# НЕСКОЛЬКО ДЕМОНСТРАЦИЙ ПО ЭФФЕКТУ ДОППЛЕРА И ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В САНТИМЕТРОВОМ РАДИОДИАПАЗОНЕ

1. Явление Допплера в сантиметровом диапазоне радиоволн удобно демонстрировать с помощью интерферометра, общий вид которого приведен на рис. 1. Основной деталью прибора является простой разветвитель, представляющий собой соединение

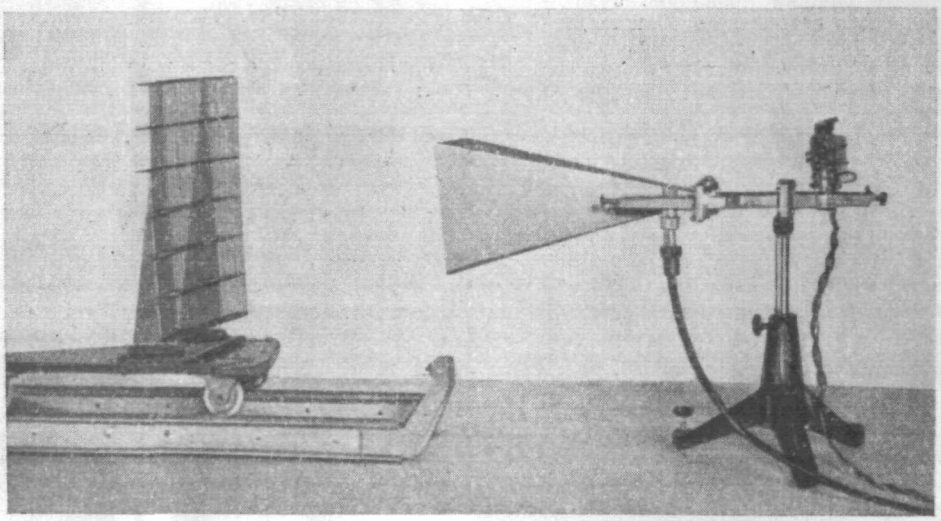

Рис. 1.

трех волноводных линий, спаянных под углом 120° друг к другу. К одному концу разветвителя присоединяется маломощный клистронный генератор, ко второму — отрезок линии с детектором и к третьему — пирамидальная рупорная антенна. Линии с детектором и клистроном имеют короткозамыкающие поршни для их настройки. Перед

рупором на тележке устанавливается зеркало-отражатель, который можно привести в движение по рельсовой дороге в направлении к рупору и обратно.

Принцип действия радиоинтерферометра состоит в следующем: радиоволны, поступающие по волноводу от клистронного генератора, в разветвителе расщепляются на два пучка, один из которых направляется к детектору, а другой — через излучающий рупор — к отражателю. Отразившись, второй пучок волн через упомянутый рупор снова поступает в разветвитель и после вторичного расщепления интерферирует с волнами первого пучка. В зависимости от разности хода интерферирующих радиоволн первого и второго пучков с детектора снимается напряжение различной амплитуды. Таким образом, при отражении радиоволн от движущегося зеркала, установленного в одном из плеч интерферометра, можно наблюдать смещение интерференционной картины или регистрировать явление биений радиоволн с несколько разными частотами [1]. Это различие частот возникает в результате эффекта Допплера для одной из радиоволн, испытавшей отражение от движущегося зеркала. Демонстрация укладывается в известные схемы наблюдения и регистрации так называемых световых биений, развитые Риги еще в 1883 г.

Подобным способом, например, осуществлена демонстрация эффекта отражения света от движущегося зеркала в работе [2]. Применение для учебных целей радиоинтерферометров приводится также в работах [3, 4]. Однако принятый в [3] метод регистрации интерференционных явлений стрелочным прибором и малый ход подвижного зеркала [3, 4] имеют тот недостаток, что отсутствует пространственная визуализация интерференционного эффекта.

