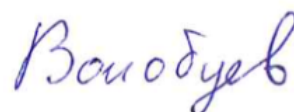


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»

На правах рукописи

Волобуев Юрий Николаевич



**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИКИ
КОРРЕКЦИИ СМАЗА КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СКАНИРУЮЩИХ СИСТЕМАХ**

Специальность 25.00.34 - Аэрокосмические исследования Земли,
фотограмметрия (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Андронов Владимир Германович

Курск – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Анализ существующих подходов к коррекции смаза изображений в информационных съёмочных системах.....	13
1.1 Физическая сущность смаза и его оценка в оптико-электронных сканирующих системах на матрицах приборов с зарядовой связью	13
1.2 Геометрические методы коррекции смаза	23
1.3 Спектральные и алгебраические методы коррекции смаза.....	26
1.4 Градиентные методы коррекции смаза	33
1.5 Обоснование направлений дальнейших исследований	38
2 Исследование процессов формирования сигналов изображения в оптико-электронных сканирующих системах в режиме временной задержки и накопления зарядовых пакетов.....	48
2.1 Координатно-временные особенности формирования сигналов изображения на интервале съёмки.....	48
2.2 Многозональная структура сигналов изображения в оптико-электронных сканирующих системах в режиме временной задержки и накопления зарядовых пакетов	54
2.3 Модель формирования тактовых периодов опроса матриц приборов с зарядовой связью	57
3 Разработка и исследование методики коррекции смаза.....	67
3.1 Формирование выборок строк и дисперсионный анализ сигналов изображений подстилающей поверхности.....	67
3.2 Аппроксимация выборочных дисперсий сигналов изображений	70
3.3 Оптимизация тактовых периодов опроса матриц приборов с зарядовой связью.....	71

3.4 Экспериментальные исследования коррекции смаза.....	73
3.4.1 Подготовка и получение экспериментальных данных.....	73
3.5 Практические рекомендации по реализации разработанной методики коррекции смаза на борту космического аппарата	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	97
СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ	99
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	101

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных тенденций развития современных космических комплексов (КК), занимающихся дистанционным зондированием Земли (ДЗЗ), является то, что все большее число процедур планирования съёмки и обработки её результатов реализуются непосредственно на борту космического аппарата (КА). Это обусловлено стремлением не только повысить степень автономности функционирования КК ДЗЗ, но и в конечном итоге обеспечить передачу результатов ДЗЗ напрямую потребителям, минуя целевые наземные центры приёма и обработки космической информации. Но если многие задачи по планированию съёмки решаются на борту КА уже сегодня, то в области обработки изображений дела обстоят гораздо сложнее.

В числе задач, решаемых на этапе съёмки и обработки изображений, одной из основных является обеспечение их качества, которое в значительной мере определяется уровнем смаза вследствие отличия скорости КА от скорости движения изображения (СДИ) относительно фотоприёмной структуры объектива. Несмотря на большой объём исследований, проведённых в этой области, задача коррекции смаза изображений остаётся актуальной.

Степень проработанности темы.

Анализ известной литературы, связанной с исследованием вопросов качества формирования цифровых изображений, показал, что явление смаза характерно не только для аэрокосмических информационных систем (ИС), но и для многих других видов ИС, в частности, цифровой фотосъёмки, компьютерного и технического зрения и т.п. Вопросами коррекции смаза в ИС занимались и занимаются многие российские и зарубежные ученые, в работах которых создана и успешно используется глубокая научная база для их успешного решения [1-90].

Несмотря на многообразие ИС и специфику областей их применения, в основе большинства подходов к коррекции смаза, лежат три группы методов. Первая группа используется на этапе планирования и включает в себя

геометрические методы априорной минимизации смаза путём выбора таких параметров съёмки, которые обеспечивают его локализацию в некоторых заданных пределах на всём включении бортовой аппаратуры. Применительно к оптико-электронным сканирующим системам (ОЭСС) этот результат достигается путём предварительного расчёта в бортовом вычислительном комплексе (БВК) программы трёхосного углового движения КА на период съёмки и тактовых периодов опроса ПЗС-матриц, которые зависят от места их расположения в фокальной плоскости ОЭСС. Программное угловое маневрирование КА по всем осям его ориентации на интервале съёмки позволяет обеспечить постоянство значения скорости движения изображения (СДИ) в центре линейки ПЗС, а разбиение линейки ПЗС-матриц на зоны их опроса - допустимые пределы отличий значений СДИ на краях этих зон. Общая методология этого подхода была описана в конце 70-х – начале 80-х г. г. в трудах А.С. Батракова [1-2] и А. Ю. Анатольева [3], получила дальнейшее развитие в исследованиях С.А. Бутырина [4-7], В.Ф. Петрищева [8-12], Г.П. Аншакова [14], А. А. Бутко [6], А.Н. Кирилина [14], В.Г. Андропова [15-22] и других отечественных учёных, и в настоящее время успешно используется в современных ОЭСС. Вместе с тем, применение только одних геометрических методов не может полностью устранить причины возникновения смаза вследствие сложности априорного учёта многочисленных факторов, влияющих на СДИ в процессе съёмки, а также ошибок вычисления параметров поступательного и углового движения КА и неточности задания тактовых периодов опроса ПЗС-матриц [23-33].

В этой связи для окончательной коррекции смаза применяются методы цифровой обработки изображений, включающие в себя группу алгебраических и спектральных методов, и группу градиентных методов. Наиболее широкое распространение получила группа алгебраических и спектральных методов цифровой обработки [38-78], поскольку они нацелены на восстановление максимального качества смазанных изображений. В основе этих методов лежат процедуры спектрального и алгебраического восстановления по обратной

свёртке изображения с известной функцией рассеивания точки (ФРТ), «слепого восстановления» при неизвестной ФРТ, фильтрации сигналов, преобразования Фурье и многие другие. Эти процедуры широко известны и освещены во многих трудах отечественных и зарубежных исследователей, в частности, в работах В.В. Еремеева [39,42,49,56], Егошкина Н.А. [38,39,48,49], Грузмана И.С.[41], Воронина А.А. [48], Киричука В.С.[41], В.К. Злобина [42], А.Е. Кузнецова [56], А.Н. Кирилина [14,37], И.В. Москватиньева [48], А.Э. Москвитина [49], Р. Н. Ахметова [33,37], Н.Р. Стратилатова [37], О.А. Гомозова [56], Ю.Б. Блохинова [57,58], Чернявского А.С.[57,58], Гнилицкого В.В.[58], Инсарова В.В.[58], Смирнова П.В.[59], Царёва М.Г.[59], Кобера В.И.[60,76,77], Карнаухова В.Н.[60], Schowengerdt R.A.[44], Storey J.C.[45], Xin M.[46], Shuyan X.[46], Guangxin L.[46], Eunsong O.[47], Ki-Beom A.[47], Seongick C.[47], Joo-Hyung R.[47], Pratt W.K.[50], Jeon B.[51], Kim H.[51], Chang Y.[51], Mallat S. A.[52], Donoho D.L.[53], Neelamani R.[54], Choi H.[54], Baraniuk R.[54], Ljung L.[55], Jain A.K.[61], Biemond J.[62], Banham M., [63], Sroubek F.[64], Sawchuk A.A.[65], Chakrabarti A.[66], Levin A.[67], Tan P.[68], Richardson W.H. [69], Lucy L.B. [70], Yitzhaky Y.[71], Fergus R.[72], Shan Q.[73], Joshi N.[74], Whyte O.[75], Hunt B. R.[78].

Вместе с тем, очевидно, что применение методов второй группы на огромных массивах видеоданных, получаемых от ОЭСС, требует наличия мощных вычислительных и энергетических ресурсов, создание которых в требуемых объёмах на борту КА не представляется возможным. Кроме того, применение этих методов на борту КА зачастую может не иметь оперативного смысла, поскольку восстановление изображения происходит в режиме постобработки.

В этой связи наибольший интерес представляют методы третьей группы, относящиеся к градиентным методам цифровой обработки изображений [32-35, 81-90] и учитывающие объективные ограничения, которые существуют на борту КА в части мощности энергетических и вычислительных ресурсов БВК, объёмов хранимой информации и т.п. Кроме того, методы третьей группы направлены на

повышение качества формирования изображения в реальном режиме, т.е. непосредственно в процессе съёмки. В основе градиентных методов лежат итерационные процедуры идентификации, функционализации и минимизации параметров смаза в яркостных полях пикселей формирующегося изображения. Эти процедуры описаны во многих работах отечественных и зарубежных учёных, в частности, в работах П.К. Кузнецова [32-35], А.А. Солодухи [32-34], В.И. Семавина [32-33], W. Bocker[81], W. Rolf[81], W. Muller[81], C. Streer[81], J. Cairns[82], K. Dickson[82], G. Lanza[82], S. Almeida[82], D. del Balzo[82], C. Field[83], M. Behrenfeld[83], J. Randerson[83], P. Falkowski[83], F. Groen[84], I. Young[84], G. Ligthard[84], E.Krotkov[85], S. K. Nayar[86], Y. Nakagawa[86], J. Pech-Pacheco[87], J. Alvarez-Borrego[87], O. Rockinger[88], M. Subarao[89], A. Nikzad[89], T. Yeo[90], S. Ong[90], Jayasooriah [90], R. Sinniah [90] и других.

Большинство из этих работ [81-90] посвящены коррекции смаза в ИС наземной цифровой фотосъёмки, компьютерного и технического зрения. При этом уровень смаза минимизируется на основе функциональной связи яркостных перепадов в пикселях формирующегося изображения при последовательном изменении времени экспозиции. Однако, что при таком подходе для оптимальной регистрации каждой новой сцены требуется новая настройка.

В известных работах [32-35], связанных с исследованием возможностей коррекции смаза в ОЭСС на борту КА, уровень смаза минимизируется на основе функциональной связи скорости смаза и скорости изменения сигналов изображений одинаковых сцен, полученных при различных значениях тактового периода опроса матриц ПЗС. Для реализации такого подхода необходимо обеспечить обработку последовательности изображений одной и той же сцены, полученных в различные моменты времени съёмки при различной частоте опроса матриц ПЗС. Рассмотренная методика имеет два основных недостатка. Первый – необходимость многократной регистрации одной и той же сцены, что обуславливает необходимость размещения в фокальной плоскости ОЭСС дополнительной линейки ПЗС-матриц с такими же характеристиками, как у первой, либо выполнения съёмки путём тангажного отслеживания. При этом в

первом случае требуется доработка бортовой аппаратуры, а во втором происходит существенное ограничение области применения КК ДЗЗ [14,36-37]. Второй недостаток – априорно неизвестно в каком направлении следует изменять первоначальное значение τ_T^n , чтобы достичь минимального уровня смаза. Это приводит к значительному увеличению объёма вычислений и времени обработки данных.

Тем не менее, методы идентификации, функционализации и минимизации параметров смаза в градиентных яркостных полях формирующегося изображения заслуживают большого внимания и более детального исследования, например, в части разработки таких критериев снижения смаза, которые инвариантны к содержанию и особенностям различных сцен.

Актуальность исследования. Рассмотренные методы успешно используются для коррекции и устранения смаза в различных видах современных цифровых информационных систем, включая системы компьютерного и технического зрения. При этом определяющая роль отводится алгебраическим и спектральным методам цифровой обработки всего массива смазанных видеоданных, связанным с восстановлением их качества и реализуемым в режимах наземной пост-обработки. Однако, имеющиеся ограничения на борту КА на вычислительные ресурсы и объёмы обрабатываемой информации не позволяют использовать эти методы в процессе съёмки. Реализация известных градиентных методов цифровой обработки изображений, обеспечивающих возможность коррекции смаза в процессе съёмки, требует либо существенной доработки существующей и перспективной бортовой аппаратуры, либо накладывает ограничения на режимы съёмки, что представляется нецелесообразным, и обуславливает необходимость их совершенствования и дальнейшего развития.

Таким образом, существует противоречие между необходимостью повышения качества формируемых изображений на борту КА и возможностями современных методов коррекции смаза. Это противоречие обуславливает **научную задачу** улучшения качества формирования космических изображений

в ОЭСС на борту КА. В этой связи тема диссертационной работы представляется *актуальной*, а решаемая в ней **научная задача** имеет значение для развития *технологий получения изображений существующими и перспективными космическими съёмочными системами*.

Цель работы – снижение уровня смаза изображений в оптико-электронных сканирующих системах на основе оптимизации тактовых периодов опроса матриц ПЗС в процессе съёмки.

Задачи. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ физической сущности смаза в ОЭСС и разработать модели смаза, устанавливающую функциональную взаимосвязь между его уровнем, значениями параметров съёмки и погрешностями их определения;

2. Разработать модель формирования периодов опроса матриц ПЗС в центрах зон компенсации смаза;

3. Разработать методику коррекции скорости движения изображения в ОЭСС, обеспечивающую заданные показатели качества формирования космических изображений на интервале съёмки, и выполнить экспериментальные исследования её эффективности.

Объект исследования - космические ОЭСС на матрицах ПЗС с временной задержкой и накоплением зарядовых пакетов.

Предмет исследования – методика коррекции смаза в ОЭСС на борту КА на основе обработки сигналов сканерного изображения.

Методы исследований основываются на статистическом, системном и дисперсионном анализе, теории множеств, теории космической фотограмметрии. Также для решения поставленных задач были использованы методы вычислительной математики и математического моделирования.

Достоверность результатов проведённых исследований.

Подтверждается экспериментальными исследованиями, в которых были использованы реальные данные сканерной космической съёмки, выполненной

КА «World View – 2». Используемые в исследованиях алгоритмы были реализованы в программах ЭВМ. Результаты были обсуждены на научно-практических конференциях и опубликованы в научных рецензируемых журналах.

Научная новизна.

1. Впервые разработаны параметрические модели, устанавливающие в ОЭСС функциональные взаимосвязи между уровнем смаза, параметрами съёмки и погрешностями их определения;

2. Разработана новая модель формирования тактовых периодов опроса матриц ПЗС, отличающаяся наиболее полным математическим описанием координатно-временных особенностей формирования многозональной структуры сигналов изображения на интервале съёмки;

3. Предложена новая методика коррекции смаза в ОЭСС на борту КА, отличающаяся реализацией выявленных новых закономерностей распределения сигналов сканерного изображения при изменении тактовой частоты опроса матриц ПЗС.

Теоретическая значимость работы заключается в наиболее полном математическом описании координатно-временных особенностей многозональной структуры формирования сигналов изображения на интервале съёмки, расширении инструментария прогнозирования, оценки и моделирования смаза, что обеспечило новое качество анализа и синтеза процессов коррекции смаза в ОЭСС на борту КА, а также разработке новой методики коррекции смаза, основанной на выявленных и неизвестных ранее закономерностях влияния частоты опроса матриц ПЗС на распределение сигналов сканерного изображения.

Практическая ценность работы заключается в программной реализации математических моделей, а также в разработке практических рекомендаций по реализации разработанной методики на борту КА в части последовательности получения выборок изображений, их числа и объёма при различной инфраструктуре подстилающей поверхности на интервале съёмки.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Параметрические модели, устанавливающие функциональную взаимосвязь между уровнем смаза, параметрами съёмки и погрешностями их определения;

2. Модель формирования тактовых периодов опроса матриц ПЗС, описывающая функциональную связь между периодами опроса матриц ПЗС в центрах зон компенсаций смаза, параметрами поступательного и углового движения КА и конструктивными характеристиками ОЭСС;

3. Методика коррекции смаза изображения в ОЭСС на борту КА, основанная на дисперсионном анализе нормированной разности сигналов смежных пикселей изображений, полученных при различной частоте опроса матриц ПЗС.

Апробация результатов. Результаты диссертационной работы были использованы в учебном процессе ЮЗГУ при подготовке обучающихся по специальности «Инфокоммуникационные системы аэрокосмического мониторинга» в рамках направления подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». Основные положения работы докладывались на международной и двух всероссийских научно-практических конференциях.

Публикации. Основные результаты выполненных исследований опубликованы в девяти научных работах, включая четыре статьи в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов, рекомендуемых ВАК, в том числе одну статью, индексируемую в Scopus. Получены два свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад соискателя. Научные положения, выносимые на защиту, разработаны автором диссертационной работы лично. В научных работах по теме диссертации, в которых соискатель является соавтором, самостоятельно были разработаны: параметрические модели смаза в ОЭСС, модель формирования программных значений периодов опроса матриц ПЗС в зонах компенсации смаза, методика коррекции смаза оптического изображения в ОЭСС.

Объём и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх разделов, заключения, библиографического списка, включающего 140 наименований, в том числе 39 зарубежных источника. Работа изложена на 116 страницах текста, содержит 40 рисунков и 6 таблиц.

В первом разделе на основе анализа физической сущности режима ВЗН ЗП в ОЭСС на матрицах ПЗС разработаны параметрические модели смаза, позволяющие прогнозировать, оценивать и моделировать уровень смаза по параметрам съёмки и погрешностям их определения. Выполнены оценки среднеквадратических погрешностей (СКП) расчёта программных значений СДИ и периодов опроса матриц ПЗС в зависимости от уровня методической точности построения моделей СДИ и ошибок задания параметров движения КА. В свете этих оценок рассмотрены известные подходы к разработке методик коррекции смаза и обоснована целесообразность и пути их совершенствования для применения на борту КА.

Во втором разделе представлены результаты исследования процессов формирования сигналов изображения в ОЭСС в режиме ВЗН ЗП. Приведена разработанная модель формирования и порядок расчёта программных значений тактовых периодов опроса матриц ПЗС в центрах зон компенсаций смаза.

В третьем разделе приведено описание методики коррекции смаза космических изображений в ОЭСС на борту КА, основанной на формировании выборок изображений подстилающей поверхности, дисперсионном анализе сигналов изображений этих выборок и нахождении оптимальных значений тактовых периодов опроса матриц ПЗС в центрах зон компенсации смаза. Представлены также результаты экспериментальных исследований и практические рекомендации по реализации разработанной методики на борту КА.

1 Анализ существующих подходов к коррекции смаза изображений в информационных съёмочных системах

1.1 Физическая сущность смаза и его оценка в оптико-электронных сканирующих системах на матрицах приборов с зарядовой связью

Известно, что формирование изображения (Рисунок 1.1) в направлении столбцов осуществляется за счет опроса элементов матриц ПЗС, которые расположены в ФП ОЭСС в шахматном порядке, а в направлении строк за счет полета КА [39, 91-96].



Рисунок 1.1 – Геометрическая иллюстрация цикла ВЗН ЗП

Для того, чтобы формируемое в процессе сканерной съемки изображение отсутствовало смазу, в соответствующих элементах ПЗС матрицы должен последовательно накапливаться заряд с одинаковых участков местности подстилающей поверхности. При этом сформированный сигнал снимается с элементов первой строки ПЗС матрицы. Таким образом, если в течении времени тактового периода опроса τ_T смещение КА на орбите Δ точно соответствует проекции смежных элементов ПЗС матрицы на Земле $L = l_x \cdot m_c$, т.е. справедливо соотношение

$$\Delta(\tau_T) = L, \quad (1.1)$$

то элементы всех строк ПЗС-матриц в течение цикла ВЗН будут «видеть» одни и те же «свои» участки местности [16-17,39] и суммарный накапливаемый сигнал не будет иметь искажений, где l_x -размер элемента строки ПЗС-матриц, m_c -знаменатель масштаба съёмки.

Очевидно, что соотношение (1.1) будет выполняться только при совпадении моментов переноса зарядовых пакетов в столбцах ПЗС-матриц и окончания тактов сканирования одних и тех же участков местности. На практике условие (1.1) всегда выполняется с погрешностями, поскольку точное значение τ_T , которое определяет эти моменты времени, априорно неизвестно. Поэтому при планировании съёмки [16-17] используются приближённые программные значения $\tau_T^п$, которые рассчитываются по формуле

$$\tau_T^п = l_x / V_x^п, \quad (1.2)$$

где $V_x^п$ -продольная составляющая СДИ в фокальной плоскости ОЭСС, которая вычисляется с использованием математической модели СДИ. Из выражения (1.2) вытекают следующие зависимости:

$$\sigma \tau_T^п = \tau_T^п / V_x^п \cdot \sigma V_x^п. \quad (1.3)$$

$$\sigma V_x^п = V_x^п / \tau_T^п \cdot \sigma \tau_T^п. \quad (1.4)$$

Погрешности определения $V_x^п$ и $\tau_T^п$ приводят к тому, что в каждом такте цикла ВЗН происходит накопление сигналов не только от «своих», но и от смежных с ними участков местности. Поскольку эти участки в общем случае обладают различными спектральными и яркостными характеристиками, в каждом элементе ПЗС-матриц в конце цикла ВЗН происходит формирование искажённых суммарных сигналов и возникает смаз, который визуально характеризуется (Рисунок 1.2) снижением резкости и в целом размыванием изображения.

Рассмотрим сущность и процесс возникновения смаза в цикле ВЗН более подробно. Если смаз отсутствует, то в течение всех тактов цикла ВЗН элементы строк ПЗС-матриц накапливают видеосигнал до тех пор, пока проекция на земле

каждого последующего элемента ПЗС-матрицы не будет совпадать с началом одного и того же «своего» участка местности.

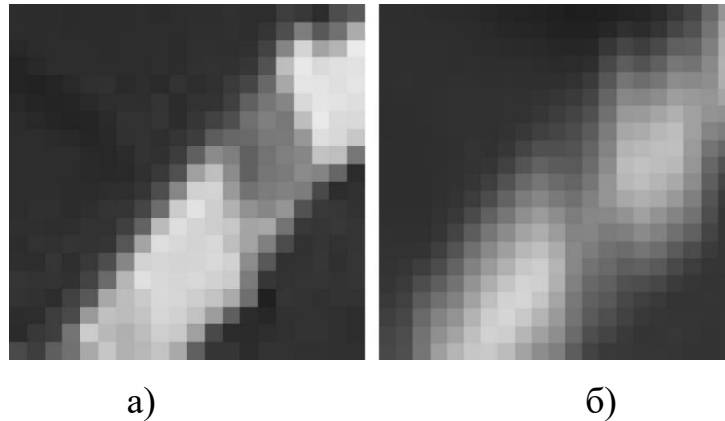


Рисунок 1.2 - Пиксельная структура фрагмента изображения:
а) без смаза; б) при наличии смаза

Будем здесь и далее называть тактовый период опроса оптимальным, если при нём смаз отсутствует, добавив в обозначение τ_T верхний индекс «*». В случае след отсутствия смаза перемещения КА по орбите $\Delta = \Delta(\tau_T^*)$ за один такт накопления точно соответствует расстоянию L между проекциями соседних элементов строк ПЗС-матриц на Землю (Рисунок 1.3).

