

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ДАННЫХ ДЛЯ РАДИОТОМОГРАФИИ ИОНОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ РЕТРАНСЛЯЦИИ СИГНАЛОВ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ НАНОСПУТНИКОМ-РЕТРАНСЛЯТОРОМ ФОРМАТА CUBSAT

Каплярчук Е.А., аспирант

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Козлов С.В. – доктор технических наук

Аннотация. Показано, что с использованием малогабаритного спутника-ретранслятора сигналов глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС, GPS, «Галилео» и аппаратуры наземного пункта приема и обработки данных систем дистанционного зондирования Земли может быть создана пассивная многопозиционная радиолокационная система, обеспечивающая высокоточное определение координат спутника-ретранслятора и измерение полного электронного содержания на трассе «навигационный спутник – спутник-ретранслятор» импульсным методом по задержке огибающей ретранслированного навигационного сигнала и разности фаз навигационных сигналов на частотах L1 и L2. Приведена функциональная аппаратуры ретрансляции и рассчитаны ее основные параметры. Показано, что основным преимуществом предлагаемого способа является упрощение аппаратуры спутника CubSat за счет замены бортового двухчастотного навигационного приемника и аппаратуры передачи данных на наземную приемную станцию на простой, имеющий меньшее энергопотребление и более высокую радиационную стойкость ретранслятор навигационных сигналов. Обосновано время когерентного накопления в станции приема данных дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова. Глобальные навигационные спутниковые системы, спутник-ретранслятор формата CubSat, навигационный сигнал, многопозиционная радиолокационная система, радиотомография, полное электронное содержание.

Введение

Одной из важных в современных условиях является задача измерения и прогнозирования полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере [1]. Результаты решения этой задачи

используются для повышения точности навигационных определений с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), определения условий дальней ионосферной связи, прогнозирования опасных природных явлений и в широком спектре научных исследований. Состояние ионосферы описывается рядом параметров: полным электронным содержанием (ПЭС) в ионосфере, ионным составом, ионной и электронной температурами, скоростью движения частиц и др. При этом с практической точки зрения ключевым параметром является ПЭС в ионосфере, поскольку именно оно непосредственно влияет на распространение радиоволн. Поэтому важно изучать ионосферу и формировать новые, более совершенные модели динамики ионосферы [1-3].

На данные моменты имеется большой арсенал методов, средств и систем мониторинга ионосферы. К их числу следует отнести станции вертикального и наклонного зондирования ионосферы, радиозонды, средства радиозондирования ионосферы со специализированных искусственных спутников Земли научного назначения и с использованием сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

В последние годы наиболее широко применяется метод трансionoсферного зондирования на основе приема сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS двухчастотной навигационной аппаратурой потребителя. Его работа состоит в следующем [2, 3]. При прохождении через ионосферу радиосигналы, излучаемые на двух несущих частотах $f_1 \approx 1,6$ ГГц и $f_2 \approx 1,2$ ГГц с навигационного спутника (НС), испытывают различные временные задержки, а также изменения фаз. Измерение этих параметров в расположенном на Земле двухчастотном приемнике ГНСС позволяет непрерывно определять значение полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы вдоль радиотрассы «НС – наземный приемник» (от любого видимого НС) в любой момент t . В качестве аппаратуры может применяться любой двухчастотный приемник сигналов ГЛОНАСС/GPS, имеющий техническую возможность обработки сигналов двух частот (например, «Trimble GNSS», «NovaTel»). Недостатком этого метода является его «статичность», так как положение линии «наземный приемник – навигационный спутник» изменяется относительно медленно.

Полученные значения ПЭС – интегралы от электронного содержания на трассах распространения от между НС и набором наземных приемных пунктов используются в качестве исходных данных для радиотомографии ионосферы - определения трёхмерных распределений электронной концентрации ионосферы. Дополнительные данные для решения обратной задачи по реконструкции локальных значений ПЭС в ионосферном слое могут быть получены с помощью орбитальной группировки малых (мини) спутников в радиодиапазоне.

