

# Информационный анализ и синтез космических систем дистанционного зондирования Земли

А.М. Полетаев

*ЗАО «Институт телекоммуникаций»  
194100, Санкт-Петербург, Кантемировская ул., 5  
E-mail: [poletam@mail.ru](mailto:poletam@mail.ru)*

Рассматриваются структурно-параметрические и информационные методы анализа и синтеза космических систем дистанционного зондирования Земли. Особое внимание уделено космическим системам на основе радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны как наиболее информативным средствам дистанционного зондирования, лишенным недостатков наблюдения в оптическом диапазоне. Показано, что измерение параметров отраженного или излучаемого электромагнитного поля, имеющих частотную, угловую, поляризационную и временную зависимость, носит дискретный характер, зависящий от технических и геометрических характеристик обзора. Сделан вывод о том, что совокупность баллистических параметров, угловой ориентации поля зрения прибора дистанционного зондирования и технических показателей сигнала определяет свойства метрического пространства измеряемой величины, в котором следует производить поиск оптимальных решений при проектировании космических систем дистанционного зондирования Земли.

При проектировании космических систем (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) как сложных технических систем с территориально-распределенными элементами и пространственно-временной обработкой сигнала в общем случае используются различные принципы структурно-параметрического характера, ориентированные главным образом на оптимизацию структуры орбитального и наземного сегментов КС и тактико-технических показателей приборов ДЗЗ. Общепринятым методом оценивания эффективности сложных технических систем является представление в форме свертки векторных показателей результативности, оперативности и ресурсоемкости [1]. Для КС ДЗЗ результативность традиционно представляется информативностью, определяемой, как правило, разрешающей способностью прибора ДЗЗ по измеряемому параметру. Оперативность и ресурсоемкость соответственно определяются баллистической структурой, составом орбитальной группировки космических аппаратов (КА) ДЗЗ, КА-ретрансляторов, наземных пунктов управления (НПУ), приемных пунктов (НПП), часто совмещаемых с пунктами обработки (НПО), с определенной конфигурацией их зоны радиовидимости (ЗРВ). Реализация потенциальных возможностей КС ДЗЗ по глобальности наблюдения ПЗ кроме геометрических факторов в значительной степени определяется совокупностью показателей КА, описывающих его энергетические, топливные и информационные ресурсы. Планирование применения КА ДЗЗ относится к классу оптимизационных задач, в которых целевая функция КА ДЗЗ обычно определяется при заданных параметрах орбиты, технических характеристик системы регистрации и передачи данных при ограничении на ресурсы. Развитие наземного и орбитального сегмента с соответствующей целевой аппаратурой составляют технический аспект повышения информативности КС ДЗЗ. Однако расширение состава и типов потребителей данных ДЗЗ (ДДЗЗ), увеличение номенклатуры тематических задач ДЗЗ и нарастающая тенденция комплексирования ОЭ и РЛ средств требуют разработки более обобщенных принципов анализа и синтеза КС ДЗЗ, основанных на учете информационных связей и показателей элементов КС ДЗЗ.

Исторический опыт разработки и применения космических радиолокационных (РЛ) систем (КРЛС) наблюдения поверхности Земли (ПЗ) на основе радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (КРСА) в целях информационного обеспечения потребителей показывает исключительную перспективность их использования для решения научно-практических и военных задач, прежде всего, вследствие уникальных свойств радиодиапазона. Более широкий по сравнению с оптико-электронными (ОЭ) системами (ОЭС) состав измеряемых параметров и возможность когерентной обработки РЛ сигнала для достижения высокой пространственной разрешающей

способности обуславливают высокие информативные свойства радиолокационных изображений (РЛИ) ПЗ, включая интерферометрические приложения. Эффективная площадь рассеивания (ЭПР) объектов ПЗ (ОПЗ) как аналог коэффициента спектральной яркости для ОЭС в качестве признака для дешифрирования изображений ПЗ поэтому имеет высокую мерность измерения. Совместно с электрофизическими свойствами ОПЗ его ЭПР определяется длиной волны, поляризацией, углами падения и отражения РЛ сигнала, поэтому можно говорить о «многозональном» или «многоканальном» характере РЛ наблюдения (РЛН), лишенном недостатков оптического диапазона [2].

