

Академик Л. И. МАНДЕЛЬШТАМ и академик Н. Д. ПАПАЛЕКСИ

ОБ ОДНОМ ВАРИАНТЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

Для исследования распространения радиоволн и, специально, скорости распространения их нами были предложены различные варианты интерференционного метода. Как одно из применений был разработан способ определения расстояния между двумя удаленными пунктами.

В настоящей заметке рассматривается вариант радиоинтерференционного метода, который позволяет существенно повысить точность измерения скорости распространения (или расстояния) в тех случаях, когда мы имеем дело с «беспрепятственным» распространением, например при распространении в однородном пространстве над плоской идеально проводящей поверхностью. Практически сюда относится распространение над поверхностью моря и ряд других случаев. Кроме того предлагаемый нами вариант может быть по нашему мнению применен для детального исследования фазовой структуры электромагнитного поля и в тех случаях, когда поле искажено наличием диффракционных явлений вследствие резкой неоднородности свойств почвы, изменения рельефа и т. д. Изучение фазовой структуры в этих случаях имеет и практическое значение в связи с вопросами радиопеленгации, определения расстояний и т. д.

Сущность радиоинтерференционного метода ⁽¹⁾ состоит, как известно, в следующем. Колебания, излучаемые передатчиком пункта I, «отражаются» от пункта II с трансформированием частоты в рациональном отношении, притом так, что между приходящими на пункт II и «отраженными» от него колебаниями сохраняется постоянная разность фаз. В пункте I имеется устройство (например катодный осциллограф с двумя парами пластин), позволяющее определять разность фаз между колебаниями, излучаемыми передатчиком пункта I и приходящими в этот пункт «отраженными» от пункта II колебаниями.

Рассмотрим сначала случаи «беспрепятственного» распространения. С достаточной точностью это имеет место, как было выше указано, например, при распространении над поверхностью моря. Тогда [см. ⁽¹⁾, стр. 562] можно написать следующее соотношение:

$$Z \cdot \frac{\lambda}{n} + \frac{\delta\lambda}{n} - l_a = 2D, \quad (1)$$

где Z —целое число, D —расстояние между пунктами I—II, в которых расположены «задающая» и «отражающая» станции, λ —длина волны задающей станции, а l_a —есть эквивалентная длина, учитывающая прохождение волны в аппаратуре и являющаяся константой аппаратуры,—так называемая «фазовая девиация».

Наблюдаемая на экране катодного осциллографа пункта I интерференционная картина позволяет судить лишь о величинах, лежащих в пределах одного цикла изменения фазы [для отношения частот «прямого»

и «отраженного» лучей, равного $\frac{m}{n}$ ($m > n$), этот цикл \odot равен $\frac{2\pi}{n}$, что соответствует длине $\frac{\lambda}{n}$ (2)], и поэтому Z не может быть определено непосредственно.

В методике, описание которой было дано в упомянутых выше статьях, расстояние оставалось неизменным, и для определения Z и D необходимо было иметь кроме уравнения (1) еще второе уравнение, которое получалось наблюдением за изменением числа волн, укладываемых на неизменном расстоянии D при плавном изменении длины волны на определенную величину. Точность измерений по этому методу была существенно связана с возможностью достаточно точного определения величины l_a с помощью специального устройства—девиометра. При этой методике сохраняется неизменной абсолютная ошибка измерения, так что относительная точность этого метода повышается с увеличением расстояния. Для измерения небольших расстояний или небольших изменений расстояния этот метод менее пригоден.

