

И. В. САХНО, Е. А. ТКАЧЕВ, Д. А. ГАВРИЛОВ, К. К. УСПЕНСКИЙ

МАЛЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ ОБЗОРА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИГНАЛОВ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Рассматривается возможность создания пассивной радиолокационной системы обзора морской поверхности с использованием сигналов спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС/GPS/Galileo на базе малых космических аппаратов. Приведен пример энергетического расчета радиолинии „передатчик—поверхность—приемник“.

Ключевые слова: прием отраженных поверхностью сигналов ГЛОНАСС GPS Galileo, многопозиционная радиолокация, энергетический расчет радиолинии, дистанционное зондирование.

Современные технологии позволяют создавать спутниковые радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны, способные получать из космоса высокодетальные изображения объектов на Земле с пространственным разрешением до 1 метра. При этом радары, в отличие от оптических датчиков, могут осуществлять съемку Земли в любое время суток независимо от метеоусловий и освещенности. Одной из современных тенденций развития радиолокации является переход к созданию двухпозиционных, а в перспективе — и многопозиционных, систем обзора поверхности.

Рассмотрим многопозиционную радиолокационную систему дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), включающую в себя два сегмента: орбитальный и наземный.

Орбитальный сегмент включает две составляющие: систему космических аппаратов (КА) радиолокационной подсветки и систему малых космических аппаратов (МКА) приема отраженных поверхностью зондирующих сигналов. Основная задача сегмента — обеспечение сбора первичной радиолокационной информации (радиолокационных голограмм), запись и передача на наземный сегмент для последующей обработки.

В качестве источников сигналов радиолокационной подсветки могут рассматриваться эксплуатируемые навигационные КА спутниковых радионавигационных систем (СРНС) ГЛОНАСС/GPS/Galileo. Использование сигналов существующих КА для решения задачи радиолокационной подсветки будет способствовать снижению затрат на создание и поддержание системы дистанционного зондирования, использующей принципы многопозиционной радиолокации.

Основная задача наземного сегмента — прием зарегистрированных отраженных сигналов, синтез радиолокационных изображений, накопление и распространение полученных данных, комплексная обработка радиолокационных данных и данных, полученных от метеоспутников и систем наблюдения в оптическом диапазоне.

Избранная стратегия создания многопозиционной радиолокационной системы мониторинга позволяет получать информацию независимо от освещенности и наличия облачного покрова за счет использования ресурсов развернутых спутниковых систем навигации и представляет особый интерес для России в связи с особенностями ее географического положения. Всепогодная радиолокационная информация представляет интерес для оперативной ледовой разведки в районах судоходства (Северный морской путь, дальневосточные и другие моря России), для изучения мезомасштабных неоднородностей морской поверхности и решения многих других научных и практических задач.

Очевидно, что особенностью предложенной системы будет слабый уровень отраженного от Земной поверхности сигнала, поэтому необходимо, прежде всего, рассмотреть энергетические соотношения на входе приемного устройства, размещенного на борту МКА.

Анализ энергетических параметров проведем в соответствии со следующими исходными данными:

