

Проблемы сверхширокополосного подповерхностного зондирования

А.В. Ефимов

ЗАО «Аэрокон», ул. Жуковского, 1, г. Жуковский, Московская обл., 140187

В работе рассматриваются проблемы и перспективы развития радиолокаторов с синтезированием апертуры антенны (РСА), использующих сверхширокополосные сигналы для подповерхностного зондирования. Показаны информационные преимущества сверхширокополосных (СШП) радиолокаторов, использующих Р-диапазон, перед традиционными узкополосными системами. Рассмотрены вопросы наращивания излучаемой энергии для подповерхностного зондирования с использованием возможностей современных АФАР. Представлены теоретические положения, характеризующие синтезирования апертуры с использованием свойств СШП сигналов. Рассмотрены особенности построения СШП радиолокаторов и технические проблемы, встающие перед разработчиками.

In this work are considered problems and prospects of development of synthetic aperture radar (SAR) using ultra wide band (UWB) signals for penetrating in ground probing. Information advantage of UWB radar, using P-band, is shown before traditional narrow-band system. They are considered questions increase of radiated energy for penetrating in ground probing with use the possibilities modern active phased antenna arrays. Theoretical positions are presented for characterizing synthetic apertures with use UWB signal. They are considered particularities of the building UWB radar and technical problems, getting up before developer.

К настоящему времени радиолокационные станции с синтезированной апертурой антенны (РСА), наряду с оптическими и многоспектральными средствами дистанционного зондирования Земли, становятся все более информативным средством наблюдения на качественно ином уровне, чем это было достигнуто ранее. Это связано, прежде всего, с тем, что разрешающая способность РСА практически приблизилась к оптическим средствам наблюдения, что позволило получать с их помощью радиолокационные изображения (РЛИ) наблюдаемых объектов, сравнимые по детальности с фотоизображениями (с максимальным разрешением около 0,1 метра, рис. 1)[1–4].



Рис. 1. Вид радиолокационного изображения (РЛИ) вертолетной площадки с разрешением около 10 сантиметров

Одной из проблем при переходе к такому разрешению является корректное дешифрирование (распознавание до класса и типа) наблюдаемых объектов на РЛИ. Даже несмотря на возросший интерес к различным перспективным видам и режимам землеобзора в РСА (бистатическому режиму, интерферометрическому режиму, режиму оценки топографического рельефа местности, поляризионному и др.) с различного типа носителей [1–4], пока остается слабо проработанным вопрос получения информации об объектах, экранированных плотными средами с возможностью создания многослойных портретов (многослойных РЛИ) земной поверхности, реализующих принципы подповерхностной радиолокации. Это связано с тем, что как в России, так и за рубежом, техника создания наземных, авиационных и космических СШП РСА, находится всего лишь на начальном этапе своего развития [5–11]. Ввиду этого, применение возможностей СШП радиолокации пока не получило должного развития из-за технических сложностей по генерации сверхкороткоимпульсных зондирующих сигналов большой мощности на борту летательных аппаратов, а также проблем, связанных с созданием и построением самой антенной системы.

Так, например, к настоящему времени широкое распространение на практике получило направление радиолокаторов (геолокаторов), которые предназначены для подповерхностного зондирования земной поверхности с целью обнаружения закопанных объектов, дефектов покрытий различного назначения (асфальтовых, аэродромных) и т.п. Схема работы типового геолокатора представлена на рис. 2. Такие геолокаторы, как правило, располагают на тележках (их питание обеспечивается от аккумуляторов) и выпускаются серийно как в России (например, георадары “Грот”, “Лоза”, “Око”), так и за рубежом [12,13].

