» значения параметров: $\tau_i = 1$ мкс, $T_{\Pi} = 1$ мс, $f_0 = 10$ ГГц

Физические основы радионавигации

Основная цель радионавигации – получение на борту **подвижного** объекта информации о его местоположении и параметрах движения.

Как вариант, эта информация может быть получена в пункте управления движением и передана на борт по системе радиосвязи.

Физические основы РН — те же, что в РЛ:

- прямолинейное распространение радиоволн;
- постоянная скорость распространения радиоволн.

Выбор частотного диапазона в задачах радионавигации

В неавтономных РНС отсутствует требование $l \gg \lambda$, таким образом нет ограничения на выбор диапазона радиоволн.

В РНС выбор частотного диапазона обусловлен особенностями распространения радиоволн в среде, которые существенно зависят от длины волны. Кроме того, учитывается регламент радиосвязи.

В неавтономных РНС, обеспечивающих определение местоположения объекта *вне пределов прямой радиовидимости*, используется диапазон $\lambda = 10 \dots 100$ км на дальностях порядка $8 \dots 10$ тыс. км; диапазоны $\lambda = 1 \dots 10$ км и $\lambda = 0,1 \dots 1$ км – на дальностях порядка 1 тыс. км.

При нахождении объекта в пределах прямой радиовидимости радиомаяка (на дальностях до 100 км при расположении радиомаяка на поверхности земли, и на любых практически реализуемых дальностях при нахождении радиомаяка на ИСЗ) используются СВЧ-диапазоны.

В автономных РНС, например в радиовысотомерах, доплеровских измерителях скорости и угла сноса (ДИСС), а также в неавтономных РНС, например в радиомаячных системах посадки, в которых требуется сформировать узкую ДН, используются диапазоны метровых и более коротких волн.

Показатели качества РЛ-систем

РЛС – средство измерения дальности, углового положения, скорости и т.д. объекта.

Показатели качества:

- диапазон измерения;
- ошибка измерения;
- минимальное разрешение двух объектов по дальности, по углу;
- число одновременно сопровождаемых целей.

Для реализации этих функций необходимо обнаружить отраженный от цели радиосигнал.

Показатели качества:

- вероятностные характеристики обнаружителя.

Показатели качества РН-систем

РНС – средство измерения координат объекта-носителя (углового положения, высоты).

Показатели качества:

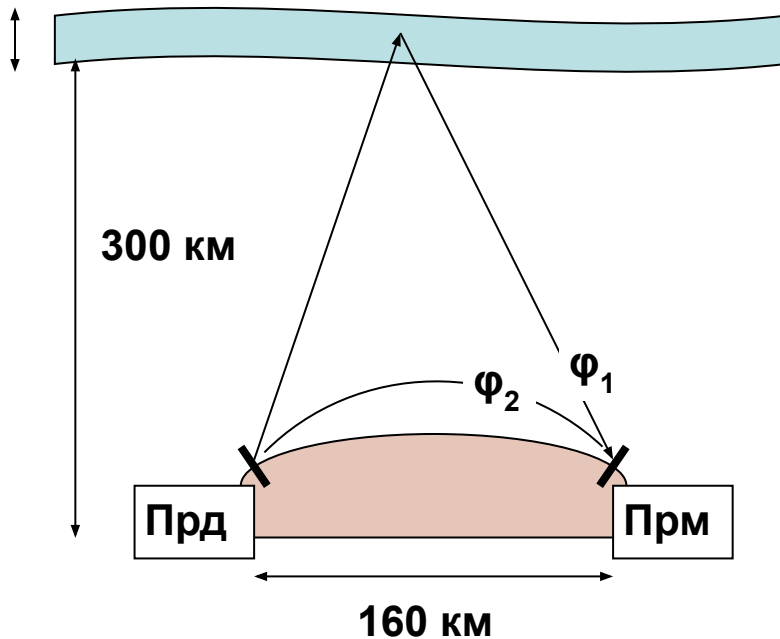
- диапазон измерения;
- ошибка измерения;
- границы рабочей зоны;
- время измерения (ожидания).

