

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.396.969
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-70-83>
EDN QDYIBS



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Принципы построения бортовых
радиолокационных систем наноспутников,
основанных на приеме отраженных сигналов
спутниковых навигационных систем

А.В. Ксендзук^{1, @},
В.Ф. Фатеев²

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Солнечногорск, Московская область, 141570 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: ks_alex@mail.ru

Резюме

Цели. Создание радиолокационных систем дистанционного зондирования, основанных на приеме отраженных от поверхности Земли сигналов навигационных спутниковых систем, позволяет развернуть группировку наноспутников радиолокационного обзора земной поверхности. Целью работы является развитие принципов построения бортовых бистатических систем дистанционного зондирования на сверхмалых космических аппаратах, оценка энергетического потенциала и возможностей его увеличения.

Методы. Оптимальный метод обработки в бортовых бистатических радиолокационных системах (ББРЛС) является развитием известных аналитических методов оптимальной обработки в моностатических системах. Расчет энергетического потенциала основывается на исходных данных, полученных в ходе экспериментальных исследований других авторов.

Результаты. Использование сигналов навигационных спутниковых систем для зондирования поверхности является перспективным, развивающимся направлением. США и Китаем развернуты спутниковые группировки, осуществляющие дистанционное зондирование по отраженным сигналам навигационных спутников. Разработан алгоритм оптимальной обработки в таких системах, реализующий принцип синтезирования апертуры, рассчитан энергетический потенциал бистатической радиолокационной системы с синтезированием апертуры антенны. Для реализации обработки предложена схема с использованием стандартного навигационного приемника, который используется для формирования опорных сигналов.

Выводы. Применение методов оптимальной обработки в ББРЛС позволяет синтезировать радиолокационное изображение по сигналам космических навигационных аппаратов. Для повышения точности оценок необходимо увеличить отношение сигнал/шум за счет сочетания когерентного накопления (синтез апертуры) и некогерентного накопления (комплексирование измерений по разным космическим аппаратам). Предложенные в работе методы обработки сигналов и структура приемника на борту сверхмалого космического аппарата позволяют реализовать синтезирование апертуры при реализуемых требованиях к аппаратной части.

Ключевые слова: бистатическая радиолокационная система, синтез апертуры, навигационный спутник, оптимальная обработка

• Поступила: 29.11.2023 • Доработана: 02.02.2024 • Принята к опубликованию: 24.05.2024

Для цитирования: Ксендзук А.В., Фатеев В.Ф. Принципы построения бортовых радиолокационных систем наноспутников, основанных на приеме отраженных сигналов спутниковых навигационных систем. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):70–83. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-70-83>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Principles of construction of nanosatellite radar systems based on global navigation satellite system reflectometry

Alexander V. Ksendzuk^{1, @},
Vyacheslav F. Fateev²

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Scientific and Technical Center of Metrology in Gravimetry, VNIIIFTRI, Solnechnogorsk, Moscow oblast, 141570 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: ks_alex@mail.ru

Abstract

Objectives. The development of radar remote sensing systems based on the reception of signals of navigation satellite systems reflected from the surface enables a constellation of nanosatellites to be deployed, in order to perform radar surveying of the Earth's surface. The aim of this work is to develop the principles of construction of onboard bistatic remote sensing systems on nanosatellites, in order to assess the energy potential and possibilities for its increase.

Methods. The optimal processing method in onboard bistatic radar systems is a development of known analytical methods of optimal processing in monostatic systems. The calculation of the energy potential is based on the experimental data obtained by other authors.

Results. The utilization of signals from navigation satellite systems for surface sensing is a promising and developing area. The USA and China have deployed satellite constellations to perform remote sensing using reflected signals of navigation satellites. An algorithm for optimal processing in such systems, which realizes the principle of aperture synthesis, was developed, and the energy potential of bistatic synthetic aperture radar was calculated. In order to achieve this processing, the proposed scheme uses a standard navigation receiver to form reference signals.

Conclusions. The application of optimal processing methods in bistatic radar enables a synthetic aperture based on scattered satellite navigation system signals. In order to improve the accuracy of estimates, the signal-to-noise ratio needs to be increased by combining coherent accumulation (aperture synthesis) and incoherent accumulation (aggregating measurements from different spacecraft). The signal processing methods and receiver structure proposed in this work onboard nanosatellites allow aperture synthesis to be achieved with realizable hardware requirements.

Keywords: bistatic radar, synthetic aperture, navigation satellite, optimal processing

• Submitted: 29.11.2023 • Revised: 02.02.2024 • Accepted: 24.05.2024

For citation: Ksendzuk A.V., Fateev V.F. Principles of construction of nanosatellite radar systems based on global navigation satellite system reflectometry. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):70–83. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-70-83>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Радиолокационные системы (РЛС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) космического базирования позволяют осуществлять мониторинг земной поверхности и расположенных на ней объектов независимо от погодных условий и времени суток.

Возможность съемки больших площадей, в т.ч. в труднодоступных районах, высокая оперативность, работа в любое время суток и при любой погоде привели к развертыванию спутниковых группировок (более 80 космических аппаратов (КА) на конец 2023 г.), решающих следующие задачи: построение радиолокационных изображений поверхности, обнаружение неподвижных и движущихся объектов, построение карт рельефа поверхности, оценка состояния водной поверхности (течения, приводный ветер, балльность волнения), мониторинг ураганов и цунами, контроль и прогнозирование ледовой обстановки, в т.ч. в арктической зоне и др. [1].

В настоящее время большинство космических радиолокационных средств ДЗЗ представляют собой моностatische радиолокаторы с синтезированием апертуры (PCA) антенны, бистатическая конфигурация была реализована только в виде TanDem-X (разработчик – EADS Astrium, Германия) [1].

В активных PCA возможности уменьшения размеров, массы и энергопотребления ограничиваются параметрами передатчика, который должен формировать достаточную для получения качественных изображений мощность. Так, например, для современной группировки из 27 КА PCA ICEYE (разработчик – ICEYE, Финляндия) пиковая излучаемая мощность составляет 3.2 кВт¹.

По этой причине отдельным направлением развития космических РЛС считаются неизлучающие системы. В таких системах роль передатчика выполняют существующие (сторонние) КА. Наиболее проработанным является вариант использования в качестве передатчиков глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), которые в иностранной литературе получил собственное название GNSS reflectometry (GNSS-R) [2, 3]. Этот вариант

реализации использовался в т.ч. для альтиметрии морской поверхности [4]. Российскими учеными также были предложены варианты создания средств ДЗЗ, основанных на использовании сигналов ГЛОНАСС² в части построения многопозиционных систем [5, 6], способов обработки сигналов в режиме синтезирования апертуры [7], использования наземной системы приема сигналов для определения параметров поверхности [8], использования летательных аппаратов для приема и обработки сигналов [9]. Однако практически был реализован только один проект [10].

Результаты обнаружения судов на фоне водной поверхности по сигналам ГНСС, приведенные в работах [10–12], показали возможность такого обнаружения только при реализации алгоритма синтезирования апертуры. В [13, 14] также опубликованы данные об успешном обнаружении речных судов по сигналам ГНСС при использовании синтезирования апертуры.

В 2014 г. был запущен спутник TechDemoSat-1 (SSTL, Великобритания), на котором размещалась аппаратура для приема отраженных от поверхности моря сигналов ГНСС и определения скорости ветра, а также границ между водной поверхностью и льдом.

Европейское космическое агентство 28 сентября 2015 г. запустило наноспутники Spire (Spire Global, Шотландия), которые по сигналам ГНСС формируют радиолокационные данные для водной, морской поверхности, ледового покрова, а также позволяют оценить параметры ионосферы [15].

Спутниковая группировка NASA Cyclone Global Navigation Satellite System (CYGNSS), запущенная в декабре 2016 г., состоит из 8 спутников и обеспечивает разрешение в режиме когерентного накопления до 3.5×0.5 км с оценкой параметров водной поверхности и суши³.

Также были запущены КА GNSS-R, в т.ч.: FSSCat [16], китайские спутники BuFeng-1 (BF-1) A/B [17], спутник DoT-1 компании Surrey Satellite Technology Ltd (SSTL) [18], спутник Fengyun-3E [19].

