

621.391.81

## Л. И. МАНДЕЛЬШТАМ И ИССЛЕДОВАНИЯ ПО РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

*В. В. Мигулин*

### СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение . . . . .	667
2. Исходные работы . . . . .	669
3. Дальнейшие работы в области радиоинтерферометрии . . . . .	674
4. Заключение . . . . .	678
Цитированная литература . . . . .	679

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Одна из наиболее ярких и оригинальных страниц научного творчества Леонида Исааковича Мандельштама — это цикл работ по радиоинтерферометрии. В этих работах особенно отчетливо выступает специфика научного творчества Леонида Исааковича, его искусство широкого обобщения и развития в новой области понятий и представлений, рожденных в других условиях и применительно к другим процессам и явлениям.

Захватывая диапазон частот от  $3 \cdot 10^{11}$  до единиц  $10^3$  Гц, радиоволны представляют собой лишь частный случай электромагнитного излучения, наряду с инфракрасным излучением, видимым светом, ультрафиолетовыми и рентгеновскими лучами. Вместе с тем временные и пространственные масштабы процессов, протекающих в области радиоволн, очень сильно отличаются от масштабов, характерных для явлений оптических. Хотя при рассмотрении излучения и распространения радиоволн мы исходим из тех же основных положений теории электромагнитного поля, что и при построении классической волновой оптики, указанное различие масштабов заставляет нас учитывать в радиодиапазоне многие факторы, которые в оптике можно с полным основанием не принимать во внимание. Основной пространственный масштаб — длина волны — в области радиоволн часто бывает одного порядка, а то и больше, нежели интересующие нас расстояния и линейные размеры. Использование излучателей с размерами, соизмеримыми с длиной волны, возможность поддерживать незатухающие колебания элементарных вибраторов и ряд других особенностей радиодиапазона заставляют при теоретическом рассмотрении радиоволн идти другими путями, нежели в оптике, а в результате получать новые соотношения, рассмотрение которых в оптике было бы лишено физического смысла. Это относится к теории излучения и распространения радиоволн, к вопросам пространственного распределения интенсивности излучения, приема, преобразования и индикации радиоволн и ко многим другим вопросам.

Различия очень велики, но наряду с этим не следует забывать и об общей природе оптических и радиоволн. Любое явление, присущее одному

из типов электромагнитных волн, должно существовать также и в области других частот — других длин волн, облекаясь, быть может, лишь в иные формы, иные черты вследствие различия в масштабах. Явление интерференции, давно известное и используемое в оптике, также имеет место в радиодиапазоне. Однако возможности, имеющиеся для реализации и использования интерференционных явлений в радиодиапазоне, до работ Л. И. Мандельштама оставались не раскрытыми. Только обширные исследования, предпринятые им совместно с Н. Д. Папалекси и проведенные под их руководством большими научными коллективами в тридцатых годах, позволили решить ряд принципиальных проблем, связанных с созданием различных радиоинтерферометров.

Работы в этом направлении были начаты Л. И. Мандельштамом еще до 1930 г., когда им и Н. Д. Папалекси было получено первое заявочное свидетельство на радиоинтерференционное устройство («Способ для определения расстояния между двумя пунктами при помощи электромагнитных волн»<sup>1</sup>), но публикации об этом цикле исследований начали появляться лишь с 1937 г.

Если в оптике когерентность интерферирующих лучей достигается использованием одного источника светового излучения и устройств, расщепляющих это излучение и направляющих получившиеся когерентные лучи по различным путям, то в радиотехнике возможно получение когерентности различных излучателей (в том числе и на разных, но соизмеримых частотах) путем соответствующего управления устройствами, генерирующими излучаемые колебания. При этом в радиотехнике по сравнению с оптикой существенно расширяются возможности наблюдения и регистрации интерференционных явлений, поскольку осуществима не только амплитудная (энергетическая) регистрация, но и прямое наблюдение и измерение фазовых сдвигов интерферирующих колебаний.

Эти принципиальные положения, лежащие в основе различных вариантов радиоинтерферометрических устройств, в настоящее время представляются настолько очевидными, что над ними никто не задумывается. А в 30-х годах, когда они впервые были сформулированы и начали реализовываться в виде конкретных систем радиоинтерферометров и использоваться для проведения исследований особенностей распространения радиоволн и для ряда практических применений, весь круг этих положений и методов представлял собой совершенно новое направление, существенно выходящее за рамки тогдашних представлений и привычных путей использования и изучения возможностей радиоволн. Здесь еще раз раскрылись глубина и масштабность научного творчества Леонида Исааковича Мандельштама, идеи которого естественно входят в качестве основополагающих в ряд разделов современной физики и техники.

Как отмечалось Л. И. Мандельштамом<sup>2,3</sup>, возможность весьма точного измерения частоты генерируемых и излучаемых колебаний позволяет в радиодиапазоне при осуществлении различных вариантов радиоинтерферометров решать задачи, недоступные оптической интерферометрии, и наряду с исследованием распространения радиоволн, решать также ряд практических задач. В оптике в большинстве случаев речь идет о сравнении эталонов длины с длиной волны используемого оптического излучения или, иначе говоря, об измерении длины волны. В радиоинтерферометрии же знание точного значения частоты и возможность фазовых измерений позволяют изучать фазовую структуру радиоволн, проводить измерение их скорости, а при знании этих величин — измерять расстояния и перемещения.