История развития радиолокации

- 1897 г. – А.С. Попов во время опытов по радиосвязи на Балтийском море, заметил, что связь нарушалась, когда между двумя кораблями проходил третий корабль.
- 1905 г. – выдан патент на «Способ обнаружения металлических предметов по отраженным ими радиоволнам» (Х. Хюльсмейер, Германия): наличие металлических предметов (кораблей, поездов и т. п.) обнаруживалось с помощью излучения радиоволн в сторону предполагаемого местонахождения предмета и приема отраженных радиоволн.
- 1922 г. – Г. Маркони предложил использовать явление отражения радиоволн для обнаружения объектов: при радиотелеграфии на волнах $\lambda \sim 1 \dots 3$ м, неоднократно наблюдалось помеховое действие отраженных волн.

Работы, связанные с исследованиями ионосферы

- 1924 г. – доказательство существования ионизированного слоя получено экспериментальным путем **методами радиолокации** (Э.Эплтоном и М. Барнеттом, Англия).



Аппаратура состояла из передатчика **непрерывных колебаний** ($\lambda \approx 395$ м – диапазон СВ) и приемника с гальванометром на выходе, расположенного от передатчика на расстоянии 160 км. (**Зачем относить приемник так далеко?**) В дневное время приемник фиксирует только поверхностную волну. В ночное время проявляется воздействие второй волны, отраженной от ионизированного слоя. В результате интерференции этих двух радиоволн амплитуда сигнала на выходе приемника будет меняться в зависимости от их фазовых соотношений.

Справка: Слой F отражает радиоволны, что делает возможным передачу радиосигналов КВ-диапазона на значительные расстояния. Максимальная концентрация электронов и ионов в области F находится на высотах 250-400 км. За открытие слоя F английскому физикау Э.Эплтону была присуждена *Нобелевская премия по физике* в 1947 г.

Задача определения высоты полета самолета

- альтиметр Ю. Бентли (патент США 1928 г.).
Метод основан на излучении **непрерывных частотно-модулированных радиоволн** и приеме отраженных от земли радиоволн. В результате интерференции излучаемой и отраженной радиоволн на выходе приемника возникали биения с разностной частотой, пропорциональной высоте полета самолета.

Развитие науки всегда связано с наличием **практической проблемы** и необходимостью ее решения.

Основная практическая потребность, приведшая к развитию радиолокации → **задача своевременного обнаружения самолетов**, независимо от метеорологических условий и времени суток.

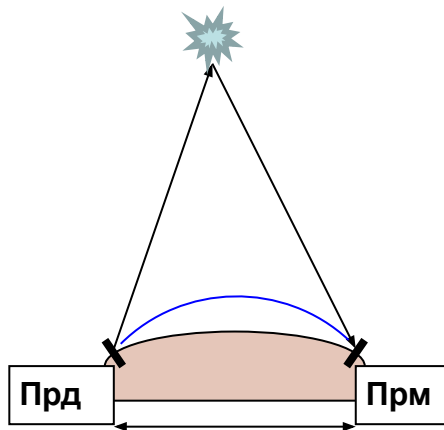
Существовавшие (1920-30-е годы) методы обнаружения самолетов:

- оптические;
- звуковые

отстали от темпов развития авиации и оказались непригодны!

Радиолокация начала развиваться именно **в интересах ПВО** примерно в одно и то же время в различных странах – в СССР, США, Англии, Германии, Франции, Японии в режиме строжайшей секретности.

- Структура первых РЛС была заимствована из опыта ионосферных исследований:
 - непрерывное радиоизлучение;
 - метровый диапазон волн;
 - обнаружение отражающих объектов по эффекту интерференции радиоволн.



- **Интерференционный метод** был заманчив своей технической подготовленностью, так как для его реализации могли быть использованы уже имевшиеся средства радиотехники: генераторы и приемники непрерывных радиоизлучений. При этом можно было использовать узкополосную аппаратуру, что позволяло снизить мешающее действие различного рода помех. **Проблема** – амплитуды интерферирующих радиоволн должны быть сопоставимы.
- Однако **непрерывный режим** радиоизлучений создавал большие трудности по развязке передающей и приемной антенн, требовавшей разноса передатчика и приемника в пространстве на десятки километров.

