

Искажения зондирующего сигнала и их коррекция при формировании радиолокационного изображения в РСА космического аппарата «Кондор-Э»

Ефимов Александр Витальевич

кандидат технических наук, ведущий конструктор ЗАО «АЭРОКОН».

E-mail: alexef@front.ru.

Цветков Олег Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник ЗАО «АЭРОКОН».

E-mail: al.vetckov@yandex.ru.

Адрес: 140180, г. Жуковский, Московская обл., ул. Жуковского, 1.

Аннотация: В работе представлен анализ различных методов определения искажений зондирующего сигнала в радиолокаторах с синтезированием апертуры антенны (РСА). В качестве примера рассмотрен сложный сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), который широко используется в современных РСА. Основное внимание уделяется анализу искажений пилот-сигнала при прохождении приёмного тракта РСА «Стриж», установленного на космическом аппарате «Кондор-Э». Предложена методика анализа экспериментальных данных, заключающаяся в усреднении реализаций для повышения точности оценивания амплитудной огибающей и фазовой модуляции зондирующего сигнала. Для оценки качества отклика и разрешающей способности по дальности предусматривается сжатие пилот-сигнала – свёртка с идеальным опорным сигналом. Проведено детальное исследование радиолокационного изображения (РЛИ) импульсного отклика системы, которое показало асимметричность боковых лепестков сжатого сигнала. Анализ реальной и мнимой составляющих выявил искажения в комплексной огибающей сигнала с ЛЧМ. Дан анализ фазовых ошибок в сформированном ЛЧМ пилот-сигнале и сигнале, отражённом от радиолокационной миры. Предложенные методы оценки фазовых искажений ЛЧМ сигнала позволяют более полно учесть все факторы неидеальности сквозного тракта прохождения сигнала и скорректировать параметры обработки радиолограммы.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, РСА, ЛЧМ-сигнал, пилот-сигнал, радиолокационное изображение, радиолокационные миры.

Введение

Пожалуй, ни одна радиотехническая система не способна сформировать идеальный сигнал, параметры которого полностью совпадают с расчётными или теоретическими. Радиолокатор с синтезированием апертуры антенны (РСА) [1–5], в частности РСА «Стриж» малого космического аппарата (МКА) «Кондор-Э», о котором идёт речь в статье, не является исключением. Совершенно очевидно, что требуется определить появляющиеся искажения, оценить их влияние на качество выходного продукта (в нашем случае импульсный отклик системы по дальности), и попытаться максимально их парировать при обработке в наземном комплексе синтеза.

В статье анализируются наблюдаемые искажения сигнала и импульсного отклика на выходе фильтра сжатия по дальности. Наблю-

дается два вида ошибок: амплитудные и фазовые изменения структуры импульса с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Конечно, корреляционные свойства широкополосных сигналов особенно чувствительны именно к изменениям закона фазовой модуляции импульса. Поэтому основное внимание уделяется наблюдаемым фазовым ошибкам. Главная цель их коррекции – обеспечение приемлемого качества отклика сжатого сигнала.

1. Зондирующий сигнал РСА

В общем случае пространственная разрешающая способность δ_r всегда обратно пропорциональна ширине спектра зондирующего импульса [6, 7]

$$\delta_r = c / (2\Delta f_c), \text{ [м]},$$

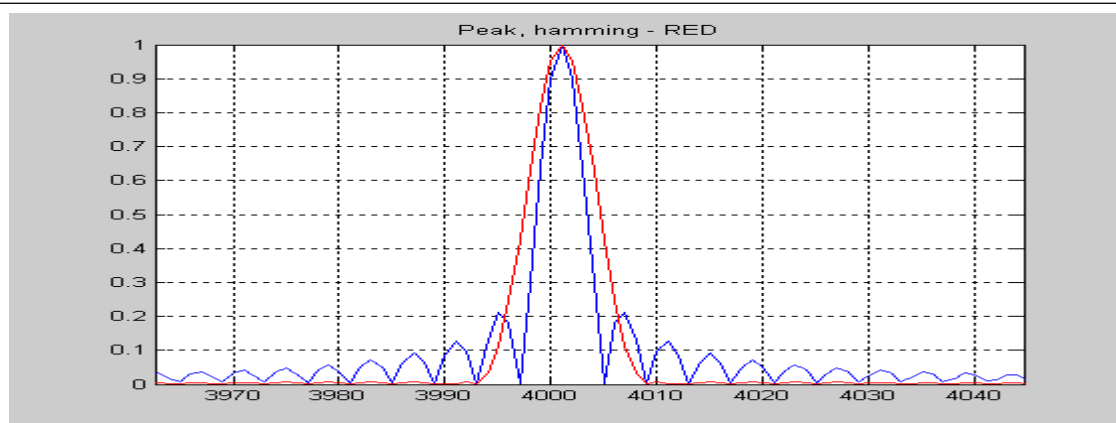


Рис. 1. Корреляционная функция ЛЧМ импульса и импульса с огибающей Хемминга

где c – скорость света (3×10^8 м/с), Δf_c – ширина спектра сигнала (Гц).

Излучаемый ЛЧМ радиоимпульс характеризуется параболической фазовой модуляцией несущей гармоники в пределах длительности импульса [6, 7]:

$$s(t) = A \cos(\omega_0 t + \pi \gamma t^2 + \phi_0), \quad |t| \leq \tau_i/2, \quad (1)$$

где A – амплитуда сигнала; ω_0 – несущая частота; ϕ_0 – начальная фаза; γ – крутизна ЛЧМ, определяемая шириной спектра Δf_c и длительностью импульса τ_i : $\gamma = \Delta f_c / \tau_i$. Для базы сигнала $B \gg 1$ ширина спектра Δf_c ЛЧМ импульса практически равна удвоенной девиации частоты. Как следует из функции полной фазы сигнала (1), частота изменяется линейно в пределах длительности импульса:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\psi(t)}{dt} = f_0 + \gamma \cdot t, \quad |t| \leq \tau_i/2.$$

Учёт неизвестной начальной фазы в теории оптимального приёма приводит к схеме квадратурного детектирования [5]. В результате сохраняется амплитудно-фазовая информация о принятом импульсе. Другими словами, в бортовом приёмнике записывается комплексная огибающая принятого сигнала $\dot{s}(t)$:

$$\dot{s}(t) = A \cdot \exp(j\pi \cdot \gamma \cdot t^2), \quad |t| \leq \tau_i/2. \quad (2)$$

Физически $\dot{s}(t)$ представляет собой два вещественных процесса:

$$\dot{s}(t) = \lambda_c(t) + j\lambda_s(t) = A \cos(\pi \gamma t^2) + jA \sin(\pi \gamma t^2).$$

Теория согласованной фильтрации таких сигналов подробно изложена в литературе (например, в [6, 7]). В связи с тем, что далее постоянно рассматриваются отклонения (искажения) реальных сигналов от идеальных, приведём график теоретически ожидаемой корреляционной функции ЛЧМ сигнала. Реакция идеальной системы на одиночный точечный отражатель показана на рис. 1. Как известно, высокий уровень боковых лепестков (порядка минус 13 дБ) приводит к дополнительным искажениям радиолокационного изображения (РЛИ), маскировке слабых отражателей.