Наряду с высокоорбитальным методом получения данных для радиотомографии на основе ГНСС и наземного приемника для оценки используются методы низкоорбитальной радиотомографии с использованием искусственных спутников Земли типа «Космос», «Транзит», «FORMOSAT-3/COSMIC», излучающих сигналы на частотах 150 / 400 МГц. Суть данного подхода можно свести к следующему. На заданной орбите (относительно низкой) создается группировка малых искусственных спутников, каждый из которых включает двигатели ориентации ионно-плазменного типа и двухчастотный приемо-передатчик с номиналами частот 150 и 400 МГц. Кроме того, на каждом спутнике необходимо разместить многопроцессорный модуль для предварительной обработки исходных данных, и радиоканал для обмена данными между спутниками и орбитальной или наземной системой сопровождения. С помощью этих приемопередатчиков фазоразностным методом измеряется ПЭС на трассах между малыми спутниками. Это позволяет расширить данные для радиотомографии, ионосферы.

Одной из перспективных модификаций вышеописанного метода получения данных для радиотомографии является метод с размещением на спутнике двухчастотного навигационного приемника с передачей по каналам связи результатов измерений на наземную станцию приема данных (СПД) дистанционного зондирования Земли [4].

Недостатками данного решения являются:

- необходимость реализации дополнительных каналов связи с СПД с достаточно высокой пропускной способностью и энергопотреблением;
- высокие технические требования к двухчастотному приемнику, который должен обеспечить измерения информационных параметров при больших радиальных скоростях и ускорениях между ИС и CubSat, следовательно, достаточно большая его масса и энергопотребление, а также высокие требования к радиационной стойкости используемых компонентов.

Цель статьи – обоснование модифицированного способа получения исходных данных для радиотомографии ионосферы за счет формирования многопозиционной когерентной радиолокационной системы на базе ГНСС, наноспутника-ретранслятора и СПД ДЗЗ.

Содержание способа и структура предлагаемой технической системы

Иллюстрация способа приведена на рисунке 1. Группировка спутников-ретрансляторов (СР) выводится на низкие (180...250 км) приближенно круговые орбиты. Минимальное число спутников-ретрансляторов составляет один (получение данных 5-6 раз в сутки). Общее число СР определяется требуемым темпом обновления данных для радиотомографии и может составлять до нескольких

десятков. При равномерном распределении спутников-ретрансляторов по долготе восходящего узла в зоне видимости земной приемной станции (ЗПС) информации ДЗЗ будет находиться, как правило, один спутник-ретранслятор.

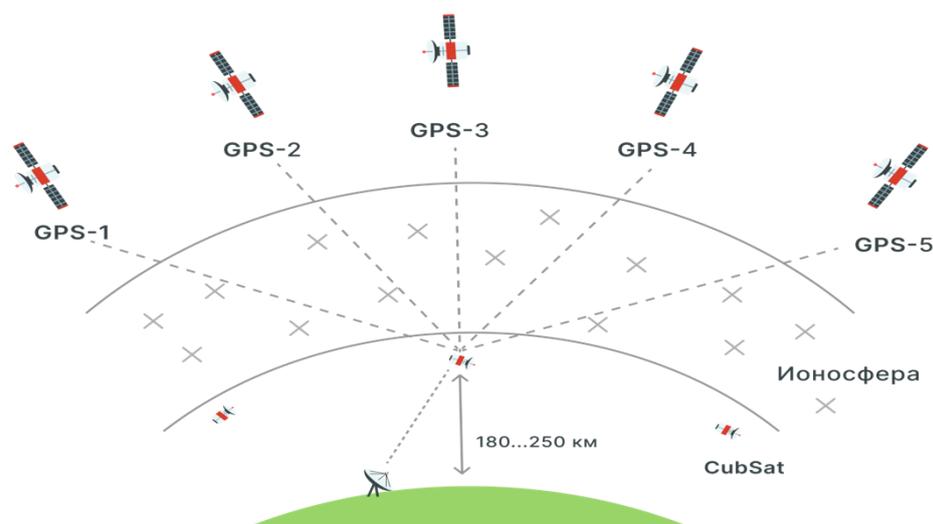


Рисунок 1 – Иллюстрация способа получения данных о ПЭС на основе ретрансляции сигналов ГНСС

