

Применение обратных инверсных доплеровских методов на интерферометрах со сверхбольшой базой

С.Ф. Коломиец, Л.А. Луканина

Фрязинский филиал ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Московская область, г. Фрязино, пл. Введенского, д. 1, radiometeo@mail.ru

Лекция посвящена обсуждению различных подходов к интерпретации результатов интерферометрического радиопросвечивания потоков плазмы вблизи Солнца. Показано, что измерения, проведенные с использованием космических аппаратов (когерентное зондирующее излучение, условия обработки в плечах интерферометра и синхронная дискретизация), в целом позволяют применять методику обработки сигналов, которая аналогична хорошо известной доплеровской обработке в акустической локации и радиолокации. Тем не менее, космические условия имеют свои особенности. Поэтому интерпретация результатов доплеровской обработки сигналов интерферометрического радиопросвечивания сталкивается со специфической проблемой формирования доплеровских частот, превышающих частоту несущей. Получение таких сигналов в земных условиях невозможно в радиолокации и крайне маловероятно в акустике. Это заставляет совершенствовать классические подходы к их интерпретации. В рамках предлагаемой авторами модели обратных инверсных доплеровских измерений удается получить вполне адекватное представление многоволновых доплеровских спектров движения сплошной неоднородной среды, каковой являются исследуемые потоки плазмы. Их динамическая структура в целом совпадает с ожидаемой и характеризуется значительно большей детальностью по сравнению той, что была доступна ранее с использованием классических методов исследования. Это позволило выявить новую динамическую составляющую, предположительно соответствующую крупномасштабным неоднородностям, имеющим очень высокие скорости движения. Подобные эффекты не регистрировались ранее ни контактными средствами исследования, ни тем более средствами радиопросвечивания. В существующей монографической литературе доплеровские измерения трактуются очень узко, только в приложении к монохроматической несущей, фазовая скорость которой по определению совпадает с групповой. Поэтому при использовании сложных сигналов их однозначная интерпретация затруднительна. Это заставляет обратиться к рассмотрению физического смысла фазовых и групповых скоростей волновых процессов в приложении к различным моделям зондирования природных сред. Отметим, что математически строгая постановка задачи распространения в терминах групповых и фазовых скоростей сигнала со сложным спектром, и с учетом эффекта Доплера в неравномерно движущихся средах чрезвычайно громоздка и противоречива. Тем не менее, опыт доплеровских измерений, накопленный в дистанционном зондировании атмосферных объектов, позволяет сформулировать предварительные гипотезы и уточнить вопросы, заслуживающие дальнейшего обсуждения.

The report is devoted to the discussion of various approaches to the interpretation of the results of interferometric occultation measurements within plasma flows near the Sun. It is shown that measurements made using spacecraft (coherent sounding signals, processing conditions in the interferometer and synchronous sampling of final data), as a whole, make it possible to apply a signal processing technique that is analogous to the well-known Doppler processing in sonars and radars. Nevertheless, the space conditions have their own peculiarities. Therefore, the interpretation of the results of Doppler processing of signals of interferometric occultation interferes with the specific problem of forming Doppler frequencies exceeding the carrier frequency. Getting such signals in terrestrial conditions is impossible with radars and is extremely unlikely with sonars. This makes it necessary to improve the classical approaches formed in terrestrial conditions in order to make a plausible interpretation of discussed signals. In the framework of the backward inverse Doppler measurement model proposed by the authors, it is possible to form a quite adequate

representation of the multiwavelength Doppler spectra of the motion of a continuous inhomogeneous medium like plasma fluxes near the Sun. Their dynamic structure in general meets expectations and characterized by much greater detail compared to what was previously available using classical research methods. This made it possible to spot a new dynamic component, presumably corresponding to large-scale inhomogeneities having very high velocities. Similar effects were not registered previously either by contact means of investigation to say nothing about occultation. In the existing monographic literature, Doppler measurements are treated very narrowly, only in relation to a monochromatic carrier, the phase velocity of which by definition is equal to the group velocity. Therefore, using complex signals, their unambiguous interpretation is not clear. This makes it necessary to address the physical meaning of phase and group velocities of wave propagation processes in respect to various models of natural media sounding. We note that the mathematically rigorous formulation of the propagation problem in terms of the group and phase velocities of a signal with a complex spectrum, taking into account the Doppler effect of accelerating media, is extremely cumbersome and contradictory. Nevertheless, the experience of Doppler measurements, accumulated in remote sensing of atmospheric objects, allows us to formulate preliminary hypotheses and clarify questions for further discussion.

Введение

Электромагнитное излучение – это основа дистанционного зондирования, которое представляет собой одно из основных современных средств развития наших представлений об окружающем мире, который, в самом общем виде, можно представить, как совокупность движущейся материи и полей различной природы.

С использованием средств дистанционного зондирования ищут воду на Марсе и Луне, исследуют процессы в атмосфере Земли и Солнечной короне, пытаются обнаружить черные дыры в центрах галактик. Пассивные системы зондирования подразумевают анализ и интерпретацию электромагнитных полей, излучаемых естественными источниками непосредственно, или тех же полей, но рассеянных частицами движущейся материи. В активном зондировании используется поле, “специально подготовленное” с помощью “специального излучающего устройства”, находящегося в распоряжении исследователей. Уникальная возможность активного режима состоит в возможности исследования угла фарадеевского вращения плоскости поляризации, который по сути является результатом взаимодействия полей.

Таким образом, дистанционное зондирование представляет собой огромную по масштабам область интеллектуальной и технической деятельности, характеризующуюся как чрезвычайно большим разнообразием подходов к проведению измерений и интерпретации регистрируемых сигналов, так и высокой активностью по сбору и накоплению данных.