Начало работ по радиообнаружению самолетов в СССР (инициатор - Управление ПВО)

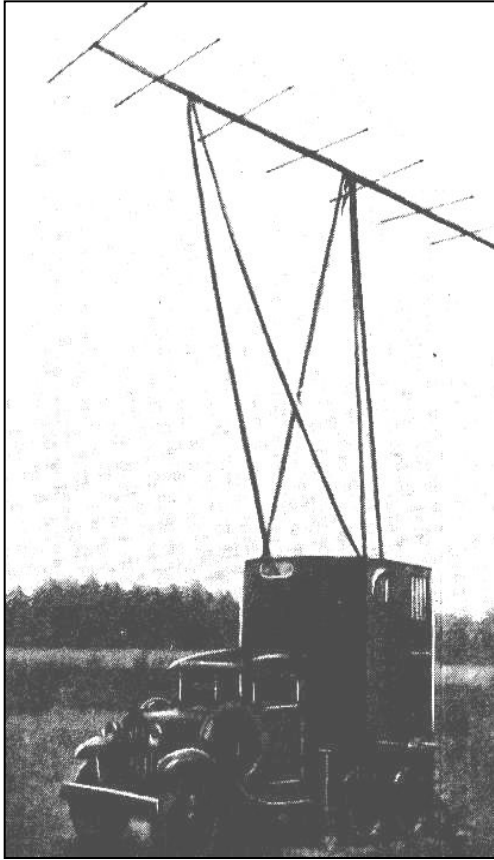
- 1939 г. — проведена серия экспериментов по обнаружению гидросамолета. Использовались передатчик **непрерывного излучения**, зеркальная параболическая антенна диаметром 2 м с диаграммой направленности 5-6 градусов и коническая развертка луча в пределах 40-50 град. Достигнута дальность обнаружения 8-10 км при мощности передатчика порядка десятков ватт и длине волны 10-20 см. Изготовлены опытные образцы зенитной РЛС: Б-2 и Б-3.

Направления дальнейшего развития РЛ:

- переход к **импульсному режиму** излучения → развязка антенн за счет временного разнесения излучаемого и принимаемого импульсов → отказ от двухпозиционных систем;
- это потребовало разработки **компонентов электронной техники**:
 - генераторные лампы высокой импульсной мощности,
 - чувствительные широкополосные приемники,
 - быстродействующие индикаторы;
- постепенное **увеличение излучаемых мощностей** (1 ... 100 кВт) и переход к **более коротким волнам** (от единиц метров до сантиметров).

Первые импульсные РЛС

- 1935 г. – начало работ по заказу Управления ПВО в Ленинградском ФТИ по освоению импульсной техники в УКВ-диапазоне.
- Была разработана импульсная генераторная лампа ИГ-7 ($\lambda = 3,5 \dots 5$ м, $P = 50$ кВт), ставшая основным типом генераторных ламп в РЛС.
- Проведены экспериментальные исследования по рассеянию самолетом электромагнитной энергии.
- Для устранения воздействия передатчика на приемник предполагалось разнести их на расстояние 300-500 м (пока нет антенного переключателя).
- 1937 г. – первые опыты по обнаружению самолета. Отраженные импульсы фиксировались **визуально** на экране ЭЛТ на дальности 17 км при мощности передатчика около 1 кВт.
- 1938 г. – изготовлена новая установка с передатчиком на генераторных лампах ИГ-8 мощностью до 40-50 кВт в импульсе и передающей антенной типа «волновой канал». Приемная антенна располагалась на расстоянии 1 км. Достигнута дальность обнаружения самолета на высоте 1500 м на дальности до 50 км.
- В результате была создана подвижная импульсная РЛС кругового обзора «Редут». Станция использовалась в «зимней» войне с Финляндией.



- 1940 г. — изготовлено два опытных образца РЛС «Редут» ($\lambda = 4$ м, $P = 50$ кВт в импульсе). Состав РЛС: передатчик, смонтированный внутри фургона, вращающегося на шасси автомашины; приемник в таком же синхронно вращающемся фургоне на другой автомашине с индикатором на электронно-лучевой трубке, две антенны типа «волновой канал», **жестко укрепленные на каждом фургоне**. Дальность действия до 100 км. Две отдельные антенны с синхронным вращением создавали конструктивное неудобство.

- РЛС «Пегманит» с объединенной приемо-передающей антенной принята на вооружение и выпускалась в течение всей войны. Вращение автофургона было заменено вращением только антенны. Передача высокочастотной энергии к антенне обеспечивалась **вращающимся переходом**.