В случае использования весовой обработки уровень боковых лепестков удаётся существенно уменьшить (до минус 42 дБ при весовой функции Хемминга) – см. рис. 1. Платой за снижение уровня боковых лепестков становится расширение отклика (в 1,3...1,5 раза) и уменьшение его амплитуды.

2. Анализ пилот-сигнала

Для анализа искажений сигнала в рассматриваемом РСА «Стриж» использовался пилот-сигнал (ПС), который представляет собой сформированный РСА аналог зондирующего сигнала, прошедший приёмопередающий тракт РСА, исключая мощный выходной каскад передающей части и антенную систему. Подробное описание РСА «Стриж» и хода лётных испытаний представлены в [8]. Прежде всего, в ходе испытаний исследовался основной «рабо-

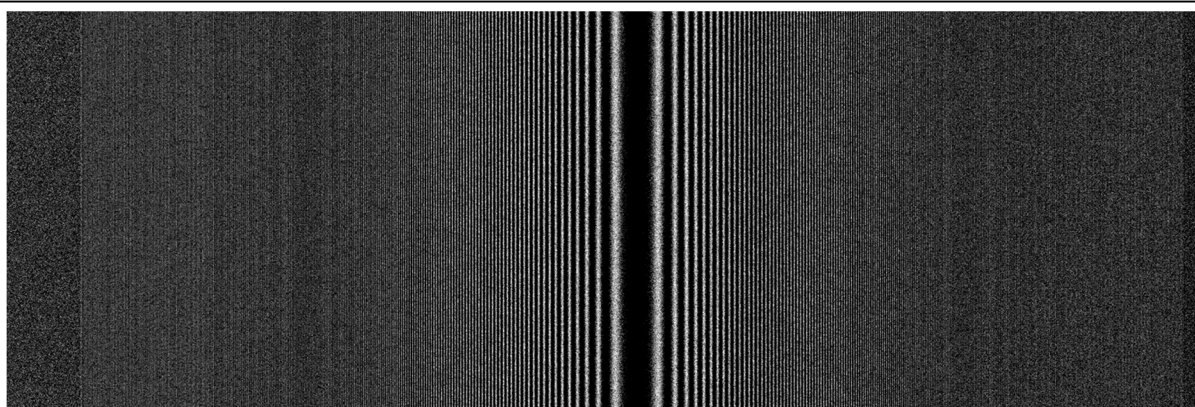
чий» импульс с длительностью 12 мкс и шириной полосы 200 МГц, который используется в детальном непрерывном и детальном прожекторном режимах. Частота оцифровки сигналов в АЦП составляет 300 МГц. В основном в статье анализируются импульсы именно с шириной спектра 200 МГц. Методика анализа полученных записей заключается в следующем:

а) считывание данных с учётом формата (с учётом заголовка строк, протоколов упаковки

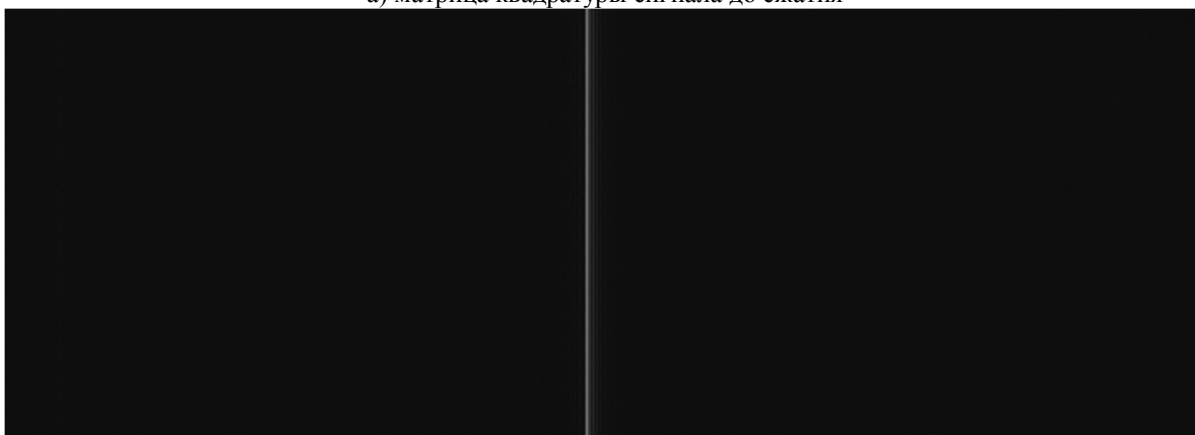
строк и кадров) и запись в память ЭВМ матрицы декодированных комплексных отсчётов;

б) анализ положения пилот-сигнала, который соответствует сигналу точечного отражателя; характерный вид квадратурных составляющих позволяет определить начало и конец пилот-сигнала в дальностной строке;

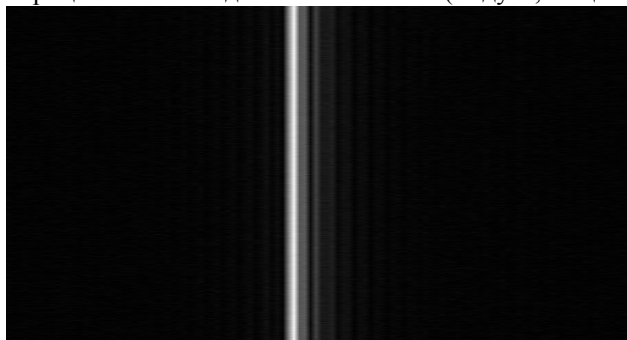
в) сжатие каждого зондирования (строки по дальности) с расчётным опорным сигналом (только для анализа качества отклика) – см. рис. 2 (а, б);



а) матрица квадратуры сигнала до сжатия



б) матрица сжатого по дальности сигнала (модуль, общий вид)



в) матрица сжатого по дальности сигнала (модуль, детально)

Рис. 2. Сигнал до сжатия и после сжатия по дальности (по горизонтали)

г) усреднение (суммирование с нормировкой) всех строк исходной декодированной голограммы для существенного уменьшения шума. В результате получаем хорошо отфильтрованную копию пилот-сигнала (ПС) (до сжатия по дальности) $\hat{s}(t) = \hat{\lambda}_c(t) + j\hat{\lambda}_s(t)$, где t – время, связанное с отчётами строки дальности;

д) оценка фазовых и амплитудных характеристик отфильтрованного пилот-сигнала, а именно: оценка амплитудной огибающей:

$$\hat{A}(t) = \sqrt{\hat{\lambda}_c^2(t) + \hat{\lambda}_s^2(t)},$$

оценка функции фазовой модуляции импульса

$$\hat{\phi}(t) = \arctg(\hat{\lambda}_s(t) / \hat{\lambda}_c(t)).$$

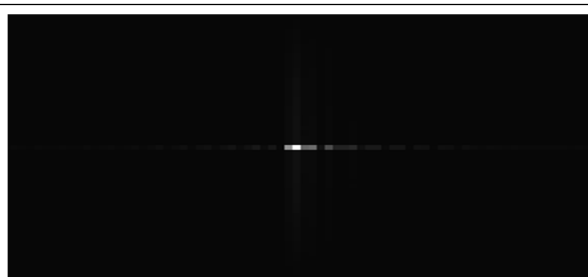


Рис. 3. РЛИ импульсного отклика системы

Кроме того, для анализа когерентности системы проводится азимутальная фокусировка сжатого по дальности сигнала, т.е. пункт в) методики дополняется сжатием по азимутальной координате. Модуль результата двумерного сжатия представляет собой модуль сигнала двумерного фильтра. Таким образом имитируется реальный отклик системы на точечный отражатель, представленный на рис.3.