Охватить всё разнообразие методов и средств дистанционного зондирования в рамках одной лекции, конечно, невозможно. Однако, все они, будучи основанными на исследовании радиоэха, безусловно, обладают общими чертами. Эта мысль, даже допуская, что в разных условиях черты эти проявляются по-разному, позволяет в определенной степени организовать поиск нужных сопоставлений. Причем, наличие разнообразия для успешного подбора вариантов сопоставления как раз является положительным обстоятельством.

В целом стоит отметить, что открытие самого электромагнитного излучения являлось предметом, так называемой методической научной революции, случившейся на рубеже XX века. До появления электромагнитного поля в физике объект, который изучался (тело, жидкость), был очевиден, и основной задачей считалось нахождение законов его движения. Это формировало определенные традиции обобщения эмпирического опыта и использование математики. В то же время, работы Фарадея и затем Максвелла впервые позволили установить сам факт существования нового

объекта.

Таким образом, ситуация изменилась. В центре внимания оказался сам объект исследования, а законы его движения стали лишь одним из способов его описания. Это не могло не отразиться на способах использования математики в физике. Не следует исключать, что эти способы, три столетия развивавшиеся как средство описания движения объектов, параметризация которых не вызывала особых проблем, могут оказаться иными при выявлении новых объектов, способы параметризации которых неочевидны.

Краткий философский экскурс, был предпринят для более ясного представления цели настоящей лекции и роли парадоксов. Их характер также изменился. Последние, образно говоря, кроме указания на ошибки в математике или логике, могут с некоторой вероятностью указывать также и на ранее не принимаемые во внимание объекты. Достаточно сравнить открытие дальних планет Солнечной системы, электромагнитный эфир, преобразования Лоренца, инфракрасную катастрофу и корпускулярно-волновой дуализм.

Целью настоящей лекции является рассмотрение проблемы формирования новых подходов к обработке данных, полученных в дистанционном зондировании солнечной короны.

Как известно, солнечная корона является верхними слоями солнечной атмосферы и связана с одним из наиболее ярких современных парадоксов — её «разогревом» (почти трехкратным разгоном электронов и ионов). Последний наблюдается на расстоянии до 10 солнечных радиусов (R_S) от видимой поверхности Солнца. Однако, очевидных источников энергии (объектов) для этого процесса — кроме более холодного Солнца, энергия которого по законам термодинамики не может использоваться для подобного «нагрева» — не наблюдается.

Как следует из всего вышеизложенного, предмет обсуждения может оказаться как математической или логической ошибкой, так и признаком не учитываемых ранее физических аспектов изучаемого явления. То, что результаты были получены с использованием достаточно простой математики, несколько повышает вероятность последнего. Но тот факт, что «простая математика» стала возможна благодаря специфическим подходам к интерпретации давно известных экспериментальных данных требует более внимательного отношения к результатам такой обработки, отличающейся от применяемой в течение более чем сорокалетнего периода изучения Солнца с помощью космических аппаратов (КА).

Забегая вперед, следует отметить, что разработка указанных подходов была продиктована необходимостью интерпретации доплеровских частот, превышающих частоту несущей, но она заставила с новых позиций взглянуть на ряд «обычных» для радиофизики, но редко обсуждаемых вопросов. Среди них следует отметить: принципиальную возможность, а также условия для регистрации доплеровской частоты, превышающей частоту несущей; смысл фазовой скорости при распространении монохроматической электромагнитной волны и фазовой скорости гармонической составляющей фурье-разложения электромагнитного поля со сложным спектром, в том числе рассеянного на многочисленных движущихся материальных частицах; смысл фазовой скорости фурье-разложения результатов зондирования движущихся множественных материальных частиц, в случае, если каждая из них представляется видеоимпульсом; способ измерения фазовой скорости в приложении к трем рассматриваемым случаям; информационные возможности использования зондирующего излучения, сформированного самим исследователем в сравнении с излучением малоизученного естественного объекта или монохроматического когерентного излучения; физически ясные причины, обеспечивающие однозначное

соответствие спектра флуктуаций мощности обратного рассеяния электромагнитного излучения на множественных частицах и пространственного спектра скорости диссипации энергии турбулентного движения самого множества материальных частиц.

В отношении перечисленных вопросов, по мнению авторов, требуется большая — чем можно достичь с использованием современной монографической литературы по оптике, акустике и радиофизике — ясность.

Интерферометрия в радиопросвечивании солнечной короны

Основное достоинство радиопросвечивания состоит в возможности получать экспериментальные данные при полном отсутствии специальной аппаратуры на борту. Оно открывает возможность проведения измерений даже в миссиях, которые напрямую не связаны с Солнцем. За последние сорок лет с использованием радиопросвечивания накоплен значительный экспериментальный материал. Однако в целом метод считается полуколичественным с соответствующими требованиями к интерпретации данных.

Часто имеется возможность принимать сигнал от космического аппарата (КА) одновременно в двух центрах космической связи. Такой режим позволяет более точно оценить один из наиболее важных параметров — скорость движения среды, пересекающей лучи, соединяющие космический аппарат (КА) и приемные пункты. Такой режим предлагается относить к интерферометрическим измерениям со сверхбольшой базой [1]. Характерная особенность большой базы — отсутствие синхронизации в трактах ПЧ. Сами тракты, тем не менее, прекрасно синхронизированы локально. Чтобы использовать известные методы когерентной обработки сигнала в таких условиях, разработаны специальные технические решения и методы [1].

До сих пор для интерпретации интерферометрических измерений использовались в основном лишь простейшие подходы, основанные на оценке группового времени запаздывания (ГВЗ) [2] или дисперсии фазовых скоростей кросс-спектра [3, 4]. Последние логически следуют из давно сложившихся и прочно обосновавшихся в радиоастрономии подходов к работе с одним немонахроматическим источником. Важно подчеркнуть, что все известные методики подразумевают использования большого количества априорных данных и основаны на предположении неизменного расстояния между лучами (величины интерферометрической базы). Это, безусловно, снижает ценность получаемых оценок.

