

## Результаты экспериментальной оценки реально достижимых характеристик самолетной РСА

Д.т.н., профессор И.В. Сахно, к.т.н., с.н.с., А.Л. Ильин, К.И. Титов, А.В. Шульженко

Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург,  
[sh\\_av\\_45@mail.ru](mailto:sh_av_45@mail.ru)

*В работе представлены результаты экспериментальной оценки реально достижимых характеристик РСА X-диапазона серии «Компат» при использовании на самолетах типа АН-30. Разработан алгоритм синтеза радиолокационного изображения (РЛИ), позволяющий оценить погрешности. Входе летного эксперимента произведена оценка допустимого времени когерентной обработки сигнала. Показано, что при наличии ограничений на время когерентного накопления сигнала целесообразно использование некогерентного осреднения на интервале наблюдения цели в диаграмме направленности антенны РСА для снижения уровня флуктуаций РЛИ.*

*There are the results of experimental evaluation of practicable achievable specifications of X-band SAR series of "Kompas" when using them in planes AN-30 in this work. It was developed an algorithm for the synthesis of radar images (SAR images), which allow to estimate the error. During the flight experiment is was evaluated the permissible time of the coherent signal processing. It shows that the presence of constraints on the time of the coherent signal accumulation makes advisable to use non-coherent averaging in the interval of supervision of the purpose in the diagram of an orientation of the SAR aerial to decrease in level of fluctuations of RI.*

Эффективность использования радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) при решении прикладных задач определяется как потенциальными характеристиками самого радиолокатора, так и способностью его носителя и навигационной системы обеспечить необходимую степень когерентности сигнала [1] для реализации указанных характеристик. Авторами данной работы решалась конкретная практическая задача по экспериментальной оценке реально достижимой разрешающей способности РСА X-диапазона серии «Компат» при установке её на самолётный носитель типа АН-30.

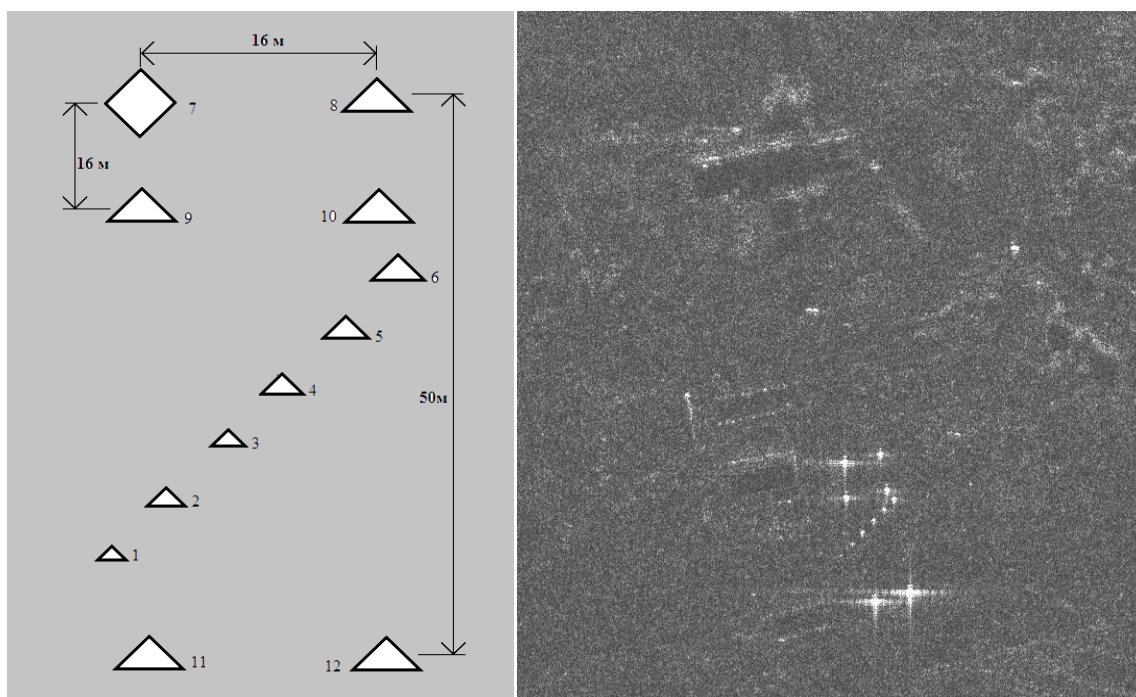
Для решения указанной задачи было необходимо разработать методику проведения натурного лётного эксперимента, создать тестовую мишенную обстановку в районе испытаний и разработать соответствующий алгоритм синтеза радиолокационного изображения (РЛИ), позволяющий поэтапно оценить погрешности, возникающие в ходе эксперимента.