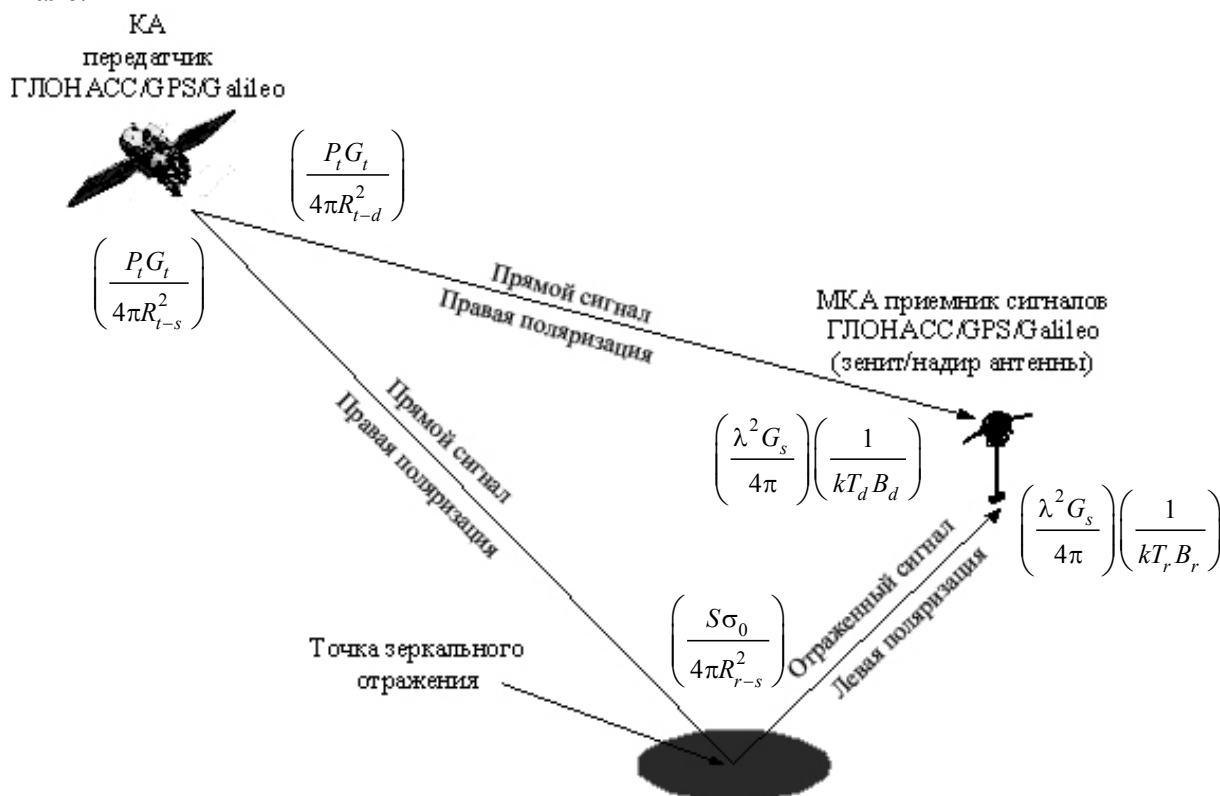
- высота орбиты МКА — 500 и 1500 км;
- приемная антенна — параболическая;
- коэффициент усиления приемной антенны G — 26,5 дБ;
- ширина диаграммы направленности по уровню — 3 дБ — $6,6 \times 6,6^\circ$;
- коэффициент шума приемника — 1,5;
- диапазон частот — L -диапазон.

Геометрия обзора системы для пары „передатчик—приемник“ показана на рисунке.

В предложенной системе возможны следующие варианты приема отраженного сигнала на борту МКА:

- в области диффузного отражения;
- в области зеркального отражения;
- в области резонансного отражения при наблюдении за сосредоточенными целями.

Поскольку используется L -диапазон, то при наблюдении за морской поверхностью и льдами будет преобладать зеркальный тип отражения. При увеличении степени „взволнованности“ морской поверхности может увеличиваться диффузная составляющая в отраженном сигнале.



Для последующей обработки [1—3] на борту носителя приемной позиции необходимо осуществлять прием как отраженного сигнала, так и сигнала прямого распространения для обеспечения когерентного накопления на протяженных временных интервалах за счет использования взаимно корреляционной обработки.

Отношение сигнал/шум в канале приема сигнала прямого распространения (S/N_d), прошедшего расстояние „передатчик—приемник“ (R_{t-d}), определяется выражением:

$$S/N_d = \frac{P_r}{P_d} = \left(\frac{P_t G_t}{4\pi R_{t-d}^2} \right) \left(\frac{\lambda^2 G_d}{4\pi} \right) \left(\frac{1}{kT_d \Delta F} \right), \quad (1)$$

где P_r — мощность сигнала на входе приемника; P_d — мощность шумов на входе приемника в канале сигнала прямого распространения; P_t — мощность передатчика; G_t — коэффициент направленного действия (КНД) антенны передатчика; G_d — КНД антенны приемника; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; T_d — шумовая температура приемника; ΔF — ширина шумовой полосы приемника; λ — длина волны зондирующего сигнала.