² <https://glonass-iac.ru/> (in Russ.). Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

³ <https://podaac.jpl.nasa.gov/CYGNSS>. Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

¹ <https://earth.esa.int/eogateway/missions/iceye>. Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

Китайская Народная Республика 8 мая 2023 г. запустила КА Jilin-1 Kuanfu 01C, который принимает отраженные от земной поверхности сигналы ГНСС для определения средней высоты поверхности моря, высоты волн, характеристики ледового покрова, параметров приповерхностного ветра и солености моря⁴.

Сеть наноспутников Spire является наиболее современной, всего на платформе LEMUR было запущено более 165 микроспутников формата 3U/6U. Аппараты GNSS-R на этой платформе ежедневно собирают по 4 Гб данных, которые принимаются более чем тридцатью наземными станциями⁵.

Направление ДЗЗ по отраженным сигналам ГНСС развивается в таких проектах как PRETTY⁶, HydroGNSS⁷, SNOOPI⁸ и других.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Решение задачи круглосуточного мониторинга земной поверхности при любых погодных условиях целесообразно осуществить путем создания созвездия бистатических РЛС с приемником на КА. Для создания таких перспективных российских КА, которые будут по результатам приема и обработки отраженных от поверхности сигналов ГНСС решать задачи построения радиоизображений поверхности Земли, измерения высоты геоида, обнаружения разрывных ледовых полей и пр., необходимо определить метод оптимальной обработки отраженных сигналов, энергетику сигнала, структуру аппаратуры приема и обработки данных, включая параметры антенной системы.

Синтезируем алгоритм формирования радиолокационного изображения в космической бистатической РСА в режиме приема отраженных сигналов спутников ГНСС, который позволяет получать радиоизображения взволнованной поверхности вблизи зеркальных точек отражения. Алгоритм сформируем для аддитивной модели уравнения наблюдения, включающей полезный сигнал $S(t)$ на входе антенны и шум $n(t)$, t – время. При этом будем полагать, что взаимная интерференция сигналов несущественна и может быть учтена в шуме приемника.

⁴ <https://news.cgtn.com/news/2022-05-08/China-launches-first-bipolar-GNSS-R-ocean-survey-payload-19RYzG3bmCs/index.html>. Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

⁵ <https://spirespaceservices.spire.com/>. Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

⁶ <https://space.oscar.wmo.int/satellites/view/pretty>. Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

⁷ <https://www.eoportal.org/satellite-missions/hydrognss>. Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

⁸ <https://esto.nasa.gov/invest/snoopi>. Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

Выделим произвольную бистатическую пару « i -й приемник – k -й передатчик» (рис. 1).

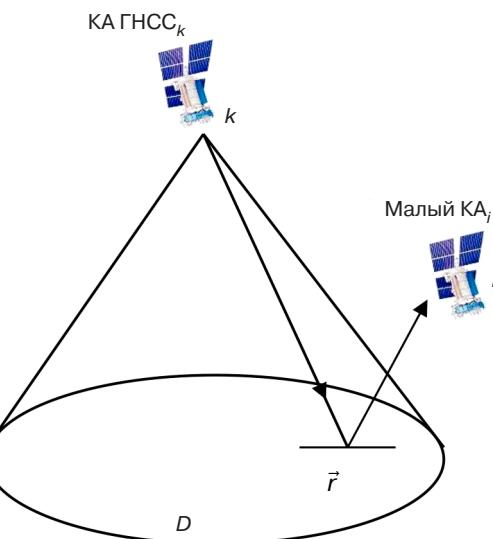


Рис. 1. Геометрия наблюдения. \vec{r} – отражающая точка в пределах D – зондируемой поверхности

Сигнал k -го КА ГНСС, отраженный от поверхности и принимаемый i -й приемной антенной, после отражения от точки поверхности с координатами \vec{r} определяется выражением:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{ik}(t, \vec{r}) = & \dot{K}_k(t, \vec{r}) \dot{K}_i(t, \vec{r}) \times \\ & \times \dot{G}_k(t, \vec{r}) \dot{G}_i(t, \vec{r}) \dot{F}_{ik}[t, \vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})] \times \\ & \times \dot{S}_{0k}[t - \tau_k(t, \vec{r}) - \tau_i(t, \vec{r})] \times \\ & \times \exp\{j\omega_{0k}[t - \tau_k(t, \vec{r}) - \tau_i(t, \vec{r})]\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\dot{S}_{ik}(t, \vec{r})$ – траекторный сигнал; $\dot{K}_k(t, \vec{r})$ и $\dot{K}_i(t, \vec{r})$ – коэффициенты, учитывающие ослабление искажение сигнала при распространении через атмосферу от передающей антенны к точке поверхности \vec{r} и от точки поверхности \vec{r} до приемной антенны соответственно; $\dot{G}_k(t, \vec{r})$, $\dot{G}_i(t, \vec{r})$ – комплексные функции, учитывающие влияние диаграммы направленности передающей и приемной антенн; $\dot{F}_{ik}[t, \vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})]$ – комплексный коэффициент отражения элемента \vec{r} , зависящий от его электрофизических параметров $\vec{\lambda}(\vec{r})$ для бистатической пары ik ; $\dot{S}_{0k}(t) \exp(j\omega_{0k}t)$ – излучаемый k -м спутником сигнал, $\omega_{0k} = 2\pi f_{0k}$ – несущая частота излучаемого сигнала k -го передатчика; $\tau_k(t, \vec{r})$ и $\tau_i(t, \vec{r})$ – время запаздывания, связанное с прохождением сигнала от передающей антенны к точке поверхности с координатами \vec{r} и от точки поверхности к приемной антенне соответственно.

Для практических расчетов опорных функций при синтезировании апертуры в бистатической РСА целесообразно пренебречь изменением функций

$\dot{G}(t, \vec{r})$ и $\dot{K}(t, \vec{r})$ за время распространения импульса, функцию $\dot{F}[t, \vec{\lambda}(t, \vec{r})] = \dot{F}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})]$ будем считать постоянной на интервале наблюдения. В результате сигнал $S_{Dik}(t)$, отраженный от зондируемой поверхности D , будет представлять собой реальную часть предельного значения суммы сигналов, отраженных от ее отдельных элементов $\dot{S}_{ik}(t, \vec{r})$:

$$S_{Dik}(t) = \operatorname{Re} \int_D \dot{F}_{ik}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})] \dot{K}_{ik}[t, \vec{r}] \dot{G}_{ik}[t, \vec{r}] \dot{S}_{0k}[t - \tau_{ik}(t, \vec{r})] \times (2) \\ \times \exp\{j\omega_{0k}[t - \tau_{ik}(t, \vec{r})]\} d\vec{r},$$

где для удобства восприятия произведения функций, зависящих от параметров передатчика и приемника, объединены в одну функцию с индексами $(\cdot)_{ik}$.

Несмотря на то, что отражение происходит от всех элементов поверхности, для которых пересекаются следы диаграмм направленности передающей и приемной антенн, наибольший вклад будут вносить компоненты, находящиеся вблизи точки зеркального отражения [20].

Особенностью реализации режима обработки (2) является определение разности хода между прямым и отраженным сигналом. Обработка прямого сигнала КА и сигнала, отраженного от зеркальной области, позволяет не только определять параметры поверхности, но и рассчитывать текущую высоту геоида в этой точке. Число таких точек зеркального отражения совпадает с числом видимых КА ГНСС, сами точки перемещаются в пространстве при взаимном движении передатчика и приемника относительно подстилающей поверхности.

Возможность решения задачи измерения высоты была показана зарубежными и российскими исследователями [21–23]. Использование высокоточных эфемерид КА ГНСС позволяет решить задачу альтиметрии с высокой точностью. Например, параметры движения центра масс КА ГНСС ГЛОНАСС определяются с погрешностями (по уровню вероятности 0.997) не более 0.5 м вдоль орбиты, 0.2 м по бинормали к орбите и 0.1 м по радиус-вектору⁹.

2. ОПТИМАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В БИСТАТИЧЕСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ РЛС

Без потери общности результатов, положим, что полезный сигнал, излученный навигационным спутником, отраженный от земной поверхности и принимаемый на борту наноспутника $\operatorname{Re} \dot{S}_{Dik}(t)$, наблюдается на фоне аддитивного нормального белого шума

$n_{ik}(t)$, статистические характеристики которого можно полагать одинаковыми для всех пар « i -й приемник – k -й передатчик»:

$$u_{ik}(t) = \operatorname{Re} \dot{S}_{Dik}(t) + n_{ik}(t). \quad (3)$$

Оптимальные оценки параметров поверхности $\vec{\lambda}(\vec{r})$, содержащихся в отраженном сигнале, для функционально-детерминированных моделей поверхности найдем в рамках метода максимального правдоподобия по максимуму функционала

$$\operatorname{p}\left[u_{ik}(t) / \dot{F}_{ik}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})]\right] = C \exp \left\{ -\frac{1}{N_{0ik}} \int_0^T [u_{ik}(t) - \operatorname{Re} \int_D \dot{F}_{ik}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})] \dot{S}_{ik}(t, \vec{r}) d\vec{r}]^2 dt \right\}, \quad (4)$$

где N_{0ik} – спектральная плотность мощности аддитивного шума, T – интервал наблюдения (синтезирования апертуры), C – нормирующий множитель.

Пусть оценивается один из параметров $\lambda(\vec{r})$, если априорные сведения о нем отсутствуют либо они распределены с максимальной энтропией (равномерно в области Λ , $\lambda \in \Lambda$), то оптимальные оценки находятся из решения вариационного уравнения $\frac{\delta \left\{ p[u_{ik}(t) / \dot{F}_{ik}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})]] \right\}}{\delta \lambda(\vec{r})} = 0$. Вариационное уравнение возникает вследствие того, что оценивается не постоянное значение параметра, а функция пространственных координат $\dot{F}_{ik}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})]$.

После ряда вычислений решение уравнения (4), которое определяет принцип синтезирования апертуры в бистатической РЛС, в компактном виде можно записать так:

$$\dot{Y}_{ik}(\vec{r}) = \int_0^T u_{ik}(t) \dot{S}_{ik}^*(t, \vec{r}) dt = \int_D \dot{F}_{ik}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})] \dot{\Psi}_{ik}(\vec{r}, \vec{r}_1) d\vec{r}_1, \quad (5)$$

где $\dot{Y}_{ik}(\vec{r}) = \int_0^T u_{ik}(t) \dot{S}_{ik}^*(t, \vec{r}) dt$ – оптимальный выходной эффект в данной бистатической паре, $\dot{\Psi}_{ik}(\vec{r}, \vec{r}_1) = \int_0^T \dot{S}_{ik}(t, \vec{r}) \dot{S}_{ik}^*(t, \vec{r}_1) dt$ – пространственная функция неопределенности бистатической РСА.

Результат обработки (5) – это радиолокационное изображение поверхности, в котором содержится информация о ее электрофизических параметрах.

⁹ <http://www.glonass-svoevp.ru/index.php?lang=ru> (in Russ.).
Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

Таблица. Характеристики сигналов ГЛОНАСС. I – синфазная и Q – квадратурная компоненты сигнала

Несущая частота f_0 , МГц	$1602 + 0.5625k$ $k = -7 \dots +6$	1600.995			1248.06			$1246 + 0.4375k$ $k = -7 \dots +6$	1202.025			
I/Q	Q	I	Q		I	Q		I	Q	I	Q	I
Тип	L1OF (L1 CT)	L1SF (L1 BT)	L1OC [L1OCd]	L1OC [LOCp]	L1SC	L2q (L2OC) [L2KCI (L2OCd)]	L2q (L2OC) [L2OCp]	L2SC	L2OF (L2 CT)	L2SF (L2 BT)	L3OC [L3OCp]	L3OC [L3OCd]]
Полоса, МГц	1.022	–	2.046	4.092	–	2.046	4.092	–	1.022	–	20.46	20.46
Средняя мощность сигнала \bar{A} , дБВт	–161	–	–161.5	–161.5	–	–161.5	–161.5	–	–161	–	–101.5	–101.5

Формирование независимых оценок по всем бистатическим парам позволяет получить $N = N_{\text{КА}}N_{\text{S}}$ измерений (4), где $N_{\text{КА}}$ – число видимых КА ГНСС, N_{S} – количество излучаемых (квази)ортогональных сигналов. Для ГНСС ГЛОНАСС¹⁰ сигналы L1OF, L1OC (L1OCd и L1OCp), L2q (L2OCd, L2OCp), L2OF, L3OC (L3OCd и L3OCp) при видимости 10 навигационных спутников позволяют получить 80 значений $\dot{Y}_{ik}(\vec{r})$ (таблица).

В результате обработки (5) на выходе будет присутствовать аддитивная смесь четырех компонент:

- сигнальная часть для конкретного сигнала заданного передатчика $\dot{S}_{ik}(t, \vec{r})$

$$\dot{Y}_{S_{ik}}(\vec{r}) = \int_D \dot{F}_{ik}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})] \dot{\Psi}_{ik}(\vec{r}, \vec{r}_1) d\vec{r}_1; \quad (6)$$

- шумовая составляющая

$$\dot{Y}_{n_{ik}}(\vec{r}) = \int_0^T n_{ik}(t) \dot{S}_{ik}^*(t, \vec{r}) dt; \quad (7)$$

- интерференционная составляющая для одного и того же спутника, излучающего M сигналов $\dot{S}_{imk}^*(t, \vec{r}_1)$, не совпадающих с $\dot{S}_{ik}(t, \vec{r})$:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{IS_{ik}}(\vec{r}) &= \\ &= \sum_{m=1 \dots M} \int_D \dot{F}_{ik}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})] \int_0^T \dot{S}_{ik}(t, \vec{r}) \dot{S}_{imk}^*(t, \vec{r}_1) dt d\vec{r}_1; \end{aligned} \quad (8)$$

- межспутниковая интерференционная составляющая, вызванная приемом сигналов прочих спутников ГНСС, облучающих участок поверхности D :

¹⁰ <https://russianspacesystems.ru/bussines/navigation/glonass/interfeysnyy-kontrolnyy-dokument/> (in Russ.). Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{in_{ik}}(\vec{r}) &= \\ &= \sum_{n=1 \dots ND} \int \dot{F}_{ik}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})] \int_0^T \dot{S}_{ik}(t, \vec{r}) \dot{S}_{in}^*(t, \vec{r}_1) dt d\vec{r}_1. \end{aligned} \quad (9)$$

Исследование влияния квазиортогональных сигналов, в т.ч. с учетом различных траекторий движения КА ГНСС, может быть выполнено численно или экспериментально. Эксперимент позволяет оценить статистические характеристики шумовых и интерференционных составляющих при сравнении эффектов на выходе коррелятора, полученных в безэховой камере при работе по одному имитируемому сигналу КА ГНСС, и этих же эффектов при работе по сигналам реальных спутников ГНСС. Такой эксперимент, проведенный во Всероссийском научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений¹¹ [24], показал, что, в соответствии с законом больших чисел, совокупный эффект (8)–(9) может быть аппроксимирован нормальным случайным процессом. Следовательно, учесть эти составляющие можно, используя упрощенную модель (3) с повышением уровня шума на 1–2 дБ.

3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ БИСТАТИЧЕСКОЙ РСА С ПРИЕМОМ ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ ГНСС

При расчете энергетических параметров будем полагать, что в приемнике многопозиционной РСА осуществляется оптимальная обработка – согласованная фильтрация в соответствии с (5). Тогда на выходе системы обработки будут формироваться две составляющие: сигнальная Q_s и шумовая Q_n .

¹¹ <https://www.vniiftri.ru/> (in Russ.). Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

Мощность сигнальной составляющей P_s запись в виде:

$$P_s = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \cdot \frac{P_{av} G_T}{R_1^2} \cdot \frac{G_R T_{Rs}}{R_2^2} \sigma^0 \Delta s, \quad (10)$$

где P_{av} – средняя мощность излучаемого передатчиком сигнала; T_{Rs} – интервал синтезирования апертуры; R_1, R_2 – расстояние от отражающей точки до передатчика и приемника, соответственно; G_T, G_R – коэффициенты усиления передающей и приемной антенны, σ^0 – удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР) поверхности, Δs – размер участка разрешения на зондируемой поверхности.

