

УДК: 621.396.967.132

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПОЛУЧЕНИЮ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ПОРТРЕТОВ В ИНТЕРЕСАХ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ, С УЧЁТОМ РЕФРАКЦИОННЫХ ОШИБОК РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В АТМОСФЕРЕ.

Козлов В.Н., д.т.н., профессор, НПК «НИИДАР»,
Гаврик А.Н., к.ф.-м.н., ИРЭ РАН, г. Фрязино, Московская область
Головин С.С., главный конструктор, НПК «НИИДАР»,
Коротун В.М., к.т.н., «НПК «НИИДАР», E-mail: nik@niidar.ru, г. Москва, Россия

Аннотация. В работе представлены предложения по построению радиоизображений низкоорбитальных космических объектов с помощью узкополосных радиосигналов на основе метода обращенного синтезирования радиоголограмм, использующего изменение ракурса объекта при движении по орбите с учётом коррекции влияния ионосферы. Проведено численное моделирование радиолокационного эксперимента, на основе которого получены оценки разрешающей способности метода и требования к условиям проведения эксперимента.

Ключевые слова: международная модель ионосферы; спутниковой навигационной системы (НС); двухчастотный приемник радиосигналов (ДПР); когерентный сигнал (КС); радиоизображение; радиоволна; валидации.

SUGGESTIONS FOR OBTAINING RADAR PORTRAITS FOR THE INTELLIGENCE SYSTEM OF RECOGNITION, CONSIDERING THE REFRACTIVE PROPAGATION ERRORS IN THE ATMOSPHERE.

Koslov V.N., D.ofSci (Tech), prof., "NIIDAR",
Gavrik A.N., PhD., IRE of RAS, Fryazino, Moscow region
Golovin S.S., Chief designer, "NIIDAR",
Korotun V.M., PhD., "NIIDAR", E-mail: nik@niidar.ru, Moscow, Russia

Annotation. The paper presents proposals for the construction of radio images of low-orbit space objects by means of narrow-band radio signals on the basis of the inverse synthesis Radioholograms using the angle change of the object while moving in an orbit taking into account the effect of the ionosphere correction. A numerical simulation of the radar experiment, from which we obtain estimates of the resolution of the method and requirements for the conditions of the experiment.

Keywords: International Reference Ionosphere (IRI); satellite navigation system (NS); Dual-frequency radio receiver (DWP); kogerentnyqsignal (CS); a radio; radio wave; validation.

Существуют различные модели ионосферы Земли, позволяющие построить высотные профили её параметров в зависимости от времени года, суток, солнечной активности и др. Одной из таких является International Reference Ionosphere (IRI), описывающая параметры земной ионосферы. Однако параметры возмущенной

ионосферы в определенном районе могут существенно отличаться от прогнозируемых параметров.

Совершенствование техники измерений и обработки навигационных сигналов привело к развитию новых методов высокоточной коррекции ионосферы Земли. Эти методы основаны на использовании двухчастотной регистрации спутниковых сигналов. Для реализации таких методов предлагается использовать российский двухчастотный приемник радиосигналов спутниковой навигационной системы (НС) Глонасс.

Двухчастотный приемник радиосигналов (ДПР) является наземным радиотехническим комплексом. ДПР – многофункциональная система, которая, в частности, позволяет измерять параметры двух когерентных радиосигналов НС Глонасс в реальном времени и осуществлять высокоточную коррекцию фазовых и дальномерных измерений. ДПР обеспечивает одновременный прием и обработку сигналов 6 НС Глонасс, излучающих сигналы на двух когерентных частотах, при этом каких-либо ограничений на входные сигналы нет, так как в каждом канале осуществляется независимый поиск, обнаружение и слежение за сигналом.

Все гетеродинные частоты, включая частоту дискретизации, когерентны частоте высокостабильного эталона, что дает возможность прецизионного измерения приведенных разностей фаз и частот. Информационные кадры, содержащие массив данных (номер кадра, коды частот несущих, отношения сигнал/шум, индикация захвата систем фазовой автоподстройки по несущей и символам, другая необходимая информация), передаются в согласованном формате в ЭВМ через последовательный порт. Частота измерений параметров сигналов определяется пользователем и составляет обычно 1 Гц, но при необходимости может быть увеличена до 10-50 Гц.

