

REVISIT TIME CAPABILITIES OF SAR SATELLITE SYSTEMS ACQUISITION OF TARGETS AND AREAS

ВОЗМОЖНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАДИОЛОКАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ПО ПЕРИОДИЧНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ И РАЙОНОВ

Kirill A. ZANIN,
Dr. Sci. (Tech), Leading Research Scientist,
Lavochkin Association, Moscow, Russia,
rc4a@laspace.ru

Nikolay N. KLIMENKO,
Cand. Sci. (Tech), Lieutenant-General retired,
Deputy General Director, Lavochkin Association, Moscow, Russia,
Klimenko@laspace.ru

ABSTRACT | The analysis of revisit time capabilities of SAR-Lupe, Topaz, COSMO-SkyMed and other SAR satellite systems is performed. Peculiarities of SAR satellite constellation structure are considered.

Keywords: *coherent change detection, SAR, orbital constellation, revisit time*



Кирилл Анатольевич ЗАНИН,
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник АО «НПО Лавочкина», Москва, Россия,
rc4a@laspace.ru



Николай Николаевич КЛИМЕНКО,
кандидат технических наук, заместитель генерального директора АО «НПО Лавочкина», Москва, Россия,
Klimenko@laspace.ru

АННОТАЦИЯ | Проведен анализ периодичности наблюдения космических систем радиолокационного наблюдения SAR-Lupe, Тораз, COSMO-SkyMed и других. Рассмотрены особенности орбитального построения группировок космических систем радиолокационного наблюдения.

Ключевые слова: *когерентное детектирование изменений, радиолокатор с синтезированной апертурой, орбитальная группировка, периодичность наблюдения*

ВВЕДЕНИЕ

Преимуществом космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) является всепогодное наблюдение независимо от условий освещенности. Поэтому за рубежом для достижения высокой периодичности наблюдения применяются многоспутниковые орбитальные группировки SAR-Lupe, Toraz и COSMO-SkyMed с РСА. В настоящее время развиваются и орбитальные группировки малых космических аппаратов (КА) типа ICEYE, Capella X-SAR и др. [1].

Одновременно с РСА развиваются и зарубежные орбитальные группировки с оптико-электронными комплексами [2, 3].

По сравнению с традиционными оптическими изображениями при близком заявленном пространственном разрешении радиолокационное изображение хуже оптического по ряду показателей, что вызывает трудности при обработке [4]. В силу ограниченной мощности зондирующих сигналов и свойств их когерентности добиться визуальной идентичности радиолокационных и оптических изображений не представляется возможным.

Конкурентное преимущество радиолокаторов с синтезированной апертурой, более важное, чем всепогодность, – наличие в радиолокационном изображении информации о фазе и поляризации отраженной от элемента разрешения электромагнитной волны.

Высокая периодичность наблюдения и наличие фазовой информации в радиолокаторах с синтезированной апертурой предоставляет качественно новые возможности наблюдения Земли.

Конкурентным преимуществом РСА, более важным, чем всепогодность, является наличие в радиолокационном изображении информации о фазе и поляризации отраженной от элемента разрешения электромагнитной волны [5, 6].

Сочетание высокой периодичности наблюдения РСА и наличие фазовой информации предоставляет качественно новые возможности наблюдения Земли в интересах различных потребителей.

Одним из новых вариантов обработки является когерентное детектирование изменений на радиолокационных изображениях. Оно основано на автоматизированном выявлении корреляции амплитудно-фазовой радиолокационной информации (рис. 1) [7, 8].

В отечественной литературе эта методика более известна как дифференциальная радиолокационная интерферометрия. Совместная обработка двух комплексных радиолокационных изображений (РЛИ) позволяет решить задачу выявления смещений поверхности или изменения фазы при отражении сантиметрового или миллиметрового масштаба (рис. 2).

Задача когерентного детектирования изменений может быть решена за две, три или четыре съемки объекта через определенный интервал времени. В простейшем случае сравниваются два изображения, полученные в разные моменты времени.

Рис. 1. Когерентное детектирование изменений по серии радиолокационных изображений