### **1 Характеристики мишенной обстановки и радиолокационной аппаратуры**

С целью определения реального разрешения РСА, установленной на самолёте АН-30 для проведения лётного эксперимента в районе проведения испытаний была создана мишенная обстановка в виде радиолокационной миры, состоящей из набора уголкового отражателей с различной ЭПР. Схема размещения отражателей и их РЛИ представлены на рисунке 1 параметры отражателей представлены в таблице 1.

Таблица 1. Размеры и соответствующие значения ЭПР уголкового отражателей.

№ уголка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Длина ребра уголка, мм	162	223	288	290	333	393	500	550	512	550	1000	1000
ЭПР, м <sup>2</sup>	2,4	8,4	24,2	25,0	43,3	84,0		313	242	313		



**Рис. 1. Схема размещения уголковых отражателей и их РЛИ**

Основные параметры РСА «Компат», используемой при проведении данного эксперимента, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры РСА «Компат»

Характеристика	Значение
Длина волны	3.45 см
Ширина спектра зондирующего ЛЧМ сигнала	300 МГц
Частота квантования принятого ЛЧМ сигнала	400 МГц
Длительность зондирующего импульса	10 мкс
Расстояние между отсчётами по дальности	0.375 м
Минимальная дальность	4500 м
Количество отсчётов в импульсе	11776
Частота повторения зондирующих импульсов	500 Гц
Раскрыв антенны по уровню 3 дБ на прием-передачу	6°
Скорость носителя	107.6 м/с
Высота полёта носителя	3964 м
Расстояние между импульсами по азимуту	0.058 м
Пространственное разрешение	0.5x0.5м

## 2 Алгоритм формирования РЛИ

Для обработки всех этапов синтеза РЛИ авторами был выбран поэтапный алгоритм (рис. 2), который не является оптимальным с точки зрения скорости вычислений, однако позволяет получить последовательность контролируемых результатов на всех этапах его обработки:

- свёртка ЛЧМ сигнала по наклонной дальности;
- коррекция волнового фронта и устранение миграций голограммы в соседние каналы дальности;
- свёртка сигнала по азимуту и формирование РЛИ.

Сжатие сигнала по дальности и азимуту осуществлялось в частотной области. Обработка алгоритма синтеза реальных РЛИ проводилась авторами в среде Matlab-7.

