

Оценка путей и возможностей аэрокосмической георадарной диагностики техносферы

В.К. Шухостанов¹, В.В. Егоров², Л.А. Ведешин²

¹Отделение «Диагностика и безопасность техносферы» РАН,
119991 Москва, Ленинский пр., 6
E-mail: v-p@diatech.ru

²Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, Профсоюзная, 84/32
E-mail: victor_egorov@mail.ru

Рассматриваются вопросы построения георадарной системы аэрокосмического базирования, предназначенной для мониторинга состояния объектов техносферы. Это, прежде всего, учет иерархической структуры зондируемых объектов и окружающей их среды и оценка влияния ионосферы на поляризацию эхо-сигнала и пространственную разрешающую способность спутниковых радаров Р- и VHF- диапазонов волн. Анализируются особенности проектирования спутниковых георадаров. Оцениваются значения максимальной глубины обнаружения подповерхностных объектов и точности ее измерения.

Введение

Дистанционная диагностика объектов техносферы (крупных инженерных сооружений, магистральных и производственных нефтегазопроводов, хранилищ углеводородного сырья, водоводов, теплотрасс и коммуникационных сетей и др.) представляет собой комплекс мероприятий, направленных на оперативное обнаружение и оценку состояния этих объектов. Последние, в большинстве случаев, расположены под слоем грунта, толщиной в несколько дециметров, метров, реже десятков метров.

Эффективному решению задачи диагностики могло бы способствовать использование радаров с синтезированной апертурой (РСА) Р и VHF-диапазонов, устанавливаемых на аэрокосмические платформы и функционирующих в структуре георадарной системы дистанционного зондирования (ДЗ) Земли. Несмотря на то, что в настоящее время аэрокосмическая георадарная система диагностики объектов техносферы (далее для краткости Система) отсутствует, необходимость ее создания не вызывает сомнения. Это связано с быстрым ростом числа таких объектов, процессами их физического старения и участвовавшими техногенными катастрофами. Кроме того, эффективно управлять всем этим техногенным хозяйством и поддерживать его в рабочем состоянии невозможно без адекватного инструмента в виде системы мониторинга.

Описание структуры и принципов построения аэрокосмической георадарной системы диагностики техносферы

Структура предлагаемой Системы во многом аналогична структуре штатных систем дистанционного зондирования (ДЗ) Земли, типа «Метеор», «Океан», «Ресурс», Landsat, SPOT и др. Ее даже можно рассматривать в качестве подсистемы одной из них, например, системы «Ресурс», предназначенной для мониторинга объектов суши. Однако данная Система, наряду с известными принципами построения и функционирования аэрокосмических систем ДЗ, будет иметь и свои специфические особенности, которым и уделяется основное внимание ниже.

Предполагается, что основным элементом Системы, обеспечивающим наибольший вклад в ее информативность, является космический сегмент. Это связано с его высокой оперативностью и возможностью охвата больших территорий. В качестве вспомогательных элементов Системы могут

рассматриваться ее авиационный и наземный сегменты, призванные осуществлять мониторинг территорий, не охваченных космической съемкой, либо проводить детальные исследования территорий, целеуказания по которым получены с космического сегмента.

Космический сегмент

В структуру данного сегмента должны входить следующие компоненты:

- два спутника, находящихся на приполярных солнечно-синхронных орбитах с высотой 600-650 км и периодом обращения порядка полутора часов;
- радиолокатор длинноволнового Р- или VHF-диапазона (георадар) с синтезированной апертурой (РСА), работающий на нескольких поляризациях с возможностью функционирования в режиме интерферометра;
- система передачи данных через коммуникационный ИСЗ на Землю.

Радиолокаторы, должны иметь полосу обзора порядка 400 км, будучи установленными на указанные выше космические аппараты, способны практически ежедневно проводить съемку заданной территории в широтах 60⁰ и выше.

Поскольку в настоящее время образцы спутниковых георадаров Р- или VHF-диапазона отсутствуют, ниже рассматриваются их проектные варианты и анализируются значения расчетных параметров.