Все применяемые приемники сигналов ГЛОНАСС и GPS позволяют зарегистрировать вариации фазы $\Phi(t)$ каждого из двух когерентных сигналов частотных диапазонов L_1 и L_2 ($L_1 > L_2$). Для выделения влияния ионосферы на основании этих данных можно сформировать разностную фазу, зависящую только от влияния плазмы:

$$\Delta\Phi(t) = \left(\Phi_2(t) - \frac{L_2}{L_1} \Phi_1(t) \right) \left(1 - \frac{L_2^2}{L_1^2} \right)^{-1}$$

Величина $\Delta\Phi(t)$ примерно равна изменению фазы сигнала с частотой L_2 , обусловленному влиянием плазмы, поэтому $\Delta\Phi(t)$ пропорциональна интегральной электронной концентрации на пути распространения сигналов $\square N_n(t)$:

$$\Delta N_n(t) = \frac{m c^2}{2\pi \cdot e^2 \cdot \lambda_{L2}} \Delta\Phi(t)$$

где e , m – заряд и масса электрона; c – скорость света, λ_{L2} – длина волны излучаемого сигнала частотного диапазона L_2 .

Трасса радиозондирования проходит и в ионосфере, протяженностью больше 1000 км, и в вышележащей области, в плазмосфере, протяженностью больше 4000 км. Вариации $\square N_n(t)$, обусловленные влиянием нестационарной плазмосферы, прогнозирование которой трудно осуществить, могут достигать 30% от величины интегральной электронной концентрации в ионосфере.

В случае фазовых измерений существует проблема определения начальной фазы каждого сигнала, поэтому используют только приращения разностной фазы $\Delta\Phi(t)$ на

$$\Delta F(t) = \frac{\Delta\Phi(t + \Delta t) - \Delta\Phi(t - \Delta t)}{4\pi\Delta t}$$

временном интервале измерений Δt , что дает возможность определить разностную частоту $\Delta F(t)$ сигналов, обусловленную влиянием ионосферы:

$$\frac{d}{dt} \Delta N_n(t) = \frac{m c^2}{e^2 \cdot \lambda_{L2}} \Delta F(t)$$

Данное соотношение уже не содержит фазовых неопределенностей и доплеровского смещения частот из-за взаимного перемещения передатчика и приемника, оно может быть использовано для исследования стратифицированных слоистых структур ионосферы. Величина $\Delta F(t)$ пропорциональна градиенту интегральной электронной концентрации при изменении пространственного положения трассы распространения сигналов $d/dt[\square N_n(t)]$:

$$\frac{d}{dt} \Delta N_n(t) = \frac{m c^2}{e^2 \cdot \lambda_{L2}} \Delta F(t)$$

.В приемнике измеряемыми величинами являются приращения фаз $\Delta\Phi_{L1}(t)$ и $\Delta\Phi_{L2}(t)$ за время Δt :

$$\Delta\Phi_{L1}(t) = \Phi_{L1}(t - \Delta t) - \Phi_{L1}(t)$$

$$\Delta\Phi_{L2}(t) = \Phi_{L2}(t - \Delta t) - \Phi_{L2}(t) .$$

Не вычисляя полное приращение фазы $\Delta\Phi(t)$ каждого сигнала, т.е. не суммируя приращения фаз $\Delta\Phi_{L1}(t)$ и $\Delta\Phi_{L2}(t)$, можно сразу определить частоты сигналов:

$$F_{L1}(t) = \Delta\Phi_{L1}(t) (2\pi\Delta t)^{-1}$$

$$F_{L2}(t) = \Delta\Phi_{L2}(t) (2\pi\Delta t)^{-1},$$

а затем получить разностную частоту: $\Delta F(t) = [F_{L2}(t) - (L_2/L_1) F_{L1}(t)] [1 - (L_2/L_1)^2]^{-1}$.

Величина $\Delta F(t)$ примерно равна (с точностью 5%) изменению частоты сигнала L_2 , обусловленному влиянием плазмы. Для более точного определения изменения частоты сигнала L_2 необходимо учитывать различие путей распространения радиоволн частотных диапазонов L_1 и L_2 , методика такой коррекции разработана.