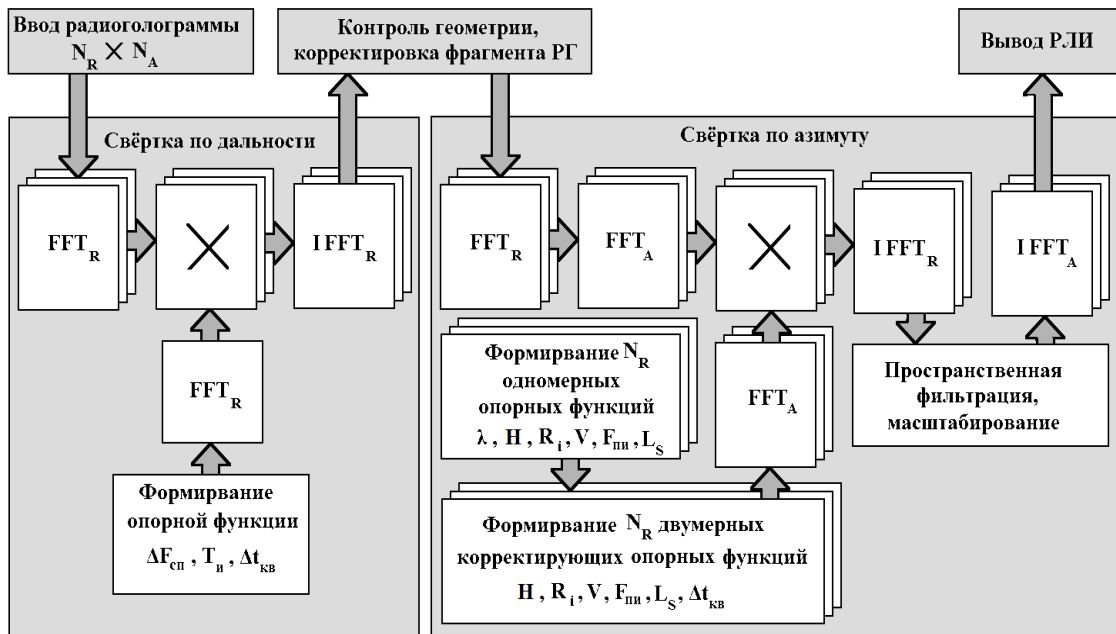


Рис. 2. Алгоритм обработки синтеза РЛИ

Как известно [2], принятый ЛЧМ сигнал, отраженный от одиночной точечной цели, находящейся на дальности  $r$ , есть

$$u(t) = A \cdot \exp \left\{ j2\pi \left[ f_0 \left( t + \frac{2r}{c} \right) + \frac{\Delta f}{\tau} \left( t + \frac{2r}{c} \right)^2 \right] \right\} \quad (1)$$

где  $A$  - амплитуда сигнала,  $f_0$  - несущая частота,  $\Delta f$  - ширина спектра ЛЧМ сигнала,  $\tau$  - длительность импульса,  $\frac{2r}{c}$  - временная задержка.

На выходе фазового детектора РСА принятый сигнал будет иметь вид:

$$u(t) = A \cdot \exp \left\{ j2\pi \frac{\Delta f}{\tau} \left( t + \frac{2r}{c} \right)^2 + j\varphi(r) \right\} \quad (2)$$

где первая часть фазового члена есть задержанный на время  $\frac{2r}{c}$  ЛЧМ импульс, а  $\varphi(r) = 4\pi f_0 r / c$  есть фаза принятого сигнала с дальности  $r$ .

Можно показать, что если для свёртки ЛЧМ импульса использовать опорную функцию вида:

$$u(t) = \exp \left\{ j2\pi \frac{\Delta f}{\tau} t^2 \right\}, \quad (3)$$

то отметка цели после свёртки будет сформирована на дальности  $r$ , а её ширина есть  $\Delta r = c / 2\Delta f$ .

Для отработки алгоритма сжатия сигнала по дальности была выбрана опорная функция вида (3) длиной  $10 \text{ мкс} * 300000000 \text{ м/с} / (2 * 0.375 \text{ м}) = 4000$  отсчётов. Сжатие сигнала производилось в частотной области с использованием алгоритма БПФ.

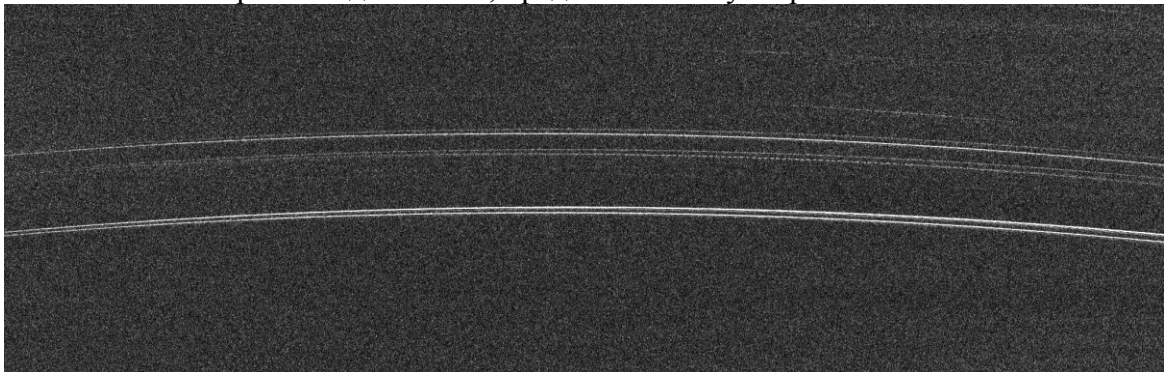
Поскольку при наблюдении цели дальность до неё  $r = \sqrt{R^2 + x^2}$  есть функция азимутальной координаты носителя  $x$  и расстояния до цели на траверзе  $R$ , то фаза принятого сигнала  $\varphi(r) = 4\pi f_0 r/c$ , входящая в выражение (2), также является функцией  $x$ , что обеспечивает формирование голограммы по азимуту.