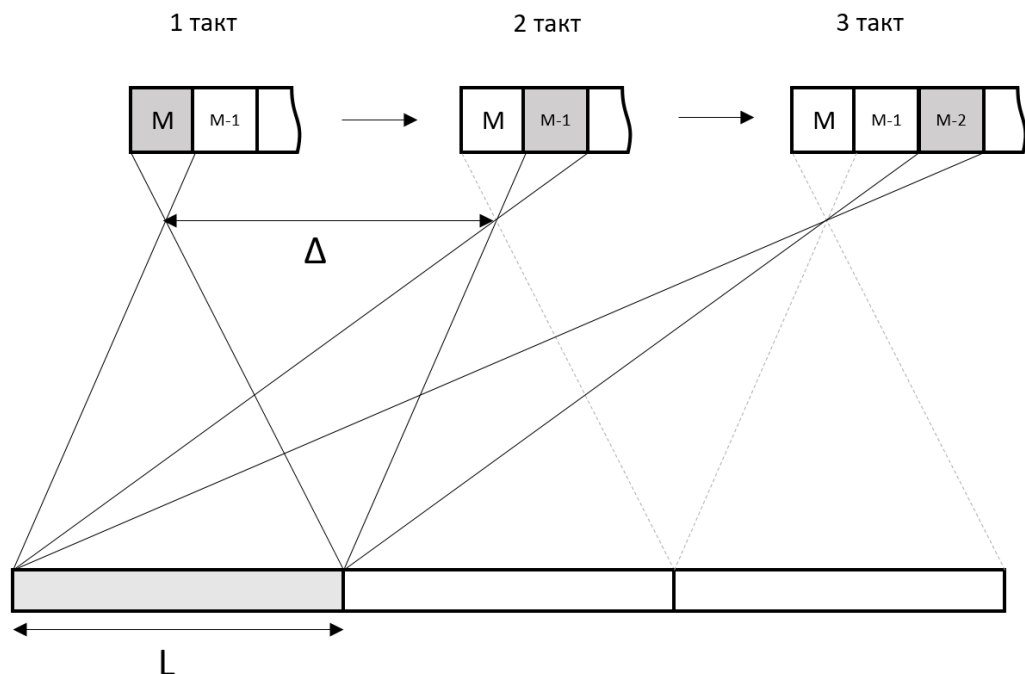


Рисунок 1.3 – Съемка в режиме ВЗН без смаза

В последующих тактах опроса и накопления $m = 1, 2, \dots, M$ сигналы, накопленные во всех предыдущих элементах строк ПЗС-матриц, передаются в

смежные элементы ПЗС-матриц следующих строк, где продолжается их накопление и суммирование от одних и тех же участков местности. Вследствие этого суммарный видеосигнал не искажается и полученное изображение не имеет смаза.

Рассмотрим случай, когда в режиме ВЗН программное значение периода опроса больше оптимального ($\tau_T^{\Pi} > \tau_T^*$). Процесс возникновения смаза в этом случае происходит следующим образом (Рисунок 1.4).

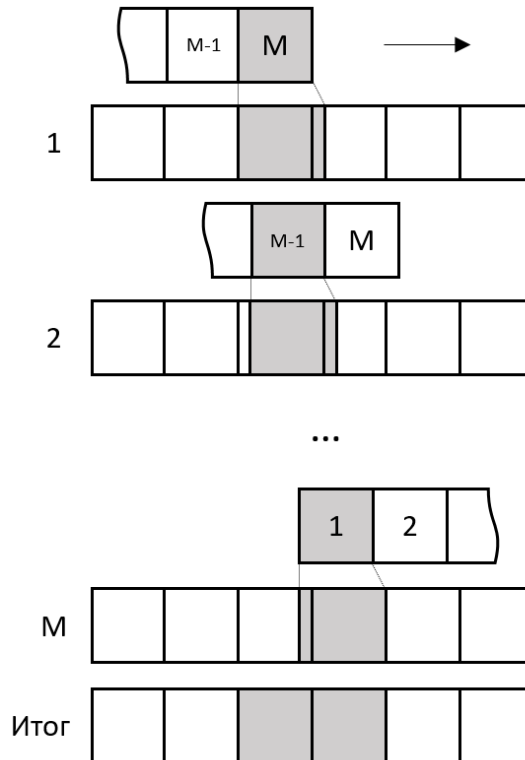


Рисунок 1.4 – Иллюстрация смаза при $\tau_T^{\Pi} > \tau_T^*$

Поскольку в случае $\tau_T^{\Pi} > \tau_T^*$ справедливо соотношение $\Delta(\tau_T^{\Pi}) > \Delta(\tau_T^*)$, в каждом такте накопления происходит накопление сигналов не только от «своих», но от смежных участков. При этом суммарные размеры территории, участвующей в каждом такте накопления сигналов, на $\delta/M \cdot L$ больше, чем при съемке с оптимальным периодом опроса τ_T^* , где δ -величина смаза в элементах ПЗС-матриц. Отсюда следует, что при $\tau_T^{\Pi} > \tau_T^*$ соотношение (1.1) примет следующий вид:

$$\Delta(\tau_T^{\Pi}) - L = L \cdot \delta/M. \quad (1.5)$$

После несложных преобразований получим:

$$\Delta(\tau_T^{\Pi}) = L \cdot (M + \delta) / M. \quad (1.6)$$

Аналогично (Рисунок 1.5) протекает процесс смаза и при $\tau_T^{\Pi} < \tau_T^*$, с той лишь разницей, что в каждом такте накопления участвуют «свой» и смежные участки, общий размер которых на $\delta/M \cdot L$ меньше, чем при съемке с оптимальным периодом опроса τ_T^* . Поэтому соотношение (1.1) примет следующий вид:

$$\Delta(\tau_T^{\Pi}) = L \cdot (M - \delta) / M. \quad (1.7)$$

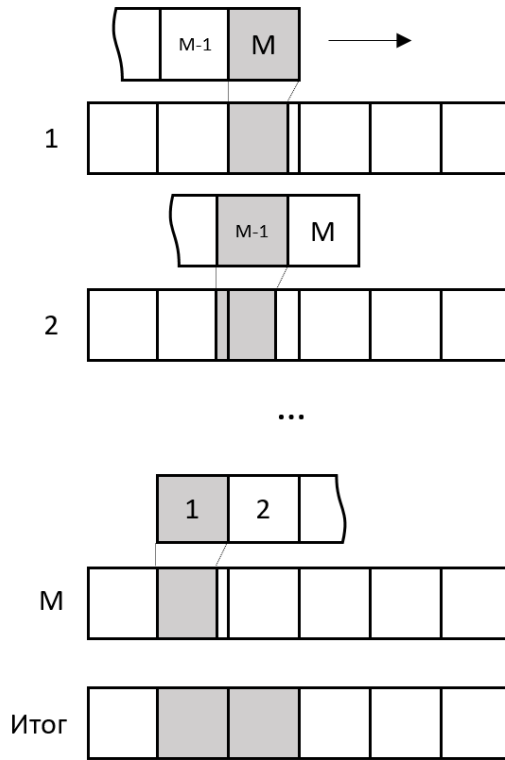


Рисунок 1.5 – Иллюстрация смаза при $\tau_T^{\Pi} < \tau_T^*$

Поскольку уровень смаза измеряется в пикселях, значение δ не может быть отрицательным. Учитывая изложенное и обобщая выражения (1.1), (1.6) и (1.7), получим общую геометрическую модель смаза в ОЭСС в режиме ВЗН зарядовых пакетов:

$$\delta = M \cdot |L - \Delta(\tau_T^{\Pi})| / L = \begin{cases} M(\Delta(\tau_T^{\Pi}) - L) / L, & \text{если } \tau_T^{\Pi} > \tau_T^*; \\ M(L - \Delta(\tau_T^{\Pi})) / L, & \text{если } \tau_T^{\Pi} < \tau_T^*; \\ 0, & \text{если } \tau_T^{\Pi} = \tau_T^*. \end{cases} \quad (1.8)$$

Основываясь на выражениях (1.2) – (1.4) и (1.6) – (1.8), получим параметрические модели, устанавливающие функциональную взаимосвязь между уровнем смаза изображений δ в ОЭСС в режиме ВЗН, программным значением тактового периода τ_T^{Π} опроса ПЗС-матриц и погрешностью его задания $\sigma\tau_T^{\Pi}$. Учитывая, что

$$L = V_{КА} \cdot \tau_T^*; \quad (1.9)$$

$$\Delta(\tau_T^{\Pi}) = V_{КА} \cdot \tau_T^{\Pi}, \quad (1.10)$$

подставим выражения (1.9) – (1.10) в (1.8). Получим:

$$\delta = \begin{cases} M(\tau_T^{\Pi} - \tau_T^*) / \tau_T^*, & \text{если } \tau_T^{\Pi} > \tau_T^*; \\ M(\tau_T^* - \tau_T^{\Pi}) / \tau_T^*, & \text{если } \tau_T^{\Pi} < \tau_T^*; \\ 0, & \text{если } \tau_T^{\Pi} = \tau_T^*. \end{cases} \quad (1.11)$$

Будем считать, что погрешности τ_T^{Π} распределены по нормальному закону.

Тогда можно записать:

$$|\tau_T^{\Pi} - \tau_T^*| = 3 \cdot \sigma\tau_T^{\Pi}. \quad (1.12)$$

Введём следующие обозначения:

$$\Delta_o(\tau_T^{\Pi}) = |\tau_T^{\Pi} - \tau_T^*| / \tau_T^*; \quad (1.13)$$

$$\Delta_A(\tau_T^{\Pi}) = |\tau_T^{\Pi} - \tau_T^*|, \quad (1.14)$$

где $\Delta_o(\tau_T^{\Pi}), \Delta_A(\tau_T^{\Pi})$ – относительные и абсолютные погрешности определения программных значений τ_T^{Π} .

После несложных преобразований на основе выражений (1.11) – (1.14) получим следующие параметрические модели смаза:

$$\delta = M \cdot \Delta_o(\tau_T^{\Pi});$$

$$\delta = M \cdot \Delta_A(\tau_T^{\Pi}) / \tau_T^{\Pi};$$

$$\delta = 3M \cdot \sigma\tau_T^{\Pi} / \tau_T^{\Pi};$$

$$\tau_T^{\Pi}(\delta) = \tau_T^* \cdot \begin{cases} (M + \delta) / M, & \text{если } \tau_T^{\Pi} > \tau_T^*; \\ (M - \delta) / M, & \text{если } \tau_T^{\Pi} < \tau_T^*. \end{cases} \quad (1.15)$$

Рассмотрим более подробно саму процедуру моделирования смаза, вызванного несоответствием τ_T^{Π} и τ_T^* . В известной литературе [38–39,42–47] для получения количественных оценок и компьютерного моделирования уровня смаза в ОЭСС используются спектральные методы математического описания процессов формирования видеосигналов в режиме ВЗН. Если допустить, что СДИ совпадает со строчным направлением изображения, то ФРТ является одномерной [39] и имеет форму отрезка, а для моделирования смаза можно воспользоваться следующими упрощенными алгоритмами.

Для кадровой съемки при моделировании смаза, вызванного превышением экспозиции, величиной один пиксель необходимо сложить для каждого пикселя изображения текущее значение сигнала со значением сигнала в соседней строке в направлении СДИ. Для произвольной величины смаза δ , необходимо сложить значения δ смежных пикселей, расположенных в смежных строках в направлении СДИ, то есть $W_{kp}(\delta) = W_{(k+1)p} + W_{(k+2)p} + \dots + W_{(k+\delta)p}$. Экспозиция в таком случае будет равна $\delta\tau_T^*$.

Если время экспозиции меньше оптимального, то есть $\tau_T^{\Pi} < \tau_T^*$ моделирование происходит иначе. В этом случае смаз отсутствует, но при этом проявляется уменьшение яркости, которое прямо пропорционально отношению программной экспозиции к оптимальной, то есть $W_{kp}(\delta) = W_{kp} \frac{\tau_T^{\Pi}}{\tau_T^*}$.

Следует отметить то, что при величине смаза δ , яркость изображения возрастает приблизительно в δ раз, в результате чего значения яркости сигналов достигают максимально возможных величин, и очень быстро возникает эффект «пересвечивания» изображения. В то же время в процессе съемки при высоких значениях СДИ не всегда возможно обеспечить достаточный уровень экспозиции, вследствие смаза, вызванного быстрым движением. Однако этих недостатков лишена съемка в режиме ВЗН. В этом режиме съемки для обеспечения достаточной экспозиции один и тот же участок местности снимается многократно в каждом датчике матрицы ПЗС, которая перемещается

в процессе съемки за счет полета КА. Рассмотрим подробнее моделирование смаза в данном режиме.

Используя параметрическую модель смаза (1.15), нетрудно показать, что формула для расчёта искажённых значений сигналов $W_{kp}(\delta)$ пикселей $\{k, p\}$ по их значениям W_{kp}^* для реального изображения без смаза имеет вид:

$$W_{kp}(\delta) = \sum_M^m \int_{k_m}^{k_m+l_m} s(k, p) dk, \quad (1.16)$$

где $W_{kp}(\delta)$ – значения сигналов искажённого изображения; m – номер такта накопления; M – количество тактов накопления; k – номер строки изображения; $k_m = k + m \left(\frac{\delta}{M}\right)$ – положение датчика в начале такта накопления m в координатной системе снимка в строчном направлении; $l_m = 1 + m \left(\frac{\delta}{M}\right)$ – длина участка накопления такта m в координатной системе снимка; p – номер столбца изображения; $s(k, p)$ – функция изображения подстилающей поверхности;

Как видно на рисунке (1.4), при возникновении смаза величиной в один пиксель при $\tau_T^{\text{п}} > \tau_T^*$, на первом такте накопления в датчик попадает территория на $\frac{1}{M} L$ часть больше, чем при съемки с оптимальным периодом опроса. Это приводит к тому, что следующий датчик начинает накопление на ту же часть дальше, чем следует и накапливает, соответственно, больше. И в результате всех тактов накапливается территория в два раза больше оптимальной, что соответствует двум пикселям исходного изображения. Но, в отличии от кадровой съемки, яркость увеличивается не в два раза, а приблизительно на $\frac{1}{M}$ относительно исходной.

Поэтому для моделирования смаза при $\tau_T^{\text{п}} > \tau_T^*$ величиной один пиксель необходимо увеличить $\tau_T^{\text{п}}$ на $\tau_T^* \frac{1}{M}$. Таким образом, за M тактов накопления, в текущем пикселе последовательно будет накоплен заряд текущего и следующего пикселя. То есть на первом такте накопления в датчик попадает заряд $W_1 =$

$\tau_T^{\Pi} < \tau_T^*$ изображение визуально растягивается относительно изображения без смаза в следствии того, что при неизменной скорости полета КА, время накопления на каждом такте меньше. В итоге будет снята меньшая территория при том же размере изображения. Соответственно, в случае $\tau_T^{\Pi} > \tau_T^*$ изображение визуально сжимается относительно оптимального.

Таким образом, может быть смоделирован смаз для кадровой и ВЗН съемки как с превышением, так и с меньшим значением периода опроса относительно оптимального.

Выражения (1.2) – (1.4), (1.6) – (1.16) позволяют решить две задачи: оценку уровня смаза реального изображения, полученного от ОЭСС в режиме ВЗН, по известным параметрам режима ВЗН и погрешностям их задания, и моделирование различных уровней смаза по реальному изображению без смаза. В первом случае должны быть известны параметры τ_T^{Π} , M и погрешность $\sigma\tau_T^{\Pi}$, а во-втором, значение параметров режима ВЗН τ_T^* , M , и значения сигналов $W_{кр}^*(\delta)$ всех пикселей изображения, полученного без смаза.

Необходимо также отметить, что отличие программных значений τ_T^{Π} от оптимальных τ_T^* обусловлено, во-первых, погрешностями σV_x^{Π} расчёта программных значений СДИ из-за ошибок задания параметров движения КА и других параметров съёмки, во-вторых, методическими ошибками ∇_m используемых моделей СДИ. Это означает, что справедливо выражение

$$\sigma V_x^{\Pi} = \sqrt{(\sigma V_x^{\Pi}(\text{КА}))^2 + \nabla_m^2}. \quad (1.17)$$

Оценим далее степень вклада в суммарную погрешность (1.17) методических ошибок ∇_m и погрешностей $\sigma V_x^{\Pi}(\text{КА})$ измерений параметров съёмки. Известно [133], что методические погрешности расчёта СДИ в существующих моделях составляют величину $\nabla_m = 2 \cdot 10^{-4}$ м/с. Для получения количественных оценок $\sigma V_x^{\Pi}(\text{КА})$ воспользуемся формулой [99-102], а именно, $V_x^{\Pi}(\text{КА}) = (d/D) \cdot V_{\text{КА}}$, где d, D – модули коллинеарных векторов, направленных из центра проекции ОЭСС до точек пересечения соответственно с центром линейки ПЗС и земной поверхностью; $V_{\text{КА}}$ – модуль вектора скорости КА.

Очевидно, что:

$$\sigma V_x^{\Pi}(\text{КА}) = \sqrt{\left(\frac{\partial V_x^{\Pi}(\text{КА})}{\partial D}\right)^2 \cdot \sigma^2(D) + \left(\frac{\partial V_x^{\Pi}(\text{КА})}{\partial V_{\text{КА}}}\right)^2 \cdot \sigma^2(V_{\text{КА}})}.$$

Дифференцируя $V_x^{\Pi}(\text{КА})$ по D и по $V_{\text{КА}}$, находим:

$$\frac{\partial V_x^{\Pi}(\text{КА})}{\partial D} = \frac{V_x^{\Pi}}{D}$$

$$\frac{\partial V_x^{\Pi}(\text{КА})}{\partial V_{\text{КА}}} = d/D.$$

Тогда получим:

$$\sigma V_x^{\Pi}(\text{КА}) = \frac{1}{D} \sqrt{(V_x^{\Pi})^2 \cdot \sigma^2 D + d^2 \cdot \sigma^2 V_{\text{КА}}}.$$

Возьмём параметры, характерные для КК «Ресурс – П» [16-17,37], а именно, $d = 4$ м; $D = 450$ км; $\sigma V_{\text{КА}} = 0,5$ м/с; $V_x^{\Pi} = 0,06$ м/с; $\tau_T^{\Pi} = 1 \cdot 10^{-2}$ с; $\sigma D = 100$ м. Тогда имеем:

$$\sigma V_x^{\Pi}(\text{КА}) = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ м/с.} \quad (1.18)$$

Отсюда следует, что доля методических ошибок в суммарной погрешности σV_x^{Π} расчёта СДИ на порядок больше доли, обусловленной ошибками определения параметров движения КА на интервале съёмки. Тогда будем в дальнейшем полагать, что погрешности определения программных значений СДИ и в соответствие с (1.3) программных значений тактового периода опроса ПЗС-матриц определяется величиной методических погрешностей расчёта СДИ. Рассмотрим далее известные методы коррекции смаза изображений.

1.2 Геометрические методы коррекции смаза

Методология геометрического подхода к коррекции смаза состоит в его локализации путём выбора на этапе планирования ДЗЗ такой геометрии съёмки, при которой программное изменение угловой ориентации КА, а также направляющих косинусов СПЛ обеспечит корректную работу режима ВЗН на всем интервале съёмки. Для этого в соответствующие элементы матрицы ПЗС в каждом такте накопления должны попадать одни и те же участки местности, не смотря на изменение положения КА на орбите.

С этой целью получают функциональные зависимости для продольной V_x и поперечной V_y составляющих СДИ от элементов внутреннего и внешнего ориентирования маршрута съёмки, в которые затем подставляются известные условия [1-33]

$$\begin{cases} V_x = const. \\ V_y = 0. \end{cases} \quad (1.19)$$

Если условия (1.19) выполняются, то обеспечивается синхронная передача ЗП в строчном направлении ПЗС матриц. При этом смаз формирующегося изображения отсутствует. Учитывая это, известные методы геометрической коррекции смаза в режиме ВЗН ЗП основываются на получении аналитических соотношений для продольной V_x и поперечной V_y составляющих СДИ, как функций от ЭВО. Далее в эти соотношения подставляются условия (1.19), и полученные выражения решаются относительно угловых ЭВО. В результате полученные кинематические уравнения реализуются системой управления КА на всем интервале съёмки.

Отличия существующих геометрических методов коррекции смаза состоят, в основном, в разнице используемого математического аппарата и координатного пространства для получения зависимостей для СДИ. Так, работы [1-3], впервые описывающие данный подход, используют уравнения коллинеарности в топоцентрической системе координат с тремя углами Эйлера наклона снимка в качестве ЭВО и их производными угловыми скоростями:

$$\begin{aligned} V_x = \dot{x}(t) &= \frac{d}{dt} \left(f \cdot \frac{a_{11}(t)(X - X_S(t)) + a_{21}(t)(Y - Y_S(t)) + a_{31}(t)(Z - Z_S(t))}{a_{13}(t)(X - X_S(t)) + a_{23}(t)(Y - Y_S(t)) + a_{33}(t)(Z - Z_S(t))} \right); \\ V_y = \dot{y}(t) &= \frac{d}{dt} \left(f \cdot \frac{a_{12}(t)(X - X_S(t)) + a_{22}(t)(Y - Y_S(t)) + a_{32}(t)(Z - Z_S(t))}{a_{13}(t)(X - X_S(t)) + a_{23}(t)(Y - Y_S(t)) + a_{33}(t)(Z - Z_S(t))} \right), \end{aligned} \quad (1.20)$$

где $a_{ij}(t)$ – элементы матрицы направляющих косинусов $A(t)$ ориентации снимка в фотограмметрической системе координат $OXYZ$, центр которой находится в центре проекции съёмочной системы, и которые соответствуют α, β, θ – углам Эйлера наклона снимка; $X_S(t), Y_S(t), Z_S(t)$ – пространственные координаты центра проекции съёмочной системы с фокусным расстоянием f в момент времени t ; X, Y, Z – пространственные координаты точки

местности, соответствующей по законам центральной проекции точке фокальной плоскости с координатами x, y [1-3].

На практике полученные на основе выражения (1.20) зависимости не получили распространение, поскольку в них использовались параметры, характерные для аэрофотосъёмки. В работах [4-14] уже использовались традиционные для небесной механики параметры движения КА в абсолютных геоцентрических системах координат и параметры ориентации КА в системах отсчёта, используемых на борту КА, которые ближе по физической сущности и составу к измеряемым на практике. Однако, в одних работах [4-7] применяются численные приближённые методы решения получаемых строгих уравнений для СДИ, которые имеют методические погрешности, возникающие при численном дифференцировании, в других [8-12] - допущения и упрощения, связанные, в частности, с представлением поверхности полосы захвата ОЭСС как часть сферы и т.п. Это снижает методическую точность определения программных значений СДИ и, как было показано выше, приводит к возникновению смаза на уровне единиц пикселей. На практике, как показывает анализ известной литературы [14,23-29,38], величина априорного смаза может быть существенно больше (8-12 пикселей) в силу того, что в процессе вывода спутника на орбиту и его функционирования в космосе возможны неизбежные деформации фокальной плоскости и оптической системы. В современных системах ДЗЗ существует возможность настройки объектива на орбите, но как показано в работе [38], возможности такой настройки не безграничны.

Таким образом, существующие геометрические методы коррекции смаза, используемые в ОЭСС на этапе планирования ДЗЗ, обеспечивают необходимые, но недостаточные условия получения изображений требуемого качества, и должны быть дополнены процедурами их окончательной коррекции либо в процессе съёмки, либо в ходе наземной обработки.

1.3 Спектральные и алгебраические методы коррекции смаза

Формирующееся съёмочной системой изображение $s(x, y)$ (Рисунок 1.7) в общем случае представляет собой [41] искаженную (нечеткую) копию оригинала $u(\vartheta, \nu)$.