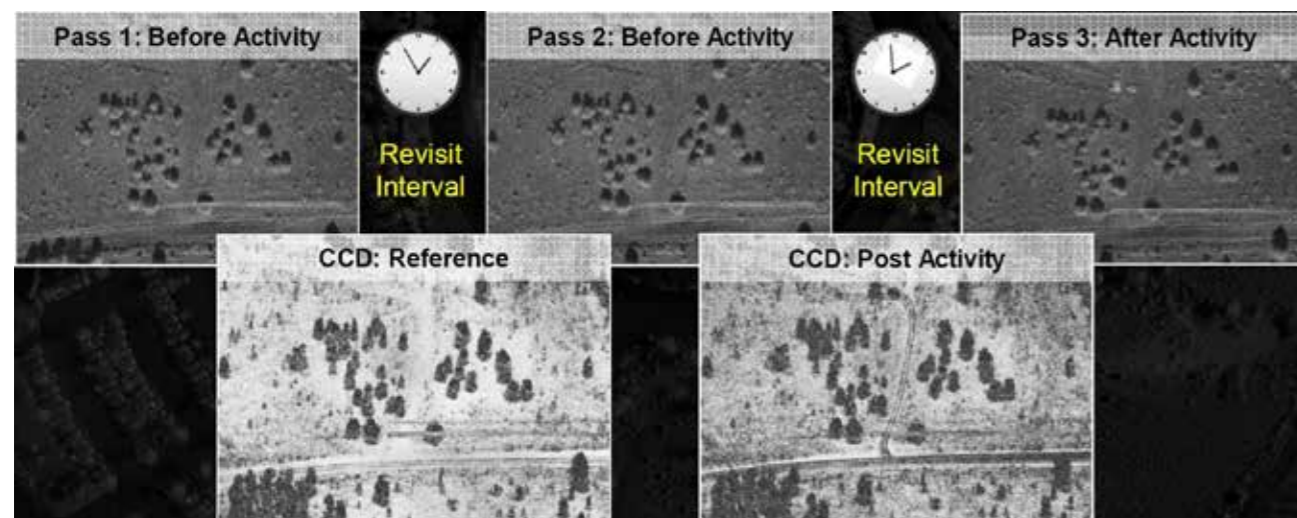
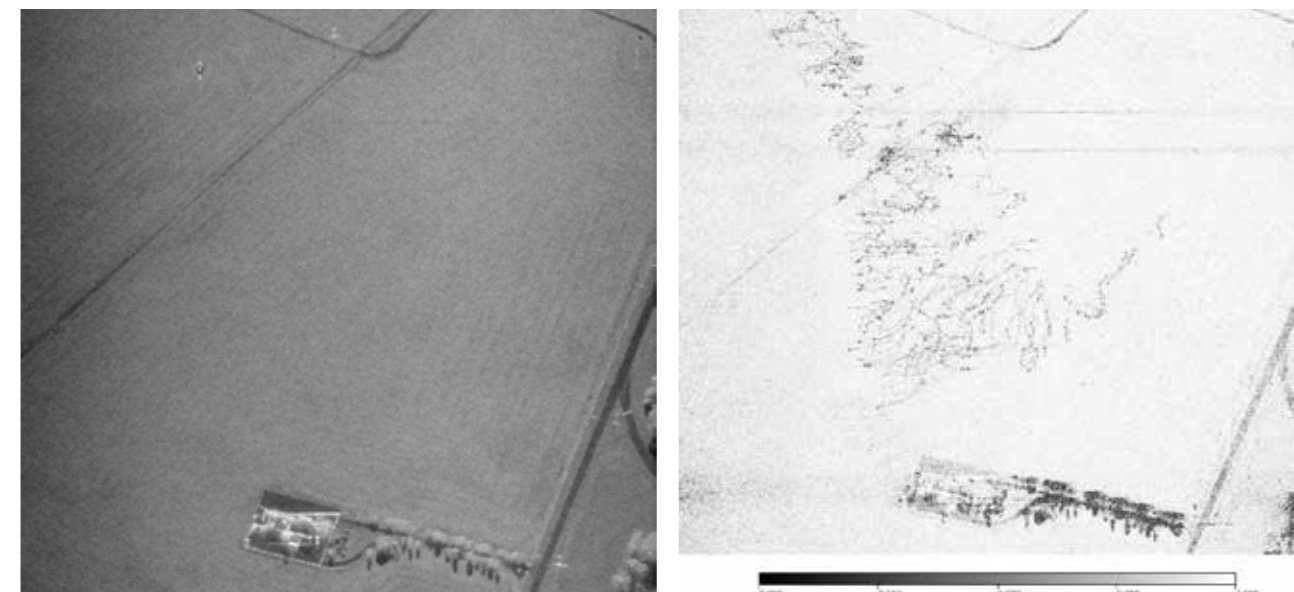


Рис. 2. Пример когерентного детектирования изменений



При трехпроходной интерферометрии два радиолокационных снимка делаются через короткий интервал времени, в течение которого поверхность была стабильна, а третий снимок через интервал, на котором происходили изменения поверхности (рис. 1).

Амплитудное радиолокационное изображение № 1 | Амплитудное радиолокационное изображение № 2

Карта фазовой и амплитудной корреляции изображений № 1 и № 2

Первые два снимка дают опорный фазовый рельеф, а третий снимок относительно первых содержит разность фаз, соответствующую смещению рельефа. В четырехпроходной интерферометрии получают две пары, одну до изменений, другую по-

сле. Произошедшие изменения выявляются вычитанием разностно-фазовой информации о рельефе.