В отличие от ОЭ КС ДЗЗ, в которых ОЭ изображения (ОЭИ) формируются в процессе непосредственного наблюдения участков ПЗ, в КРСА для формирования РЛИ выделяют специальный этап когерентной пространственно-временной обработки отраженного сигнала – этап синтеза РЛИ, выполняемый, как правило, в элементах наземного сегмента КРЛС из-за необходимости привлечения априорной и апостериорной информации. Поэтому в типовой структуре КРЛС, включающей орбитальный и наземный сегменты с подсистемой управления КА, орбитальной группировкой КА с КРСА, подсистемой распределения РЛ ДДЗЗ, особую роль играет подсистема регистрации, передачи и обработки РЛ ДДЗЗ. Она отвечает за регистрацию на борту КА первичных РЛ данных (РЛД) - радиоголограмм (РГГ) - и дальнейшую их обработку и/или передачу совместно с сопутствующей служебной информацией в подсистему обработки. Передача РГГ от КРСА с реализацией реального масштаба времени (РМВ) (в ЗРВ НПП и/или КА-Р непосредственно при РЛ наблюдении) или с существенными временными задержками (при воспроизведении РГГ из бортового запоминающего устройства (БЗУ) при влете КРСА в ЗРВ НПП и/или КА-Р). Поэтому обеспечение заданных показателей оперативности КРЛС сводится не только к обеспечению требуемой периодичности РЛН заданных районов ПЗ путем формирования баллистической структуры и увеличения численного состава КРСА, но и обеспечению разветвленной сети НПП и КА-Р с определенной конфигурацией их ЗРВ. Дорогостоящие системы КА-Р с высокоскоростными радио- или оптическими каналами со скоростью передачи ДДЗЗ до 50-200 Мбит/с имеются в настоящее время у США, Японии и Европы, в которых в соответствии с международными соглашениями КА-Р размещаются на геостационарных орбитах в определенных точках (табл.1).

Таблица 1. Структура орбитального и наземного сегмента зарубежных КРЛС

Принадлежность КРЛС	Количество КРСА	Количество НПП	Количество НПУ	Количество НПО	Наличие КА-Р
США (NIMA/NGA)	4 («Lacrosse-2,-3,-4,-5»)	? (мобильные типа EagleVision)	?	?	«TDRS» (9 КА), «SDS» (5 КА)
Канада (MDA)	2 («Radarsat-1,-2»)	25 (возможны мобильные)	2	2	«Anik» (5 КА для передачи РЛИ)
Европа (ESA)	2 («ERS-2», «Envisat»)	30 (возможны мобильные)	4	12	«Artemis» (1 КА)
Япония (JAXA)	3 («ALOS», «MIGS-1R, -3B»)	18 (возможны мобильные)	2	2	"DRTS" (1 КА)
Китай (Минобороны)	3 («Yaogan-1, -2,-3»)	3 (возможны мобильные)	?	?	«Zhongxing» (2 КА передачи РЛИ)

Для минимизации экономических затрат государства и коммерческие компании-операторы КРЛС формируют наземную сеть НПП, часто совмещаемых с пунктами обработки РЛД и позволяющих эффективно обслуживать большое количество потребителей, попадающих в зону РЛН (ЗРЛН) НПП. Общая потенциальная ЗРЛН ПЗ как максимально возможная площадь территории, доступная для РЛН при различных ориентациях трасс КРСА в ЗРВ НПП, включает совокупность площадей ЗРЛН НПП, получаемых для множества НПП с географическими координатами на рассматриваемой площади ПЗ при их возможном взаимном наложении. Поэтому размер ЗРЛН НПП определяется географическими координатами и техническими параметрами НПП (минимальный угол места антенны), параметрами орбиты КА (высота, наклонение) и техническими характери-