Начало импульса пилот-сигнала в каждой строке стабильно. Сжатие сигнала по дальности подтверждает стабильность положения от-

счётов импульса: не наблюдается перехода между каналами дальности, основной пик сосредоточен в одном канале дальности – см. рис. 2. Это характеризует высокую стабильность и синхронность системы с точки зрения формирования «записи сигнала по каналам дальности». Хорошая наблюдаемость и стабильность положения пилот-сигнала имеет место при всех длительностях импульса (на рис. 2 иллюстрируются фрагменты матрицы сигналов с длительностью импульса 12 мкс).

Результат обработки по дальности уже выявляет некоторые негативные особенности сигнала: визуально наблюдается асимметрия боковых лепестков и их высокий уровень (см. рис. 2 в). Нужно иметь в виду, что никаких весовых функций в опорных сигналах не используется. В таком случае ожидаемый идеальный отклик системы должен представлять импульс типа *sinc*. Однако после сжатия по азимуту очевидные искажения ЛЧМ импульса проявляются в двумерном отклике сигнала, который представлен на рис. 3. Наблюдаются большие боковые лепестки по дальности. Конечно, более детально следует анализировать отфильтрованный по дальности исходный сигнал, а не яркостную матрицу отклика.

Видно, что фокусировка по дальности откровенно некачественная. Проведём детальный анализ усреднённого пилот-сигнала $\hat{s}(t) = \hat{\lambda}_c(t) + j\hat{\lambda}_s(t)$. Вид полученных квадратурных составляющих иллюстрируется рис. 4. Количество усредняемых (суммируемых) отсчётов азимута составляло до 8...12 тысяч. Та-

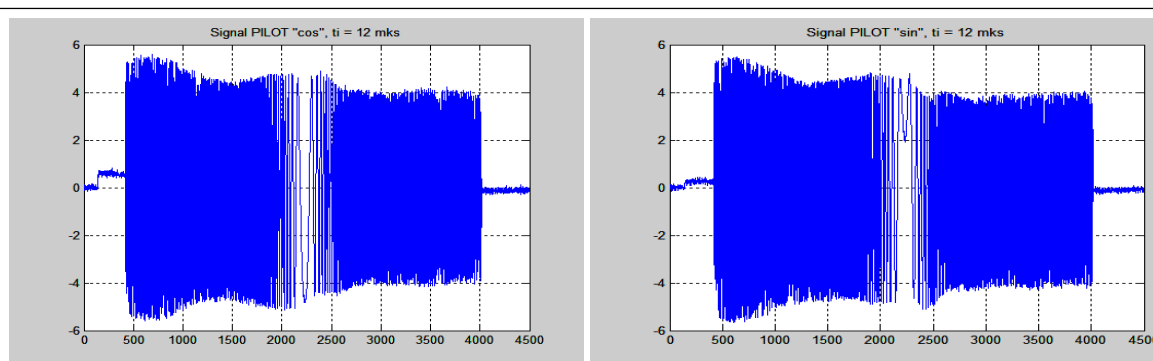
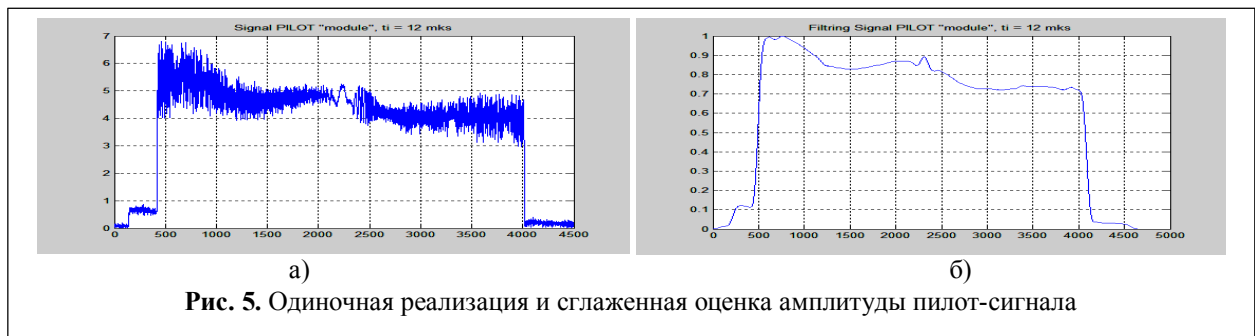


Рис. 4. Реальная и мнимая составляющие пилот-сигнала



кое значительное усреднение позволяет серьёзно увеличить отношение сигнал-шум q_0 (на 39...40,8 дБ) по сравнению с первоначальным значением $q_0 = 3$ дБ. При большом отношении сигнал-шум среднеквадратическая ошибка (СКО) оценки фазы определяется соотношением [9] $\sigma_\phi = 1/\sqrt{q_0}$, расчёт по которому с учётом количества усредняемых зондирований даёт СКО оценки фазы $\sigma_\phi = 0,37^\circ \dots 0,45^\circ$. Это более чем достаточная точность для оценки фазовых искажений.

Рассмотрим теперь более детально оценки амплитуды и фазы пилот-сигнала. Реализация огибающей пилот-сигнала и оценка амплитудной функции, которая определялась по усреднённым квадратурам, представлены на рис. 5 (а, б). Обращает на себя внимание «непрямоугольный» характер амплитуды импульса пилот-сигнала.

В анализе оценки огибающей следует отметить две основных черты: линейный характер спада (до 0,7 от максимума) и наличие шумовой составляющей. Монотонное спадание,

возможно, обусловлено избирательностью характеристик канала, уровень снижения амплитуды в общем несущественный для качества отклика. Происхождение шумовой составляющей, видимо, обусловлено фазовым шумом при дискретизации сигнала, что подтверждает анализ фазовой характеристики импульса, результаты которого приводятся ниже.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) (модуль коэффициентов дискретного преобразования Фурье от $\hat{s}(t) = \hat{\lambda}_c(t) + j\hat{\lambda}_s(t)$) также характеризуется линейным спадом (рис. 6), что характерно для таких импульсов с ЛЧМ.