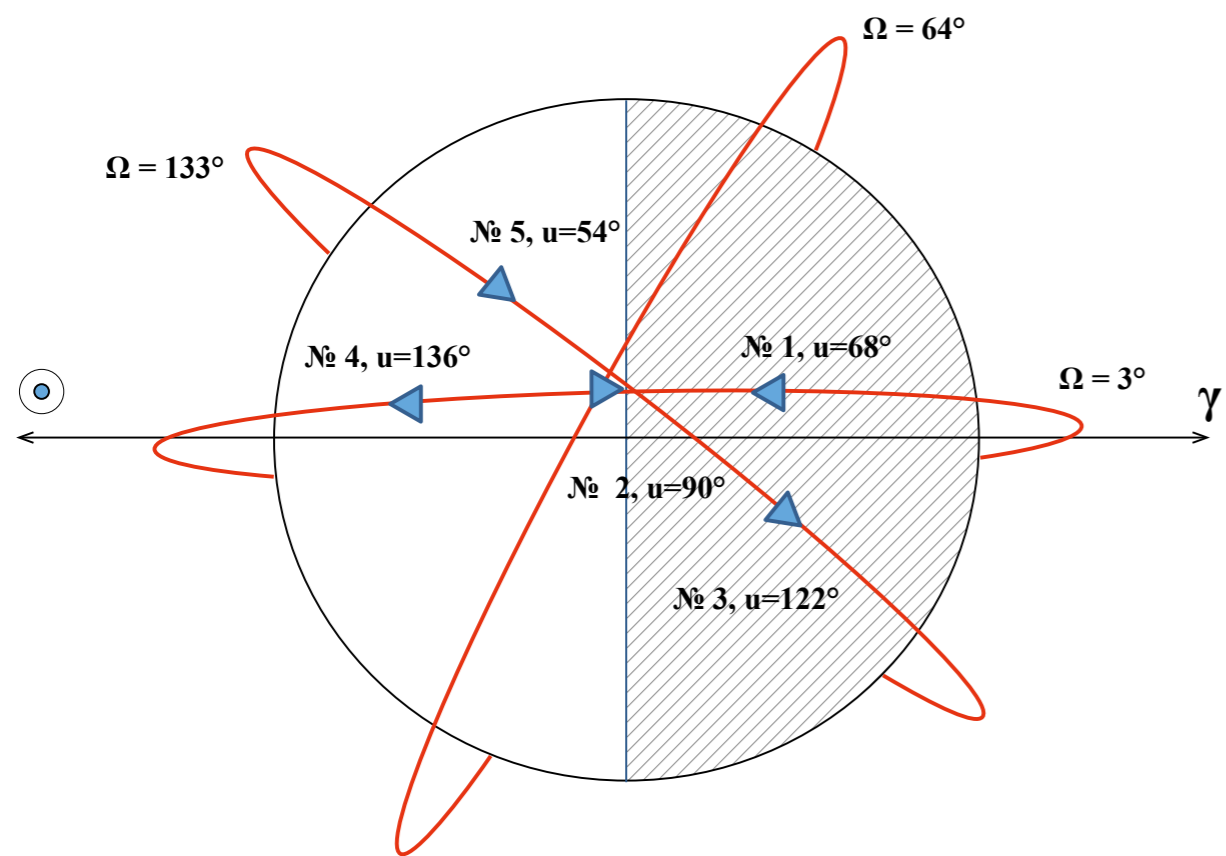
Решение задачи когерентного детектирования изменений требует выбора рационального интервала между съемками. Таким образом, первая пара наблюдений должна проводиться за минимально возможным интервалом времени, чтобы изменения еще не успели произойти. Последующие наблюдения должны иметь интервал времени не менее характерной длительности происходящих изменений, но не более интервала устаревания информации об объекте.

Обеспечение требуемых интервалов возможно при рациональном баллистическом построении космической системы радиолокационного наблюдения. Параметры повторяемости трассы зарубежных космических систем радиолокационного наблюдения (КС РЛН) приводятся в таблице 1.

Таблица 1. Параметры повторяемости трассы зарубежных КС РЛН

Название	SAR-Lupe	TerraSAR	COSMO-SkyMed	RADARSAT Constellation	FIA Radar
Количество КА	5	2	4	3	4
Большая полуось, км	6861	6887	7001	6974	7482
Наклонение, градусы	98,10	97,45	97,89	97,74	122,98
Погрешность поддержания долготы узла, м	—	±250	1000	2000	—
Кратность для нодального периода, Q	15,291	15,200	14,833	14,918	13,500
Количество витков повторения, N	107	76	89	176	27
Повторяемость, суток, D	7	5	6	12	2
Показатель суточного смещения трассы, k	2	1	5	11	1

Рис. 3. Орбитальное построение КС РЛН SAR-Lupe



ОЦЕНКА ПЕРИОДИЧНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ ЗАРУБЕЖНЫМИ КС РЛН

Важной проблемой является обеспечение оперативности наблюдения. Показатель оперативности состоит из нескольких основных значений. Среди них наиболее важные — интервал времени выхода КА на объект от момента постановки задачи и интервал времени доставки информации потребителю.

Указанные показатели обычно ограничиваются периодичностью наблюдения, обусловленной углами обзора РСА и баллистическим построением. Под периодичностью понимается интервал времени между двумя возможными последовательными наблюдениями объекта.

Далее приводится численная оценка потенциальной периодичности различных КС РЛН, полученная методом имитационного моделирования [9, 10].

SAR-LUPE

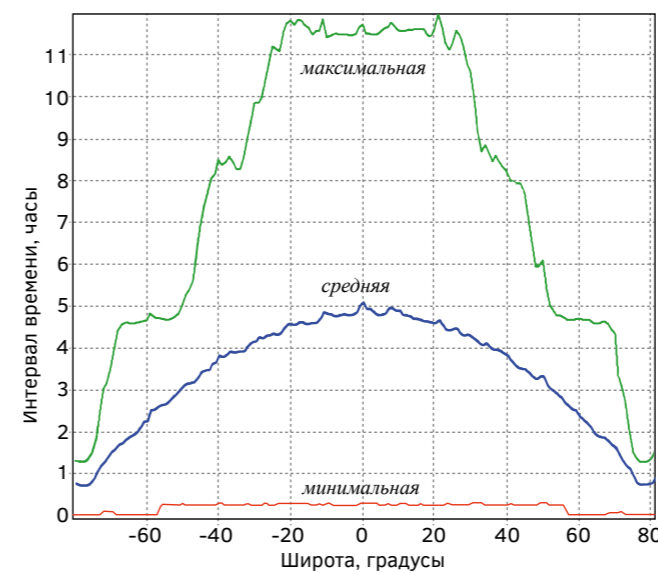
Орбитальная группировка SAR-Lupe состоит из пяти космических аппаратов в трех орбитальных плоскостях на круговой солнечно-синхронной орбите высотой около 485 км. Четыре КА образуют две пары с близкими долготами восходящих узлов в парах. Пятый одиночный КА дополняет их (рис. 3).

Две пары КА № 1, 4 и № 3, 5 разнесены по аргументу широты на 67°.

Оценка потенциальной периодичности наблюдения космической системы SAR-Lupe в диапазоне зенитных углов от 20° до 57° приводится на рис. 4.

Особенностью орбитального построения КС РЛН SAR-Lupe является использование пар КА с разницей аргумента широты 67° в близких орбитальных плоскостях. Такая конфигурация позволяет устранить пропуски в центральной слепой полосе РСА с зенитными углами наблюдения менее 20°.