стиками КРСА (диапазон углов крена антенны, сторона обзора) [3]. Для НПП формируется до четырех ЗРЛН для соответствующей ветви витка орбиты (нисходящая, восходящая) и стороны обзора от трассы КРСА (правая, левая). Размер ЗРЛН уменьшается пропорционально интервалу времени включения и выключения передатчика КРСА после влета и до вылета из ЗРВ НПП, поэтому увеличение суммарной ЗРЛН по ПЗ одновременно с увеличением оперативности происходит путем увеличения числа НПП, включая мобильные варианты [4]. Например, в КРЛС Radarsat-1 наземный сегмент включает 25 стационарных НПП, в том числе на территории России, позволяющей наблюдать в РМВ практически всю сушу ПЗ. В Европейском космическом агентстве в КРЛС на основе КА Envisat на солнечно-синхронной орбите (ССО) и с БЗУ большой емкости для КРСА ASAR задержка в доставке РЛ ДДЗЗ составляет не более периода орбиты, т. К. один из четырех НПП расположен на архипелаге Шпицберген и позволяет производить прием РЛ ДЗЗ на каждом витке орбиты.

Технология обеспечения заданной периодичности/кратности и глобальности обзора ПЗ весьма подробно отработана при создании баллистических структур низкоорбитальных систем связи (Globastar, Iridium, Orbcost) и навигационных систем (ГЛОНАСС, GPS, Galileo), однако создание и особенно управление значительным количеством КА ДЗЗ наталкивается на серьезные трудности как экономического, так и системного характера. Этим, в частности, определяются трудности разработки и реализации перспективной КРЛС США Space Based Radar/Discoverer-II, предусматривающей размещение на орбите 24 КРСА.

Степень глобальности РЛН ПЗ как отношение площади потенциального покрытия к общей площади ПЗ определяется высотой и наклоном орбиты КРСА совместно с диапазоном углов крена ДНА и стороной обзора. Максимальное значение угла крена ДНА определяется условиями промаха ДНА из-за сферичности ПЗ, обеспечения заданного соотношения сигнал/шум в РЛ канале и допустимым проявлением эффектов радиотеней РЛИ. Минимальное значение угла крена ДНА определяется допустимым ограничением разрешающей способности по дальности (шириной спектра с допустимыми для когерентной обработки фазовыми искажениями, вносимыми ионосферой), увеличением зеркального отражения фона и увеличением проявления эффекта наложения РЛИ. Степень глобальности носит экстремальный характер для полярных орбит и двусторонним обзором КРСА.

Двусторонний обзор может быть реализован при наличии двух антенных систем (АС) (например, КРСА «Экор-А» на КА «Алмаз-1», некогерентный радиолокатор бокового обзора на КА серии «Океан-О»), однако из-за дороговизны крупногабаритных АС и недостаточной мощности системы энергоснабжения КА для обеспечения продолжительной работы на витке обычно применяют одну АС с перестраиваемой стороной обзора путем разворота корпуса КА (например, КРСА Radarsat-1, SAR-Lupe) [4]. Изменение ориентации ДНА по крену осуществляется либо механическим способом - поворотом АС или корпуса КА, либо электронным сканированием для активной фазированной антенной решетки (АФАР) (табл.2). Время переориентации и стабилизации узкой ДНА КРСА при массе КА до нескольких тонн может достигать нескольких минут, при этом одновременно расходуется значительная часть рабочего топлива (или затрачивается время на подготовку иных способов переориентации) и уменьшается время на витке орбиты, возможное для проведения РЛН. Поэтому для минимизации расходования ресурса и повышение срока функционирования КРСА в большинстве КРСА используются АФАР с возможностью программно-алгоритмической реализации нескольких режимов РЛН и их быстрой смены в течении долей-единиц секунд. Типовые режимы РЛН различаются по охватываемой полосе наблюдения, разрешающей способности по координатам (ширине спектра излучаемого сигнала) и скорости поступления данных, зависящей от числа каналов по частоте зондирующего сигнала, поляризации и позиции приемника. Наиболее широкую полосу наблюдения (максимальный диапазон углов крена) обеспечивает когерентный режим ScanSAR с преодолением противоречия между разрешающей способностью и шириной полосы наблюдения по дальности, характерного для импульсных радиолокаторов. Таким образом, фундаментальным отличием КРСА с АФАР от ОЭ аппаратуры ДЗЗ является малая «инерционность» при перенацеливании ДНА (мгновенного поля зрения) и

многорежимность с реализацией переменной разрешающей способности, что не позволяет использовать известные процедуры выбора оптимальных параметров ОЭ КС ДЗЗ.

