

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ИСКАЖЕНИЯ ТРАЕКТОРНЫХ СИГНАЛОВ В БОРТОВОМ РАДИОЛОКАТОРЕ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Ю. В. Петров, А. Н. Бызов, Н. Ю. Петров, С. А. Южно

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова*

Поступила в редакцию 20.01.2015 г.

**Аннотация.** Статья посвящена исследованию влияния различных факторов, вызывающих искажения траекторных сигналов, на качество изображений бортового радиолокатора высокого разрешения. Рассмотрены нестабильности движения летательного аппарата и характеристик среды распространения сигналов, ошибки измерения навигационных параметров летательного аппарата и обработки сигналов, а также аппаратные ошибки. Проведен анализ влияния фазовых искажений траекторного сигнала на такие параметры радиолокационных изображений как максимальная амплитуда, положение максимума, ширина главного лепестка, уровень первого бокового лепестка по отношению к главному лепестку.

Проанализирован «бюджет» фазовых искажений траекторного сигнала. Сделан вывод, что наибольший вклад вносят траекторные нестабильности, упругие колебания корпуса носителя и ошибки измерителей параметров движения летательного аппарата. Суммарное среднеквадратическое отклонение фазовых искажений может достигать десятков и сотен градусов. Их необходимо снижать до уровня 10–15°. Для этого надо измерять реальную траекторию движения фазового центра антенны с помощью специальных систем микронавигации. Получены зависимости максимально допустимых ошибок измерения навигационных параметров от интервала синтеза и требуемой разрешающей способности радиолокатора.

**Ключевые слова:** бортовой радиолокатор, траекторный сигнал, высокое разрешение, дестабилизирующие факторы, траекторные нестабильности, упругие колебания корпуса, фазовые искажения, радиолокационное изображение, микронавигация.

**Annotation.** The article is devoted to research of influence of various factors causing distortion of the trajectory signals, the image quality on-Board high resolution radar. Considered unstable movement of aircraft and the characteristics of the medium of propagation of signals, the measurement error of the navigation parameters of the aircraft and signal processing, and hardware errors. The analysis of the influence of the phase distortion of the trajectory of the signal parameters such radar images as the maximum amplitude, the position of the maximum width of the main lobe, the level of the first side lobe relative to the main lobe.

Analyzed budget phase distortion of the trajectory of the signal. It is concluded that the greatest contribution of the trajectory instability, the elastic oscillations of the body of the carrier and errors of measuring motion parameters of the aircraft. The total standard deviation of the phase distortion can reach tens and hundreds of degrees. They must be reduced to a level of 10–15°. For this purpose it is necessary to measure the real trajectory of the phase center of the antenna by using special systems micronavigation. The dependences of the maximum permissible error of measurement navigation parameters from the interval synthesis and the desired resolution of the radar.

**Keywords:** the on-Board radar, trajectory signal, high resolution, destabilizing factors, the trajectory instability, the elastic oscillations of the housing, phase distortion, radar image, micronavigation.

В реальных условиях работы бортового радиолокатора с синтезированной апертурой антенны имеют место искажения траекторного сигнала, вызванные различными дестабилизирующими факторами. К ним относятся нестабильности движения ЛА, среды распространения радиоволн, аппаратные ошибки, ограничение динамического диапазона приемника, флуктуации при переотражениях облучаемых объектов, ошибки измерения навигационных параметров.

### **НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

При полете самолета в атмосфере происходит непрерывное изменение направления и скорости ветра, давления и плотности воздуха и т. п., в связи с чем возникают случайные отклонения режима полета самолета от заданного. Система управления самолета, с одной стороны, не всегда успевает реагировать на все эти изменения и поддерживать заданный режим полета, с другой – сама вносит элементы случайности в движение самолета. Наиболее характерным примером в этом отношении являются ошибки пилотирования со стороны летчика. Всякие случайные отклонения от заданного режима полета принято называть траекторными нестабильностями (ТН). К ним относят также угловые колебания самолета, случайные изменения модуля и направления вектора скорости и т. д.

Траекторные нестабильности представляют собой реакцию самолета как жесткого тела на воздействие турбулентной атмосферы и шумов системы управления. Вместе с тем следует иметь в виду, что конструкция самолета является гибкой. Упругие смещения элементов конструкции самолета под действием аэродинамических сил при полете в турбулентной атмосфере называют упругими колебаниями конструкции (УКК). В реальных условиях полета ТН и УКК, проявляясь одновременно, вызывают случайные отклонения траектории фазового центра антенны от опорной (расчетной). В определенной мере случайные отклонения от заданного режима полета присущи всем ЛА.