Предлагаемое техническое решение заключается в приеме сигналов ГНСС спутником-ретранслятором, фильтрации сигналов диапазонов частот L1 и L2, усилении, переносе по частоте в выделенный для систем ДЗЗ диапазон частот и излучении через слабонаправленную антенну в направлении на Землю (нижнюю полусферу). Прием и обработка ретранслированных сигналов осуществляется станцией приема данных ДЗЗ [7] с соответствующей модернизированной обработкой.

Так как излучаемые навигационные сигналы являются когерентными с известными параметрами, включая моменты излучения и координаты навигационных спутников, то предлагаемая совокупность технических средств образует многопозиционную радиолокационную систему (МпРЛСи) с большим (десятки) числом независимо функционирующих источников когерентных зондирующих сигналов (навигационные спутники), единственной радиолокационной целью – спутником-ретранслятором и одной приемной позицией – земной станцией приема информации ДЗЗ. Данную МпРЛСи можно представить в виде совокупности бистатических радиолокационных средств, образованных каждым навигационным спутником, спутником-ретранслятором и земной станцией приема, с подвижной, ввиду взаимного пространственного перемещения НС, СР и земной станции приема ДЗЗ, базой. Ввиду высокой когерентности навигационных сигналов каждого отдельного навигационного спутника в это систем могут быть реализованы методы синтеза апертуры или, что аналогично, способы обработки при длительном когерентном накоплении [5]. При этом координаты навигационных спутников и земной станции приема известны с высокой точностью. Излучаемые навигационные сигналы содержат неизвестное навигационное сообщение. Однако, оно может быть легко исключено из принимаемого сигнала за счет приема и дешифрации прямого навигационного сигнала на земной станции приема с использованием стандартного навигационного приемника.

Отметим, что ввиду линейности всех операций при ретрансляции навигационного сигнала из принимаемого земной станцией сигнала можно извлечь ту же самую информацию, что и при приеме прямого навигационного сигнала в двухчастотном приемнике: время задержки и разность фаз сигналов на двух когерентных частотах L1 и L2. При это для сохранения когерентности перенос частот L1 и L2 необходимо проводить с использованием одного высокостабильного гетеродина. Кроме того, по измерениям доплеровских сдвигов частоты навигационных сигналов (которые не зависят от ПЭС) от множества видимых навигационных спутников возникает возможность высокоточного определения координат и параметров движения спутника-ретранслятора. При известных пространственных положениях навигационного спутника, спутника-ретранслятора и станции приема данных из результатов измерений могут быть вычтены дополнительные составляющие, обусловленные распространением ретранслированного сигнала на трассе «спутник-ретранслятор – станция приема» и определены такие же параметры, как и при размещении двухчастотного навигационного приемника на спутнике-ретрансляторе.

Оценки показывают, что основные пространственные характеристики способа следующие:

- дальность прямой видимости между спутником-ретранслятором и земной приемной станцией 1500...1800 км;
- время нахождения спутника-ретранслятора в зоне действия земной приемной станции 380...460 с;
- число направлений определения ПЭС в ионосфере (число направлений «прокола» ионосферы) при фиксированном положении спутника-ретранслятора при темпе получения ПЭС 1 секунда за время пролета спутника-ретранслятора в зоне прямой видимости – порядка 6000.