В наших опытах при показе допплер-эффекта одновременно со слуховым приемом сигнал просматривался на осциллоскопе И4-М с длительным послесвечением экрана ø31 *см*. Используемый в интерферометре отражатель собран на эпоксидной смоле из медных вертикальных (для волн типа $TE_{01}$) проволочек ø 2 *мм* и образует сферическую поверхность с радиусом кривизны $R = 3$ *м*. Сферический отражатель имеет ряд преимуществ. Например, при его перемещении в пределах 0,8—2,6 *м*, считая от переднего среза рупора, полученное значение коэффициента стоячей волны ($K_{\text{с.в}} = E_{\max}/E_{\min}$) в два с лишним раза больше для сферического отражателя по сравнению с плоским металлическим отражателем при одинаковых размерах 310 × 240 *мм*$^2$. Кроме того, сферический отражатель менее чувствителен к неточности установки относительно оптической оси рупор — отражатель.

Эта установка производилась следующим образом. Отражатель с тележкой подкатывался в ближайший к рупору конец рельсовой дороги. Путем регулировок рупор ориентировался таким образом, чтобы центр раскрытия рупора лежал на горизонтали, проходящей через центр отражателя, а углы переднего среза рупора касались поверхности отражателя. Затем рельсовая дорога оттягивалась на 0,4—0,5 *м* вдоль направления рельсов от рупора. Такая настройка всегда была достаточной и оптимальной.

В опытах с интерферометром высокочастотное излучение клистронного генератора модулировалось звуковой частотой 800 *гц* и напряжением около 40 *мв*, для чего постоянное напряжение от выпрямителя УИП-1 М на отражатель клистрона подавалось последовательно с выходной обмоткой трансформатора звукового генератора ГЗ-3 М. Применение модулированного излучения представляет большие удобства, так как для усиления сигнала с детектора ДК-И 2 М можно использовать обычные усилители низкой частоты. Усиленный сигнал прослушивался через громкоговоритель и одновременно просматривался на экране осциллоскопа, работавшего с медленной линейной разверткой осциллограммы во времени с периодом развертки 5—10 *сек*.

Установив слабую связь возбуждающего штыря клистрона (тип К-27, длина волны в свободном пространстве равна 3,2 *см*) с волноводной линией, опытным путем подбиралось положение короткозамыкающих поршней так, чтобы при перемещении зеркала-отражателя на экране осциллоскопа получалась картина биений без искаженной огибающей и с достаточно большим к. с. в.

*Демонстрация* проводится следующим образом. После полной настройки интерферометра отражатель устанавливается в средней части рельсовой дороги в положении, соответствующем минимуму сигнала с детектора. В момент начала очередной развертки луча осциллоскопа отражатель вместе с тележкой приводят вручную в медленное движение. При этом наблюдают периодическое увеличение и уменьшение сигнала с частотой биений. Очевидно, эта частота биений равна скорости движения отражателя, выраженной через число полуволн, проходимых отражателем в 1 *сек*. На рис. 2, *а* приведена осциллограмма, соответствующая движению отражателя с убывающей скоростью (средняя скорость 2—3 *см/сек*, частота биений 1—2 *гц*). Некоторое искажение сигнала — сдвиг максимумов из центрального положения — обусловлен отражением радиоволн от детектора из-за сильной связи последнего с линией [5]. Опыт можно успешно проводить при перемещении отражателя в пределах расстояний 0,4—3,5 *м* между передней кромкой рупора и отражателем.

2. *Демонстрацию интерференционной картины стоячих волн*, образующихся в свободном пространстве между зеркалом-отражателем и приемно-передающей антенной, можно провести с описанным выше радиоинтерферометром, но с несколько измененным

способом регистрации принимаемого с детектора сигнала. Это изменение предпринято с целью «визуализации» интерференционной картины и состоит в следующем. На рельсовую дорогу устанавливается и фиксируется в специальных отверстиях высокоомный реостат длиной 200—300 *мм* со скользящим токосъемным контактом. Можно использовать лабораторные проволочные реостаты либо изготовленные путем намотки на цилиндрический каркас нескольких слоев электропроводной бумаги (применяемой при физических моделированиях потенциальных полей). Находящаяся между реостатом и антенной тележка с отражателем жестко скрепляется посредством штыря со скользящим токосъемным контактом реостата, так что при перемещении от руки скользящего контакта одновременно происходит перемещение тележки с установленным на ней отражателем. К концам реостата от выпрямителя УИП-1М или от батареи подключается постоянное напряжение 50—60 *в*, а напряжение, снятое с токосъемного контакта и одного из концов реостата, подается на вход осциллоскопа, работающего в режиме внешней развертки луча Усиление горизонтальной развертки устанавливают

