

УДК 629.7.052.3

Е. Т. Скорик

Державне підприємство Науково-дослідний інститут «Квант-Навігація» Мінпромполітики України, Київ

Альтернативные применения сигналов спутниковых радионавигационных систем

Приведено відомості про застосування СРНС для досліджень фізики атмосфери і для дистанційного моніторингу морської поверхні. Використовується режим прихованого радіозондування середовища сигналами випромінювання СРНС і просторова схема двохпозиційної радіолокації.

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС), благодаря высокому научно-техническому системному обеспечению, представляют для ученых разных специальностей мощный инструмент исследований, в том числе в областях знаний, не имеющих прямого отношения к координатно-временному обеспечению (КВО). Высокая когерентность системной шкалы времени, гарантирующая высокое разрешение по доплеровскому смещению, квазишумовой характер излучения с высоким разрешением по дистанции, парный (двухчастотный) сигнал излучения, обеспечивающий разрешение по частотной дисперсии, — это далеко не полный перечень особенностей датчиков СВЧ-генераторов сигналов космических аппаратов (КА) СРНС, дающих в руки исследователей радиофизиков уникальные возможности альтернативных применений сигналов СРНС, число которых ограничено только творческим воображением ученых.

В статье из многих возможных применений приведены только два наиболее эффективные и проверенные на практике. Оба эти направления используют режим скрытого радиозондирования (СРЗ) физических объектов сигналами СРНС при прохождении их излучения через исследуемую среду или при приеме их отражения от поверхности раздела сред. Речь идет о мониторинге (дистанционном контроле) состояния земной атмосферы и морской поверхности. С точки зрения техники СВЧ реализуется полный комплексный анализ матрицы рассеяния среды, а сам прибор может быть отнесен к классу скаттерометров СВЧ с внешним источником пробного (опорного) сигнала. С точки зрения радиофизики используется по сути метод когерент-

ного радиооблучения физической среды, сводимый к радиоголографии (радиотомографии), а именно — получению срезов среды и реконструкции объемных и поверхностных физических параметров сред по этим срезам.

МОНИТОРИНГ ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ СИГНАЛОВ СРНС

Истоки метода восходят еще к первой СРНС «Транзит», использовавшей низкоорбитальные навигационные космические аппараты (НКА). Во многих странах, в том числе в бывшем СССР, были проведены успешные исследования метода зондирования атмосферы при проходах НКА от востока до захода над испытательной наземной приемной позицией. Осуществлялся прием двух взаимокерентных сигналов частот 150 и 400 МГц с регистрацией разностных доплеровских смещений частот и эффекта Фарадея. Были получены пространственные срезы полного электронного содержания ионосферы вдоль траекторий орбиты НКА и его временные вариации и осуществлялся расчет электронной концентрации ионосферы и некоторых других параметров атмосферы.

После введения в полномасштабную эксплуатацию СРНС GPS Navstar метод был успешно применен в США по программе NASA EOS — Earth Observing System. В результате технология СРЗ стала основой эксперимента GGI — GPS Geoscience Instruments. Приемник GPS размещался на борту низкоорбитального исследовательского КА на полярной орбите [2]. Взаимное орбитальное вращение передатчиков GPS на НКА и приемника на исследовательском КА приводило к тому, что трасса

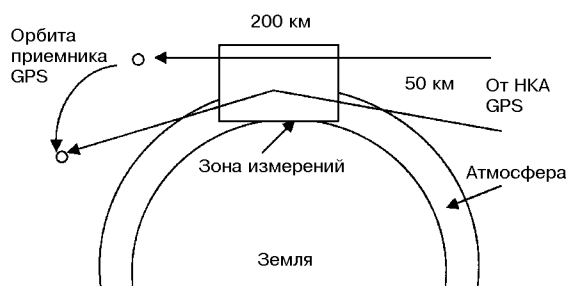


Рис. 1. Геометрия измерений параметров атмосферы сигналами GPS

радиосигналов GPS делала срезы, как показано на схеме геометрии измерений (рис. 1), подобной той, которая реализуется при автономном местопределении координат низкоорбитальных КА с помощью СРНС. Длительность наблюдения одного среза атмосферы от скольжения трассы вдоль поверхности Земли до высоты 100 км составляет от 1 до 2 мин. При полной орбитальной группировке GPS в 24 НКА в течение дня реализуется до 500 сеансов зондирования при разрешении по дистанции 1 км. В результате реализуется планетарный эксперимент оптического типа, при котором между источником сигналов СРЗ и приемником GPS в атмосфере формируется своеобразная синтезированная линза. Наблюдаемым (измеряемым) параметром является избыточная задержка распространения сигнала GPS за счет атмосферы. Задержка вызывается изменением индекса рефракции, что вызывает, в свою очередь, искривление трассы прохождения луча через границу раздела сред с разной рефракцией по закону Снелла. В качестве модели атмосферы была выбрана многослойная структура сферических тонких слоев. Для вычисления искривления оптических трасс используется прецизионная техника измерения приращений доплеровского смещения частоты несущей, когда трасса сигнала слегка отличается от той, которая была бы при отсутствии атмосферы. Реализована точность измерения частоты 10^{-13} . Это эквивалентно угловому разрешению около 10 нрад или 1 мкград, что соответствует искривлению трассы 5 см на расстоянии 5000 км.