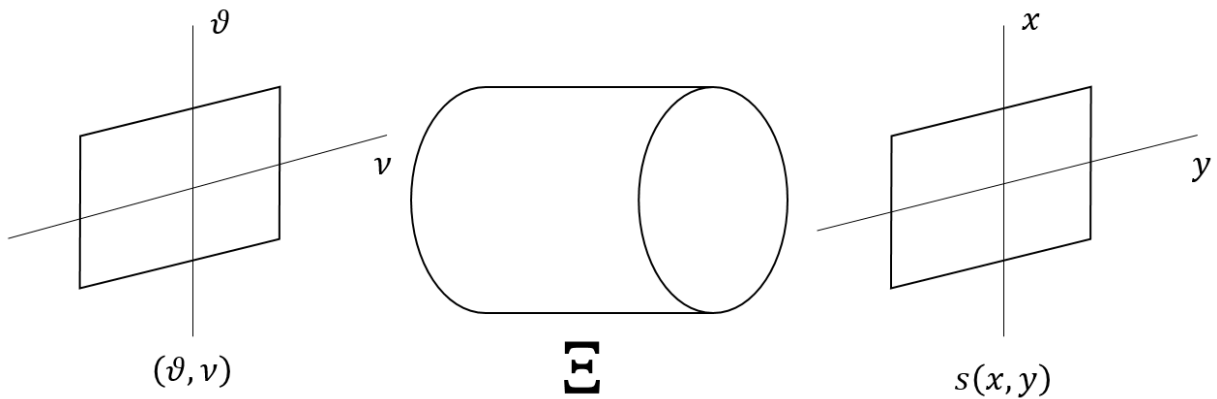


Рисунок 1.7 – Общая схема формирования изображения

Тогда процесс формирования изображения $s(x, y)$, имеющего смаз по осям x и y , может быть описан выражением [41]

$$s(x, y) = \Xi[u(\vartheta, \nu)], \quad (1.21)$$

где $u(\vartheta, \nu)$ - исходное идеальное изображения с неизвестным распределением яркости регистрируемой сцены; Ξ - оператор искажений. В теории цифровой обработки изображений под задачей восстановления изображения понимается устранение или ослабление искажений для повышения резкости. Вид оператора Ξ считается известным, поскольку он определяется свойствами конкретной формирующей системы. Задача восстановления заключается в нахождении изображения $\hat{u}(\vartheta, \nu)$, являющегося оценкой исходного изображения $u(\vartheta, \nu)$, по наблюдаемому смазанному изображению $s(x, y)$, т.е. в устранении искажений, вносимых оператором Ξ [41].

В соответствие с этим в работе [39] описано формирование видеосигнала одним произвольным столбцом ПЗС-матрицы (Рисунок 1), направленным вдоль оси x . Обозначим изображение, формирующееся этим столбцом, через $s(x)$, и

положим, что время τ опроса элементов матрицы существенно меньше периода опроса τ_T .

В этом случае на i -м такте накопления в строке матрицы ПЗС под номером n происходит накопление заряда $q_n(i) = s(i\Delta + nL)$, где $n = \overline{1, N}$, который суммируется в строчном направлении и формирует сигнал [39]:

$$r(i) = \sum_{n=1}^N q_n(i-n) = \sum_{n=1}^N s(i-n)\Delta + nL = \sum_{n=1}^N s(i\Delta + n(L-\Delta)). \quad (1.22)$$

Данный процесс в ОЭСС может быть представлен в виде свёртки изображения $s(x)$ с функцией рассеивания точки (ФРТ), которая является одномерной и имеет следующий вид [39]:

$$f(x) = \sum_{n=1}^N \delta(x - n(L-\Delta)). \quad (1.23)$$

Далее проводится дискретизация непрерывного сигнала изображения. При этом шаг дискретизации равен Δ , а в качестве дельта-функции выступает $\delta(x)$. Таким образом, в операторной форме выражения (1.21) - (1.22) выглядят следующим образом:

$$r = D(f(s)) = Dfs, \quad (1.24)$$

где D - оператор дискретизации, f - оператор линейной системы (1.23) [39].

Перейдём от непрерывного изображения $s(x, y)$ к дискретному изображению s и положим, что $s = D^{-1}r^l$. Это означает, что изображение s можно однозначно восстановить линейным оператором D^{-1} по его известным дискретным отсчётам. Подставим последнее выражение в (1.24) и задача устранения смаза изображения может быть сформулирована как переход от дискретного изображения r к дискретному изображению r^l , которое формируется без смаза, идеальной съёмочной системой

$$r = Fr^l. \quad (1.25)$$

При этом оператор

$$F = DfD^{-1}, \quad (1.26)$$

можно рассматривать как свертку с дискретной ФРТ, так как он осуществляет связь между двумя дискретными изображениями, линейен и

обладает свойством инвариантности к целочисленным сдвигам дискретного входного сигнала [39].

В известной литературе [38-39,41-42], связанной с цифровой обработкой космических изображений, задача их восстановления сводится к решению уравнения (1.25) относительно r^l , и показано, что эта задача может быть решена с использованием двух подходов: спектрального и алгебраического.

Спектральные методы.

Формально процесс устранения смаза изображений спектральными методами можно описать следующей формулой

$$r^l = \frac{r}{F}, \quad (1.27)$$

где r^l, r, F – преобразование Фурье операторов из выражения (1.25), а в качестве закона композиции используется поточечное умножение. В качестве F используется Π – образная функция. Спектр функции может быть представлен следующим образом:

$$F(\omega) = \frac{[\sin(0.5 \omega \cdot \delta)]}{(0.5 \omega \cdot \delta)}, \quad (1.28)$$

где δ – величина смаза. Вид функции $F(\omega)$ определяет возможность коррекции смаза изображения. Основным показателем выступает количество нулей функции на рабочем участке спектра $\omega \in [0, \pi]$, которое обычно составляет около половины величины смаза. Поэтому при восстановлении изображения спектральными методами может быть три варианта вида функции $F(\omega)$ [39]:

- Отсутствие нулей в рабочей полосе частот функции $F(\omega)$ свидетельствует о *незначительном уровне смаза*, не превышающем двух пикселей изображения. В этом случае для его коррекции применяется формула (1.25), а также проводится оценка функций F и f , которые обычно меняются на протяжении всего снимка;

- Несколько нулей функции соответствует *среднему урону смаза*. В данном случае необходима регуляризация $1/F$ в области нулей функции F ;

- При наличии большого количества нулей функции $F(\omega)$ на рабочем участке спектра наблюдается *сильный смаз*. При этом полезный сигнал значительно ослабляется. Величина ослабления сигнала пропорциональна $1/(\omega \cdot \delta)$ и усиливается в процессе возрастания частоты. Для того чтобы сигнал не подавлялся шумом, необходимо на высоких частотах регулировать коэффициент усиления $1/F$.

В случае некоррелированного шума, фильтр Винера дает оптимальное решение, обеспечивая среднеквадратическую близость восстановленного и исходного сигналов

$$r^1(\omega) = \frac{|\tilde{F}(\omega)|}{|F(\omega)|^2 + E(\omega)} \cdot r(\omega), \quad (1.29)$$

где $E(\omega)$ - отношение спектральной мощности шума и изображения [41-43].

Быстрое преобразование Фурье (БПФ) может быть использовано в практической реализации фильтрации в спектральной области. При этом используется длина M окна БПФ, которая должна быть значительно больше величины смаза δ и с использованием выражения (1.29) вычисляется дискретный спектр

$$\mathcal{V}(\mathcal{W}) = V(\omega), \quad (1.30)$$

где $\omega = \frac{2\pi}{M} \mathcal{W}$, $\mathcal{W} = \overline{0, M-1}$.

Полученному спектру $\mathcal{V}(\mathcal{W})$ требуется найти импульсную характеристику $V(i)$, где $i = -\frac{M}{2}, \frac{M}{2} - 1$, для чего применяется обратное БПФ. При этом, в процессе восстановления сигнала, длина которого составляет Z отчетов используется $(Z+M)$ ближайших отчетов входного сигнала [39].

В работе [39] показано, что, несмотря на применение быстрых преобразований Фурье, применение спектральных методов восстановления и коррекции изображений на борту КА весьма проблематично даже в дальней перспективе из-за больших и сверхбольших объёмов видеoinформации.

Алгебраические методы.

Формирующие системы Ξ , изображенные на рисунке 1.3, в большинстве своем можно упрощенно представить как линейные и обладающие свойством инвариантности к сдвигу. Сформированные подобными системами изображения $s(x, y)$ испытывают линейные искажения. При этом механизм возникновения этих искажений одинаков для всех участков изображения. Данные искажения приводят к ослаблению верхних частот в исходном изображении $u(\vartheta, \nu)$. В результате резкость изображения уменьшается, а также проявляется смаз. В целях упрощения описания работы алгебраических методов допустим, что на изображениях отсутствует шум, наличие которого неизбежно в реальных условиях съемки. Тогда $s(x, y) = z(x, y)$ и общая схема формирования непрерывных изображений (Рисунок 1.8) примет следующий вид [41]:

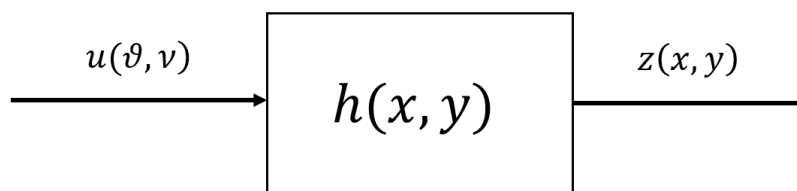


Рисунок 1.8 - Линейная модель формирования изображения

При отсутствии шума, изображение $z(x, y) = s(x, y)$, которое было получено в результате линейного искажения входного изображения $u(\vartheta, \nu)$, можно представить в виде двумерной свёртки:

$$z(x, y) = h(x, y) \otimes \otimes u(\vartheta, \nu), \quad (1.31)$$

где $h(x, y)$ – двумерная ФРТ [41].

Иными словами, ФРТ $h(x, y)$ вносит искажения в виде смаза в непрерывное исходное изображение $u(\vartheta, \nu)$, представленное значениями функции яркости. Для цифровых изображений, вместо непрерывных двумерных функций $s(x, y)$, $z(x, y)$, $u(\vartheta, \nu)$, $h(x, y)$, используются двумерные массивы данных со значениями яркости в интервалах дискретизации, которые имеют

одинаковые размеры $\Delta = \Delta x = \Delta y$ и соответствуют пикселям изображения. Таким образом, выражение (1.31) принимает следующий вид:

$$z(i, j) = h(i, j) \otimes \otimes u(i, j), \quad (1.32)$$

где $i = \left(-\frac{L_i}{2}, \frac{L_i}{2}\right), j = \left(-\frac{L_j}{2}, \frac{L_j}{2}\right)$, L_i, L_j - размеры условного кадра дискретного изображения (число отсчётов), i – номер строки, j – номер столбца [41].

Отметим, что размеры условного кадра дискретного изображения можно определить как отношение высоты L_B и ширины L_T аналогового кадра изображения к длине интервала дискретизации Δ , а ФРТ имеет следующий вид:

$$h(i, j) = \begin{cases} \Delta/\delta, & \text{при } 0 \leq i \leq \delta/\Delta - 1; j = 0 \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}, \quad (1.33)$$

где размеры условного кадра $L_i = \delta/\Delta, L_j = 1$ [41].

Выражение (1.32) можно представить в виде системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно $u(i, j)$. Таким образом, для того чтобы восстановить исходное цифровое изображение $u(i, j)$ с использованием ФРТ $h(i, j)$, достаточно решить такую систему уравнений, что и составляет суть алгебраических методов коррекции смаза [41].

Выражение (1.32) можно представить в матричном виде. С этой целью двумерный массив изображения $Z(i, j) = S(i, j)$, который имеет размер

$$L^{(z)} = L^{(s)} = (L_i + 1) \times (L_j + 1), \quad (1.34)$$

преобразуется в вектор столбец $Z = S$ с размером $L^{(z)} \times 1 = L^{(s)} \times 1$. Данная операция выполняется путем развертки массива $s(i, j)$ в строчном направлении. Таким же способом исходное изображение $u(i, j)$ преобразуется в вектор – столбец $L^{(u)}$. Тогда, учитывая, что в условиях отсутствия шумов $Z = S$, связь между исходным и смазанным изображением будет определяться соотношением

$$Z = HU, \quad (1.35)$$

где H - прямоугольная матрица, которая используется для преобразования вектора исходного изображения U в вектор искаженного изображения Z и имеет размер $L^{(z)} \times L^{(u)}$. При этом матрица H состоит из блоков, элементы которых содержат отсчеты для ФРТ [41].

Учитывая изложенное, восстановление изображения алгебраическими методами заключается в нахождении оценки \hat{U} решения уравнения (1.35), которая удовлетворяет следующему условию [41]

$$Z = H\hat{U}. \quad (1.36)$$

В случае квадратной матрицы H и существовании обратной матрицы $[H]^{-1}$, уравнение легко решалось бы следующим образом:

$$\hat{U} = [H]^{-1}Z. \quad (1.37)$$

Но матричное уравнение (1.35) является неопределенной СЛАУ, а матрица H представляет собой прямоугольную матрицу, которая имеет размер $L^{(z)} \times L^{(u)}$. Это обусловлено тем, что размер исходного изображения превышает размер искаженного изображения и, соответственно, количество уравнений $L^{(z)}$ всегда меньше числа неизвестных $L^{(u)}$. В работе [102] и во многих других работах описаны различные методы решения подобных СЛАУ, которые основаны на применении метода наименьших квадратов, псевдообратных матриц и т.п. Неопределённые СЛАУ имеют более одного решения, поэтому существует проблема выбора наиболее подходящего решения для использования в качестве оценки \hat{U} . В качестве критерия выбора решения обычно используется так называемый критерий наименьших квадратов, который обеспечивает минимизацию ошибки восстановления изображения

$$\varepsilon_1^2 = e_i(\hat{U})^T e_i(\hat{U}) = \sum_{i=1}^{L^{(u)}} (U_i - \hat{U}_i)^2 = \min, \quad (1.38)$$

где t – операция транспонирования матрицы; $e_i(\hat{U}) = U - \hat{U}$ - ошибка восстановления в векторной форме.

Минимальная норма ошибки достигается, если оценка решения \hat{U} будет

$$\hat{U} = H^+ Z, \quad (1.39)$$

где $H^+ = H^T(HH^T)^{-1}$ - обратная обобщенная матрица [41].

Основным недостатком алгебраических методов восстановления изображений, препятствующем их применению на борту КА, является то, для их реализации необходимы огромные вычислительные ресурсы. Это обусловлено тем, что в процессе вычислений используются операции умножения, транспонирования и обращения матриц сверхбольших размеров, а также большим количеством итераций метода наименьших квадратов. Поэтому данные методы не могут быть применены на борту КА.

1.4 Градиентные методы коррекции смаза

Градиентные методы направлены на повышение качества формирования изображения в реальном режиме времени, т.е. непосредственно в процессе съёмки. В основе этих методов лежат итерационные процедуры минимизации величины смаза, которая пропорциональна градиентным характеристикам яркостных полей формирующегося изображения. В общем виде модель коррекции смаза в градиентных методах будем представлять следующим образом:

$$\begin{cases} \delta_{\gamma_j}^j - \delta_{\gamma_j + \Delta\gamma}^{j+1} \Rightarrow \min. \\ F \{W_{\gamma_j}^j, W_{\gamma_j + \Delta\gamma}^j\} \Rightarrow \max, \end{cases} \quad (1.40)$$

где $\delta_{\gamma_j}^j$ - величина смаза j -й обрабатываемой сцены подстилающей поверхности при j -м значении параметра съёмки γ ; Δ - дискретность изменения параметра съёмки γ ; $W_{\gamma_j}^j$ - значение яркостных полей j -й сцены при j -м значении параметра съёмки γ .

В выражении (1.40) под параметром съёмки γ понимается одна из характеристик съёмочной системы, которая программным образом изменяется в процессе съёмки. В современных кадровых цифровых ИС это время экспозиции,

выдержка, форма и размер диафрагмы, фокусное расстояние объектива [103-104]. В ОЭСС с ВЗН ЗП к этим параметрам можно добавить тактовый период опроса матриц ПЗС и СДИ [42-43]. Поскольку предметом исследования в работе является скоростной смаз, возникающий при движении съёмочной системы и подстилающей поверхности друг относительно друга во время экспозиции, в качестве программно-изменяющегося параметра съёмки в цифровых фотокамерах будем рассматривать время экспозиции, а в ОЭСС – тактовый период опроса матриц ПЗС.

Анализ известной литературы [32-35,81-89] показал, что в градиентных методах для идентификации смаза используется три основных подхода. Первый основан на анализе частотных, второй – дисперсионных, третий – кинематических характеристик яркостных полей изображений регистрируемых сцен. В соответствие с этим в первом случае в качестве показателя наличия смаза обрабатываемой сцены используется низкая доля высоких частот в спектре её изображения, во втором – низкое значение дисперсии скорости изменения яркостей пикселей, и в третьем – наличие скорости смаза. С целью оценки возможности применения этих подходов на борту КА рассмотрим их суть более подробно.

Градиентный анализ частотных характеристик в цифровой фотосъёмке представляет собой усечённый спектральный метод восстановления изображений, рассмотренный выше. Усечённость состоит в том, что, ФРТ обрабатываемой сцены используется не для восстановления исходного изображения, а только для идентификации наличия или отсутствия смаза путём анализа распределения частот в спектре изображения.

Для этого ФРТ обрабатываемой сцены

$$f(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\delta} \Delta(x), & \text{при } 0 \leq y \leq \delta; \\ 0 & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (1.41)$$

преобразуется в функцию

$$F(\omega) = [\sin(0.5\omega \cdot \delta)] / (0.5\omega \cdot \lambda), \quad (1.42)$$

где $\Delta(x)$ – дельта-функция; ω – пространственные частоты Фурье; δ – величина смаза.

В работе [39] показано, что в этом случае на рабочий участок спектра $\omega \in [0, \pi]$ обрабатываемой сцены в первом приближении приходится $0.5 \cdot \delta$ нулей функции (1.39). Тогда наличие и величина смаза будет определяться числом нулей функции $F(\omega)$. При этом возможны три варианта [39]:

Незначительный смаз, который характеризуется отсутствием нулей в рабочей полосе частот функции $F(\omega)$;

Средний смаз, при котором имеется несколько нулей функции $F(\omega)$;

Сильный смаз, приводящий к наличию большого количества нулей функции $F(\omega)$ на рабочем участке спектра.

При идентификации среднего или сильного смаза значение времени экспозиции в цифровой камере изменяется программным образом и снова проводится частотный анализ. Эти итерации выполняются до полного устранения нулей в функции $F(\omega)$. Рассмотренный подход требует значительно меньшего объёма вычислительных ресурсов, чем полномасштабный спектральный метод восстановления изображений, и по этому критерию вполне может использоваться на борту КА.

Вместе с тем он обладает такими недостатками спектрального метода восстановления изображений, как зависимость от режима и геометрии съёмки, а также от изменений формы и вида ФРТ по полю изображения различных сцен. Для минимизации этих недостатков требуется многократный анализ распределения частот в изображениях одной и той же сцены. Такой вид съёмки в современных ОЭСС можно обеспечить только в режиме тангажного отслеживания наблюдаемой сцены, что существенно ограничивает область применения градиентных методов частотного анализа на борту КА.

Градиентный анализ дисперсионных характеристик в цифровой фотосъёмке основан на критерии максимального значения дисперсии скорости изменения яркостей пикселей по полю изображения обрабатываемой сцены [81-

89]. Суть одного из таких подходов заключается в анализе дисперсий вторых производных яркостных полей изображений наблюдаемой сцены, получаемых при различных значениях времени экспозиции [85]. При этом синтез значений вторых производных яркостных полей изображений обрабатываемой сцены выполняется путём их фильтрации с помощью оператора Лапласа

$$\nabla = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (1.43)$$

Лапласиан выделяет края и области изображения, содержащие быстрые изменения интенсивности, подобно операторам Собеля и Шарра. При этом, исходя из физической сущности смаза, высокое и низкое значение дисперсии значений вторых производных яркостей пикселей изображения сцены свидетельствует соответственно об отсутствии или наличии смаза.

В соответствие с этим подходом итерационные процедуры изменения времени экспозиции, фильтрации яркостного поля изображения обрабатываемой сцены и вычисления дисперсии значений вторых производных яркостей пикселей заканчиваются тогда, когда дисперсия (1.40) будет максимальной. Достоинством чисто дисперсионного анализа является низкий объём вычислений и по этому критерию так же, как и рассмотренный выше частотный анализ, вполне может использоваться на борту КА. В работах [32-35] предложены градиентные методы коррекции смаза (Рисунок 1.9), основанные на итерационных процедурах анализа кинематических характеристик яркостей сигналов изображений одних и тех же сцен, получаемых при различных значениях параметров съёмки. При этом в качестве изменяемого программным образом параметра съёмки в ОЭСС используется тактовый период опроса матриц ПЗС. Этот подход основан на функциональной связи скорости смаза $\Delta V_x^{см^{(v)}}$ и изменения резкости $F\left(\frac{\Delta W^{(j)}}{\Delta t}\right)$ изображений в последовательности сцен $j = \overline{1, J}$, полученных двумя линейками матриц ПЗС при различных значениях тактового периода $\tau_T^{(j)}$ опроса матриц ПЗС.

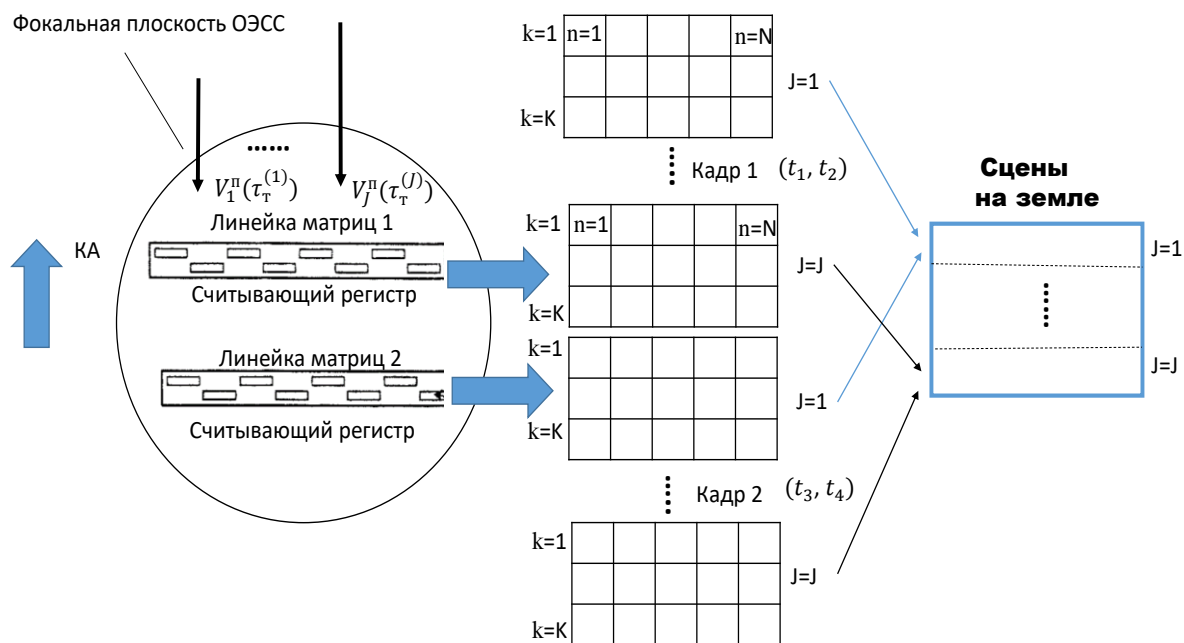


Рисунок 1.9 – Градиентные методы анализа скорости изменения смаза

В общем виде функционал смаза записывается следующим образом:

$$\left\{ \delta / \Delta t^{(v)} \right\} \min = \max \left(\frac{\Delta W^{(j)}}{\Delta t} \right) = \frac{1}{\Delta t} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \left[W_j^{(1)}(\tau_T^{(j)}) - W_j^{(2)}(\tau_T^{(j)}) \right], \quad (1.44)$$

где: $W_j^{(1)}(\tau_T^{(j)})$, $W_j^{(2)}(\tau_T^{(j)})$ – суммарные яркости j -х фрагментов одноимённых сцен изображения, полученных первой (1) и второй (2) линейками матриц ПЗС при различных значениях тактового периода $\tau_T^{(j)}$ опроса их опроса; v - порядковый номер итерации; $k = \overline{1, K}$, $n = \overline{1, N}$ - номера строк и столбцов в j -м фрагментах; (t_1, t_2) , (t_3, t_4) – интервалы времени формирования первого и второго условных кадров.