В случае, когда используется зеркальное отражение от поверхности, в качестве размера участка необходимо использовать след на поверхности пространственной функции неопределенности навигационного сигнала $\dot{\Psi}_{ik}(\vec{r}, \vec{r}_1)$.

Шумовая составляющая выходного эффекта (4) \dot{Q}_n определяется спектральной плотностью мощности помех на входе приемного устройства N_0 :

$$N_0 = t_A k T_0, \quad (11)$$

где t_A – относительная шумовая температура антенны, $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T_0 – температура антенны.

В уравнении (10) основные параметры определяются геометрией наблюдения и характеристиками передатчиков – навигационных спутников. Дополнительно надо определить удельную эффективную поверхность рассеяния поверхности.

Математическая модель отражения от взволнованной морской поверхности основывается на двухмасштабной модели поверхности [25]. Для описания отражения навигационного сигнала от морской поверхности предложена модель BA-PTSM [26], которая учитывает поляризацию сигналов и при этом обеспечивает большую скорость вычислений при совпадении результатов с двухмасштабной моделью. Для этой модели результаты расчета УЭПР для круговой поляризации сигнала КА ГНСС приведены на рис. 2.

Для оценки энергетических параметров можно использовать экспериментально полученные данные (рис. 3 и 4).

Результаты расчета (9) с использованием данных [28] показывают, что обеспечить отношение сигнал/шум 4 дБ для времени накопления 1 мс в областях до 10° относительно зеркальной области отражения можно при использовании антенны с усиливанием 14 дБи. Полученные результаты близки к полученным экспериментально при скорости ветра менее 5 м/с [29] (рис. 5).

Оптимальное время синтезирования апертуры ограничивается двумя факторами. С одной стороны, необходимо осуществить накопление сигнала с уровнем, достаточным для обеспечения требуемой точности оценок параметров поверхности и высоты геоида (не менее 10 мс). С другой стороны, за время синтезирования параметры поверхности не должны существенно изменяться, чтобы в уравнении (3) комплексный коэффициент отражения не стал функцией времени. При размещении на сверхмалом КА типа cubesat¹² усиление антенны будет не более 10–16 дБи (размер антенны соответствует одной грани аппарата 3U-6U), если не используется конструкция с раскрывающейся антенной, как на КА SPIRE. Учитывая возможность совместной обработки по видимым КА с получением дополнительного увеличения отношения сигнал/шум на 4–7 дБ, время синтезирования апертуры можно сократить до 100 мс, что значительно упростит реализацию синтезирования апертуры на борту.

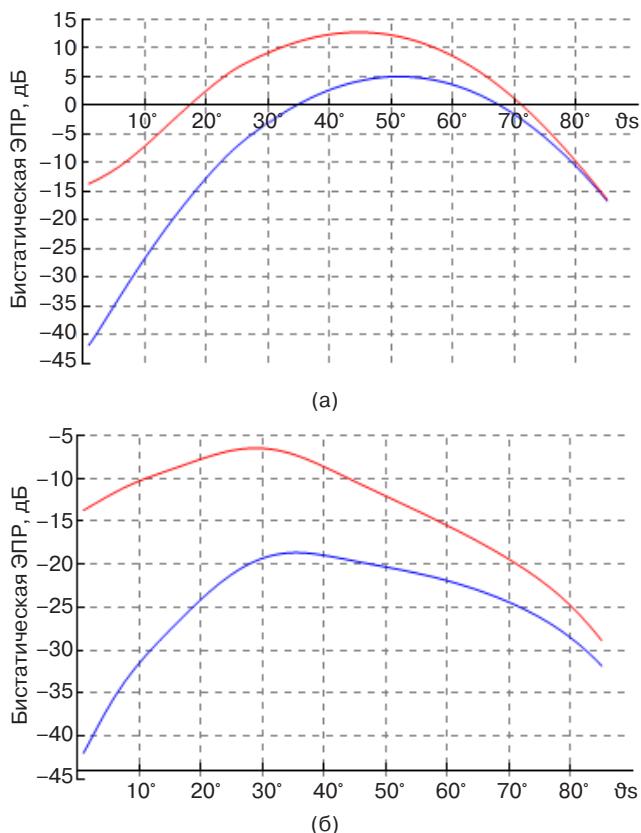
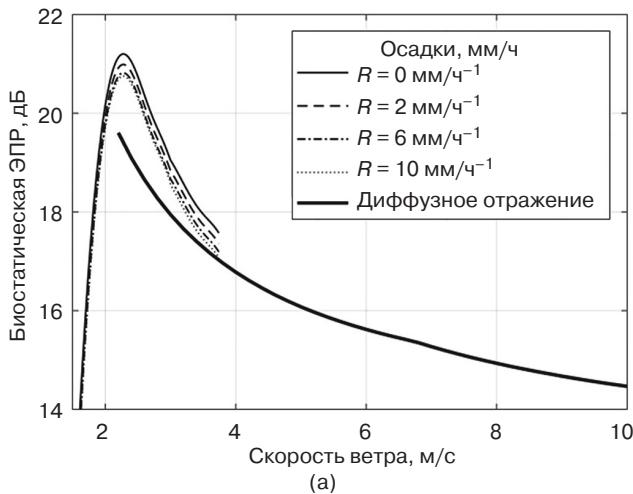
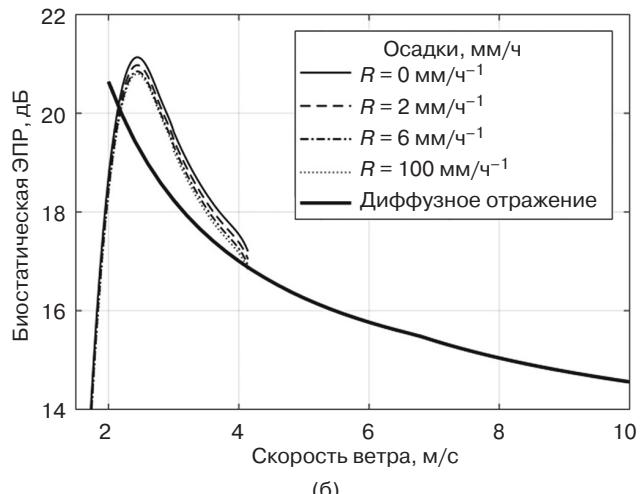


Рис. 2. Зависимость величины УЭПР при приеме отраженного сигнала с правой круговой поляризацией (красная линия) и левой круговой поляризацией (синяя линия) от вертикального угла рассеяния θ_s для сигнала с частотой 1.58 ГГц при совпадающей вертикальной проекции бистатического угла наблюдения 45° и горизонтальной проекции бистатического угла 0° (а) и 30° (б) [26]

¹² https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2018/01/cubesatdesignspecificationrev14_12022-02-09.pdf. Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.