Основные преимущества предлагаемого способа определяются:

- существенным упрощением радиоэлектронной аппаратуры спутника-ретранслятора формата CubSat за счет отказа от размещения на нем прецизионного двухчастотного многоканального навигационного приемника с высокой радиационной стойкостью и большим энергопотреблением;
- отказом от использования аппаратуры связи с достаточно высокой пропускной способностью;
- возможность измерения ПЭС путем обработки принятой реализации одновременно по большому (20...25) числу навигационных спутников;
- возможностью высокоточного оценивания координат спутника-ретранслятора доплеровским методом, на который не оказывает влияние состояние ионосферы;
- возможностью использования доработанных земных станций приема информации ДЗЗ.

Типы используемых навигационных систем и параметры их сигналов

Предлагаемый способ предполагает реализацию накопления ретранслированных сигналов при его оптимальной внутривидеопериодной обработке (сжатии в согласованном фильтре) и междувидеопериодном когерентном накоплении. Кроме того, для точного определения ПЭС необходима реализация фазоразностного метода. Поэтому для ретрансляции подходят:

- сигналы всех спутников ГНСС «Глонасс»;
- сигналы L1 C/A и L2C ГНСС GPS начиная со спутников модификации IIR-M (24 спутника из 32 в орбитальной группировке);
- сигналы L1F и E5A ГНСС «Галилео».

Перечень ретранслируемых сигналов и их параметров приведен в таблице 1. Ширина спектра указана по первым нулям главного лепестка спектра.

Таблица 1 – Параметры ретранслируемых сигналов [8]

Тип ГНСС	Число НС в группировке	Рабочая частота / ширина спектра, МГц		Вид разделения	Вид сигнала
		L1	L2		
Глонасс	25	$1602+k-0,562$ 5, $k=-7...6$	$1246+k-0,437$ 5, $k=-7...6$	Частотное	BPSK
GPS	32	1575,42 / 2,046	1226,6 / 2,046	Кодовое	BPSK
Галилео	22	1575,42 / 4,092	1176,45 / 4,092	Кодовое	BOC(1,1) ; BPSK

Особенности используемых типов ГНСС и их сигналов следующие. По каждому видимому спутнику ГНСС «Глонасс» может быть реализовано сочетание фазоразностного и импульсного (для устранения неоднозначности) методов определения координат. Эти же методы могут быть реализованы по сигналам спутников ГНСС GPS начиная с модификации IIR-M. При этом, так как период навигационного сигнала с открытым кодом L2C составляет 20 мс, то измерения будут проводиться со сниженным темпом. Сигналы спутников модификаций до IIR-M могут быть использованы только для импульсного метода определения ПЭС и определения координат спутника-ретранслятора. Для ГНСС «Галилео» для каждого спутника могут быть использованы когерентные сигналы L1F (диапазон частот E1) и E5A с различными видами модуляции.

Отметим, что минимальный состав системы и, соответственно, наиболее простая структура ретранслятора достигается при использовании сигналов только какой-либо одной ГНСС: «Глонасс», GPS или «Галилео». Максимальные возможности могут быть достигнуты при ретрансляции сигналов всех ГНСС. Исходя из вида разделения (кодированное или частотное) можно сформировать четыре варианта ретрансляции сигналов. Они приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Возможный состав системы (на основе данных [8,9])

Вариант состава ретранслируемых сигналов	Диапазон частот ретранслируемых сигналов, МГц	Ширина полосы ретранслируемых частот, МГц	Общая полоса частот, занимаемая спектрами ретранслированных сигналов, МГц
Только «Глонасс»	1597,5...1605,9 1242,4...1249,9	8,5 7,5	364
«Глонасс» + GPS	1597,5...1605,9 1575,42 ±1,023 1242,4...1249,9 1227,6 ±1,046	8,5 2,0 7,5 2,0	380
GPS + «Галилео»	1575,42 ±2,046 1227,6 ±2,046 1176,6 ±2,046	4,0 4,0 4,0	404
«Глонасс» + GPS + «Галилео»	1597,5...1605,9 1575,42 ±2,046 1242,4...1249,9 1227,6 ±1,046 1176,45 ±2,046	8,5 4,0 7,5 2,0 4,0	426

Анализ приведенных в таблицах 1 и 2 исходных данных показывает, что наилучшим вариантом является организация ретрансляции сигналов ГНСС «Глонасс» и GPS. Общее число навигационных ИСЗ, по которым может быть реализован фазоразностный метод определения ПЭС составит в данном случае 49. При средней доли видимых навигационных спутников около 1/3, число одновременно ретранслируемых сигналов составит 15...17.