Рассматриваемый подход работает следующим образом [32-33]. В режиме ВЗН ЗП в процессе перемещения изображения подстилающей поверхности происходит перенос ЗП с одних строк матриц ПЗС на другие, при этом продолжается накопление ЗП на следующей строке. С последних строк матриц считывается накопленная информация и записывается в память БВК, где формируется первый кадр, состоящий из $j = \overline{1, J}$ изображений сцен. При этом каждая j -сцена состоит из одинакового числа строк ($k = \overline{1, K}$) и имеет своё значение тактового периода $\tau_T^{(j)}$ опроса матриц. Иными словами, значение $\tau_T^{(j)}$, а

значит и значение $V_x^п(\tau_T^{(j)})$, изменяется программным образом от одной сцены к другой. При оптимальной величине тактового периода опроса матриц второй кадр формируется в момент подхода того же участка подстилающей поверхности ко второй линейке матриц. Таким образом, в первый и второй кадры записываются последовательности $j = \overline{1, J}$ изображений $j = \overline{1, J}$ сцен подстилающей поверхности, имеющих различную величину смаза δ . Из выражения (1.3) следует, что скорость изменения величины смаза δ при изменении тактового периода $\tau_T^п$ опроса матриц определяется разницей между скоростью переноса зарядов $V_x^п$, задаваемой $\tau_T^п$, и фактической скоростью движения изображения $V_x^ф$. С другой стороны, известно, что меньше уровень смаза, тем резкость изображения и скорость изменения яркости выше. В соответствие с этим идея рассматриваемого подхода состоит в последовательном изменении тактового периода $\tau_T^п$ опроса матриц в начальном периоде съёмки и выбора такого его значения, при котором скорость изменения яркости j -й сцены будет максимальна.

Основным недостатком градиентного метода анализа кинематических характеристик является необходимость размещения дополнительной линейки ПЗС-матриц в фокальной плоскости ОЭСС, что влечёт за собой существенную доработку бортовой аппаратуры и по условиям задачи представляется нецелесообразным.

1.5 Обоснование направлений дальнейших исследований

Проведенный анализ существующих методов коррекции смаза в цифровых ИС позволяет отметить следующее. Можно выделить три основных группы методов, которые наиболее широко используются для коррекции смаза в цифровых ИС, а именно, геометрические, цифровые и градиентные.

Первая группа применяется только для ИС ДЗЗ, основывается на модели смаза (1.5) и состоит в предварительной локализации его уровня. Для этого на этапе планирования ДЗЗ рассчитывается такая геометрия съёмки, при которой в

каждом цикле ВЗН ЗП, несмотря на перемещение КА на орбите, связка проектирующих лучей (СПЛ) отслеживает сканируемые участки местности. С этой целью получают функциональные зависимости составляющих СДИ от элементов внутреннего и внешнего ориентирования маршрута съёмки (модели СДИ), в которые затем подставляются условия (1.20), и находятся параметры программного углового движения КА, обеспечивающие на всём интервале съёмки синхронность и постоянство скорости перемещения ЗП в строчном направлении матриц ПЗС. Однако в силу методических погрешностей используемых моделей СДИ с помощью геометрических методов удаётся только ограничить уровень смаза величиной в несколько пикселей, что обеспечивает необходимые, но недостаточные условия получения изображений требуемого качества. Кроме того, учитывая то обстоятельство, что во время вывода КА ДЗЗ на орбиту и процессе его функционирования в космосе возможны неизбежные деформации фокальной плоскости и оптической системы, приводящие к смазу от восьми до 12-и пикселей и более, а возможности настройки съёмочной системы не беспредельны, можно сделать следующие выводы.

Во-первых, необходимо повысить методическую точность моделей СДИ, которые используются на этапе планирования. Во-вторых, геометрические методы должны использоваться на первом этапе разрабатываемой методики коррекции смаза, а на последующих этапах дополняться процедурами окончательной коррекции изображений в процессе съёмки.

При этом разработка таких процедур должна основываться на градиентных методах, поскольку методы цифровой обработки изображений обладают двумя связанными между собой недостатками, которые не позволяют их применять на борту КА ДЗЗ. Первый связан с требованием наличия на борту КА огромных вычислительных ресурсов, а второй обуславливает необходимость восстановления на борту КА всего маршрута включения ОЭСС, что не имеет ни практического, ни оперативного смысла.

Наряду с этим разрабатываемая методика окончательной коррекции смаза на борту КА должны обладать достоинствами градиентных методов

дисперсионного и кинематического анализа и не иметь их недостатков. К достоинствам последних следует отнести, во-первых, возможность использования последовательности обрабатываемых сцен, включающей в себя различные участки однородной подстилающей поверхности, примыкающие друг к другу по направлению съёмки. Однако при этом должно быть обеспечено новое качество разрабатываемой методики, обеспечивающее её инвариантность, как к режимам съёмки, так и к характеру обрабатываемых сцен (плотная застройка, лесные, степные участки и т.п.). Во-вторых, в качестве показателя снижения смаза следует использовать увеличение скорости и/или диапазона изменения сигналов изображения. В-третьих, разрабатываемая методика окончательной коррекции смаза на борту КА должна опираться на такие размеры обрабатываемых выборок формирующихся фрагментов маршрута съёмки, которые в целом не превышают доли процента от объёма всего маршрута съёмки. Реализация градиентных методов обеспечит возможность использования современных вычислительных методов обработки данных, а не изображений, и, как следствие, небольшого объёма вычислительных ресурсов.

Для определения направления дальнейших исследований в части коррекции смаза на борту КА рассмотрим возможные варианты соотношений между программным значением периода тактового опроса τ_T^{Π} и оптимальным τ_T^* (Рисунок 1.10).

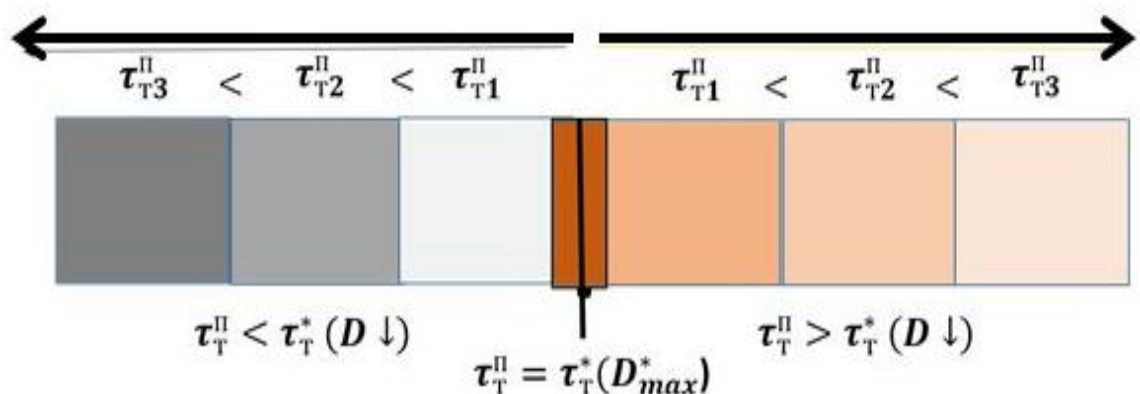


Рисунок 1.10 – Динамика изменения яркостных полей

В отличие от кадровых съёмочных систем в ОЭСС смаз возникает в случае отличия тактового периода опроса матриц ПЗС от его оптимального значения,

как в меньшую, так и в большую сторону. При этом в случае $\tau_T^{\Pi} > \tau_T^*$ накопление сигналов изображений в ОЭСС происходит с опережением, а при $\tau_T^{\Pi} < \tau_T^*$ – с отставанием. И в том и в другом случае не обеспечивается правильная работа в режиме ВЗН, которая подразумевает накопление одних и тех же участков территории в процессе съемки. Таким образом, в течение цикла ВЗН в элементах матриц ПЗС накапливаются сигналы разных участков территории, что приводит к искажению суммарного сигнала и характеризуется размытием формируемого изображения. На Рисунке 1.2 видно, а на Рисунке 1.6 схематично показано, что возникновение смаза приводит к ухудшению контрастно-яркостных характеристик между пикселями изображения, уменьшению скорости изменений сигналов изображения и, как следствие, уменьшению их дисперсионных характеристик. Также видно, что дальнейшее увеличение (при $\tau_T^{\Pi} > \tau_T^*$) или уменьшение (при $\tau_T^{\Pi} < \tau_T^*$) тактового периода опроса матриц ПЗС приводит к возрастанию величины смаза, причём градации уровней сигналов изображения в обоих случаях становятся плавнее, а значения дисперсионных характеристик уменьшается [134].

Поскольку при изменении τ_T^{Π} длительность экспозиции незначительно, но изменяется, будем для удобства дальнейшего изложения условно считать, что в первом случае происходит некоторое затемнение, а во-втором – осветление смазанного изображения. В соответствии с этим будем в дальнейшем называть интервал значений ($\tau_T^{\Pi} < \tau_T^*$) тёмной, а интервал ($\tau_T^{\Pi} > \tau_T^*$) – светлой зонами (Рисунок 1.11).

С учётом изложенного будем далее полагать, что в общем случае значения дисперсии сигналов изображений имеют тренд к увеличению по мере приближения значения τ_T^{Π} к τ_T^* со стороны тёмной зоны, достижению максимума при $\tau_T^{\Pi} = \tau_T^*$ и уменьшению по мере удаления τ_T^{Π} от τ_T^* в светлой зоне. Аналогичная картина наблюдается при обходе со стороны светлой зоны.

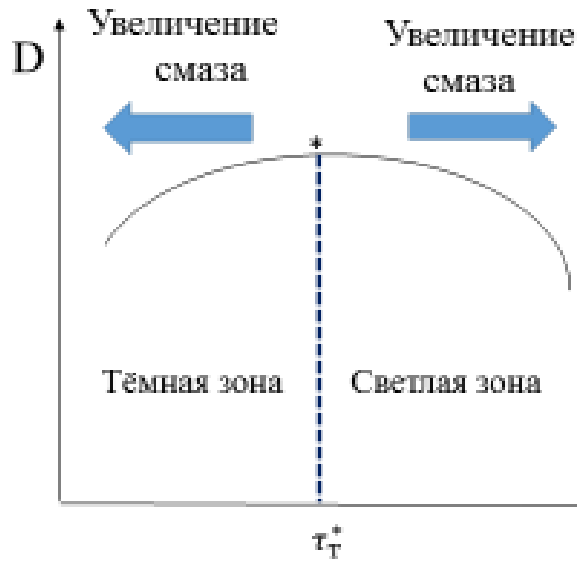


Рисунок 1.11 – Взаимосвязь дисперсии яркостных полей и смаза

Таким образом при условии монотонности функции дисперсии $D(\tau_T^\pi)$ на участках $\tau_T^\pi < \tau_T^*$ и $\tau_T^\pi > \tau_T^*$ она должна иметь некий квазипараболический вид с чётко выраженным максимумом (Рисунок 1.12).

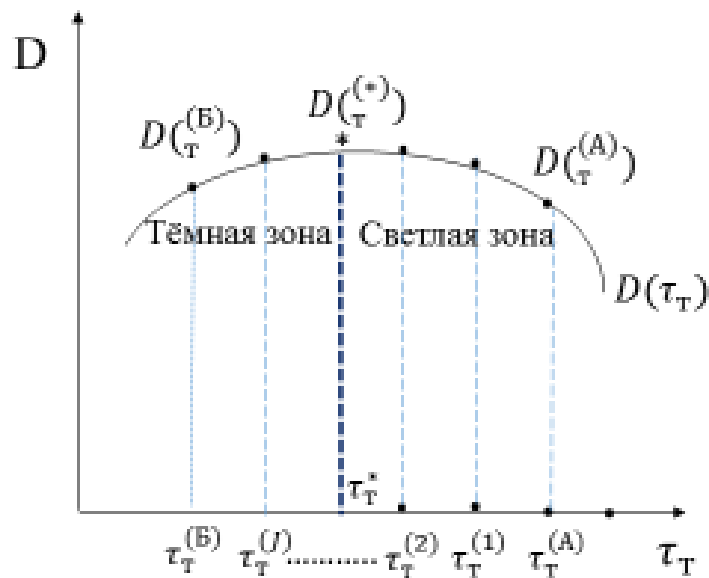


Рисунок 1.12 – Геометрическая иллюстрация постановки задачи

Это означает, что путём изменения значений τ_T^π на интервале $[\tau_T^{(A)}, \tau_T^{(B)}]$ и исследований характера изменения параметра дисперсионного анализа (ПДА) $\wp(\tau_T)$ получаемых изображений можно найти такое оптимальное значение τ_T^* , при котором дисперсия $\wp(\tau_T)$ достигает максимума, а уровень смаза будет минимальным. Здесь и далее под ПДА $\wp(\tau_T)$ понимаются либо сами сигналы

изображения $W_{kp}^{(j)}$ подстилающей поверхности, либо какие-либо комбинации этих сигналов (суммы, разности, производные и т.п.). Учитывая изложенное выше, математическая постановка задачи коррекции смаза на борту КА может быть сформулирована следующим образом.

Пусть имеется непрерывная функция $D(\tau_T)$ и известны её дискретные значения $\{D(\tau_T^j)\}$ для выборок изображений $j = \overline{1, J}$ при заданных тактовых периодах опроса матриц ПЗС $\{\tau_T^j | j = \overline{1, J}\} \in [\tau_T^{(A)}, \tau_T^{(B)}]$. Будем считать, что функция $D(\tau_T)$ имеет априорно неизвестную единственную точку максимума $\tau_T^* \in [\tau_T^{(A)}, \tau_T^{(B)}]$, монотонно возрастает при $\tau_T^j \in [\tau_T^{(A)}, \tau_T^*]$ и монотонно убывает, если $\tau_T^j \in (\tau_T^*, \tau_T^{(B)}]$.

При выполнении этих условий задача состоит в нахождении такого значения $\tau_T = \tau_T^*$, при котором функция $D(\tau_T)$ достигает максимума:

$$\tau_T = \tau_T^* \rightarrow \max \left(D(\tau_T^{(*)}) \right) \Rightarrow \left\{ \delta(\tau_T^{(*)}) \right\} \min \quad (1.45)$$

Для решения поставленной задачи необходимо:

- 1) минимизация ширины интервала $[\tau_T^{(A)}, \tau_T^{(B)}]$ путём повышения методической точности модели СДИ;
- 2) разработка процедур формирования интервала $[\tau_T^{(A)}, \tau_T^{(B)}]$;
- 3) обоснование типа ПДА;
- 4) разработка процедур нахождения оптимального значения $\tau_T^{(*)}$.

ВЫВОДЫ

1. В ОЭСС, в процессе формирования изображения, в поле зрения съёмочной системы в течение цикла ВЗН ЗП последовательно попадает одна и та же территория земной поверхности [39]. В каждом такте опроса ПЗС-матриц сигналы изображений с элементов предыдущей ПЗС-строки суммируются с сигналами смежных элементов последующей ПЗС-строки, а с элементов первой ПЗС-строки считываются выходные сигналы. В каждую строку ПЗС-матриц при отсутствии смаза в течение всех тактов цикла ВЗН будут попадать одинаковые

участки местности, а на выходе сформируется неискажённая сумма соответствующих сигналов.

Погрешности задания периода опроса матриц ПЗС, обусловленные ошибками расчёта СДИ по полю фотоприёмной структуры, приводят к тому, что в каждом такте цикла ВЗН в полосу захвата элементов ПЗС попадают не только «свои», но смежные с ними участки местности. Поскольку эти участки в общем случае обладают различными спектральными и яркостными характеристиками, в каждом элементе ПЗС в конце цикла ВЗН происходит формирование искажённых суммарных видеосигналов и возникает смаз, который визуальнo характеризуется снижением контрастности, резкости и в целом размытием изображения. Для количественной оценки и моделирования смаза изображений в ОЭСС разработаны параметрические модели смаза, связывающие его уровень с абсолютной и относительной погрешностью параметров съёмки.

2. Определяющее влияние на величину смаза оказывает отличие программных и фактических значений СДИ, которое обусловлено, во-первых, погрешностями расчёта априорных значений СДИ из-за ошибок задания параметров движения КА и других параметров съёмки, во-вторых, методическими ошибками используемых моделей СДИ. Сравнительные оценки влияния ошибок параметров съёмки и методических ошибок используемых моделей СДИ показали, что доля последних в суммарной погрешности расчёта СДИ на порядок больше, чем доля ошибок определения параметров движения КА на интервале съёмки. При этом количественный уровень смаза, обусловленный ошибками в методической составляющей СДИ, составляет один пиксель.

3. Известные методы коррекции смаза изображений в современных цифровых ИС можно разбить на три основные группы: геометрические, цифровые и градиентные. Методология первого подхода к коррекции смаза основывается на геометрической модели смаза и состоит в его локализации путём выбора на этапе планирования ДЗЗ такой геометрии съёмки, при которой СПЛ в каждом цикле ВЗН ЗП, в процессе изменения на орбите положения КА,

сканируются одна и та же территория земной поверхности. Для этого на основе разработанных моделей СДИ составляют кинематические уравнения, решением которых являются параметры программного углового движения КА, обеспечивающие синхронность движения ЗП по всем элементам матриц ПЗС в строчном направлении. Однако наличие методических ошибок определения программных значений СДИ приводит к возникновению смаза на уровне единиц пикселей. На практике величина априорного смаза может быть существенно больше (8-12 пикселей) в силу того, что в процессе вывода спутника на орбиту и его функционирования в космосе возможны неизбежные деформации фокальной плоскости и оптической системы. Это обуславливает необходимость дополнения геометрических методов процедурами окончательной коррекции смаза.

Цифровые методы коррекции смаза включают в себя спектральные и алгебраические подходы к восстановлению смазанных изображений. И те, и другие подходы используют модель смаза в виде свёртки изображения с известной функцией рассеивания точки и сводятся к решению задачи обратной свёртки изображений. При этом спектральный подход использует для решения этой задачи процедуры преобразования Фурье и фильтрации всего маршрута съёмки, а алгебраический – систему линейных алгебраических уравнений в матричном виде. Применение спектральных и алгебраических методов восстановления изображений на борту КА весьма проблематично. Это обусловлено необходимостью, во-первых, обработки больших и сверхбольших объёмов видеоинформации, что связано с требованием наличия на борту КА огромных вычислительных ресурсов, во-вторых, восстановления на борту КА всего маршрута включения ОЭСС, что не имеет ни практического, ни оперативного смысла.

4. Градиентные методы коррекции смаза направлены на повышение качества формирования изображения в реальном режиме времени, т.е. непосредственно в процессе съёмки. В основе этих методов лежат итерационные процедуры минимизации величины смаза, которая пропорциональна градиентным характеристикам сигналам формирующегося изображения. При

этом для идентификации смаза используется три основных подхода. Первый основан на анализе частотных, второй – дисперсионных, третий – кинематических характеристик сигналов изображений регистрируемых сцен. В соответствие с этим в первом случае в качестве показателя наличия смаза обрабатываемой сцены используется низкая доля высоких частот в спектре её изображения, во втором – низкое значение дисперсии скорости изменения сигналов изображения, а в третьем – наличие скорости смаза. Анализ частотных характеристик включает в себя один из небольших этапов спектрального восстановления изображений и используется только для идентификации наличия или отсутствия смаза. Такой подход требует значительно меньшего объёма вычислительных ресурсов, чем полномасштабный спектральный метод восстановления изображений, и по этому критерию вполне может использоваться на борту КА. Вместе с тем он обладает такими недостатками, как зависимость от режима и геометрии съёмки, а также от изменений формы и вида ФРТ по полю изображения различных сцен. Для минимизации этих недостатков требуется многократный анализ распределения частот в изображениях одной и той же сцены. Такой вид съёмки в современных ОЭСС можно обеспечить только в режиме тангажного отслеживания наблюдаемой сцены, что существенно ограничивает область применения градиентных методов частотного анализа на борту КА.

5. Градиентный анализ дисперсионных характеристик сводится к исследованию характера изменения параметра дисперсионного анализа изображений, получаемых при различных значениях времени экспозиции. При этом в качестве параметра дисперсионного анализа используются значения вторых производных сигналов изображений обрабатываемой сцены, получаемых путём их фильтрации с помощью оператора Лапласа. В соответствие с этим подходом итерационные процедуры изменения времени экспозиции, фильтрации сигналов изображения обрабатываемой сцены и вычисления дисперсии значений их вторых производных заканчиваются тогда, когда дисперсия будет максимальной. Достоинством дисперсионного анализа

является низкий объём вычислений и по этому критерию так же, как и частотный анализ, вполне может использоваться на борту КА. Кроме того, такой подход не требует многократного анализа изображений одной и той же сцены, полученных при различных значениях тактового периода опроса матриц ПЗС. Однако присущие ему операции фильтрации вследствие многополосной сканерной структуры маршрута съёмки в ОЭСС снижают эффективность из-за многочисленных краевых эффектов, создающих эффект ложного смаза.

6. Градиентные методы анализа кинематических характеристик основаны на функциональной связи скорости смаза, скорости изменения сигналов изображений и скорости движения изображения в фокальной плоскости съёмочной системы. Идея такого подхода состоит в последовательном изменении тактового периода опроса матриц в начальном периоде съёмки и выбора такого его значения, при котором скорость изменения сигналов текущей сцены будет максимальна. Основным недостатком градиентного метода анализа кинематических характеристик является необходимость обработки последовательности изображений одних и тех же участков подстилающей поверхности, для чего требуется размещение дополнительной линейки ПЗС-матриц в фокальной плоскости ОЭСС, что по условиям задачи представляется нецелесообразным.