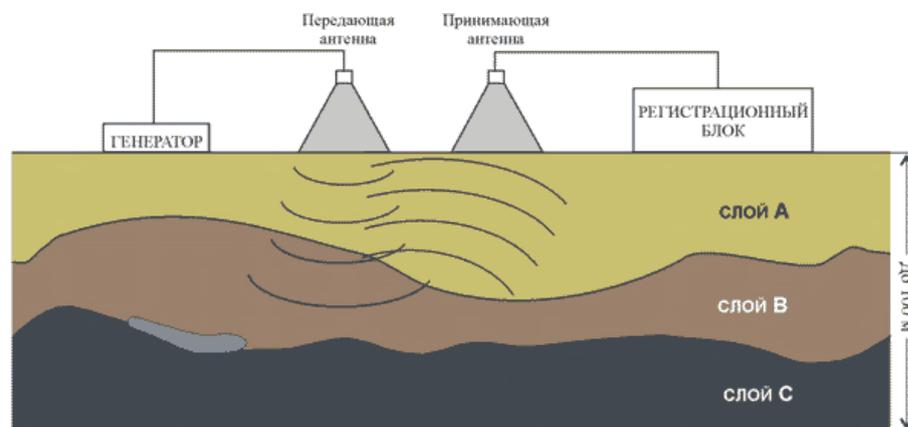


Рис. 2. Схема работы геолокатора на наземной подвижной платформе

Они способны обнаруживать объекты на заглублениях от единиц до десятков метров и относятся к сверхкороткоимпульсной видеолокации (СКИВЛ). Здесь основная идея метода при подповерхностном зондировании состоит в излучении импульсов электромагнитных волн и регистрации сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различие по диэлектрической проницаемости. Такими границами раздела в исследуемых средах являются, например, контакт между сухими и влагонасыщенными грунтами (уровень грунтовых вод), контакты между породами различного литологического состава, между породой и материалом искусственного сооружения, между мерзлыми и тальными грунтами, между коренными и рыхлыми породами и т.д. Среди способов получения зондирующих СШП сигналов в таких РЛС наиболее распространен метод ударного возбуждения, воздействия на антенну коротким импульсом или перепадом напряжения. В настоящее время во многих

странах, таких как США, Япония, Канада и Швеция разрабатываются и выпускаются малыми партиями различные модификации георадаров.

Частотный диапазон георадаров обычно лежит в пределах 50...500 МГц, что является компромиссом между глубиной зондирования в единицы – десятки метров и разрешающей способностью в единицы – десятки сантиметров для реальных геологических структур. Получили развитие и более высокочастотные радары, имеющие верхнюю частоту до 40 ГГц, которые имеют глубину зондирования в единицы – десятки сантиметров и используются в основном для анализа состояния бетонных строительных конструкций, и которые трудно отнести к геологическим приборам. Технические характеристики практически всех георадаров, так и их схемные решения мало чем отличаются друг от друга. Такие РЛС способны формировать радиолокационные изображения объектов, находящихся в слоях земли (воды), но не могут обеспечить надлежащую разрешающую способность либо по азимуту(георадары), либо по дальности (низкочастотные РСА). Тем не менее, близость зондирующих сигналов георадаров к требуемым для СШП РСА (ГеоРСА) позволяет рассматривать их как возможные прототипы при дальнейшей их разработке.

Отметим, что получение РЛИ в современных авиационных и космических узкополосных РСА обеспечивается в различных диапазонах длин волн (от миллиметровых до метровых) и предназначено в основном для нужд картографирования и обнаружения объектов на поверхности Земли. Все попытки использовать существующие радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли с космических и авиационных носителей для поиска и обнаружения объектов под различными слоями (грунт, вода, песок ит.д.), стали предприниматься сравнительно недавно. Эти попытки нашли свое отражение в применении многочастотных авиационных радиолокаторов, работающих в X, L и P диапазонах (таблица 1), причем их технологическая реализация сама по себе является довольно сложной задачей [7]. Фактически такое решение позволило лишь приблизиться к реализации принципов подповерхностной радиолокации при синтезировании апертуры антенны –это оказалось эффективным на небольших глубинах залегания исследуемых объектов в средах распространения радиоволн.

