

## ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ МЕРЦАНИЙ ДИСКРЕТНЫХ РАДИОИСТОЧНИКОВ НА ИРКУТСКОМ РАДАРЕ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

М.В. Глоба, Р.В. Васильев, Д.С. Кушнарев, А.В. Медведев

### INTERFEROMETRIC OBSERVATIONS OF DISCRETE RADIOSOURCES SCINTILLATIONS AT IRKUTSK INCOHERENT SCATTER RADAR

M.V. Globa, R.V. Vasilyev, D.S. Kushnaryov, A.V. Medvedev

Приведены результаты интерферометрических наблюдений ионосферных мерцаний радиостанции Лебедь-А на Иркутском радаре ИР в период с 2012 по 2014 гг. Наблюдения выполнялись во время штатных сеансов работы радара на протяжении 5–15 сут в различные сезоны, эффективное время наблюдений составляет 15–30 мин в сутки. Для интерферометрического анализа мерцаний использовались свойства коэффициента корреляции (когерентности) двух независимых регистрирующих каналов радара. Анализ данных независимых каналов позволяет строить двумерные изображения радиостанции с периодом 18 с и для каждого изображения определять статистические параметры, отражающие положение и угловой размер радиостанции. Показано, что изменение этих статистических характеристик не коррелирует с изменениями мощности (мерцаниями) радиостанции, возникающими вследствие прохождения радиосигнала через ионосферные неоднородности.

Results of observations of radiostation Cygnus-A ionospheric scintillations at Irkutsk incoherent scatter radar during period of 2012–2014 are presented. Observations were made during regular sessions of radar within 5–15 days for different seasons, the effective time of observations is 15–30 min per day. For interferometric analysis the properties of correlation (coherence) coefficient of two independent recording channels were used. Analysis of data from independent channels allows to construct two-dimensional images of radiostation with period of 18 seconds and to determine statistical parameters representing position and angular size of radiostation for each image. It is shown that change of statistical characteristics does not correlate with fluctuations in power (scintillations) of the signal caused by radiowave propagation through ionospheric irregularities.

#### Введение

Мерцания радиосигналов в ионосфере Земли известно с середины прошлого века [Little, 1951] и достаточно хорошо изученное [Kung Chie Yeh, 1982] явление. Основные направления человеческой деятельности, в которых влияние ионосферных мерцаний играет значительную роль, – это спутниковые коммуникации и радиоастрономия. В настоящее время разработан ряд моделей, которые описывают и в некоторой мере предсказывают поведение ионосферных мерцаний в планетарном масштабе [Priyadarshi, 2015]. Исследование свойств мерцаний в некоторых случаях позволяет определять характеристики ионосферных неоднородностей [Безродный, 2010]. Иркутский радар ИР (ИРНР), работающий в пассивном режиме, также способен наблюдать мерцания радиоволн от дискретных космических радиостанций (ДКИ) в ионосфере [Vasilyev, 2013]. Особенности регистрирующей системы ИРНР позволяют выполнять интерферометрические [Лебедев, 2012] наблюдения ионосферы и объектов на околоземной орбите. Эти особенности также можно задействовать для наблюдения за дискретными космическими объектами и их характеристиками.

#### Интерферометрия ионосферных мерцаний

Влияние эффектов распространения метровых радиоволн в ионосфере, как правило, отрицательно влияет на работу радиотелескопов-интерферометров. Рефракционные эффекты, возникающие при распространении сигнала в неоднородной среде, искажают истинное положение источника излучения и его размер [Sroelstra, 1984]. Вариации характеристик ионосферы имеют различный характер. Существует сезонные и суточные вариации электронной концентрации, ее эволюция по высоте, а также волновые явления (перемещающиеся ионосферные возмущения)