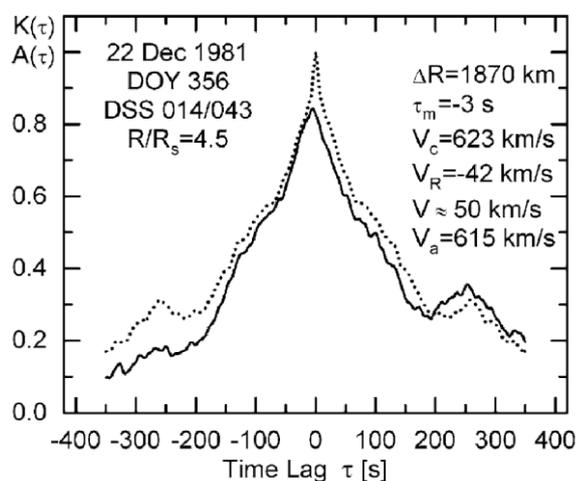


Рис. 1. Результаты классической обработки данных радиопросвечивания (см. [2])

Данные, представленные на Рис. 1. позволяют в общих чертах представить классическую методику работы с интерферометрическими данными радиопросвечивания. Сдвиг характерного максимума кросс-корреляционной функции или групповое время задержки τ_m позволяет оценить групповую скорость V_c на базе ΔR , считающейся неизменной за время измерения. Однако, оба луча, соединяющих КА и разнесенные наземные пункты приема, движутся в пространстве. Скорость их перемещения V_R в направлении изучаемых потоков плазмы можно оценить по «баллистическим» данным, которые известны с высокой точностью. Скорость медленных потоков плазмы V на данном расстоянии от Солнца (R/R_S) может быть априорно оценена по усредненным данным множества измерений, полученных различными средствами в предыдущие годы. Оценённая ранее групповая скорость за вычетом разницы между двумя последними параметрами V_R и V , позволяет оценить «быстрый солнечный ветер» V_a , связываемый часто с волновыми явлениями, распространяющимися в плазме.

Результаты настоящего исследования показывают, что интерферометрические измерения с когерентным источником имеют значительно больший информационный потенциал, достаточный для достоверных количественных измерений основных динамических параметров движения исследуемого объекта без привлечения априорной информации.

Для обоснования предлагаемого метода предлагается рассмотреть те же самые данные, что были использованы при подготовке Рис. 1. Это многократно проверенные экспериментальные данные о флуктуациях угла фарадеевского вращения плоскости поляризации, полученные в проектах Helios.

Сигналы радиопросвечивания вообще, и соответствующих экспериментов Helios, в частности, существенно нестационарны. Их предобработка обычно состоит в вычитании центрирующего многочлена (или ВЧ фильтрации) с последующим сглаживанием (или НЧ фильтрацией) [2].

Неустранимым недостатком подобных манипуляций с данными является возможность формирования ложной кросс-корреляции. Её вероятность сложно оценить, особенно принимая во внимание, что сами параметры предобработки (возможно в виду рутинности подобных операций) практически никогда не указывают ни в публикациях, ни даже в сопроводительных отчетах о первичной предобработке данных того или иного эксперимента, распространяемых для ознакомления и исследований в различные научные центры.

По данным о флуктуациях угла фарадеевского вращения удавалось надежно определять ГВЗ с использованием классической кросс-корреляции (см., например, Рис. 1). Однако попытка восстановить параметры предобработки, которые не были указаны в ряде ранее опубликованных результатов, позволила авторам обнаружить, что в некоторых случаях незначительные изменения условий фильтрации или объема выборки приводили к исчезновению или существенному изменению положения характерного максимума кросс-корреляционной функции (ККФ). Наиболее вероятные объяснения указанных фактов не находят способов проверки в рамках классических подходов, опирающихся на использование кросс-корреляции.

В настоящее время можно считать установленным, что солнечный ветер во время низкой активности Солнца и переходные периоды представляет собой вдали от солнечного экватора совокупность как минимум двух потоков, движущихся с разными скоростями [5]. Однако при оценке ГВЗ отсутствует возможность анализа структуры рассеивающей среды, так что количество потоков вводится в классические методики априорно [4].

В рамках подобной модели перемежающихся потоков аналитическая ценность

информации, полученной с использованием ГВЗ, оставляет желать лучшего, а необходимость разработки более тонких методов анализа данных не вызывает сомнения.

Следует отметить, что подобные затруднения не уникальны. Похожая ситуация наблюдалась с перемежаемостью атмосферной турбулентности. Она до появления доплеровской радиолокации была одним из наиболее сложных вопросов при оценке динамики нижних слоев атмосферы. Зависимость между скоростью движения потока и интенсивностью его взаимодействия с электромагнитным полем зондирующего излучения также нельзя считать вполне определенной и неизменной во времени. Это дополнительно снижает ценность результатов, полученных с использованием кросс-корреляции.

Способ доплеровской обработки, рассматриваемый в этой лекции, свободен от большинства недостатков, указанных выше, а область его применения может оказаться намного шире задач радиопросвечивания. При его рассмотрении полезно явно определить режимы «обратной» и «инверсной» локации, принцип «качающихся аналитических точек».