Таблица 1. Частотные диапазоны для авиационных РСА

Наименование диапазона	Условное обозначение	Частота, ГГц	Длина волны, см	Полоса, МГц
ОВЧ (<i>VHF</i>)	<i>P</i> (70 см)	0,430–0,440	68,2–69,8	10
УВЧ (<i>UHF</i>)	<i>L</i> (24 см)	1,215–1,24	24,2–24,7	25
СВЧ (<i>SHF</i>)	<i>S</i> (10 см)	3,1–3,3	9,09–9,68	200
–"–	<i>C</i> (5,6 см)	5,25–5,35	5,61–5,714	100
–"–	<i>C</i> (5,3 см)	5,65–5,725	5,24–5,3	75
–"–	<i>X</i> (3,4 см)	8,5–9,0	3,33–3,53	500
–"–	<i>X</i> (3,2 см)	9,2–9,3	3,22–3,26	100
–"–	<i>X</i> (3 см)	9,5–10,5	2,86–3,16	1000
–"–	<i>Ku</i> (2 см)	13,4–14,0	2,142–2,238	600
–"–	<i>Ku</i>	15,7–17,3	1,73–1,91	1600
–"–	<i>K</i> (1,2 см)	24,05–24,25	1,22–1,33	200
КВЧ (<i>EHF</i>)	<i>Ka</i> (8 мм)	33,4–36,0	0,83–0,9	2600
–"–	Миллиметровые волны	59–64	0,46–0,51	5000
–"–	Миллиметровые волны	76–81	0,37–0,39	5000
–"–	Миллиметровые волны	92–95	0,31–0,326	3000

Поэтому стало совершенно очевидным, что для повышения информационных возможностей РСА и практической реализации принципов подповерхностной радиолокации требуется иной подход к разработке систем подобного типа, а именно, переходу к расширению полосы генерируемых и обрабатываемых частот, и в частности, внедрении технологии сверхширокополосных (сверхкороткоимпульсных) зондирующих сигналов в РСА. На сегодня эта технология получила развитие в двух основных направлениях, а именно в использовании зондирующих сигналов с внутриимпульсной модуляцией и сверхкороткоимпульсных сигналов (СКИ). В свою очередь технология СКИ-сигналов распалась на два направления: сверхкороткоимпульсная радиолокация длинноволнового (метрового) диапазона и СКИ радиолокация сантиметрового и миллиметрового диапазона. Для реализации такой технологии необходимо осуществить коррекцию классических принципов, способов и алгоритмов синтеза апертуры РСА и только после реализации этого этапа исследований переходить к разработке структуры и методик расчета основных характеристик СШП РСА как сложной технической системы [9–10].

Но для создания такого типа СШП радаров, как и любой другой техники, необходимы некоторые основы теории, позволяющие грамотно рассчитывать их характеристики. Теория также необходима для определения требований к элементам радаров и разработки аппаратуры: устройств формирования, излучения, приема и обработки СШП сигналов. При этом необходимо учесть, что СШП РСА будут обладать рядом особенностей, связанных главным образом с двумя основными параметрами: шириной спектра зондирующего сигнала Δ_f и разрешающей способностью по дальности ρ_r , которые изменяются в процессе зондирования. Несущая или точнее центральная частота спектра сигнала f_0 и линейная разрешающая способность по азимуту ρ_a , связаны с Δ_f и ρ_r , но для одного и того же радиолокатора они могут иметь произвольные значения из ограниченного диапазона. Вместе с тем, в теории узкополосных РСА предполагается как само собой разумеющееся, что спектры зондирующего, отраженного и принятого радиоимпульсов по ширине равны. Для СШП РСА такое допущение является некорректным. И связано это, прежде всего, со свойствами СШП радиосигналов, а именно:

- в процессе локационного наблюдения СШП радиосигнал неоднократно меняет свою форму;
- одни из этих изменений (при излучении, приёме, формировании диаграммы направленности (ДН) поддаются расчёту, другие (при отражении от цели, прохождении через атмосферу и другие среды) остаются неизвестными;
- классическая оптимальная обработка СШП сигнала с помощью согласованного фильтра или коррелятора становится невозможной, и соответственно, требуется поиск методов обработки сигнала, позволяющих максимизировать отношение сигнал-шум.

Известно, что основным классификационным признаком СШП радиосигналов является ширина относительной спектральной полосы, которая вычисляется как отношение ширины полосы частот к несущей частоте. Но это справедливо тогда, когда у сигнала можно выделить несущую частоту. Так, например, используется более общее определение относительной полосы η :

$$\eta = (f_H - f_L) / (f_H + f_L),$$

где f_H – высшая, а f_L – низшая частоты спектра сигнала.

В соответствии с этим определением системы или сигналы, имеющие $\eta \leq 0,01$, относятся к узкополосным (УП), $0,01 < \eta \leq 0,25$ – к широкополосным (ШП), следовательно, сигналы с $\eta > 0,25$ можно отнести к сверхширокополосным (СШП). Это определение в настоящее время используется разработчиками РСА во всем мире.