имеющие характерные периоды порядка нескольких часов и размеры от десятков до тысяч километров. Эти относительно плавные вариации характеристик ионосферы играют существенную роль для радиointерферометров, обладающих базой порядка нескольких километров и более. Они могут быть учтены либо при помощи существующих моделей ионосферы [Sukumar, 1987] либо при помощи вспомогательных наблюдений за ионосферой. Ионосферные неоднородности с масштабом порядка одного километра, в связи с тем, что их размер приближается к размеру зоны Френеля для метровых волн на высотах ионосферы, будут приводить к наблюдению дифракционных эффектов, которые выражаются в мерцаниях радиосигнала ДКР. Мерцания радиосигнала, регистрируемые интерферометром при наблюдении ДКР, могут иметь различный характер: в зависимости от соотношения размеров неоднородностей и базы интерферометра можно различать амплитудные и фазовые мерцания радиосигнала на выходе коррелятора. Если размер базы интерферометра (расстояние между антеннами) будет существенно меньше размера неоднородности, то вариации радиосигнала в различных антеннах интерферометра будут синхронными, и на выходе коррелятора будет наблюдаться вариации соотношения сигнал/шум, это проявление так называемых амплитудных мерцаний. Относительная фаза сигналов при этом будет изменяться медленно, в соответствии с перемещением ДКР по небесной сфере с суточным вращением Земли. При увеличении размера базы интерферометра до размеров, сопоставимых с размерами ионосферных неоднородностей и больших, фазовые задержки сигналов в антеннах интерферометра, обусловленные прохождением радиоволны через участки с различной электронной концентрацией, начнут различаться. Это приведет к

сложению в корреляторе сигналов с различной задержкой и вариация сигнала на выходе коррелятора уже будет обусловлена как вариацией соотношения сигнал шум, так и усилением или ослаблением выходного сигнала вследствие синфазного или противофазного суммирования, что является проявлением так называемых фазовых мерцаний. В этом случае на плавное изменение фазы сигнала от ДКР за счет вращения Земли будут накладываться быстрые вариации фазы, которые в конечном итоге будут влиять на наблюдаемое положение и размер ДКР. Более подробно этот вопрос был исследован в работе [Spoelstra, 1995], в которой показана зависимость ослабления амплитудных мерцаний и увеличения фазовых мерцаний с ростом базы интерферометра.

### ИРНР как радиоинтерферометр

Антенная система ИРНР, предназначенная для осуществления частотного сканирования участка небесной сферы размером  $20 \times 30^\circ$  состоит из двух независимых приемо-передающих секториальных рупоров (полурупоров). Щелевые излучатели питающих волноводов, лежащих в основании каждого полурупора, формируют линейную антенную решетку обеспечивающую ширину диаграммы направленности (ДН) в плоскости сканирования  $0.5^\circ$ . Частотный диапазон радара 154–162 МГц, что соответствует длине волны около двух метров. Форма ДН радара, а также точные коэффициенты для уравнения сканирования могут быть получены при помощи наблюдения ДКР. Совместное наблюдение ДКР двумя полурупорами позволяет также определить характеристики интерферометра, который они образуют. Наклон характеристики, связывающей перемещение ДКР по небесной сфере и разность фаз сигнала в полурупорах, составляет 16 электрических градусов на один градус небесной сферы [Лебедев, 2006]. Расстояние между фазовыми центрами антенн при этом составляет порядка 5 м. База интерферометра на основе антенной системы ИРНР мала, и поэтому ширина основного лепестка интерферометра составляет порядка  $11^\circ$ . Ширина ДН обоих рупоров в плоскости, в которой лежат фазовые центры, составляет около  $20^\circ$  таким образом главный лепесток интерферометра полностью помещается в ДН антенн.

Регистрация сигналов в полурупорах ведется при помощи специализированной системы, позволяющей сохранять принимаемый в каждом рупоре сигнал в виде ряда комплексных чисел в устройствах долговременного хранения. Система состоит из аналоговой усилительно-гетеродинной части, усиливающей принятый сигнал и понижающей частоту до диапазона приемлемого для работы цифровых регистрирующих устройств, шестнадцатиразрядного АЦП, регистрирующего сигнал на выходе аналоговой части с частотой сэмпирования 1 МГц, и сигнального процессора, раскладывающего результат работы АЦП на комплексные составляющие. Регистрация сигналов системой ведется интервалами длительностью 8 мс, с периодом около 40 мс. Управление работой системы и формирование окончательного представления полученных данных осуществляется

посредством рабочей ЭВМ. Полученные на рабочей машине результаты наблюдений передаются в локальную вычислительную сеть ИРНР и сохраняются на жестких дисках серверной ЭВМ для дальнейшей обработки и хранения.