Авиационный сегмент

Он используется для проведения более детальной съемки исследуемой территории, обследования районов, не охваченных космической съемкой, и решения оперативных задач в условиях природных и техногенных катастроф. В состав авиационного сегмента целесообразно включать средневысотные самолеты (высота полета от 2 до 5 км) и вертолеты (с высотой полета от 0,1 до 2 км), оснащенные следующей бортовой аппаратурой:

- отечественным РСА ИМАРК (средняя длина волны – 2,54 м, разрешение по дальности -15 м, разрешение по азимуту – 15 м, полоса обзора – 24 км). Однако данный радар требует определенного улучшения своих параметров – в частности, доведения пространственного разрешения до 3-5 м, что сегодня вполне реализуемо. В качестве вертолетного варианта РСА целесообразно разработать отечественный аналог американского радара MkV (средняя длина волны – 1 м, разрешение по дальности - 1 м, разрешение по азимуту – 1 м, полоса обзора – 0,7 км);
- телеметрическая система передачи данных ДЗ через телекоммуникационный ИСЗ;
- система координатной привязки данных ДЗ (GPS/ГЛОНАСС).

Наземный сегмент

Наземные георадары устанавливаются на передвижные платформы различного типа (автомобильные прицепы, дрезины, локомотивы, ручные тележки), а также могут переноситься вручную. Они предназначены как для решения самостоятельных задач подповерхностного зондирования, так и для более детального изучения локальных участков, предварительно обследованных спутниковыми и авиационными средствами, и на которых выявлены объекты или процессы, интересующие потребителя. В состав наземного сегмента целесообразно включать следующие средства:

- РСА (средняя длина волны – 0,67 м, разрешение по дальности и глубине – 10 см, разрешение по азимуту 0,5 м), устанавливаемый на автомобильной платформе, антенна радара монтируется на телескопической вышке, высотой до 4 м;
- наземные радарные комплексы типа «Лоза-В» (средняя длина волны – 1,5 м, разрешение по глубине – 15 см, средняя излучаемая мощность 0,1 Вт), перемещаемые вручную, с помощью наземных тележек или на дрезинах;
- телеметрическая система передачи данных ДЗ через телекоммуникационный ИСЗ;

- система координатной привязки данных ДЗ (GPS/ГЛОНАСС).

Кроме того, в состав наземного сегмента следует включить станции приема и обработки информации, как крупные стационарные - федерального и регионального уровня, так и локальные и персональные.

Особенности проектирования космических георадаров Р- и VHF – диапазонов

Как уже было сказано выше, космический сегмент является наиболее важным элементом аэрокосмической системы георадарной диагностики техносферы. В самом этом сегменте наименее проработанным на сегодня вопросом является вопрос о проектировании бортовых георадаров Р- и VHF-диапазонов, единственно способных осуществлять подповерхностное зондирование объектов техносферы. Остальные компоненты Системы (спутники и каналы передачи данных) являются достаточно стандартными и не требуют особого пояснения. В связи с этим, ниже основное внимание уделяется особенностям проектирования таких радаров, что обусловлено специфическим влиянием ионосферы и поверхностных отражений на их работу.

Влияние ионосферы на работу космических георадаров и способы его компенсации

Флуктуации фазы сигнала Р и VHF-диапазона, прошедшего через слой ионосферы, приводят к уменьшению времени его когерентного накопления и, как следствие, к ухудшению пространственного разрешения георадара на местности [1]. Этот параметр (пространственное разрешение), является одним из наиболее важных, существенным образом влияющим на обнаружительные и измерительные характеристики георадаров.

1. Влияние ионосферы на разрешающую способность радара по дальности. Причинами ухудшения разрешения являются дополнительные сдвиги фаз гармоник зондирующего сигнала, вызываемые дисперсионными свойствами ионосферы. Это приводит к тому, что форма импульсного сигнала, прошедшего через ионосферу, искажается, становится более плоской, увеличивается длительность импульса и, соответственно, в 3-5 раз ухудшается пространственная разрешающая способность [2].

В работе [1] описан метод частичного восстановления разрешения космического РСА по дальности. В результате использования этого метода может быть достигнуто следующее значение относительной эффективной полосы модуляции эхо-сигнала:

$$\left(\frac{B}{f_0}\right) \leq 88 \cdot \left(\frac{f_0 \varphi_{4\max}}{\pi \cdot N_\Sigma}\right)^{1/3}, \quad (1)$$

где B - эффективная полоса спектра модуляции сигнала, после осуществления процедуры фазовой коррекции ($B \leq B_s$ - полоса зондирующего сигнала); f_0 - средняя частота сигнала, $\varphi_{4\max}$ - максимальная фазовая ошибка компенсации фазового сдвига, определяемая четвертым членом разложения $\varphi_r(\omega)$. Расчеты, произведенные по формуле (1) показывают, что величина B может реально составлять 30 МГц, а разрешающая способность по дальности – 7,5 м.