Существует связь между границами спектра сигнала f_H , f_L , шириной спектра Δf и центральной частотой спектра f_0 :

$$\Delta f = f_H - f_L \text{ и } f_0 = (f_H + f_L)/2.$$

Отметим, что для того, чтобы сигнал был сверхширокополосным, вовсе не обязательно в составе спектра иметь очень высокие частоты, важно лишь выполнение соответствующего соотношения между шириной полосы Δf и центральной частотой f_0 . Напомним, что в традиционных узкополосных РСА ширина полосы зондирующего сигнала Δf связана с разрешающей способностью по дальности:

$$\rho_r = (c/2) / \Delta f = 150 / \Delta f_{\text{МГц}}.$$

Корректнее было бы Δf считать шириной спектра импульса, принятого РЛС. В теории узкополосных РСА предполагается как само собой разумеющееся, что спектры зондирующего, отраженного и принятого радиоимпульсов по ширине равны. Для СШП РСА такое допущение несправедливо.

Для большей определённости введена следующая классификация СШП РСА:

- СШП РСА, излучающие короткие немодулированные радиоимпульсы, включающие в классическом варианте 1–2 периода несущей (средней) частоты – коротко-импульсные РСА (КИ СШП РСА);
- СШП РСА, излучающие короткие видеоимпульсы – видеоимпульсные РСА (ВИ СШП РСА);
- СШП РСА с зондирующим сигналом большой базы (например, ЛЧМ сигналы или ФКМ сигналы, элементами которого становятся КИ сигналы) – СШП РСА ББ.

Вместе с тем СШП сигнал может возникать в широкополосных или даже в узкополосных радиолокаторах на промежуточной частоте, **когда условие сверхширокополосности возникает из-за понижения несущей частоты**. Такие радиолокаторы трудно отнести к сверхширокополосным (зондирующий сигнал не является СШП), однако обработка сигналов в них должна быть как в СШП РСА. Поэтому для практической реализации принципов подповерхностной радиолокации с борта ЛА главной особенностью становится выбор частотного диапазона радиоволн, **способных проникать под землю при умеренных потерях**. Выбор диапазона волн, проникающих сквозь плотные среды, проще всего сделать, используя графики на рис. 3. Здесь представлена зависимость удельных потерь (дБ/м) энергии радиоволн в зависимости от частоты.