С ростом интенсивности ТН и УКК ухудшается разрешающая способность РСА по азимуту, увеличиваются ошибки в определении положения объектов, сужается динамический диапазон сигнала РЛИ. В некоторых случаях изображение может быть полностью разрушено.

### **НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ**

В реальных условиях работы РСА среда распространения вносит случайные, в основном фазовые, изменения в электромагнитную волну, нарушающие когерентность траекторного сигнала. Эти изменения могут быть учтены в виде случайной составляющей импульсной переходной характеристики.

На фазовые изменения траекторного сигнала также оказывает влияние изменение параметров тропосферы. Изменением показателя преломления тропосферы во времени можно пренебречь, поскольку время корреляции флуктуации составляет 20...100 с, что меньше времени синтезирования.

### **АППАРАТНЫЕ ОШИБКИ**

Так как истинно когерентные РСА обладают рядом преимуществ по сравнению с псевдокогерентными, поэтому чаще используют именно истинно когерентные РСА. Обеспечение когерентности тракта РСА при этом предъявляет высокие требования к опорному генератору. Случайный процесс фазовых нестабильностей опорного генератора, обусловленный незначительным уходом частоты генератора за время синтезирования (единицы секунд), можно считать нормальным случайным процессом. Чем ниже частота фазовых флуктуации опорного генератора, тем меньше вклад низкочастотных флуктуации в СКО флуктуации фазы приемопередающего тракта. Однако опорные генераторы имеют спектральную плотность фазовых шумов колебаний, возрастающую с уменьшением частоты, что требует учета всех спектральных составляющих фазовых шумов опорного генератора.

Наиболее сильно фазовые искажения влияют на интегральный уровень боковых лепестков выходного сигнала точечной цели (функции неопределенности), от которого в значительной степени зависит возможность обнаружения малоразмерных целей на фоне земной поверхности.

Поскольку нарушение когерентности приемопередающего тракта является лишь одной из причин фазовых флуктуации траекторного сигнала, то допустимая величина СКО флуктуации фазы приемопередатчика обычно не должна превышать нескольких градусов.

У современных опорных генераторов интервал корреляции фазовых нестабильностей обычно много меньше времени синтезирования (быстрые нестабильности), а СКО нестабильностей фазы составляет  $3...10^\circ$ .

## **ОШИБКИ ПРИ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ**

Существуют ошибки аппроксимации в алгоритмах обработки. Влияние этих ошибок зависит от сложности алгоритмов аппроксимации. Обычно, чем сложнее алгоритм, тем он надежнее, но при этом тратится больше вычислительных ресурсов.

### **ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ**

Ошибки измерения составляющих скорости и ускорения носителя по осям НСК приводят к ошибкам при вычислении тангенциальной скорости, радиальной скорости и ускорения движения ФЦА.

Основными параметрами неискаженного выходного сигнала являются:

1. Максимальная амплитуда;
2. Положение максимума, которое определяется азимутом объекта;
3. Ширина главного лепестка, которая определяет разрешение по азимуту;
4. Уровень первого бокового лепестка по отношению к главному лепестку.

Искажения траекторного сигнала, вызванные различными дестабилизирующими факторами, могут быть как амплитудными, так и фазовыми, и вызывают, в конечном счете,

искажения получаемого радиолокационного изображения (РЛИ).

Амплитудные искажения траекторного сигнала обусловлены, в основном, ошибками стабилизации диаграммы направленности антенны и измерением эффективной площади рассеяния цели за время синтезирования. Они носят медленный характер, и их влияние эквивалентно изменению весовой функции системы обработки. Обычно амплитудные флуктуации траекторного сигнала за время синтезирования невелики и их влиянием можно пренебречь.

К фазовым искажениям, в основном, приводят нестабильности: распространения радиоволн, приемопередающего тракта и систем обработки, а также движения ЛА. Наибольший вклад вносят траекторные нестабильности, упругие колебания корпуса носителя РСА и ошибки измерителей параметров движения ЛА. Суммарное среднеквадратическое отклонение фазовых искажений от них может достигать десятки и сотни градусов, поэтому основной задачей при получении высокого разрешения становится снижение ошибок оценивания параметров траектории движения ТПА.

Следствием фазовых искажений траекторного сигнала являются изменение следующих параметров РЛИ:

I. Смещение максимума, что приводит к ошибкам измерения координат объекта и искажению радиолокационного изображения местности.