Смысл обратной локации наиболее нагляден в случае точечной цели, при заданном законе движения которой с использованием известных доплеровских зависимостей можно оценить фазовую скорость монохроматической несущей. Обратная локация хаотических сред более громоздка при том же физическом содержании. Но в условиях сплошных хаотических сред, разумно рассмотреть еще одну логическую «инверсию». Если для зондирования можно использовать шумоподобную несущую (что, например, используется в военных приложениях, типа ММО радиолокации), то почему не поменять местами хаотическую движущуюся среду и монохроматическую несущую? Подобные измерения предлагается называть «инверсными доплеровскими измерениями», а, соответственно, классические — измерениями «с генерируемой несущей». Важно, что «обратный инверсный» метод открывает возможность оценки фазовой скорости среды, используемой как несущая.

Рассматриваемый подход, как может показаться с первого взгляда, должен привести лишь к элементарным перемещениям переменных между левой и правой частями уравнений, входящих в задачу, и для этого не следует вводить дополнительных определений. Но это не так в случае перехода к использованию среды в качестве несущей, особенно при неизвестной дисперсионной зависимости.

В общем, известные соотношения между скоростью и доплеровской частотой, естественно, сформулированы для групповой скорости, которая, в случае использования монохроматических сигналов, совпадает с фазовой. Этот подход допускает распространение и на сложные сигналы с полностью или частично известным составом (то есть сигналы, сформированные под контролем исследователя). Учитывая возможность разложения Фурье, такую модель следует рассматривать, как достаточно общую. При неизвестном составе сигнала и характере дисперсионной зависимости следует найти способ их определить, тем самым свести задачу к рассматриваемой.

По определению, способ измерения фазовой скорости некоторой спектральной составляющей сложного сигнала заключается в сужении полосы фильтрации до тех пор, пока сигнал на выходе не станет «узкополосным» с нужной точностью. Далее разность фаз в двух точках позволит оценить фазовую скорость при известном расстоянии между ними. Логика наблюдавшихся до сих пор явлений в распространении электромагнитных волн указывает на то, что значение фазовой скорости не несет физического содержания. Образно говоря, оно нужно лишь для корректной записи уравнений распространения в случае использования фурье-

разложения.

Классический пример с призмой, разлагающей белый свет на составляющие, движущиеся по определению с разными фазовыми скоростями (иначе не получилось бы разложения) заставил в свое время рассмотреть следующий естественный вопрос. Имеет ли физический смысл, получаемый с помощью призмы цветной свет? Физический состав белого цвета, скорее всего, — это множество цугов гармонических колебаний, случайных по фазе, частоте и длительности. Но установить это удастся лишь с использованием разнообразных измерительных инструментов, а не только призмы.

Несмотря на имеющуюся возможность, в форме мысленного эксперимента, сложить отдельные цуги с одинаковой частотой в непрерывное колебание, (манипулированное по амплитуде и фазе), общепринятый ответ на поставленный выше вопрос — нет. Узкополосные гармонические составляющие «на выходе» призмы — это лишь один из способов представления случайных флуктуаций интенсивности белого света, хорошо описываемый к тому же средствами фурье-разложения. Имеют ли смысл абсолютные значения фазовых скоростей отдельных составляющих? Да, но лишь в том смысле, что они представляют разложение групповой скорости, соответствующее выбранному представлению. Обычно более интересна их дисперсия, характеризующая в большей степени не излучение, а среду распространения.

Хотелось бы особенно подчеркнуть, что вышеприведенная модель сложилась в оптике, то есть в отношении электромагнитных колебаний с высокой энергией кванта, излучаемых достаточно узким — по меркам дистанционного зондирования — подмножеством естественных сред. Она оказалась применимой к распространению продольных колебаний в акустике. Но в то же время, есть основания полагать, что возможность полного переноса соответствующих подходов на случай зондирования сред, состоящих из хаотически движущихся дискретных частиц, требует более подробного рассмотрения.

В частности, именно изменение фазовой скорости при рассеянии монохроматического излучения на движущемся рассеивателе лежит в основе доплеровской обработки сигналов обратного рассеяния на распределенных множественных частицах. Иными словами, в доплеровских устройствах с монохроматической несущей информативным параметром является именно распределение фазовых скоростей. При дистанционном зондировании материальных сред, состоящих, по определению, из материальных частиц, она линейно связана с их движением.

Определим передатчик и приемник как «аналитические точки». В радиолокаторе между ними имеется мгновенная когерентная связь — местный гетеродин. При конечной скорости относительного движения цели и антенны сигнал на выходе синхронного детектора будет изменяться со временем, что даст возможность определить скорость.

Одна из аналитических точек может быть перенесена на борт движущейся точечной цели без изменения модели обработки сигнала при сохранении когерентной связи (КС) между точками и превышении ГВЗ основного канала над ГВЗ канала КС.

Представим хаотическую среду, движущуюся между аналитическими точками со скоростью меньше скорости света. Подобным условиям отвечает, например, излучатель акустического шума, направленный в сторону удаленного, возможно движущегося, приемника. В такой схеме генерируемый шум может быть записан и передан в приемник практически мгновенно с использованием электромагнитных волн, и математическая модель процесса, при известной дисперсионной зависимости

среды распространения, не будет отличаться от модели, описывающей работу обычного доплеровского радиолокатора. При движении приемника, правда, появляется нежелательное доплеровское смещение в канале КС, которого нет в радиолокационной схеме. На данном этапе важно другое: аналогично с записью шума для последующей передачи можно поступить и с измеренными в одной из точек параметрами хаотической среды.

В случае интерферометрических экспериментов, в распоряжении исследователя имеются измерения в двух точках, разнесенных на некоторое расстояние ξ , допускающие фурье-разложение. Описание распространения отдельных составляющих полученных фурье-спектров между точками достаточно тривиально и подчиняется теореме запаздывания с неизменным — в случае неподвижных точек — множителем запаздывания. Это позволяет по фазе кросс-спектра в оперативном режиме оценить характер дисперсионной зависимости с точностью до аддитивной константы. Последнюю можно приближенно оценить с использованием ГВЗ, рассчитанного по смещению максимума кросс-корреляции. Задав априорно дополнительные, хотя и достаточно слабые, условия на динамическую структуру среды (в частности, задавая количество потоков, имеющих различные скорости) и применяя далее метод минимального среднеквадратичного отклонения, можно оценить наиболее вероятные скорости заданного количества потоков. Обратные рассуждения не используются. Иными словами, рассматриваемый метод не позволяет оценить количество независимых потоков в среде [4].