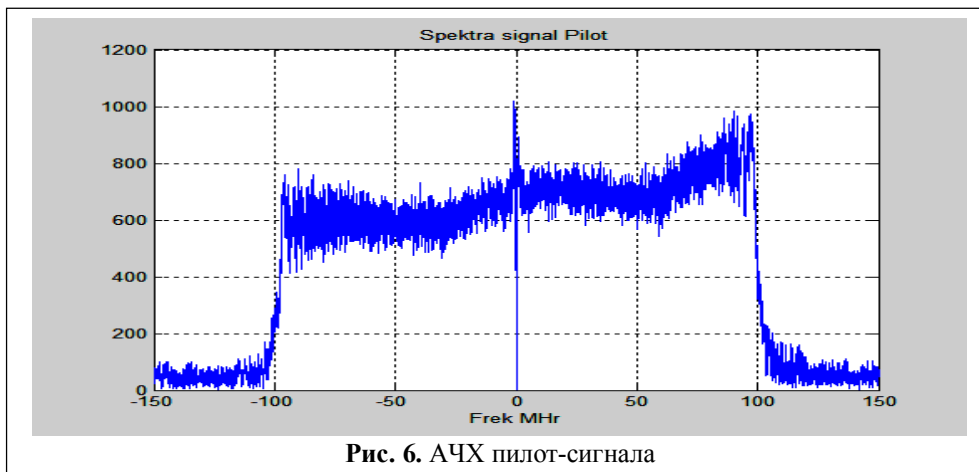
Более глубоко источники расфокусировки определяет анализ фазовых искажений функции модуляции импульса. Расчётный (идеальный) ЛЧМ импульс описывается выражением: $\dot{s}(t) = A \cdot \exp(j\pi(\Delta f_c/\tau_i)t^2) = A \cdot \exp(j\psi(t))$, $|t| \leq \tau_i/2$, где $\psi(t)$ – параболическая функция фазовой модуляции, соответствующая ширине спектра сигнала Δf_c и его длительности τ_i .

Функция фазовых искажений (ошибки)

$\phi_{err}(t)$ определяется как разница оценки и расчётной:

$$\phi_{err}(t) = \hat{\phi}(t) - \psi(t).$$

Вид полученной функции фазовой ошибки $\phi_{err}(t)$ (после устранения линейной составля-



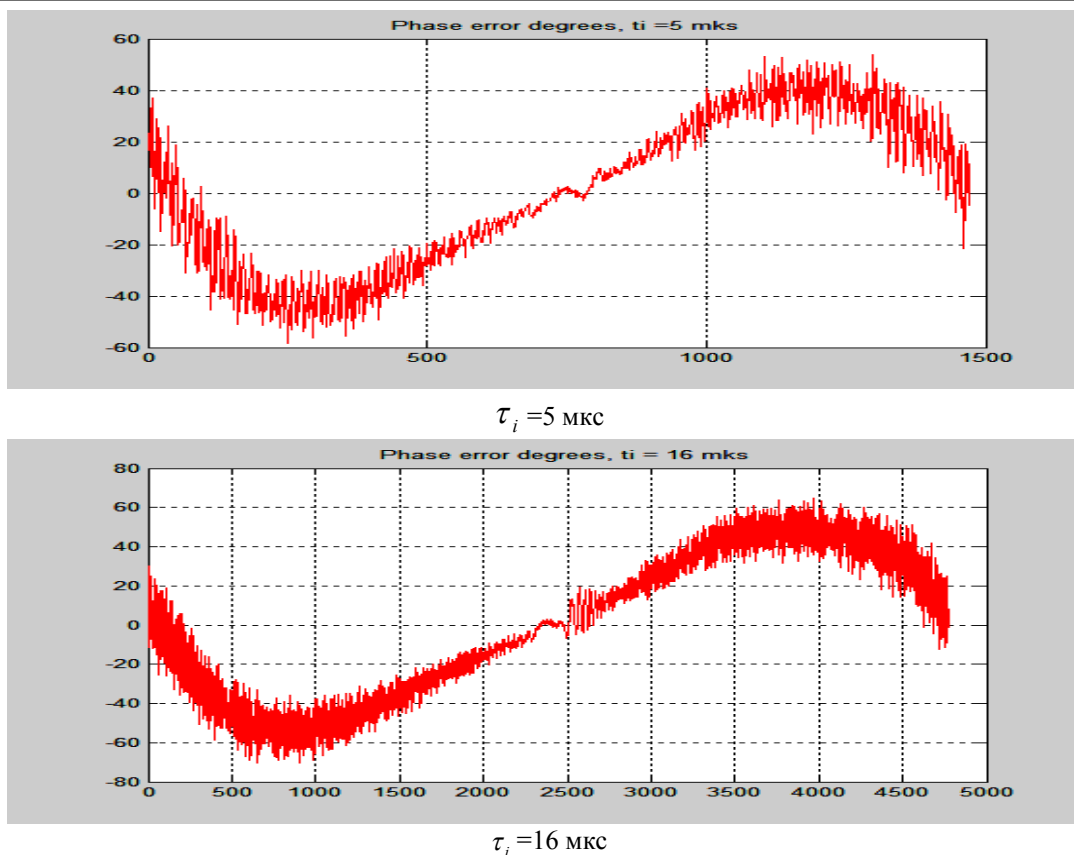


Рис. 7. Фазовая ошибка $\phi_{err}(t)$ (градусы) во временной области

ющей) для двух значений длительности импульсов иллюстрируется рис. 7. Наблюдается две составляющие: низкочастотный (НЧ) процесс $\phi_v(t)$ и высокочастотный (ВЧ) шумовой сигнал $\phi_\phi(t)$ ошибки фазы:

$$\phi_{err}(t) = \phi_v(t) + \phi_\phi(t) .$$

Здесь уместно отметить, что импульсы различной длительности имеют практически идентичные НЧ фазовые искажения.

Следовательно, имеет место постоянство фазовременных характеристик тракта. Более того, при изменении знака ЛЧМ (девиация вверх) «картина» фазовых ошибок лишь зеркально переворачивается. Это приходится учитывать в случае использования разнонаправленной частотной модуляции зондирующих импульсов.

Однако следует подчеркнуть, что речь идёт об анализе во временной области (фазовре-

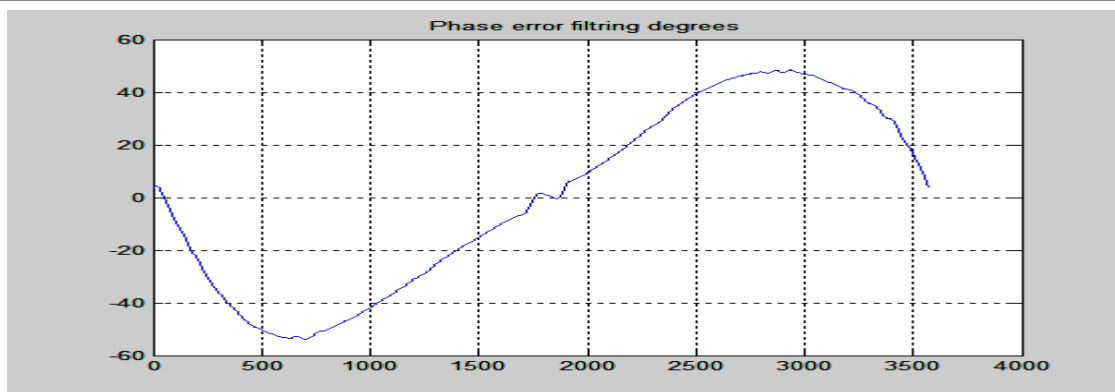


Рис. 8. Низкочастотная фазовая ошибка (градусы) $\phi_v(t)$ во временной области

менные функции). После фильтрации ВЧ процесса удаётся оценить форму и динамику медленных фазовых ошибок $\phi_v(t)$ в пределах длительности импульса. На рис. 8 представлена выделенная (отфильтрованная) «медленная» фазовая ошибка. Максимальное её значение достигает величины 50 градусов. Следует особо обратить внимание на форму функции $\phi_v(t)$. В пределах длительности сигнала её можно аппроксимировать полиномом высокого порядка или тригонометрической функцией $\phi_v(t) \approx 0,25\pi \cdot \sin(2\pi \cdot t/\tau_i)$. Хотя максимальная фазовая ошибка ($45^\circ \dots 50^\circ$) в теории сигналов ЛЧМ часто считается приемлемой, в данном случае отмеченный характер искажений приводит к недопустимому росту боковых лепестков. На рис. 9 представлен пик сжатого сигнала (корреляция с расчётным). Приведён также расчётный отклик сжатого сигнала при отсутствии фазовых ошибок («идеальный» вариант). В отклике с пилот-сигналом наблюдается несколько боковых лепестков очень большого уровня, которые существенно ухудшают РЛИ. Это означает, что при обработке реального траекторного сигнала требуется коррекция.