Рис. 4. Периодичность наблюдения КС РЛН SAR-Lupe



В объектовом режиме съемки для увеличения времени накопления и обеспечения разрешения до 0,5 м осуществляется поворот КА в направлении целевого района (объекта) в диапазоне зенитных углов от 20° до 57°. После завершения съемки КА возвращается в положение постоянной солнечной ориентации для подзарядки аккумуляторной батареи. Система управления КА обеспечивает перенацеливание со скоростью 1 град/сек и точность наведения 0,01 градуса.

При таком способе съемки космической системы из пяти КА SAR-Lupe средняя периодичность наблюдения может достигать один-два часа в северных широтах, и до пяти часов на экваторе.

Создаваемая на смену SAR-Lupe перспективная КС РЛН SARah включает два КА с параболической антенной на базе космической платформы Smart LEO Agile (КА SAR-Lupe на базе космической платформы Smart LEO), система управления которой содержит силовой гироскопический комплекс (гиродины) с программируемым кинетическим моментом, и один КА с активной фазированной антенной решеткой (АФАР) на базе КА TerraSAR-X

NC нового поколения. Новое поколение радиолокаторов с синтезированной апертурой имеет расширенную полосу зондирующего сигнала с потенциальным разрешением по дальности до 0,25 м.

Несмотря на то, что КП Smart LEO Agile намного тяжелее, чем КП Smart LEO, она обеспечивает перенацеливание КА со скоростью 3 град/сек с ускорением 0,2 град/сек². Это обстоятельство позволяет улучшить производительность перспективной КС РЛН SARah.

ТОПАЗ (FIA-RADAR)

Одним из путей достижения высокой производительности и оперативности при ограниченном количестве КА является увеличение высоты орбиты. Высокая орбита позволяет повысить производительность, полосу обзора, периодичность наблюдения и площадь захвата кадра [11].

По такому принципу строится система из пяти КА РЛН FIA-Radar (Торпаз) с высотой полета 1000 км [12].

Основным преимуществом КС РЛН FIA-Radar является строгая повторяемость трассы через двое суток, что обеспечивает высокую оперативность при решении задач интерферометрии и когерентного дешифрирования.

Основные четыре КА располагаются на орбитах с обратным наклоном 123° (табл. 2), пятый КА располагается на солнечно-синхронной орбите с наклоном 106° и дополняет систему для наблюдения широт более 60°.

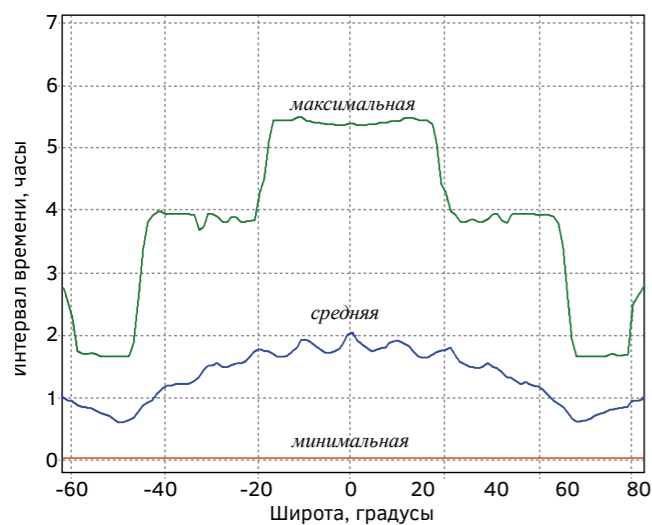
Считается, что выбор наклона 123° необходим для улучшения разрешающей способности РСА. Следует отметить, что орбита с обратным наклоном не дает существенного выигрыша по скоростям относительного движения и доплеровским частотам. КС РЛН FIA-Radar создана на смену КС РЛН Lacrosse. Выбор наклона КС РЛН Lacrosse в 57° обусловлен требованием обеспечения высокой периодичности наблюдения в средних широтах.

Орбита с обратным наклоном 123° обеспечивает лучшие условия освещенности солнечной батареи КА по сравнению с орбитой 57°. Период

Таблица 2. Основные орбитальные параметры КС РЛН FIA-Radar

Номер КА	Большая полуось, м	Долгота восходящего узла, градусы	Наклонение, градусы	Аргумент широты, градусы
1	7 482 152,4	292,8	123,0	261,8
2	7 482 161,5	112,5	123,0	258,2
3	7 482 116,7	22,4	123,0	78,1
4	7 482 158,7	202,7	123,0	78,8
5	7 457 655,2	240,6	106,0	233,9

Рис. 5. Периодичность наблюдения КС РЛН Тораз (FIA-Radar)



прецессии плоскости орбиты относительно плоскости терминатора для наклонения 123° составляет около 95 суток. Для орбиты с наклонением 57° прецессия имеет противоположный знак, плоскость орбиты КА проходит терминатор каждые 46 суток.

Бортовой радиолокационный комплекс FIA-Radar, вероятнее всего, имеет параболическую антенну с диаметром 6–8 метров и функционирует в С-диапазоне (длина волны 5,6 см). Полоса захвата в детальном кадровом режиме существенно превышает низкоорбитальные КА РЛН и составляет от 15 до 20 км.

Оценка потенциальной периодичности наблюдения приводится на рис. 5. Средняя периодичность наблюдения в широтном поясе $\pm 60^\circ$ не превышает двух часов (одного витка). Максимальная периодичность обусловлена в основном наличием центральной слепой зоны РСА для зенитных углов менее 20° и не превышает четырех – пяти с половиной часов.