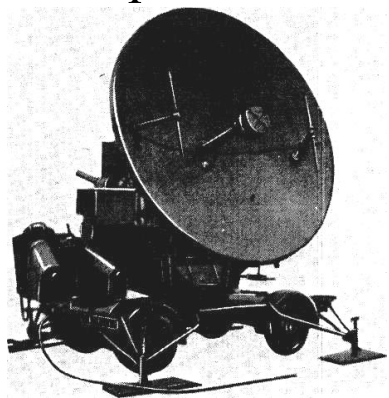
Оснащение флота СССР радиолокационной техникой

- 1940 г. – задание на разработку корабельного варианта РЛС «Пегматит».
- 1944 г. – РЛС «Гюйс» на волне 1,5 м. После успешных испытаний на Северном флоте разработана модификация «Гюйс-1» с мощностью 60-80 кВт в импульсе и дальностью обнаружения линкора 15 км, крейсера – 13 км, эсминца – 9 км, тральщика – 7,5 км. РЛС имела антенну типа «волновой канал» с частотой вращения 3 ... 5,5 об./мин и успешно использовалась до конца войны.

Опыт других стран

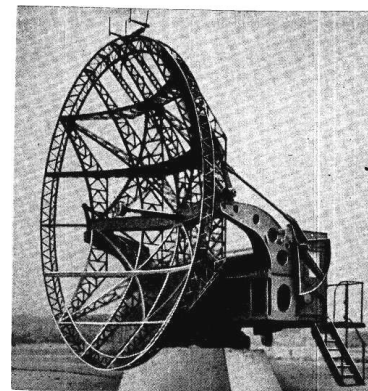
- Аналогичные разработки радиолокационной техники проводились в США, Англии, Франции, Германии и Японии.
- В **США** был разработан импульсный радиолокатор SCR-268, работавший на частоте 110 МГц. Радиолокатор имел одну передающую и две приемных антенных решетки для пеленгации **равносигнальным методом**. Дальность обнаружения самолетов типа В-10 составляла 36 км, точность пеленгации – около 4 град. по азимуту и 2,5 град. по углу места.

- В Германии разработки РЛС велись в интересах ВМФ, на который возлагались задачи по нарушению океанских коммуникаций Англии.
- Фирма «Гема» сконструировала в 1939 г. станцию дальнего обнаружения надводных и воздушных целей «Фрейя» с рабочей волной 2,4 м.
- Характеристики:
 - «Фрейя-Ф Лафет» имела импульсную мощность 12 кВт и дальность действия 100 км,
 - «Фрейя-LZ» – 25 кВт и 150 км соответственно.



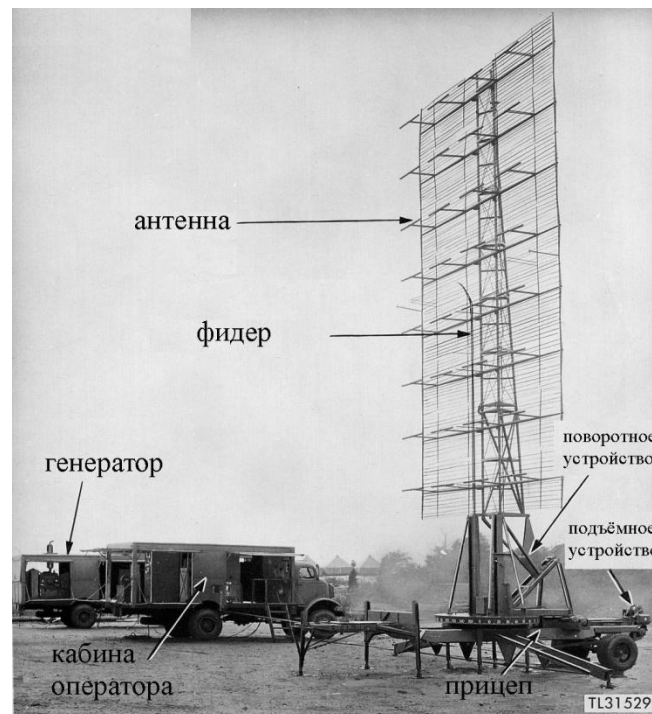
- 1940 г. — немецкая фирма «Телефункен» начала массовый выпуск РЛС для ПВО - станция орудийной наводки «Вюрцбург». Первые серийные образцы станции работали на волне 53 см, имели импульсную мощность 8 кВт и дальность действия около 35 км.