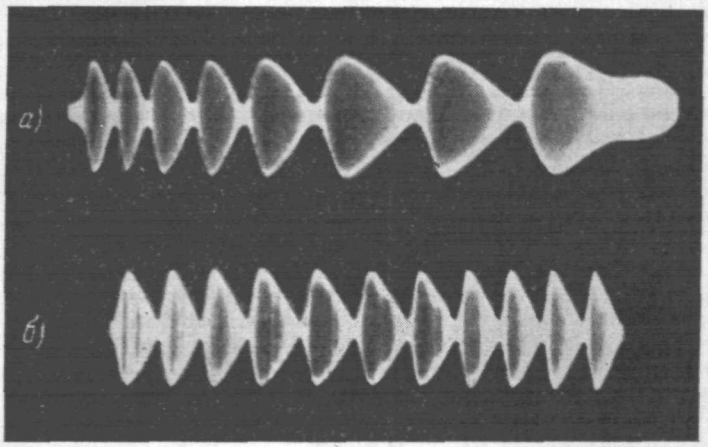


Рис. 2.

таким, чтобы при перемещении токосъемного контакта (а следовательно, и отражателя) на определенное расстояние пятно изображения луча на экране осциллоскопа перемещалось на то же расстояние и в ту же сторону. Это существенно для последующих измерений длины волны излучения. В остальном настройка интерферометра производится описанным в предыдущей демонстрации способом.

*Демонстрация.* Перемещая от руки взад-вперед токосъемный контакт и связанный с ним отражатель при выключенном питании клистрона и включенной цепи горизонтальной развертки осциллоскопа, показывается синхронность перемещения отражателя и пятна электронного луча на экране. Затем включается питание клистрона и при медленном перемещении отражателя прослушивается на слух и наблюдается на экране осциллоскопа картина стоячих электромагнитных волн (рис. 2, *б*). Благодаря длительному послесвечению экрана, кроме качественной демонстрации интерференционной картины, в опыте можно произвести измерение длины волны в свободном пространстве. Для этого необходимо предварительно измерить расстояние $l$ между двумя фиксированными точками на экране, например между двумя краями маски, наложенной на экран, и отсчитать число полуволн $N$, укладывающихся между этими точками; тогда, в соответствии с установленным в осциллоскопе специальным режимом развертки, длина волны $\lambda$ определится из условия $\lambda = 2l/N$.

3. *Интерференция волновых пучков, вышедших из двух щелей (схема Юнга).* Этот опыт, являющийся одним из основных, иллюстрирующих волновую природу электромагнитного излучения, может быть проведен на установке, показанной на рис. 3. Электромагнитные волны, возбуждаемые клистронным генератором, поступают по волноводу к разветвителю (описанному выше) и расщепляются на два пучка, каждый из которых излучается по одному из двух так называемых $E$-плоскостных секторных рупоров [6], образующих сдвоенную антенну. Тип рупоров выбран, исходя из необходимых для нормального проведения опыта условий получения широкой диаграммы направленности излучения в горизонтальной плоскости и узкой — в вертикальной. Кромки рупоров впаяны в кромки излучающих отверстий металлического экрана, укрепленного на вертикальном штыре. Вся излучающая система в целом может быть приведена рукой во вращательное вокруг оси штыря движение в пределах $\pm 90°$ в под-

шипнике, установленном в подставке. В подставку встроен потенциометр типа СП, ось токосъемного контакта которого жестко связана с вышеуказанным штырем. К концам потенциометра подключается источник постоянного напряжения 50—60 *в*, а напряжение, снятое с делителя, подается на вход осциллоскопа, соединенного с приемным устройством (см. ниже), так что при поворачивании от руки всей излучающей системы вправо или влево из среднего положения пропорционально увеличивается