2. Влияние ионосферы на разрешающую способность георадара по азимуту. Флуктуации начальной фазы сигнала, прошедшего через ионосферу особенно сильно сказываются на величину азимутального разрешения космического РСА. Влияние ионосферы на прохождение электромагнитных волн является дисперсионным, т.е. степень ее воздействия зависит от частоты этих волн [2]. В работе [1] описан метод компенсации фазовых флуктуаций радиолокационного сигнала, основанный на использовании алгоритма фазогradientной автофокусировки (ФГА), позволяющего практически полностью восстановить исходное изображение, т.е. получить разрешение космического георадара, практически равное потенциальному.

Специфической особенностью работы георадаров космического базирования является их работа в условиях присутствия мешающих отражений электромагнитных волн от границы «воздух-грунт», оказывающих маскирующее воздействие на объект подповерхностного зондирования. Наличие таких помех существенно ухудшает возможности таких георадаров по глубине зондирования и точности определения пространственного положения подповерхностных объектов техносферы.

Для учета влияния поверхностных отражений воспользуемся методикой, изложенной в [3]. Так, в этой работе приведен график зависимости среднего контраста мощности сигнала, отраженного подповерхностным объектом к мощности отражений от поверхности K_H . В свою очередь, величина K_H связана с такими важными характеристиками обнаружения как вероятность правильного обнаружения p_{np}

Поскольку далее мы будем пользоваться графиками, приведенными в работе [3] (см. рис. 1), то целесообразно использовать пороговую величину $K_H = 9$ дБ, которая обеспечивает значения $p_{np} = 0,9$ и $p_{лт} = 0,1$.

Еще одним важным фактом является то обстоятельство, что увеличение мощности передатчика георадара не приводит к росту контраста K_H , поскольку происходит одновременное увеличение интенсивности как полезного сигнала, отраженного от подповерхностной цели, так и помехи (clutter) [3].

Единственным эффективным методом борьбы с поверхностными отражениями является повышение пространственной разрешающей способности как по дальности, так и по азимуту (оптимально чтобы разрешение соответствовало размеру зондируемого подповерхностного объекта), что делает особенно актуальной процедуру компенсации воздействия ионосферы на эхо-сигнал.

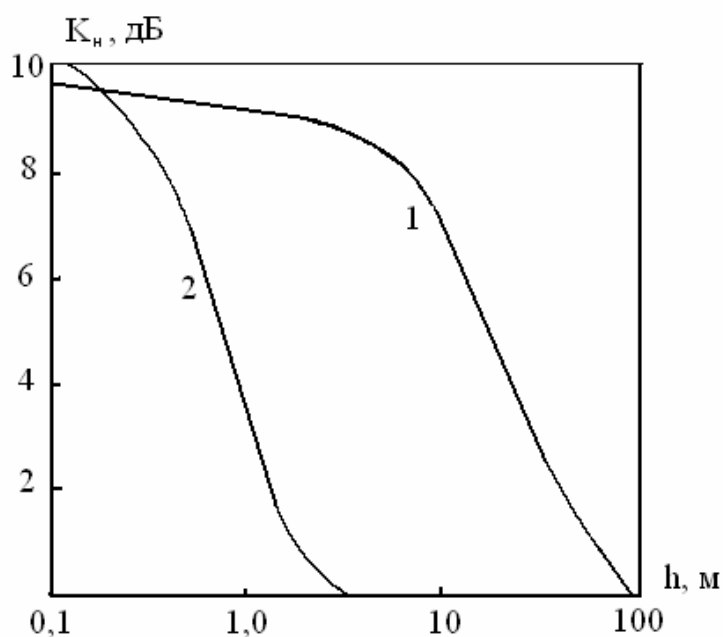


Рис. 1. Зависимость контраста K_H от глубины размещения подповерхностного объекта (плоский металлический лист): 1 – объект находится в песке; 2 – объект в глине

Обеспечение требования однозначности данных космического георадара и выбор параметров его антенны

В радиолокации известно условие устранения неоднозначности по дальности, общее для всех типов радаров. Оно состоит в том, что для предотвращения наложения отраженных сигналов, относящихся к смежным периодам модуляции, частота последней F_n должна быть ограничена сверху [4]:

$$F_n^{\max} = \frac{c}{2(R_{\max} - R_{\min})}, \quad (2)$$

где R_{\max} и R_{\min} - наклонные дальности до начала и конца полосы обзора соответственно, c – скорость света.