II. Уменьшение максимума выходного сигнала, что равносильно снижению энергетического потенциала РЛС.

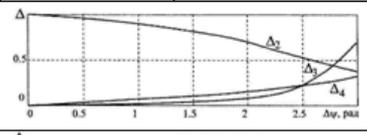
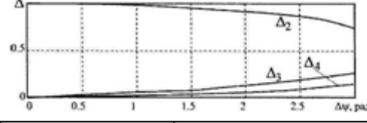
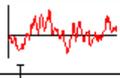
III. Расширение главного лепестка, что ухудшает разрешающую способность.

IV. Увеличение уровня боковых лепестков, что снижает контраст РЛИ.

Перечисленные искажения изображения выражаются функциональной зависимостью основных параметров выходного сигнала РСА от характеристик искажений траекторного сигнала. Фазовые искажения могут быть функциями регулярными и случайными, медленно или быстро изменяющимися в течение времени синтезирования, возможны также

Таблица 1

Анализ влияния фазовых искажений траекторного сигнала на параметры изображений

		I $\Delta_1$	II $\Delta_2$	III $\Delta_3$	IV $\Delta_4$	Условные рисунки
Регулярные	Линейные С1	$\Delta_1 = \frac{c_1 T_c}{2\pi}$	-	-	-	
	Квадратические С2	-				
	Кубические С3	$\Delta_1 = \frac{0,6c_1 T_c}{4\pi}$				
Случайные	Некоррелированные	Смещение максимума находится в пределах 20..25%	Уменьшение максимума не превышает 20%	Расширение главного лепестка составляет >1%	Увеличение уровня боковых лепестков находится в пределах 20..50%	
	Коррелированные	В случае случайного коррелированного искажения фазы показатели уменьшаются в $\sqrt{1-r(T_c)}$ раз. Например: при $r(T_c)=0,9$ примерно в 2,3 раза				
Периодические	Медленные	$\Delta_1 = c_{\psi} f_{\psi} T_c$	-	-	-	
	Быстрые	-	-	-	$\Delta_4 = \frac{4c_{\psi}}{(4-c_{\psi}^2)^2}$	

периодические функции как следствие механических вибраций или электрических наводок. Анализ влияния фазовых искажений траекторного сигнала на параметры изображений сведены в табл. 1.

**“БЮДЖЕТ” ФАЗОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ ТРАЕКТОРНОГО СИГНАЛА**

Как было показано выше, нестабильность движения ЛА приводит к нарушению оптимальности обработки отраженных сигналов. Тропосферные неоднородности имеют пространственный интервал корреляции порядка 50...100 м, при этом СКО фазовых искажений составляет единицы градусов.

Фазовые нестабильности приемопередающего тракта зависят от метода обеспечения когерентности. В целом, путем стабилизации частоты опорных генераторов и повышения стабильности фазовых характеристик приемного устройства и устройства обработки СКО

фазовых искажений, вызванное аппаратурными флуктуациями, также может быть доведено до единиц градусов. Для снижения ошибок аппроксимации в алгоритмах обработки необходимо разрабатывать и применять более сложные алгоритмы обработки. Флуктуации при переотражениях облучаемых объектов составляют единицы градусов. СКО фазовых искажений, вызванное ТН и УКК носителя РСА и ошибками датчиков движения ЛА, может достигать десятков и сотен градусов, а следовательно требует более подробного рассмотрения. Для оценки вклада отдельных составляющих фазовых искажений в суммарную ошибку качественно отразим полученные результаты диаграммой (рис. 1). Как видно из рисунка, существенный вклад в суммарную фазовую ошибку вносят траекторные нестабильности (с УКК) и ошибки измерений навигационных параметров. Эти ошибки необходимо снижать до уровня остальных составляющих, т. е. до 10–15°.