Таблица 2. Баллистические и тактико-технические характеристики существующих и перспективных КРЛС

КРСА	<i>Lacrosse</i> -2,-4/ -3,-5	<i>Discoverer</i> II /SBR	<i>Yaogan 1-3</i> (RSS 1-3)	<i>MIGS-1R</i> <i>MIGS-3E</i>	<i>ALOS-1</i>	<i>ERS-2 /</i> <i>ENVISAT</i>	<i>Radarsat-</i> <i>1/-2</i>	<i>SAR-Lupe</i>	<i>TerraSAR-X</i> <i>TanDEM-X</i>
Страна	США	США	Китай	Япония	Япония	Европа	Канада	Германия	Германия
Запуск	8.03.1991, 17.08.2000 24.10.1997 30.04.2005	2009-2011	27.04.2006 25.05.2007 11.11.2007	28.03.2003 24.02.2007	24.01.2006	21.04.1995/ 1.03.2002	4.11.1995/ 14.12.2007	19.12.2006 2.07.2007 1.11.2007	15.06.2007
Состав группировки	2-4	24	3	2	1	1-2	2-3	5	2
Наклонение, град	68 / 57	53	97.8	97.3	98.21	98.54/ 98.55	98.58	98.15	97.44
Долгота восходящего узла, град /число плоскостей	136, 274/ 175, 288	8 плоскостей орбиты по 3 К в каждой	292	?	1.82	1.59/ 193.96	293.88	0 (2 КА), 64 (1 КА) 129 (2 КА)	?
Аргумент перигея, град	261, 295/ 159, 67		80.1	?	94.66	92.6/93.38	86.22		?
Главная аномалия, град	99, 65/ 201, 293	0, 120, 240	280	?	265.47	267.5/299.6	356.01	1-0; 2-69; 3-34.5; 4-0; 5-69	?
Период, мин	98.2	?	97	94.4	98.66	98.66/100.5	100.7	?	?
Средняя высота, км	675	770	626	489	695	783/783	791	500	520
Время пролета, час			нисх.6.00	нисх.10.30	нисх.11.30	нисх.11.00 нисх.10.30	нисх.6.00	?	восх.18.00
Изомаршрутность трассы, сутки	1	?	?	?	46	3, 35, 176/ 35	24	?	12-22
Периодичность обзора	~90 мин – 7.5 часа	~15 мин	?	?	2 сут	15-20 сут/ 1-7 сут	1-5 сут	~50 мин – 4 часа	4-11 сут
Тип и размер антенны, м	АФАР или параболоид	АФАР 8x5	АФАР ?	АФАР 9x1.5	АФАР 8.9x3.1	ФАР 10x1/10x1 3	АФАР 15x1.5	Параболоид 3	АФАР 4.8x0.7
Сторона обзора	обе?	обе	правая	правая	правая	правая	правая и левая	правая и левая	правая
Угол крена ДНА, град	15-55?	20-60			7-52	21/15-40	10-57	?	?
Длина волны (диапазон), см	3, 23.5, 70 (9.5-10.5 ?)	3	X- или L- диапазон	23.5 ?	23.5	5.6	5.6	3	3
Поляризация	вв, вг, гв, гг	вв, вг, гв, гг	вв, вг, гв, гг	вв, вг, гв, гг	вв, вг, гв, гг	вв/ вв, вг, гв, гг	гг/ гг, гв, вв, вг	вв, вг, гв, гг	вв, вг, гв, гг
Разрешение, м	1-20	0.3-3	5, 20	1-3	7-100	25-30/ 30-900	8-150	0.7-3	1-16
Полоса наблюдения/ обзора, км	10/1000	50-170/640	?	?	42-350/680	100/ 100-500/500	50-500/500	5-60/~500	10/600

Оптимизация баллистической структуры КРЛС с целью увеличения оперативности РЛН производится несколькими способами или их сочетанием: а) согласованным выбором параметров орбит (наклонения, высоты, долготы восходящего узла, истинной аномалии) и увеличением количества КРСА на различающихся орбитах; б) изменением технических параметров КРСА - увели-

чение полосы обзора при заданной высоте орбиты, применение двухстороннего обзора, переориентация АФАР на смежных витках орбиты при достаточном межвитковом расстоянии.