Следующая составляющая сигнала фазовой ошибки – ВЧ шумовой процесс $\phi_\varphi(t)$, который можно выделить из полной ошибки вычитанием низкочастотной составляющей: $\phi_\varphi(t) = \phi_{err}(t) - \phi_v(t)$. Вид функции $\phi_\varphi(t)$ пред-

ставлен на рис. 10.

Эта ошибка $\phi_\varphi(t)$ имеет «нарастающий» характер к краям импульса и достигает осциллирующий до 20...25 градусов. В принципе, для ЛЧМ сигналов нарастающая дисперсия ошибки фазы имеет место при дрожании сетки отсчётов АЦП. Однако, как показывает анализ, функция ошибки $\phi_\varphi(t)$ не является исключительно шумоподобной. Обратим внимание на влияние этого искажения фазы ЛЧМ на отклик по дальности. Полный вид функции отклика представлен на рис. 11.

Видно, что наблюдается серия дальних боковых лепестков. Их уровень достаточно высокий (до минус 30 дБ). Кроме того, проведённое моделирование с добавлением в идеальный сигнал только фазы $\phi_\varphi(t)$ показывает осциллирующий характер АЧХ импульса – см. рис. 12. Видимо, быстрые флуктуации АЧХ импульса как раз и обусловлены ВЧ фазовыми ошибками.

Появление боковых пиков потребовало отдельного исследования поведения ВЧ ошибки. Детальный вид функции $\phi_\varphi(t)$ представлен на рис. 13, из которого следует, что ВЧ ошибка является квазипериодическим процессом. Основное предположение о природе возникновения ВЧ фазовых ошибок свелось к непостоянству временной сетки отсчётов АЦП, поскольку в приёмнике РСА используется пятиканальный АЦП. Такие искажения называют в

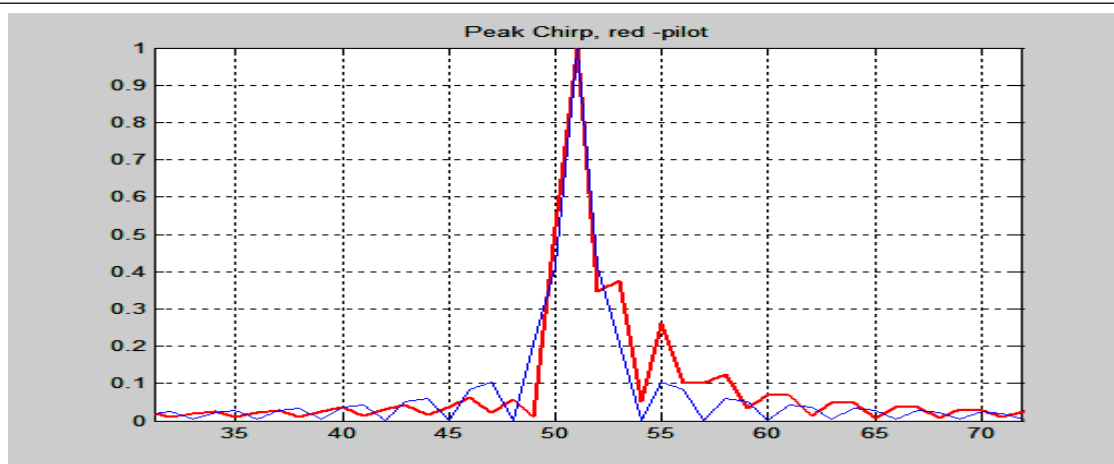


Рис. 9. Отклик по дальности, красный – пилот-сигнала, синий – при отсутствии фазовых ошибок

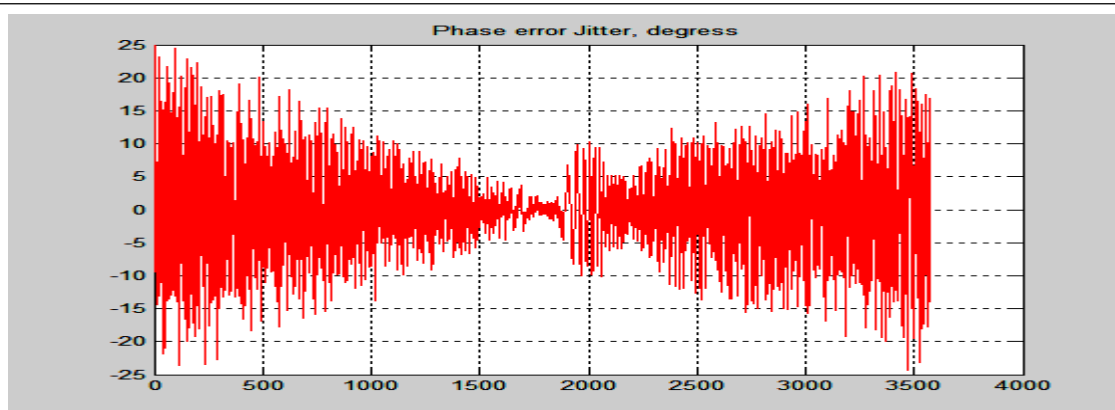


Рис. 10. Высокочастотная фазовая ошибка (градусы) во временной области

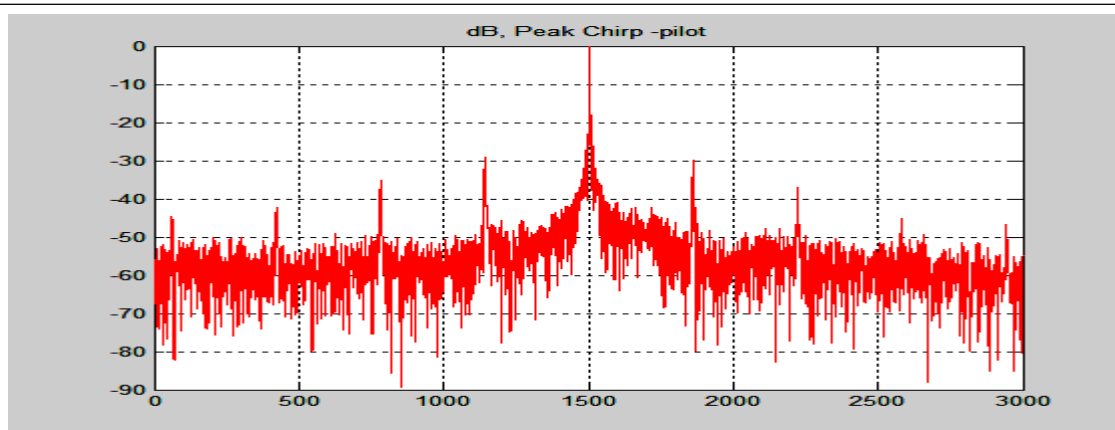


Рис. 11. Отклик сжатого пилот-сигнала (дБ)

практике цифровых устройств джиттером (*jitter*). Кроме того, ошибка временного стробирования является ещё и периодической (квази-периодической, а не чисто шумовой). Учёт и компенсация джиттера позволила заметно снизить уровень дальних боковых лепестков.

