

И. Л. БЕРШТЕЙН

## ОПЫТ САНЬЯКА НА РАДИОВОЛНАХ

(Представлено академиком А. А. Андроновым 16 X 1950)

1. Здесь дается краткое описание опыта, являющегося радиофизическим аналогом классического оптического „вихревого опыта“ Саньяка (1913 г.) <sup>(1)</sup> \*. Нами обнаружено и измерено изменение скорости распространения радиоволн в концентрическом кабеле, намотанном на барабан, происходящее вследствие вращения последнего. Опыт проводился на волне длиной 10 м. С точностью до ошибок измерения полученный эффект совпадает с тем, который следует из теории.

Интерес описываемого опыта мы видим в том, что: 1) он является (насколько нам известно) первым радиофизическим опытом по электродинамике движущихся тел и 2) распространение волны в нашем опыте происходит в среде, сильно отличающейся от вакуума (диэлектрик, заполняющий кабель, имеет диэлектрическую проницаемость  $\epsilon = 2,24$ ); вследствие этого в описываемом опыте, как и в оптическом опыте Физо с текущей жидкостью, существенную роль играет (говоря языком дорелятивистской физики) френелевский „эффект увлечения“.

В наших опытах вращение барабана вызывало относительное изменение скорости распространения порядка  $10^{-8}$ . Измерение столь малого эффекта оказалось возможным благодаря приему, идея которого заключается в следующем. С помощью переключателя периодически коммутируется направление распространения волны в кабеле, вследствие чего (при вращении барабана) происходит периодическое скачкообразное изменение разности фаз между колебаниями на концах кабеля. Это изменение составляет величину порядка 1 угловой секунды; измерить его удалось посредством метода, аналогичного разработанному ранее методу для измерения флуктуаций фазы лампового генератора <sup>(3,4)</sup>.

2. Так как речь идет об опыте „первого порядка“, его теорию можно рассмотреть, пользуясь дорелятивистскими представлениями. Скорость волны в кабеле (здесь, как и везде дальше, имеется в виду фазовая скорость) при неподвижном барабане равна  $c/\sqrt{\epsilon}$ , где  $c$  — скорость света в вакууме. При вращении барабана скорость волны относительно неподвижного наблюдателя будет

$$\frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \pm u \left(1 - \frac{1}{\epsilon}\right), \quad (1)$$

где  $u$  — линейная скорость барабана,  $(1 - 1/\epsilon)$  — френелевский „коэффициент увлечения“; знаки  $\pm$  соответствуют распространению волны вдоль и против движения барабана.

\* Несколько ранее Саньяка подобный же опыт был осуществлен Гарресом <sup>(2)</sup>.

Скорость волны относительно кабеля равна

$$\frac{c}{\sqrt{\varepsilon}} + \frac{u}{\varepsilon}. \quad (2)$$

Разность времени прохождения волной в одном и другом направлении всей длины кабеля  $L$  будет

$$\Delta\tau_1 = L \left\{ \frac{1}{\frac{c}{\sqrt{\varepsilon}} - \frac{u}{\varepsilon}} - \frac{1}{\frac{c}{\sqrt{\varepsilon}} + \frac{u}{\varepsilon}} \right\} \approx \frac{2Lu}{c^2} = \frac{4\pi LnR}{c^2}, \quad (3)$$

где  $n$  — число оборотов барабана в секунду,  $R$  — его радиус.

На опыте наблюдается эффект, вызванный изменением направления вращения барабана. Этому будет соответствовать величина

$$\Delta\tau = 2\Delta\tau_1 = \frac{8\pi LnR}{c^2}, \quad (4)$$

что дает сдвиг фазы, равный

$$\Delta\varphi = 2\pi f\Delta\tau = \frac{16\pi^2 fLnR}{c^2}, \quad (5)$$

где  $f$  — частота волны.