- 1942 г. — РЛС «Большой Вюрцбург» - стационарная с параболической антенной диаметром 7,5 м (вместо 3 м), вращающейся в азимутальной плоскости с частотой 1,5 об./мин., обеспечивала точность $\pm 0,1$ град. методом конического сканирования луча.



Нападение на Перл-Харбор

- **Нападение на Перл-Харбор** — внезапное нападение японской палубной авиации на американские военно-морскую и воздушную базы на Гавайских островах утром 7 декабря 1941 года.
- В атаке участвовало 353 самолёта, вылетевших с 6 японских авианосцев. Итогом нападения стало затопление четырёх линейных кораблей ВМС США, ещё четыре были повреждены. Японцы также уничтожили около 250 самолетов; жертвы — 2403 убитых и 1178 раненых.
- За 50 минут до нападения японские самолёты были обнаружены РЛС [SCR-270](#), но американцы посчитали эти самолёты своими.



| | |
|-----------------------|---------------|
| Диапазон частот | 110 МГц |
| Частота импульсов | 621 Гц |
| Длительность импульса | 10 — 30 мкс |
| Частота вращения | 1 об/мин |
| Макс. дальность | 190 км |
| Пиковая мощность | 100 – 300 кВт |
| Ширина луча А / УМ | 28° / 10° |
| Точность по дальности | 7300 м |
| Точность по азимуту | 4° |

Сравнительные данные радиолокаторов дальнего обнаружения 1940-х годов

| Характеристики | РУС-2с (СССР) | MRV (Англия) | SCR-270 (США) | Фрейя F-L (Германия) | Вассерман-М (Германия) |
|------------------------------|------------------|-----------------|------------------|-------------------------|---------------------------|
| Дальность обнаружения, км | 150 | 100 | 200 | 200 | 300 |
| Время развёртывания, ч | 8 | 60 | 40 | 48 | - |
| Длина волны, м | 4 | 7 | 2,7 | 2,4 | 1,9-4 |
| Мощность импульса, кВт | 70-120 | 200 | 100-300 | 25 | 80-150 |
| Точность по дальности, км | 1,5 | - | 7 | 1 | 1 |
| Точность по азимуту, градусы | 3 | - | 4 | 0,5 | 0,25 |

Направления развития РЛ после Второй мировой войны

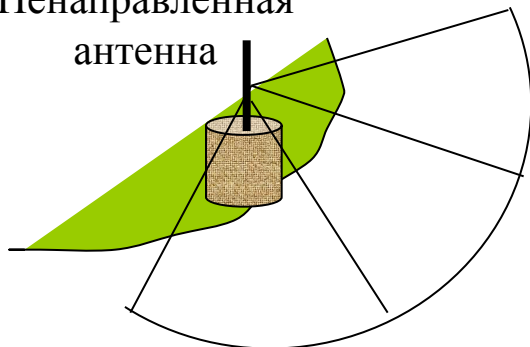
- Применение РЛС как в военных так и в *гражданских отраслях*, включая радионавигацию, геологию, геодезию, метеорологию;
- использование *научных достижений* теории информации и кибернетики, вычислительной техники, антенно-фидерной, приемо-передающей и индикаторной техники, системотехники, теории автоматического управления;
- эволюция *генераторных и усилительных приборов* в направлении дальнейшего увеличения мощности, стабильности их характеристик и эффективности. **Магнетрон** — первый генераторный прибор, обеспечивший высокие мощности в СВЧ диапазоне; позднее - клистроны и лампы бегущей волны обеспечили переход к более высокочастотным диапазонам;
- совершенствование *зеркальных антенн*, а также *ФАР*, обеспечивающих быстрое электронное сканирование пространства;
- значительное повышение *чувствительности приемников*;
- внедрение ЭВМ в процессы *обработки информации и управления РЛС*;
- все более широкое использование *доплеровского метода* селекции целей;
- освоение режима излучения радиосигналов с *внутриимпульсной модуляцией и сжатием импульсов* в приемнике.