В то же время очевидно и то, что если изменение величины  $r-R$  превышает величину дискрета голограммы по дальности, то сигнал будет зарегистрирован в соседних каналах дальности. Поскольку сжатие голограммы по дальности производилось в частотной области, то величина дискрета как до, так и после свёртки осталась равной  $\Delta r = 0.375 \text{ м}$  при разрешающей способности  $\delta r = 0.5 \text{ м}$ .

Расчёт максимальной величины миграции на краях диаграммы направленности антенны был произведён для минимальной  $R_{min} = 4500 \text{ м}$  и максимальной  $R_{max} = 4500 + 11776 * 0.375 = 8916 \text{ м}$  дальностей.

При этом максимальное количество каналов миграции в соответствии с данными таблицы 2 есть  $N_M = R(\frac{1}{\cos 3^\circ} - 1)/\Delta r$  и равно 16 для минимальной  $R_{min} = 4500 \text{ м}$  дальности и, соответственно 32 для максимальной  $R_{max} = 8916 \text{ м}$  дальности.

Указанные соотношения были проверены по изображению голограммы мишенной обстановки после свёртки по дальности, представленному на рис. 3.



**Рис. 3. Голограмма мишенной обстановки после свёртки по дальности**

Благодаря тому, что ряд уголкового отражателя имел достаточно высокую ЭПР, их отметки и миграция элементов дальности хорошо прослеживаются на представленном изображении. Данное изображение позволило уточнить геометрию наблюдения и траекторные параметры носителя РСА.

Выбор способа сжатия сигнала по азимуту был основан на следующих соображениях. При реализации алгоритма преобразования Френеля во временной области величина дискрета по азимуту на РЛИ равна величине элемента разрешения  $\delta a = \frac{\lambda R}{2L_s}$  и может быть выбрана близкой к  $\delta r = 0.5 \text{ м}$  для достижения равномерности изображения. Однако, поскольку диапазон изменения дальностей достаточно велик, то для обеспечения одинакового масштаба на разных дальностях  $R$  это потребует постоянного изменения интервала синтезирования  $L_s$ , что крайне неудобно.

В свою очередь преобразование Френеля в частотной области позволяет получить величину дискрета по азимуту  $\Delta x = 0.058 \text{ м}$  во всех каналах дальности, однако эта величина более, чем в 6 раз меньше, чем величина дискрета по дальности  $\Delta r = 0.375 \text{ м}$ , и в 8.6 раза меньше, чем величина элемента разрешения  $\delta a = \delta r = 0.5 \text{ м}$ . Это требует дальнейшего выравнивания масштаба на РЛИ. Тем не менее, данный алгоритм

предпочтительнее, чем преобразование Френеля во временной области в силу постоянства масштаба формируемого изображения на различных дальностях R.

Для выбора величины интервала синтезирования определим ширину диаграммы направленности антенны  $\Theta R$  на минимальной, максимальной и средней дальности, а также разрешение по азимуту при интервалах синтезирования 8192 и 4096 отсчётов.

Таблица 3. Разрешающая способность для различных значений дальности.

Наклонная дальность, м	$\Theta R$ , м	$\delta a$ , м	
		$N_s = 8192, L_s = 475\text{м}$	$N_s = 4096, L_s = 238\text{м}$
$R_{min} = 4500$	472	0.16	0.32
$R_{cp} = 6700$	703	0.24	0.48
$R_{max} = 8916$	943	0.32	0.62

Исходя из данных, представленных в таблице 3, наиболее рациональным является выбор  $N_s = 4096, L_s = 237\text{м}$ , обеспечивающий в диапазоне рабочих дальностей разрешение, близкое к 0.5 м.