Таблица 3. Оценка периодичности КС РЛН COSMO-SkyMed

Конфигурация (количество КА в плоскости)	Средняя периодичность, часов	Наихудшая периодичность, часов
1	12 – 34	60
2	6 – 12	36
3	4 – 8	24
4	3 – 4	12

COSMO-SKYMED

Орбитальная группировка КС РЛН COSMO-SkyMed состоит из четырех КА. Она формировалась поэтапно последовательными запусками. Поэтому ее конфигурация имела промежуточные варианты. Все КА располагаются в одной плоскости орбиты с разнесением на 90° . Периодичность (в часах) наблюдения орбитальной группировкой разной конфигурации — номинальная и улучшенная за счет адаптации орбиты для оптимального наблюдения за заданным районом — приведена в таблице 3.

Таким образом, при полной орбитальной группировке из четырех КА средняя периодичность достигает трех-четырех часов. Аналогичную среднюю периодичность имеет и КА SAR-Lupe.

В то же время разнесение КА SAR-Lupe по трем орбитальным плоскостям позволяет обеспечивать максимальную периодичность в полтора-два раза лучше, чем в COSMO-SkyMed (рис. 6). Наихудшая периодичность КС SAR-Lupe составляет пять часов для широты 60° и восемь часов для широты 40° .

Рис. 6. Периодичность наблюдения КС РЛН COSMO-SkyMed

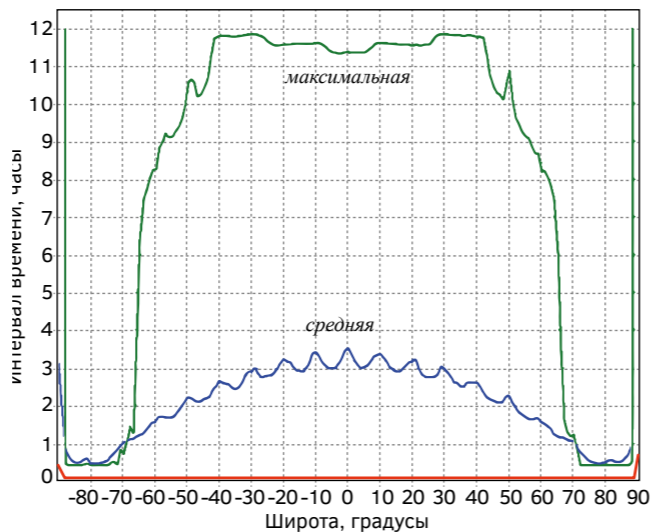
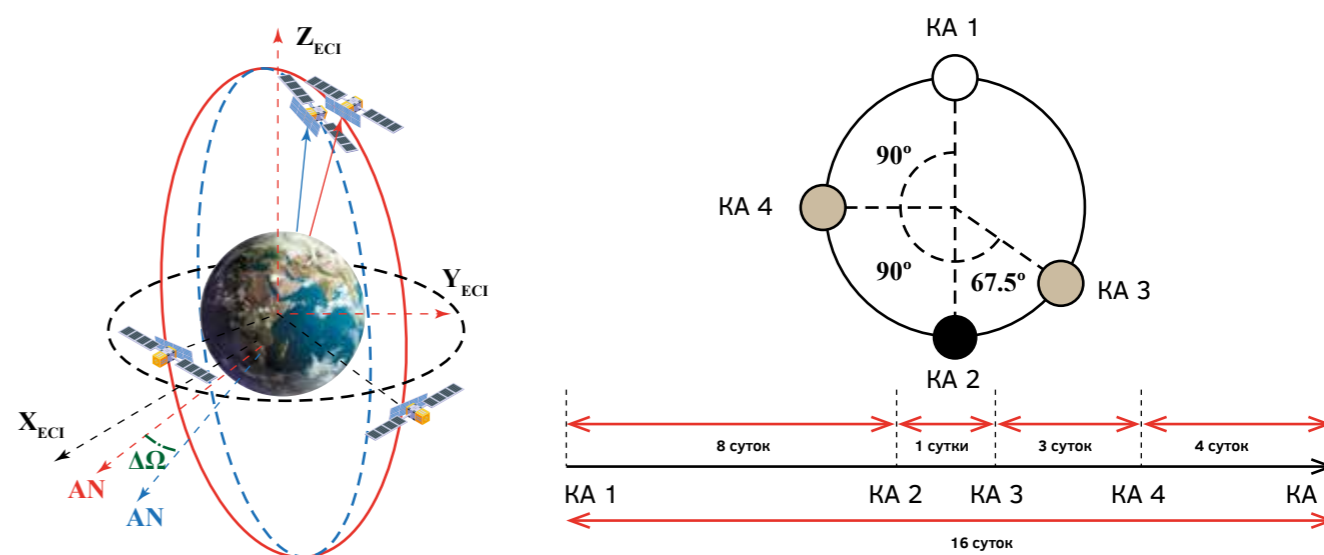


Рис. 7. Конфигурация ОГ КА COSMO-SkyMed в режимах «тандем» (слева) и «квазитандем» (справа)



Для COSMO-SkyMed наихудшая периодичность равна девять и двенадцать часов соответственно. Это обусловлено тем, что разнесение КА в одной орбитальной плоскости на 90° не позволяет разнести трассы КА для более равномерного покрытия. Тем не менее орбитальное построение COSMO-SkyMed имеет свои преимущества.

Размещение КА COSMO-SkyMed в близких плоскостях позволяет осуществлять трансформирование номинальной конфигурации орбитальной группировки в конфигурации для интерферометрической съемки типа «тандем» и «квазитандем» (односуточная интерферометрия).