Однако если привести аналитические точки в непрерывное относительное движение с некоторым известным законом (например, колебательным), то множитель запаздывания станет известной непрерывной функцией. Дополнительное «известное» позволяет добавить в схему дополнительное «неизвестное». Если неизменная интерферометрическая база позволяла определять лишь дисперсию фазовых скоростей, то с «качающейся базой» появляется дополнительная возможность непосредственного определения абсолютных фазовых скоростей.

Интересно, что доплеровский эффект в этом смысле может рассматриваться как альтернативный способ формирования дисперсионной зависимости. Иными словами, представление призмы, состоящей из неподвижных материальных частиц среды, формирующих «классическую дисперсию», может быть без нарушения логической целостности заменено на рассмотрение рассеяния на множестве движущихся частиц без привлечения каких либо представлений о «классической дисперсии». Подобная замена особенно показательна в случае линейной дисперсионной зависимости, которая аналогична линейной зависимости доплеровского смещения от скорости движения рассеивающей частицы.

Главное, что изменяется при переходе между указанными моделями — смысл фазовых скоростей отдельных гармонических составляющих сложного колебания. При рассмотрении рассеяния на множестве движущихся частиц фазовые скорости имеют ясное физическое содержание, в то время как в модели «классической дисперсии» они — лишь вспомогательное математическое средство разложения сложного колебания на гармонические составляющие.

С этих позиций наиболее сложной моделью является модель зондирования широкополосным сигналом множества движущихся частиц в среде с дисперсией. Для такой модели необходимы средства разделения «классической дисперсии» и доплеровского эффекта, одновременно и независимо влияющие на фазовые скорости различных составляющих фурье-разложения сигналов. Интерферометрические измерения с переменной базой могут рассматриваться как одно из таких средств.

Действительно, «качающиеся аналитические точки» позволяют не только оценить

дисперсионную зависимость, но и применить классическое уравнение доплеровской локации. Оно связывает известную в каждый момент времени интерферометрическую базу ξ , пространственную частоту (или соответствующую длину волны) неоднородности среды с измеряемой (то есть тоже известной) скоростью набега фазы.

В простейшем случае, если на всем времени измерения все зависимости рассматривать как линейные, можно получить:

$$v_n = \frac{\omega_n v_a}{\omega_n^\phi} \pm v_a$$

Частота флуктуаций ω_n (измеряемая) определяется неоднородностями масштаба λ_n , движущимися в пространстве со скоростью v_n , а доплеровская частота ω_n^ϕ — со скоростью «скольжения» (качания) аналитических точек v_a по тем же самым неоднородностям. Если $v_a \ll v_n$, то $\omega_n^\phi \ll \omega_n$. Одновременное измерение ω_n и соответствующей ей ω_n^ϕ позволяет оценивать v_n и λ_n при соблюдении очевидных допущений относительно микроструктуры и динамического состава среды. В зависимости от степени трансформации последних в процессе движения между точками, нельзя исключать, что флуктуации ω_n могут формироваться различными сочетаниями λ_n и v_n .

Это в частности справедливо в случае ускоряющейся среды и/или при значительном эффекте Доплера от «скольжения» аналитических точек (то есть изменении λ_n при переходе между инерциальными системами, движущимися со скоростями v_a и v_n). Оба эффекта ограничивают предельно достижимую точность метода, так как требуют сознательного расширения интервала элементарного фурье фильтра (спектрального разрешения) до той степени, которая обеспечит выполнение так называемой «гипотезы заморозенности», то есть неизменности модели микроструктуры и динамики среды, как они представляются с точки зрения используемого измерительного инструмента. Отметим, что аналогично широко распространенным пространственно-временным ограничениям, накладываемым гипотезой заморозенности, здесь формулируется еще одно, спектральное. Оно, естественно, логически и функционально связано с остальными. Контроль этого требования позволяет придать кросс-спектру с заданным разрешением ясное физическое содержание.

В случае линейного равномерного расхождения точек от центра симметрии, если $v_a \lambda_n^{-1} \geq 2T^{-1}$, то частоты ω_n , соответствующие одним и тем же λ_n , будут отличаться в двух точках на один отсчет и более. То есть требование существования интерпретируемого кросс-спектра ограничивает снизу $1/T$ — спектральное разрешение при данном v_a и наоборот. Исключая λ_n из рассматриваемого выражения получаем:

$$\frac{\omega_n v_a}{v_n} \geq 4\pi T^{-1}$$

Приведенное соотношение позволяет более осознанно выбирать спектральное разрешение при проведении анализа.

Среда солнечного ветра — это чрезвычайно сложный объект исследования с высокими скоростями движения среды и ускорениями, существенной нестационарностью флуктуаций рассеивающих свойств. Не менее сложными являются условия проведения измерений: высокая скорость скольжения аналитических точек вдоль среды и широкий интервал её изменения как следствие

значительных ускорений. Заслуживает упоминания, что кинематическая схема измерений предполагает дополнительное движение обеих аналитических точек как целого со скоростью V_R (относительно системы координат, в которой также движутся составляющие исследуемой среды со скоростями v_n) и друг относительно друга со скоростью v_a .