Понятно, что полная коррекция, например, в частотной области, позволяет учесть и скомпенсировать все фазовые ошибки. Коррекция спектра сигнала дальности возможна по следующему алгоритму: 1) умножение на корректирующую АЧХ $S_0(f)/S_{pilot}(f)$ и 2) «вычитание» фазовой ошибки $\phi_{err}(f)$ из ФЧХ сигнала дальности. Здесь $S_0(f)$ – АЧХ расчётного ЛЧМ сигнала, $S_{pilot}(f)$ – АЧХ имеющегося ПС. Такая методика позволила получить полностью сфокусированный отклик по дальности. Что касается анализа пилот-сигналов для режимов с меньшей шириной спектра (обзорные режимы: 30 МГц, 50 МГц [8]), то, как и

следовало ожидать, уровень искажений фазовой структуры ЛЧМ-импульса в них значительно ниже.

3. Коррекция искажений по сигналам радиолокационного полигона

Методика анализа сигналов от радиолокационного полигона с мирами из уголкового отражателей (УО, см. рис. 14) полностью совпадает с методикой анализа пилот-сигналов, однако дополнительно позволяет охватить контролем мощный передатчик и антенно-фидерный тракт. Основная операция, которая позволяет получить оценку квадратур ЛЧМ импульса: усреднение (простое суммирование) всех строк азимута. В результате получаем хорошо отфильтрованную копию сигнала (до сжатия по дальности) $\hat{s}(t) = \hat{\lambda}_c(t) + j\hat{\lambda}_s(t)$. Основное внимание уделим импульсу с шириной спектра 200 МГц.

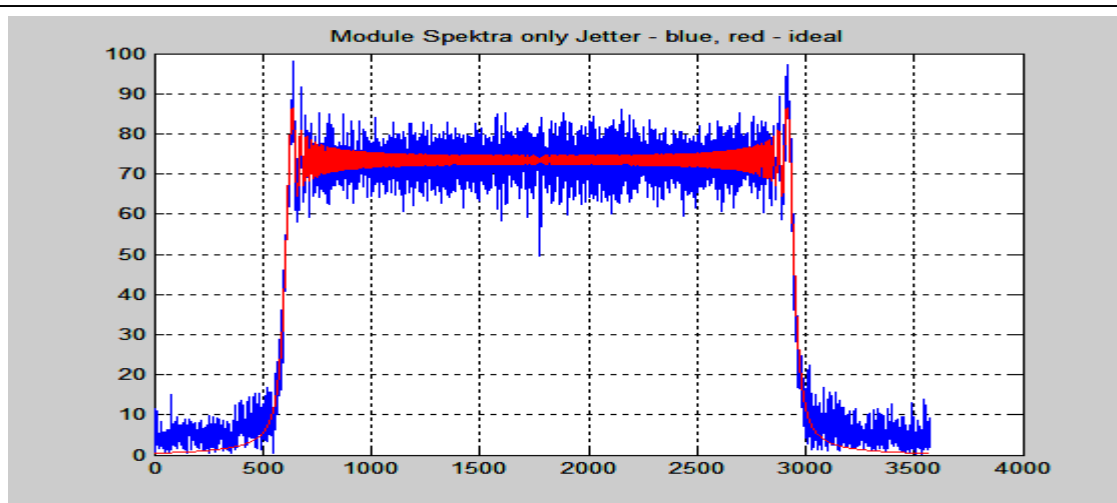


Рис. 12. Спектр идеального импульса (красный); АЧХ с добавлением фазы (синий)

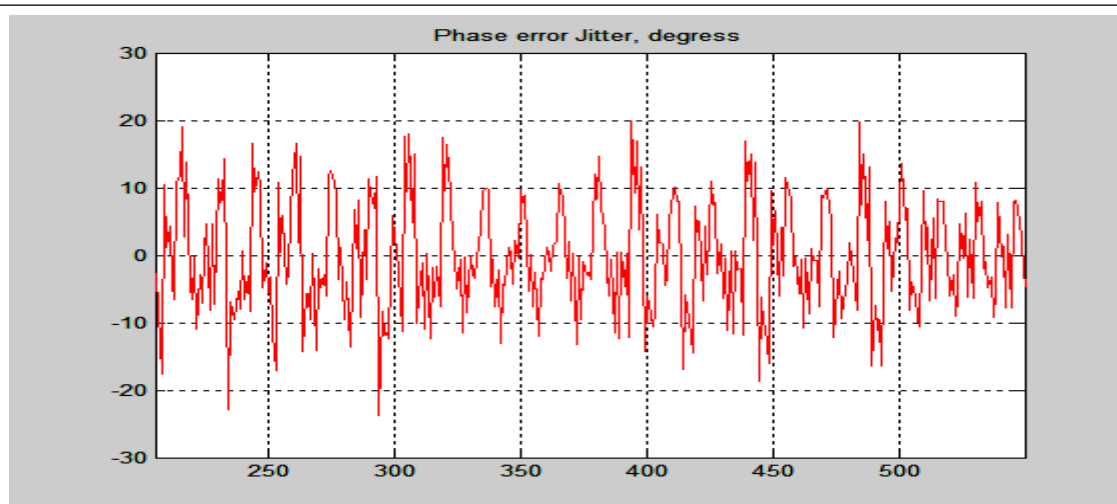


Рис. 13. Детальный вид ВЧ шумовой функции фазовой ошибки

Ошибки фазовой функции ЛЧМ импульса во временной области для двух сигналов (пилот-сигнала и сигнала УО) также имеют существенные различия. Ниже на рис. 15 демонстрируются функции НЧ фазовых ошибок для обоих случаев. Разница очевидна. Высокочастотная фазовая ошибка $\phi_\varphi(t)$ («джиттер») внешне по форме сохраняется, хотя отличия, пусть небольшие, по сравнению с ПС имеются. Кроме того, при решении задачи качественной фокусировки мы столкнулись с проблемой недостаточности описания фазовых искажений только низкочастотной полиномиальной функцией. В связи с этим для обработки радиоголограмм был выбран вариант более динамичной ошибки, представляющий сумму усреднённых по отражателям мира НЧ и ВЧ ошибок (см. рис. 16). Вид сигналов отдельных

УО мира разрешающей способности, сжатых по дальности, показан на рис. 17. РЛИ мира оценки разрешающей способности также сформировано с учётом именно подобной фазовой ошибки. Общие оценки искажений сигналов УО сохраняются для разных по длительности импульсов.