Еще при жизни Леонида Исааковича Мандельштама разработка различных вариантов радиоинтерферометров и их использование для

научных и практических целей привели к выдающимся научным и практическим результатам. Дальнейшее же развитие радиоинтерферометрии принесло богатые плоды в исследованиях ионосферы и магнитосферы и в космических исследованиях. Радиоинтерферометрические методы позволили реализовать ряд систем наблюдения и контроля параметров орбит искусственных спутников Земли (ИСЗ), позволили создать глобальные радионавигационные системы, решать многие задачи локальной радионавигации и геодезии.

В связи с этим представляется целесообразным кратко изложить основные принципы работы ряда наиболее типичных радиоинтерференционных устройств и важнейшие научные результаты и пути практического использования радиоинтерферометрии, начиная от периода, когда эти работы возглавлял сам Л. И. Мандельштам и вплоть до наших дней.

Кроме этого, представляет интерес изложение некоторых соображений о возможных путях дальнейшего развития радиоинтерферометрии и конкретных предложений по системам радиоинтерферометров с некоторой оценкой возможностей подобных систем.

## 2. ИСХОДНЫЕ РАБОТЫ

Предложенный Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси интерференционный радиодальномер<sup>4</sup> основан на использовании изменения с частотой измеряемой разности фаз между колебаниями соизмеримых частот, одно из которых испускается так называемой «задающей» станцией, а второе — «отражающей», находящейся на другом конце измеряемого расстояния, при согласованном изменении частот в точно определенном интервале.

В этом варианте радиоинтерферометра излучаются колебания с частотой  $\omega$ , которые при распространении на измеряемом расстоянии  $d$  приобретают дополнительную фазу

$$\Phi_1 = \omega \int_0^d \frac{ds}{v_1}.$$

После приема этих колебаний на «отражающей» станции и преобразования частоты колебаний в соотношении  $m/n$ , где  $m$  и  $n$  — небольшие целые числа, происходит их излучение и на пути распространения обратно от «отражающей» станции до «задающей» их фаза в масштабе новой частоты, равной  $(m/n)\omega$ , изменяется на величину

$$\Phi_2 = \frac{m}{n} \omega \int_0^d \frac{ds}{v_2}.$$

Наблюдаемая на задающей станции разность фаз в масштабе исходной частоты  $\omega$  будет равна

$$\Psi = \Phi_1(\omega) + \frac{n}{m} \Phi_2\left(\frac{m}{n}\omega\right) + \delta_1 + \delta_2,$$

где  $\delta_1$  — фазовые искажения в приемно-измерительном устройстве пункта 1;  $\delta_2$  — фазовые сдвиги в аппаратуре пункта 2 (рис. 1).

При плавном изменении частоты  $\omega$  на заданную величину  $\Delta\omega$  можно измерить изменение наблюдаемой разности фаз; считая фазовые искажения в аппаратуре постоянными, имеем

$$\Delta\Psi = [\Phi_1(\omega + \Delta\omega) - \Phi_1(\omega)] + \frac{n}{m} \left[ \Phi_2\left(\frac{m}{n}(\omega + \Delta\omega)\right) - \Phi_2\left(\frac{m}{n}\omega\right) \right].$$

Для простейшего случая отсутствия дисперсии и дифракции на трассе  $d$ ,  $v_1 = v_2 = v$ , так что

$$\Phi_1(\omega) = \frac{\omega d}{v}, \quad \Phi_2\left(\frac{m}{n}\omega\right) = \frac{m}{n} \frac{\omega d}{v}, \quad \Delta\Psi = \Delta\omega \cdot \frac{2d}{v},$$

откуда

$$d = \frac{v}{2} \frac{\Delta\Psi}{\Delta\omega}.$$

Таким образом, при известной скорости распространения радиоволн измерение изменения наблюдаемой разности фаз излучаемых колебаний с частотой  $\omega$  и принимаемых когерентных колебаний с частотой  $m/n\omega$ .

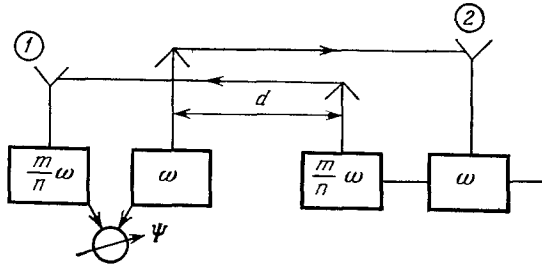


Рис. 1. Схема действия интерференционного радиодальномера.

позволяет определить расстояния между двумя пунктами. Многочисленные измерения, проведенные с подобным интерференционным радиодальномером в тридцатых годах<sup>3-6</sup> показали, что для многих практически важных случаев можно пользоваться подобными упрощенными представлениями, и они легли в основу плодотворного использования этого варианта радиоинтерферометра для решения многих задач геодезии и навигации при технически совершенном выполнении соответствующих устройств<sup>7-11</sup>. При этом именно радиоинтерференционная методика позволила с достаточно высокой точностью определить величину фазовой скорости радиоволн  $-v$  для тех условий, в которых эффективно применение радиоинтерференционных дальномеров.

Использование тех же устройств, что и в радиодальномере с изменяющейся частотой, но на фиксированной частоте при непрерывном изменении расстояния между пунктами 1 и 2, дает возможность связать эти изменения расстояния с отсчитываемой на фазометре изменением разности фаз колебаний  $\omega$  и  $(m/n)\omega$ .