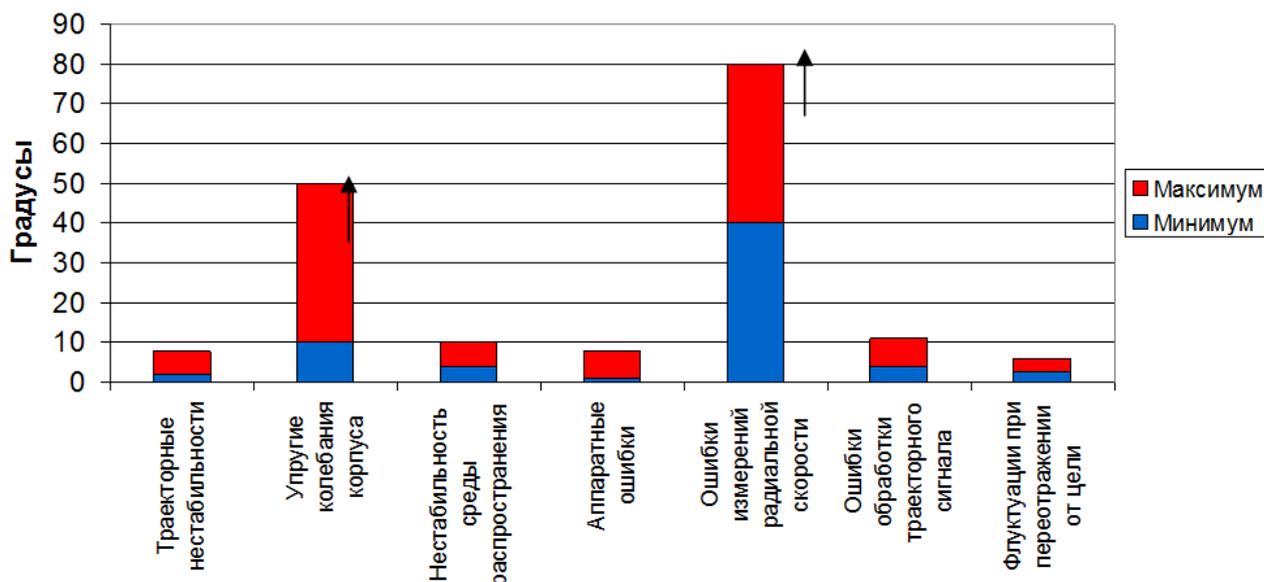


Рис. 1. Вклад отдельных составляющих фазовых искажений в суммарную фазовую ошибку

### АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТРАЕКТОРНЫХ НЕСТАБИЛЬНОСТЕЙ И УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ КОРПУСА НА ФАЗОВЫЕ ИСКАЖЕНИЯ ТРАЕКТОРНОГО СИГНАЛА

Эти факторы вызывают отклонение траектории фазового центра антенны (ФЦА) от опорной (расчетной), что приводит к фазовым искажениям траекторного сигнала, которые имеют вид (рис. 2)

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta R}{\lambda}, \text{ где } \Delta R = \sigma \cos \beta. \quad (1)$$

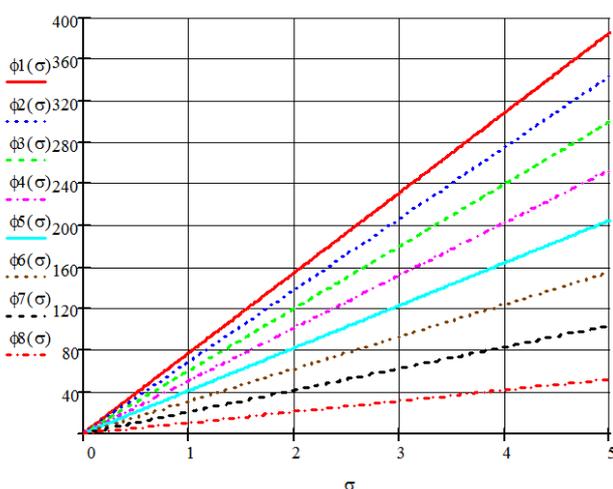


Рис. 2. Графики зависимости фазовых искажений  $\varphi$  (градусы) от среднеквадратического отклонения упругих колебаний корпуса  $\sigma$  (см) при различных углах обзора

Из графиков следует, что даже при больших углах обзора и малых СКО упругих колебаний корпуса фазовые искажения очень существенны и могут достигать сотен градусов. Единственным выходом из этой ситуации является измерение реальной траектории движения ФЦА с помощью специальных систем микронавигации.

### АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ФАЗОВОЕ ИСКАЖЕНИЕ ТРАЕКТОРНОГО СИГНАЛА

Как правило, ошибки оценки тангенциальной скорости незначительны, и их влиянием можно пренебречь. Ошибки оценки радиальной скорости  $\Delta V_r$  и радиального ускорения  $\Delta a_r$  движения ФЦА на интервале синтеза приводит к тому, что формируемая опорная функция оказывается рассогласованной с отраженным сигналом. В этом случае фазовые искажения траекторного сигнала имеют вид:

$$\psi_v(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta V_r t; \quad (2)$$

$$\psi_a(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta a_r t^2. \quad (3)$$