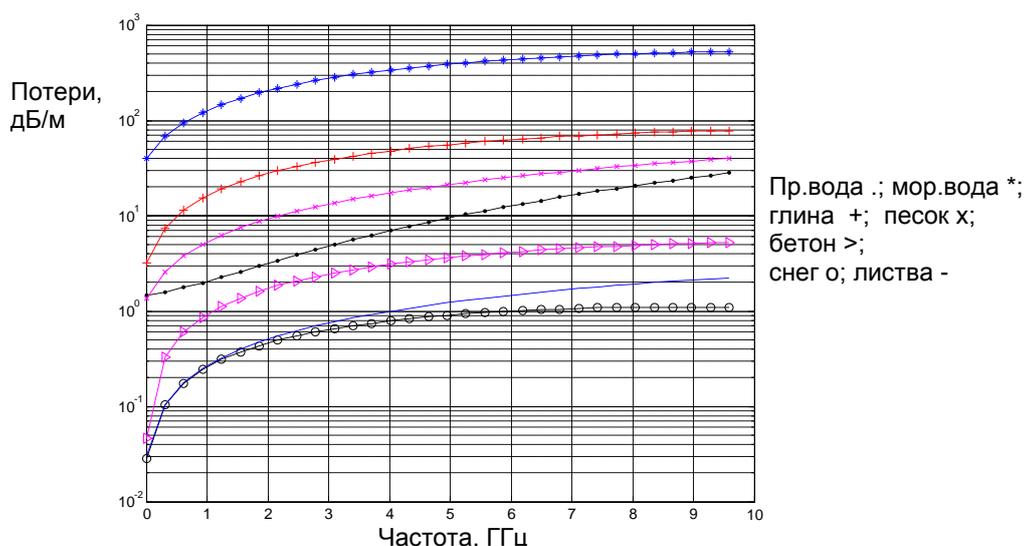


Рис. 3. Удельные потери при распространении радиоволн в плотных природных средах

Анализ графиков показывает, что с уменьшением частоты потери в плотных средах падают. Поэтому желательным вариантом для проникновения в плотные среды является диапазон частот до 1 ГГц, а наиболее предпочтительным – Р-диапазон. Это прежде всего связано с тем, что при использовании Р-диапазона (длина волны 70 сантиметров) или метрового диапазона (длина волны 1,5...3 метра) возможно надеяться не только на обнаружение пространственно-временных искажений земной поверхности, но и на обнаружение различных объектов на границе раздела двух-трех сред (например, земля-вода) по наличию фазовых искажений отраженного сигнала, демаскирующих эти объекты неестественной геометрией (аномалиями) земной поверхности в силу различных явлений природы, таких как снег, дождь, и.т.п.

Необходимо отметить, что для обеспечения достаточной глубины проникновения излучения в почву зондирование должно осуществляться в диапазоне длин волн порядка 1 метра и более, при этом достаточно сложную проблему представляет собой обеспечение широкополосности зондирующего сигнала, в частности, из-за ограничения полосы пропускания антенны. В таблицах 2 и 3 приведены соответственно характеристики различных сред и видов почвы, а также значения действительной составляющей относительной диэлектрической проницаемости и коэффициент затухания излучения на длине волны 1 метр в песчаных и глинистых грунтах различной влажности.

Таблица 2. Характеристики различных сред и видов почвы σ

Среда	ϵ	σ , (см/м)	c , (м/мкс)	Γ_t	Γ_n
Дождевая вода	80,1	0,001	33	0,47	0,27
Нефть	1,8–3,0	$1,2 \times 10^{-5}$	200	0,99	0,89
Песок малой влажности	5,5	3×10^{-4}	130	0,93	0,73
Песок средней влажности	8–11	$(5...9) \times 10^{-4}$	110	0,85	0,61
Песок максимальной влажности	22	4×10^{-3}	65	0,71	0,46
Сухая глина	10–15	0,02	87	0,82	0,57
Влажная глина	16–40	0,08	55	0,69	0,44
Сухая глинистая почва	3	$2,5 \times 10^{-4}$	170	0,98	0,85
Влажная глинистая почва	15	0,05	78	0,78	0,53

Здесь приняты следующие обозначения: ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды, σ – удельная проводимость; c – скорость распространения электромагнитного излучения в среде; Γ_t и Γ_n – пропускательная способность границы раздела атмосферы с данной средой при угле падения 45 градусов для различных поляризаций падающего излучения.

Таблица 3. Действительная составляющая относительной диэлектрической проницаемости и коэффициент затухания излучения на длине волны 1 метр в песчаных и глинистых грунтах различной влажности

Параметр	Песчаный грунт с влажностью, (%)			Глинистый грунт с влажностью, (%)			
	10	20	30	10	20	30	37
Относительная диэлектрическая проницаемость	6	10	17	6	10	17	22
Коэффициент затухания, дБ/м	1	3	5	5	15	20	30

Еще одной характеристикой земной поверхности, *определяющей глубину обнаружения объектов*, является *удельная ЭПР поверхности*, что также является важнейшим фактором при учете проникновения сигнала в различные среды и который необходимо учитывать. Проникновение радиоволн через иные среды, такие как вода (морская и пресная), грунт, снег и искусственные покрытия, характеризуется данными таблицы 4. Рассматривая эту таблицу, можно прийти к выводу, что обнаружение объектов под различными покрытиями вполне реально и осуществимо. Во всяком случае, при длине волны 60 см и более проникновение в почву на глубину несколько метров вполне осуществимо.

Таблица 4. Способность проникновения радара в различные среды

Среда	Длина волны (см)	Коэффициент поглощения (дБ/м)	Глубина проникновения, м при поглощении 20 дБ
Снег	10	0,3	67
	100	0,036	520
Замороженная Почва	300	4,2	4,5
Сухая почва	500	0,8	25
Сухая песчаная почва (с влажностью 3 %)	3	300	0,07
	60	3	6,7
Сухая глина	3	300	0,07
	60	14	1,4

Более подробные данные представлены ниже. Здесь потери (дБ/м) при проникновении в слои воды и грунта в зависимости от частоты (ГГц) характеризуют кривые, показанные на рис.4. Верхняя кривая относится к морской воде. Потери в ней настолько серьёзны, что говорить о каком-либо проникновении в её глубину для сигнала на частотах от 100 МГц до 10 ГГц трудно. Гораздо проще дело обстоит в случае пресной воды (третья кривая сверху). Здесь, по-видимому, можно говорить о проникновении до десятков метров.