Забегая вперед, хотелось бы отметить, что вопрос о точности оценок, получаемых с использованием предлагаемого метода в отношении солнечного ветра, а также усвоение получаемой таким образом информации, еще потребует приложения усилий. На данном этапе хотелось бы подчеркнуть, что при изменении объема выборки (спектрального разрешения) качественные изменения тонкой структуры спектров флуктуаций совпадают с ожидаемыми на основе вышеприведенного соотношения.

Следует особо отметить также, что малые значения v_a по сравнению с характерными скоростями измерительной схемы приводили к тому, что ранее она в большинстве известных методов просто отбрасывалась. Тем не менее, авторами при обработке реальных данных было установлено, что разность фаз имеет периодический характер.

Геометрия экспериментов по радиопросвечиванию солнечной короны, без учета эффектов «второго порядка», связанных с отклонениями в движении КА по траектории или пространственных вариаций направления основного лепестка диаграммы направленности антенны, указывает на то, что подобные изменения могут объясняться только относительным движением аналитических точек.

Таким образом, открывается ранее не использовавшаяся возможность получения дополнительной информации об исследуемом явлении с использованием фазовой обработки, которая аналогична доплеровской в радиолокации. Абсолютные фазовые скорости отдельных спектральных составляющих будут оцениваться независимо и без использования средних квадратов, с методической точностью, которая будет ограничена сверху значением v_a .

В качестве иллюстрации работы рассматриваемого метода будут рассмотрены два интервала по 512 с измерений угла поворота плоскости поляризации со сдвигом 1500 с. и 6800 с. от начала интерферометрического приема сигналов с КА Helios, который 09 января 1983 г. начался в 20:01:16. Период дискретизации в обоих случаях составляет одну секунду. Кросс-корреляции между пунктами приема на этих интервалах показывают двух- и восьмисекундные ГВЗ, соответственно. На Рис. 2, 3 приведены основные спектральные составляющие флуктуаций регистрируемых в разнесенных точках приема сигналов, а также их кросс-спектр. Сигналы предварительно были центрированы многочленом второй степени и сглажены по семи точкам.

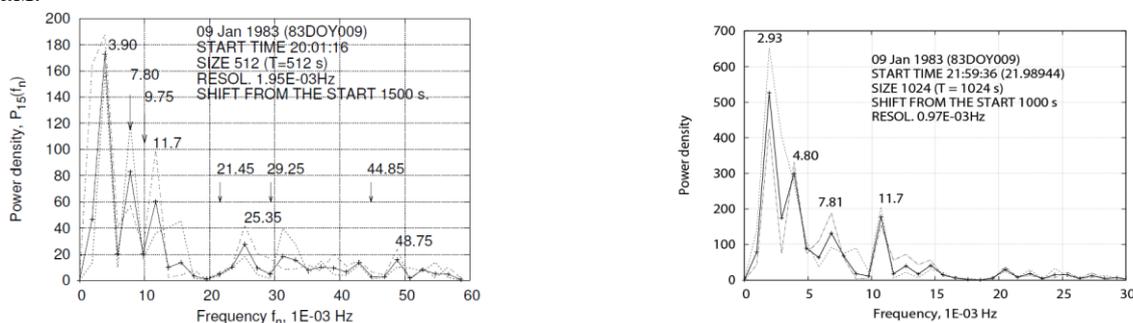


Рис. 2. Спектры флуктуаций в двух аналитических точках и их кросс-спектр для 512 с и 1024 с интервала со смещением 1500 с и 1000 с от начала интерферометрического приема 09 января 1983 года

В случае зондирования солнечной короны аналитическими точками являются области (разнесенные на расстояние ξ км), в которых излучение КА наиболее интенсивно взаимодействуют с околосолнечной плазмой. Они находятся в непрерывном относительном движении на заданном R_S - расстоянии от Солнца. Параметры их движения для рассматриваемого сеанса приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Баллистика сеанса 09 января 1983 г.

Время	R (R_\odot)	v_R (km/s)	ξ (km)	v_a (km/h)
20-00	3.70	40.5	1664.9	281.0
21-00	3.91	38.7	1945.9	166.5
22-00	4.11	40.5	2112.4	40.6
23-00	4.32	38.7	2153.0	-88.0
00-00	4.52	-	2065.0	-

На Рис. 4, 5 приведены доплеровские спектры по различным частотным составляющим спектров флуктуаций в аналитических точках, приведенных на Рис. 2, 3. Доплеровские спектры рассчитывались с шагом 5 с. Соответственно, количество точек в расчете спектра было уменьшено, чтобы покрыть временной интервал, примерно равный интервалу построения спектров флуктуаций. Обращает на себя внимание превышение доплеровской частотой частоты флуктуаций. По этой причине интерпретация данных не возможна на основе вышеприведенной зависимости для v_n , широко используемой в обычной доплеровской локации. Её корректировка потребовала усилий, которые не соразмерны с простотой найденного решения. Подобные же трудности возникают при попытке их объяснения и обоснования с использованием общепринятых концепций, что говорит о необходимости развития последних.

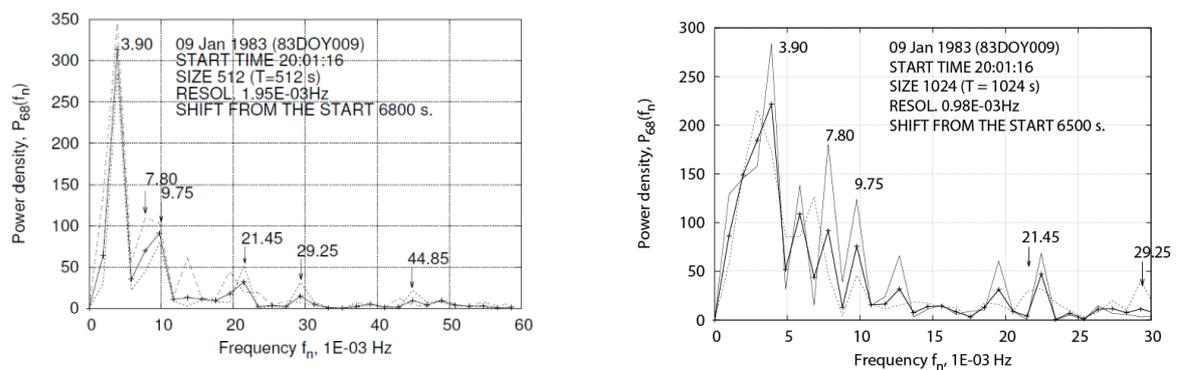


Рис. 3. Спектры флуктуаций в двух аналитических точках и их кросс-спектр для 512 с и 1024 с интервала со смещением 6800 с и 6500 с от начала интерферометрического приема 09 января 1983 года