Из двух последних выражений видно, что ошибка оценки радиальной скорости приво-

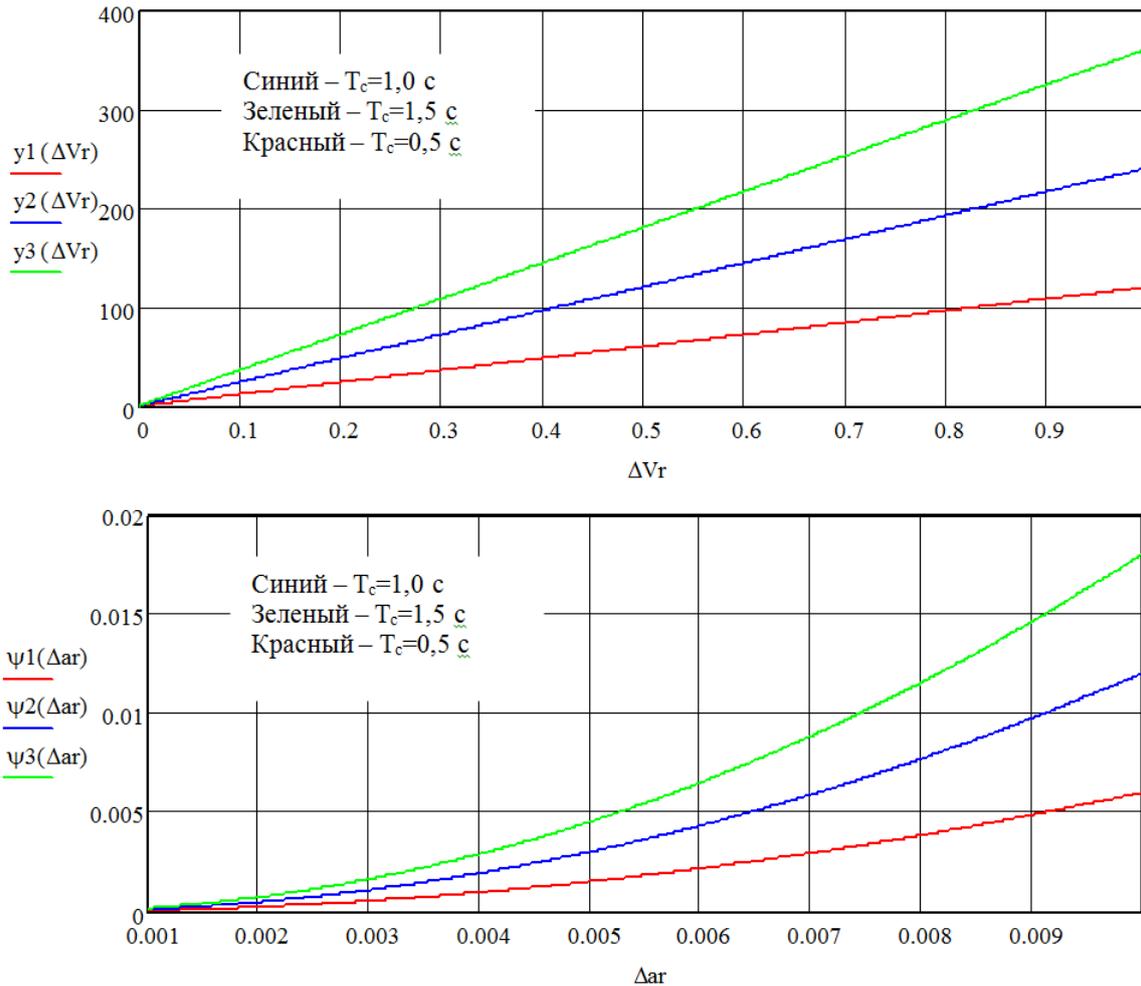


Рис. 3. График зависимости фазовых искажений  $y$  (градусы) от ошибки измерения радиальной скорости  $\Delta V_r$ , (а) и радиального ускорения  $\Delta a_r$ , (б) при различных временах синтезирования (0,5; 1,0; 1,5 с)

дит к линейному набегу фазы траекторного сигнала (т. е. вызывает сдвиг изображения), а ошибка оценки радиального ускорения – к квадратичному набегу фазы. Следствием последнего является расфокусировка РЛИ, приводящая к снижению разрешающей способности РСА. На рис. 3 приведены кривые фазовых искажений от ошибки оценки радиальной скорости и радиального ускорения.

Из рис. 2–3 можно сделать вывод, что ошибки оценивания радиальной скорости приводят к существенным фазовым искажениям траекторного сигнала, которые даже при малых значениях могут достигать  $400^\circ$ .

А ошибки оценки радиального ускорения незначительны и их влиянием можно пренебречь. Для снижения фазовых искажений, вызванных ошибками измерения радиальной скорости необходимо использование широ-

кополосных измерителей, имеющих малые ошибки на интервале синтезирования. Кроме того, обычно измерители располагаются на ЛА вблизи центра масс, А антенна РСА часто выносится в носовую часть ЛА. В связи с этим измерители навигационных параметров целесообразно располагать по возможности максимально близко к фазовому центру антенны РСА.