Заключение

Результаты наземных и лётных испытаний РСА МКА «Кондор-Э» позволяют считать, что:

- 1) основные амплитудные и фазовые искажения зондирующего сигнала возникают в приёмо-передающем тракте радиолокатора;
- 2) фазовые ошибки, возникающие в приёмо-передающем тракте, масштабируются по

длительности зондирующего радиоимпульса и для ЛЧМ сигнала зеркально отображаются при изменении направления модуляции;

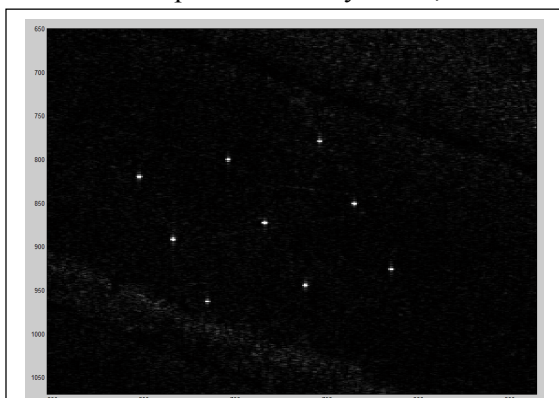


Рис. 14. РЛИ радиолокационной миры для измерения разрешающей способности

3) наиболее рациональным способом определения полной фазовой ошибки зондирующего сигнала для коррекции при обработке радиоголограмм представляется вариант оценки по уголковым отражателям радиолокационной миры.

Литература

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы. – М.: Радиотехника, 2010. – 676 с.
2. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
3. Радиолокационные системы воздушной разведки. Дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. – М.: Изд. ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2008. – 531 с.
4. Авиационные системы радиовидения / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2015. – 648 с.
5. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / Под ред. В.Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
6. Авиационные радиолокационные комплексы и системы: учебник для слушателей и курсантов ВУЗов ВВС / Под ред. П.И. Дудника. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2006. – 1112 с.
7. Толстов Е.Ф., Филончиков В.Д., Школьный Л.А. Радиотехнические цепи и сигналы. Теория сигналов, линейных цепей и систем. Учебник. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1993. – 725 с.

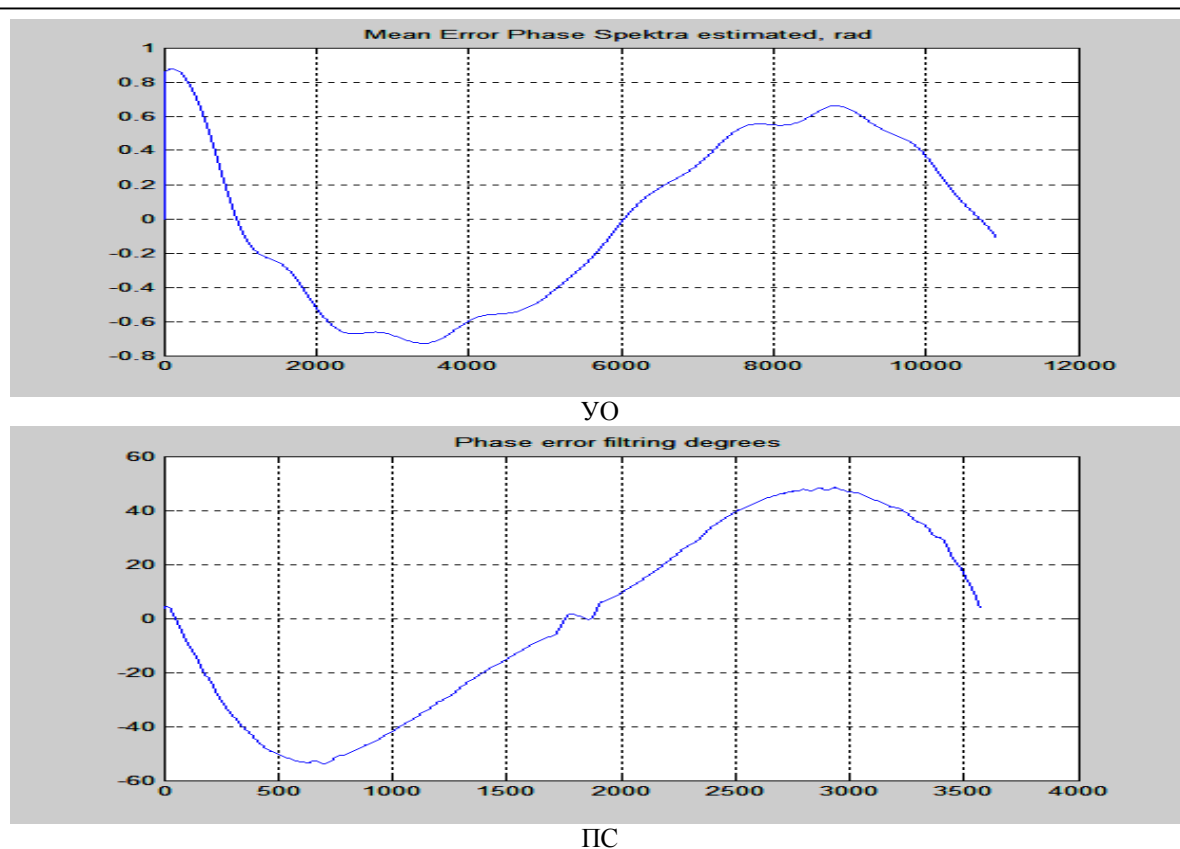


Рис. 15. Низкочастотная фазовая ошибка, сформированная по мире разрешающей способности (вверху – УО, радианы; внизу – ПС, градусы)