В соответствии с данным алгоритмом при синтезировании радиоголограммы по азимуту по 4096 отсчётам было получено РЛИ, представленное на рис. 1. При этом регистрировалась амплитуда сигнала. Указанный интервал когерентного накопления должен был обеспечить разрешение по азимуту близкое к 0.5 м.

### 3 Результаты эксперимента

Для оценки реального разрешения РСА были выбраны РЛИ уголкового отражателя, находящихся в центре и на краях радиолокационной миры. Их характеристики ЭПР и положения на РЛИ сведены в таблицу 4.

Таблица 4. Характеристики уголкового отражателя.

Номер отражателя	ЭПР, $\text{м}^2$	Длина ребра, м	Наклонная дальность, м	Номер отсчёта на РЛИ
8	313	550	6665	40
3	24,2	288	6693	117
12		1000	6718	184

Для всех трёх отражателей была произведена оценка разрешающей способности по ширине отклика на РЛИ на уровне 0.7. В качестве иллюстрации на рисунках 4 и 5 показаны сечения РЛИ по дальности и азимуту для среднего уголкового отражателя (№ 3). Исходя из масштаба РЛИ, оценка разрешения по обеим координатам для всех трёх отражателей составила 0.5 м. При этом физически размеры дальнего уголка соответствовали величине разрешения 0.5 м, но превышали масштаб по дальности 0.375м, а размеры ближнего уголка в 2 раза превышали величину элемента разрешения и почти в три раза превышали расстояние между отсчётами по дальности. Несмотря на это их сжатие по азимуту было достаточно успешным.

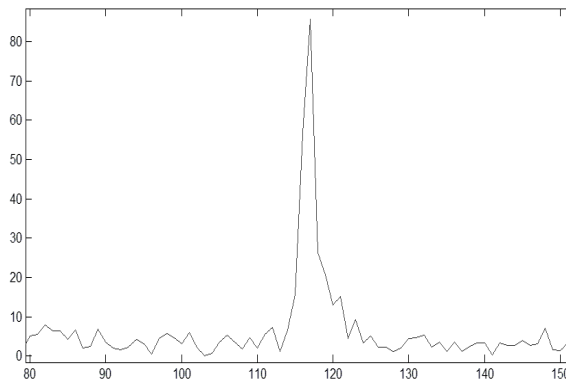


Рис. 4. Сечение РЛИ по дальности

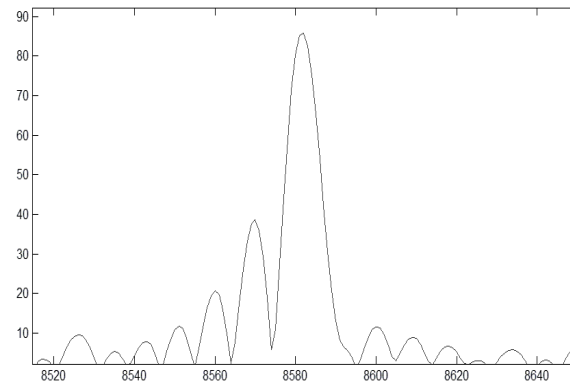


Рис. 5. Сечение РЛИ по азимуту

Параллельное проведение имитационного моделирования показало, что при выборе только одной опорной функции, сфокусированной на дальность, соответствующую среднему уголкового отражателю, разрешение для крайних уголков для данных условий синтеза ухудшается не более, чем на 3-4%. При этом для дальнего уголка, где крутизна волнового фронта меньше, это ухудшение менее значимо.

Зависимость разрешения по азимуту от времени когерентного накопления сигнала проверялось для среднего уголка при точной фокусировке опорной функции. На рис. 6 показаны сечения его РЛИ для различного количества когерентно накапливаемых импульсов (2048, 4096, 8192).