В режиме «тандем» два КА разводятся в две орбитальные плоскости с небольшим разнесением восходящих узлов на $0,08^\circ$, что обеспечивает примерное совпадение их трасс на земной поверхности. Вместе с тем под воздействием прецессии орбиты трассы будут расходиться. Для обеспечения одинаковых зенитных углов при съемке этими КА осуществляется их фазирование. При этом съемка этими КА разносится по времени на 20 сек.

В режиме «квазитандем» КА разводятся в плоскости орбиты на $67,5^\circ$. При этом обеспечивается «односуточная интерферометрия» с циклом повторения $14+13/16$ витков, то есть КА совершает 237 витков за 16 суток. Остаток для достижения целого числа $3/16$ соответствует углу разноса КА на орбите $67,5^\circ (=3/16 \times 360^\circ)$. Пара КА при таком разнесении в пространстве проходит над заданным районом с интервалом в одни сутки (при высоте орбиты 620 км и наклонении $97,85^\circ$).

Следует отметить, что в перспективном КА COSMO-SkyMed SG приняты меры для дальнейшего наращивания периодичности наблюдения. В частности, реализован режим HRWS (High Resolution Wide Swath), обеспечивающий высокое разрешение при значительном расширении полосы съемки. Технически это реализуется за счет использования АФАР с двумя фазовыми центрами и соответствующими независимыми каналами приема отраженных зондирующих сигналов.

Кроме того, в составе системы управления наряду с маховиками применяются силовые гироскопы (гиродины) с программируемым кинетическим моментом, что обеспечивает возможность динамического перенацеливания КА на несколько объектов на каждом пролете над заданным районом.

RADARSAT CONSTELLATION

Группировка состоит из трех идентичных КА массой 1430 кг. Выведение всех трех КА осуществлено 12 июня 2019 года в одну плоскость на солнечно-синхронную орбиту высотой 600 км при помощи группового запуска ракетой-носителем «Фалькон-9». Средняя периодичность наблюдения составит четыре-восемь часов, предельная периодичность не хуже 24 часов. В задачи КС РЛН RADARSAT Constellation входит в том числе осуществление когерентного дешифрирования с интервалом 24 суток.

Рис. 8. КА ICEYE: ICEYE-X1 (слева), ICEYE-X2, -X4, -X5 (в середине), ICEYE-X3 (Harbinger) (справа)



ICEYE

Первый КА ICEYE-X1 запущен в январе 2018 года. Последующий КА ICEYE-X2 с улучшенными тактико-техническими характеристиками (ТТХ) (с субметровым разрешением) был запущен в декабре 2019 года и стал базовым для КА X4 и X5, запущенных одновременно в июле 2019 года.

КА X3, получивший название Harbinger, предназначен для решения военных задач. Масса КА X3-150 кг, что вдвое превышает массу КА X2. В отличие от традиционной базовой орбиты для КА ICEYE с наклоном 97,56° и 97,77°. КА ICEYE-X3 выведен на орбиту с наклоном 40° с целью повышения периодичности наблюдения районов в средних и южных широтах. Полная орбитальная группировка из 18 КА будет развернута в 2021 году и обеспечит среднюю периодичность наблюдения три часа в глобальном масштабе.

MICROSAR

Норвежская КС РЛН предназначена для высокопериодического наблюдения арктической зоны (рис. 9). Орбитальная группировка в составе восьми КА в двух орбитальных плоскостях обеспечивает периодичность наблюдения в северных широтах один-три часа.

CAPELLA X-SAR

КС РЛН американской компании Capella Space предназначена для решения задач Минобороны и разведсообщества, что требует обеспечения высокой периодичности наблюдения, в том числе и в режиме интерферометрической съемки, результаты которой используются для выявления изменений на театре военных действий (ТВД), а также для получения данных о рельефе местности для полетных заданий крылатых ракет. Первый КА, получивший название Denali с антенной типа «оригами», использовался в отработочных целях. КА № 2 с сетчатой антенной размером 8 м, разворачиваемой на орбите, получил название Sequoia (рис. 10). На 2020 год планировался запуск еще трех КА Capella 3, 4, 5 на орбиту высотой 485 – 525 км с наклоном 90°. Еще один КА Capella-X выведен на орбиту с наклоном 45° в мае 2020 года для обеспечения высокопериодического наблюдения районов Ближнего Востока, Юго-Восточной Азии, Африки, Кореи, Японии и США. КА созданы на базе космической платформы с высокой скоростью перенацеливания. Рабочий участок длится 10 мин. на каждом суточном витке, разрешение РСА на местности — 0,5 м. Длина маршрутной съемки может достигать 4000 км. Для обмена командно-программной информацией в составе КА применяется бортовая аппаратура передачи данных из состава спутниковой системы связи Inmarsat, что обеспечивает связь с наземными пунктами каждые 20 мин.

Таблица 4. Возможности орбитальных группировок КА Capella по периодичности наблюдения

Количество КА в группировке	6	12	24	36
Количество орбитальных плоскостей	2	4	8	12
Средняя периодичность, час.	<4	<2	1	<1
Периодичность в интерферометрическом режиме, час.	24	12	6	4

Рис. 9. КА MicroSAR (слева), периодичность наблюдения морской зоны в Норвежском море