(а)



(б)

Рис. 3. Зависимость бистатической эффективной площади рассеяния (ЭПР) сигнала GPS¹³ L1 для морской поверхности от скорости приводного ветра при различном уровне осадков R для горизонтальной проекции бистатического угла 0° (а) и 30° (б), по данным [27]

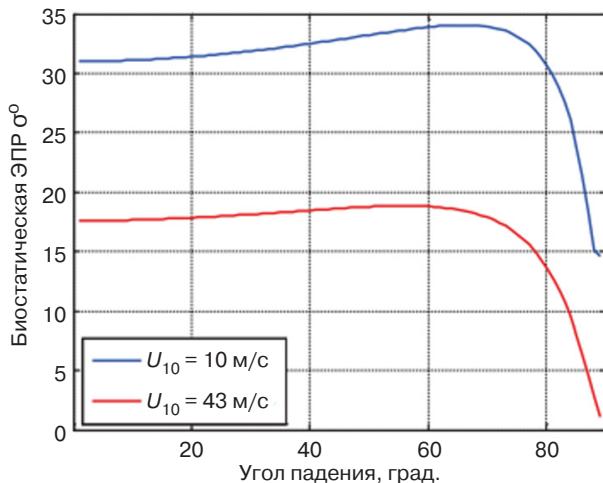


Рис. 4. Зависимость бистатической ЭПР сигнала GPS L1 для морской поверхности в области зеркального отражения от угла рассеяния для двух скоростей приводного ветра U_{10} , по данным σ^0 [26]¹⁴

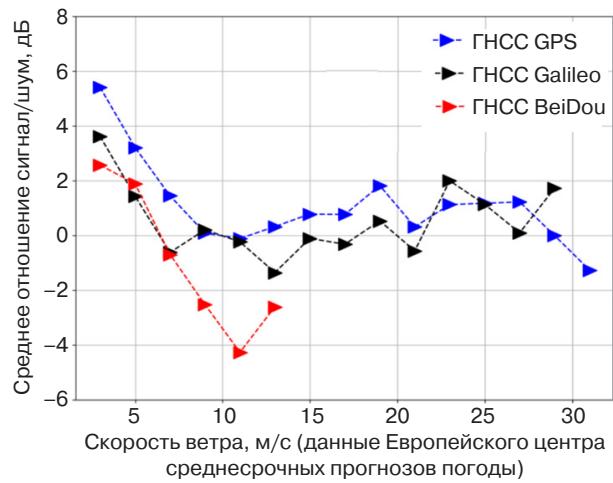


Рис. 5. Средние значения отношения сигнал/шум при различной скорости ветра (для ГНСС GPS, Galileo¹⁵, BeiDou¹⁶) [29]

4. СТРУКТУРА БОРТОВОЙ БИСТАТИЧЕСКОЙ РЛС

Для корректной обработки сигналов бортовая РЛС должна содержать (рис. 6):

- антеннную систему (АС) для приема прямого сигнала ГНСС, необходимого для формирования опорного сигнала (стандартную навигационную антенну);

- антеннную систему приема сигнала с левой круговой поляризацией, поляризационной развязкой не хуже 20 дБ, коэффициентом усиления не менее 10 дБи;
- программно-определяемый приемник;
- стандартный космический приемник ГНСС с возможностью выдачи координатной информации для контроля положения КА. Эта информация используется в корреляторе для формирования

¹³ <https://www.gps.gov/>. Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

¹⁴ Cyclone global navigation satellite system (CYGNSS). Algorithm Theoretical Basis DocumentLevel 2 Wind Speed Retrieval. https://cygnss.ingen.umich.edu/wp-content/uploads/sites/534/2021/07/148-0138-ATBD-L2-Wind-Speed-Retrieval-R6_release.pdf. Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

¹⁵ <https://galileognss.eu/>. Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

¹⁶ <https://glonass-iac.ru/guide/gnss/beidou.php> (in Russ.). Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

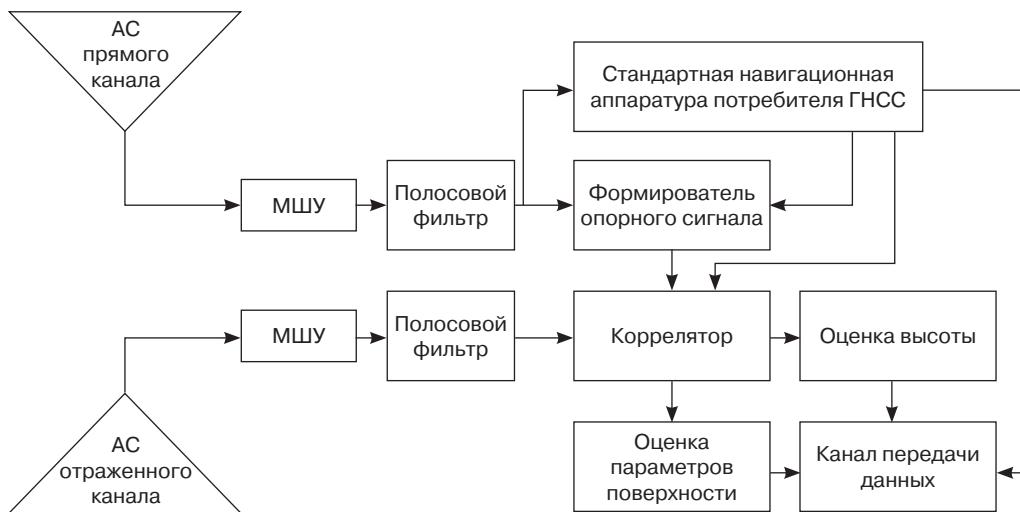


Рис. 6. Предлагаемая структура бистатической РЛС, работающей по отраженным от поверхности сигналам ГНСС. МШУ – малошумящий усилитель

опорных функций, что позволит значительно снизить требования к обработке на борту;

- канал передачи данных с устройством хранения информации для передачи данных на наземные станции.

Для увеличения отношения сигнал/шум целесообразно использовать патч-антенну. Размеры предлагаемой антенны превышают используемую в CYGNSS (6 патч-элементов). Элементы расположены «мозаикой», однако их также можно расположить параллельно, как это сделано в иностранных КА GNSS-R, и уменьшить размер антенны на КА (рис. 7).

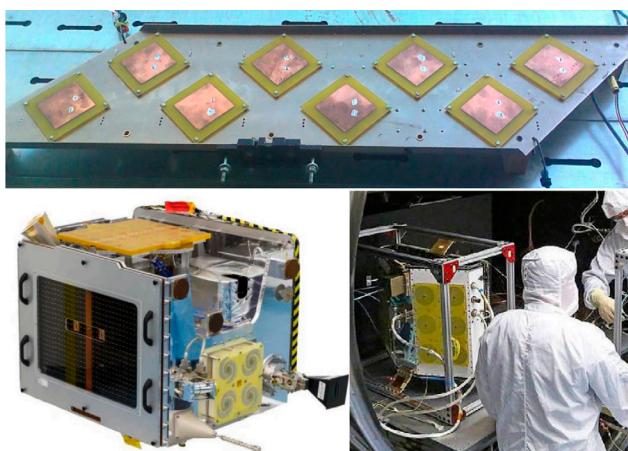


Рис. 7. Предлагаемая модель антенной решетки из патч-антенн (вверху) [14], антенна спутника TDS-1 (внизу слева) [11] и CYGNSS (внизу справа)¹⁷ [28]

¹⁷ <https://www.eoportal.org/satellite-missions/techdemo-sat-1#spacecraft>. Дата обращения 20.03.2024. / Accessed March 20, 2024.

Для приемника на КА целесообразно иметь две антенны, направленные влево и вправо от подспутниковой точки под углом 30° относительно вертикали, что позволяет обрабатывать сигналы слева и справа от трека приемного КА. При этом в схеме на рис. 6 добавляется еще один приемный канал отраженного от поверхности сигнала ГНСС.

5. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА БИСТАТИЧЕСКИХ РСА

Основной недостаток неизлучающей РЛС заключается в том, что мощность передатчиков относительно невелика. В CYGNSS для обеспечения требуемой энергетики используется наиболее простой метод – обрабатывается сигнал в области зеркального отражения, что обеспечивает увеличение уровня сигнала на 15–30 дБ относительно других областей. Размер области, которая вносит основной вклад в отраженный сигнал, зависит не только от геометрии наблюдения, но и от характеристик подстилающей поверхности (рис. 8) [30]. Для морского льда, поверхности озер и болотистой местности характерна малая область отражения в координатах «задержка – допплеровский сдвиг» вследствие зеркального отражения. Для растительного покрова и открытого моря характерна широкая область отражения. Следовательно, информация о типе отражающей поверхности содержится не только в абсолютном значении мощности отраженного сигнала, но и в его распределении в координатах «задержка – допплеровский сдвиг», что позволяет создавать новые методы анализа радиолокационных изображений для определения водно-ледовой обстановки.