Применение ССО (с зависимостью высоты орбиты от наклона) в подавляющем числе КА ДЗЗ обусловлено рядом обстоятельств [5]:

- обеспечение практически постоянного местного времени пролета над участками ПЗ (угла места Солнца, изменяющегося только из-за сезона) для ОЭ ДЗЗ создает оптимальные условия съемки;

- удобство последующей каталогизации данных съемки – как правило, трассы подобных орбит обладают свойством изомаршрутности (повторяемости через определенное количество суток или периодов), поэтому с учетом ширины полосы наблюдения/обзора создается структура условных кадров, географически привязанных к участкам ПЗ вдоль трассы, и по мере выполнения съемки происходит накопление данных ДЗЗ по каждому участку;

- «регулярность» освещенности КА ДЗЗ (смены теневого и освещенного участка орбиты) позволяет оптимизировать процесс чередования применения различных приборов ДЗЗ (днем – ОЭ, ночью – РЛ) и циклы перезарядки бортовых АБ;

- выбор долготы восходящего узла орбиты при заданном географическом расположении НПП позволяет максимизировать длительность ЗРВ для управления КА, траекторного контроля и передачи данных ДЗЗ.

Несмотря на отсутствие необходимости комплексирования КРЛС с метеорологическими КС и обеспечения времени съемки с требуемым уровнем освещенности, характерного для ОЭ КС ДЗЗ, КРСА также размещаются на ССО вследствие указанных причин. Примером размещения КРСА на ССО является баллистическая структура из одной орбитальной плоскости, в которой находятся 3 КРСА: ENVISAT, затем следует ALOS через 5-10 минут, затем ERS-2 через 20-25 минут. Подобная баллистическая структура реализована с целью пространственно-временного совмещения РЛИ и ОЭИ в французской ОЭ КС ДЗЗ SPOT: КА SPOT-5 (синхронизирован по углу истинной аномалии с ENVISAT), SPOT-4 (синхронизирован с ERS-2), и затем SPOT-2. Оператор КА ALOS японское космическое агентство JAXA предварительно не принимает заказы на РЛ съемку, организуемую в соответствии со стратегией совместного использования бортового КРСА PALSAR с ОЭ аппаратурой AVNIR-2 и PRISM, справедливо полагая, что практически одновременные и пространственно совмещенные ДДЗЗ другого РЛ диапазона будут востребованы из архива РЛД (ALOS – 23.5 см, ERS-2 и ENVISAT – 5.6 см). Различие долготы восходящего узла орбиты КРСА Канады Radarsat-1 и Китая RSS-1 объясняется реализацией более выгодного энергетического режима: поверхность солнечных батарей (СБ) практически всегда освещена солнцем (трасса орбиты почти совпадает с линией терминатора), т.е. для одинаковой с КРСА ENVISAT продолжительности работы КРСА Radarsat-1 28-30 минут на витке орбиты не требуется аккумуляторов значительной емкости (вес ENVISAT - 8 тонн, Radarsat-1 - 2.4 тонны). Увеличение числа плоскостей ССО до трех в КРЛС SAR-Lupe с размещением на них пяти КРСА с разносом по углу аномалии снижают интервал РЛН заданного района ПЗ до 50 минут в приполярных областях и 4 часов на экваторе. Использование наклонных орбит для КРСА Аркон-2 и Lacrosse хотя и не является оптимальным для освещенности СБ, но при реализации двустороннего широкополосного обзора обеспечивает высокую интенсивность РЛН - 5-6 наблюдений с интервалом 1.5 часа.