Отношение сигнал/шум (S/N_s) в канале приема отраженного от земной поверхности сигнала, прошедшего трассу „передатчик—поверхность—приемник“, определяется выражением:

$$S/N_s = \frac{P_r}{P_s} = \left(\frac{P_t G_t}{4\pi R_{t-s}^2} \right) \left(\frac{S \sigma_0}{4\pi R_{r-s}^2} \right) \left(\frac{\lambda^2 G_s}{4\pi} \right) \left(\frac{1}{kT_s \Delta F} \right), \quad (2)$$

где P_s — мощность шумов на входе приемника в канале отраженного сигнала; σ_0 — удельная эффективная площадь рассеяния (ЭПР) элемента разрешения; S — площадь элемента разрешения; R_{t-s} — расстояние „передатчик—поверхность“; R_{r-s} — расстояние „приемник—поверхность“; G_s — КНД антенны приемника в канале приема отраженного сигнала; T_s — шумовая температура приемника.

Расчет произведен для случая наблюдения за отраженным сигналом от морской поверхности с удельной ЭПР $\sigma_0 = 0,01$. Таким образом, выражение (2) определяет отношение фон/шум на формируемом радиолокационном изображении.

Первый множитель выражения (2) $\left(\frac{P_t G_t}{4\pi R_{t-s}^2} \right)$ учитывает прохождение сигнала от КА-носителя передатчика до точки отражения на земной поверхности. Эта величина, характеризующая уровень сигнала у поверхности Земли, может быть рассчитана точно, и в данном случае полагается известной (–155...–160 дБ·Вт), так как может быть получена из интерфейсного контрольного документа (ИКД) для систем GPS и ГЛОНАСС [4, 5].

Второй множитель выражения (2) $\left(\frac{S \sigma_0}{4\pi R_{r-s}^2} \right)$ учитывает отражение от поверхности и прохождение сигнала от точки отражения до МКА-носителя приемника при работе в зоне *диффузного отражения* (см. рисунок). Здесь $S = \Delta X \Delta Y$, как упоминалось выше, — площадь облучаемого элемента разрешения на поверхности Земли. Разрешение по суммарной дальности определяется соотношением $\Delta Y = c_0 / \Delta F$ (c_0 — скорость света), а разрешение по азимуту ΔX целесообразно положить равным разрешению по поперечной координате $\Delta X = \Delta Y$. Далее при проведении расчетов удельная ЭПР σ_0 наблюдаемого фона местности выбиралась равной $\approx 10^{-2}$ для водной поверхности и 0,015—0,03 — для льда. Необходимо особо отметить, что в случае работы в области *зеркального отражения* (см. рисунок) второй множитель выражения (2) примет вид

$$\frac{1}{R_{r-s}^2} \cdot \frac{S^2}{\lambda^2}.$$

Третий множитель выражения (2) характеризует эффективную площадь антенны приемника A_r в канале приема отраженного сигнала.

Знаменатель четвертого множителя в выражении (2) $\left(\frac{1}{kT_s \Delta F}\right)$ характеризует мощность шумов, приведенных к входу приемника, в канале приема отраженного сигнала.

Для обеспечения двумерного разрешения предполагается использовать принципы синтезирования апертуры антенны и взаимно корреляционной обработки прямого и отраженного сигналов [2, 3]. Как известно, при синтезировании апертуры в процессе обработки осуществляется когерентное сложение сигналов, отраженных от каждого элемента поверхности за время синтезирования t_c . Интервал синтезирования в рассматриваемом случае рассчитывается исходя из известной ширины диаграммы направленности антенны в канале приема отраженного сигнала $\sim 6,6^\circ$, что соответствует ширине полосы обзора на земной поверхности порядка $\sim 57\,660$ м.

Учитывая скорость движения МКА-носителя приемника на высоте 500 км $\sim 7,6 \cdot 10^3$ м/с, получим оценку протяженности интервала синтезирования $t_c \approx 7,586$ с.

Количество периодов дальномерного кода сигналов стандартной точности СРНС GPS, ГЛОНАСС и Galileo, обработанных на интервале синтезирования, рассчитаем как отношение интервала синтезирования к длительности периода кода $n = t_c / t_k \approx 7586$.

Ширина диаграммы направленности синтезированной апертуры при $t_c = 7,586$ с составляет $\sim 3,3 \cdot 10^{-6}$ рад и при пересчете в линейную меру позволяет определить потенциальную разрешающую способность по продольной координате $\Delta X_{\min} = 1,65$ м, что в рассматриваемом случае является весьма малой величиной.