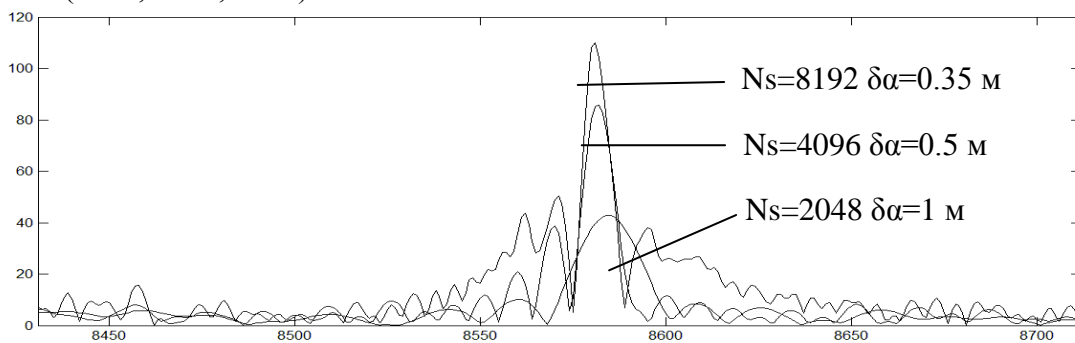
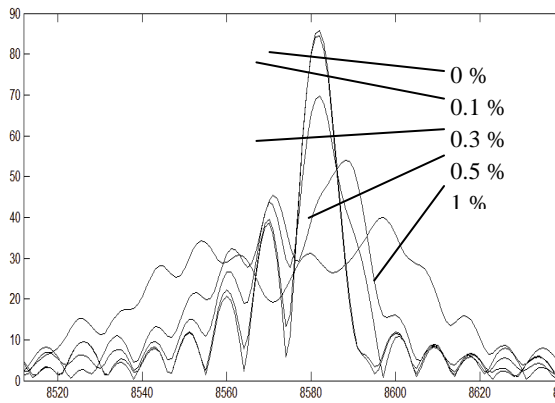


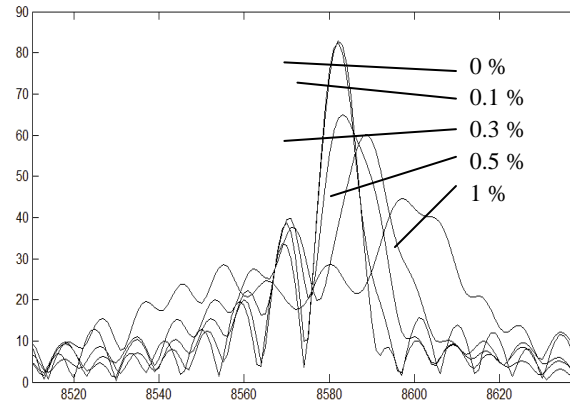
Рис. 6. Сечения РЛИ по азимуту для различных  $N_s$

При накоплении 2048 и 4096 импульсов ширина отклика соответствует расчётному значению разрешающей способности 1м и 0,5м соответственно. Для разрешения 0,5м интервал синтезирования составил 237м, что соответствует полётному времени 2.2с. При накоплении 8192 импульсов ширина отклика составила 0.35м. Последовательное изменение параметров опорной функции к улучшению разрешения не привёл, что приводит к выводу о разрушении когерентности сигнала за счёт траекторных нестабильностей носителя. При накоплении 16384 отметка цели начинает разрушаться. Указанное разрешение 0.35м соответствует интервалу синтезирования 330м или времени накопления сигнала 3с, что позволяет оценить степень флюктуаций сигнала при использовании самолёта АН-30 в качестве носителя РСА.

В ходе эксперимента по РЛИ отражателя № 3 проверялось влияние ошибки измерения скорости носителя на ширину отклика цели. На рисунках 7 и 8 показаны сечения РЛИ в азимутальной плоскости при уменьшении и увеличении значения скорости относительно истинного значения на 0.1, 0.3, 0.5 и 1%. Из анализа представленных рисунков следует, что ошибка в измерении величины скорости 0.1% (0.1 м/с) практически не приводит к ухудшению разрешения при разрешении 0.5 м.



