

Анализ положения дел в области создания сверхширокополосных РСА

А.В. Ефимов

АО «АЭРОКОН», 140187, г. Жуковский, Московская область, ул. Жуковского, д.1
E-mail: alexef733@mail.ru

В докладе рассматриваются проблемы и перспективы создания радиолокаторов с синтезированием апертуры антенны (РСА), использующих сверхширокополосные сигналы. Показаны информационные преимущества сверхширокополосных (СШП) радиолокаторов, использующих Р-диапазон, перед традиционными узкополосными системами. Рассмотрены особенности построения СШП радиолокаторов и технические проблемы, встающие перед разработчиками.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры антенны (РСА), сверхширокополосные сигналы, сверхширокополосный радиолокатор, пространственное разрешение, радиолокационное изображение

Analysis of the state of affairs in the field of creating ultra-wideband SAR

A.V. Efimov

JSC «Aerocon», Zhukovsky

In this report are considered problems and prospects of development of synthetic aperture radar (SAR) using ultra wide band (UWB) signals. Information advantage of UWB radar, using P-band, is shown before traditional narrow-band system. They are considered particularities of the building UWB radar and technical problems, getting up before developer.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR), ultra-wideband signals, ultra-wideband radar, spatial resolution, radar image

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 существующих 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]. 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 узкополосных РСА (бистатическому режиму, интерферометрическому режиму, режиму оценки топографического рельефа местности, поляризационному 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.



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

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.

Но это направление получило развитие в области создания геолокаторов, которые предназначены для обнаружения объектов на заглублениях от единиц до десятков метров и относятся к сверхкороткоимпульсной видеолокации (СКИВЛ). 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 позволяет рассматривать их как возможные прототипы при дальнейшей 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 и т.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 (VHF)	P (70 см)	0,430–0,440	68,2–69,8	10
УВЧ (UHF)	L (24 см)	1,215–1,24	24,2–24,7	25
СВЧ (SHF)	S (10 см)	3,1–3,3	9,09–9,68	200
– " –	C (5,6 см)	5,25–5,35	5,61–5,714	100
– " –	C (5,3 см)	5,65–5,725	5,24–5,3	75
– " –	X (3,4 см)	8,5–9,0	3,33–3,53	500
– " –	X (3,2 см)	9,2–9,3	3,22–3,26	100
– " –	X (3 см)	9,5–10,5	2,86–3,16	1000
– " –	Ku (2 см)	13,4–14,0	2,142–2,238	600
– " –	Ku	15,7–17,3	1,73–1,91	1600
– " –	K (1,2 см)	24,05–24,25	1,22–1,33	200
КВЧ (EHF)	Ka (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 внутримпульсной модуляцией и сверхкороткоимпульсных (СКИ) сигналов.

В свою очередь технология СКИ сигналов распалась на два направления:

- сверхкороткоимпульсная радиолокация длинноволнового (метрового) диапазона;
- 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 Δ_f 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 Δ_f и центральной частотой f_0 . Напомним, что в традиционных узкополосных РСА ширина полосы зондирующего сигнала Δ_f связана с разрешающей способностью по дальности:

$$\rho_r = (c/2)/\Delta_f = 150/\Delta_{f[\text{МГц}]}$$

Корректнее было бы Δ_f 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. 2.

Здесь представлена зависимость удельных потерь (дБ/м) энергии радиоволн в зависимости от частоты.

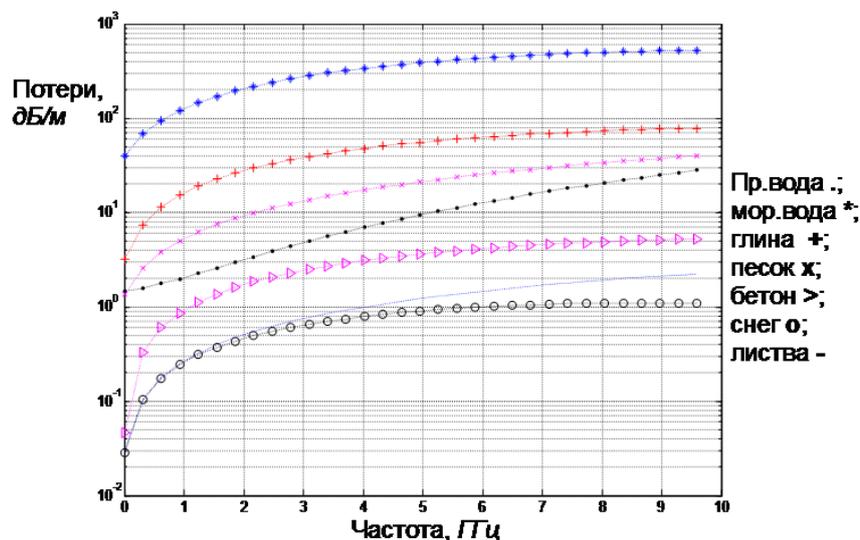


Рис. 2. Удельные потери при распространении радиоволн в плотных природных средах

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 – P -диапазон. Это прежде всего связано с тем, что при использовании P -диапазона (длина волны 70 см) или метрового диапазона (длина волны $1,5 \dots 3 \text{ м}$) 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 м 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 м в песчаных и глинистых грунтах различной влажности. Здесь приняты следующие обозначения: ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды, σ – удельная проводимость; c – скорость распространения электромагнитного излучения в среде; Γ_t и Γ_n – пропускная способность границы раздела атмосферы с данной средой при угле падения 45 градусов для различных поляризаций падающего излучения.