Запись сигналов в комплексном виде удобна с точки зрения корреляционной обработки. Отсутствует необходимость создания дополнительного устройства (коррелятора), входящего в состав измерительной системы, есть возможность варьировать время интегрирования при последующей обработке и т. п. Для корреляционного анализа данных мы использовали т.н. коэффициент взаимной корреляции сигналов в рупорах антенной системы:

$$\eta = \frac{\langle AB^* \rangle}{\sqrt{\langle AA^* \rangle \langle BB^* \rangle}}, \quad (1)$$

где  $A$  и  $B$  – сигналы независимых рупоров (антенн интерферометра), звездочка означает операцию комплексного сопряжения, а угловые скобки – усреднение по времени. Нетрудно показать, что фаза полученной величины отражает положение источника относительно фазовых центров, а амплитуда соотношение сигнал/шум. Традиционно коэффициент когерентности рассматривается как некая статистическая характеристика, и формально для него можно получить не только среднее значение, но и моменты более высоких порядков, которые будут отражать изменение формы наблюдаемого ДКР. Однако есть вероятность того, что из-за содержания шумовой составляющей в сигнале статистические моменты будут испытывать вариации, не относящиеся к вариациям размера и положения ДКР за счет ионосферы. Это обстоятельство привело нас к решению рассматривать не усредненные характеристики, а статистические распределения (гистограммы), и на основе анализа формы этих распределений делать выводы о наблюдаемом положении источника на небесной сфере и его размере.

### Изображение радиоисточника и его характеристики

Поскольку использовались данные активных радионаблюдений, то необходимо проводить анализ только той части развертки, которая отражает фоновое космическое радиоизлучение, отбрасывая рассеянный в ионосферный зондирующий сигнал. Изменение частоты принимаемого радиоизлучения означает перемещение источника вдоль плоскости север–юг, а изменение разности фаз между двумя полурупорами – перемещение вдоль плоскости запад–восток. Для определения координат ДКР в этих направлениях необходимо анализировать частотный спектр принятого радиосигнала и аргумент коэффициента корреляции радиосигналов в полурупорах (1). При обработке данных для каждой реализации производилось преобразование Фурье, а затем вычисление аргумента коэффициента корреляции между полурупорами для каждой частотной компоненты:

$$\arg(\eta_i) = \arg(a_i \times b_i), \quad (2)$$

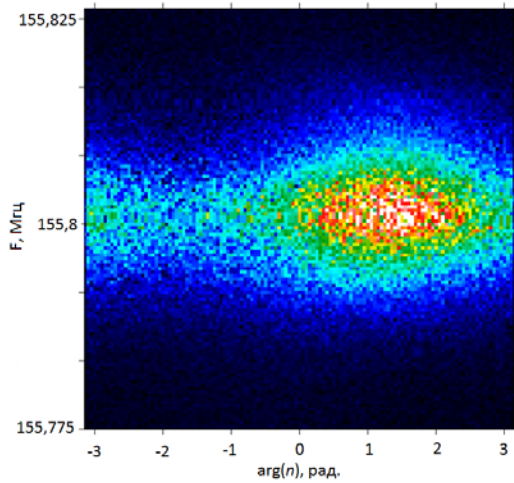


Рис. 1. Изображение радиоисточника, построенное за время накопления 18 с.

где  $i$  означает номер частотной компоненты,  $a$  и  $b$  – спектральные отсчеты сигналов полурупоров. Эти значения складывались в гистограмму на протяжении определенного периода, равного 18 с. За этот же период производилось накопление значений коэффициента корреляции:

$$H_i = \sum_k \frac{a_{ik} b_{ik}^*}{\sqrt{a_{ik} a_{ik}^* b_{ik} b_{ik}^*}}, \quad (3)$$

где  $k$  обозначает временные отсчеты,  $i$  – отсчеты по частоте.