На Рис. 4, 5 указаны скорости, соответствующие первым моментам доплеровских спектров. Среднее значение скорости по нескольким первым составляющим с максимальной спектральной мощностью позволяет получить приблизительную оценку групповой скорости среды и ГВЗ. Очевидно вполне удовлетворительное совпадение с результатами кросс-корреляционных оценок для обоих измерительных интервалов, приведенными на Рис. 6. Отметим, что эти интервалы и параметры предобработки отличаются от тех, что были использованы при подготовке Рис. 1. Так же хотелось бы обратить внимание, что график на Рис. 6, соответствующий сдвигу в 1500 с от начала интерферометрического приема, представляет собой пример

достаточно интересных данных: имеются два характерных пика по обе стороны от нуля.

Следует указать на чувствительность структуры полученного разложения ГВЗ на фазовые составляющие к спокойному (см. Рис. 3) и ускоренному (см. Рис. 2) режиму движения. Сопоставление фазовых скоростей различных спектральных составляющих и форм доплеровских спектров для спокойного и ускоренного режима движения позволяет не только получить ценную количественную информацию о движении солнечного ветра, но проследить тонкие связи между динамикой неоднородностей различных масштабов.

Помимо того, множество скоростей, выявленных с помощью рассматриваемого метода, достаточно хорошо согласуется с имеющимися представлениями о структуре солнечного ветра, ранее проведенными оценками и кинематической схемой полета КА.

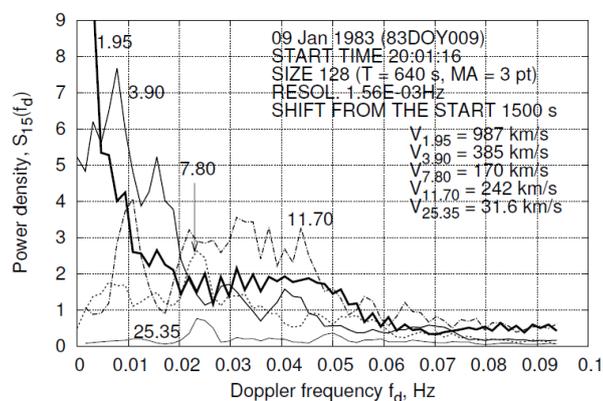


Рис. 4. Ненормированные спектры доплеровских частот, соответствующих разным частотным составляющим 512 с спектров пульсаций сигнала в аналитических точках (см. Рис. 2)

Обратные инверсные доплеровские спектры, указывают на высокую фазовую скорость наиболее крупномасштабных неоднородностей. Движение с высокими скоростями связывается в настоящее время с волновыми процессами и любая дополнительная информация о характере соответствующих процессов представляет значительный интерес [6, 7].

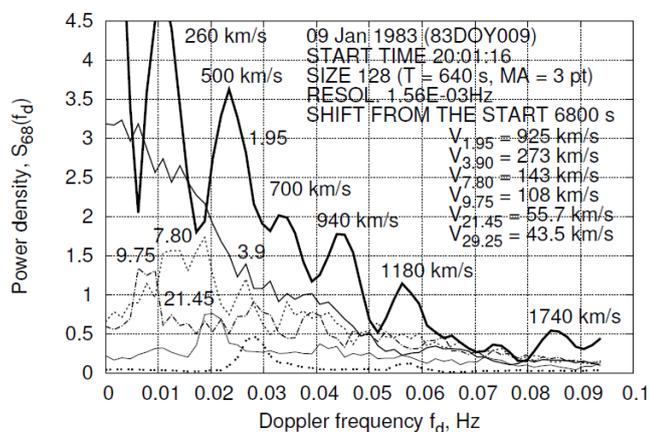


Рис. 5. Ненормированные спектры доплеровских частот, соответствующих разным частотным составляющим 512 с спектров пульсаций сигнала в аналитических точках (см. Рис. 3)

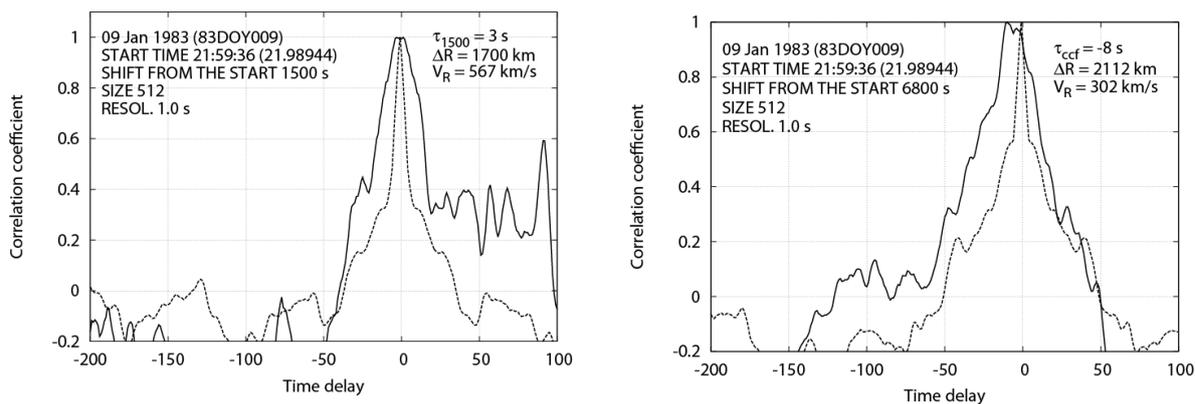


Рис. 6. Кросс-корреляционные и автокорреляционные функции 512 с интервалов со смещением 1500 с и 6800 с от начала интерферометрического приема 09 января 1983 года