Таблица 2. Характеристики различных сред и видов почвы

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	$(5 \dots 9) \times 10^{-4}$	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

Таблица 3. Действительная составляющая относительной диэлектрической проницаемости и коэффициент затухания излучения на длине волны 1 м 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 слой 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 ($W > 5\%$); 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.

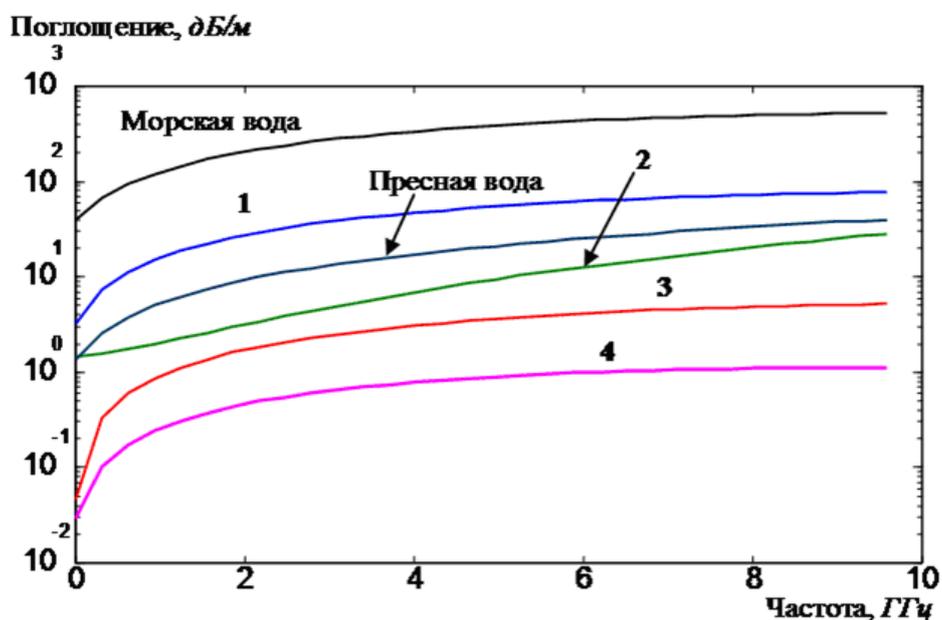


Рис. 3. Зависимость коэффициентов поглощения (дБ/м) в воде и грунте от частоты (ГГц)

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
$\gamma, \text{дБ/м}$ ($\lambda = 3 \text{ см}$)	100	20	1	1000	1,2
$\gamma, \text{дБ/м}$ ($\lambda = 70 \text{ см}$)	10	3	0,1	7	0,12
$\gamma, \text{дБ/м}$ ($\lambda = 3 \text{ м}$)	8	1	0,05	2	0,05

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.).

Но всё же наиболее перспективным и 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 со СШП сигналами. Проблема создания антенн связана с решением следующих специфических задач:

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

Для наиболее масштабного использования РЛС с СКИ необходимо решение основной задачи – повышение их энергетики. 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).

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.

В качестве примера уже существующей бортовой сверхнизкочастотной СШП РСА, можно привести РСА CARABAS-2 (Швеция) с рабочим диапазоном 20...90 МГц, которая использует зондирующие сигналы малой длительности. Эта станция, имея разрешающую способность по дальности 2 м и одну угловую минуту по азимуту, обеспечивает получение радиолокационных изображений земной поверхности и объектов, замаскированных листвой деревьев, а также обнаруживает цели в грунте на глубине до 5...10 м. [12]

Еще одним представителем семейства СШП РСА, использующих широкополосную фазированную антенную решетку, является авиационная РСА PAMIR (Германия) с разрешением 5 см и 8 см по дальности и азимуту соответственно, позволяющая получать РЛИ сельских и городских районов с высоким динамическим диапазоном до 70 дБ [13].

Что касается американских разработчиков авиационных СШП РСА, то здесь наиболее ярким представителем является РСА SANDIA (США), которая использует сигнал с шириной спектра от 125 до 950 МГц и разрешением по дальности 15 см [7].

Все перечисленные выше примеры говорят о том, что использование СШП сигналов в авиационных РСА обеспечивает им много положительных свойств и является весьма перспективным направлением дальнейшего развития не только авиационной, но и космической радиолокации.

Тем не менее, наряду с теорией синтезирования апертуры еще 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 синтезирования 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 синтезированием 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 в сверхширокополосных 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. РА 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.