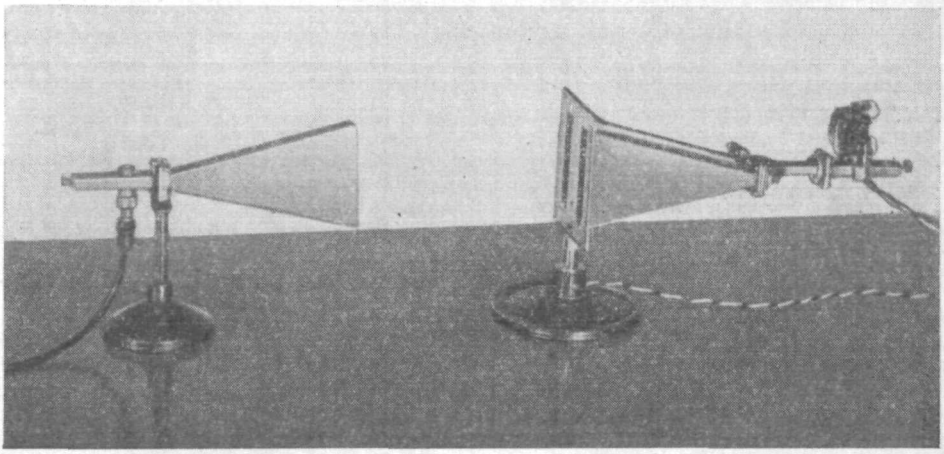

Рис. 3.

или уменьшается постоянное напряжение, подаваемое на вход осциллоскопа. Прием радиоволн, вышедших из щелей излучателей, осуществляется одиночным *E*-плоскостным секторным рупором, установленным на расстоянии 1—2 *м* от излучателей. Усиление и наблюдение сигнала производится уже описанным способом.

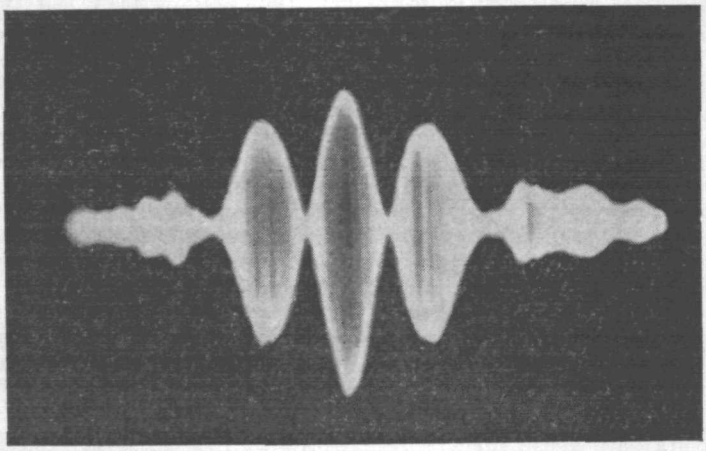

Рис. 4.

*Демонстрация*. При повороте вправо — влево из среднего положения излучающей системы при выключенном питании клистрона и включенной цепи горизонтальной развертки показывается синхронное перемещение святящегося пятна на экране осциллоскопа.

Включив клистрон и медленно поворачивая излучающую систему, на слух и визуально наблюдают с детектора приемной антенны сигнал, амплитуда которого зависит от разности фаз интерферирующих волн, вышедших из двух щелей. Осциллограмма явления приведена на рис. 4. Небольшая асимметрия крайних максимумов обусловлена нелинейной зависимостью снятого с потенциометра напряжения от угла поворота излучающей системы.

В заключение отметим, что опыт может быть проведен и в другом варианте (осуществление которого было бы затруднительно в оптическом диапазоне), когда излучателем является одиночный рупор, а прием радиоволн производится сдвоенной антенной. Для этого достаточно поменять местами отрезки волноводов, содержащие клистронный генератор и детектор. Поворачивая приемную сдвоенную антенну, можно наблюдать такую же интерференционную картину, как и в первом варианте.

*Ф. Х. Байбулатов*

Новосибирский государственный университет

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. К. Шеффер, Теоретическая физика, т. 3, ч. 2, «Оптика», М., ГОНТИ, 1938, стр. 186—189.
2. Д. Даттон и др., УФН 88 (4) 756 (1966).
3. C. L. Andrews, Amer. J. Phys. 33 (11) (1965).
4. Л. П. Стрелкова, Изв. вузов (Физика), № 6 (1965).
5. А. А. Брандт, Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах, М., Физматгиз, 1963, стр. 168—169.
6. В. И. Бекетов, Антенны сверхвысоких частот, М., Воениздат, 1957, стр. 39—46.