Обсуждение специальных вопросов физики солнечного ветра выходит за рамки настоящей лекции. Тем не менее, нельзя не отметить достаточно неожиданную особенность полученных результатов, заключающуюся в наличии третьей, низкочастотной и высокоскоростной составляющей динамической структуры солнечного ветра.

В этом смысле следует отметить, что скорости порядка 1500-2000 км/с регистрировались в экспериментах по радиопросвечиванию с использованием кросс-корреляционной обработки данных, хотя и чрезвычайно редко.

К сожалению, контактными инструментами, установленными непосредственно на КА, такие скорости не наблюдались и возможность существования потоков с такими скоростями не считается предметом глубоких исследований. Тем не менее, в результате многочисленных экспериментов с рассматриваемой моделью обработки и интерпретации на различных данных радиопросвечивания солнечной короны третья составляющая присутствовала всегда.

Заключение

Таким образом, мы рассмотрели оригинальную модель обработки данных радиопросвечивания солнечной короны и на её основе экспериментальный метод расчета многоволновых доплеровских спектров обратного инверсного зондирования. Последние позволяют получать разложение на фазовые составляющие интегрального ГВЗ, полученного по данным измерений параметров хаотической сплошной среды в двух пунктах зондирования, разнесенных в пространстве по направлению движения среды.

Разработка обсуждавшейся в лекции модели потребовала заметных изменений в подходах к осмыслению экспериментальных данных с использованием классических представлений физики распространения и волновых процессов.

Рассмотрен вопрос применимости метода к исследованию ускоряющихся сред. Получены оценки применимости для условий, соответствующих движению солнечного ветра на расстоянии порядка $4R_s$, и проведена их экспериментальная проверка.

Разложение производится без использования какой-либо априорной информации. Особенностью предлагаемого метода является возможность исследования поперечного движения среды, используя её саму в качестве несущей. Простота основных соотношений открывает возможность его использования в целом ряде важных приложений, связанных с движением неоднородных сред: от тропосферной

радиолокации и радиометрии до лабораторных измерений и гидроакустики.

В частности, он может использоваться при измерениях атмосферных динамических процессов в условиях рассеяния сплошной средой с использованием пассивных устройств или активных инструментов, не имеющих средств доплеровской обработки или, наконец, в особых условиях измерений, которые препятствуют использованию классических доплеровских подходов. Есть основания полагать, что с использованием предлагаемых подходов можно предложить принципиально новый способ оценки сдвигов и поворотов ветра, что может значительно улучшить оценки интенсивности атмосферной турбулентности в нижних слоях атмосферы.

Возвращаясь к началу этой лекции, хотелось бы отметить следующее. Сложившееся в области некогерентной оптики «классическое» отношение к фазовой скорости, как к виртуальному параметру, вошедшее в учебники, мешает осознанию того факта, что в условиях зондирования природных сред с использованием монохроматических сигналов (и в более широком смысле — сигналов, сформированных под контролем исследователя) фазовая скорость различных составляющих рассеянного поля может являться важным информационным параметром, связанным с реальными физическими явлениями. Этот факт требует упоминания в современных руководствах по оптике и распространению рядом с описанием классических экспериментов с некогерентными сигналами. Должны найти свое место и способы интерпретации доплеровских частот, превышающих частоту несущей.

В заключении хотелось бы поблагодарить А. И. Ефимова и А. Г. Горелика за поддержку и плодотворные обсуждения вопросов, затронутых в настоящей лекции, которая была бы невозможно без огромной работы, проведенной с данными проекта Helios проф. М. К. Бёрдом (M. K. Bird, Bonn, Germany).

Литература

1. В. П. Якубов. Узкополосная сверхбольшебазовая радиоинтерферометрия к космических исследованиях: — Томск: Изд-во Том. ун-та, 1996. — 246 с. ISBN 5-7511-0828-0
2. Efimov A. I., Lukanina L. A., et al. Coronal Radio Occultation Experiments with the Helios Solar Probes: Correlation Spectral Analysis of Faraday Rotation Fluctuations. Sol.Phys.(2014). doi:10.1007/s11207-015- 0687-y
3. Н. А. Лотова, И. В. Чашей. Распределение скоростей в межпланетной среде по наблюдениям мерцаний. Геомагнетизм и аэрномия. 1978. Т. 18, Вып. 5, С. 809-817.
4. Olyak M. R. The dispersion analysis of drift velocity in the study of solar wind flows. J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2013. V. 102. p.p. 185-191.
5. McComas, D. J., et al. (2007), Understanding coronal heating and solar wind acceleration: Case for in situ near-Sun measurements, Rev. Geophys., 45, RG1004, doi:10.1029/2006RG000195.
6. Efimov, A. I., Bird, M. K., Andreev, V. E., et al. On the detection of Alfvén waves in circumsolar plasma by radio sounding using linearly polarized signals, Astr. Lett. 22(6), 785-790, 1996.
7. Chashei, I. V., Bird, M. K., Efimov, et al. Five-minute magnetic field fluctuations in the solar wind acceleration region, Solar Phys. 189, 399-413, 1999.