Каждое значение накопленной гистограммы умножалось на модуль соответствующего коэффициента корреляции. Таким образом, изображение ДКР представляет собой двумерное распределение мощности по частоте и по фазе. Результат такой обработки показан на рис. 1.

Источник проходит через диаграмму направленности в течение 10–15 мин, для анализа перемещения ДКР по диаграмме направленности радара вычислялись положение максимума и среднее значение каждого двумерного изображения (рис. 2, а, б). В отсутствие ДКР положение максимума меняется случайным образом, в то время как среднее значение остается сравнительно постоянным. При появлении источника среднее значение меняется медленно, и не вполне корректно отображает перемещение источника по сектору обзора. Следовательно, можно сделать вывод о том, что для наблюдения за положением источника лучше следить за изменением максимального значения распределения.

Для анализа ширины изображения ДКР вычислялись среднеквадратическое отклонение и ширина на уровне половинной амплитуды (рис. 2, в, г). Видно, что для частоты (рис. 2, в) среднеквадратическое отклонение также медленно изменяется при появлении источника, и не точно отображает изменение ширины изображения. Для фазы (рис. 2, г) формы линий почти совпадают.

#### Поведение характеристик ДКИ в условиях мерцаний и смене сезонов

При работе ИРНР в штатном режиме регистрация радиосигналов ведется непрерывно на протяже-

нии нескольких суток. Сканирование ДН осуществляется не в полной мере, как правило, выбирается два фиксированных направления, которые циклически просматриваются радаром. ДКР, перемещающиеся по сектору обзора проходят через ДН, ориентированную на определенное направление, и раз в сутки для выбранного ДКР существует относительно короткий интервал наблюдения. Поскольку минимальная ширина ДН составляет величину порядка половины градуса, то ДКР проходит через ДН за время порядка 15 мин. Этого времени достаточно, чтобы зафиксировать возникающие ионосферные мерцания ДКР в устройстве хранения.

На рис. 3 показано изменение вычисляемых характеристик изображений и изменение мощности принимаемого сигнала. Изображения построены для двух дней (28 июня – широкополосный канал, 26 июня – узкополосный канал), когда наблюдались заметные мерцания. Из рисунков видно, что мерцания не влияют на размер и положение изображения ДКР. Это связано с тем, что расстояние между антеннами радара составляет 5 м, что существенно меньше зоны Френеля для ионосферных неоднородностей, наблюдаемых в этом случае, поэтому возможно только наблюдение синхронных амплитудных мерцаний в полурупорах.

Поскольку ИРНР в штатном режиме работает на протяжении около 50–100 дней в году, несмотря на кратковременность суточного периода наблюдений, существует достаточно обширный материал для обработки. В таблице представлены средние значения некоторых вычисляемых характеристик за летний и зимний периоды 2013 г. Можно отметить, что существенного различия в этих характеристиках для различных сезонов не наблюдается.

сезон	лето	зима
индекс мерцаний	0.031	0.034
ширина по частоте	46.642	45.875
ширина по фазе	47	47.375
среднее отклонение	14.328	18.184

#### Заключение

В данной статье был предложен метод анализа изображения ДКИ, полученного на основе статистических распределений интерференционных характеристик принимаемого сигнала. Анализ формы статистических распределений более качественно отражает характеристики ДКИ, такие как положение и угловой размер, по сравнению с анализом статистических моментов. Показано, что ионосферные мерцания ДКИ не влияют на параметры изображения ДКИ, в особенности на поведение фазы, что находится в соответствии с проведенными ранее исследованиями [Spoelstra, 1995], поскольку расстояние между антеннами радара существенно меньше размеров неоднородностей, поэтому фазовые мерцания возможно наблюдать только для сверхмелкомасштабных неоднородностей (метры и десятки метров). Чтобы наблюдать фазовые мерцания для крупномасштабных неоднородностей, необходимо проводить синхронные наблюдения с отдаленными регистраторами для увеличения базы интерферометра. Показано, что в различные сезоны не наблюдается