В этом случае измеряемая разность фаз будет

$$\Psi = \omega \left[ \int_1^2 \frac{ds}{v_1} + \int_2^1 \frac{ds}{v_2} \right] + \theta,$$

где  $\theta$  — фазовые сдвиги, связанные с аппаратурой;  $v_1$  и  $v_2$  — соответственно фазовые скорости колебаний с частотами  $\omega$  и  $(m/n)\omega$ . Изменение  $\Psi$ , связанное с перемещением пункта 2 в точку 3, равно

$$\Delta\Psi = \omega \left[ \int_2^3 \frac{ds}{v_1(\omega, s)} + \int_3^2 \frac{ds}{v_2(m\omega/n, s)} \right].$$

Для простейших случаев

$$\Delta\Psi = 2 \frac{\omega}{v} \Delta d.$$

Измерения с подобным перемещающимся радиоинтерферометром подобно оптическому интерферометру позволяют определять изменение расстояния между станциями в масштабе длины волны

$$\Delta d = \frac{1}{4\pi} \lambda^* \Delta \Psi;$$

здесь

$$\lambda^* = 2\pi \frac{\bar{v}^*}{\omega},$$

где  $\omega$  — частота колебания, излучаемого первой станцией и  $\bar{v}^*$  — фазовая скорость радиоволн, определенным образом усредненная по частотам  $\omega$  и  $(m/n)\omega$  и по интервалу  $\Delta d$ .

Большой цикл исследований, выполненный с помощью подобного перемещающегося интерферометра под общим руководством Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси в период с 1935 по 1941 гг. (см.<sup>2,3,6,12-14</sup>) позволили получить исчерпывающие данные о фазовой структуре и скорости распространения радиоволн вдоль земной поверхности, начиная от малых (в масштабе длины волны) удалений от излучающих антенн до существенных удалений, как при регулярном распространении вдоль ровной поверхности, так и в случаях, когда имеются неоднородности, вызывающие дифракционные искажения. Принципиально важным результатом этого цикла работ явилось установление того факта, что независимо от электрических свойств почв и вдоль поверхности земли с малой проводимостью и вдоль морской поверхности скорость распространения радиоволн близка к  $c$ . Наблюдаются лишь местные искажения фазовой структуры поля радиоволн и соответствующие изменения величины фазовой скорости, возникающие в зоне установления в окрестности излучающей антенны и в окрестностях возмущающих неоднородностей. Возмущения могут вызываться как нерегулярностями геометрии поверхности раздела земля — воздух, так и изменениями электрических свойств земной поверхности (например, при переходе от суши к морю или при переходе от открытой местности к лесу). Эти исследования привели к исчерпывающему объяснению так называемого «берегового эффекта» и подтвердили применимость теоретических расчетов Зоммерфельда к проблеме распространения радиоволн вдоль земной поверхности, а также показали неприменимость для этих задач концепции поверхностных волн Ценнека. (См. цитированные работы в сборнике «Новейшие исследования распространения радиоволн вдоль земной поверхности». — М.: Гостехиздат, 1945.)

Весьма эффективным методом изучения особенностей распространения радиоволн явился также другой вариант радиоинтерферометрического устройства, — так называемый дисперсионный радиоинтерферометр. В этом устройстве излучение двух когерентных колебаний с частотами  $\omega$  и  $(m/n)\omega$  происходит в одной точке с постоянной разностью фаз этих колебаний. В точке приема производится измерение разности фаз принятых колебаний. Эта разность фаз может отличаться от первоначальной и изменяться с изменением удаления приемника от излучателя, если фазовые скорости используемых колебаний с различными частотами не совпадают, т. е. имеет место дисперсия. Кроме того, в области установления волнового процесса в окрестности излучателей, а также в областях, где имеются объекты, вызывающие дифракцию из-за различия длин волн и соответствующих масштабов в фазовой структуре поля, тоже могут наблюдаться изменения наблюдаемой разности фаз. Это дало возможность провести с помощью дисперсионного интерферометра большое число исследований, которые существенно дополнили данные, полученные другими радиоин-

терференционными методами и позволили уточнить многие стороны процессов излучения и распространения радиоволн. Схема действия дисперсионного радиоинтерферометра показана на рис. 2.

Измеряемая разность фаз, в масштабе частоты  $\omega$ , равна

$$\Psi = \omega \left[ \int_1^2 \frac{ds}{v_1} - \int_1^2 \frac{ds}{v_2} \right] + \Psi_0,$$

где  $v_1$  и  $v_2$  — фазовые скорости радиоволн с частотами соответственно  $\omega$  и  $(m/n)\omega$ ,  $\Psi_0$  — начальный сдвиг фаз между излучаемыми колебаниями.