Частотные зависимости средних значений удельного затухания или потерь в грунтах сведены в четыре группы: 1 – глина, суглинки (влажность $W > 5\%$); 2 – глина, суглинки ($W < 5\%$), морские льды, пески и песчаники ($W > 15\%$), торф; 3 – пески и песчаники ($W < 15\%$), влажные угли, асфальт, бетон, кирпич, гранит; 4 – пресный лёд, снег, сухие угли, гранит, кальцит, доломит, каменная соль. Наиболее сложно дело обстоит в отношении группы №1 (вторая кривая сверху). Что же касается групп №4,3 и 2 (первая, вторая и третья кривые снизу), то потери в этих грунтах представляются

вполне приемлемыми. Ориентировочные значения коэффициента затухания в дБ/м электромагнитных волн (ЭМВ) в различных материалах представлены в таблице 5.

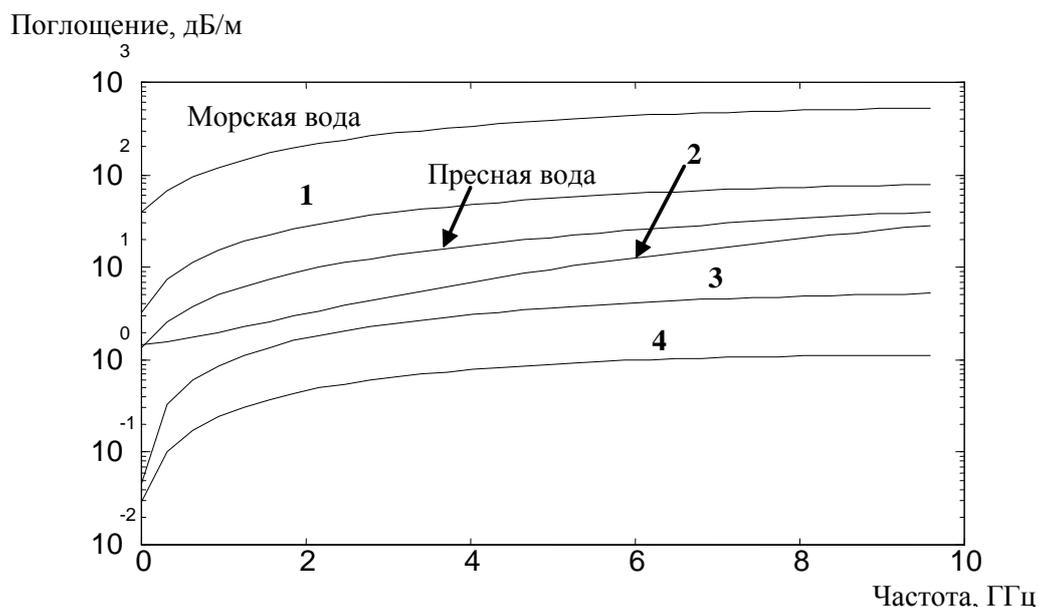


Рис.4. Зависимость коэффициентов поглощения (дБ/м) в воде и грунте от частоты (ГГц)

Таблица 5. Ориентировочные значения коэффициента затухания ЭМВ в различных материалах, дБ/м

Типы местности	Глина, морской лёд	Песок, бетон	Снег, пресный лёд	Вода пресная	Кроны деревьев
γ , дБ/м ($\lambda = 3\text{ см}$)	100	20	1	1000	1,2
γ , дБ/м ($\lambda = 70\text{ см}$)	10	3	0,1	7	0,12
γ , дБ/м ($\lambda = 3\text{ м}$)	8	1	0,05	2	0,05