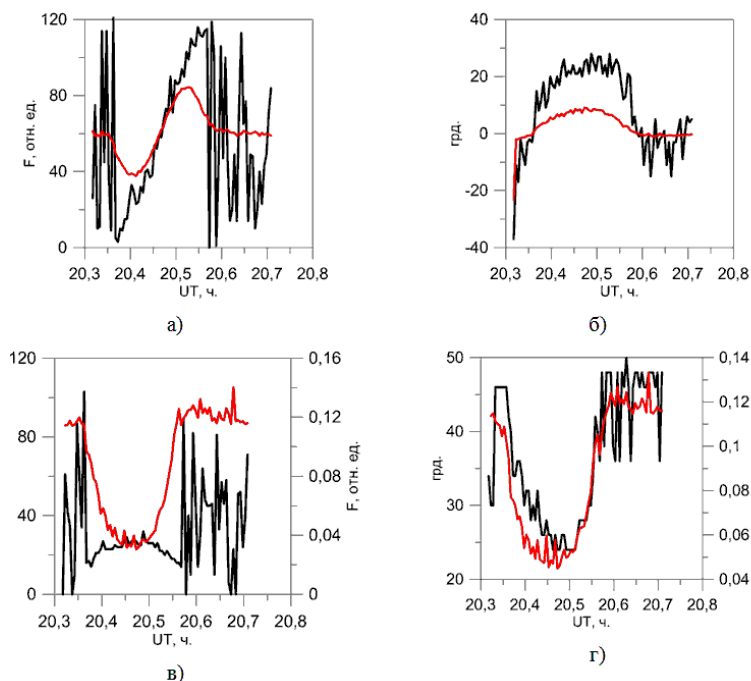


Рис. 2. Изменение положения максимального значения (черная линия) и среднего значения распределения (красная линия) для частоты (а) и фазы (б); изменение среднеквадратического отклонения (красная линия) и ширины гистограммы (черная линия) для частоты (в) и фазы (г) (28 июня 2013 г.).

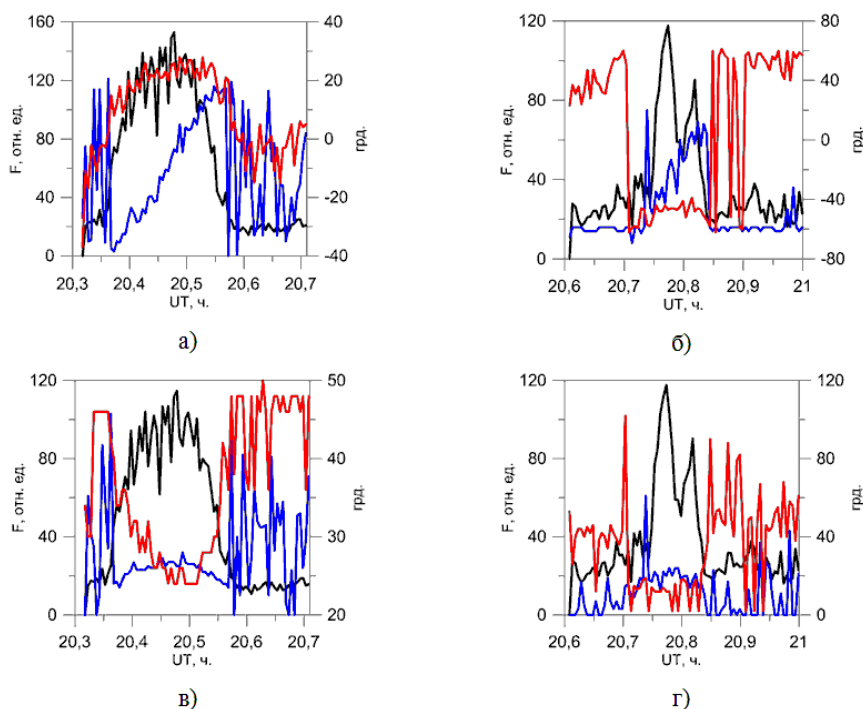


Рис. 3. Изменение мощности (черная линия) и основных характеристик изображения ДКР. На рис. а и б синей линией показано изменение положения максимума распределения по частоте, красной линией – изменение положения максимума по фазе; на рисунках в и г синей линией показано изменение ширины на полувысоте по частоте, красной линией – по фазе (28 июня (а, в) и 26 июня (б, г) 2013 г.).