2 Исследование процессов формирования сигналов изображения в оптико-электронных сканирующих системах в режиме временной задержки и накопления зарядовых пакетов

2.1 Координатно-временные особенности формирования сигналов изображения на интервале съёмки

Координатно-временные особенности формирования сигналов изображения на интервале съёмки оказывают большое влияние на уровень методической погрешности расчёта программных значений параметров съёмки V_x^{Π}, τ_T^{Π} , поскольку эти особенности через порядковые номера пикселей формирующегося изображения обеспечивают позиционирование взаимосвязи сигналов изображения и этих параметров съёмки. Для выделения ключевых координатно-временных аспектов процесса ВЗН ЗП воспользуемся известным постулатом теории цифровой обработки сигналов [50], который гласит, что элементы $|mp|$ матриц ПЗС рассматриваются как устройства преобразования падающей на них световой энергии \mathcal{E}_{mp} в электрические сигналы (зарядовые пакеты) $W_{m,p}$ по схеме

$$\mathcal{E}_{mp} \rightarrow W_{mp}. \quad (2.1)$$

Известно, что в цикле ВЗН происходит синхронный опрос элементов всех строк матриц ПЗС. Пусть при этом значение периода опроса равно τ_T . В идеальном случае [110] в промежутки времени между опросами происходит экспонирование одних и тех же участков подстилающей поверхности, а в моменты опроса параллельно протекают два процесса: перенос сформированных ЗП в другие элементы матриц ПЗС и считывание ЗП с первых строк матриц ПЗС в БВК.

В рамках первого процесса, протекающего одновременно во всех элементах $p = \overline{1, P}$ от последних до вторых строк ($m = \overline{2, M}$) матриц ПЗС, сигналы изображений $W_{m,p}$, накопленные в них за время τ_T между опросами, со

скоростью $V_x^{\text{ЗП}}$ переносятся в соответствующие элементы ПЗС предыдущих строк, а именно:

- в первом столбце ($p = 1$): $W_{M,1} \rightarrow W_{M-1,1}; W_{M-1,1} \rightarrow W_{M-2,1}, \dots, W_{2,1} \rightarrow W_{1,1}$;
- во втором столбце ($p = 2$): $W_{M,2} \rightarrow W_{M-1,2}; W_{M-1,2} \rightarrow W_{M-2,2}, \dots, W_{2,2} \rightarrow W_{1,2}$;
- в последнем ($p = P$): $W_{M,P} \rightarrow W_{M-1,P}; W_{M-1,P} \rightarrow W_{M-2,P}, \dots, W_{2,P} \rightarrow W_{1,P}$.

Процесс переноса назовём дрейфом ЗП. Одновременно с этим во всех элементах $p = \overline{1, P}$ первых строк матриц ПЗС с порядковыми номерами $m = 1$ протекает второй процесс, включающий в себя считывание ЗП в БВК с элементов этих строк и запись электронных сигналов $\{ \langle W_{1,1}, W_{1,2}, \dots, W_{1,P} \rangle \}$, эквивалентных полученной световой энергии. Второй процесс назовём накоплением ЗП.

Отсюда следует [110], что ЗП, сформированные в момент включения ОЭСС в первом цикле ВЗН, пройдут различное число тактов накопления, а именно от одного до M . Поэтому первый цикл ВЗН ЗП можно называть разгонным этапом. На этом этапе происходит формирование сигналов изображения первых M – строк маршрута изображения, порядковый номер которых (от 1 до M) совпадает с числом тактов накопления сигналов изображения от одного и того же участка земной поверхности (Рисунок 2.1).

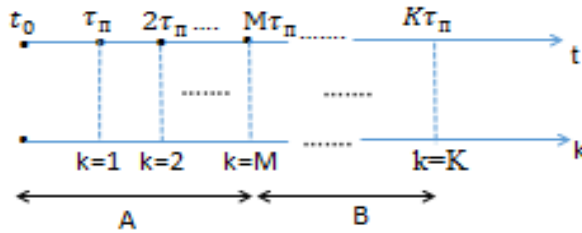


Рисунок 2.1 – Структура этапов ВЗН ЗП: А - разгонный; В - штатный

Это означает, что сигналы изображения, соответствующие пикселям строк $k = \overline{1, M}$, будут иметь следующие значения:

$$\begin{aligned}
 k = 1: & \{ \langle W_{1,1}(\tau_T), W_{1,2}(\tau_T), \dots, W_{1,P}(\tau_T) \rangle \}; \\
 k = 2: & \{ \langle W_{1,1}(2\tau_T), W_{1,2}(2\tau_T), \dots, W_{1,P}(2\tau_T) \rangle \}; \\
 k = 3: & \{ \langle W_{1,1}(3\tau_T), W_{1,2}(3\tau_T), \dots, W_{1,P}(3\tau_T) \rangle \}; \\
 & \dots \\
 k = M: & \{ \langle W_{1,1}(M\tau_T), W_{1,2}(M\tau_T), \dots, W_{1,P}(M\tau_T) \rangle \}.
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

По окончании разгонного этапа в каждом последующем такте опроса матриц ПЗС считываются суммарные сигналы во всех элементах первых строк матриц ПЗС и, начиная с $k = \overline{M+1, K}$, происходит формирование видеосигналов маршрута изображения заданного качества.

Более наглядно один из циклов ВЗН ЗП в штатном режиме съёмки на примере одной из матриц ПЗС представлен на Рисунке 2.2.

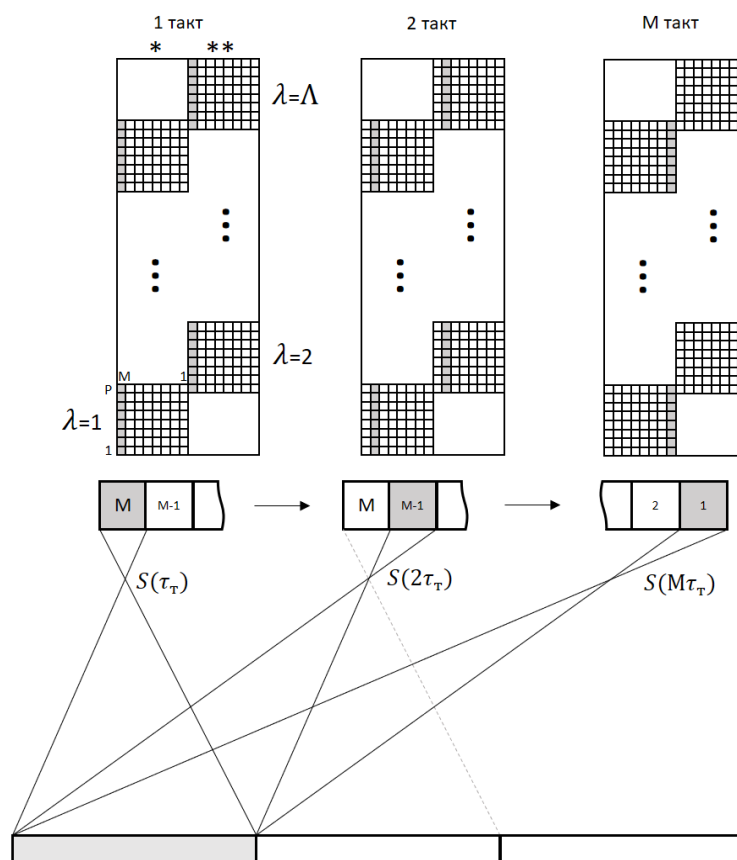


Рисунок 2.2 – Геометрическая иллюстрация процесса ВЗН ЗП

Пусть в какой-нибудь момент времени на интервале съёмки в первом такте цикла ВЗН в полосу захвата элементов последней строки ($m=M$) матрицы ПЗС попадает некий участок местности, представленный на рисунке 2.2. Тогда в этих элементах в течение времени τ_T образуются сигналы $\langle W_{M,1}, W_{M,2}, \dots, W_{M,P} \rangle$, эквивалентные падающей на них световой энергии от этого участка. Эти ЗП в конце первого такта передаются для дальнейшего накопления в соответствующие элементы строки $m=M-1$, которые продолжают сканирование этого же участка, в конце второго такта – в элементы строки $m=M-2$, и, наконец, в начале последнего такта – в элементы первой строки $m=1$, которые завершают

процесс сканирования рассматриваемого участка. В результате в конце последнего такта опроса содержащиеся в элементах первой строки суммарные сигналы $\langle \sum_{m=1}^{m=M} W_{m,1}, \sum_{m=1}^{m=M} W_{m,2}, \dots, \sum_{m=1}^{m=M} W_{m,P} \rangle$ считываются в БВК. Рассмотренные процессы развиваются во время съёмки непрерывно и синхронно во всех матрицах ПЗС. Рассмотрим далее топологию размещения всех матриц ПЗС в ФП ОЭСС (Рисунок 2.3) [113].

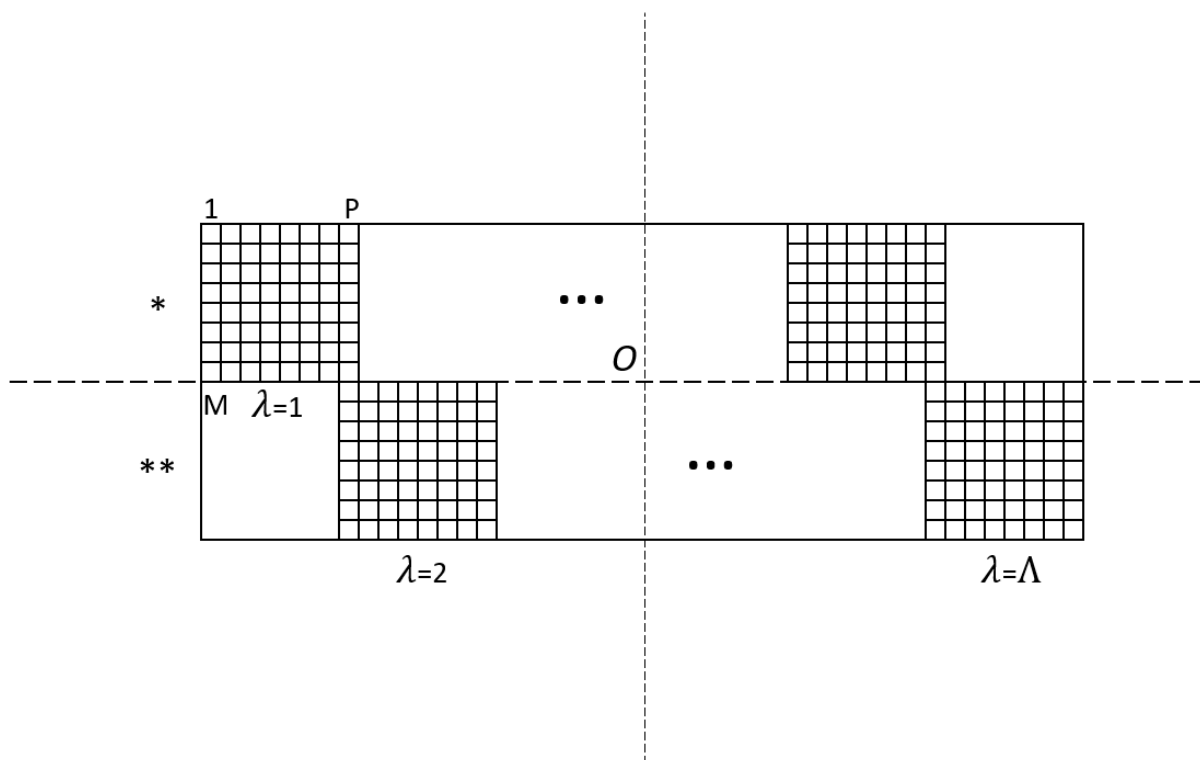


Рисунок 2.3 - Фотоприёмная структура ОЭСС

Известно [111], что в ОЭСС на борту КА нечетный ряд * матриц ПЗС находится впереди чётного **. А порядковые номера матриц $\lambda = \overline{1, L}$ и строк матриц $m = \overline{1, M}$ увеличиваются слева направо в направлении полета КА. При этом экспонирующая щель (ЭЩ) совпадает своим геометрическим центром O с главной точкой ФП, матрицы ПЗС имеют $m = \overline{1, M}$ строк и $p = \overline{1, P}$ столбцов элементов ПЗС с размером $\Delta l_x, \Delta l_y$ и порядковыми номерами $n = \overline{1, N}$ в направлении ЭЩ. При этом $N = P \cdot L$.

Для организации координатного пространства введём левую систему координат Ikn маршрута съёмки и правую систему плоских координат ФП Oxy , и расположим их следующим образом [111]. Начало отсчёта I левой системы

координат Ikn расположим в верхнем левом углу первого элемента ПЗС ($m = M, n = 1$) матрицы $\lambda = 1$, ось Ik направим вдоль верхних границ элементов ПЗС первого столбца матрицы $\lambda = 1$. Тогда ось In будет направлена по левому краю элементов строки M матриц ПЗС нечётного ряда и по правому краю элементов первой строки четного ряда матриц ПЗС в сторону матрицы $\lambda = \Lambda$. В первой строке матрицы $\Lambda/2$ в центре последнего элемента будет расположено начало координат ФП Oxy . Направление оси Ox будет перпендикулярно строчному направлению матриц ПЗС, а Oy будет пересекать центры элементов матриц ПЗС четного и нечетного рядов в направлении матрицы $\lambda = 1$. Проведенный анализ координатно-временных особенностей сканерной съёмки матрицами ПЗС позволяет устранить одну из основных предпосылок к возникновению методических ошибок при математическом описании процесса ВЗН ЗП, которая присутствует в ряде известных работ. В частности, в работе [109] режим ВЗН ЗП назван асинхронным вследствие возникающей, по мнению автора, неопределённости позиционирования параметров съёмки в цикле накопления ЗП. Поэтому в этой и в ряде других работ, например, в [106-108], координатно-временное позиционирование параметров съёмки привязывают к середине цикла ВЗН. Между тем, как было показано выше, моменты времени τ_k формирования сигналов изображений k -х строк маршрута съёмки однозначно определяются моментами времени считывания ЗП с первых строк элементов ПЗС (Рисунок 2.4):

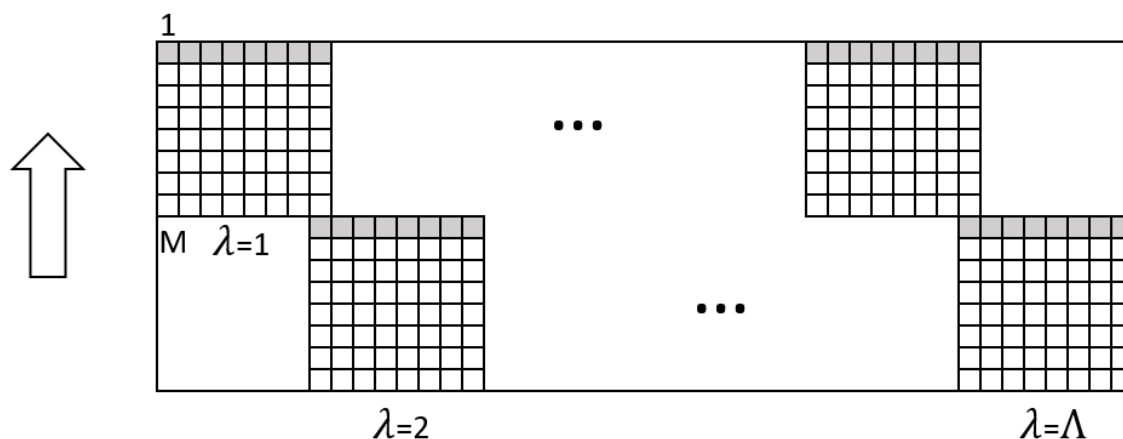


Рисунок 2.4 – Координатно-временные особенности цикла ВЗН

Учитывая также, что в эти моменты времени геометрические центры первых столбцов матриц ПЗС чётного и нечётного ряда позиционируют положения элементов ПЗС в системе координат ФП Oxy , справедливы следующие соотношения [110]:

$$\tau_k = k \cdot \tau_T. \quad (2.3)$$

$$x = \begin{cases} 0, \text{ если } n = n^* \in \lambda^*; \\ M \cdot \Delta l_x, \text{ если } n = n^{**} \in \lambda^{**}. \end{cases} \quad (2.4)$$

$$y = \begin{cases} 0, \text{ если } n = \frac{N}{2}; \\ \left(\frac{N}{2} - n\right) \cdot \Delta l_y + \frac{\Delta l_y}{2}, \text{ если } n \neq N/2. \end{cases} \quad (2.5)$$

где:

x, y – координаты геометрических центров первых столбцов матриц ПЗС чётного и нечётного ряда в системе координат Oxy ;

$\Delta l_x, \Delta l_y$ – размеры датчика ПЗС.

При этом порядковый номер матрицы, содержащей элемент ПЗС с порядковым номером $n \in N$, и её принадлежность к чётному или нечётному ряду определяются соотношением [110]:

$$\lambda = \begin{cases} \lambda^* = \ell + 1, \text{ если } \lambda = \frac{n}{P} = \ell + \Delta \ell; \\ \lambda^{**} = \ell, \text{ если } \lambda = \frac{n}{P} = \ell, \end{cases} \quad (2.6)$$

где ℓ – целая часть числа; $\Delta \ell$ – мантисса числа.

Таким образом, выражения (2.1) – (2.6) учитывают следующие ключевые особенности координатно-временные особенности формирования сигналов изображения в режиме ВЗН:

- матрицы чётного ряда формируют полосы изображений земной поверхности раньше, чем матрицы нечетного ряда. При этом сканируемые этими матрицами участки являются смежными по оси Oy ;

- абсциссы $\{x\}$ геометрических центров элементов ПЗС первых строк матриц, с которых происходит считывание ЗП в БВК, и их ординаты $\{y\}$ позиционируют параметры съёмки в моменты времени τ_k формирования строк.

2.2 Многозональная структура сигналов изображения в оптико-электронных сканирующих системах в режиме временной задержки и накопления зарядовых пакетов

Для окончательного формирования сигнальной структуры изображений маршрута съёмки в режиме ВЗН ЗП необходимо учитывать (Рисунок 2.5), что для выравнивания продольной составляющей СДИ в ФП ОЭСС вся линейка ПЗС разбивается на $q = \overline{1, Q}$ зон компенсации смаза:

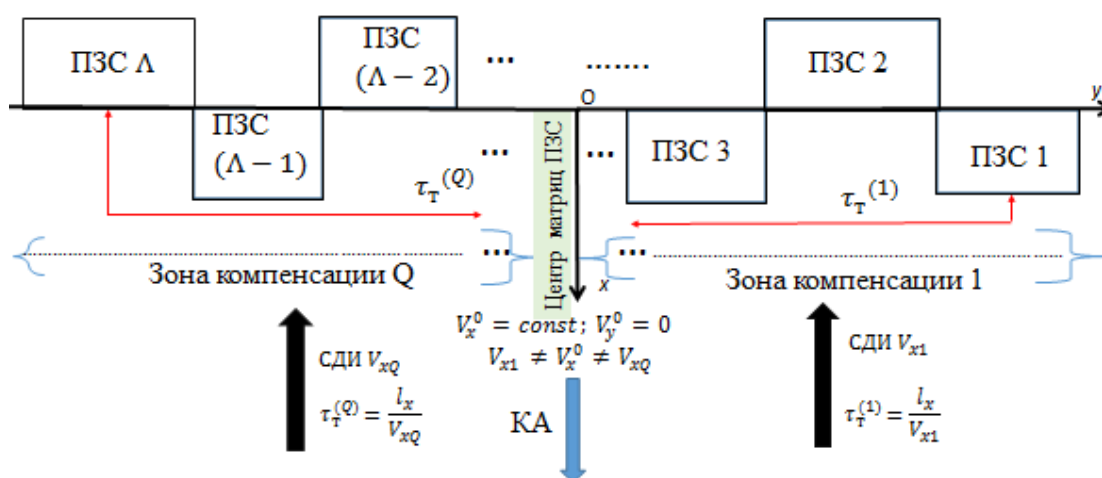


Рисунок 2.5 – Структура зон компенсации смаза

После включения ОЭСС элементы матриц ПЗС каждой зоны опрашиваются с разными тактовыми периодами $\tau_T^{(q)} = \frac{l_x}{V_{xq}}$. При этом после каждого такта опроса для каждой матрицы ПЗС в БВК формируются свои файлы сигналов изображений [111]:

$$\underline{\lambda^* = 1}$$

$$\left\{ \langle W_{1,1}^{(1)}(\tau_T^{(q)}), W_{1,2}^{(1)}(\tau_T^{(q)}), W_{1,3}^{(1)}(\tau_T^{(q)}), \dots, W_{1,P}^{(1)}(\tau_T^{(q)}) \rangle \right\}$$

$$\left\{ \langle W_{2,1}^{(1)}(\tau_T^{(q)}), W_{2,2}^{(q)}(\tau_T^{(q)}), W_{2,3}^{(1)}(\tau_T^{(q)}), \dots, W_{2,P}^{(1)}(\tau_T^{(q)}) \rangle \right\}$$

⋮

$$\left\{ \langle W_{K^*,1}^{(1)}(\tau_T^{(q)}), W_{K^*,2}^{(1)}(\tau_T^{(q)}), W_{K^*,3}^{(1)}(\tau_T^{(q)}), \dots, W_{K^*,P}^{(1)}(\tau_T^{(q)}) \rangle \right\}$$

$$\underline{\lambda^{**} = 2}$$

$$\{ \langle W_{1,1}^{(2)}(\tau_T^{(q)}), W_{1,2}^{(2)}(\tau_T^{(q)}), W_{1,3}^{(2)}(\tau_T^{(q)}), \dots, W_{1,P}^{(2)}(\tau_T^{(q)}) \rangle \}$$

$$\{ \langle W_{2,1}^{(2)}(\tau_T^{(q)}), W_{2,2}^{(2)}(\tau_T^{(q)}), W_{2,3}^{(2)}(\tau_T^{(q)}), \dots, W_{2,P}^{(2)}(\tau_T^{(q)}) \rangle \}$$

⋮

$$\{ \langle W_{K^{**},1}^{(2)}(\tau_T^{(q)}), W_{K^{**},2}^{(2)}(\tau_T^{(q)}), W_{K^{**},3}^{(2)}(\tau_T^{(q)}), \dots, W_{K^{**},P}^{(2)}(\tau_T^{(q)}) \rangle \}$$

$$\underline{\lambda^{**} = \Lambda}$$

$$\{ \langle W_{1,1}^{(\Lambda)}(\tau_T^{(Q)}), W_{1,2}^{(\Lambda)}(\tau_T^{(Q)}), W_{1,3}^{(1)}(\tau_T^{(Q)}), \dots, W_{1,P}^{(\Lambda)}(\tau_T^{(Q)}) \rangle \}$$

$$\{ \langle W_{2,1}^{(\Lambda)}(\tau_T^{(Q)}), W_{2,2}^{(\Lambda)}(\tau_T^{(Q)}), W_{2,3}^{(1)}(\tau_T^{(Q)}), \dots, W_{2,P}^{(\Lambda)}(\tau_T^{(Q)}) \rangle \}$$

⋮

$$\{ \langle W_{K^{**},1}^{(\Lambda)}(\tau_T^{(Q)}), W_{K^{**},2}^{(\Lambda)}(\tau_T^{(Q)}), W_{K^{**},3}^{(\Lambda)}(\tau_T^{(Q)}), \dots, W_{K^{**},P}^{(\Lambda)}(\tau_T^{(Q)}) \rangle \}$$

Учитывая, что $k^* = \overline{1, K^*}$; $k^{**} = \overline{1, K^{**}}$; $K^{**} = K^* = K$; $n = \overline{1, N} = \overline{1, \lambda \cdot P}$, структуру сигналов изображений в режиме съемки ВЗН можно представить следующим образом (Рисунок 2.6):