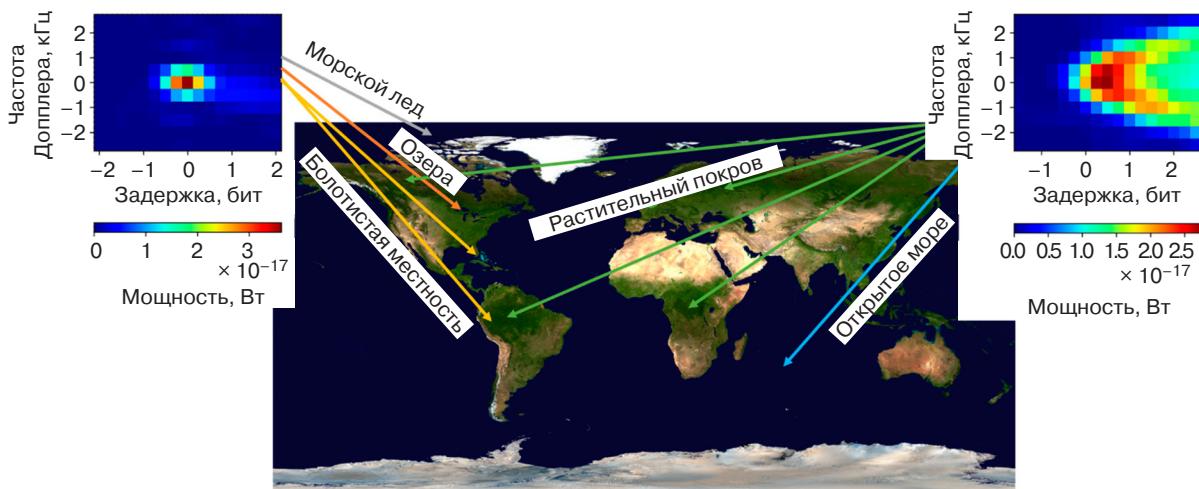


Рис. 8. Два примера изображений в координатах «задержка – допплеровский сдвиг» для двух различных типов поверхностей [30]

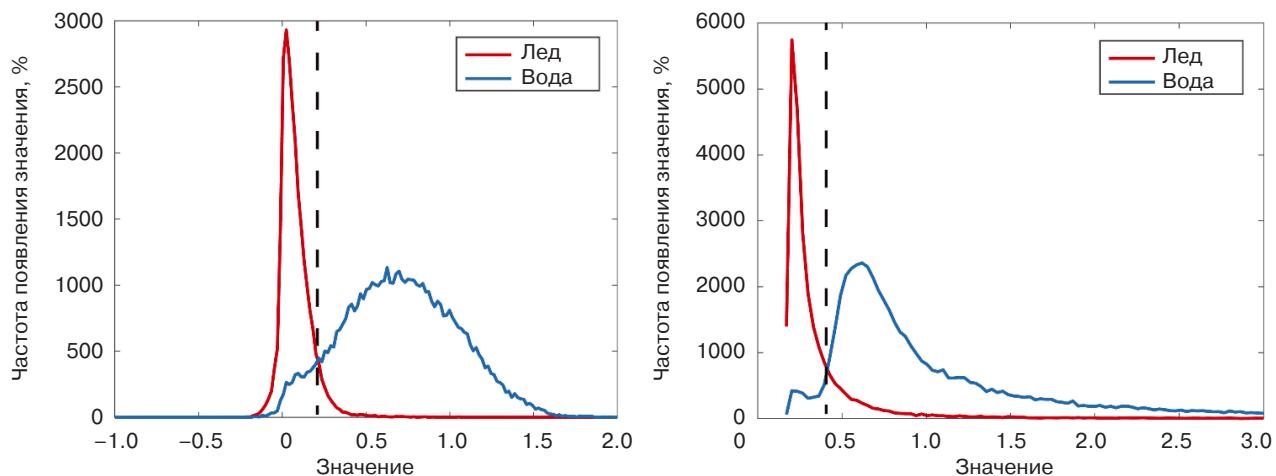


Рис. 9. Гистограммы распределения мощности отражения в координатах «дальность – допплеровский сдвиг» (слева) и переднего фронта отраженного импульса (справа)

Еще одним признаком различия сигнала ГНСС, отраженного от воды и льда, может служить гистограмма уровня отраженного сигнала от типа поверхности (рис. 9) [31].

Синтез алгоритма оптимальной совместной обработки осуществляется с учетом электродинамических моделей поверхности при наблюдении ее под различными углами и на различных несущих частотах [32].

Для увеличения отношения сигнал/шум, необходимого для повышения качества оценок, предлагается использовать когерентное накопление сигнала (в режиме синтезирования апертуры антенны), которое позволит осуществлять наблюдение в широком секторе углов и «выровнять» пространственное разрешение в дальномерном и азимутальном направлении.

Дополнительные возможности открываются за счет приема сигналов всех видимых КА ГНСС, их раздельной обработки (синтезирование апертуры)

с последующим комплексированием измерений на этапе вторичной обработки (оценки параметров поверхности, обнаружение объектов и построение радиолокационных изображений).

В отличие от описанных в литературе методов обработки отраженных сигналов КА ГНСС, необходимо обрабатывать сигналы на всех несущих частотах, что позволяет сформировать независимые данные об отражающей способности поверхности и скорректировать ионосферные искажения. Это особенно важно при определении высоты геоида для подспутниковой точки или точки зеркального отражения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен анализ систем дистанционного зондирования земной поверхности по отраженным сигналам навигационных КА. Показано, что зарубежные группировки таких КА функционируют на орбите,

решая задачи определения параметров водной поверхности и почвы. Данные с этих КА находятся в открытом доступе и доступны для анализа. С учетом ограниченных возможностей по созданию метеорологических спутниковых группировок, КА мониторинга водной поверхности и определения высот геоида, основанные на приеме отраженных сигналов спутниковых навигационных систем, позволили бы решить ряд важных научных и практических задач. В работе представлен алгоритм оптимальной обработки отраженных от поверхности сигналов навигационных систем с учетом особенностей функционирования КА ГНСС, включая наличие интерференционной составляющей. Рассчитанные численно значения энергетического потенциала бистатической РСА для сигналов круговой поляризации совпадают с экспериментальными значениями, приведенными в иностранной литературе.

Предложено выбирать время синтезирования апертуры порядка 100 мс с учетом постоянства параметров отражающей поверхности. Дальнейшее увеличение отношения сигнал/шум необходимо осуществлять за счет совместной обработки по всему видимому созвездию.

Предложена структура бортовой бистатической РЛС, в которой, в отличие от известных аналогов, используется навигационный приемник для

формирования опорного сигнала. Использование вычисленных в навигационной аппаратуре задержек и допплеровских сдвигов частот позволяет упростить коррелятор сигналов. Это позволяет снизить нагрузку на программно-определенный приемник с сохранением требуемого качества оценок.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта №23-67-10007.

ACKNOWLEDGMENTS

The study was financially supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-67-10007.

Вклад авторов

А.В. Ксендзук – цели и задачи исследования, методы обработки, энергетический потенциал.

В.Ф. Фатеев – идея исследования, разработка структуры бистатической РЛС, формулировка выводов.

Authors' contributions

A.V. Ksendzuk – developing aims and objectives, theoretical background, processing methods, and energy potential.