Описываемый ниже вариант интерференционного метода позволяет в значительной мере устранить указанные выше источники ошибок и существенно повысить точность измерений. Из формулы (1) видно, что если плавно изменять расстояние D между обоими пунктами, сохраняя неизменным состояние аппаратуры (т. е. величину l_a) и частоту обоих излучений (что осуществимо практически с очень большой точностью), то наблюдаемая нами интерференционная картина будет также плавно изменяться. При «беспрепятственном» распространении радиоволн (т. е. в отсутствие дисперсии и диффракции) можно считать, что λ остается неизменной при изменении D и, следовательно, наблюдаемое изменение фазовой картины дает непосредственно в длинах волн изменение ΔD —расстояния между обоими пунктами. В этом случае можно написать:

$$\Delta Z \cdot \frac{\lambda}{n} + \Delta \frac{\delta \lambda}{n} = 2\Delta D, \quad (2)$$

откуда следует, что изменение фазы на один полный цикл ($\Delta Z=1$) соответствует изменению расстояния

$$\Delta D = \frac{\lambda}{2n}, \quad (3)$$

где n зависит от отношения частот «прямого» и «отраженного» излучений. Для отношения частот 3 : 2, которое применялось в наших опытах, один полный цикл изменения фазы равен 180° , что соответствует изменению расстояния $\Delta D = \frac{\lambda}{4}$.

По фигурам Лиссажу легко судить об изменении фазы на $2-3^\circ$, таким образом чувствительность этого метода можно положить равной

$$\delta \Delta D \approx \frac{\lambda}{300},$$

что дает для длин волн короче 300 м точность отсчета в долях метра.

Для истолкования таких измерений становится, конечно, необходимым точное определение «центра» излучения антенны. Описываемый метод полностью аналогичен известному интерференционному методу Майкельсона, примененному им для эталонирования метра в длинах волн.

Для практического осуществления описываемого здесь метода необходимо, чтобы один из пунктов оставался неподвижным, а второй плавно передвигался. Такое передвижение легко осуществить по воде, располагая один из пунктов на судне. При опытах на суше одна из станций может быть смонтирована в автомобиле.

Этот способ был нами применен для исследования скорости распространения радиоволн как по воде (Одесса, май 1935 г.; озеро Ильмень, ноябрь 1935 г.; Белое море, август 1937 г.), так и на суше (г. Пугачев, ноябрь 1939 г.). Опыты на Черном море и озере Ильмень производились экспедицией ЛЭФИ (Е. Я. Щеголев, И. М. Борушко, К. Э. Виллер) совместно с ЦНИГАИК, обеспечившим геодезические определения под руководством проф. О. Г. Дитца и инж. А. И. Грузинова. В опытах на Белом море принимали участие экспедиции ЛИИ (Щеголев, Борушко, Виллер) и Гидрографического управления Главсевморпути (инж. Д. Н. Преображенский и С. А. Мещеряков) под руководством инж. Я. К. Смирницкого, обеспечившего геодезические определения.

В опытах на Черном море условия практически соответствовали «беспрепятственному» распространению. Задающая станция была установлена у открытого берега, а отражающая находилась на корабле. Вдоль мачты корабля была повешена гирлянда мощных электрических ламп (описываемые опыты производились ночью), включавшаяся и выключавшаяся оператором отражающей станции по сигналу задающей станции. В трех пунктах на берегу были расположены теодолиты, с помощью которых определялось положение корабля, причем отсчет брался в момент тушения гирлянды, производившегося через каждые 50 полуциклов изменения фазы. Частота задающей станции, стабилизированная с помощью кварца в термостате, была равна $1,274 \cdot 10^6$ Hz и изменение фазы на один полуцикл соответствовало изменению расстояния ΔD между обоими пунктами:

$$\Delta D = \frac{\lambda}{8} = \frac{v}{c} \cdot 29,407 \text{ м},$$

где c была взята равной $3 \cdot 10^{10}$ см/сек. Во время описываемых опытов, результаты которых приводятся ниже, было просчитано всего 500 полуциклов изменения фазы, что соответствовало изменению расстояния $R = \frac{v}{c} \cdot 14\,702$ м. Считая, что точность отсчета фазы, включая и фазовую девиацию приемников обеих станций, составляет около 5° , получаем для измеренного радиоинтерференционным способом расстояния* между конечными пунктами R :