**Рис. 7. Уменьшение значения скорости**



**Рис. 8. Увеличение значения скорости**

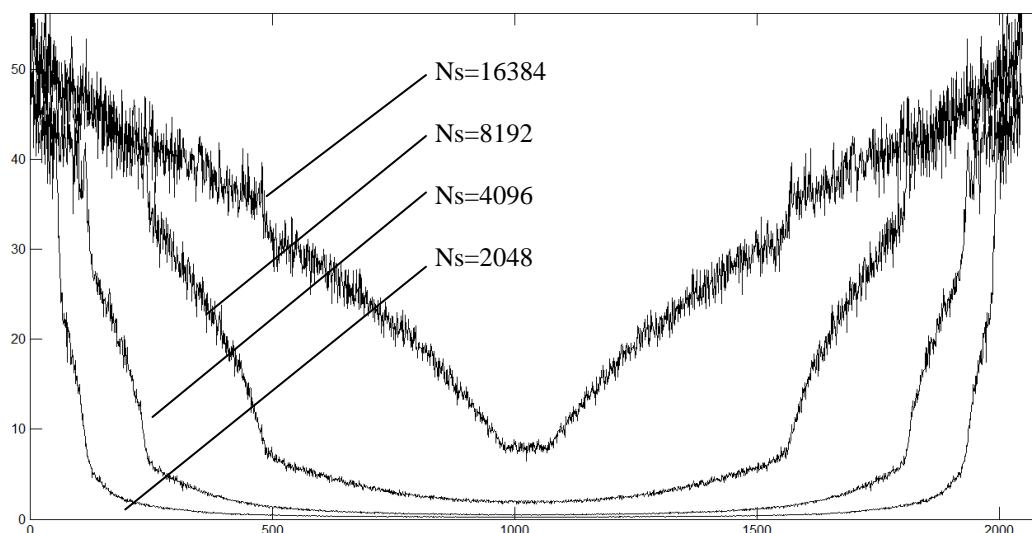
Как уже было показано, требуемое разрешение по азимуту 0.5м достигается для условий эксперимента при 4096 когерентно накапливаемых импульсов. При этом ширина диаграммы направленности антенны позволяет произвести обработку 16384 импульсов, что позволяет произвести некогерентное осреднение 4 независимых реализаций сигнала. Как известно [3], интервал пространственной корреляции флюктуаций фона определяется величиной интервала синтезирования и не зависит от степени когерентности принятого сигнала. Поэтому указанное некогерентное осреднение должно привести к нормализации закона распределения амплитуды РЛИ и сглаживанию флюктуаций фона.

С целью проверки данного положения по оптическому изображению (рисунок 9) рядом с радиолокационной мишенью (светлый прямоугольник) был выбран покрытый травой достаточно однородный участок фона (тёмный прямоугольник).



**Рис. 9. Оптическое изображение эталонного участка**

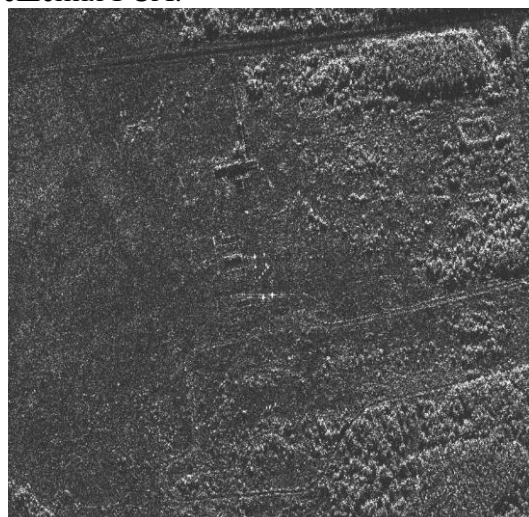
Были сформированы ряд РЛИ фонового участка без некогерентного осреднения при различных интервалах синтезирования (2048, 4096, 8192 и 16384 отсчётов). Построены соответствующие пространственные спектры амплитуды РЛИ по азимуту, осреднённые по 128 реализациям (рис. 10).