3. На барабане имеются генератор и приемник. Колебание высокой частоты поступает от генератора на вход приемника двумя путями: через кабель, давая на входе приемника напряжение амплитуды  $U_\phi$ , и через тот или иной обычный („сосредоточенный“) импеданс, давая там же напряжение амплитуды  $U_2$ . Положим, что параметры схемы так подобраны, что векторная диаграмма этих напряжений соответствует изображенному на рис. 1. На входе приемника получается напряжение  $U_0 \ll U_2$ , которое (после некоторого усиления) подается на детектор высокой частоты. Будем теперь периодически переключать концы кабеля, что соответствует периодической смене направления распространения волны в кабеле. Если при этом разность фаз  $\varphi$  меняется на малую величину  $\delta\varphi$ , то величина  $U_0$  будет периодически меняться на величину  $U_2\delta\varphi$ , что будет отмечено на выходе детектора высокой частоты.

4. Был изготовлен деревянный барабан диаметром 2 м, который может вращаться вокруг своей оси в ту и другую сторону. Вращение производилось при помощи мотора и редуктора. По ободу барабана был намотан концентрический кабель типа РК-3 (волновое сопротивление 50 ом,  $\varepsilon = 2,24$ ), длиной (за вычетом радиально расположенных участков) 244 м. Подставив в формулу (5) величины, имевшие место в наших опытах:  $f = 30,3 \cdot 10^6$  герц,  $R = 1$  м,  $n = 1 \div 1,3$  сек<sup>-1</sup>, получим  $\Delta\varphi = (1,3 \div 1,7) \cdot 10^{-5} \approx 3$  угловые секунды.

Вблизи оси на барабане установлена высокочастотная аппаратура, состоящая из генератора, приемника и переключающего блока. На оси барабана имеется токосъемник, через который осуществлялось питание аппаратуры, установленной на барабане, и ее связь с низкочастотной частью установки, собранной вместе с выходными измерительными приборами на отдельном столе (так называемый „пульт“). Генератор собран по трехкаскадной схеме, стабилизирован кварцем, с

возможностью плавно менять частоту в пределах 0,01%, с выходной мощностью 2 вт. Приемник содержит двухкаскадный усилитель и детектор высокой частоты. Переключающий блок содержит 2 реле, при помощи которых происходит периодическое переключение концов кабеля. Полный цикл коммутации происходит с частотой 12,5 герц. Принципиальная схема этого блока изображена на рис. 2. Емкость  $C$  равна примерно 52  $pF$ ; емкости  $C_1$  и  $C_2$  служат для уравнивания паразитных емкостей реле и схемы и имеют порядок 0,2  $pF$ . Сопротивление  $r$  имеет величину  $400 \div 600$  ом и необходимо для правильного подбора фазы колебания  $\bar{U}_2$ . Для уравнивания времени прохождения волны по кабелю в обоих направлениях при неподвижном барабане места подключения концов кабеля (точки  $A$  и  $B$  на рис. 2) могут перемещаться при помощи микрометрических винтов.

Выходное напряжение детектора высокой частоты через токоотъемник поступает на „пульт“, где его переменная составляющая усиливается усилителем низкой частоты (12,5 герц) и подается на балансный детектор вместе с напряжением, синфазным с напряжением, управляющим работой реле. Это позволяет определять не только величину эффекта, но и его знак. Наблюдение эффекта ведется по микроамперметру (с нулем посередине) на выходе балансного детектора и заключается в определении разности показаний этого прибора при изменении направления вращения барабана.

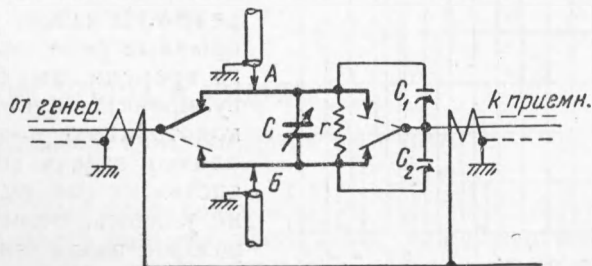


Рис. 2

Для сравнения наблюдаемой величины  $\Delta\varphi$  с найденным выше теоретическим значением этой величины надо знать величину  $U_{2k}$  ( $k$  — коэффициент усиления усилителя высокой частоты), коэффициент преобразования детектора высокой частоты и, наконец, чувствительность низкочастотной части „пульта“. В цепи нагрузки детектора высокой частоты имеется микроамперметр, по показаниям которого (после предварительной градуировки) можно определить величину  $U_0 k$ . Величину же  $U_{2k}$  можно определить на основе следующих соображений.

Пусть при некоторой частоте генератора величина  $U_0 = 0$ . Изменив частоту генератора на малую величину  $\Delta f$ , получим треугольник с углом  $\varphi$  и величиной  $U_0 \neq 0$ , причем

$$\varphi = 2\pi\Delta f \frac{L V_{\varepsilon}}{c} \cong \operatorname{tg} \varphi = \frac{U_0}{U_2}, \quad (6)$$

откуда

$$kU_2 = \frac{cU_0 k}{2\pi\Delta f L V_{\varepsilon}}. \quad (7)$$

Коэффициент преобразования детектора легко определяется из кривой его градуировки. Чувствительность же низкочастотной части „пульта“ определяется подачей на ее вход напряжения известной величины и той же формы и фазы, что и напряжение с выхода высокой частоты.

Правильность получаемого на опыте знака  $\Delta\varphi$  была проверена, исходя из того, что эффект увеличения скорости распространения волны на сдвиг фазы эквивалентен уменьшению частоты. Поэтому вращение барабана заменялось включением дополнительного реле, которое работало в такт с основными реле и в нужной фазе несколько изменяло частоту генератора.

5. Рассмотрение всего устройства в целом показывает, что устойчивость и точность обнаружения эффекта задаются, главным образом,

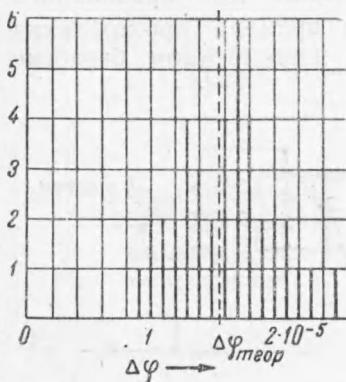


Рис. 3

стабильностью работы реле переключающего блока. Высокая чувствительность схемы требует высокой степени постоянства работы и паразитных параметров этих реле \*. В нашем распоряжении были лишь обычные реле поляризованного типа. Много времени нами было потрачено на их регулировку, некоторые добавления в их конструкцию, подбор режима их питания, однако задачу получения высокого постоянства их работы нам полностью решить не удалось. Этим в основном объясняется разброс наблюдаемого эффекта (см. ниже).

Нами было проведено несколько серий измерений эффекта, причем каждая серия состояла из 25 ÷ 40 наблюдений. На рис. 3 представлена типичная картина одной серии наблюдений. По оси абсцисс отложена величина эффекта, а по оси ординат — число наблюдений, давших такую величину эффекта. Погрешности калибровки аппаратуры могут дать расхождение наблюдаемого эффекта с теоретическим значением порядка 15%. Отклонение среднего по серии наблюдений от теоретического значения не превышало этой величины. В приведенной серии средняя величина  $\Delta\varphi = 1,61 \cdot 10^{-5}$  при теоретическом значении этой величины  $1,57 \cdot 10^{-5}$ . Большие же отклонения отдельных наблюдений объясняются, повидимому, как уже указывалось, недостаточно высоким постоянством работы реле, а также, возможно, и другими паразитными явлениями, как, например, микрофонным эффектом \*\*. Центробежные силы увеличивали  $L$  примерно на 0,001%. При наблюдениях эффекта мы следили за тем, чтобы при вращении в обоих направлениях увеличение  $L$  было одинаковым.

При налаживании аппаратуры и проведении испытаний существенную помощь мне оказали С. И. Боровицкий, В. А. Зверев и Е. А. Любимов, за что я им весьма благодарен.

Физико-технический институт  
при Горьковском государственном  
университете

Поступило  
29 IX 1950

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> М. Sagnac, Journ. de Phys., 4, 177 (1914). <sup>2</sup> С. И. Вавилов, Экспериментальные основания теории относительности, М.—Л., 1928, гл. 3. <sup>3</sup> И. Л. Берштейн, ДАН, 68, № 3 (1949). <sup>4</sup> И. Л. Берштейн, Изв. АН СССР, сер. физ., 14, 2 (1950),

\* Речь идет о постоянстве параметров, а не о флуктуациях, которые вряд ли в какой-нибудь мере могли сказаться в наших опытах.

\*\* Для его уменьшения аппаратура, стоящая на барабане, укреплена на мягкой резине.