Отметим лишь, что обнаружение подповерхностных объектов в различных средах, представляет собой довольно нетривиальную задачу, поскольку обнаружение придется осуществлять по косвенным признакам с учетом РЛ-характеристик приповерхностного слоя почвы, выражающегося, как правило, в *«нестандартных»* текстурах (например, локальная просадка почвы вниз по высоте или относительный сдвиг приповерхностного слоя по сравнению с общим фоном местности) на радиолокационном изображении при картографировании, и возможно, в изменениях поляризационных характеристик приповерхностного слоя почвы и его характерных отражающих характеристик, что также может являться демаскирующим фактором наличия объекта в почве (воде). Тем не менее, стоит отметить, что принятие определенной модели зондирования для обнаружения различных объектов будет зависеть от конкретных условий работы РСА (длины волны, поляризации, углов наблюдения и облучения, разрешающей способности и т.п.). Однако, имея в виду ограниченный потенциал РСА, есть смысл рассмотреть вопросы по дальнейшему наращиванию излучаемой энергии для решения задач подповерхностного зондирования.

Два очевидных и теоретически обоснованных шага представляются очевидными для решения этой проблемы, а именно:

- использовать возможности АФАР с целью увеличения излучаемой мощности;
- увеличить длительность излучаемого сигнала при сохранении ширины полосы частот для увеличения энергии импульса.

Но все же принципиально новым направлением в РСА остается создание сверхширокополосных систем и особенно работающих со сверхкороткими импульсами (СКИ). В настоящее время во многих странах ведутся исследования, направленные на создание физико-технических основ СШП радиолокации. И в первую очередь это связано с созданием антенных, передающих и приемных устройств, а также систем обработки и регистрации. Разработка этих устройств, работающих со сверхкороткими импульсами, является весьма сложной технической проблемой, поэтому одним из важнейших аспектов в исследовании путей и принципов построения СШП РСА является вопрос о работе устройств антенно-фидерного тракта, схемы построения антенной системы. Очевидно, что возможности таких систем будут ограничены способностями антенн работать с СШП сигналами. Проблема создания антенн связана с решением следующих специфических задач:

- синтезом сверхширокополосных антенн;
- созданием излучателей, не искажающих форму сигнала;
- определением энергетических характеристик направленности с учетом временных параметров СШП сигнала.

Для наиболее масштабного использования РЛС с СКИ необходимо решение основной задачи – повышение их энергетики. Для определения основных параметров, влияющих на это, запишем уравнение дальности в виде :

$$W_R = W_T H(w) / 16\pi^2 r_T^2 r_R^2 \geq W_{R\min}, \quad (1)$$

где W_T – энергия сигнала, подводимого к передающей антенне;

$H(w) \equiv G_T(w)\sigma(w)A_R(w)[1-\eta_T(w)][1-\eta_R(w)]\gamma(w)$ – передаточная функция радиолинии;

$G_T(w)$ и $A_R(w)$ – коэффициент усиления передающей антенны и эффективная площадь приемной антенны в направлении на объект;

$\sigma(w)$ – бистатическая эффективная площадь рассеяния (ЭПР) объекта;

$\gamma(w)$ – коэффициент поляризационных потерь;

$\eta_{T,R}(w)$ – коэффициенты отражения передаваемого сигнала от входа передающей антенны и принимаемого сигнала от входа приемной антенны;

W_R и $W_{R\min}$ – энергия отраженного сигнала и заданная минимально необходимая энергия сигнала на выходе приемной антенны.

В соответствии с (1) видно, что основными параметрами, на которые может повлиять разработчик СШП РСА, для повышения энергетики полезного сигнала и в конечном итоге – на увеличение дальности действия, является не только увеличение мощности передатчика, но и повышение коэффициента направленного действия (КНД) антенны и чувствительности приемного устройства. Поэтому на сегодня рассматриваются три основных направления повышения энергетики СШП РСА, а именно:

- повышение мощности передающих устройств и адаптация устройств формирования СКИ зондирующих сигналов;
- построение СШП активных фазированных антенных решеток (АФАР);
- повышение отношения сигнал/шум на выходе приемных устройств и их адаптация при приеме СКИ сигналов.