В стандарте RINEX, который используется для хранения данных, приводятся значения фазового пути радиоволн $L_1(t)$ и $L_2(t)$, на основании которых разностная частота определяется соотношением:

$$\Delta F(t) = - [L_2(t+\Delta t) - L_2(t) - (L_2/L_1) (L_1(t+\Delta t) - L_1(t))] [1 - (L_2/L_1)^2]^{-1} (\lambda_{L_2} \Delta t)^{-1},$$

На рис. 1 в качестве примера представлены результаты измерений параметров двух когерентных сигналов НС ГЛОНАСС в двух сеансах наблюдений, полученные с помощью ДПР (двухчастотный приемник радиосигналов), установленного в ФИРЭ им. Котельникова РАН, г. Фрязино. Измерения проводились в дневное время суток с 8 до 20 часов, в сеансах измерений одновременно наблюдалось от 1 до 6 спутников.

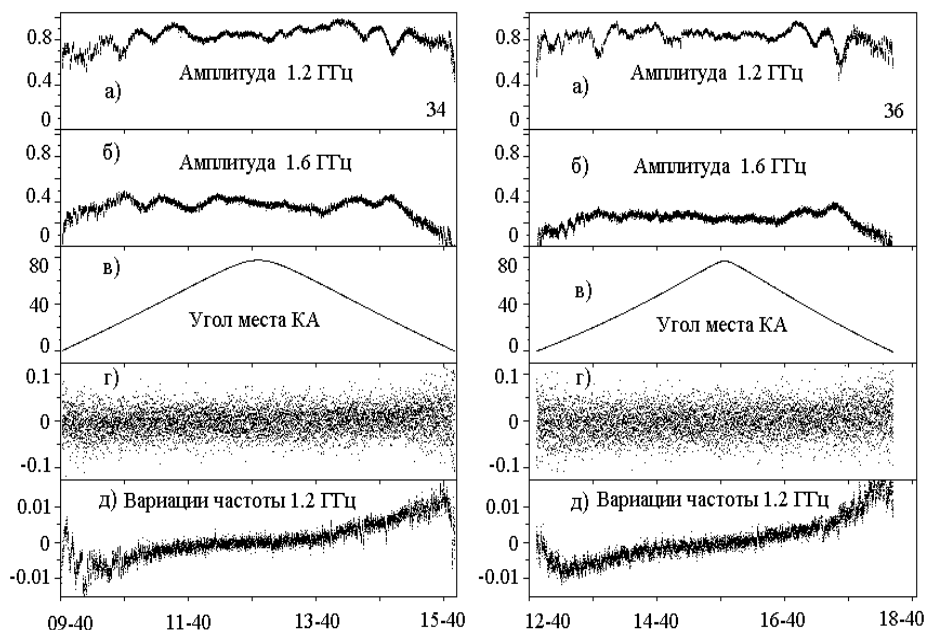


Рис. 1. Результаты измерений параметров двух когерентных сигналов НС Глонасс.

В центральной части рисунков (рис. 1в) показано изменение угла места в процессе слежения за спутниками ГЛОНАСС, осью абсцисс является текущее местное время проведения измерений. По вариациям нормированной к единице амплитуды сигналов $A_1(t)$ (рис. 1а) и $A_2(t)$ (рис. 1б) двух когерентных диапазонов L_1 и L_2 видно, что захват обоих сигналов и начало измерений их параметров произошли, когда угол места составлял 0.1° . С ростом угла места спутника амплитуды сигналов растут и наблюдаются вариации, обусловленные как диаграммой направленности антенны, так и влиянием ионосферы и атмосферы Земли. После захода спутника за горизонт, когда

угол места оказался меньше 0^0 , слежение за сигналами прекратилось. На основе этих данных можно сделать вывод о том, что ДПР позволяет вести многочасовые наблюдения за сигналами нескольких НС ГЛОНАСС с момента их появления над горизонтом до момента захода спутников за горизонт.