В простейшем случае

$$\Psi = \omega r \left( \frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right) + \Psi_0.$$

Если  $r$  изменяется, т. е. приемный пункт перемещается по отношению к излучателям, то наблюдаемое изменение разности фаз в этом случае будет равно

$$\Delta\Psi = \omega \left( \frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right) \Delta r.$$

Фаза колебаний в точке приема может быть записана как

$$\Phi(r) = \frac{\omega}{v} r + \varphi_0(r) + \varphi^*(r),$$

где  $\varphi_0(r)$  — возмущение фазы, вызываемое дифрагирующим объектом, а  $\varphi^*(r)$  — дополнительная фаза, связанная с процессом установления картины излучения. Разность фаз, наблюдаемая в дисперсионном интерферометре, будет

$$\Psi = \Phi_1 - \frac{n}{m} \Phi_2 = \omega r \left( \frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right) + \left[ \varphi_1^*(r) - \frac{n}{m} \varphi_2^*(r) \right] + \left[ \varphi_{10}(r) - \frac{n}{m} \varphi_{20}(r) \right].$$

Таким образом, в экспериментах с дисперсионным интерферометром при перемещении приемного устройства изменение наблюдаемой разности фаз определяется тремя составляющими. Первый член, присутствующий при наличии реальной дисперсии ( $v_1 \neq v_2$ ), дает величину, пропорциональную удалению, второй при удалении от излучателя на расстояния, превышающие (50—60)  $\lambda$ , практически переходит в постоянную величину, а третий содержит функции  $\varphi_{10}(r)$  и  $\varphi_{20}(r)$  — дифракционные возмущения эквифазовых поверхностей, различные для применяемых частот вследствие различий в  $\lambda$ . Этот последний член, изменяясь с расстоянием, при удалении от дифрагирующего объекта стремится к нулю. Многочисленные исследования, проведенные в тридцатые годы с дисперсионным интерферометром в различных условиях, в сочетании с другими радиоинтерференционными исследованиями, позволили уточнить многие детали процесса установления фазы при излучении, выяснить влияние дифракционных эффектов на фазовую структуру поля радиоволн и подтвердили практи-

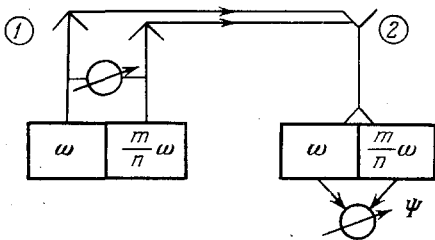


Рис. 2. Схема действия дисперсионного радиоинтерферометра.

при удалении от дифрагирующего объекта стремится к нулю. Многочисленные исследования, проведенные в тридцатые годы с дисперсионным интерферометром в различных условиях, в сочетании с другими радиоинтерференционными исследованиями, позволили уточнить многие детали процесса установления фазы при излучении, выяснить влияние дифракционных эффектов на фазовую структуру поля радиоволн и подтвердили практи-

ческое отсутствие регулярной дисперсии при распространении радиоволн вдоль земной поверхности<sup>3, 12-15 \*</sup>).

Если излучатели когерентных колебаний с частотами  $\omega$  и  $(m/n)\omega$  находятся на определенном расстоянии  $d$  друг от друга, то поверхности, соответствующие постоянной разности фаз при идеализированных законах распространения радиоволн, будут представлять собой гиперboloиды с фокусами в точках излучения. Это позволяет создать радиомаяк: постоянство наблюдаемой в перемещающемся приемном устройстве разности фаз означает, что движение приемного пункта происходит по одному из первоначально выбранных гиперboloидов или соответствующей гиперболе при использовании двумерной системы. Возможно осуществление системы и с тремя излучателями. Один из них может быть сделан задающим, а два других — подчиненными, в которых принимаемые (с постоянной запаздывающей фазой) колебания будут трансформироваться по частоте соответственно в  $(m_1/n_1)\omega$  и  $(m_2/n_2)\omega$ , а затем излучаться с контролируемым постоянным фазовым сдвигом. Тогда контроль за изменением двух разностей фаз между принимаемыми колебаниями с частотами  $\omega$  и  $(m_1/n_1)\omega$  и  $\omega$  и  $(m_2/n_2)\omega$  позволит определять перемещения приемника в соответствующей гиперболической сетке, составленной из двух систем гиперboloидов с фокусами в точках излучения. Легко реализуемые дополнительные устройства позволяют в месте приема не только контролировать постоянство или величину изменения наблюдаемых разностей фаз, но и находить истинные значения самих этих разностей и тем самым определять местонахождение приемного пункта в соответствующей гиперболической координатной системе. Создание подобных радиомаячных систем, имеющих важное практическое значение, стало возможным лишь на основе разработки предложенных Л. И. Мандельштамом совместно с Н. Д. Папалекси методов осуществления радиоинтерференции с использованием когерентных излучений соизмеримых частот и применением фазовых методов индикации, а также в результате выяснения реальных законов распространения радиоволн вдоль земной поверхности.

Подводя некоторые итоги работам по радиоинтерферометрии, проведенным при жизни Л. И. Мандельштама, можно сказать, что эти работы выявили новые пути в использовании радиоволн для практики. Развитие в этих работах методы осуществления интерференции радиоволн открыли новую страницу в радиофизике и заложили основы использования интерференции радиоволн для навигации и геодезии. Они позволили провести исчерпывающее изучение фазовой структуры и скорости радиоволн, распространяющихся вдоль земной поверхности, установить особенности влияния свойств земной поверхности на процессы установления фазовой структуры радиоволн, излучаемых антенной, находящейся на поверхности раздела воздух — земля и тем самым позволили оценивать возможные точности и перспективы использования различных радиомаячных даль-

---

\*) Мы не будем здесь, как и раньше, приводить многочисленные данные, полученные в ходе всего проведенного цикла исследований с дисперсионным интерферометром, и ограничимся лишь сделанными ссылками на публикации, в которых приведены конкретные результаты и соответствующие обобщения, вытекающие из упомянутых работ, реализовавших исходные идеи Леонида Исааковича Мандельштама. Следует заметить, что все эти выводы справедливы лишь для таких удалений, когда земная поверхность может считаться плоской, и дифракционными эффектами, обусловленными кривизной земной поверхности, можно пренебрегать. Для больших расстояний, как показали более поздние теоретические и экспериментальные исследования, проведенные в Ленинградском университете под общим руководством Г. И. Макарова, имеет место определенная зависимость фазовой скорости распространяющихся радиоволн от частоты в зависимости от электрических свойств почвы<sup>37</sup>, т. е. может возникать определенная дисперсия.