$$R = (14\,702 \text{ м} \pm 3 \text{ м}) \frac{v}{c}.$$

Геодезическое определение дало для этого расстояния

$$D = 14\,695 \text{ м} \pm 22 \text{ м}.$$

Отсюда получаем для скорости распространения радиоволн:

$$v = \frac{D}{R} c = (2,999 \pm 0,005) \cdot 10^{10} \text{ см/сек}.$$

Заметим, что малая точность геодезического определения объясняется, главным образом, трудностью производить определение движущегося корабля ночью. Равенство между собой [в пределах точности геодезических определений (ср. табл. 1)] отдельных участков, соответствующих изменению фазы на 50 полуциклов, указывает на равномерность фазового поля, какого и следовало ожидать вдоль морской поверхности.

Интересно привести результаты измерений при специально поставленных опытах в Белом море в узкой длинной губе Чупа с холмистыми,

* Следует подчеркнуть, что здесь, как и в дальнейшем, мы, разумеется, имеем дело с изменениями расстояния между обоими станциями и приводимые величины R (и D) представляют собою изменения этого расстояния при переходе подвижной станции из одной точки в другую.

покрытыми лесом берегами и густо разбросанными островами, лежавшими на пути распространения радиоволн. Здесь поле должно было быть искажено диффракционными явлениями и применение к этому случаю формулы (2) становится беспредметным. Иными словами, если в этом случае подставить полученные экспериментальные данные для числа фазовых циклов в формулы для расстояния, то мы должны, вообще говоря, получить значения расстояний, отличные от действительных. В табл. 2 приведены полученные результаты.

В этих опытах задающая станция была расположена на корабле и счет полуциклов производился от створа до створа, положение которых определялось с корабля с помощью секстанта. Интересно отметить, что если взять разность расстояний между начальными и конечными пунктами и отражающим пунктом (опуская промежуточные), что, конечно, заранее не оправдано, то получается значительно лучшее согласие между радиоизмерениями (прямой ход 14 357 м; обратный ход—14 337 м) и действительной разностью расстояний (14 480 м), чем на отдельных участках. На больших расстояниях (во всяком случае в этих опытах) диффракционные искажения, повидимому, в большей своей части взаимно компенсируются.

Таблица 1

№ участка	Радиоизмерения R в м	Геодезические измерения D в м
I	1 470,2	1 464,2
II	1 470,2	1 451,4
III	1 470,2	1 463,5
IV	1 470,2	1 492,4
V	1 470,2	1 474,9
VI	1 470,2	1 466,7
VII	1 470,2	1 475,8
VIII—IX	2 940,4	2 946,1
X	1 470,2	1 460,0
Среднее	1 470,2	1 469,5

Таблица 2

		Радиоизмерения R в м	Геодезические измерения D в м
1. Участок мыс Картуш—I засечка	Прямой ход	$5\,219 \pm 4$	$3\,430 \pm 70$
	Обратный ход	$5\,211 \pm 4$	
2. Участок I засечка—II засечка	Прямой ход	$4\,315 \pm 4$	$5\,290 \pm 100$
	Обратный ход	$4\,373 \pm 4$	
3. Участок II засечка—III засечка	Прямой ход	$4\,823 \pm 4$	$5\,760 \pm 100$
	Обратный ход	$4\,753 \pm 4$	

Во время опытов на суше, производившихся в районе гор. Пугачева экспедицией ФИАН (В. В. Мигулин, Я. Л. Альперт, Д. И. Кедров), вдоль дороги был расставлен ряд вех, расстояние которых от установленной неподвижно задающей станции было определено заранее с помощью теодолита и мерной ленты (инж. Л. Е. Миндлин). Отражающая станция, смонтированная в автомобиле, двигалась плавно вдоль пути, по которому были расположены вехи, и на задающей станции счетом полуциклов определялось изменение фазы на пути от одной вехи до соседней. Эти опыты, производившиеся на волнах 130—195 м с целью исследования фазовой структуры поля как в непосредственной близости от передатчика, так и по мере удаления от него, дали результаты, отвечающие теоретическим ожиданиям для случая распространения над однородной ровной поверхностью, а также показали резкое нарушение фазовой структуры поля в случае наличия изменения рельефа местности (глубокая балка). Более

подробно результаты этих опытов и их сравнение с теорией будут даны в другом месте.