### РАСЧЕТ ДОПУСТИМЫХ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Для определения допустимых ошибок измерения навигационных параметров необходимо задаться допустимым уровнем фазовых искажений траекторного сигнала, требуемой разрешающей способностью и дальностью.

### ЗАВИСИМОСТЬ ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ОТ ИНТЕРВАЛА СИНТЕЗИРОВАНИЯ

Выше было показано, что необходимо снижать уровень фазовых искажений траекторного сигнала до уровня других ошибок, т.е. до  $10^\circ$ . Тогда (для трехсантиметрового диапазона) получаем зависимости ошибки оценивания радиальной скорости от интервала синтезирования (рис. 4):

$$\Delta V_r = \frac{\Delta \psi}{T_c} \frac{\lambda}{4\pi}. \quad (4)$$

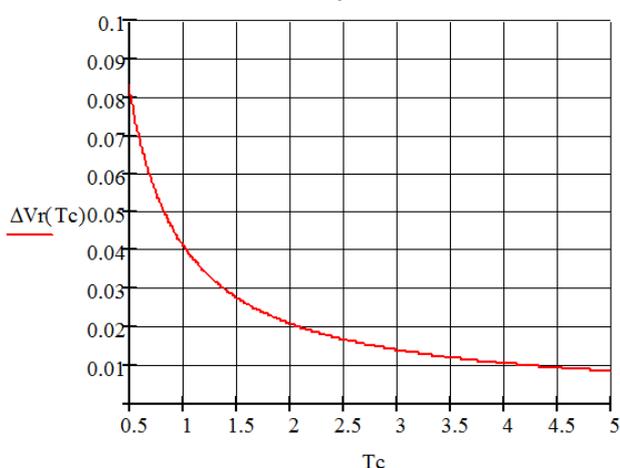


Рис. 4. Зависимость ошибки измерения радиальной скорости  $\Delta V_r$  (м/с) от времени синтезирования  $T_c$  (с)

Из графика (рис. 4) видно что, в зависимости от требуемого интервала синтезирования, ошибка оценивания радиальной скорости должна находиться в пределах от 0.025 до 0.083 м/с.

### ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕРВАЛА СИНТЕЗИРОВАНИЯ ОТ ТРЕБУЕМОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

Разрешающая способность по азимуту определяется выражением:

$$\delta \ell = \frac{\lambda R_n}{2VT_c \sin \theta_n}, \quad (5)$$

где  $R_n$  – наклонная дальность наблюдения (20...200 км);  $\theta_n$  – угол наблюдения;  $V$  – путевая скорость,  $V = 300$  м/с. Выразим отсюда время синтезирования  $T_c$  и построим семейство кривых (рис. 5).

Из графиков видно, что требуемая разрешающая способность при различных дальностях может быть достигнута при различных интервалах синтезирования. Но при это стоит учитывать, что при малом разрешении интервал синтезирования должен быть относительно велик, что приводит к существенному уменьшению запаса ошибки оценки измерения радиальной скорости.