мерных и навигационных систем в условиях, когда влиянием ионосферы можно пренебречь. Кроме того, пионерские работы этого цикла, в которых были изучены возможности применения радиоинтерференции для исследования ионосферы и ее возмущений, заложили основу для многих дальнейших исследований, успешно развиваемых в настоящее время \*).

### 3. ДАЛЬНЕЙШИЕ РАБОТЫ В ОБЛАСТИ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Попытаемся теперь осветить дальнейшую судьбу радиоинтерференционных методов, их дальнейшее развитие и применение в современной технике и физических исследованиях.

Прежде всего следует упомянуть о получивших значительное распространение фазовых радионавигационных системах, в которых реализуются идеи фазовых измерений для определения местонахождения объекта в пространстве методом интерференции двух или более когерентных излучений с соизмеримыми частотами. Подобные фазовые радионавигационные системы работают в различных диапазонах волн в зависимости от своего назначения. Длинноволновые излучения используются для глобальных систем, а короткие и ультракороткие радиоволны позволяют решать навигационные задачи с высокой точностью для небольших расстояний. При этом, естественно, используются достаточно эффективные автоматизированные фазометрические системы, во многих случаях основанные на счете полных циклов изменения разности фаз колебаний, приведенных к одной частоте, с использованием фазовых детекторов.

Возможности преобразования частоты колебаний с контролем фазовых искажений позволяют в наше время производить путем умножения частоты как бы усиление фазовых сдвигов и существенно повышать чувствительность и точность измерения малых разностей фаз.

Современные интерферометры с большими базами, используемые в радиоастрономии и в системах слежения за местоположением спутников и других космических аппаратов и дающие высокую угловую точность в определении направления на ИСЗ и КА, представляют собой радиоинтерферометры с одним источником излучения (см. <sup>15</sup>, с. 372), и входят в общую семью радиоинтерферометрических устройств. Их разработка и усовершенствование были прямо и непосредственно стимулированы работами по радиоинтерферометрии, проводившимися под руководством Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси.

Особо следует остановиться на использовании метода дисперсионного интерферометра для изучения электронной концентрации в приземной и космической плазме с помощью ракет, ИСЗ и других космических аппаратов (КА). Создание дисперсионного радиоинтерферометра на метровых, дециметровых и сантиметровых волнах с установкой передатчика когерентных излучений с соизмеримыми частотами на борту ракет и различных космических аппаратов дало возможность измерять концентрацию электронов на трассе распределения сигналов от ракеты или КА до приемно-фазометрического устройства. Подобные передающие устройства, получившие название передатчиков «Маяк», сейчас входят в обычный комплект оборудования исследовательских ракет, различных ИСЗ и других КА. Начало этим исследованиям в СССР было положено экспериментами 1954—1958 гг., проведенными с использованием геофизических ракет. Установка излучателя когерентных частот на ракете, траектория которой мало

---

\*) Некоторые общие заключения и обобщения возможных путей реализации и использования интерференции радиоволн на основе проведенных исследований были сделаны в работе автора, опубликованной в 1947 г. в УФН <sup>15</sup>.



отличалась от вертикальной, позволила по наблюдениям изменения разности фаз колебаний соизмеримых частот, прошедших через ионосферу, получать значения электронной концентрации в функции высоты <sup>16</sup>.

Измеряемое изменение разности фаз  $\Delta\Psi$  связано с дисперсией, обусловленной зависимостью эффективного показателя преломления ионизированной атмосферы от частоты, определяемой наличием свободных электронов:

$$n_{\omega} = 1 - \frac{2\pi N e^2}{m\omega^2},$$

где  $N$  — эффективная концентрация электронов,  $e$  и  $m$  — заряд и масса электрона,  $\omega$  — частота распространяющейся радиоволны. При вертикальном подъеме ракеты для частот  $\omega$  и  $p\omega$

$$\Delta\Psi = \frac{2\pi N_{\text{ср}} e^2}{c m \omega} \frac{p^2 - 1}{p} \Delta H.$$

Отсюда для среднего значения электронной концентрации на участке  $\Delta H$  получаем

$$N_{\text{ср}} = \frac{c m \omega}{2\pi e^2} \frac{p}{p^2 - 1} \frac{\Delta\Psi}{\Delta H}.$$

В случае установки излучателей когерентных частот на ИСЗ и других космических аппаратах (КА) с траекторией, существенно отличающейся от вертикальной, вычисление локальной электронной концентрации возможно лишь при определенных допущениях и не всегда. Интерпретация получаемых данных существенно осложняется наличием земного магнитного поля и динамическими процессами в приземной плазме, приводящими к возникновению различных неоднородностей.

Если излучатели когерентных колебаний на соизмеримых частотах (передатчики «Маяк») установлены на геостационарном ИСЗ, то наблюдения за разностью фаз между этими колебаниями, принимаемыми на Земле, содержат информацию о суммарной электронной концентрации на всем пути радиоволн от ИСЗ до точки приема и об ее изменении <sup>17,18</sup>.