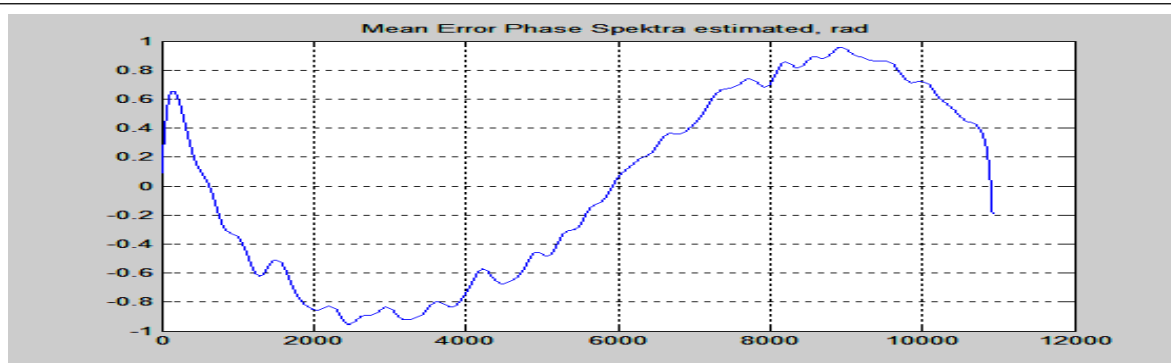


Рис. 16. Полная фазовая ошибка, сформированная по радиолокационной мире

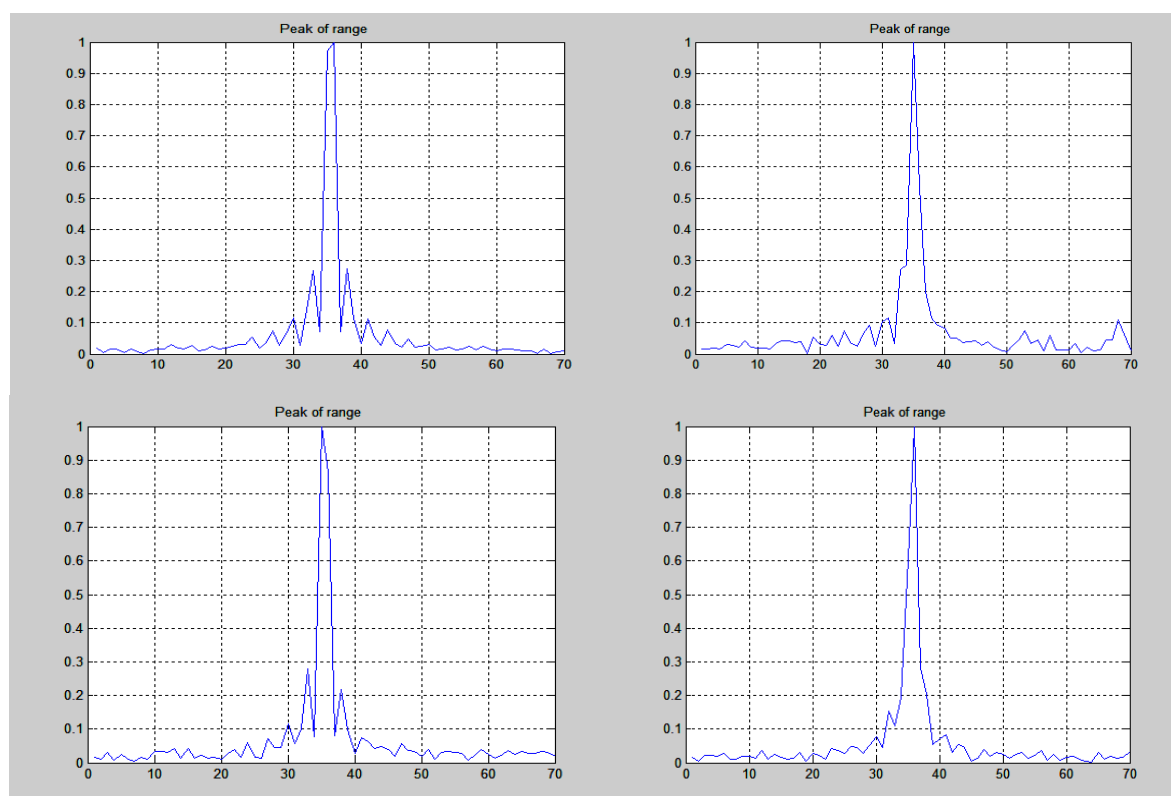


Рис. 17. Отклики на отдельные уголкового отражатели мира оценки разрешающей способности после коррекции

8. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Карпов О.А., Костров В.В, Неронский Л.Б., Савосин Г.В., Титов М.П., Толстов Е.Ф., Турук В.Э., Цветков О.Е. Итоги и уроки лётных испытаний РСА малого космического аппарата «Кондор-Э» // VI Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании

сред: VII Всероссийская научная конференция (31.05–2.06. 2016 г., Муром). – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. – С.16-36.

9. Пестряков В.Б. Фазовые радиотехнические системы (основы статистической теории). – М.: Сов. радио, 1968. – 468 с.

Поступила 3 октября 2017 г.

English

Sounding signal distortion and its correction in radar imaging in SAR Kondor-E space vehicle

Alexander Vitalyevich Yefimov – Candidate of Technical Sciences, Senior Research Associate, CJSC AEROKON.

E-mail: alexef@front.ru.

Oleg Evgenyevich Tsvetkov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Research Associate, CJSC AEROKON.

E-mail: al.vetckov@yandex.ru.

Address: 140180, Zhukovsky, Moscow Region, Zhukovsky st., 1.

Abstract: The work gives analysis of various methods to define sounding signal distortions in synthetic aperture radars (SAR). As an example, the aggregate signal with linear frequency modulation is examined which is widely used in modern SAR. Basic performance data of such sounding signal with weighting and non-weighting is given. The major accent is put on the pilot signal distortion analysis when passing through SAR "Strizh" receiving path mounted on space vehicle (SV) Condor-E. The analysis procedure of experimental data is suggested that involves averaging of implementations to enhance the evaluation accuracy of the amplitude envelope and sounding signal phase modulation. The compression of pilot signal - convolution with ideal reference signal is provided for quality evaluation of the response and range resolution capacity. The detailed research of the system pulse response radar image (RI) is conducted, which revealed the sidelobes asymmetry of the compressed signal. The analysis of actual and idle components revealed distortions in the complex envelope of the linear frequency modulation (LFM) signal. The analysis of phase errors in the produced LFM pilot signal and in the corner reflector echoed signal is given. Phase errors are divided into low-frequency and high-frequency ones that gives the chance to more precisely evaluate the down ratio of SAR resolution capacity loss and the quality of the obtained RI. The results of processing flight path signal of SAR in space vehicle Condor-E obtained during the flight tests are given. The correction procedure for signal spectrum in regard to range coordinate is examined that enables to compensate phase errors and to obtain completely focused range response. The suggested evaluation methods of LFM signal phase distortions give the chance to more fully consider all nonideality factors of through-path for passing signal and to correct parameters of processing radio frequency hologram.

Key words: remote sensing, SAR, LFM signal, pilot signal, radar image, radar corner reflectors.

References

1. Verba V.S., Neronsky L.B., Osipov I.G., Turuk V.E. Space-based Earth viewing radar systems. Ed. by V.S. Verba - M Radiotekhnika, 2010. - 676 p.
2. Kondratenkov G. S., Frolov A.Yu. Radio vision. Radar systems for Earth remote sensing. The textbook for higher education institutions. Ed. by G.S. Kondratenkov. - M.: Radiotekhnika, 2005. - 368p.
3. Air reconnaissance radar systems, radar image interpretation. Ed. by L.A. Shkolny. - M.: VVIA publ.h. named after N.E. Zhukovsky, 2008. - 531 p.
4. Aircraft radiovision systems. Ed. by G.S. Kondratenkov. - M.: Radiotekhnika, 2015. - 648 p.
5. Digital synthetic aperture radars. - Ed. by V.T. Goryainov. - M.: Radio i svyaz, 1988. - 304 p.
6. Aircraft radar facilities and systems: textbook for attendees and cadets of the Air Force Higher Education Institutions. Ed. by P. I. Dudnik. - M.: Publ.H. VVIA named after prof. N.E. Zhukovsky, 2006. - 1112 p.
7. Tolstov E.F., Filonchikov V.D., Shkolny L.A. Radio technical circuits and signals. Signaling theory, theory of linear circuits and systems. Textbook. - M.: Publ.H. VVIA named after N.E. Zhukovsky, 1993. - 725 p.
8. Babokin M.I., Yefimov A.V., Zaytsev S.E., Karpov O.A., Kostrov V.V, Nerorskiy L.B., Savosin G.V., Titov M.P., Tolstov E.F., Turuk V.E., Tsvetkov O.E. Flight test results and lessons of SAR small-size Condor-E space vehicle. VI All-Russian: Radio physical methods in media remote sensing: VII All-Russian scientific conference (31.05-2.06. 2016, Murom). - Murom: Izdatelsko-poligrafichesky tsentr MI VIGU, 2016. – P. 16-36.
9. Pestryakov V.B. Phase radio engineering systems (statistics theory fundamentals). - M.: Sov. radio, 1968. – 468 p.