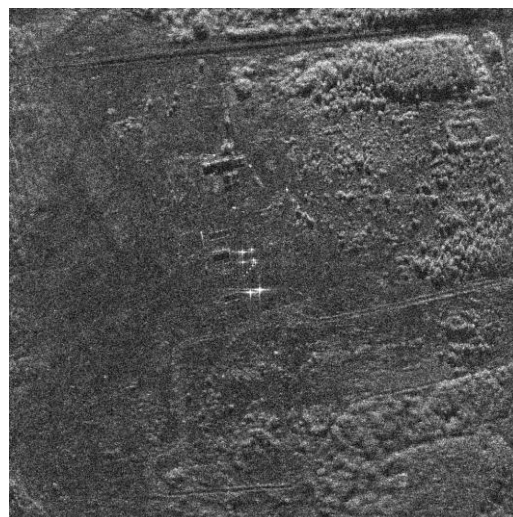
**Рис. 10. Пространственные спектры амплитуды РЛИ фона**

Из представленных графиков видно, что ширина спектра пространственных флюктуаций фона прямо пропорциональна интервалу синтезирования и не ограничена временем когерентности сигнала, определённого ранее по РЛИ уголкового отражателя.

Указанное обстоятельство позволяет в условиях частичной когерентности сигнала преодолеть естественное противоречие между пространственным и радиометрическим разрешением [4]. Т.е. время когерентной обработки должно быть выбрано в пределах времени когерентности сигнала, что обеспечивает разрешение, близкое к потенциально достижимому. При этом запас времени наблюдения цели, определяемый шириной ДН антенны целесообразно использовать для некогерентного осреднения РЛИ, что приводит к сглаживанию флюктуаций фона и улучшению радиометрического разрешения РСА.



**Рис. 11. РЛИ без осреднения**



**Рис. 12. РЛИ при осреднении 4 отсчётов.**

Для иллюстрации данного эффекта было проведено синтезирование РЛИ по 16384 отсчётам, а сглаживание флюктуаций фона обеспечивалось путём пространственной фильтрации амплитуды РЛИ в спектральной области, как это показано на структурной схеме алгоритма (рис. 2). Была использована гауссовская форма фильтра пространственных частот шириной, соответствующей величине элемента разрешения



0.5м . На рис. 11 и 12 представлены РЛИ без некогерентного осреднения и при осреднении 4 отсчётов по азимуту. Анализ приведённых РЛИ свидетельствует о заметном снижении флюктуаций фона.

### **Заключение**

Эффективность использования РСА при решении прикладных задач целесообразно рассматривать в системе радиолокатор – носитель – условия наблюдения. В ходе лётного эксперимента произведена оценка реально достижимой разрешающей способности РСА X-диапазона серии «Компат» при установке её на самолётный носитель типа АН-30.

С целью решения данной задачи разработана методика проведения натурного лётного эксперимента, создана тестовая мишенная обстановка в районе испытаний и разработан соответствующий алгоритм синтеза радиолокационного изображения, позволяющий поэтапно оценить погрешности, возникающие в ходе эксперимента.

Произведена экспериментальная оценка допустимого времени когерентной обработки сигнала при использовании в качестве носителя самолёта типа АН-30. Установлено, что на заданных дальностях в X диапазоне реально достигается разрешение 0.35м вдоль линии пути. Показано, что при наличии ограничений на время когерентного накопления сигнала целесообразно использование некогерентного осреднения на интервале наблюдения цели в диаграмме направленности антенны РСА для снижения уровня флюктуаций РЛИ.

В ходе натурного эксперимента произведена оценка допустимой погрешности измерения путевой скорости носителя. Установлено, что при заданных условиях синтеза указанная погрешность не должна превышать 0.1 % (0.1 м/с).

### **Литература**

1. А.Л.Ильин, А.Я.Пасмуров Характеристики РЛС с синтезированной апертурой при наблюдении флюктуирующих объектов. Известия ВУЗов, Радиоэлектроника. 1989. №2, С.65-68.
2. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. 2005. 368 с.
3. А.Л.Ильин, Г.В.Корсунов, М.Н.Маров Корреляционные характеристики изображений земной поверхности, получаемых радиолокатором с синтезированной апертурой. Радиотехника и электроника. 1987. Т.XXXII, № 11. С.2332-2341.
4. Moore R.K. Trade-off between Picture Element Dimension and Noncoherent Averaging in Side-Looking Airborne Radar. IEEE Trans. 1979.v.AES-15. № 5.p.697-708.