История развития радионавигации

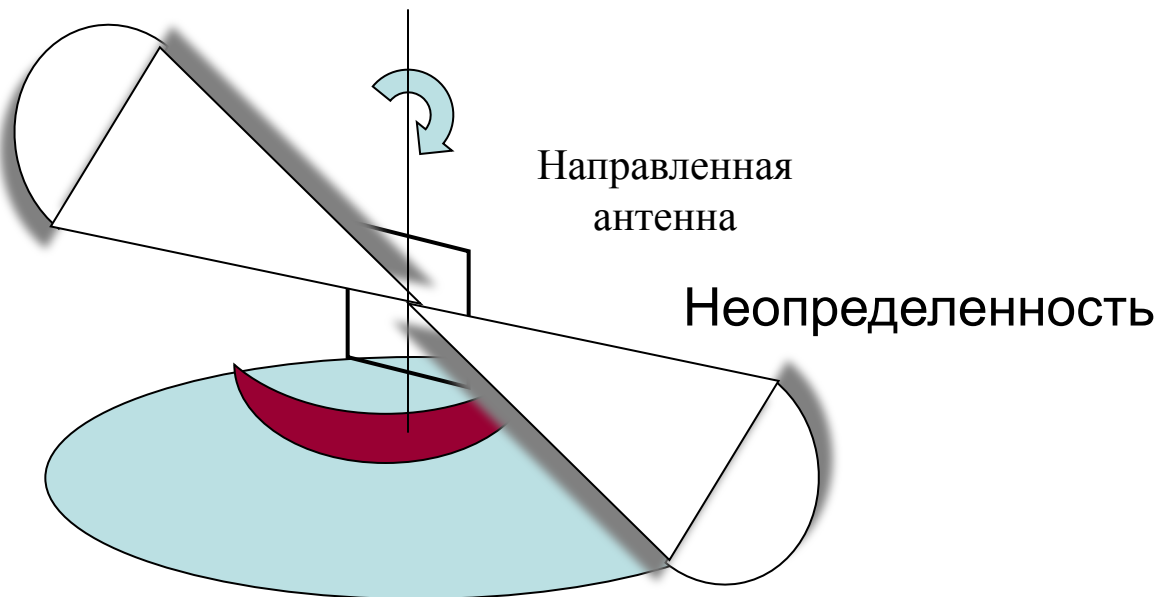
- Первые идеи по использованию радиоволн для ориентации кораблей были высказаны А.С. Поповым.
- 1905-1907 гг.— начались исследования простейших направленных рамочных антенн, а также изучение закономерностей распространения радиоволн, и был предложен принцип гониометра (пространственное вращение диаграммы направленности неподвижных антенн).
- предложен принцип радиомаяка с равносигнальной зоной, (предназначаются для обеспечения вождения судов по прямолинейным фарватерам. Вождение по зоне осуществляется путём удержания судна в пределах зоны равной слышимости двух сигналов)
- были начаты работы по созданию простейших слуховых радиопеленгаторов (Никола́й Дми́триевич Папале́кси (1880 - 1947) физик, академик АН СССР. Признанный основоположник советской радиоастрономии.).
- 1910-1914 гг. — созданы первые радионавигационные пеленгаторы использовались для радиоразведки (пеленгование передатчиков германских кораблей), а также для ориентирования своих кораблей. Радиопеленгатор содержал 16 рамочных антенн, к которым поочередно подключался приемник, и по минимуму слышимости определялся пеленг.

- 1910-1914 гг. — в России, Франции, США создаются первые **корабельные радиопеленгаторы** с поворотными рамками и слуховой индикацией для приема сигналов береговых ненаправленных радиомаяков и определения пеленга на радиомаяк с корабля. Радиопередатчики маяка были искровыми, работавшими в диапазоне 200 - 600 кГц. Дальность их действия составляла 85 - 100 км.