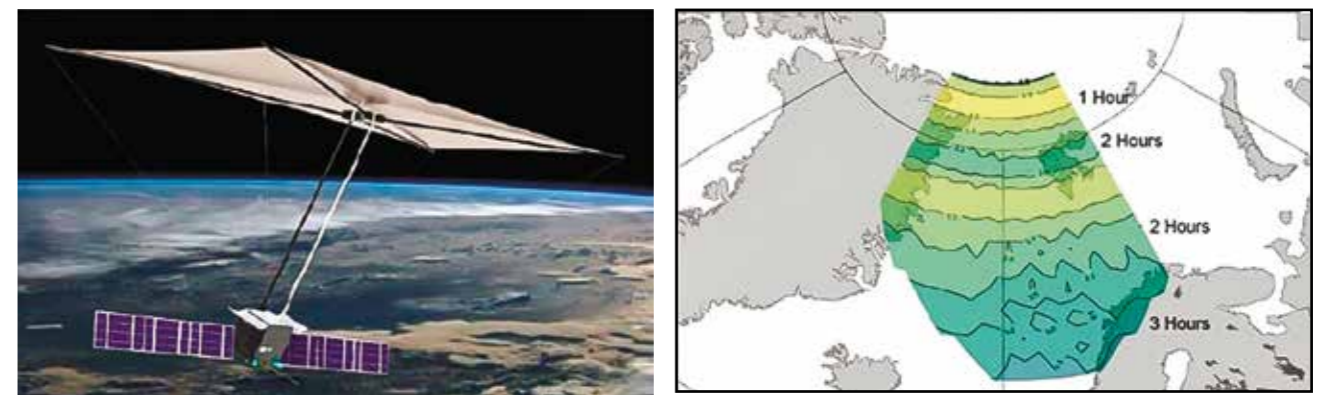


Таблица 5. Возможности орбитальных субгруппировок типа Whitney по периодичности наблюдения

№ серии	Временные интервалы по отношению к первичному событию, час			
0	0	54	120	174
1	12	66	132	186
2	24	78	144	198
9	108	162	228	282
10	120	174	240	294

В 2023 году планируется завершить развертывание орбитальной группировки полного состава из 36 КА под названием Capella 36. Возможности такой орбитальной группировки по периодичности наблюдения с учетом этапности ее формирования приведены в таблице 4.

Частная орбитальная группировка из шести КА в двух орбитальных плоскостях, получившая название Whitney, обеспечивает проведение

интерферометрических измерений с формированием временной базы в режиме great-pass (great-track). При этом баллистическое построение КА в орбитальной группировке полного состава обеспечивает возможность точного прогнозирования временных интервалов между последовательными состояниями орбитальной субгруппировки типа Whitney, при которых выполняются необходимые условия для проведе-

Рис. 10. КА Capella: Capella 1 (Denali) (слева) и Capella 2 (Sequoia) (справа)



ния интерферометрических измерений. Если принять за точку отсчета первый случай выполнения этих условий, то последующие возможности для осуществления интерферометрических измерений наступают через прогнозируемые интервалы времени, которые можно представить в виде формализованного временного ряда: о (первая реализация), 54 час., 120 час., 174 час. Существуют и другие возможные временные ряды интервалов, отстоящих от начальной условной точки отсчета, через которые реализуются условия для интерферометрической съемки одного и того же района, но под различными углами съемки. Каждый новый ряд этих интервалов формируется путем увеличения значений интервалов в «нулевой» исходной серии на 12 часов. Указанные серии (ряды) временных интервалов, определяемых по отношению к условной точке отсчета, приведены в *таблице 5*.

Заметим, что эти серии временных интервалов повторяются через 120 часов или пять суток, то есть после 10-й серии имеет место циклическое повторение значений, приведенных в *таблице 5*. При этом каждая серия временных интервалов из табл. 5 пригодна для наблюдения процессов на земной поверхности, изменяющихся в течение пяти и более суток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приводится оценка оперативности наблюдения зарубежных КС РЛН. Приведены общие сведения о параметрах орбитального построения SAR-Lupe, COSMO-SkyMed, Topaz и др.

Анализ периодичности наблюдения показал, что для большинства современных КС РЛН возможность осуществления повторной съемки в среднем через три-четыре часа. Предельная периодичность не превышает восемь-двенадцать часов. Повторение циклов наблюдения позволяет осуществлять когерентное детектирование с интервалами от одних суток.

Наиболее впечатляющие характеристики периодичности один-два часа достигнуты в высокоорбитальной группировке FIA-Radar (Topaz). Кратность повторения трассы двое суток позволяет проводить оперативное когерентное детектирование.

Близкие к FIA-Radar характеристики по оперативности наблюдения достигаются орбитальными группировками малых КА типа ICEYE, Capella X-SAR и др. Однако РСА малых КА существенно уступают по радиометрическому качеству информации в силу ограниченной мощности системы электропитания.

Подобные подходы к выбору параметров орбиты могут быть применены при проектировании перспективных космических систем радиолокационного наблюдения, состоящих из больших и малых КА.



Литература

1. Клименко Н.Н., Занин К.А. Новое поколение космических аппаратов для наблюдения за морской обстановкой // Воздушно-космическая сфера. 2019. № 2. С. 28 – 38.
2. Клименко Н.Н., Занин К.А., Москатиньев И.В. Современные космические аппараты дистанционного зондирования Земли. Часть 1. Базовые проектные решения и пути модернизации космических аппаратов дистанционного зондирования Земли опико-электронного наблюдения // Воздушно-космическая сфера. 2020. № 2. С. 95 – 101. DOI: 10.30981/2587-7992-2020-103-2-106-116
3. Клименко Н.Н., Занин К.А., Москатиньев И.В. Современные космические аппараты дистанционного зондирования Земли. Часть 2. Особенности применения коммерческих космических аппаратов опико-электронного наблюдения для решения задач в интересах государственных и военных потребителей // Воздушно-космическая сфера. 2020. № 3. С. 89 – 99. DOI: 10.30981/2587-7992-2020-104-3-88-99
4. Занин К.А. Обобщенный метод определения разрешающей способности радиолокатора с синтезированием апертуры // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2020. № 1. С. 4 – 12.
5. Занин К.А. Анализ качества координатной привязки изображений космического радиолокатора с синтезированной апертурой // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2013. № 4. С. 34 – 39.
6. Занин К.А. Требования к навигационному обеспечению радиолокатора с синтезированной апертурой в режиме бистатической интерферометрической съемки // Космонавтика и ракетостроение. 2014. № 1. С. 164 – 169.
7. Branch, Karen Coperich (2016). Overview of Synthetic Aperture Radar at Sandia National Laboratories [Электронный ресурс] // URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1398368> (Дата обращения: 09.11.2020).
8. Preiss M., Stacy N. (2006). Coherent change detection: Theoretical description and experimental result. Edinburgh (Australia):Defence Science and Technology Organisation, 2006 [Электронный ресурс] // URL: https://archive.org/details/DTIC_ADA458753/mode/2up (Дата обращения: 09.11.2020).
9. Занин К.А., Клименко Н.Н. Выбор параметров орбитального построения космических систем радиолокационного наблю-