Так как задача определения ПЭС в ионосфере является составной частью более общей задачи дистанционного зондирования Земли, несущие частоты ретранслированного сигнала целесообразно располагать в выделенных диапазонах частот передачи информации данных ДЗЗ. Основные диапазоны частот, применяемые в радиолиниях «Борт-Земля» спутников ДЗЗ и метеосъемки составляют 2200 - 2290 МГц, 8025 - 8400 МГц и 25500 – 27000 МГц [8]. Использование диапазона 2200 - 2290 не удовлетворяет требованиям по полосе ретранслированного сигнала, а в полосе частот 25,5...27,0 ГГц проблемным является вопрос реализации стабильного гетеродина и усилителей СВЧ. Наиболее подходящим, таким образом, является диапазон 8025 – 8400 МГц с общей полосой 375 МГц.

Выделенная полоса частот несколько меньше требуемой для одновременной ретрансляции сигналов ГНСС «Глонасс» и GPS.

Возможными техническими решениями в данном случае являются:

- использование двух гетеродинов, когерентные сигналы которых формируются от общего задающего генератора, с переносом частот ретранслированных сигналов в общую полосу частот 8025...8400 МГц;

- попеременную ретрансляцию сигналов «Глонасс» (полоса 364 МГц) и GPS (полоса 350 МГц) с использованием перестраиваемого гетеродина.

Структура аппаратуры ретрансляции и расчет ее требуемых характеристик

Структурно-функциональная схема аппаратуры ретрансляции для наиболее простого случая ретрансляции сигналов только ГНСС «Глонасс» приведена на рисунке 2.