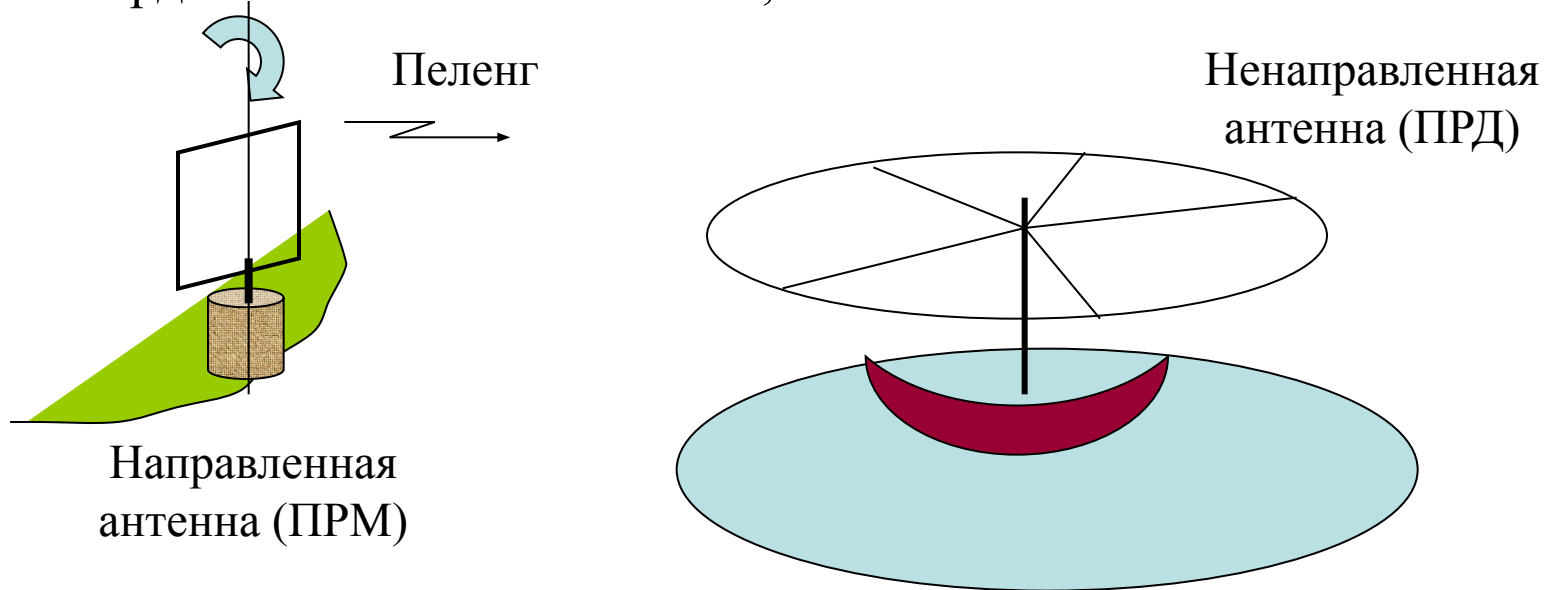
Ненаправленная
антенна



Что регистрировать:
максимум или
минимум?



- После Первой мировой войны задачи радионавигации расширились в связи с развитием **авиации**.
- После 1918 г. по берегам морей и около аэропортов началась установка **наземных радиопеленгаторов**. Пеленг выдавался по запросу корабля (самолета) по радиолинии связи. Корабельные передатчики были искровыми, мощностью 0,5-10 кВт, частота – 100 - 545 кГц). Дальность действия доходила до 600 км. Точность пеленга была невысокая, порядка 2-3 градусов. Она зависела от угла молчания (пеленгование по минимуму), который доходил до 10 градусов. Процедура определения координат занимала не менее 1,5 - 2 мин.



- Наземные радиопеленгаторы не получили значительного применения из-за прогресса в технологии и конструировании бортовой радиоаппаратуры и перспектив создания надежных малогабаритных бортовых радиопеленгаторов со значительно большими возможностями.
- Сложнее оказалась проблема применения слуховых радиопеленгаторов на самолетах. Первые приборы были слишком громоздки. Так, например, немецкий самолетный радиопеленгатор фирмы «Телефункен» содержал поворотную рамку диаметром 80 см на полутораметровой колонке. Поворот рамки осуществлялся вручную штурвалом.
- 1930 - 1935 гг. – определились принципы действия, выявились потенциальные возможности и практические трудности РНС со слуховой индикацией. Расширение круга задач, стоящих перед авиацией и флотом, потребовало коренных улучшений РНС.

Были достигнуты определенные успехи в развитии элементной базы: разработаны малогабаритные и надежные лампы, высокочастотные магнитные сердечники, пленочные резисторы, компактные бумажные и слюдяные конденсаторы.