Поскольку ранее было принято, что $\Delta X = \Delta Y$, возможно разбить всю запись траекторного сигнала на независимые интервалы с последующим дополнительным некогерентным усреднением. Количество таких усреднений определяется выражением $N_X = \Delta X / \Delta X_{\min}$. Использование некогерентного усреднения на этапе синтезирования радиолокационного изображения приведет к улучшению отношения S/N в элементе разрешения в $\sim \sqrt{N_X}$ раз. Наличие дополнительных возможностей по когерентному и некогерентному накоплению должно быть учтено при расчете результирующего отношения S/N , в том числе при объединении на этапе обработки сигналов нескольких КА подсветки.

Поскольку принимается непрерывный шумоподобный сигнал, при его когерентной обработке на интервале синтезирования отношение сигнал/шум на выходе приемника возрастет в B (база) раз. Для рассматриваемого случая $B = \Delta F t_c$.

Одним из основных факторов, ограничивающих чувствительность, является мощность теплового шума на входе приемника:

$$P_N = kT_s \Delta F = kT_0 k_N \cdot 1,1 \Delta F_c, \quad (3)$$

где T_s — шумовая температура приемника, $T_s = T_0 k_N$; $k_N = 1,2—1,5$ — коэффициент шума приемника; T_0 — шумовая температура антенны (~ 290 К) при радиолокационном обзоре поверхности; $\Delta F \approx 1,1 \Delta F_c$; ΔF_c — ширина спектра сигнала.

Таблица 1

Уровень теплового шума на входе приемного устройства

Параметр	ГЛОНАСС, СТ-код ($\Delta F = 0,511$ МГц)	ГЛОНАСС, ВТ-код ($\Delta F = 5,11$ МГц)	GPS, С/А-код ($\Delta F = 1,023$ МГц)	GPS, Р-код ($\Delta F = 10,23$ МГц)
P_N , дБ·Вт	-145,279	-135,279	-142,264	-132,264

Результаты расчета уровня тепловых шумов на входе приемного устройства для рассматриваемого случая приведены в табл. 1.

Рассчитанные уровни используются далее для определения отношения сигнал/шум или фон/шум.

Результаты расчета уровня сигналов и отношения S/N на входе приемника при диффузном и зеркальном отражении для двух значений высоты полета МКА-носителя приемной позиции приведены в табл. 2 и 3. Расчет произведен для случая приема как узкополосных навигационных сигналов L1 ГЛОНАСС СТ и L1 GPS C/A (ширина полосы ± 511 кГц и $\pm 1,023$ МГц соответственно), так и широкополосных навигационных сигналов L1 ГЛОНАСС ВТ и L1 GPS P (ширина полосы $\pm 5,11$ МГц и $\pm 10,23$ МГц соответственно).

Таблица 2

Уровень сигналов и отношение S/N на входе приемника при диффузном отражении ($\sigma_0 = 10^{-2}$)

Параметр	L1 GLONASS СТ ($f=1602,5625$ МГц)		L1 GLONASS ВТ ($f=1602,5625$ МГц)		L1 GPS C/A ($f=1575,42$ МГц)		L1 GPS P ($f=1575,42$ МГц)	
	500	1500	500	1500	500	1500	500	1500
H , км	500	1500	500	1500	500	1500	500	1500
P_s , дБ·Вт	-252,655	-262,197	-272,655	-282,197	-258,536	-268,078	-278,536	-288,078
S/N_s , дБ·Вт	-107,376	-116,918	-137,376	-146,918	-116,271	-125,814	-146,271	-155,814

Примечание: 1. Уровень сигнала у поверхности Земли — 158 дБ.
2. Учтены потери в атмосфере и приемном тракте приемника — 4 и 2 дБ соответственно.
3. f — несущая частота.

Таблица 3

Уровень сигналов и отношение S/N на входе приемника при зеркальном отражении

Параметр	L1 GLONASS СТ ($f=1602,5625$ МГц)		L1 GLONASS ВТ ($f=1602,5625$ МГц)		L1 GPS C/A ($f=1575,42$ МГц)		L1 GPS P ($f=1575,42$ МГц)	
	500	1500	500	1500	500	1500	500	1500
H , км	500	1500	500	1500	500	1500	500	1500
P_s , дБ·Вт	-151,735	-161,277	-191,735	-201,277	-163,793	-173,336	-203,793	-213,336
S/N_s , дБ·Вт	-6,456	-15,998	-56,456	-65,998	-21,529	-31,071	-71,529	-81,071

В табл. 4 приведен расчет уровня сигналов и отношения S/N на входе приемника МКА DMC [7] (высота орбиты $H=700$ км), который входит в состав спутниковой группировки системы мониторинга чрезвычайных ситуаций.