существенных отличий в значениях статистических параметров. Это может быть связано с тем, что сигналы регистрировались с минимально возможным интегрированием.

Было проведено исследование влияния времени интегрирования на размер изображения источника. На рис. 4 показано изменение ширины распределения фазы коэффициента корреляции в зависимости

от количества реализаций, участвующих в вычислении коэффициента корреляции. Видно, что с увеличением числа реализаций ширина значительно уменьшается, а затем выходит на постоянное значение. Ширина распределения незначительно изменяется после 100 реализаций, что соответствует времени интегрирования 4 с. Это время интегрирования рекомендуется использовать для дальнейшего анализа

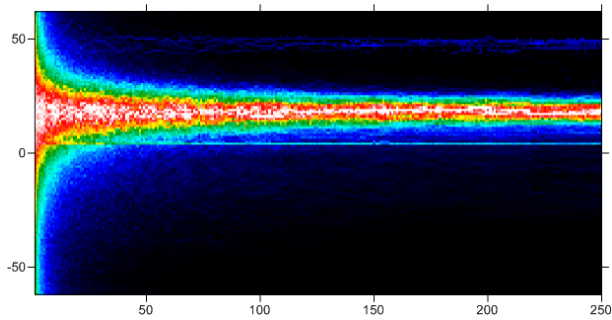


Рис. 4. Зависимость ширины гистограммы от количества просуммированных реализаций (22 июня 2013 г.).

данных. Вычисляемые на основании результатов проведенной работы статистические характеристики изображений ДКР в дальнейшем необходимо связать с характерными размерами ионосферных неоднородностей, а также их интенсивностью. Для этого требуется разработать специализированную модель прохождения излучения ДКР через ионосферу отражающую вариации интенсивности и фазы радиоизлучения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-05-03946 А.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Безродный В.Г., Чаркина О.В., Ямпольский Ю.М. и др. Исследование стимулированных ионосферных мерцаний и поглощения излучения дискретных космических источников с помощью панорамного ВЧ-риометра // Радиофизика и радиоастрономия, 2010. Т. 15, № 2. С. 151–163.

Лебедев В.П., Медведев А.В., Кушнарев Д.С. Методика калибровки диаграммы направленности иркутского радара НР // Труды молодежной конференции БШФФ-2006. Секция А. Физика околоземного космического пространства. 2006. С. 185–188.

Лебедев В.П., Медведев А.В., Толстиков М.В. Использование интерференционного метода исследования НР-сигнала на Иркутском радаре некогерентного рассеяния: теория и практика // II Всеросс. науч. конф. «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». Санкт-Петербург, 24–26 апреля 2012 г.: Программа конф. СПб., 2012. С. 12.

Little C.G., Maxwell A. Fluctuations of the intensity of radio waves from galactic sources // Philosophical Magazine Series 7, 1951. 42:326, P. 267–278.

Kung Chie Yeh, Chao-Han Liu. Radio Wave Scintillations in the Ionosphere // Proceedings of the IEEE. 1982. V. 70, N 4.

Vasilyev R.V., Kushnarev D.S., Lebedev V.P., et al. Perspectives of usage of Irkutsk incoherent scatter radar (IISR) as an imaging riometer and radio-heliograph // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2013. Nb 105–106.

Priyadarshi S. A Review of Ionospheric Scintillation Models // Surv. Geophys. 2015. V. 36. P. 295–324.

Sukumar S. Ionospheric Refraction Effects on Radio Interferometer Phase // J. Astrophys. Astr. 1987. V. 8. P. 281–294.

Spoelstra T.A.Th., Kelder H. Effects produced by the ionosphere on radio interferometry // Radio Sci. 1984. V. 19, N 3. P. 779–788.

Spoelstra T.A.Th., Yang Yi-Pei // Ionospheric scintillation observations with radio interferometry // J. Atmos. Terr. Phys. 1995. V. 57, N 1. P. 85–97.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия