

ФИЗИКА

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.) (1) \*. Нами обнаружено и измерено изменение скорости распространения радиоволн в концентрическом кабеле, намотанном на барабан, происходящее вследствие вращения последнего. Опыт проводился на волне длиною 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 (3, 4).

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

\* Несколько ранее Саньяка подобный же опыт был осуществлен Гаррессом (2).

Скорость волны относительно кабеля равна

$$\frac{c}{V\varepsilon} \mp \frac{u}{\varepsilon}. \quad (2)$$

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

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

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

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

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 выходе приемника напряжение амплитуды  $U_\phi$ , и через тот или иной обычный („сосредоточенный“) импеданс, давая там же напряжение амплитуды  $U_z$ .

Рис. 1 Положим, что параметры схемы так подобраны, что векторная диаграмма этих напряжений соответствует изображенному на рис. 1. На выходе приемника получается напряжение  $U_0 \ll U_z$ , 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  $\phi$  меняется на малую величину  $\Delta\phi$ , то величина  $U_0$  будет периодически меняться на величину  $U_z\Delta\phi$ , 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,  $\varepsilon = 2,24$ ), длиною (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  $\Delta\phi = (1,3 \div 1,7) \cdot 10^{-5} \approx 3$  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, стабилизован 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  $\mu\text{F}$ ; емкости  $C_1$  и  $C_2$  служат для уравнивания паразитных емкостей реле и схемы и имеют порядок 0,2  $\mu\text{F}$ . Сопротивление  $r$  имеет величину  $400 \div 600$  ом и необходимо для правильного подбора фазы колебания  $U_2$ . 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 токоизмерительный 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.

Для сравнения наблюденной величины  $\Delta\phi$  с найденным выше теоретическим значением этой величины надо знать величину  $U_2 k$  ( $k$  — 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  $U_2 k$  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  $\phi$  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

$$k U_2 = \frac{e U_0 k}{2\pi\Delta f L V \varepsilon}. \quad (7)$$

Коэффициент преобразования детектора легко определяется из кристалла 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.

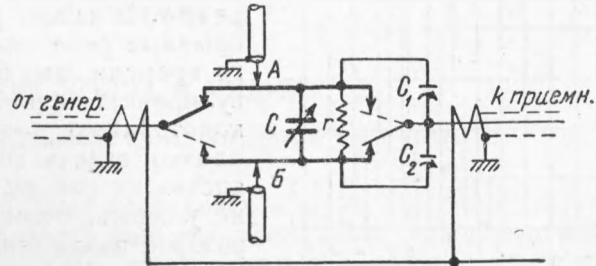


Рис. 2

Правильность получаемого на опыте знака  $\Delta\phi$  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,

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, подбор режима их питания, однако задачу получения высокого постоянства их работы нам полностью решить не удалось. Этим в основном объясняется разброс наблюденного эффекта (см. ниже).

Нами было проведено несколько серий измерений эффекта, причем каждая серия состояла из  $25 \div 40$  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 наблюденного эффекта с теоретическим значением порядка 15%. Отклонение среднего по серии наблюдений от теоретического значения не превышало этой величины. В приведенной серии средняя величина  $\Delta\phi = 1,61 \cdot 10^{-5}$  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> M. Sag nac, 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 оказаться в наших опытах.

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