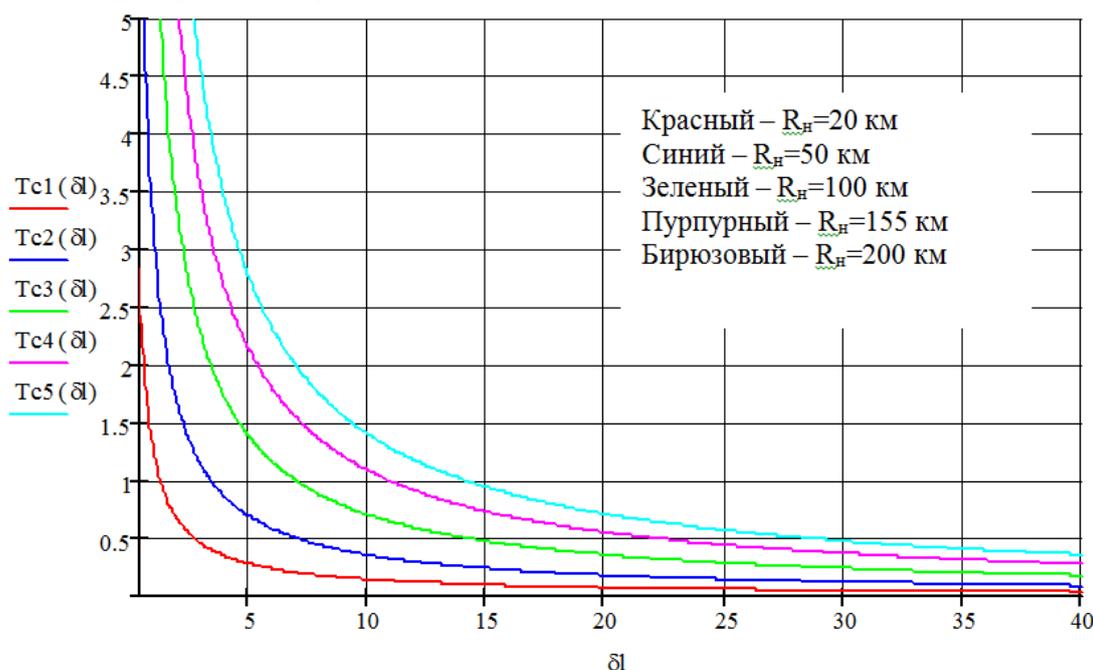


Рис. 5. Зависимость времени синтезирования  $T_c$  (с) от разрешающей способности  $\delta \ell$  (м) при различной дальности наблюдения  $R_n$

Объединив выражения (4) и (5), получим зависимость ошибки измерения радиальной скорости от разрешающей способности:

$$\Delta V_r = \frac{\Delta \psi}{R_n} \frac{\delta \ell V \sin \theta_n}{4\pi} \quad (6)$$

и построим два семейства графиков при углах наблюдения  $\theta_n = 45^\circ$  (рис. 6а) и  $\theta_n = 90^\circ$  (рис. 6б)

Для примера определим несколько значений максимально допустимых ошибок измерения радиальной скорости для конкретных случаев (табл. 2).

Таблица 2  
Значения максимально допустимых ошибок измерения радиальной скорости

Угол обзора Расстояние и разрешающая способность	Ошибка измерения радиальной скорости, м/с	
	45°	90°
$R = 50$ км; $\delta \ell = 20$ м	0.24	0.33
$R = 100$ км; $\delta \ell = 5$ м	0.03	0.04
$R = 100$ км; $\delta \ell = 1$ м	0.01	0.01
$R = 200$ км; $\delta \ell = 5$ м	0.02	0.02

Из таблицы можно сделать вывод, что для целей обеспечения высокого разрешения при обзоре земной поверхности необходимо

увеличивать точность измерения навигационных параметров на порядок и более. В некоторых случаях максимально допустимые ошибки измерения радиальной скорости должны быть 1–2 см/с (на интервале синтезирования).

## ВЫВОДЫ

1. При анализе факторов, вносящих наибольший вклад в фазовые искажения траекторных сигналов бортового радиолокатора с синтезированной апертурой антенны, были рассмотрен каждый из факторов в отдельности. Определено, что наибольший вклад в фазовые искажения вносят траекторные неустойчивости и упругие колебания корпуса, а также ошибки измерения навигационных параметров. Для получения высокого разрешения эти фазовые искажения необходимо снижать до уровня 10–15°.

2. Анализ фазовых искажений траекторных сигналов показал, что даже при больших углах обзора и малых среднеквадратических отклонениях фазового центра антенны искажения очень существенны и могут достигать десятков градусов. Следовательно, для получения радиолокационного изображения с высоким разрешением необходимо измерять и учитывать реальную траекторию движения фазового центра антенны.

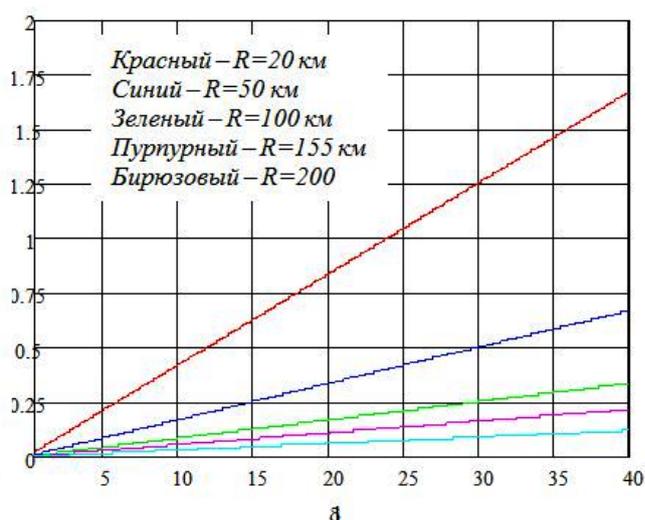
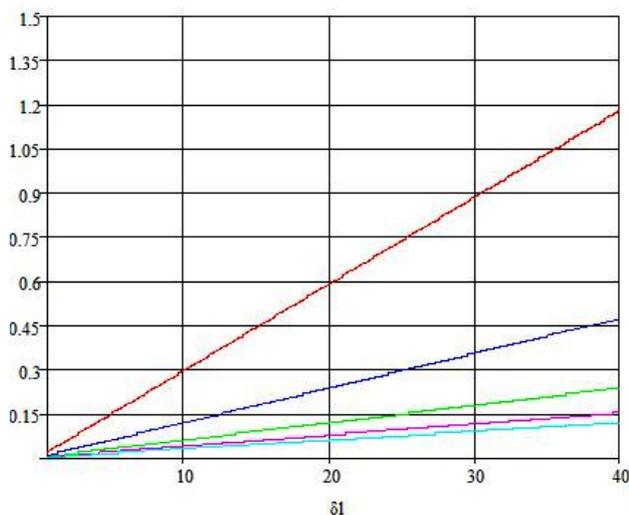