Реализация потенциальных возможностей КРСА по глобальности РЛН ПЗ кроме геометрических факторов в значительной степени определяется совокупностью показателей КА, описывающих его энергетические  $E$ , топливные  $T$  и информационные  $J$  ресурсы [6]. Задача планирования целевого применения КРСА относится к классу оптимизационных задач, в которой целевая функция КА ДЗЗ  $G$  обычно определяется при заданных параметрах орбиты  $O$ , системы регистрации и передачи данных  $D$ , и технических характеристик  $TK$ :  $G = \arg \max (E, T, J)$ , при этом отсутствие ресурса определенного типа  $O, D, TK$

$J \cup \{E \cap T\}$  приводит соответственно к прекращению полета КА и/или невыполнению целевого предназначения. Приведенная формализованная постановка в общем виде представляет собой задачу Нели-

нейного математического программирования и может быть решена только в частных случаях.

Управление энергетическим ресурсом осуществляет система энергоснабжения КА, в которой величина вырабатываемой энергии определяется площадью и, следовательно, массой СБ. Энергия в СБ вырабатывается только на освещенном участке орбиты, в остальное время снабжение происходит от аккумуляторных батарей (АБ). Размер запасаемой энергии зависит от емкости АБ, что напрямую определяется их массой и типом. Энергетический ресурс является периодически возобновляемым с уменьшающимся максимальным значением из-за деградации характеристик составных частей системы энергоснабжения, при этом период его пополнения при заданных технических характеристиках определяется параметрами орбиты.

Топливный ресурс определяет возможность выполнения коррекции орбиты КА и управления угловой ориентацией ДНА при механическом способе и является невозобновляемым. Для КА с КРСА точность поддержания высоты круговой орбиты лежит в пределах 2-5 км (как правило, из-за необходимости обеспечения режимов функционирования АС), поэтому в зависимости от высоты орбиты, активности Солнца и конструктивного исполнения КА и АС интервал между коррекциями орбиты может составлять недели-месяцы. КА с КРСА выполняют целевую задачу на высотах 300-1500 км, на которых сильно проявляется тормозящее влияние атмосферы из-за большой площади поперечного сечения КА благодаря увеличенной площади СБ и АФАР. Размер и, следовательно, масса АФАР определяется реализацией требуемой разрешающей способности, диапазоном эффективного электронного сканирования ДНА и достижением энергетического потенциала (максимальной излучаемой мощности с единицы площади).

Информационный ресурс характеризуется объемом БЗУ и пропускной способностью каналов системы передачи РГГ в ЗРВ НПП и/или КА-Р. БЗУ может быть реализовано на цифровых магнитофонах и/или твердотельной памяти, поэтому информационный ресурс является периодически возобновляемым без уменьшения максимального значения. Чем шире сеть НПП и КА-Р, тем длительнее период обслуживания КРСА и БЗУ и, соответственно, больше восполнение информационного ресурса [7]. В отличие от пассивных ОЭ КА ДЗЗ, способных работать практически в течение всего витка орбиты при обеспечении достаточной емкости БЗУ и/или высокоскоростных каналов передачи данных, у КРСА как активного средства наблюдения производительность съемки, выражаемая длительностью работы на витке или числом условных кадров за интервал времени, значительно ниже, чем у ОЭ КА ДЗЗ.

Одновременная максимизация рассмотренных ресурсов наталкивается на системно-технические трудности. Ресурсы определяют массу СБ, АБ, АФАР, топлива, вспомогательных подсистем и в конечном итоге массу КА. Из-за достаточно высокой стоимости запуска на заданную высоту орбиты на массу КА с КРСА вводят ограничения. Как правило, изначально при конструировании КА задаются типом существующего или перспективного ракетносителя, который при необходимости дополняют разгонным блоком. Увеличение интервала освещенности КА на ССО для повышения энергетического ресурса возможно путем разворота плоскости орбиты по долготе восходящего узла. При повышении высоты орбиты увеличивается межвитковое расстояние и появляется возможность просмотра заданного района ПЗ на смежных витках (повышение оперативности), но одновременно изменяется наклонение орбиты, снижающее глобальность РЛН. Для компенсации уменьшения широты границы наблюдения требуется более широкий диапазон углов крена ДНА, что означает рост габаритов АФАР (расход топливного ресурса), при этом увеличение максимального угла крена приводит к возрастанию дальности и, следовательно, мощности излучения для сохранения заданного отношения сигнал/шум (расход энергетического ресурса). Окончательный выбор параметров орбиты осуществляется в результате компромиссного выбора степени расходования топливного и энергетического ресурсов [8].