Изложенные выше соображения относятся, как уже было указано выше, к тем случаям, когда можно с достаточным приближением отвлечься от диффракции и дисперсии. Однако, если наряду с описанными выше измерениями производить одновременно и измерения по методу дисперсионного интерферометра ⁽³⁾, то является возможность исследовать структуру фазового поля и в более сложных условиях (наличие дисперсии, а также диффракции).

В самом деле, в общем случае неоднородной среды, удовлетворяющей условиям теоремы взаимности, можно, очевидно, вместо соотношения ⁽⁴⁾

$$\Delta Z \cdot \odot + \Delta\psi = \frac{2\omega_1 \Delta D}{v}, \quad (4)$$

эквивалентного формуле (1), написать следующее соотношение:

$$\Delta Z \cdot \odot + \Delta\psi = \Delta\Phi_{12}(\omega_1) + \frac{\omega_1}{\omega_2} \Delta\Phi_{21}(\omega_2). \quad (5)$$

Здесь $\Phi_{12}(\omega_1)$ — полное изменение фазы колебания частоты ω_1 на пути от пункта I до пункта II, а $\Phi_{21}(\omega_2)$ — изменение фазы колебания частоты ω_2 на пути от пункта II до пункта I и соответственно $\Delta\Phi_{12}(\omega_1)$ и $\Delta\Phi_{21}(\omega_2)$ суть их изменения при изменении расстояния D на ΔD . С другой стороны, метод дисперсионного интерферометра приводит к соотношению [см. ⁽¹⁾, стр. 577, формула (19)]:

$$\Delta Z' \cdot \odot + \Delta\psi' = \Delta\Phi_{12}(\omega_1) - \frac{\omega_1}{\omega_2} \Delta\Phi_{12}(\omega_2). \quad (6)$$

Так как на основании теоремы взаимности

$$\Delta\Phi_{12}(\omega_1) = \Delta\Phi_{21}(\omega_2),$$

то, измеряя при одном и том же перемещении на ΔD величины ΔZ , $\Delta Z'$, $\Delta\psi$ и $\Delta\psi'$, мы из уравнений (5) и (6) можем определить как $\Delta\Phi_{12}(\omega_1)$, так и $\Delta\Phi_{12}(\omega_2)$, т. е. изменения фазы колебаний с частотами ω_1 и ω_2 .

Таким образом описанный здесь метод дает возможность производить тонкое исследование структуры поля в различных условиях. При опытах на небольших расстояниях счет циклов изменения фазы можно производить непосредственно, наблюдая за изменением фазовой картины на экране катодного осциллографа. При большом числе циклов такой счет становится утомительным и может привести к ошибкам, и совершенно естественно встает вопрос о применении автоматических регистрирующих счетчиков.

В заключение укажем, что этим методом можно также производить измерения больших расстояний, не поддающихся оптическим методам измерений, как, например, соединение систем триангуляции, разделенных большим водным пространством.

Поступило
9 II 1940

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси, ЖТФ, VII, стр. 559 (1937). ² Е. Я. Щеголев, ЖТФ, IV, стр. 191 (1934). ³ Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси, ЖТФ, VII, стр. 576 (1934); Я. Л. Альперт, В. В. Мигулин, П. А. Рязин, ДАН, XVIII, № 9, стр. 635 (1938). ⁴ Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси, ЖТФ, VII, стр. 562 (1937).