Рис. 6. Графики зависимостей ошибки измерения радиальной скорости  $\Delta V_r$  (м/с) от разрешающей способности  $\delta \ell$  (м) при различной дальности наблюдения  $R_n$  (км) и углах наблюдения  $45^\circ$ (а) и  $90^\circ$  (б)

3. Анализ влияния точности измерения навигационных параметров на фазовые искажения показал, что ошибки оценивания тангенциальной скорости и радиального ускорения ЛА незначительны, и их влиянием можно пренебречь. Ошибки оценивания радиальной скорости приводят к существенным фазовым искажениям траекторного сигнала, которые даже при малых значениях могут достигать десятков и сотен градусов.

4. Для целей обеспечения высокого разрешения при обзоре земной поверхности необходимо увеличивать точность измерения навигационных параметров на порядок и более. В некоторых случаях максимально допустимые ошибки измерения радиальной скорости должны быть 1–2 см/с (на интервале синтеза).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиолокационные методы исследования Земли / Ю. А. Мельник, С. Г. Зубкович, В. Д. Степаненко и др.; Под ред. Ю. А. Мельника. – М.: «Советское радио», 1980.

2. Сытник А. А., Раевский Н. В., Ключика К. Н., Протасов С. Ю. Сопоставление ме-

тодов фильтрации в задачах статистической регуляризации при оценивании параметров радиолокационных систем // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Системный анализ и информационные технологии. – 2013. – № 1. – С. 10–16.

3. Кондратенков Г. С., Фролов А. Ю. Радиолокационное. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Под ред. Г. С. Кондратенкова. – М.: «Радиотехника», 2005. – 368 с.

4. Петров Ю. В., Аникин С. Н. Система микронавигации бортового радиолокатора // Системы управления и передачи информации: юбилейный сборник трудов, посвященный 50-летию создания Приборостроительного факультета (ныне – Институт систем управления). Балт. гос. техн. ун-т – СПб.: 2008. с. 85–89.

5. Петров Ю. В., Аникин С. Н. Микронавигационное обеспечение бортового радиолокатора высокого разрешения // Радиоэлектронные комплексы многоцелевого назначения: сборник научных трудов. Юбилейный выпуск. 1991–2011 / Открытое акционерное общество «Радиоавионика». – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – с. 367–375.

**Петров Юрий Витальевич** – к.т.н., доцент, Балтийский Государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. Тел.: +7-921-926-63-39, E-mail: petrov@gtn.ru

**Бызов Алексей Николаевич** – аспирант 3-го года обучения, Балтийский Государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. Тел.: +7-931-207-92-31, E-mail: bisonwishmaster@mail.ru

**Петров Никита Юрьевич** – аспирант 3-го года обучения, Балтийский Государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. Тел.: +7-952-374-98-45, E-mail: nekit1003@gmail.com

**Юхно Семен Александрович** – студент 5-го курса, Балтийский Государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. Тел.: +7-911-900-92-14, E-mail: yukhno.s.a@gmail.com

**Petrov Yuriy V.** – Associate Professor, PhD, Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov. Тел.: +7-921-926-63-39, E-mail: petrov@gtn.ru

**Bizov Alexey N.** – 3rd year postgraduate student, Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov. Тел.: +7-931-207-92-31, E-mail: bisonwishmaster@mail.ru

**Petrov Nikita Y.** – 3rd year postgraduate student, Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov. Тел.: +7-952-374-98-45, E-mail: nekit1003@gmail.com

**Yukhno Semen A.** – 5th year postgraduate student, Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov. Тел.: +7-911-900-92-14, E-mail: yukhno.s.a@gmail.com