Эффективность использования КС ДЗЗ в целом решающим образом определяется эффективностью подсистемы распределения данных. Например, несмотря на то, что США первыми создали ОЭ КС ДЗЗ Landsat для коммерческого использования, лидирующие позиции на мировом рынке ДЗЗ заняла Франция с ОЭ КС ДЗЗ SPOT, сумевшая организовать применение своей системы с максимальным учетом запросов потребителей. Аналогичный подход продемонстрировала канадская компания RSI (в последствии MDA), разработав совокупность организационно-технических мер по

распространению РЛД КРСА Radarsat-1 на основе теории массового обслуживания и расширив число постоянных клиентов до 600 в 60 странах. Введенную систему приоритетов и временных нормативов по заказу и организации РЛН и выдаче РЛД в различных форматах следует рассматривать как информационный интерфейс между различными категориями потребителей и многорежимным КРСА Radarsat-1. Информативность РЛД в этом случае отражает степень удовлетворения требований потребителя по обеспечению полной и актуальной информацией об ОПЗ для решения целевых задач. Качественными характеристиками или признаками ОПЗ могут быть приняты:

а) вещественность или материальность (микроскопическое строение вещества) - свойства ОПЗ, проявляющиеся в диапазоне ЭМП и описываемые количественными показателями - комплексной диэлектрической и магнитной проницаемостью;

б) пространственная ограниченность (макроскопическое строение), описываемая количественно в избранной системе отсчета;

в) связность, отражающая пространственно-логические отношения ОПЗ и описывающая иерархическую многоуровневую семантическую топологию участка ПЗ (УПЗ), пространственное положение и логику взаимодействия ОПЗ метрическими отношениями (типа вхождение, совмещение, пересечение, смежность, примыкание, наложение) и логическими отношениями (типа принадлежность, продолжение), причем описываемый уровень связей ОПЗ устанавливается потребителем и в определяющей мере зависит от дискретности представления их пространственных характеристик (все признаки ОПЗ зависят от времени).

Наблюдаемый УПЗ с расположенными на нем ОПЗ можно рассматривать как материальный носитель количественных характеристик  $n$ , связанных с их качественными признаками. Количественные характеристики ОПЗ  $n' \leq n$  влияют на параметры отражаемого ЭМП. К ним относятся: частота или длина ЭМП и ее изменение, ширина спектра, направление распространения, поляризация, фаза (разность фаз) и скорость ее изменения, амплитуда или мощность, время задержки распространения, коррелированность фона (соизмеримость интервала накопления полезного сигнала с интервалом корреляции фона). Активный характер РЛН позволяет целенаправленно управлять синтезом оптимальных зондирующих сигналов, согласованной пространственно-временной обработкой расширенного состава параметров ЭМП, снижать априорную неопределенность условий наблюдения для получения требуемых ТТХ КРСА и соответственно РЛИ ПЗ.

К пространственным характеристикам ОПЗ относят его координаты, скорость и ориентацию в избранной системе координат, размеры, форма и шероховатость как характеристика поверхности; вещественные характеристики, как правило, описываются ЭПР для соответствующих длин волны, поляризаций и углов облучения КРСА. УПЗ описывается ЭПР фона для тех же параметров падающего ЭМП. Аналогично требования потребителей к РЛД на первичном уровне можно разделить на ряд групп:

- пространственных характеристик – разрешающая способность по координатам (в плане и по высоте) и по скорости, погрешности определения координат и скорости, размер наблюдаемого УПЗ (кадра, ширины и длины полосы наблюдения);

- радиометрических характеристик – динамический диапазон РЛД, радиометрическая чувствительность и разрешающая способность;

- временных характеристик – время съемки, периодичность наблюдения (как аналог частоты дискретизации по Котельникову при дискретном наблюдении динамических процессов).