На рис. 1г представлены вариации разностной частоты сигналов $\Delta F(t)$, измеренные в процессе наблюдения за спутниками с частотой выборки 1 с. Из рис. 1г видно, что флуктуации $\Delta F(t)$ относительно нулевого уровня не превышают значений 0.15 Гц, причем наибольшие флуктуации наблюдаются в начале и в конце сеанса, когда угол места меньше 10^0 . Но на рис. 1г трудно выявить наличие или отсутствие регулярных трендов $\Delta F(t)$. Для того чтобы продемонстрировать регулярные изменения $\Delta F(t)$, обусловленные изменением интегральной электронной концентрации на пути распространения радиоволн от спутника до ДПР, усредним измеренные данные методом скользящего среднего на интервале 30 с.

Результаты такого усреднения представлены на рис. 1д, из которого четко видны регулярные вариации $\Delta F(t)$, обусловленные ионосферой Земли. При малых углах места ($<20^0$) вариации $\Delta F(t)$ могут достигать значений 0.015 Гц, а их природа требует анализа состояния ионосферы, но при больших углах места ($>20^0$) наблюдается закономерное увеличение $\Delta F(t)$ от -0.008 Гц до +0.008 Гц, обусловленное геометрией радиопросвечивания ионосферы Земли. Среднеквадратичные флуктуации данных относительно аппроксимации полиномом 6-й степени $\sim 0,001$ Гц, что составляет не более 10-20% от значения частоты $\Delta F(t)$ в момент наблюдения. Такая точность определения $\Delta F(t)$ позволяет использовать получаемые ДПР данные измерений разностной частоты для коррекции параметров модели высотного распределения электронной концентрации в ионосфере Земли.

Следует отметить, что рассмотренные регулярные вариации $\Delta F(t)$, по-видимому, можно прогнозировать, используя существующие модели ионосферы. Но ионосфера очень изменчива и модель не всегда правильно описывает влияние ионосферы в определенное время в конкретном регионе наблюдения. На рис. 2 в качестве примера представлены результаты измерений $\Delta F(t)$ в трех сеансах наблюдений, полученные с помощью ДПР.

Измерения проводились в дневное время суток с 8 до 20 часов. В верхней части рис. 2 показано изменение угла места в процессе слежения за спутниками, осью абсцисс является текущее время проведения измерений. Вариации разностной частоты $\Delta F(t)$, показанные в нижней части рис. 2, демонстрируют, что отклонения $\Delta F(t)$ от нулевого уровня при одинаковых углах места могут существенно различаться.

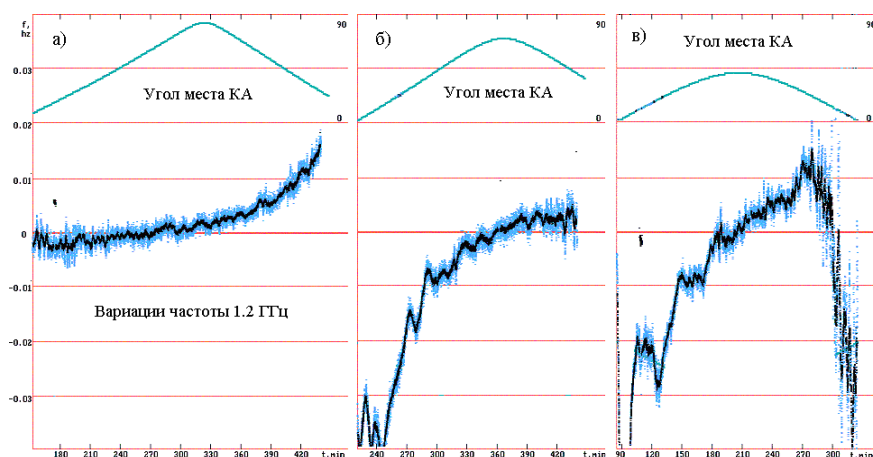


Рис. 2. Результаты измерений $\Delta F(t)$ по сигналам НС ГЛОНАСС.

На рис. 2а вариации $\Delta F(t)$, обусловленные ионосферой Земли, с начала сеанса и до перицентра очень маленькие, а после прохождения перицентра отклонение $\Delta F(t)$ от нуля быстро нарастает с увеличением угла места. При малых углах места ($<40^\circ$) значения $\Delta F(t)$ могут достигать 0.04 Гц (рис. 2б,2в), причем вариации $\Delta F(t)$ не являются монотонными (рис. 2а,2б,2в). Такие вариации могут быть обусловлены изменениями ионосферы во времени, но наиболее вероятно, что они обусловлены пространственными вариациями концентрации в ионосфере и плазмосфере при изменении длины пути радиоволн в ионизированной оболочке Земли из-за изменения угла места НС ГЛОНАСС.