Отметим, что реализовать СШП антенную систему и СШП приемо-передающий тракт с технической точки зрения представляет собой нетривиальную задачу. Здесь существует альтернативное решение, заключающееся в использовании метода межпериодного расширения спектра сигнала. В этом методе требуемая ширина спектра частот зондирующего сигнала, а также полосы пропускания антенной системы и приемного тракта обеспечивается изменением от периода к периоду значения несущей частоты и частоты гетеродина приемника. Мгновенная ширина спектра зондирующего сигнала и полоса пропускания при этом могут быть во столько раз уже требуемой, сколько значений несущей частоты используется в процессе зондирования. Отметим также, что в СШП РСА при коэффициенте широкополосности $\Delta f/f_0 \geq 1$ можно получить разрешение по азимуту выше, чем в традиционной УП РСА, причем для достижения этого разрешения можно использовать только эффект миграций сигнала по наклонной дальности пренебрегая фазовой модуляцией траекторного сигнала – в этом случае вместо квадратурного фазового детектора или преобразователя Гильберта можно использовать амплитудный детектор и, в конечном счете, использовать некогерентный способ формирования, излучения и приема зондирующего сигнала. Иначе говоря, СШП РСА может быть условно «некогерентной» РЛС, в том числе РЛС с несинусоидальным зондирующим сигналом (например, в виде короткого импульса), как это предлагается.

Таким образом, что касается использования авиационных и космических РСА со СШП зондирующими сигналами большой мощности, то здесь для получения радиолокационного изображения подповерхностных объектов имеются пока достаточные сложности, так как в отличие от георадаров в авиационных (и особенно в космических РСА) мы имеем большую дальность до объектов зондирования. В первом случае это десятки километров, а во втором – тысячи. *Это и объясняет тот факт, что к настоящему времени среди космических РСА отсутствуют РЛС с СШП.*

Тем не менее, использование СШП сигналов в авиационных и космических РСА обеспечит им много положительных свойств и является весьма перспективным направлением дальнейшего развития космической и авиационной радиолокации. Кроме того, наряду с теорией синтеза апертуры [3] предстоит разработать теорию режимов СШП РСА с расширением функций на поляриметрическую работу, идентификацию движущихся целей, оценку рельефа местности и сдвигов её элементов, определения состояния морской поверхности, бистатического синтеза апертуры антенны, а также режимов поиска подповерхностных объектов в различных средах распространения радиоволн.

Литература

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Теоретические основы построения радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли. Учебник для слушателей и курсантов инженерных вузов ВВС. – М.: ВВИА им проф. Н.Е. Жуковского, 2009. – 360 с.
2. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. – М.: Изд. ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2008. – 531 с.
3. Радиолокационные станции с цифровым синтезом апертуры антенны / Под ред. В.Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
4. Цифровая обработка сигналов в РСА / Под ред. Е.Ф. Толстова. – Смоленск: Изд. ВА ВПВО ВС РФ, 2005. – 232 с.

5. Иммореев И.Я. Сверхширокополосные радары: новые возможности, необычные проблемы, системные особенности // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. 1998. № 4.
6. Осипов М.Л. Сверхширокополосная радиолокация // Радиотехника. 1995. №3. С.3-6.
7. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. Под общей ред. В.С. Вербы – М.: Радиотехника, 2010.– 680 с.
8. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Карпов О.А., Титов М.П. Однопроходный интерферометр при переднебоковом обзоре // Радиотехника. 2014. №7.
9. Ефимов А.В., Карпов О.А., Криштопов А.В., Толстов Е.Ф. Синтезирование апертуры антенны при переходе к сверхширокополосным зондирующим сигналам // Радиотехника. 2012. №10.
10. Ефимов А.В., Кудря А.И., Толстов Е.Ф. Алгоритмы обработки сигналов всверхширокополосных РСА // Цифровая обработка сигналов в РСА / Под ред. Е.Ф. Толстова. – Смоленск: Изд. ВА ВПВО ВС РФ, 2005.
11. Бабокин М.И., Ефимов А.В. Организация бистатического радиолокационного комплекса со сверхширокополосными зондирующими сигналами для обнаружения подповерхностных объектов // Передача, обработка и отображение информации о быстропротекающих процессах: сборник трудов Всероссийской научно-технической школы-семинара. – М.: Изд. РАН, 2010.
12. Hellsten H. CARABAS – An UWB Low Frequency SAR // Military Technology, 5, 1994.
13. Ender J.H.G., Brenner A.R. PAMIR – A Wideband Phased Array SAR/MTI System // Proceedings of EUSAR 2002. Cologne, Germany, June 4–6, 2002.