Так как исследователей интересует в конечном счете вертикальное распределение рефракции (когда доплеровского смещения нет), то для его вычисления на основе наклонных зондирований был использован метод интегрального преобразования Абея при допущении, что структура атмосферы изменяется локально в основном только в вертикальном измерении.

Следующий шаг состоял в интерпретации полученных результатов по рефракции. Учитывается,

что в атмосфере Земли имеется три первичных источника рефракции, влияющих на прохождение СВЧ-сигналов: составляющие сухой атмосферы, влажной атмосферы и ионосферы. Разделение составляющих рефракции было успешно выполнено с учетом того, что в диапазоне рабочих частот GPS зона Френеля, как приближение волнового дифракционного подхода к эквивалентной (синтезируемой) реализуемой апертуре датчика, имеет диаметр около 1.5 км. Это гарантирует горизонтальное разрешение примерно 160 км, определяющее достаточную длину пути в вертикальном атмосферном слое после преобразования Абея. Были определены все составляющие инструментальных ошибок метода, что позволяет успешно применять метод GPS-зондирования для изучения энергетики и динамики атмосферы. Новые по точности перспективы метода возникли после снятия режима ограниченного доступа в гражданском коде GPS. Для улучшения разделения вклада составляющих сухой и влажной рефракций с помощью таких космических атмосферных патрулей обсуждается возможность дополнительного использования на бортах будущих проектов аппаратов НКА GPS и в проектах НКА GALILEO передатчиков-радиомаяков на одной или двух частотах диапазона миллиметровых волн (ММВ) вблизи линии резонансного поглощения паров воды на частоте 22 ГГц.

ДВУХПОЗИЦИОННАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО СКРЫТОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ (СРЗ)

Двухпозиционная (bistatic) радиолокация, при которой позиции передатчика и приемника радиолокационной станции (РЛС) разнесены в пространстве, является относительно новым эффективным направлением в радиолокации. В 1980-х были проведены эксперименты по использованию бистатической схемы РЛС в качестве высотомера для летательного аппарата (ЛА) с повышенной скрытностью (без передающего сигнала) при использовании для «подсветки» земной поверхности излучения Галактики [1]. Последнее представляет собой широкополосное шумовое радиоизлучение массивных космических тел, подобных Солнцу, лежащих в плоскости Галактики. Атмосфера Земли ограничивает диапазон частот космического шума, достигающего ее поверхности, значениями 10 МГц—100 ГГц, с хорошо изученными зонами повышенного затухания в диапазоне ММВ в парах воды и молекулах кислорода. Наибольшее значение интенсивности галактического шума достигается в том случае,