Аналогичные измерения параметров когерентных радиоволн могут быть получены с использованием НС GPS. Для валидации результатов измерений, полученных с использованием перспективного навигационного комплекса, проведем сравнение зарегистрированных данных с аналогичными данными, которые были представлены на рис. 1 и 2. На рис. 3 показаны результаты измерений параметров двух когерентных сигналов НС GPS в двух сеансах наблюдений, полученные с помощью перспективного навигационного комплекса.

Изменение угла места в процессе слежения за спутниками GPS показано на рис. 3в, 3ж, осью абсцисс является текущее время проведения измерений с шагом по времени 1 с. По вариациям амплитуды сигналов $A_1(t)$ (рис. 3а, 3д) и $A_2(t)$ (рис. 3б, 3е) двух когерентных диапазонов L_1 и L_2 видно, что с ростом угла места спутника амплитуды сигналов растут и наблюдаются вариации, обусловленные как диаграммой направленности антенны, так и влиянием ионосферы и атмосферы Земли. После захода

спутника за горизонт, когда угол места оказался меньше 5° , слежение за сигналами прекратилось.

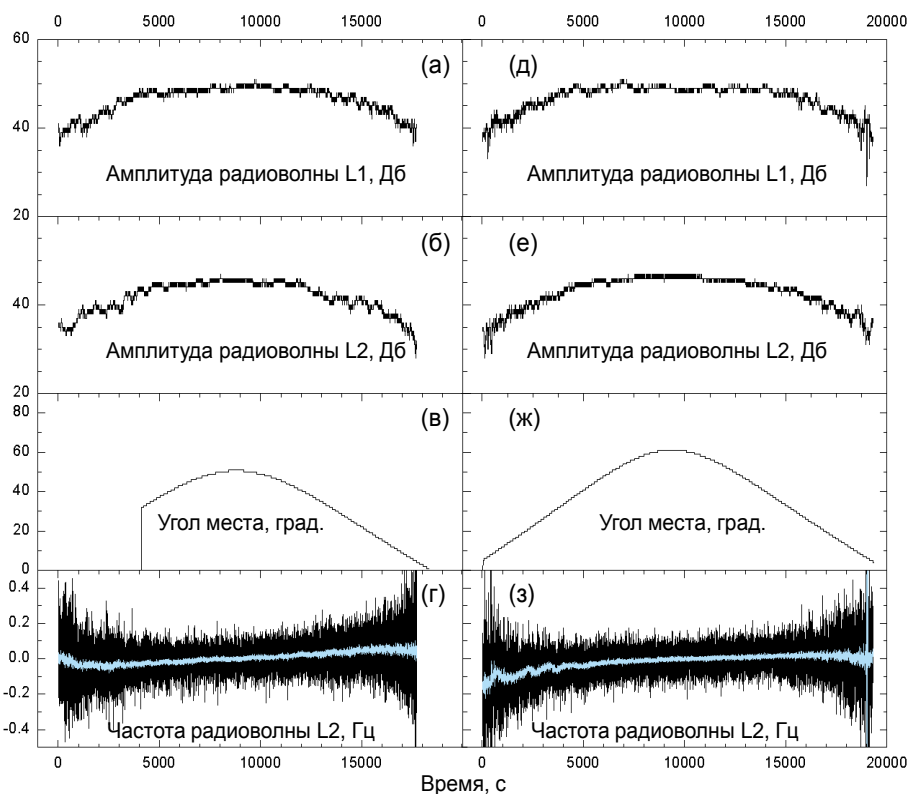


Рис. 3. Результаты измерений параметров двух когерентных сигналов HC GPS.