дения // Космонавтика и ракетостроение. 2019. № 2. С. 30 – 41.

10. Клименко Н.Н., Занин К.А. Методика определения величины интерферометрической базы космической радиолокационной системы наблюдения для задач когерентного дешифрирования // Космонавтика и ракетостроение. 2020. № 2. С. 22 – 34.

11. Занин К.А. Москатиньев И.В. Рациональное баллистическое построение космической системы радиолокационного наблюдения // Полет. 2018. № 9. С. 23 – 29.

12. Гринкевич В.И., Лазаренко В.Е. Оценка возможностей дистанционного зондирования Земли РСА космического базирования на примере спутника FIA RADAR-1 // Доклады БГУИР. 2012. № 3 (65).

References

1. Klimentko N.N., Zanin K.A. Novoe pokolenie kosmicheskikh apparatov dlya nablyudeniya za morskoy obstanovkoy. *Vozdushno-kosmicheskaya sfera*, 2019, no. 2, pp. 28 – 38.
2. Klimentko N.N., Zanin K.A., Moskatin'ev I.V. Sovremennye kosmicheskie apparaty distantsionnogo zondirovaniya Zemli. Chast' 1. Bazovye proektnye resheniya i puti modernizatsii kosmicheskikh apparatov distantsionnogo zondirovaniya Zemli optiko-elektronnogo nablyudeniya. *Vozdushno-kosmicheskaya sfera*, 2020, no. 2, pp. 95 – 101. DOI: 10.30981/2587-7992-2020-103-2-106-116
3. Klimentko N.N., Zanin K.A., Moskatin'ev I.V. Sovremennye kosmicheskie apparaty distantsionnogo zondirovaniya Zemli. Chast' 2. Osobennosti primeneniya kommercheskikh kosmicheskikh apparatov optiko-elektronnogo nablyudeniya dlya resheniya zadach v interesakh gosudarstvennykh i voennykh potrebiteley. *Vozdushno-kosmicheskaya sfera*, 2020, no. 3, pp. 89 – 99. DOI: 10.30981/2587-7992-2020-104-3-88-99
4. Zanin K.A. Obobshchenny metod opredeleniya razreshayushchey sposobnosti radiolokatora s sintezirovaniem apertury. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2020, no. 1, pp. 4 – 12.
5. Zanin K.A. Analiz kachestva koordinatnoy privyazki izobrazheniy kosmicheskogo radiolokatora s sintezirovannoy aperturoy. *Vestnik FGUP NPO im. S.A. Lavochkina*, 2013, no. 4, pp. 34 – 39.
6. Zanin K.A. Trebovaniya k navigatsionnomu obespecheniyu radiolokatora s

sintezirovannoy aperturoy v rezhime bistaticheskoy interferometricheskoy s'emki. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2014, no. 1, pp. 164 – 169.

7. Branch, Karen Coperich (2016). Overview of Synthetic Aperture Radar at Sandia National Laboratories. Available at: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1398368> (Retrieval date: 09.11.2020).

8. Preiss M., Stacy N. (2006). Coherent change detection: Theoretical description and experimental result. Edinburgh (Australia):Defence Science and Technology Organisation, 2006. Available at: https://archive.org/details/DTIC_ADA458753/mode/2up (Retrieval date: 09.11.2020).

9. Zanin K.A., Klimentko N.N. Vybora parametrov orbital'nogo postroeniya kosmicheskikh sistem radiolokatsionnogo nablyudeniya. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2019, no. 2, pp. 30 – 41.

10. Klimentko N.N., Zanin K.A. Metodika opredeleniya velichiny interferometricheskoy bazy kosmicheskoy radiolokatsionnoy sistemy nablyudeniya dlya zadach kogerentnogo deshifirovaniya. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2020, no. 2, pp. 22 – 34.

11. Zanin K.A. Moskatin'ev I.V. Ratsional'noe ballisticheskoe postroenie kosmicheskoy sistemy radiolokatsionnogo nablyudeniya. *Pollet*, 2018, no. 9, pp. 23 – 29.

12. Grinkevich V.I., Lazarenko V.E. Otsenka vozmozhnostey distantsionnogo zondirovaniya Zemli RSA kosmicheskogo bazirovaniya na primere sputnika FIA RADAR-1 // *Doklady BGUIR*, 2012, no. 3 (65).

© Занин К.А., Клименко Н.Н., 2020

История статьи:
Поступила в редакцию: 24.10.2020
Принята к публикации: 09.11.2020

Модератор: Гесс Л.А.
Конфликт интересов: отсутствует

Для цитирования:
Занин К.А., Клименко Н.Н. Возможности космических систем радиолокационного наблюдения по периодичности наблюдения объектов и районов // *Воздушно-космическая сфера*. 2020. № 4. С. 82-93.