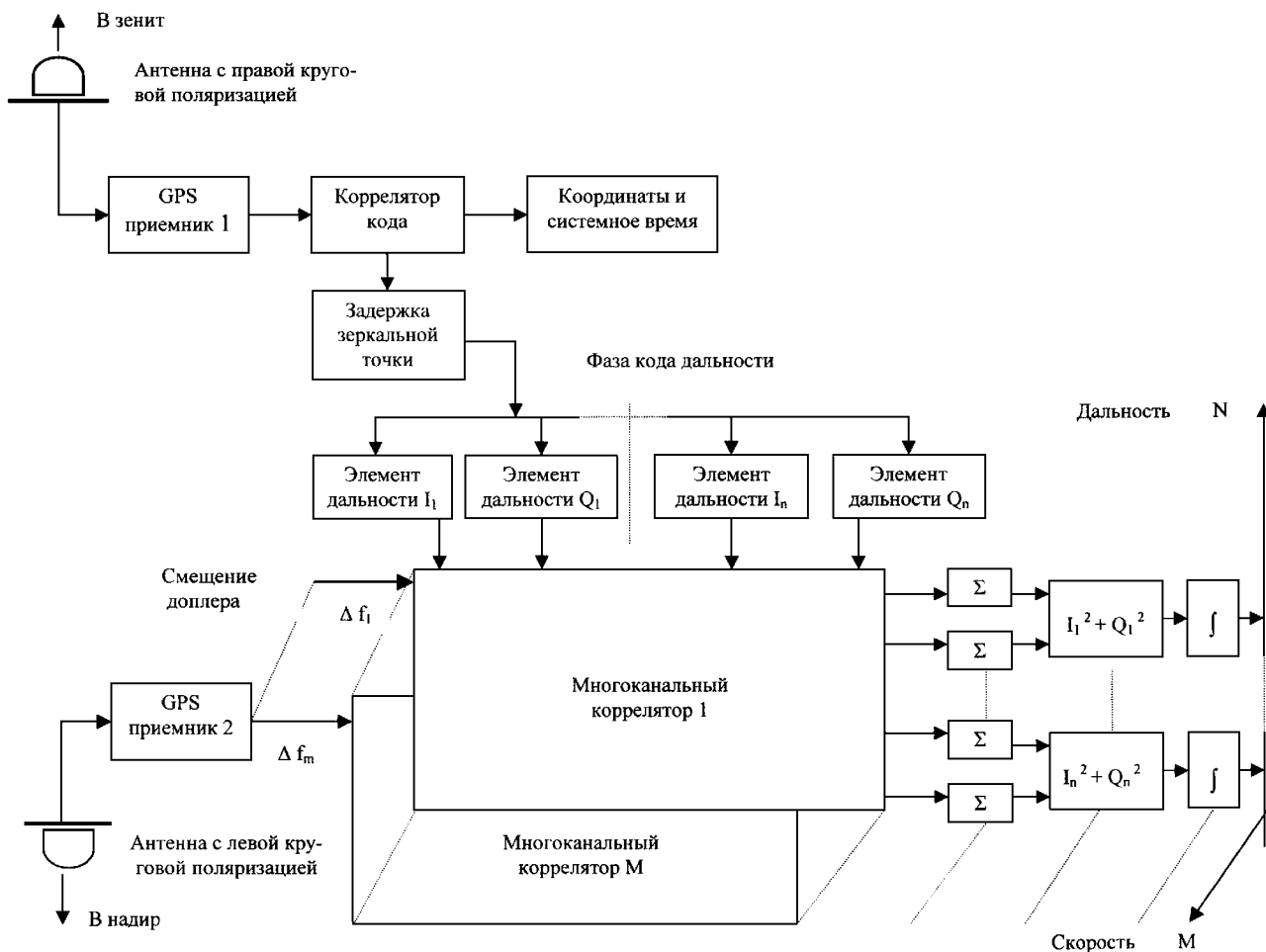


Рис. 2. Структурная схема РЛС со скрытым радиозондированием сигналами GPS

когда приемная антенна ориентирована на центр плоскости Галактики. На частоте 10 МГц уровень галактического шума, принятый полуволновым вибратором, превышает на 30 дБ уровень теплового шума $kT\Delta f$ приемника при стандартной температуре $T_0 = 290$ К, где k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура в градусах Кельвина, Δf — полоса частот канала в Гц. На частоте 500 МГц этот относительный уровень падает до -10 дБ. В связи с тем, что Галактика представляет собой протяженный и неоднородный источник шума, есть предел усиления антенны такого электромагнитного датчика, равный 10—15 дБ.

Эксперимент состоял в размещении на ЛА двух приемных антенн — одной, ориентированной вверх на центр плоскости Галактики, и другой, направленной вниз на подстилающую поверхность. С помощью взаимной корреляционной обработки галактического шума, считая его гауссовым процессом с нулевым средним значением, определялось

групповое время запаздывания отражения, принимаемого «земной» антенной относительно шума, принимаемого антенной «небесной». Был разработан субоптимальный приемник, состоявший из двух радиоканалов и двух однобитовых аналого-цифровых преобразователей и сдвигового регистра в опорном канале. Затем оба канала поступали на сумматор по модулю два, на выходе которого устанавливался счетчик в качестве так называемого «знакового» взаимокоррелятора. Если сигналы с выходов двух антенн не коррелированы по задержке (коэффициент корреляции $\rho = 0$), то появление нулей и единиц на выходе счетчика равновероятны, и вероятность равна 0.5. При $\rho > 0$ вероятность единиц увеличивается, и пороговая схема обнаруживает наличие совпадения задержек в качестве факта обнаружения сигнала, отраженного от подстилающей поверхности с измерением величины задержки как меры высоты ЛА относительно Земли. Эксперимент на частоте 100 МГц в полосе пропускания

10 МГц при частоте отсчетов $2 \cdot 10^7$ независимых выборок в секунду подтвердил возможность измерения высоты с разрешением ± 3.75 м при использовании галактического шума для СРЗ.