Особенностью работы спутниковых радаров, в которых используется метод апертурного синтеза, является возможность появления неоднозначности и вдоль трассы полета. Так, если частота повторения F_n настолько мала, что изменение фазы отраженного от некоторого элемента разрешения на местности сигнала за время между двумя последовательными импульсами превышает 2π рад, то при формировании результирующего сигнала возникает неоднозначность. Для ее исключения необходимо, чтобы

$$F_n^{\min} = 2V/l_a, \quad (3)$$

где V – орбитальная скорость ИСЗ, l_a - длина антенны георадара.

Соотношения (2) и (3) могут быть объединены в одно неравенство, определяющее условия выбора частоты повторения зондирующего сигнала. Выражая $R_{\max} - R_{\min}$ через полосу наблюдения L и угол визирования θ_{\max} , соответствующий максимальному углу места: $R_{\max} - R_{\min} \cong L \sin \theta_{\max}$, получим

$$\frac{2V}{l_a} \leq F_n \leq \frac{c}{2L \sin \theta_{\max}}. \quad (4)$$

Из условия (4) следует весьма противоречивая закономерность: чтобы обеспечить достаточно широкую полосу обзора L , надо увеличивать длину антенны георадара, снижая при этом F_n . Для большей наглядности выражения (4) выполним над ним следующее преобразование. Поделим правую и левую части неравенства (4) на $\frac{c}{2L \sin \theta_{\max}}$. Далее, выражая L как $L = L_0 / \cos \theta_{\max}$, где $L_0 = R\lambda/h_a$, R – наклонная дальность, h_a - высота антенны, λ - средняя длина волны георадара, в результате получим:

$$S_a = l_a \cdot h_a \geq \frac{4V \cdot R \cdot \lambda \cdot \operatorname{tg} \theta_{\max}}{c}, \quad (5)$$

где S_a - эффективная площадь антенны георадара.

Например, при $V = 7,5$ км/с, $R = 600$ км, $\lambda = 68$ см, $\theta_{\max} = 45^\circ$ и $c = 3 \cdot 10^8$ м/с будем иметь что $S_a = 28,5$ м². Соответственно для георадаров с длиной волны 1 и 2,5 м получим соответственно $S_a = 40,8$ и 104 м². Из этих расчетов следует, что для обеспечения однозначности спутникового георадарного зондирования необходимо устанавливать на борту ИСЗ огромные антенны, что практически нереально особенно для георадаров с длиной волны 1 и 2,5 м.

Одним из путей преодоления этой технической трудности является использование в РСА (георадарах) антенны меньшей длины с перекрытием полосы обзора L несколькими лучами и последовательным переключением полной мощности излучения т.е. со сканированием. При этом не только упрощается конструкция антенны, но и может быть существенно повышена F_n , а, следовательно, потенциал радара. Так, при многолучевом режиме и $\theta_{\max} = 50^\circ$ длина антенны спутниковых РСА приблизительно определяется соотношением:

$$l_a = L/(n \cdot 10^4), \quad (6)$$

где n – количество лучей (полос сканирования).

С учетом допустимого усложнения аппаратуры реальные значения $n = 3-4$. При $n = 4$ и $L = 400$ км согласно (6) $l_a = 6,5, 10$ и 25 м соответственно для георадаров с длиной волны 0,68, 1,0 и 2,5 м. Антенны длиной до 10 м уже реализованы на практике, в то время как создание 25 метровых антенн может вызвать существенные технические трудности.

Далее, при указанных значениях L и l_a согласно (4) частота повторения F_n может быть повышена до 1500 Гц, т.е. потенциал радара повышается примерно в 3 раза по сравнению с однолучевым режимом.