V.F. Fateev – the research idea, developing the structure of on-board bistatic radar system, and formulating the conclusions.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krieger G., Moreira A., Fiedler H., et al. TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2007;45(11):3317–3341. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.900693>
2. Hall C.D., Cordey R.A. Multistatic scatterometry. In: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 'Remote Sensing: Moving Toward the 21st Century'*. IEEE. 1988. V. 1. P. 561–562. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1988.570200>
3. Cardellach E., Fabra F., Nogués-Correg O., et al. GNSS-R ground-based and airborne campaigns for ocean, land, ice, and snow techniques: Application to the GOLD-RTR data sets. *Radio Sci.* 2011;46(6):RS0C04. <http://doi.org/10.1029/2011RS004683>
4. Martin-Neira M. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): Application to ocean altimetry. *ESA J.* 1993;17(4):331–355.
5. Ксендзук А.В. Использование спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS для дистанционного зондирования поверхности. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2003;8(5):8–15.
6. Фатеев В.Ф., Сахно И.В. Применение навигационных КА GPS/ГЛОНАСС в составе многопозиционных РЛС обзора земной поверхности. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2004;47(3):27–30.
7. Фатеев В.Ф., Сахно И.В. Способ получения радиолокационного изображения земной поверхности при помощи многопозиционной радиолокационной системы с синтезированной апертурой антенны: пат. № 2278398 РФ. Заявка № 2004121076/092006; заявл. 06.07.2004; опубл. 20.06.2006.
8. Фатеев В.Ф., Ксендзук А.В. Наземно-космическая радиолокационная система: пат. № 113022 РФ. Заявка № 2010154058/07; заявл. 29.12.20104; опубл. 27.01.2012.
9. Бахолдин В.С., Гаврил Д.А., Шалдаев А.В. Алгоритмы формирования радиолокационных изображений земной поверхности при использовании сигналов ГЛОНАСС. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2012;55(9):24–29.
10. Ксендзук А.В., Фатеев В.Ф., Герасимов П.А., Новиков В.А. Совместная обработка в многопозиционных РСА. Результаты экспериментальных исследований. В сб.: *Радиолокационное исследование природных сред: труды XXVIII Всероссийского симпозиума*. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского. 2013;10(2):218–222.
11. Di Simone A., Park H., Riccio D., Camps A. Sea target detection using spaceborne GNSS-R delay-Doppler maps: Theory and experimental proof of concept using TDS-1 data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2017;10(9):4237–4255. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2705350>

12. Hu C., Benson C.R., Park H., et al. Detecting targets above the Earth's surface using GNSS-R delay Doppler maps: Results from TDS-1. *Remote Sens.* 2019;11(19):2327. <https://doi.org/10.3390/rs11192327>
13. Фатеев В.Ф., Ксендзук А.В., Обухов П.С., Крапивкин Г.И., Тимошенко Г.В., Король Г.Н., Фатеев О.В., Новиков В.А., Герасимов П.А., Шахалов К.С. Многопозиционная радиолокационная система с синтезированием апертуры антенны по отраженным сигналам ГНСС «ГЛОНАСС». *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2012;17(5):62–68.
14. Фатеев В.Ф., Ксендзук А.В., Обухов П.С., Крапивкин Г.И., Тимошенко Г.В., Король Г.Н., Новиков В.А., Герасимов П.А., Шахалов К.С. Экспериментальный bistатический радиолокационный комплекс. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2012;17(5):58–61.
15. Freeman V., Masters D., Jales P., et al. Earth Surface Monitoring with Spire's New GNSS Reflectometry (GNSS-R) CubeSats. In: *22nd EGU General Assembly Conference Abstracts*. 2020. id. 13766. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-13766>
16. Camps A., Golkar A., Gutierrez A., et al. Fsscat, the 2017 Copernicus Masters' "Esa Sentinel Small Satellite Challenge" Winner: A federated polar and soil moisture tandem mission based on 6U Cubesats. In: *IGARSS 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE; 2018. P. 8285–8287. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518405>
17. Jing C., Niu X., Duan C., et al. Sea surface wind speed retrieval from the first Chinese GNSS-R mission: Technique and preliminary results. *Remote Sens.* 2019;11(24):3013. <https://doi.org/10.3390/rs11243013>
18. Unwin M., Rawinson J., King L., et al. GNSS-reflectometry activities on the DoT-1 microsatellite in preparation for the hydrognss mission. In: *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*. IEEE; 2021. P. 1288–1290. <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9554352>
19. Xia J., Bai W., Sun Y., et al. Calibration and wind speed retrieval for the Fengyun-3 E Meteorological Satellite GNSS-R Mission. In: *2021 IEEE Specialist Meeting on Reflectometry using GNSS and other Signals of Opportunity (GNSS+R)*. IEEE; 2021. P. 25–28. <https://doi.org/10.1109/GNSSR53802.2021.9617699>
20. Cheng Z., Jin T., Chang X., et al. Evaluation of spaceborne GNSS-R based sea surface altimetry using multiple constellation signals. *Front. Earth Sci.* 2023;10:1079255. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1079255>
21. Munoz-Martin J.F., Portero A.P., Camps A., et al. Snow and ice thickness retrievals using GNSS-R: Preliminary results of the MOSAiC experiment. *Remote Sens.* 2020;12(24):4038. <https://doi.org/10.3390/rs12244038>
22. Nogués O.C., Munoz-Martin J.F., Park H., et al. Improved GNSS-R altimetry methods: Theory and experimental demonstration using airborne dual frequency data from the microwave interferometric reflectometer (MIR). *Remote Sens.* 2021;13(20):4186. <https://doi.org/10.3390/rs13204186>
23. Фатеев В.Ф., Лопатин В.П. Космический bistатический радиолокатор контроля профиля поверхности океана на основе сигналов ГНСС. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2019;62(5):484–491. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2019-62-5-484-491>
24. Лопатин В.П., Фатеев В.Ф. Исследование bistатической радиолокационной системы на основе сигналов GPS/ГЛОНАСС в безэховой камере. *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. 2019;670:64–68.
25. Волосюк В.К., Кравченко В.Ф. *Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации*. М.: Физматлит; 2008. 351 с.
26. Di Martino G., Di Simone A., Iodice A., Riccio D. Bistatic scattering from anisotropic rough surfaces via a closed-form two-scale model. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2020;59(5):3656–3671. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3021784>
27. Asgarimehr M., Zavorotny V.U., Wickert J., Reich S. Can GNSS reflectometry detect precipitation over oceans? *Geophys. Res. Lett.* 2018;45(22):12585–12592. <https://doi.org/10.1029/2018GL079708>
28. Gleason S., Ruf C.S., O'Brien A.J., McKague D.S. The CYGNSS Level 1 calibration algorithm and error analysis based on on-orbit measurements. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2019;12(1):37–49. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2832981>
29. Nan Y., Ye S., Liu J., et al. Signal-to-noise ratio analyses of spaceborne GNSS-reflectometry from Galileo and BeiDou satellites. *Remote Sens.* 2022;14(1):35. <https://doi.org/10.3390/rs14010035>
30. Rodriguez-Alvarez N., Munoz-Martin J.F., Morris M. Latest Advances in the Global Navigation Satellite System—Reflectometry (GNSS-R) Field. *Remote Sens.* 2023;15(8):2157. <https://doi.org/10.3390/rs15082157>
31. Cartwright J., Banks Ch.J., Srokosz M. Sea Ice Detection Using GNSS-R Data From TechDemoSat-1. *JGR Oceans*. 2019. V. 124. Iss. 8. P. 5801–5810. <https://doi.org/10.1029/2019JC015327>
32. Потапов А.А., Кузнецов В.А., Аликулов Е.А. Анализ способов комплексирования изображений, формируемым мно-годиапазонными радиолокационными станциями с синтезированной апертурой. *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2021;24(3):6–21. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-3-6-21>

REFERENCES

1. Krieger G., Moreira A., Fiedler H., et al. TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2007;45(11):3317–3341. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.900693>
2. Hall C.D., Cordey R.A. Multistatic scatterometry. In: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 'Remote Sensing: Moving Toward the 21st Century'*. IEEE. 1988. V. 1. P. 561–562. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1988.570200>
3. Cardellach E., Fabra F., Nogués-Correig O., et al. GNSS-R ground-based and airborne campaigns for ocean, land, ice, and snow techniques: Application to the GOLD-RTR data sets. *Radio Sci.* 2011;46(6):RS0C04. <http://doi.org/10.1029/2011RS004683>