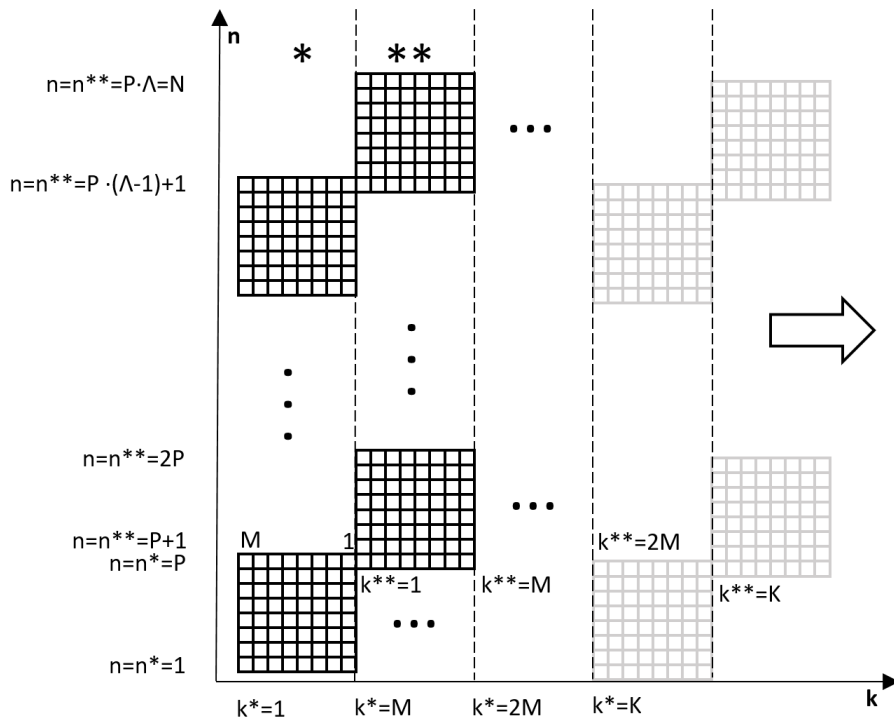


Рисунок 2.6 - Структура сигналов изображений в режиме ВЗН

Тогда многозональная структура \mathfrak{R} видеоданных в терминах теории множеств будет иметь следующий вид:

$$\mathfrak{R} = \left\{ \langle W_{(k),(n)}^{(\lambda)}(\tau_T^{(q)}) \rangle \mid \lambda = \overline{1, \Lambda}; k = \overline{1, K}; n = \overline{1, N}; q = \overline{1, Q} \right\}. \quad (2.7)$$

При этом по порядковому номеру λ матрицы ПЗС легко найти номер зоны компенсации q , в которой она находится, а по номеру зоны, наоборот, определить перечень входящих в неё матриц ПЗС. Эти зависимости описываются следующими соотношениями:

$$q = \begin{cases} \ell + 1, & \text{если } \frac{\lambda}{\Lambda/Q} = \ell + \Delta\ell; \\ \ell, & \text{если } \frac{\lambda}{\Lambda/Q} = \ell, \end{cases} \quad (2.8)$$

где ℓ - целая часть числа; $\Delta\ell$ – мантисса числа.

$$\lambda = 1 + (\Lambda/Q) \cdot (q - 1). \quad (2.9)$$

В матричной форме многозональная структура \mathfrak{R} видеоданных имеет следующий вид :

$$\mathfrak{R}_{[\Lambda, P, K]} = \begin{bmatrix} W_{(1),(1)}^{(1)}(\tau_T^{(1)}) & \dots & W_{(P),(K)}^{(1)}(\tau_T^{(1)}) \\ \vdots & & \vdots \\ w_{(P),(1)}^{(1)}(\tau_T^{(1)}) & \ddots & w_{(P),(K)}^{(1)}(\tau_T^{(1)}) \\ \vdots & & \vdots \\ w_{(P(\Lambda-1)+1),(1)}^{(\Lambda)}(\tau_T^{(Q)}) & \dots & w_{(P(\Lambda-1)+1),(K)}^{(\Lambda)}(\tau_T^{(Q)}) \\ \vdots & & \vdots \\ w_{(P \cdot \Lambda),(1)}^{(\Lambda)}(\tau_T^{(Q)}) & \dots & w_{(P \cdot \Lambda),(K)}^{(\Lambda)}(\tau_T^{(Q)}) \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

Таким образом, каждый элемент $W_{(k),(n)}^{(\lambda)}(\tau_T^{(q)})$ множества (2.7) и матрицы (2.10) представляет собой сигнал, сформированный в матрице ПЗС с порядковым номером λ , входящей в зону компенсации q , и соответствующий изображению пикселя с порядковым номером p , находящегося в k -й строке изображения. Например, сигнал $W_{(333)(4)}^{(6)}(\tau_T^{(1)})$ сформирован шестой матрицей ПЗС, находящейся в первой зоне компенсации, и соответствует четвёртому пикселю в триста тридцать третьей строке изображения. При этом размерность матрицы (2.10) по строкам определяется формулой $N = \Lambda \cdot P$, а по столбцам – количеством

строк K в маршруте съёмки. Полученные выражения (2.6) – (2.10) описывают многозональную структуру сигналов изображения в ОЭСС.

Выделенные координатно-временные особенности формирования многозональной структуры сигналов изображения позволяют перейти к построению аналитических зависимостей для расчёта программных значений периодов опроса матриц ПЗС в центрах зон компенсации смаза. С этой целью рассмотрим кинематику ЗП в цикле ВЗН.

2.3 Модель формирования тактовых периодов опроса матриц приборов с зарядовой связью

Допустим, что центр масс КА совпадает с центром проекции ОЭСС (S) с геоцентрическими координатами X_s, Y_s, Z_s (Рисунок 2.7), оси Sx_B и Sy_B визирной системы координат параллельны соответствующим осям системы координат ФП, которые направлены соответственно вдоль столбцов $p=1,2,3,\dots,P$ и строк $m=1,2,3,\dots,M$ матриц ПЗС, работающих в режиме ВЗН ЗП [113].

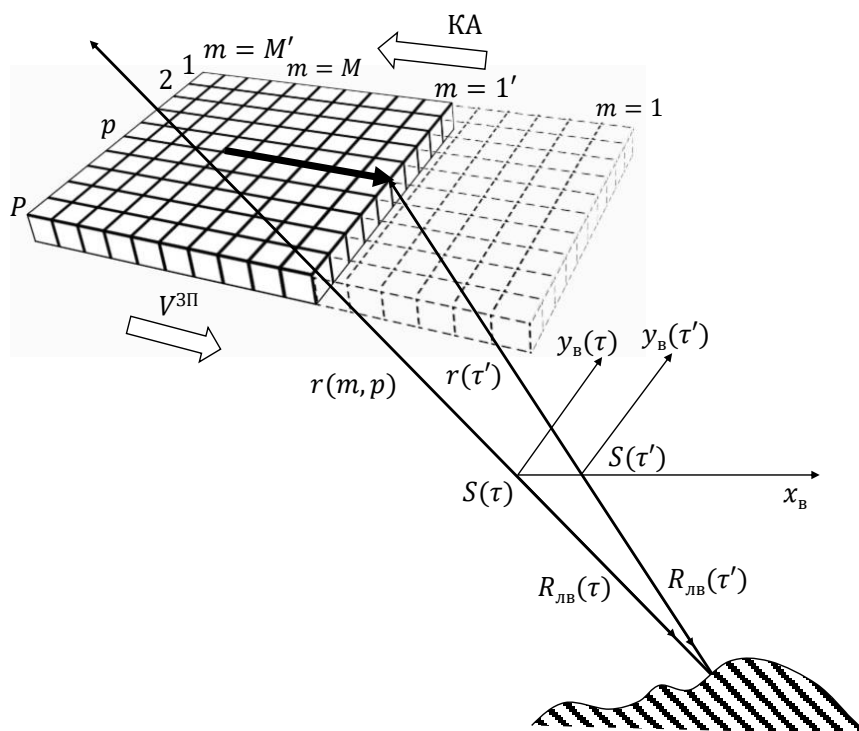


Рисунок 2.7 - Геометрическая иллюстрация кинематики ЗП в цикле ВЗН

При этом направление оси Sz_B противоположно линии визирования (ЛВ) $R_{ЛВ}(\tau)$ ОЭСС, которая пересекает точку земной поверхности A . Далее будет описано взаимное расположение ЗП в столбце матрицы ПЗС, имеющем порядковый номер p , геометрии ЛВ, которая направлена в точку на местности A , имеющую геоцентрические координаты X, Y, Z в момент времени $t = \tau \in (\tau_T, M\tau_T)$ и во время окончания цикла ВЗН ЗП $t + \Delta t = \tau'$ [111,113–114]. Допустим, что в момент времени τ , в датчике ПЗС, имеющем порядковые номера (p, m) находятся ЗП, которые осуществляют накопление световой энергии в цикле ВЗН от участка местности, обозначенного точкой A . Тогда в конце цикла накопления в момент времени τ' эти ЗП будут расположены в датчике ПЗС соответствующем столбцу p и строке $m = 1$.

Рисунок 2.7 демонстрирует положение ЗП и ЛВ в разные моменты времени. Так, в процессе накопления в момент времени $t = \tau$ в визирной системе координат, положение ЗП представлено вектором $r(t) = \langle x(m), y(p), f \rangle^T$, а вектор $R(t) = \langle (X - X_S), (Y - Y_S), (Z - Z_S) \rangle^T$ описывает направление линии визирования на участок земной поверхности A из центра проекции S . При этом, в момент времени τ' , которое соответствует окончанию цикла накопления ВЗН точки A , эти векторы изменятся следующим образом [110]

$$r(\tau') = r(t + \Delta t) = \langle x(M), y(p), f \rangle^T. \quad (2.11)$$

$$R(\tau') = \langle (X - X_S(t + \Delta t)), (Y - Y_S(t + \Delta t)), (Z - Z_S(t + \Delta t)) \rangle^T. \quad (2.12)$$

Вместе с тем, геоцентрические координаты точки A останутся неизменными. Геометрически это можно представить, как многократное проецирование одних и тех же участков местности на различные элементы матрицы ПЗС при постоянном перемещении КА на орбите [110]. Для синхронизации скорости движения изображения и скорости переноса ЗП в цикле ВЗН необходимо построить функции

$$\begin{aligned} V_x &= F_1(x, y, t). \\ V_y &= F_2(x, y, t). \end{aligned} \quad (2.13)$$

Существующая методология решения этой задачи широко известна и изложена в работах [1–13]. Отличия этих методик решения задачи состоят в разнице применяемого математического аппарата и состава координатного пространства. При этом их объединяет использование целого ряда допущений и упрощений для построения моделей СДИ, что обуславливает наличие методических ошибок. Например, в моделях, полученных в работах [8–13], были сделаны следующие упрощения: 1) составляющие СДИ изменяются линейно вдоль линейки ПЗС; 2) снимаемый участок земной поверхности в пределах угла зрения объектива ОЭСС является частью сферы; 3) угол между центральным и крайним элементом связки проектирующих лучей равен нулю, т.е. $l_z(t) = 1$. В работе [10] показано, что такие допущения приводят к методическим ошибкам расчёта СДИ порядка $2 \cdot 10^{-4}$ м/с. В этой связи в ряде работ [110–111, 113–114, 116–117] были проведены исследования по разработке модели СДИ, в которой отсутствуют перечисленные выше упрощения, приводящие к методическим погрешностям. Рассмотрим полученную модель более подробно:

$$\begin{aligned}
 V_x(t) &= \omega_x(t) \frac{l_x(t)}{l_y(t)} y + \omega_y(t) \left[-\frac{l_x(t)}{l_y(t)} x - f \right] + \omega_z(t) y + \\
 &+ \omega_3 \left[a_{31}(t) \left(-\frac{l_x(t)}{l_y(t)} y \right) + a_{32}(t) \left(\frac{l_x(t)}{l_y(t)} x + f \right) + a_{33}(t)(-y) \right] + \\
 &+ (d(t)/D(t)) g_1(t) - (l_x(t)/l_z(t)) \cdot (d(t)/D(t)) \cdot g_3(t); \\
 V_y(t) &= \omega_x(t) \left(\frac{l_y(t)}{l_z(t)} y + f \right) + \omega_y(t) \left[-\frac{l_y(t)}{l_z(t)} x \right] + \omega_z(t)(-x) + \\
 &+ \omega_3 \left[a_{31}(t) \left(-\frac{l_y(t)}{l_z(t)} y - f \right) + a_{32}(t) \left(\frac{l_y(t)}{l_z(t)} x \right) + a_{33}(t)(x) \right] + (d(t)/D(t)) \cdot g_2(t) - \\
 &- (l_y(t)/l_z(t)) \cdot (d(t)/D(t)) \cdot g_3(t), \tag{2.14}
 \end{aligned}$$

где $V_x(t)$ – СДИ в продольном направлении движения КА;

$V_y(t)$ – СДИ в поперечном направлении движения КА;

$\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t)$ – элементы вектора $\omega(t) = (\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t))^T$,

который является вектором угловой скорости СПЛ в системе координат ФП ОЭСС;

$l_x(t), l_y(t), l_z(t)$ – направляющие косинусы внутреннего ориентирования элементов ФП ОЭСС в визирной системе координат, которые рассчитываются по следующим формулам:

$$l_x(t) = \frac{x}{|r(t)|}, \quad l_y(t) = \frac{y}{|r(t)|}, \quad l_z(t) = \frac{f}{|r(t)|},$$

$$|r(t)| = \sqrt{x^2 + y^2 + f^2}, \quad (2.15)$$

где f – фокусное расстояние в метрах;

x, y – координаты элементов ФП ОЭСС в визирной системе координат в метрах;

$a_{11}(t), a_{12}(t), \dots, a_{33}(t)$ – элементы матрицы ортогональных преобразований координатного пространства при переходе от визирной к гринвичской системе координат;

$g_1(t), g_2(t), g_3(t)$ – элементы вектора g , которые рассчитываются по следующей формуле:

$$\begin{pmatrix} g_1(t) \\ g_2(t) \\ g_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}(t) \dot{X}_s(t) + a_{21}(t) \dot{Y}_s(t) + a_{31}(t) \dot{Z}_s(t) \\ a_{12}(t) \dot{X}_s(t) + a_{22}(t) \dot{Y}_s(t) + a_{32}(t) \dot{Z}_s(t) \\ a_{13}(t) \dot{X}_s(t) + a_{23}(t) \dot{Y}_s(t) + a_{33}(t) \dot{Z}_s(t) \end{pmatrix}. \quad (2.16)$$

ω_3 – скорость вращения земли в м/с;

$d(t)$ – расстояние от элемента ФП ОЭСС до центра проекции в метрах, которое рассчитывается по следующей формуле:

$$d(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t) + f^2}. \quad (2.17)$$

$D(t)$ – расстояние от центра проекции до участка местности на земной поверхности сканируемого текущим элементом ФП ОЭСС в метрах, которое вычисляется по следующей формуле:

$$D(t) = \sqrt{(X - X_s(t))^2 + (Y - Y_s(t))^2 + (Z - Z_s(t))^2}. \quad (2.18)$$

$X_S(t), Y(t), Z_S(t)$ - координаты центра проекции в гринвичской геоцентрической системе координат, а $\dot{X}_S(t), \dot{Y}_S(t), \dot{Z}_S(t)$ соответствующая им скорость в м/с;

X, Y, Z - координаты сканируемого участка местности в гринвичской геоцентрической системе координат.

Учитывая, что скорость переноса ЗП по столбцам матриц ПЗС определяется только продольной составляющей СДИ и на интервале съёмки выполняется компенсация поперечной составляющей за счёт трёхосного углового движения КА, оставим для дальнейших исследований только первое уравнение системы (2.43). Добавим в этом уравнении зависимость параметров от номера q зоны компенсации смаза и, присоединив к нему выражение (1.2), окончательно получим следующую систему уравнений:

$$V_x^n(q, t) = \omega_x(t) \frac{l_x(t)}{l_y(t)} y(q) + \omega_y(t) \left[-\frac{l_x(t)}{l_y(t)} x(q) - f \right] + \omega_z(t) y(q) + \\ + \omega_z \left[a_{31}(t) \left(-\frac{l_x(t)}{l_y(t)} y(q) \right) + a_{32}(t) \left(\frac{l_x(t)}{l_y(t)} x(q) + f \right) + a_{33}(t) (-y(q)) \right] + (2.19) \\ + (d(q)/D(q)) \cdot g_1(t) - (l_x(t)/l_z(t)) \cdot (d(q)/D(q)) \cdot g_3(t).$$

$$\tau_T^n(q) = l_x/V_x^n(q). \quad (2.20)$$

Система уравнений (2.19) – (2.20) описывает математическую модель формирования тактовых периодов опроса матриц ПЗС в центрах зон компенсаций смаза. Формулы для нахождения текущих значений параметров $\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t), l_x(t), l_y(t), l_z(t), a_{31}(t), a_{32}(t), a_{33}(t), g_1(t), g_3(t), d(q), D(q)$ приведены в работах автора [110-111, 113-114].

Порядок расчёта значений тактовых периодов опроса матриц ПЗС в центрах зон компенсаций смаза заключается в следующем [117].

1. Определение числа зон компенсации смаза.

Число Q рассчитывается по следующим формулам:

$$Q^+ = \frac{\Delta V^+}{\sigma V_x^{\text{доп}}}. \quad (2.21)$$

$$Q^- = \frac{\Delta V^-}{\sigma V_x^{\text{доп}}}. \quad (2.22)$$

$$Q = Q^+ + Q^-. \quad (2.23)$$

В выражениях (2.21) – (2.23) приняты следующие обозначения:

$$\Delta V^+ = |V^+ - V_{\text{НОМ}}^0|; \Delta V^- = |V^- - V_{\text{НОМ}}^0|, \text{ где } V_{\text{НОМ}}^0, V^+, V^- \text{ – значения}$$

продольной составляющей СДИ $V_x^{\text{п}}(t)$ в центре и на краях линейки матриц ПЗС;

Параметры $V_{\text{НОМ}}^0, V^+, V^-$ вычисляются путём решения уравнения (2.14) после последовательной подстановки в него значений $(x = 0, y = 0)$, (x^+, y^+) и (x^-, y^-) , где $x^+ = 0$; $x^- = M \cdot l_x$ (см. (2.4)), а y^+, y^- рассчитываются по формуле (2.5) соответственно при $n^+ = 1$ и $n^- = N$.

2. Расчёт числа $\{\lambda_q\}$ матриц ПЗС, входящих в каждую зону $q = \overline{1, Q}$ компенсации смаза. Для этого в формулу (2.9) последовательно подставляются значения $q = \overline{1, Q}$.

3. Расчёт координат x_q, y_q центров зон компенсации смаза.

Поскольку число Λ матриц в линейке ПЗС чётное, число зон λ_q компенсации смаза тоже является чётным. В соответствие с формулой (2.4) это означает, что $x_1 = x_2 = \dots x_Q = 0$. Значения y_q получают по формуле (2.5) при $n = (\lambda_q \cdot P)/2$.

4. Определение программных значений $\{V_x^{\text{п}}(q, t), \tau_{\text{T}}^{\text{п}}(q)\}$.

Программные значения

$$\{V_x^{\text{п}}(q, t), \tau_{\text{T}}^{\text{п}}(q)\} \quad (2.24)$$

в центрах зон компенсаций смаза вычисляются по формулам (2.19) – (2.20) и используются далее в работе в качестве исходных данных при разработке методики коррекции смаза на борту КА.

Для того чтобы найти СДИ для каждого пикселя маршрута съёмки, необходимо перейти от метрических координат x, y к пиксельным координатам изображения k, n . С этой целью вынесем за скобки x и y в выражении (2.19). Далее заменим x и y на соответствующие им выражения согласно формулам (2.4) – (2.5). При этом по формуле (2.6) определяется принадлежность к четной либо нечетной матрице. В строчном направлении развертка изображения осуществляется за счет полета КА и задается временем по формуле (2.3).

В итоге получим:

$$\begin{aligned}
V_x(t) &= x \frac{l_x(t)}{l_y(t)} \left(\omega_3 a_{32}(t) - \omega_y(t) \right) + y \left(\omega_x(t) \frac{l_x(t)}{l_y(t)} + \omega_z(t) - \right. \\
&- \left. \omega_3 a_{31}(t) \frac{l_x(t)}{l_y(t)} - \omega_3 a_{33}(t) \right) + \omega_3 a_{32}(t) f - \omega_y(t) f + (d(t)/D(t)) \cdot g_1(t) - \\
&- (l_x(t)/l_z(t)) \cdot (d(t)/D(t)) \cdot g_3(t) , \\
V_y(t) &= y \left(\omega_x(t) \frac{l_y(t)}{l_z(t)} - \omega_3 a_{31}(t) \frac{l_y(t)}{l_z(t)} \right) - x \left(\omega_y(t) \frac{l_y(t)}{l_z(t)} + \omega_3 a_{32}(t) \frac{l_y(t)}{l_z(t)} - \right. \\
&- \left. \omega_z(t) x + \omega_3 a_{33}(t) \right) + \omega_x(t) f - \omega_3 a_{31}(t) f + (d(t)/D(t)) \cdot g_2(t) - \\
&- (l_y(t)/l_z(t)) \cdot (d(t)/D(t)) \cdot g_3(t). \tag{2.25}
\end{aligned}$$

Таким образом, если заданный пиксель изображения сформирован в нечетной матрице ПЗС, то продольная составляющая СДИ рассчитывается по следующей формуле:

$$\begin{aligned}
V_x(t) &= M \cdot \Delta l_x \frac{l_x(t)}{l_y(t)} \left(\omega_3 a_{32}(t) - \omega_y(t) \right) + \left(\left(\frac{N}{2} - n \right) \cdot \Delta l_y + \right. \\
&+ \left. \frac{\Delta l_y}{2} \right) \left(\omega_x(t) \frac{l_x(t)}{l_y(t)} + \omega_z(t) - \omega_3 a_{31}(t) \frac{l_x(t)}{l_y(t)} - \omega_3 a_{33}(t) \right) + \omega_3 a_{32}(t) f - \omega_y(t) f + \\
&+ (d(t)/D(t)) \cdot g_1(t) - (l_x(t)/l_z(t)) \cdot (d(t)/D(t)) \cdot g_3(t) \tag{2.26}
\end{aligned}$$

Если четной, то

$$\begin{aligned}
V_x(t) &= \left(\left(\frac{N}{2} - n \right) \cdot \Delta l_y + \frac{\Delta l_y}{2} \right) \left(\omega_x(t) \frac{l_x(t)}{l_y(t)} + \omega_z(t) - \omega_3 a_{31}(t) \frac{l_x(t)}{l_y(t)} - \right. \\
&- \left. \omega_3 a_{33}(t) \right) + \omega_3 a_{32}(t) f - \omega_y(t) f + (d(t)/D(t)) \cdot g_1(t) - (l_x(t)/l_z(t)) \cdot \\
&(d(t)/D(t)) \cdot g_3(t) \tag{2.27}
\end{aligned}$$

Аналогичным способом может быть рассчитана поперечная составляющая СДИ, которая для нечетной матрицы ПЗС рассчитывается по следующей формуле:

$$\begin{aligned}
 V_y(t) = & \left(\left(\frac{N}{2} - n \right) \cdot \Delta l_y + \frac{\Delta l_y}{2} \right) \left(\omega_x(t) \frac{l_y(t)}{l_z(t)} - \omega_3 a_{31}(t) \frac{l_y(t)}{l_z(t)} \right) - \\
 & - M \cdot \Delta l_x \left(\omega_y(t) \frac{l_y(t)}{l_z(t)} + \omega_3 a_{32}(t) \frac{l_y(t)}{l_z(t)} - \omega_z(t) x + \omega_3 a_{33}(t) \right) + \omega_x(t) f - \\
 & - \omega_3 a_{31}(t) f + (d(t)/D(t)) \cdot g_2(t) - (l_y(t)/l_z(t)) \cdot (d(t)/D(t)) \cdot g_3(t) \quad (2.28)
 \end{aligned}$$

А для четной:

$$\begin{aligned}
 V_y(t) = & \left(\left(\frac{N}{2} - n \right) \cdot \Delta l_y + \frac{\Delta l_y}{2} \right) \left(\omega_x(t) \frac{l_y(t)}{l_z(t)} - \omega_3 a_{31}(t) \frac{l_y(t)}{l_z(t)} \right) + \omega_x(t) f - \\
 & - \omega_3 a_{31}(t) f + (d(t)/D(t)) \cdot g_2(t) - (l_y(t)/l_z(t)) \cdot (d(t)/D(t)) \cdot g_3(t), \quad (2.29)
 \end{aligned}$$

где n - номер столбца изображения.

Так как матрицы ПЗС ОЭСС расположены с перекрытиями, номер столбца изображения может не соответствовать порядковому номеру датчика ПЗС (Рисунок 2.8).

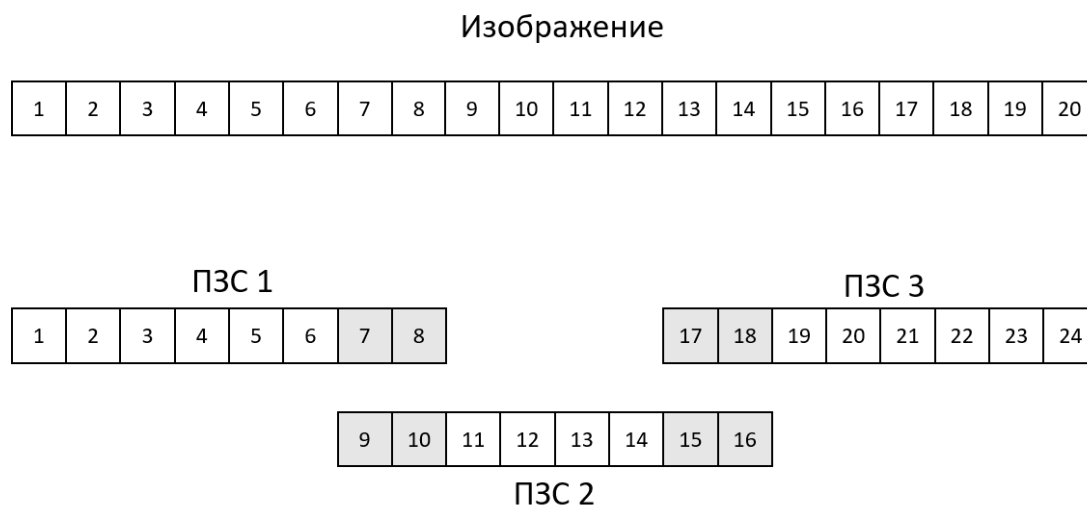


Рисунок 2.8 – Соотношение порядкового номера датчика и столбца изображения.

Поэтому для получения номера столбца изображения по порядковому номеру датчика с учетом перекрытия между матрицами ПЗС, используется следующее выражение:

$$n_{\text{изб}} = n_{\text{дат}} - \left[\frac{n_{\text{дат}} - 1}{P} \right] \cdot \zeta, \quad (2.30)$$

где $n_{\text{изб}}$ – столбец изображения;

$n_{\text{дат}}$ – порядковый номер датчика;

$\left[\frac{n_{\text{изб}}}{P} \right]$ - целая часть отношения номера столбца изображения к количеству элементов в матрице ПЗС;

ζ – количество перекрывающихся пикселей матриц ПЗС.

При этом по порядковому номеру λ матрицы ПЗС, согласно выражению (2.8) можно найти номер зоны компенсации q , в которой она находится, а по номеру зоны, согласно выражению (2.9), определить перечень входящих в неё матриц ПЗС.

В соотношениях (2.25) – (2.29) отсутствуют допущения и упрощения, которые имеются в известных моделях, полученных в работах [8-13], вследствие чего обеспечивается более высокая методическая точность расчёта СДИ и соответственно периодов опроса матриц ПЗС. Это позволяет повысить точность начального приближения $\tau_T^{\text{п}}$ при организации на борту КА окончательной коррекции смаза путём оптимизации значений $\tau_T^{\text{п}}$.

ВЫВОДЫ

1. Фотоприемная структура оптико-электронной сканирующей системы, работающая в режиме ВЗН ЗП, содержит матрицы ПЗС, которые располагаются в направлении экспонирующей щели в шахматном порядке и образуют четный и нечетный ряды. Элементы матриц ПЗС образуют строки и столбцы. При этом между столбцами смежных элементов ПЗС матриц имеются перекрытия. В каждом цикле ВЗН происходит синхронный опрос элементов строк матриц ПЗС. В процессе опроса элементов матриц ПЗС происходит последовательное

экспонирование одних и тех же участков местности. Съёмку ВЗН ЗП можно условно разделить на разгонный и штатный этапы.

2. В процессе съёмки в каждой матрице ПЗС образуется собственная полоса изображения, причем матрицы ПЗС чётного ряда формируют полосы изображений раньше матриц нечетного ряда на время накопления зарядовых пакетов. При этом сканируемые этими матрицами участки земной поверхности являются смежными и имеют перекрытия вдоль направления сканирования. Для каждого элемента матриц ПЗС можно вычислить координаты в фокальной плоскости ОЭСС и порядковые номера пикселей в формирующемся изображении на любой момент времени. Скорость движения изображения отличается на разных участках ФП ОЭСС. Для учета данной особенности формирования изображения и более точного расчета параметров съёмки на этапе планирования вводятся зоны компенсации, которые включают смежные матрицы ПЗС, имеющие близкие значения СДИ.

3. Разработана математическая модель формирования тактовых периодов опроса матриц ПЗС в центрах зон компенсаций смаза. Модель получена без допущений и упрощений, имеющих в других известных моделях и отличается наиболее полным математическим описанием координатно-временных особенностей многозональной структуры сигналов изображений в режимах съёмки ВЗН, с использованием двух линеек ПЗС матриц. Это позволяет проводить анализ процессов коррекции смаза космических сканерных изображений на более качественном уровне.

3 Разработка и исследование методики коррекции смаза космических изображений в оптико-электронной сканирующей системе на борту космического аппарата

Методика коррекции смаза космических изображений в оптико-электронной сканирующей системе на борту КА включает в себя три этапа:

- формирование выборок строк и дисперсионный анализ сигналов изображений подстилающей поверхности;
- аппроксимация выборочных дисперсий сигналов изображений;
- нахождение оптимальных значений тактовых периодов опроса матриц ПЗС.

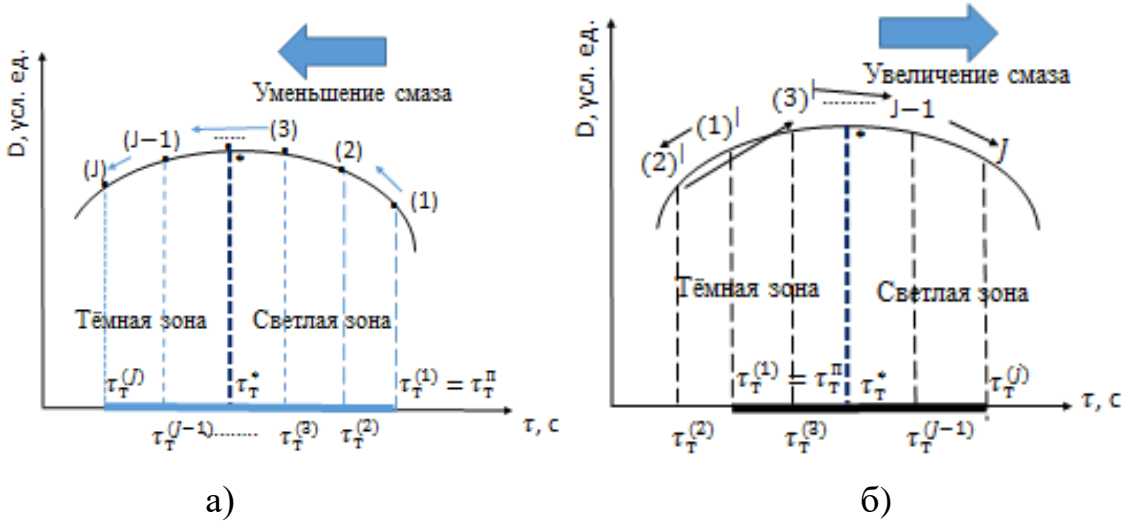
Рассмотрим содержание этапов коррекции смаза космических изображений в ОЭСС на борту КА более подробно [129, 133, 134, 136].

3.1 Формирование выборок строк и дисперсионный анализ сигналов изображений подстилающей поверхности

Сущность первого этапа коррекции смаза на борту КА заключается в формировании выборок изображений $\left\{ \mathfrak{R}^{(j)}(\tau_T^{(j)}) \mid \overline{1, J} \right\}$ подстилающей поверхности, полученных при различных значениях тактовых периодов $\left(\tau_{Tq}^{(1)}, \tau_{Tq}^{(2)}, \dots, \tau_{Tq}^{(J)} \right)$ опроса матриц ПЗС, и дисперсионном анализе ПДА $\left\{ \mathfrak{D}^{(j)}(\tau_T^{(j)}) \right\}$ сигналов изображений этих строк. При этом подразумевается, что временной интервал $\left(\tau_{Tq}^{(1)}, \tau_{Tq}^{(J)} \right)$ гарантировано содержит оптимальное значение $\tau_{Tq}^{(*)}$, при котором уровень смаза минимален, а значения дисперсий достигают максимума.

Рассмотрим эти процедуры более подробно на примере одной из матриц ПЗС. Поскольку программное значение τ_T^{Π} содержит погрешности, они могут привести к отклонению этого программного значения как в большую, так и в меньшую сторону от оптимального τ_T^* . На практике возможно два варианта

изначального расположения τ_T^{Π} , а именно, в светлой или в тёмной зоне графика дисперсии ПДА (Рисунок 1.8). Поэтому вначале выполняется позиционирование программного значения τ_T^{Π} путём определения соотношения значений τ_T^{Π} и τ_T^* (Рисунок 3.1).



а) б)
 Рисунок 3.1 – Вариант местоположения τ_T^{Π} :
 а) в светлой зоне; б) в тёмной зоне

Для этого (Рисунок 3.2) в первую выборку ($j=1$) включаются строки с порядковыми номерами от $k=M+1$ до $k = K_1$, полученные при значении $\tau_T^{(1)} = \tau_T^{\Pi}$, а во вторую ($j=2$) – следующие $(K_2 - K_1)$ строки, полученные при $\tau_T^{(2)} = \tau_T^{\Pi} - \Delta\tau_1$, где $\Delta\tau_1 = 0.01\tau_T^{\Pi}$ [134].

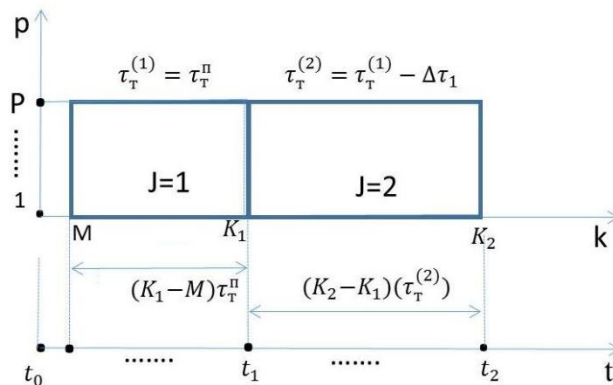


Рисунок 3.2 – Формирование первых двух выборок строк изображений

Значение $\Delta\tau_1$ в первом приближении соответствует значению $\sigma\tau_T^{\Pi}$, которое в среднем составляет величину 1% от τ_T^{Π} . При этом должно обеспечиваться

условие $K_1 - M = K_2 - K_1$, что обусловлено тем, что все строки маршрута съёмки от $k=1$ до $k=M$ проходят разное число тактов накопления.

После этого в БВК формируются первые две выборки ПДА $\{\varphi^{(1)}(\tau_T^{(1)})\}, \{\varphi^{(2)}(\tau_T^{(2)})\}$, вычисляются их дисперсии по формулам

$$D^{(1)} = \frac{1}{K_1 - M} \sum_{K_1}^{K_1} \frac{1}{P} \sum_{P=1}^P [\varphi^{(1)}(\tau_T^{(1)}) - \overline{(\varphi^{(1)}(\tau_T^{(1)}))}]^2. \quad (3.1)$$

$$D^{(2)} = \frac{1}{K_2 - K_1} \sum_{K_1}^{K_2} \frac{1}{P} \sum_{P=1}^P [\varphi^{(2)}(\tau_T^{(2)}) - \overline{(\varphi^{(2)}(\tau_T^{(2)}))}]^2, \quad (3.2)$$

и находится разность $D^{(2)} - D^{(1)}$.

Если разность больше нуля, то делается вывод о том, что $\tau_T^{\Pi} > \tau_T^*$ (положение (1) на Рисунке 3.1, а), а если меньше нуля – что $\tau_T^{\Pi} < \tau_T^*$ (положение (1)^л на Рисунке 3.1, б).

Первый вариант. $D^{(2)} - D^{(1)} > 0$.

Тогда съёмка далее продолжается с последовательно изменяемыми значениями $\tau_T^{(3)} = \tau_T^{(2)} - \Delta\tau_2, \dots, \tau_T^{(j)} = \tau_T^{(j-1)} - \Delta\tau_2$ (положения (3), (4), ..., J на рисунке 3.1, а), формируются выборки строк от K_2 до K_3 , от K_3 до K_4 , ..., и от K_{j-1} до K_j , причём $K_3 - K_2 = \dots = K_j - K_{j-1}$, по формулам

$$D^{(j)} = \frac{1}{K_{j-1} - K_j} \sum_{K_{j-1}}^{K_j} \frac{1}{P} \sum_{P=1}^P [\varphi^{(j)}(\tau_T^{(j)}) - \overline{(\varphi^{(j)}(\tau_T^{(j)}))}]^2 \quad (3.3)$$

вычисляются дисперсии $\{D^{(j)} | j = \overline{3, J}\}$ ПДА и их разности $D^{(j)} - D^{(j-1)}$. Процесс формированием выборок строк изображений заканчивается после выполнения условия $D^{(j)} - D^{(j-1)} < 0$, которое соответствует положениям (j – 1) или (j) на Рисунке 3.1, а.

Второй вариант. $D^{(2)} - D^{(1)} < 0$.

В этом случае процесс съёмки продолжается с последовательно изменяемыми значениями $\tau_T^{(3)} = \tau_T^{(1)} + \Delta\tau_2, \dots, \tau_T^{(j)} = \tau_T^{(j-1)} + \Delta\tau_2$ (положения (1)^л, (2)^л, (3)^л, ...) на Рисунке 3.1, б). Процесс формирования выборок изображений, вычисления и сравнения дисперсий ПДА заканчивается, как и в первом варианте, при выполнении условия $D^{(j)} - D^{(j-1)} < 0$.

3.2 Аппроксимация выборочных дисперсий сигналов изображений

Имеем: $\tau_T^{(1)}, \tau_T^{(2)}, \tau_T^{(3)}, \dots, \tau_T^{(J)}$ и $D(\tau_T^{(1)}), \dots, D(\tau_T^{(J)})$.

Требуется: найти аналитический вид функции $D = F(\tau_T)$.

Эта задача решается известными методами вычислительной математики [137-139]. Рассмотрим один из вариантов её решения путём аппроксимации функции дисперсии алгебраическим многочленом. Формула многочлена:

$$D_j(\tau) = a_1 \cdot \tau_j^1 + a_2 \cdot \tau_j^2 + a_3 \cdot \tau_j^3 + a_4 \cdot \tau_j^4 + \dots + a_j \cdot \tau_j^j. \quad (3.4)$$

Составляем систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов a_1, \dots, a_j :

$$\begin{cases} \tau_1 \cdot a_1 + \tau_1^2 \cdot a_2 + \tau_1^3 \cdot a_3 + \dots + \tau_1^j \cdot a_j = d_1 \\ \tau_2 \cdot a_1 + \tau_2^2 \cdot a_2 + \tau_2^3 \cdot a_3 + \dots + \tau_2^j \cdot a_j = d_2 \\ \tau_3 \cdot a_1 + \tau_3^2 \cdot a_2 + \tau_3^3 \cdot a_3 + \dots + \tau_3^j \cdot a_j = d_3 \\ \dots \\ \tau_j \cdot a_1 + \tau_j^2 \cdot a_2 + \tau_j^3 \cdot a_3 + \dots + \tau_j^j \cdot a_j = d_j \end{cases} \quad (3.5)$$

В уравнениях (3.5) приняты следующие обозначения:

$$\tau_1 = \tau_T^{(1)}, \tau_2 = \tau_T^{(2)}; \tau_3 = \tau_T^{(3)}, \dots, \tau_j = \tau_T^{(j)};$$

$$d_1 = D(\tau_T^{(1)}); d_2 = D(\tau_T^{(2)}); d_3 = D(\tau_T^{(3)}); \dots; d_j = D(\tau_T^{(j)}).$$

В матричной форме система линейных алгебраических уравнений (3.5) имеет следующий вид:

$$T \times A = D, \quad (3.6)$$

где:

$$T = \begin{bmatrix} \tau_1 & \tau_1^2 & \tau_1^3 & \dots & \tau_1^j \\ \tau_2 & \tau_2^2 & \tau_2^3 & \dots & \tau_2^j \\ \tau_3 & \tau_3^2 & \tau_3^3 & \dots & \tau_3^j \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tau_j & \tau_j^2 & \tau_j^3 & \dots & \tau_j^j \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_j \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_j \end{bmatrix}.$$

Тогда неизвестные элементы вектора-столбца A вычисляются по известной формуле:

$$A = \begin{vmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_J \end{vmatrix} = T^{-1} \times D. \quad (3.7)$$

После нахождения коэффициентов a_1, a_2, \dots, a_J функция $D(\tau_T)$ будет иметь следующий вид:

$$D(\tau_T) = a_1 \cdot \tau_T + a_2 \cdot \tau_T^2 + \dots + a_J \cdot \tau_T^J, \quad (3.8)$$

где $\tau_T \in (\tau_T^{(1)}, \tau_T^{(J)})$.

Таким образом, результатом второго этапа является получение в явном виде функции $D = F(\tau_T)$, которая обладает следующими особенностями:

- является монотонной на интервалах $[\tau_T^{(1)}, \tau_T^*]$ и $(\tau_T^*, \tau_T^{(J)})$;
- имеет единственную точку максимума τ_T^* внутри интервала $[\tau_T^{(1)}, \tau_T^{(J)}]$.

3.3 Оптимизация тактовых периодов опроса матриц приборов с зарядовой связью

Задача, решаемая на последнем этапе разработанной методики коррекции смаза на борту КА, состоит в нахождении такого значения τ_T^* , при котором функция $D(\tau_T)$ достигает максимума.

Если условия (3.9) выполняются, тогда, как следует из первой теоремы Больцано-Коши [141], на интервале $[\tau_T^{(1)}, \tau_T^{(J)}]$ имеется единственный корень, а именно, $\tau_T = \tau_T^*$, при котором значение первой производной от функции дисперсии равно нулю, а значение самой дисперсии достигает максимума.

В соответствие с этим продифференцируем выражение (3.8) и приравняем его к нулю. Получим:

$$F(\tau_T) = \dot{D}(\tau_T) = a_1 + 2 \cdot a_2 \cdot \tau_T + \dots + J \cdot a_J \cdot \tau_T^{J-1} = 0 \quad (3.10)$$

Решение уравнения (3.10) в работе выполнено с помощью известного в вычислительной математике метода хорд. Формула итерационного нахождения значения $\tau_T = \tau_T^*$ имеет следующий вид [137]:

$$\tau_T^{(\vartheta)} = \frac{\tau_A^{(\vartheta)} \cdot F^{(\vartheta)}(\tau_B) - \tau_B^{(\vartheta)} \cdot F^{(\vartheta)}(\tau_A)}{F^{(\vartheta)}(\tau_B) - F^{(\vartheta)}(\tau_A)}, \quad (3.11)$$

где $\tau_A^{(\vartheta)}$, $\tau_B^{(\vartheta)}$ – значения τ_T на левом и правом концах интервала, содержащего корень $\tau_T = \tau_T^*$; $F^{(\vartheta)}(\tau_A)$, $F^{(\vartheta)}(\tau_B)$ – значения функции $\dot{D}(\tau_T)$ при $\tau_T = \tau_A^{(\vartheta)}$ и $\tau_T = \tau_B^{(\vartheta)}$; $\vartheta = \overline{1, U}$ – номер итерации.

Пусть график функции (3.10) имеет следующий вид (Рисунок 3.3).

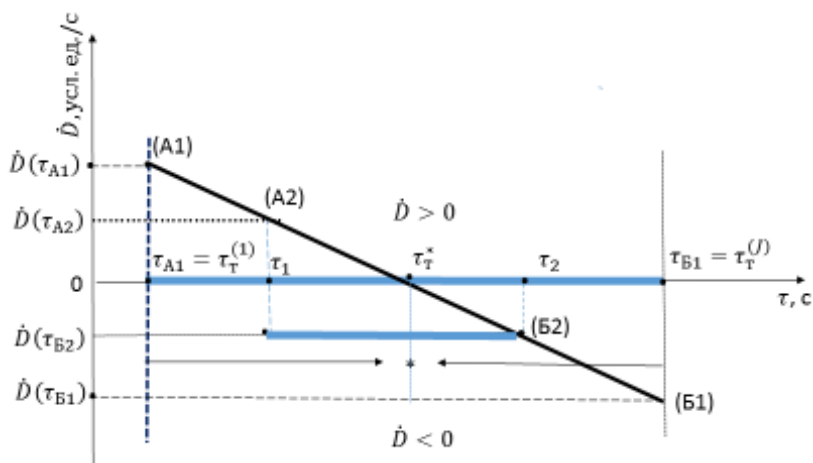


Рисунок 3.3 – Нахождение оптимального значения τ_T^*

Положим также, что в первой итерации $\vartheta = 1$ в качестве начальных приближений взят интервал $[A1, B1]$. Тогда значениям $\tau_{A1} = \tau_T^{(1)}$ и $\tau_{B1} = \tau_T^{(J)}$ будут соответствовать значения $\dot{D}(\tau_{A1}) = \dot{D}(\tau_T^{(1)})$ и $\dot{D}(\tau_{B1}) = \dot{D}(\tau_T^{(J)})$, полученные из решения уравнения (3.10).