Выбор параметров георадаров космического базирования

Результаты исследований, выполненных выше, позволяют произвести проектный расчет основных параметров спутниковых георадаров Р ($\lambda = 0,68$ м) и VHF ($\lambda = 1,0$ и $2,5$ м) диапазонов (см. табл. 1). Более длинноволновые варианты спутниковых георадаров здесь не рассматривались, поскольку, согласно [3], величина максимальной глубины обнаружения подповерхностных объектов практически не увеличивается при превышении длины волны георадара $2,5$ м. Кроме того, увеличение длины волны радара требует соответствующего увеличения размеров спутниковых антенн, что несомненно создает дополнительные трудности проектировщикам и конструкторам.

Таблица 1. Расчетные параметры спутниковых георадаров Р- и VHF-диапазона с учетом коррекции влияния ионосферы

№ пп	Параметры радара	Р – диапазон, $\lambda = 0,68$ м	VHF – диапазон, $\lambda = 1$ м	VHF – диапазон, $\lambda = 2,5$ м
1.	Полоса частот ЛЧМ-модуляции, МГц	20	10	6
2.	Длительность зондирующих импульсов, мкс	27	25	25
3.	Полоса обзора, км	400	400	400
4.	Разрешение на местности, м:			
	- по дальности	7,5	10	15
	- по азимуту	7,5	10	15
5.	Поляризация	ВВ, ГГ, ГВ, ВГ	ВВ, ГГ, ГВ, ВГ	ВВ, ГГ, ГВ, ВГ
6.	Средняя излучаемая мощность, Вт	100	150	250

Примечание. В таблице 1 введены следующие обозначения: ЛЧМ – линейная частотная модуляция; ВВ, ГГ, ГВ, ВГ означает использование соответственно горизонтальной и вертикальной поляризации на прием и передачу.

Параметры георадаров (см. табл. 1), а также формулы и график (рис. 1), приведенные в п. 2.2. позволяют перейти к оценкам обнаружительных возможностей и точностей определения глубины подповерхностных объектов спутниковыми РСА.

Оценка максимальной глубины обнаружения подповерхностных объектов и точности ее измерения спутниковыми георадарами

Ниже в качестве объектов техносферы рассматривались: металлические и железобетонные трубы двух диаметров (1,0 м и 0,1 м), металлические контейнеры диаметром 5 м для подземного хранения углеводородного сырья (УВС), хранилища УВС в естественном грунте, полиэтиленовые трубы, зоны подтопления объектов техносферы (полотна железных и шоссейных дорог, а также взлетно-посадочных дорожек аэродромов, дамб, плотин и др.). На основе данных табл. 1, формулы для расчета контраста и рис. 1 были выполнены расчеты максимальной глубины обнаружения различных объектов техносферы (табл. 2).

Таблица 2. Расчетные значения максимальной глубины объектов техносферы, находящихся в сухом песке (влажной глине) для $p_{np} = 0,9$ и $p_{zm} = 0,1$

Максимальная глубина обнаружения: песок (влажная глина), м	P-диапазон, ($\lambda = 0,68$ м)	VHF – диапазон, ($\lambda = 1,0$ м)	VHF – диапазон, ($\lambda = 2,5$ м)
Трубопровод металлический: $\varnothing = 1000$ мм; $\varnothing = 100$ мм.	4,2 (0,21) 3,1 (0,13)	6,1 (0,4) 3,86(0,28)	10 (0,5) 7,3 (0,39)
Трубопровод железобетонный: $\varnothing = 1000$ мм; $\varnothing = 100$ мм.	3,31 (0,17) 2,39 (0,12)	4,7 (0,25) 3,0 (0,15)	7,9 (0,43) 5,0 (0,24)
Контейнер металлический ($\varnothing=5$ м)	6,2 (0,27)	7,2 (0,5)	12 (0,55)
Линзы воды, грунтовые воды, зоны подтопления	2,1 (0,2)	2,46 (0,21)	6,0 (0,35)

Анализ табл. 2 показывает, что рассматриваемые объекты контрастные техносферы будут обнаруживаться космическими георадарами P- и VHF-диапазонов на глубинах 2,3-12 м в сухом песке и 0,12-0,55 м во влажной глине. В то же время слабоконтрастные объекты типа полиэтиленовых труб, подземных хранилищ в естественном грунте и др. не будут обнаруживаться при заданных значениях вероятности правильного обнаружения, равной 0,9 и вероятности ложной тревоги – 0,1.

При оценке точности измерения предполагалось, что электрические характеристики грунта (величина действительной части комплексной диэлектрической проницаемости) точно известны. На практике из-за неопределенности этой величины реальная точность будет на 20% хуже. Кроме того, расчеты выполнялись только для тех объектов (см. табл. 2), которые могли быть обнаружены спутниковым георадаром.