Подавляющее большинство работ по применению метода дисперсионного интерферометра для исследования ионосферы было выполнено на основе классического двухчастотного варианта этого устройства, хотя для некоторых из этих задач рассматривались также трехчастотные <sup>19</sup> и четырехчастотные <sup>20</sup> интерферометры.

Общий анализ возможностей дисперсионных интерферометров применительно к исследованиям космической плазмы с помощью КА привел к развитию теории фазометрических систем с обобщением метода дисперсионного интерферометра на случай произвольного количества когерентных сигналов и получением выражения для измеряемой величины как линейной комбинации полных фаз всех используемых сигналов. При этом были предложены и разработаны системы с использованием когерентного запрашивающего сигнала <sup>21-23</sup>, предназначенные как для решения радионавигационных задач, так и для изучения свойств космической плазмы, через которую проходят рассматриваемые когерентные сигналы.

Вопросы, относящиеся к исследованию приземной, межпланетной плазмы и ионосфер других планет с помощью их просвечивания когерентными частотами, излучаемыми ИСЗ и КА, широко освещались в научной литературе. Достаточно сослаться на большие обзоры Дж. Эванса <sup>24</sup> и Я. Л. Альперта <sup>25</sup> и статьи М. А. Колосова, О. И. Яковлева и др. <sup>26</sup>, М. А. Колосова и др. <sup>27</sup>, М. Б. Васильева, А. С. Вышлова и др. <sup>28,29</sup>. Не вдаваясь в детали, укажем, что с помощью экспериментов с дисперсионным интерферометром, которые зарубежные исследователи называют раз-

ностно-доплеровским методом, получены значения интегральной и локальной электронной концентрации для различных высот в различных условиях для земной ионосферы, оценены многие параметры возникающих в ней неоднородностей, получены оценки электронной концентрации межпланетной плазмы и установлен ряд характеристик ионосфер Венеры и Марса.

Рассмотрение широкого класса радиоинтерференционных систем с запросными и ответными когерентными сигналами показало, что эффективным вариантом систем с когерентным ответом является интерферометр с двумя запросными и тремя ответными линиями связи. Такая система должна обеспечить измерение параметров нестационарных процессов, протекающих в плазме на пути распространения радиоволн, позволяя при этом определять местоположение этих процессов на трассе связи. В отличие от системы с одночастотной запросной и ответной линиями связи, т. е. обычной системы траекторных измерений радиальной скорости движения КА, в которой точная компенсация доплеровского сдвига частоты принимаемого сигнала невозможна, в этом варианте измеряемая величина не должна зависеть от параметров движения КА, что повышает чувствительность метода и точность измерений.

Можно также отметить, что эксперименты, проводимые с использованием фарадеевского вращения плоскости поляризации одной из компонент радиоизлучения, распространяющегося в плазме при наличии магнитного поля, фактически также являются вариантом радиоинтерференционной методики с использованием интерференции на одной и той же частоте двух различно поляризованных компонент.

При этом во многих экспериментах сами условия проведения измерений определяют необходимость измерений не значений разностей фаз, а их изменений, т. е. приводят к частотным измерениям.

С другой стороны, создание высокостабильных квантовых стандартов частоты позволяет производить преобразование частоты практически без нарушения первоначальной стабильности частоты исходного колебания и таким путем создавать новые модификации радиоинтерференционных устройств.

В качестве примера можно рассмотреть вариант радиоинтерферометра с использованием квазикогерентного излучения с таким преобразованием частоты, который позволит исключить (или существенно подавить) влияние обыкновенного доплеровского смещения частоты при установке ответчика на борту ИСЗ. Подобный эксперимент был реализован Н. Г. Басовым, Б. М. Чихачевым и др.<sup>30,31</sup> для оценки обусловленного гравитационным полем Земли сдвига частоты колебаний, испущенных наземным излучателем и ретранслированных обратно с борта ИСЗ (после соответствующего преобразования частоты). На борту ИСЗ был установлен квантовый стандарт частоты со стабильностью порядка  $10^{-11}$  Гц. Запросный сигнал, посланный с земли с частотой  $\omega_0$ , после приема на борту ИСЗ имел частоту  $\omega_0 + \Delta\omega_0$ , где  $\Delta\omega_0$  — смещение частоты из-за эффекта Доплера, влияния среды и других факторов. При этом можно считать, что  $\Delta\omega_0 \ll \omega_0$ .

Частота колебаний генератора на спутнике выбирается равной  $2\omega_0$  (с возможной точностью). Вычитание частоты принятых колебаний из частоты генератора дает сигнал с частотой

$$\omega' \approx \omega_0 - \Delta\omega_0.$$

На земле он принимается с частотой

$$\omega_1 = \omega' + \Delta'\omega',$$

где опять  $\Delta'\omega'$  — изменения частоты принятого на земле сигнала за счет эффекта Доплера, влияния ионосферы и т. д.:

$$\omega_1 \approx \omega_0 - \Delta\omega_1 + \Delta'\omega_0.$$

Сравнение частоты этого сигнала с частотой запроса  $\omega_0$  дает

$$\Delta\omega \approx \Delta\omega_0 - \Delta\omega_0.$$

Так как перельтивистский эффект Доплера и изменение частоты вследствие влияния среды не зависят от направления распространения