4. Martin-Neira M. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): Application to ocean altimetry. *ESA J.* 1993;17(4):331–355.
5. Ksendzuk A.V. Use of GLONASS/GPS satellite navigation systems for remote surface sensing. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy = Electromagnetic Waves and Electronic Systems.* 2003;8(5):8–15 (in Russ.).
6. Fateev V.F., Sakhno I.V. Application of navigating space vehicles GPS/GLONASS in structure multi-position radar the review of a terrestrial surface. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = J. Instrument Eng.* 2004;47(3): 27–30 (in Russ.).
7. Fateev V.F., Sakhno I.V. *Method for Producing Radiolocation Image of Earth Surface by Means of Using Multi-Positional Radiolocation System with Synthesized Aperture of Antenna:* RF Pat. 2278398. Publ. 20.06.2006 (in Russ.).
8. Fateev V.F., Ksendzuk A.V. *Ground-Space Radar System:* RF Pat. 113022. Publ. 27.01.2012 (in Russ.).
9. Baholdin V.S., Gavril D.A., Shaldaev A.V. Algorithms of pattern SAR images of the Earth surface with the use of GLONASS signals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = J. Instrument Eng.* 2012;55(9):24–29 (in Russ.).
10. Ksendzuk A.V., Fateev V.F., Gerasimov P.A., Novikov V.A. Multiposition radar coprocessing techniques. Experimental results. In: *Radar Research of Natural Environments: Proceedings of the 28th All-Russian Symposium.* St. Petersburg: Mozhaisky Military Space Academy. 2013;10(2):218–222 (in Russ.).
11. Di Simone A., Park H., Riccio D., Camps A. Sea target detection using spaceborne GNSS-R delay-Doppler maps: Theory and experimental proof of concept using TDS-1 data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* 2017;10(9):4237–4255. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2705350>
12. Hu C., Benson C.R., Park H., et al. Detecting targets above the Earth's surface using GNSS-R delay Doppler maps: Results from TDS-1. *Remote Sens.* 2019;11(19):2327. <https://doi.org/10.3390/rs11192327>
13. Fateev V.F., Ksendzuk A.V., Obukhov P.S., et al. Multi-position non-radiating SAR with GNSS GLONASS transmitters. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy = Electromagnetic Waves and Electronic Systems.* 2012;17(5):62–68 (in Russ.).
14. Fateev V.F., Ksendzuk A.V., Obukhov P.S., et al. Experimental bistatic radar complex. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy = Electromagnetic Waves and Electronic Systems.* 2012;17(5):58–61 (in Russ.).
15. Freeman V., Masters D., Jales P., et al. Earth Surface Monitoring with Spire's New GNSS Reflectometry (GNSS-R) CubeSats. In: *22nd EGU General Assembly Conference Abstracts.* 2020. id. 13766. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-13766>
16. Camps A., Golkar A., Gutierrez A., et al. Fsscat, the 2017 Copernicus Masters' "Esa Sentinel Small Satellite Challenge" Winner: A federated polar and soil moisture tandem mission based on 6U Cubesats. In: *IGARSS 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.* IEEE; 2018. P. 8285–8287. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518405>
17. Jing C., Niu X., Duan C., et al. Sea surface wind speed retrieval from the first Chinese GNSS-R mission: Technique and preliminary results. *Remote Sens.* 2019;11(24):3013. <https://doi.org/10.3390/rs11243013>
18. Unwin M., Rawinson J., King L., et al. GNSS-reflectometry activities on the DoT-1 microsatellite in preparation for the hydrognss mission. In: *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS.* IEEE; 2021. P. 1288–1290. <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9554352>
19. Xia J., Bai W., Sun Y., et al. Calibration and wind speed retrieval for the Fengyun-3 E Meteorological Satellite GNSS-R Mission. In: *2021 IEEE Specialist Meeting on Reflectometry using GNSS and other Signals of Opportunity (GNSS+R).* IEEE; 2021. P. 25–28. <https://doi.org/10.1109/GNSSR53802.2021.9617699>
20. Cheng Z., Jin T., Chang X., et al. Evaluation of spaceborne GNSS-R based sea surface altimetry using multiple constellation signals. *Front. Earth Sci.* 2023;10:1079255. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1079255>
21. Munoz-Martin J.F., Portero A.P., Camps A., et al. Snow and ice thickness retrievals using GNSS-R: Preliminary results of the MOSAiC experiment. *Remote Sens.* 2020;12(24):4038. <https://doi.org/10.3390/rs12244038>
22. Nogués O.C., Munoz-Martin J.F., Park H., et al. Improved GNSS-R altimetry methods: Theory and experimental demonstration using airborne dual frequency data from the microwave interferometric reflectometer (MIR). *Remote Sens.* 2021;13(20):4186. <https://doi.org/10.3390/rs13204186>
23. Fateev V.F., Lopatin V.P. Space bistatic radar to monitor the ocean surface profile based on GNSS signals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = J. Instrument Eng.* 2019;62(5):484–491 (in Russ.). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2019-62-5-484-491>
24. Lopatin V.P., Fateev V.F. Study of a bistatic radiolocation system on the basis of GPS/GLONASS signals in echo-free camera. *Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy.* 2019;670:64–68 (in Russ.).
25. Volosyuk V.K., Kravchenko V.F. *Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya i radiolokatsii (Statistical Theory of Radio-engineering Systems of Remote Sensing and Radiolocation).* Moscow: Fizmatlit; 2008. 351 p. (in Russ.).
26. Di Martino G., Di Simone A., Iodice A., Riccio D. Bistatic scattering from anisotropic rough surfaces via a closed-form two-scale model. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2020;59(5):3656–3671. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3021784>
27. Asgarimehr M., Zavorotny V.U., Wickert J., Reich S. Can GNSS reflectometry detect precipitation over oceans? *Geophys. Res. Lett.* 2018;45(22):12,585–12,592. <https://doi.org/10.1029/2018GL079708>
28. Gleason S., Ruf C.S., O'Brien A.J., McKague D.S. The CYGNSS Level 1 calibration algorithm and error analysis based on on-orbit measurements. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* 2019;12(1): 37–49. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2832981>
29. Nan Y., Ye S., Liu J., et al. Signal-to-noise ratio analyses of spaceborne GNSS-reflectometry from Galileo and BeiDou satellites. *Remote Sens.* 2022;14(1):35. <https://doi.org/10.3390/rs14010035>

30. Rodriguez-Alvarez N., Munoz-Martin J.F., Morris M. Latest Advances in the Global Navigation Satellite System—Reflectometry (GNSS-R) Field. *Remote Sens.* 2023;15(8):2157. <https://doi.org/10.3390/rs15082157>
31. Cartwright J., Banks Ch.J., Srokosz M. Sea Ice Detection Using GNSS-R Data From TechDemoSat-1. *JGR Oceans*. 2019. V. 124. Iss. 8. P. 5801–5810. <https://doi.org/10.1029/2019JC015327>
32. Potapov A.A., Kuznetsov V.A., Alikulov E.A. Methods for Complexing Images Formed by Multi-Band Synthetic Aperture Radars. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika = Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2021;24(3):6–21 (in Russ.). <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-3-6-21>

Об авторах

Ксендзук Александр Владимирович, д.т.н., заведующий базовой кафедрой № 346 – радиоэлектронных систем, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ks_alex@mail.ru. Scopus Author ID 56628472300, SPIN-код РИНЦ 2389-6036, <https://orcid.org/0009-0001-7084-1433>, <https://www.researchgate.net/profile/Alexander-Ksendlzuk-2>

Фатеев Вячеслав Филиппович, д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки РФ, начальник научно-технического центра «Метрологического обеспечения наземной и космической гравиметрии», ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ») (141570, Россия, Московская область, г. Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево (промзона ВНИИФТРИ)). E-mail: office@vniiiftri.ru. Scopus Author ID 56442213300, SPIN-код РИНЦ 5385-8126, <https://orcid.org/0000-0001-7902-0212>

About the authors

Alexander V. Ksendzuk, Dr. Sci. (Eng.), Head of Department Radioelectronic systems, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ks_alex@mail.ru. Scopus Author ID 56628472300, RSCI SPIN-code 2389-6036, <https://orcid.org/0009-0001-7084-1433>, <https://www.researchgate.net/profile/Alexander-Ksendlzuk-2>

Vyacheslav F. Fateev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Head of Scientific and Technical Center for Metrological Support of Ground and Space Gravimetry, Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radioengineering (VNIIFTRI) (industrial zone of VNIIFTRI, settlement Mendelevо, Solnechnogorsk, Moscow oblast, 141570 Russia). E-mail: office@vniiiftri.ru. Scopus Author ID 56442213300, RSCI SPIN-code 5385-8126, <https://orcid.org/0000-0001-7902-0212>