Результаты оценок приведены в таблице 3.

Таблица 3. Точность измерения глубины размещения подповерхностного объекта

Точность измерения, см	P-диапазон, ($\lambda = 0,68$ м)	VHF – диапазон, ($\lambda = 1,0$ м)	VHF – диапазон, ($\lambda = 2,5$ м)
Трубопровод металлический: $\varnothing = 1000$ мм; $\varnothing = 100$ мм.	8,0 10,1	7,5 9,6	7,0 8,3
Трубопровод железобетонный: $\varnothing = 1000$ мм; $\varnothing = 100$ мм.	8,5 10,7	8,0 11,4	7,5 8,0
Контейнер металлический ($\varnothing=5$ м)	7,2	7,0	6,8
Линзы воды, грунтовые воды, зоны подтопления	40	35	33

Из табл. 3 видно, что точность определения глубины залегания объектов для большинства объектов достаточно высока и составляет 10-15 см.

Итак, георадары космического базирования способны эффективно обнаруживать и измерять глубину подповерхностных объектов техносферы, обладающих высоким контрастом на фоне отражений от грунта. В то же время, слабоконтрастные объекты будут плохо диагностироваться этими радаром. При выборе

оптимального георадара, из рассмотренного выше набора (по длинам волн) следует отдать предпочтение варианту с длиной волны 1,0 м, поскольку он способен обеспечить характеристики диагностики объектов техносферы, близкие к тем, что обеспечивает радар с длиной волны 2,5 м и создание антенн радара не слишком затруднительно.

Выводы

1. Многоуровневая структура системы георадарной диагностики обусловлена иерархическим строением объектов техносферы. В ее состав должны входить космический, авиационный и наземный сегменты. При этом, основным поставщиком информации об обнаружении и оценке состояния этих объектов будут являться спутниковые георадары.

2. Спутниковые РСА (Р- и VHF-диапазонов) при надлежащей компенсации влияния ионосферы, способны обеспечивать пространственное разрешение до 7,5 м.

3. Контрастные объекты техносферы (металлические трубы и контейнеры и т.п.) могут эффективно обнаруживаться космическими РСА вплоть до глубин 10-12 м (в сухом песке), в то время как слабоконтрастные объекты (полиэтиленовые трубы, хранилища в естественном грунте) не могут быть обнаружены с заданными $p_{np} = 0,9$ и $p_{лт} = 0,1$ из-за сильного маскирующего влияния поверхностных отражений от границы «воздух-почва» особенно при зондировании объектов, находящихся во влажной глине.

4. Точность определения глубины контрастных объектов, находящихся в грунте для большинства из них составляет 10-15 см, в то время как для зон подтопления она может составлять 30-40 см.

5. Из рассмотренных выше вариантов космических георадаров следует отдать предпочтение варианту с длиной волны 1,0 м, поскольку он способен обеспечить характеристики диагностики объектов техносферы, близкие к тем, что обеспечивает радар с длиной волны 2,5 м, а создание антенн радара - не слишком затруднительно.

Литература

1. Штейншлейгер В.Б., Дзенкевич А.В., Минаков В.Ю. и др. О разрешающей способности трансионосферной РЛС с синтезированной апертурой для дистанционного зондирования Земли в УКВ-диапазоне волн // Радиотехника и электроника, 1997. Т.42. № 6. С. 725-732.
2. Арманд Н.А. Об ограничении разрешающих способностей космических радаров с синтезированной апертурой, обусловленных условиями распространения радиоволн в ионосфере // Исслед. Земли из космоса, 2005. № 1. С. 1-12.
3. Калмыков А.И., Фукс И.М., Цимбал В.Н. и др. Радиолокационные наблюдения сильных отражателей, расположенных под слоем почвы. Модель подповерхностных отражений // Харьков, ИРЭ Академии наук Украины, 1993. Препринт № 93-6. 29 с.
4. Ходарев Ю.К., Дробкин М.О., Хатин Ю.Б. Вопросы повышения эффективности микроволновых средств дистанционного зондирования. Труды ГосНИИЦПР, вып. 32, Дистанционные методы и аппаратура получения данных о природных ресурсах Земли и окружающей среде, серия А, Ленинград, Гидрометеиздат, 1988, с. 130 – 142.