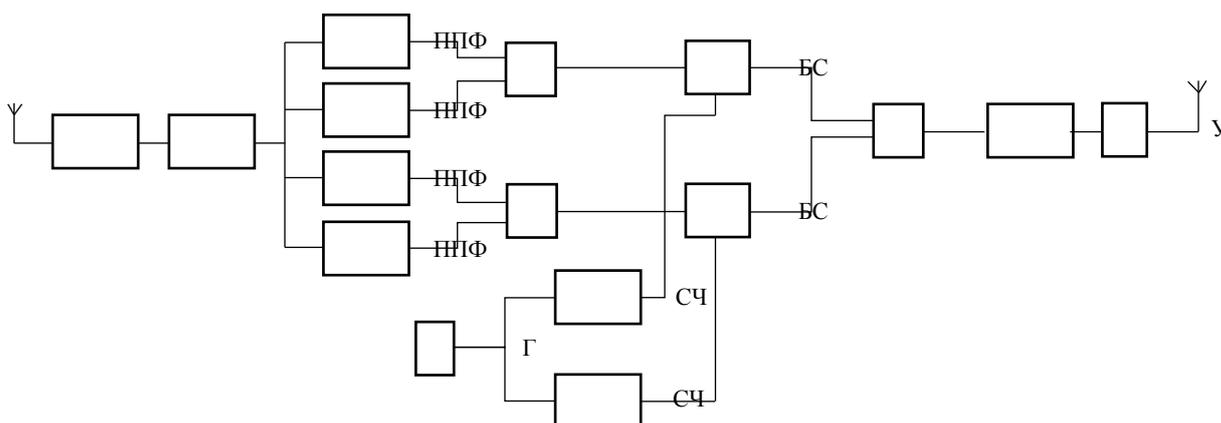


Рисунок 2 – Структурно-функциональная схема аппаратуры

С выхода микрополосковой приемной антенны на частотный диапазон 1,2...1,6 ГГц принятые навигационные сигналы поступают на малошумящий усилитель (МШУ) и далее на делитель на 4. С выходов делителя сигналы поступают на полосно-пропускающие фильтры с центральными частотами и полосами пропускания, в соответствии с таблицей 2 (строка 2– «Глонасс» + GPS). Сигналы с выхода фильтров объединяются с использованием сумматоров и поступают на балансные смесители. На вторые входы балансных смесителей поступают сигналы гетеродинов, формируемые из сигналов высокостабильного опорного генератора с использованием синтезаторов частоты с фиксированными целочисленными коэффициентами деления частот опорного сигнала и генератора, управляемого напряжением. Сигнал с выхода смесителя усиливается в цепочке выходных усилителей и излучается через передающую антенну диапазона 8,025...8,4 ГГц.

Основными параметрами аппаратуры являются эффективный (с учетом всех потерь в тракте) коэффициент ретрансляции и мощность выходного усилителя. Определим указанные параметры с учетом предполагаемых параметров станции приема данных. Примем следующие исходные данные:

- мощность излучаемого навигационного сигнала $P_{НС} = 50$ Вт, коэффициент усиления передающей антенны навигационного спутника $G_{НС} = 50$;
- дальность между НС и спутником-ретранслятором $R_1 = 25000$ км;
- дальность между спутником-ретранслятором и станцией приема данных ДЗЗ $R_2 = 1500$ км;
- спектральная плотность мощности внутренних шумов аппаратуры ретрансляции и приемного тракта станции приема данных $N_0 = 10^{-20}$ Вт/Гц;
- коэффициенты усиления приемной и передающей антенн аппаратуры ретрансляции с учетом потерь в тракте $G_r = G_{tr} = 1$;
- коэффициент усиления приемной антенны станции приема данных ДЗЗ $G_{СПД} = 5000$;
- коэффициент потерь полезного сигнала в приемном тракте станции приема данных дистанционного зондирования Земли $k_{СПД} = 0,25$.

Отношение сигнал/шум (ОСШ) на выходе согласованного фильтра составит

$$\gamma = \frac{P_{НС} G_{НС} G_r G_{tr} G_{СПД} \lambda_{НС}^2 \lambda_p^2 k_{СПД} T_0}{(4\pi)^4 R_1^2 R_2^2 N_0} K_p, \quad (1)$$

где $\lambda_{НС} \approx 0,19$ и или $\lambda_{НС} \approx 0,24$ м – длина волны для частот L1 и L2; $\lambda_p = 0,037$ м – длина волны ретранслированного сигнала; $T_0 = 1$ мс – длительность навигационного сигнала.

Основной особенностью рассматриваемого ретранслятора является существенное усиление собственных шумов, так как мощность принимаемого навигационного сигнала, как и для типового навигационного приемника, на 15...20 дБ [5] меньше мощности шума. Поэтому коэффициент ретрансляции должен быть ограничен мощностью выходного шума, которая составит

$$P_{ш} = N_0 \Delta f_p K_p, \quad (2)$$

где Δf_p – полоса пропускания ретранслятора.

Зависимости ОСШ и мощности шума на выходе ретранслятора от K_p приведены на рисунке 3.

Из рисунка 3 следует, что при $K_p > 125$ дБ мощность шума на выходе ретранслятора будет превышать 1 Вт. При этом ОСШ на выходе согласованного фильтра составит всего $\gamma = 2$, при котором точные измерения времени задержки сигнала импульсным методом и разности фаз сигналов на частотах L1 и L2 невозможны. Дальнейшее увеличение коэффициента ретрансляции невозможно ввиду ограниченной мощности выходного усилителя и ограничений по энергопитанию.

Увеличение ОСШ и обеспечение требуемой точности измерения параметров принимаемого сигнала и ПЭС возможно путем реализации когерентного накопления (КН) принимаемого сигнала при его обработке в аппаратуре СПД. Оценим требуемое время $T_{КН}$ КН в станции приема ДЗЗ.

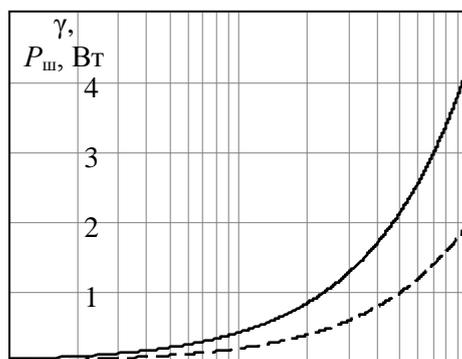


Рисунок 3 – Зависимость ОСШ (сплошная кривая) и мощности шума (пунктирная кривая) на выходе ретранслятора от коэффициента ретрансляции

ОСШ на выходе когерентного накопителя и средние квадратические ошибки оценки дальности импульсным методом (по времени задержки огибающей) и разности фаз когерентных сигналов составят

$$\rho(K_p) = \gamma(K_p) \frac{T_{\text{кн}}}{T_0}; \quad \sigma_r(K_p) = \frac{\Delta r}{2\pi\sqrt{\rho(K_p)}}; \quad \sigma_{\Delta\varphi}(K_p) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\rho(K_p)}}. \quad (3)$$

Зависимости σ_r и $\sigma_{\Delta\varphi}$ от K_p для $T_{\text{кн}}=0,1; 0,5$ и $1,0$ с приведены на рисунке 4.

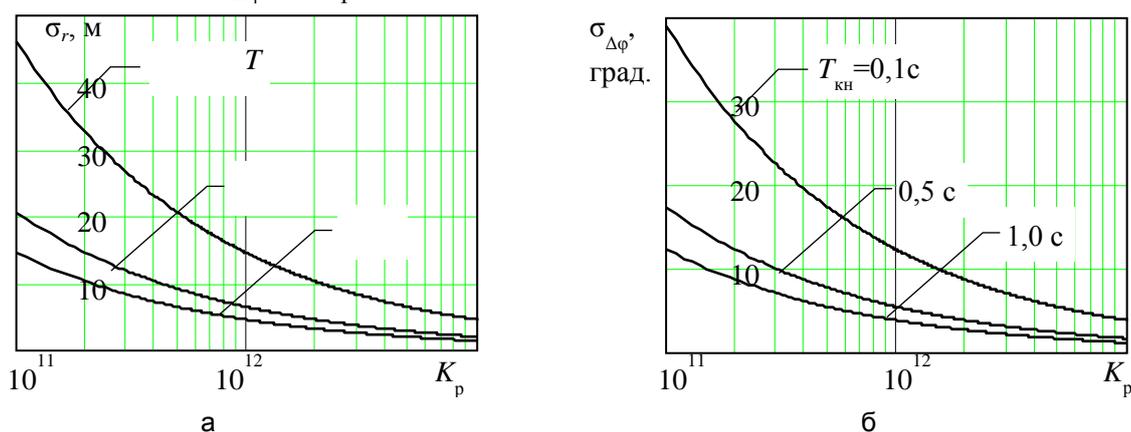


Рисунок 4 – Зависимости СКО σ_r и $\sigma_{\Delta\varphi}$ от коэффициента ретрансляции

Требуемая для измерения ПЭС среднеквадратическая ошибка разности фаз когерентных сигналов на частотах L1 и L2 должна составлять не более 5° при точности измерения дальности (ионосферной задержки) порядка единиц метров. Из зависимостей на рисунке 4 следует, что этого можно добиться при времени когерентного накопления порядка 1,0 с и при коэффициенте ретрансляции 123...125 дБ. Мощность шумов на выходе ретрансляторе составит при этом порядка 0,5 Вт.