Компания SSTL и британский университет Суррея с помощью МКА DMC смогли принять и использовать отраженные от морской поверхности сигналы спутников GPS и GIOVE-A (Galileo) для получения информации о погодных условиях и высоте волн в открытом море [6, 7].

Таблица 4

Уровень сигналов и отношение S/N на входе приемника

Параметр	L1 GPS C/A ($f=1575,42$ МГц)		L1 GPS P ($f=1575,42$ МГц)	
	диффузное	зеркальное	диффузное	зеркальное
Вид отражения	диффузное	зеркальное	диффузное	зеркальное
P_s , дБ·Вт	-270,458	-175,716	-290,458	-215,716
S/N_s , дБ·Вт	-128,194	-33,451	-158,194	-83,451

Полученные результаты для уровня сигнала на входе приемника необходимо сравнивать со значением -158 дБ·Вт, которое является стандартным для приемника навигационной аппаратуры потребителя (НАП). Необходимо учесть, что предельная чувствительность, которая может быть обеспечена при приеме навигационных сигналов СРНС, в настоящее время составляет -175 — -190 дБ·Вт.

Результаты расчетов и анализа полученных данных показывают, что прием и обработка сигналов СРНС, отраженных от морской поверхности, возможны на борту МКА-носителя с высотой орбиты 500 — 700 км в области зеркального отражения, а также при резонансном отражении от сосредоточенных целей. Прием в области диффузного отражения при указанных условиях весьма проблематичен. С точки зрения обеспечения наилучших энергетических характеристик при наблюдении за фоном местности более предпочтительным является сигнал ГЛОНАСС СТ (ширина полосы ± 511 кГц), при использовании которого пространственное разрешение по суммарной дальности не превысит 600 м. Наилучшее разрешение по суммарной дальности ($\Delta Y \approx 30$ м) будет обеспечено при использовании широкополосных навига-

ционных сигналов (ширина полосы $\pm 10,23\text{МГц}$) GPS (сигнал L5) и Galileo (сигнал E5b и E5a), но при их использовании возможности по наблюдению за фоном местности будут значительно хуже, чем при использовании сигнала ГЛОНАСС СТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ № 2278398. Способ получения радиолокационного изображения земной поверхности при помощи многопозиционной радиолокационной системы с синтезированной апертурой антенны / В. Ф. Фатеев, И. В. Сахно. 06.07.2004.
2. Сахно И. В., Фатеев В. Ф. Применение навигационных КА GPS/ГЛОНАСС в составе многопозиционных РЛС обзора земной поверхности // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т. 47, № 3. С. 27—31.
3. Сахно И. В., Фатеев В. Ф. Разнесенная РСА космического базирования на базе МКА с непрерывным широкополосным зондирующим сигналом // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 2. С. 10—15.
4. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС // Интерфейсный контрольный документ (редакция 5.0). М., 2002.
5. Interface Control Document Global Positioning System (ICD-GPS-200C). 2000. [Электронный ресурс]: <www.gpsword.com>
6. Gleason S., Unwin M., Brennan M., Woodroffe A. Ground Validation of the UK Disaster Monitoring Constellation Satellite GNSS Reflectometry Experiment, Surrey Satellite Technology Ltd. [Электронный ресурс]: <www.sstl.co.uk>
7. Unwin M., Gleason S., Brennan M. The Space GPS Reflectometry Experiment On the UK Disaster Monitoring Constellation Satellite, Surrey Satellite Technology Ltd. [Электронный ресурс]: <www.sstl.co.uk>

Сведения об авторах

- Игорь Викторович Сахно** — д-р техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: vstrecha10@mail.ru
- Евгений Андреевич Ткачев** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: tke33@omnisp.ru
- Денис Александрович Гаврилов** — адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: GDanas@yandex.ru
- Константин Константинович Успенский** — Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: k_uspensky@yandex.ru

Рекомендована Ученым советом
ВКА им. А. Ф. Можайского

Поступила в редакцию
20.10.08 г.