Меры информативности, позволяющие оценивать смысл, количество и ценность доставляемых РЛД для потребителя о наблюдаемых ОПЗ, должны носить как синтаксический, так и семантический характер и удовлетворять ряду свойств - инвариантности, аддитивности, выпуклости и непрерывности. Традиционная теория информации К.Шеннона и Р.Хартли изучает методы кодирования сообщений различных источников и проблемы надежной передачи по каналам связи с шумом, при этом сама семантика сообщений не является предметом этой теории. Понятие семантической информации отсутствует и в теории кибернетики Н.Винера благодаря принципу обратной связи, жестко привязывающей сигналы к объекту управления и его среде, и в статистической

физике Л.Больцмана, учитывающей сложность равновесной термодинамической системы. ЭПР ОПЗ как функция многих переменных имеет определенную динамику изменения и может быть аппроксимирована на основе  $\epsilon$ -энтропии А.Н.Колмогорова. Диапазоны и потенциальные точности измерения параметров ЭМП в КРСА определяют свойства метрических пространств. Например, исследование геометрических факторов РЛН показывает ограничение углов РЛН ОПЗ по углам места и азимута вследствие ориентации ДНА перпендикулярно трассе КРСА и ограничения диапазона углов крена ДНА. При размещении КРСА на полярных орбитах, включая ССО, образуется два азимутальных сектора (восток, запад) направления РЛН, а применение наклонных орбит расширяет диапазон углов РЛН по азимуту и месту (три-четыре азимутальных сектора). Дополнительно вследствие изомаршрутности трассы КА углы РЛН приобретают дискретный характер, что означает определенную вырожденность метрического пространства ЭПР. Ценность информации целесообразно рассматривать как меру уменьшения штрафов в теории статистических решений Р.Стратоновича и как меру приращения информации при сравнении с тезаурусом при структурно-лингвистическом (семиотическом) подходе Ю.Шрейдера.

Для повышения эффективности КРЛС наряду с совершенствованием баллистической структуры КА, расширением сети НПП и введением многорежимности функционирования КРСА необходимо формирование устойчивого состава потребителей РЛД путем создания распределенной системы сбора заявок, обработки и распределения РЛД в форматах, стандартизованных на основе информационного подхода.

## Литература

1. Соллогуб А.В., Аниаков Г.П., Данилов В.В. Космические аппараты систем зондирования поверхности Земли: Математические модели повышения эффективности КА. М.: Машиностроение, 1993. 368 с.
2. Справочник по радиолокации: Под ред. М. Скольника. М.: Советское радио, 1978. В 4-х т.
3. Полетаев А.М. и др. Алгоритм расчета зон наблюдения космических радиолокаторов с синтезированной апертурой // Сборник алгоритмов и программ типовых задач. Вып. 21. МО РФ, 2003. С.79-87.
4. Спутники радиолокационного зондирования. Приложение №1 к Ежегоднику «Спутниковые системы связи и вещания». М.: Издательское предприятие редакции журнала «Радиотехника», 2000. 86 с.
5. Чернов А.А., Чернявский Г.М. Орбиты спутников дистанционного зондирования Земли. Лекции и упражнения. М.: Радио и связь, 2004. 200 с. с ил.
6. Полетаев А.М. и др. Управление ресурсами космического аппарата при функционировании бортового радиолокатора с синтезированной апертурой антенны // Сборник алгоритмов и программ типовых задач. Вып. 24. МО РФ, 2006. С.302-313.
7. Полетаев А.М. и др. Алгоритм определения оптимального размещения наземных приемных пунктов информации с космических аппаратов // Сборник алгоритмов и программ типовых задач. Вып. 22. МО РФ, 2004. С.163-170.
8. Полетаев А.М. и др. Алгоритм определения параметров орбит космических радиолокаторов при задаваемых технико-экономических ограничениях // Сборник алгоритмов и программ типовых задач. Вып. 22. МО РФ, 2004. С.158-162.