Эксперименты с галактическим СРЗ исчерпали себя после появления возможности использования для целей СРЗ сигналов от НКА GPS. С 1993 г. Европейским космическим агенством ESA проводились первые эксперименты по использованию этих сигналов для бистатических РЛС в качестве скаттерометров и альтиметров. Уже в 1998 г. в рамках программы TOPEX — Ocean Topography Experiment в США был создан высотомер-скаттерометр, использующий сигналы GPS для СРЗ [3]. С помощью этого оборудования был получен большой объем статистических данных о свойствах морской подстилающей поверхности, что позволило создать специализированный инструмент дистанционного мониторинга для задач океанографии.

Структурная схема оборудования показана на рис. 2. Это типичный современный когерентный радиолокатор (РЛС) с двумерным разрешением по дальности и скорости. В качестве источника опорного сигнала используется GPS-приемник 1 с антенной, направленной в зенит. GPS-приемник 2 с антенной, направленной в нади́р (в случае альтиметра) или под наклоном к поверхности воды (скаттерометр) служит в качестве измерительного канала. Исключительно эффективно было использовано явление перемены знака круговой поляризации GPS сигналов с правой при передаче на левую при отражении от поверхности среды. Уникальность сигналов GPS в качестве датчика СРЗ, в отличие от галактического шума, состоит в возможности получения высокой угловой разрешающей способности (эффект синтеза апертуры) на приемной позиции при слабонаправленной антенне. Устранение влияния зеркального отражения («засветки») опорного сигнала реализовано с помощью фиксированной задержки фазы кода. Применяя двумерную матрицу согласованных фильтров по задержке и по доплеровскому смещению, в устройстве обработки измерителя реализуется возможность накопления (когерентного суммирования Σ и некогерентного интегрирования \int) отсчетов сигналов GPS, отраженных от поверхности в пределах временных N и доплеровских M стробов. Фирма «Mitel Semiconductor» (Канада) разработала для этих целей матрицу «задержка — частота Доплера» из 2021 корреляторов квадратурных составляющих отраженных сигналов I_n и Q_n на базе высокой технологии на полупроводниковых чипах. Таким образом, были реализованы измерения высоты морских волн, скорости и направления

движения ветра и волн, а также величины отражающей способности поверхности σ в м^2 с помощью измерителя мощности огибающей отраженного сигнала $I_n^2 + Q_n^2$ в элементах разрешения. Последнее свойство позволило различать сухую и влажную земную поверхность, обеспечивая картографирование береговых зон и районов портов (гаваней).

Аппаратура бистатической РЛС с СРЗ сигналами GPS успешно была испытана в США в 1998 г. не только с борта самолета C-130 с высоты 3 км, но и с борта аэростата (зонда) с высоты 25 км. NASA изучает возможность применения этой техники измерений также с борта КА. Успехи настоящей программы обусловят широкое использование техники СРНС (наряду с применением для КВО) в качестве универсального инструмента практически для всех глобальных геофизических исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прогнозируется, что сфера применения когерентных электромагнитных датчиков (сенсоров) скрытого зондирования, применяющих сигналы СРНС для исследования геофизических параметров окружающей среды будет расширяться. Их использование особенно перспективно при решении актуальных проблем глобального потепления и изменения климата Земли, исследовании процессов текущих циркуляций в Мировом океане, изменений в атмосфере и прогнозировании погоды. Уникальность метода обеспечивается возможностью использовать высокотехнологичные параметры этих пробных сигналов без затрат на их формирование и излучение, и сосредоточить основное внимание на вопросах обработки сигналов для выделения наиболее полной информации об окружающей среде.

1. Heralley J. E., Schroeder J. E. Bistatic Radar Without Transmitted signal-Covert Altimetry Concept // IEEE Trans. Aerospace and El. Systems.—1990.—26, N 5.—P. 732—736.
2. Kursinski R. Monitoring the Earth's Atmosphere with GPS // GPS World.—1994, March.—P. 50—53.
3. Romjathy A., Garrison J. L., Zavorotny V. GPS: A New Tool for Ocean Science // GPS World.—1999, April.—P. 50—52, 54, 56.

ALTERNATIVE TO USE THE SIGNALS OF SATELLITE RADIO-NAVIGATION SYSTEMS

E. T. Skoryk

Results on the use of the satellite radio-navigation systems (SRNS) for the meteorological physics investigation and the sea surface monitoring distance are reported. The method of hidden radiation sounding of surrounding medium by the signals of SRNS radiation and space diagram of two-positional radiolocation is used.