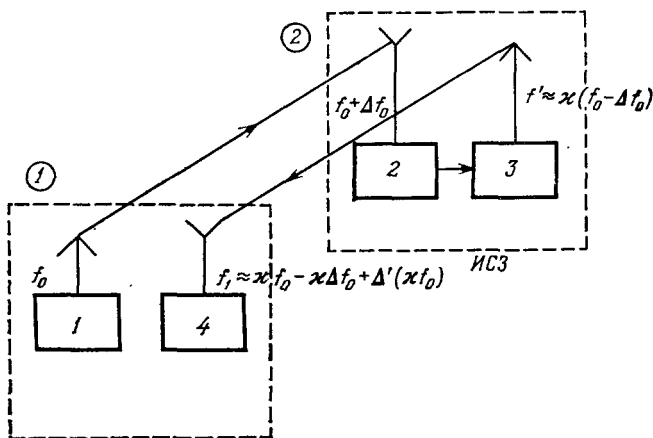


Рис. 3. Схема действия интерферометра с некогерентным ответом для наблюдения гравитационного смещения частоты.

$\kappa$  — коэффициент, близкий к единице.

сигналов, то они компенсируются в выражении для  $\Delta\omega$ . Смещение же частоты в гравитационном поле и релятивистский эффект Доплера имеют разный знак для запросного и ответного сигналов и поэтому в  $\Delta\omega$  входят их удвоенные значения.

Описанная схема преобразования частоты практически не реализуется, так как невозможно вести прием и излучение на совпадающих частотах. Поэтому в реальных экспериментах частоты запроса и ответа несколько сдвигаются и компенсация эффекта Доплера становится не полной, но достаточной, чтобы не маскировать ожидаемое смещение частоты за счет действия гравитационного поля (рис. 3). В работе <sup>32</sup> приводятся результаты подобного эксперимента, качественно подтвердившие наличие искомого гравитационного смещения. В этом эксперименте используется нестационарная интерференционная картина, получаемая за счет взаимодействия колебаний, созданных аналогичными, но независимыми квантовыми источниками стабильных колебаний, и в связи с этим подобные эксперименты получили название интерференционных с квазикогерентным ответом. Очевидно, стабильность квантовых стандартов частоты порядка  $10^{-11}$ — $10^{-12}$  Гц может обеспечить постоянство отсчетов интерференционной картины на несущих частотах порядка  $10^7$  Гц не лучше  $10^{-5}$  с<sup>-1</sup> при абсолютном совпадении частот генераторов на земле и на ИСЗ или позволит не хуже, чем с указанной точностью, производить отсчет скорости изменения разности фаз, т. е. наблюдаемых разностных частот (частот биений).

В настоящее время в литературе предложено много различных вариантов радиоинтерферометров с квазикогерентным ответом, предназначенных для наблюдений нестационарных процессов в приземной и космической плазме, а также разрывов в магнитосфере и межпланетном пространстве. Возможность наблюдения интерференции не строго когерентных колебаний и соответствующих преобразований частоты существенно расширяет потенциальные возможности радиоинтерференционной методики (см., например, <sup>33,34</sup>).

В заключение следует сказать несколько слов о получивших большое распространение методах наблюдения ряда процессов в ионосфере и в космической плазме путем наблюдения изменения частоты принимаемых колебаний за счет эффекта Доплера и других подобных эффектов, связанных изменением оптической длины пути. Эти эксперименты, нашедшие отражение в обширнейшей литературе, естественно рассматривать как дальнейшее развитие и усовершенствование исходной радиоинтерференционной методики. Методы, основанные на наблюдении изменения разности фаз двух когерентных излучений, из которых одно прошло через интересующую нас область пространства, также были рассмотрены и применены в исходных работах Л. И. Мандельштама и его школы (см. <sup>3,15,35</sup>). Однако эти методы применимы лишь для изучения сравнительно медленных и крупномасштабных процессов. При наблюдении быстротекущих процессов удобнее регистрировать не изменение разности фаз, а ее производную, т. е. частоту. Поэтому наблюдение изменения исходной частоты является естественным развитием радиоинтерференционной методики с заменой второго когерентного колебания местным достаточно стабильным опорным источником колебаний, с которым и сравнивается наблюдаемое колебание. Этот метод, получивший общее название доплеровского метода, в 60-х годах начал интенсивно развиваться применительно к изучению свойств и динамики ионосферы и свойств космической плазмы. Сколько-нибудь подробное изложение особенностей этого метода и полученных с его помощью результатов завело бы нас слишком далеко, в силу чего мы ограничимся лишь ссылкой на весьма исчерпывающий обзор С. А. Намазова, В. Д. Новикова и И. А. Хмельницкого, опубликованный в 1975 г. <sup>36</sup>.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанные в данном обзоре работы в области радиоинтерферометрии, начатые в тридцатых годах нашего века, показывают исключительную плодотворность основополагающих идей Леонида Исааковича Мандельштама о путях осуществления и применения интерференции радиоволн. Предложенные им и разработанные совместно с Н. Д. Папалекси различные варианты радиоинтерферометров, использующих интерференцию на соизмеримых частотах, и фазовые методы измерения, позволили решить широкий круг научных и практических задач. Они открыли новые пути практического использования радиоволн и заложили основу новых методов исследования распространения радиоволн и изучения среды, в которой оно происходит.