Заключение

Предлагаемый способ получения исходных данных для радиотомографии ионосферы может быть реализован в многопозиционной когерентной радиолокационной системе, образованной за счет ретрансляции, с переносом частоты, сигналов ГНСС «Глонасс» и GPS аппаратурой спутника-ретранслятора и приема ретранслированных сигналов на СПД ДЗЗ. Достижение требуемой точности определения информационных параметров обеспечивается при большом, порядка 1 с, времени КН, при котором нужно учитывать высшие производные дальности между НС, СР и СПД.

Список использованных источников:

1. Ступницкий, М. М.. Инфокоммуникационная инфраструктура цифровой экономики: задачи отраслевого института / М.М. Ступницкий, Н.И. Харитонов, Е.Е. Девяткин // Электросвязь, № 4, 2018. – С. 49-54.

2. Перевалова Н.П. Исследование ионосферных возмущений методом трансionoсферного GPS-зондирования. Дис. докт. физ.-мат. наук. – Иркутск: ФГБУН ИСЗФ СО РАН, 2014. – 286 с.

3. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. – Иркутск: ГУ НЦ ВСНЦ СО РАН, 2006. – 480 с.

4. Белоконов, И.В.. Исследование возможностей пространственной реконструкции параметров электронной компоненты ионосферы с использованием навигационных спутников / О.В. Филонин, И.В. Белоконов. // Известия Самарского научного центра РАН, № 4, т. 16, 2014, – С. 47-53.

5. Алгоритмы длительного когерентного накопления отраженного сигнала при ненулевых высших производных дальности до радиолокационной цели в спектральной области / Козлов С.В., Ле В.К. // Доклады БГУИР, № 5, 2021. – С.35-44.

6. Интегрированный приемник GALILEO/GPS/GLONASS/SBAS для создания аппаратуры «SAFETY of LIFE». Режим доступа: <http://navis-ukraine.com.ua/ru/publications/37-publication-galileo.html>. Дата доступа 12.04.2022.

7. Гершензон В. Е., Кучейко А. А. Стандартизация оборудования станций приема данных дистанционного зондирования Земли // Пространственные данные. 2006. № 1. С. 33–43.

8. Глонасс. Принципы построения и функционирования ГЛОНАСС Издание четвертое перераб. и доп. Под редакцией А. И. Перова, В. К Харисова – Издательство «Радиотехника», Москва, 2010. – С. 70-94.

9. Современные ГНСС | Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.glonass-iac.ru> (дата обращения: 20.04.2022).

UDC 621.396

METHOD FOR OBTAINING DATA FOR IONOSPHERIC RADIOTOMOGRAPHY BASED ON RELAYING SIGNALS OF GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS BY CUBSAT FORMAT NANOSATELLITE-REPEATER

Kapliarchuk E.N.¹

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics¹, Minsk, Republic of Belarus

Kozlov S. V. - Doctor of Technical Sciences

Annotation. It is shown that a passive multi-position radar system can be created using a small-sized satellite repeater of signals from global navigation satellite systems GLONASS, GPS, Galileo and equipment of a ground point for receiving and processing data from remote sensing systems of the Earth, providing high-precision determination of the coordinates of the satellite repeater and measurement of the full electronic content on the route "navigation satellite – satellite repeater" by the pulse method of delay of the envelope of the relayed navigation signal and the phase difference of navigation signals at frequencies L1 and L2. The functional retransmission equipment is given and its main parameters are calculated. It is shown that the main advantage of the proposed method is the simplification of the equipment of the CubSat satellite by replacing the on-board dual-frequency navigation receiver and data transmission equipment to the ground receiving station with a simple repeater of navigation signals with lower power consumption and higher radiation resistance. The requirements for algorithms for processing signals received by a ground station are given..

Keywords. Global navigation satellite systems, Cubesat format repeater satellite, navigation signal, multi-position radar system, radiotomography, full electronic content.