Рис. 3г демонстрирует вариации разностной частоты сигналов $\Delta F(t)$, измеренные с частотой выборки 1 св в процессе непрерывной работы перспективного навигационного комплекса. Из рис. 3г видно, что флуктуации $\Delta F(t)$ относительно нулевого уровня вблизи перигея HC GPS составляют 0.15 Гц и увеличиваются до 0.4 Гц, т.е. наибольшие флуктуации наблюдаются в начале и в конце сеанса, когда угол места меньше 10° . Для того чтобы показать регулярные вариации $\Delta F(t)$, обусловленные изменением интегральной электронной концентрации на пути распространения радиоволн от спутника до приемника, усредним измеренные данные методом скользящего среднего на интервале 30 с. Результаты такого усреднения представлены на рис. 3г светлой кривой, в результате четко видны регулярные вариации $\Delta F(t)$, обусловленные ионосферой Земли.

Если полагать, что вариации $\Delta F(t)$ обусловлены только изменением угла места HC, т.е. геометрией радиозондирования, то значение $\Delta F(t)$ будет определяться скоростью изменения угла места. Но скорость изменения угла места в экспериментах радиолокации ИСЗ в 20-30 раз превышает скорость изменения угла места HC. Кроме того, при радиолокации радиолучи дважды проходят через ионосферу. Следовательно,

значения $\Delta F(t)$ в экспериментах радиолокации ИСЗ могут составлять 1-2 Гц на частоте 1.25 ГГц, 0.3-0.5 Гц на частоте ~ 5 ГГц или 0.1-0.2 Гц на частоте ~ 10 ГГц при радиолокации на малых углах места. При синтезе радиоизображений на интервале 3-5 с такое влияние ионосферы приведет к неопределенности фазы $> \pi/3$. Это свидетельствует о необходимости учета влияния ионосферы и компенсации регулярных ионосферных вариаций $\Delta F(t)$, если ставится задача построения радиоизображений объектов локации.

Прогноз ионосферных вариаций $\Delta F(t)$ по модели ионосферы может в отдельных сеансах существенно расходиться с реальными ионосферными вариациями $\Delta F(t)$ в регионе расположения РЛС, о чем свидетельствуют ярко выраженные нерегулярности изменения $\Delta F(t)$, представленные на рис. 2. Поэтому целесообразно разработать методику прогноза ионосферных вариаций $\Delta F(t)$ с использованием сигналов НС Глонавс для измерений вариаций интегральной электронной концентрации в нескольких разнесенных пунктах, расположенных вблизи РЛС.

При наличии трех приемников GPS/Глонавс, разнесенных на расстояние несколько десятков км, мы одновременно можем определить вариации интегральной электронной концентрации на разных наклонных трассах зондирования. Используя алгоритм коррекции модели ионосферы можно определить такие параметры модели ионосферы, которые обеспечивают при расчетах интегральной электронной концентрации на заданных наклонных трассах наилучшее приближение к экспериментальным данным. Полученные в момент проведения радиолокации такие ионосферные параметры позволят исключать влияние ионосферы.

Итак, из представленных данных следует:

1. Флуктуации $\Delta F(t)$ относительно нулевого уровня не превышают значений 0.15 Гц для сигнала 1.2 МГц при времени усреднения 1 с, причем наибольшие флуктуации $\Delta F(t)$ наблюдаются в начале и в конце сеанса, когда угол места меньше 10^0 .
2. Отклонение $\Delta F(t)$ от нулевого уровня для сигнала 1.2 МГц, обусловленное ионосферой Земли, при углах места $\sim 40^0$ может достигать 0.01 Гц, а при углах места $< 20^0$ может достигать 0.04 Гц.
3. Ионосфера изменчива и модель не всегда правильно описывает её влияние в конкретном регионе, поэтому наблюдение за сигналами НС Глонавс при проведении радиолокационных экспериментов повысит точность измерения координатной информации, если ставится задача построения радиоизображений объектов локации.
4. Для коррекции влияния ионосферы можно использовать российский дисперсионный приемник сигналов спутниковой навигационной системы Глонавс.

Список литературы:

1. Варганов М.Е. и др. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов. М.: Радио и связь, 1985.
2. Зиновьев Ю.С., Пасмуров А.Я.// Зарубежная радиоэлектроника. 1985. № 3.
3. Пасмуров А.Я.// Зарубежная радиоэлектроника. 1987. № 12.
4. Сафронов Г.С, Сафронова А.П. Введение в радиологифию.М.:Советское радио,1973