Как первоначальные работы, проведенные еще при жизни Л. И. Мандельштама, так и дальнейшее развитие всего этого направления показали исключительную плодотворность радиоинтерференционных методов для радионавигации, геодезии, для исследования ионосферы и ее возмущений, а также в приложениях к космическим исследованиям. И если в настоящее время положения, лежащие в основе многочисленных вариантов радиоинтерференционных устройств, уже представляются совершенно очевид-

ными, то это лишь еще раз подчеркивает глубину и физичность «общеколебательного» подхода Леонида Исааковича к самым разнообразным физическим явлениям и его искусство находить в этих явлениях те стороны, которые до этого ускользали от внимания других исследователей, а после его разъяснения становились предельно ясными и наглядными. Весь цикл работ по радиоинтерферометрии являет собой прекрасный образец научного творчества Л. И. Мандельштама, составляя один из основополагающих разделов современной радиофизики и ряда технических применений радиоволн.

Институт земного магнетизма, ионосферы  
и распространения радиоволн АН СССР

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Мандельштам Л. И. и Папалекси Н. Д. Заявл.н. 16.12.1930 г. Авт. свид. № 27639.
2. Мандельштам Л. И.— Изв. АН СССР. Сер. физ. 1938, т. 2, с. 525.— То же: В Полном собрании трудов.— М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950. Т. III, с. 63.
3. Мандельштам Л. И., Папалекси Н. Д. В кн. Новейшие исследования распространения радиоволн вдоль земной поверхности.— М.: Гостехиздат, 1945.— С. 7.— Статья 1  
Мандельштам Л. И. Полное собрание трудов.— М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1947.— Т. II, с. 232.
4. Мандельштам Л. И. Папалекси Н. Д.— ЖТФ, 1937, т. 7, с. 559.
5. Щеголев Е. Я.— Ibid., С. 579.
6. Мандельштам Л. И., Папалекси Н. Д., Щеголев Е. Я.— Цитир. в <sup>3</sup> сб.— С. 145.— Статья 4.
7. Грузинов А. И., Миндлин Л. Е.— Изв. АН СССР. Сер. физ. 1940, № 3, с. 468.
8. Щеголев Е. Я. Радиоинтерференционные дальномеры и опыт их практического применения.— Л.; М.: Изд-во Главсевморпути, 1941.
9. Щеголев Е. Я. Цитир. в <sup>3</sup> сб.— С. 231.— Статья 231.
10. Воробьев В. И.— Ibid.— С. 231.— Статья 8.
11. Грузинов А. И., Миндлин Л. Е.— Ibid.— С. 224.— Статья 7.
12. Альперт Я. Л., Мигулин В. В.— Изв. АН СССР. Сер. физ. 1940, т. 4, с. 458.
13. Альперт Я. Л., Мигулин В. В., Рязин П. А.— ЖТФ, 1941, т. 11, с. 7.
14. Альперт Я. Л., Мигулин В. В.— Цитир. в <sup>3</sup> сб.— С. 172.— Статья 5.
15. Мигулин В. В.— УФН, 1947, т. 33, с. 353.
16. Грингауз К. И.— ДАН СССР, 1958, т. 120, с. 1234.
17. Davies K., Friz R. V., Grubb R. N., Jones J. E.— Radio Sci., 1975, v. 10, p. 785.
18. Davies K., Fritz R. V., Gray T. V.— J. Geophys. Res., 1976, v. 81, p. 2825.
19. Willmann J. P., Tucker A. J.— Ibid., 1968, v. 73, p. 385.
20. Willmann J. P.— IEEE Trans., 1965, v. AES-1, p. 283.
21. Савич Н. А. Радиотехн. и электрон., 1967, т. 12, с. 606.
22. Савич Н. А.— Ibid., 1973, т. 18, с. 1358.
23. Савич Н. А., Самознаев Л. Н.— Ibid., 1976, т. 21, с. 594.
24. Evans J. V.— COSPAR. Beacon Symposium Proceedings.— Boston, USA, 1976.
25. A'pert Ja. L.— Space Sci. Rev., 1976, v. 18, p. 551.
26. Колосов М. А., Яковлев О. И., Ефимов А. И.— ДАН СССР, 1968, т. 182, с. 93.
27. Колосов М. А. и др.— Радиотехн. и электрон., 1973, т. 18, с. 2009.
28. Васильев М. Б., Вышков А. С., Колосов М. А.— Косм. исслед. 1975, т. 13, с. 48.
29. Александров Ю. Н., Васильев М. Б., Вышков А. С. и др.— Ibid., 1976, т. 14, с. 819.
30. Басов Н. Г., Чихачев Б. М. и др.— УФН, 1961, т. 75, с. 1
31. Басов Н. Г., Борисенко М. И., Дубоносков С. П. и др.— Косм. исслед., 1967, т. 5, с. 608.
32. Чихачев Б. М., Иванов М. Е., Федоренко Г. М. и др.— Ibid., 1975, т. 13, с. 381.
33. Стаханов И. П.— Ibid., с. 375.

34. Стаханов И. П., Ковалевский И. В.— Геомагн. и аэроном., 1976, т. 16, с. 511.
35. Папалекси Н. Д.— В кн. Труды экспедиции по наблюдению полного солнечного затмения 19.VI.1936 г. Т. 1—Л.: АН СССР, 1936.— С. 115.— То же: В Собрании трудов.— М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1948.— С. 143.
36. Намазов С. А., Новиков В. Д., Хмельницкий И. А.— Изв. вузов. Сер. «Радиофизика», 1975, Т. 18, с. 473.
37. Гюннинен Э. М., Макаров Г. И. и др.— В кн. Дифракция и распространение волн. Вып. 3.— Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1964.