- Применение радиоуказателей курса («магнитный компас») – так называемые индикаторы типа «лево-нуль-право». Они позволяли с борта определять направление на наземный радиомаяк. Об отклонении от курса можно было судить с помощью стрелочного прибора. Система была удобной для привода самолетов на аэродром по сигналам «приводной аэродромной радиостанции». Бортовые приводные РНС получили название **радиополукомпасов**.

радиополукомпас – это самолётный радиопеленгатор для полуавтоматического нахождения направления на наземные передающие радиостанции, отличающийся от радиоконпаса отсутствием следящей системы (поворот рамки его антенны осуществляется вручную).

- В СССР по военно-тактическим соображениям большое значение имели самолеты с малочисленными экипажами (истребители и т. п.). В этих условиях обычные радиополукомпасы оказывались чрезмерно сложными в технической эксплуатации, трудоемкими в изготовлении.
- В период войны в связи с появлением реактивных самолетов проявились ограничения, свойственные радиополукомпасам: значительное аэродинамическое сопротивление антенны, необходимость управления ручками приборов и т. д. По этим причинам были начаты работы по созданию внутрифюзеляжных антенн и **автоматических радиоконпасов**.

- В авиации и на флоте существует необходимость определения координат с высокой точностью.
- К 1930 г. стало ясно, что использовавшиеся в то время угломерные системы со слабонаправленными антеннами имели по точности принципиальные ограничения, вызванные рядом непреодолимых факторов, связанных с особенностями распространения радиоволн (например отражения и переизлучения от зданий, предметов и элементов рельефа местности), а также с тем, что при определенной угловой ошибке линейная ошибка увеличивалась пропорционально дальности.
- Угломерные средневолновые системы повышенной точности, например немецкая «Зонне», а также разработанная на ее основе английская система «Консол» (40-е годы), позволили уменьшить угловые ошибки до 0,3 градусов при дальности до 1500 км.
- Это соответствует линейной ошибке $0,3 * (\pi/180) * 1500 \approx 8$ км

- В амплитудных пеленгаторах ошибки в основном зависели от ширины диаграммы направленности. Погрешность амплитудных пеленгаторов при антеннах много больших, чем длина волны, составляла (в радианах)

$$0,03 * \lambda / l_A$$

- Увеличение размеров направленных антенн в амплитудных пеленгаторах связано со значительными техническими трудностями, и их стоимость пропорциональна квадрату размеров.
- В фазовых же пеленгаторах разнос между независимо работающими простыми ненаправленными антеннами можно сделать большим без значительного увеличения стоимости и тем самым увеличить точность определения координат.

- Значительно более перспективным оказалось использование фазовых принципов, основанных на **измерениях разностей фаз радиоволн**, принятых от нескольких радиопередатчиков, положение которых на местности точно известно.
- Принципиальные преимущества таких систем для точных определений координат за пределами прямой видимости были оценены советскими учеными, академиками Л.И. Мандельштамом и Н.Д. Папалекси, которые с 1930 г. начали проводить исследования, закончившиеся созданием системы для высокоточной морской радионавигации.
- При дальностях действия до 100-200 км фазовая система обладала погрешностью 10-20 м, или 0,01 % от дальности, что соответствует эквивалентной угловой ошибке 0,01-0,02 градусов.

- Современные системы спутниковой радионавигации, например системы GPS (США) и ГЛОНАСС (Россия), обеспечивают точность определения координат порядка единиц метров, а их абонентское оборудование реализовано в габаритах мобильного телефона.
- Спутниковая РНС включает следующие основные элементы:
 - орбитальную группировку, состоящую из нескольких спутников, излучающих специальные радиосигналы;
 - наземную систему управления и контроля, включающую блоки измерения текущего положения спутников и передачи на них полученной информации;
 - приемное клиентское оборудование («спутниковые навигаторы»), используемое для определения координат.
- Принцип работы спутниковых систем навигации основан на измерении расстояния от объекта, координаты которого необходимо определить, до спутников, положение которых известно с большой точностью.
- Расстояния от спутника до приёмника определяется по времени распространения радиосигнала. Каждый спутник навигационной системы излучает сигналы точного времени в составе своего сигнала.