Подставив значения начальных приближений в уравнения (3.11), находят значение $\tau_{T1} = \tau_1$, а затем из решения уравнения (3.10) определяют $\dot{D}(\tau_1)$. После этого во второй итерации $\vartheta = 2$ формируется новый интервал, содержащий корень $\tau_T = \tau_T^*$. Для этого сравниваются знаки функций $\dot{D}(\tau_T^{(1)})$, $\dot{D}(\tau_1)$ и $\dot{D}(\tau_T^{(J)})$, $\dot{D}(\tau_1)$. Пусть $\dot{D}(\tau_T^{(1)}) > 0$, $\dot{D}(\tau_1) > 0$, и $\dot{D}(\tau_T^{(J)}) < 0$, $\dot{D}(\tau_1) > 0$. Тогда в качестве нового интервала выбирается интервал $[A2, B1]$ и вычисляются значения $\tau_{T2} = \tau_2$ и $\dot{D}(\tau_2)$, после чего выбирается снова новый интервал. На Рисунке 3.3 приведен случай, когда $\tau_2 > \tau_1$ и новый интервал составляет $[A2, B2]$.

Итерационный цикл заканчивается тогда, когда в какой-либо итерации выполнится условие

$$\tau_{T\vartheta} - \tau_{T(\vartheta-1)} \leq \Delta\tau_T (\text{доп}), \quad (3.12)$$

после чего считается, что $\tau_{T\vartheta} = \tau_T^*$ и задача коррекции смаза решена.

Найденное значение τ_T^* используется далее в течение остального времени включения ОЭСС. С целью проверки эффективности разработанной методики и разработки практических рекомендаций по формированию рационального количества выборок реальных данных в процессе съёмки, выбору степени аппроксимирующих полиномов, а также для оценки степени влияния инфраструктуры подстилающей поверхности на получение оптимальных значений тактовых периодов опроса матриц ПЗС, были проведены экспериментальные исследования.

3.4 Экспериментальные исследования коррекции смаза

Цель экспериментальных исследований в работе состояла в подтверждение полученных результатов теоретических исследований коррекции смаза на борту КА, основанных на оптимизации программных значений тактовой частоты опроса матриц ПЗС путём дисперсионного анализа сигналов изображений строк формирующегося маршрута съёмки. Методическая схема экспериментальных исследований включала в себя два этапа:

- подготовка и получение экспериментальных данных;
- обработка и анализ полученных результатов.

Рассмотрим содержание этих этапов более подробно.

3.4.1 Подготовка и получение экспериментальных данных

Подготовка экспериментальных данных, позволяющих исследовать различные алгоритмы реализации рассмотренной выше методики коррекции смаза космических изображений, выполнялась путём искажений сигналов изображений строк и периода опроса матриц ПЗС, полученных в результате реальной космической съёмки. Моделирование смаза выполнялось на основе модели (1.18), а значений $\tau_T^j(\delta_j)$ – по формуле (1.15).

Для этого использовался фрагмент цифрового изображения реального маршрута съёмки без смаза, полученный с КА «World View – 2», в формате tiff 16 бит, который состоял из 889 строк и 1772 пикселей в строках (Рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Исходный фрагмент реального изображения

Он был декомпозирован (Рисунок 3.5) на девять условных кадров строк без смаза в этом же формате tiff 16 бит (порядок нумерации условных кадров идёт снизу-вверх по направлению полёта КА) [134].

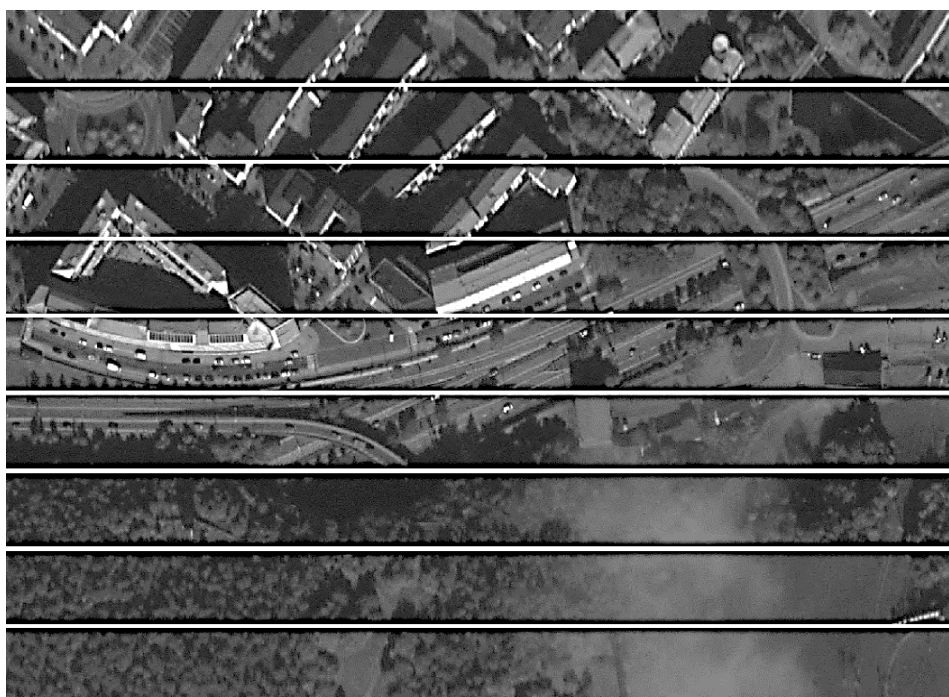
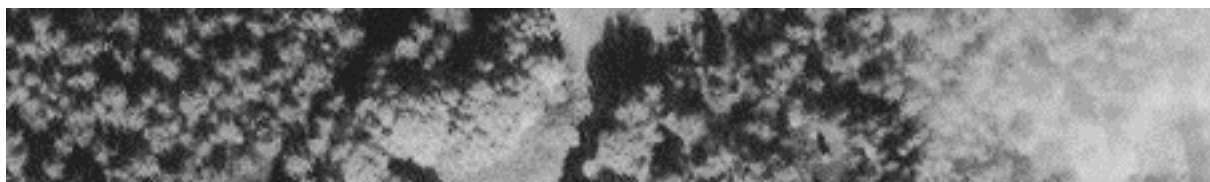
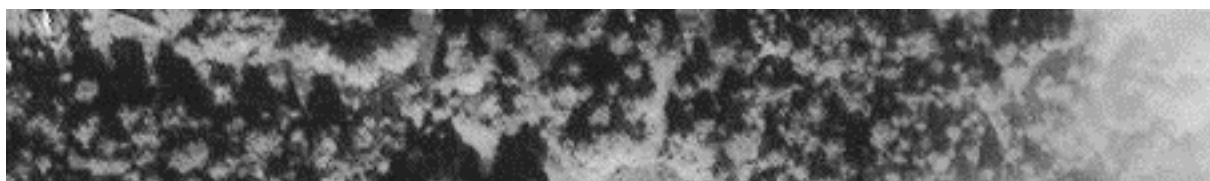


Рисунок 3.5 – Зоны декомпозиции исходного фрагмента изображения

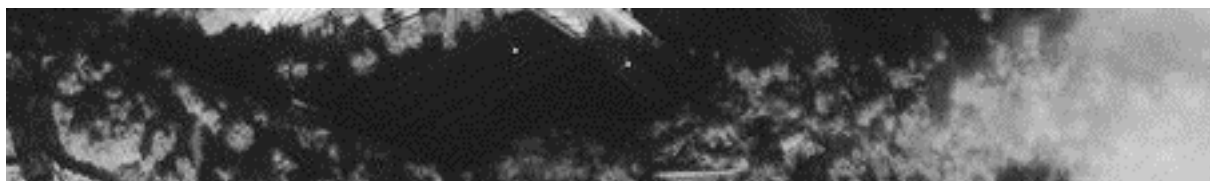
Условные кадры включали в себя 66 строк и 1238 пикселей в строках, а их увеличенные изображения без смаза представлены на Рисунках 3.6 - 3.8.



а)



б)



в)

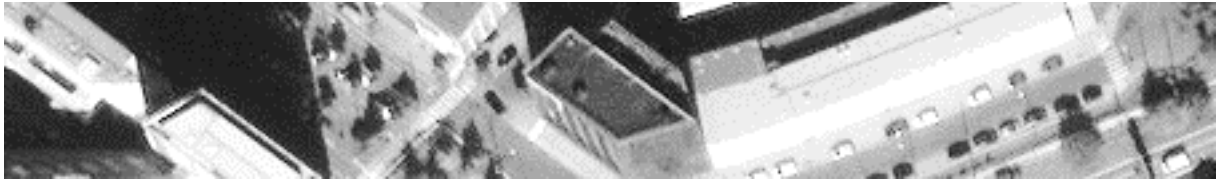


г)

Рисунок 3.6 – Условные кадры: а) $j = 1$; б) $j = 2$; в) $j = 3$; г) $j = 4$



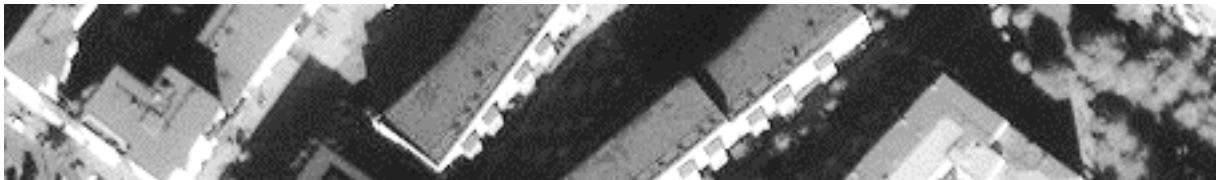
Рисунок 3.7 – Условный кадр $j = 5$ (контрольный)



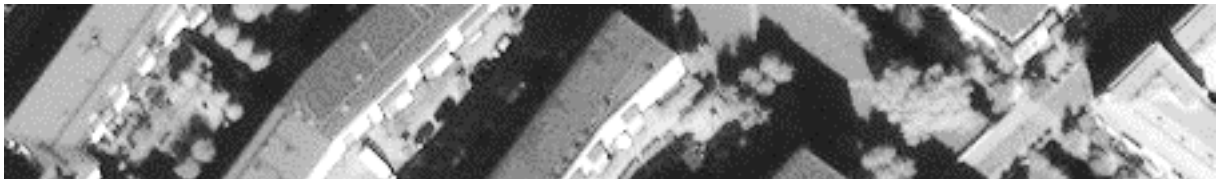
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.8 – Условные кадры: а) $j = 6$; б) $j = 7$; в) $j = 8$; г) $j = 9$

Каждому кадру были поставлены в однозначное соответствие реальные сигналы изображений $\{W_{kp}^{*(j)} | k = \overline{1,66}; p = \overline{1,1238}; j = \overline{1,9}\}$ без смаза, тип инфраструктуры (деревья – поле; застройка – деревья – поле; застройка – деревья и застройка), а также одинаковые значения высоты съёмки H , скорости КА $V_{КА}$, фокусного расстояния f , длины пикселя l матриц ПЗС, числа M тактов накопления в цикле ВЗН, тактового периода τ_T^* опроса матриц ПЗС, знаменателя масштаба съёмки m_c и линейного разрешения на местности ρ (Таблица 1).

Таблица 1 - Параметры съёмки «World View – 2»

$V_{КА}$, м\с	H , км	f , м	m_c	ρ , м	$l, 10^{-6}$ м	M	τ_T^* , 10^{-4} с
7990	770	13,3	58 000	0,5	8	128	0,579

Моделирование смаза изображений и соответствующих им искажённых значений периода опроса матриц ПЗС.

Искажения исходных сигналов изображений $W_{кр}^{*(j)}$ и периода опроса τ_T^* были смоделированы для первых четырёх условных кадров в тёмной, а для остальных – в светлой зоне. Пятый кадр оставался без смаза в качестве опорного (контрольного) кадра с контрольным значением τ_T^* . Моделирование смаза выполнялось на основе модели (1.27) путём пересчёта исходных значений сигналов изображений условных кадров, заданных в условных единицах электрического сигнала [134-135], а также с использованием моделей, представленных в работе [140]. Моделирование искажённых значений $\tau_T^j(\delta_j)$ периода опроса матриц ПЗС и погрешностей их задания, соответствующих заданным уровням смаза δ_j , выполнялось по формулам (1.11) – (1.14), а результаты моделирования представлены в Таблице 2.

Таблица 2 - Результаты моделирования периода опроса матриц ПЗС

Зона	Номер кадра, j	Тип сцен условных кадров	Уровень смаза δ_j , число пикселей	$\tau_T^j(\delta_j)$, 10^{-4} с	Погрешности		
					σ_{τ_T} , 10^{-4} с	$\Delta_o(\tau_T^p)$, %	$\Delta_A(\tau_T^p)$, 10^{-4} с
тёмная	1	Деревья, поле	4	0,561	0,006	3,2	0,018
	2	Деревья, поле	3	0,566	0,0043	2,3	0,013
	3	Деревья, поле	2	0,570	0,003	1,6	0,009
	4	Застройка, деревья, поле	1	0,575	0,13	0,7	0,004
Опт.	*5	Застройка, деревья	0	0,579	0	0	0
светлая	6	Застройка	1	0,584	0,002	0,86	0,006
	7	Застройка	2	0,588	0,003	1,53	0,009
	8	Застройка	3	0,593	0,005	2,53	0,015
	9	Застройка	4	0,597	0,006	3,02	0,018

В Таблице 2 приняты следующие обозначения:

$$\Delta_o(\tau_T^n) = [|\tau_T^n - \tau_T^*| / \tau_T^n];$$

$$\Delta_A(\tau_T^n) = |\tau_T^n - \tau_T^*|;$$

$\sigma\tau_T$ – средняя квадратическая погрешность задания τ_T^n .

Результаты моделирования смаза в кадре $j = 9$ приведены на Рисунке 3.9.

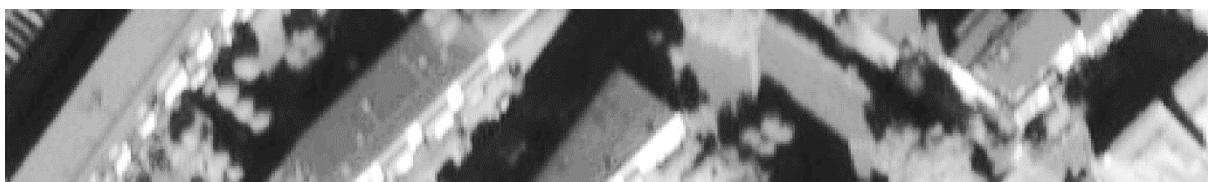


Рисунок 3.9 – Условный кадр $j = 9$ с уровнем смаза $\delta = 4$ в светлой зоне

Далее для каждого условного кадра были рассчитаны дисперсии ПДА. При этом для исследования чувствительности разработанной методики к различиям в инфраструктуре обрабатываемых выборок изображений подстилающей поверхности были рассчитаны значения дисперсий $D_\alpha^{(j)}$ для трёх типов ПДА (Таблица 3), представляющих собой различные комбинации сигналов.

Таблица 3 - Значения дисперсий для различных типов ПДА

Зона	Номер условного кадра, j	Тип сцены условного кадра	Уровень смаза δ_j , число пикселей	$\tau_T^j(\delta_j)$, 10^{-4} с	$D_\alpha^{(j)}$, усл. ед.		
					\wp_1	\wp_2	\wp_3
тёмная	1	деревья - поле	4	0,561	34206	1183	0.5
	2	деревья - поле	3	0,566	32453	1380	0.55
	3	деревья - поле	2	0,570	36578	2045	0.67
	4	Застройка-деревья - поле	1	0,575	62676	3709	1.18
оптимум	*5	Застройка-деревья	0	0,579	35785	3754	1.29
светлая	6	Застройка	1	0,584	13351	871	1.19
	7	Застройка	2	0,588	13011	134	0.71
	8	Застройка	3	0,593	10160	95	0.61
	9	Застройка	4	0,597	11579	74	0.50

Первые два типа ПДА представляют собой суммы и разности сигналов изображений одноимённых пикселей смежных строк:

$$\wp_1(\tau_T) = W_{kp}^{(j)}; \wp_2(\tau_T) = W_{k+1,p}^{(j)} - W_{k,p}^{(j)}; \quad (3.14)$$

Третий тип ПДА – это отношение разностей сигналов изображений одноимённых пикселей смежных строк и смежных пикселей одноимённых строк:

$$\wp_3(\tau_T) = (W_{k+1,p}^{(j)} - W_{k,p}^{(j)}) / (W_{k,p+1}^{(j)} - W_{k,p}^{(j)}), \quad (3.15)$$

где $\alpha = 1, 2, 3$.

Таким образом, внутри ИГР $[0,561 \cdot 10^{-4}, 0,597 \cdot 10^{-4}]$ было подготовлено восемь условных кадров, не имеющих перекрытий, которые представляют собой восемь выборок строк изображений ($j = 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9$). В выбранных условных кадрах отличаются следующие параметры:

- величина смаза δ_j ;
- значения $\{W_{kp}^{(j)}(\delta_j)\}$ сигналов изображений;
- тактовый период опроса матриц ПЗС $\tau_T^j(\delta_j)$;
- дисперсия $D_\alpha^{(j)}$ ПДА сигналов изображений
- инфраструктура (типы содержимого сцен).

В число выборок включены четыре выборки в тёмной зоне ($j = \overline{1,4}$) и четыре – в светлой зоне ($j = \overline{6,9}$).

3.4.2 Обработка и анализ полученных результатов

На этом этапе выполнялись следующие операции:

- обоснование типа ПДА, который в наименьшей степени чувствителен к изменению инфраструктуры изображений подстилающей поверхности;
- аппроксимация выборочных дисперсий и оптимизация значений тактового периода опроса матриц ПЗС при различном числе обрабатываемых условных кадров и геометрии их взаимного расположения внутри ИГР;
- оценка эффективности разработанной методики по величине абсолютного $\Delta_A^{**}(\tau_T) = |\tau^{**} - \tau^*|$ и относительного $\Delta_0^{**}(\tau_T) = (|\tau^{**} - \tau^*|) / \tau^{**}$ отклонения

найденных оптимальных значений τ^{**} тактовых периодов опроса от опорного (контрольного) значения τ^* и степени коррекции первоначального смаза при различном числе включаемых в обработку выборок обрабатываемых изображений и геометрии их взаимного расположения внутри ИГР.

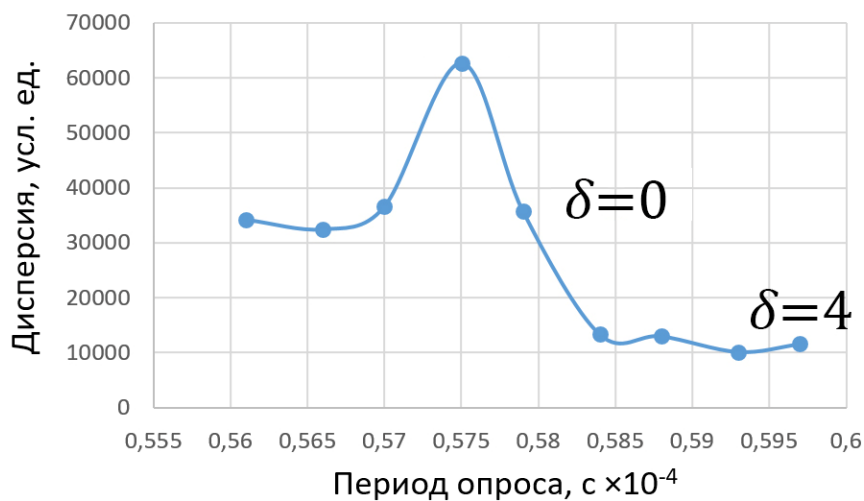
Рассмотрим полученные результаты более подробно.

Обоснование типа ПДА

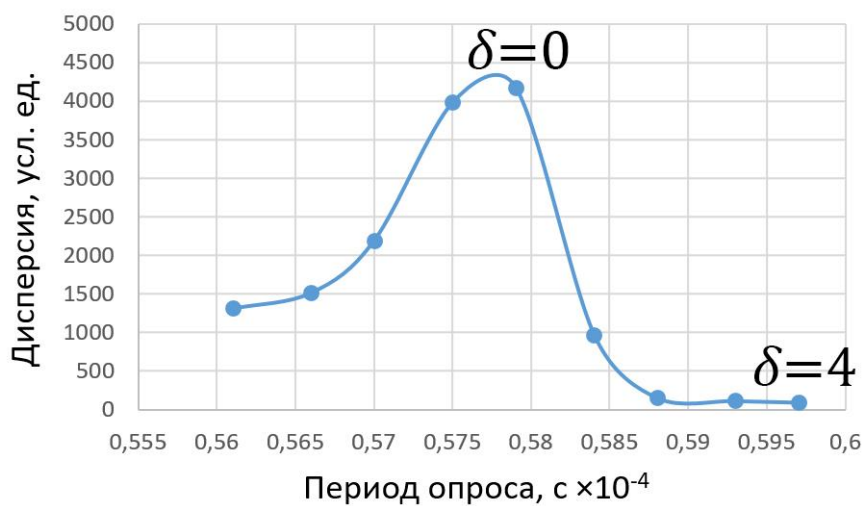
В процессе съемки ОЭСС сканируемая местность может резко меняться от достаточно однородной незаселенной местности до высококонтрастной городской инфраструктуры. При этом отсутствие перекрытия изображений в сканерной съемке значительно усложняет применение ПДА, значение которого обусловлено дисперсией. Поэтому основным критерием выбора ПДА является минимальная зависимость от инфраструктуры подстилающей поверхности, которая должна оказывать меньшее влияние, чем возникновение смаза в следствии неоптимальных параметров съемки.

Для того чтобы изучить влияние инфраструктуры на величину ПДА, по данным Таблицы 3 были построены графики дисперсий $D_1^{(j)}, D_2^{(j)}, D_3^{(j)}$ (Рисунок 3.10) на множестве найденных значений $\tau_T^j(\delta_j)$. Сравнительный анализ графиков дисперсий для трёх рассматриваемых типов ПДА позволил отметить следующее.

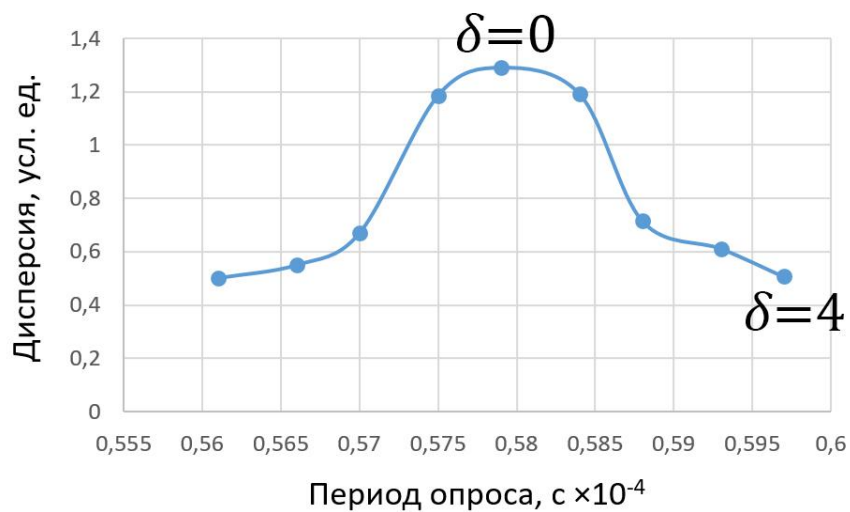
Первый тип ПДА, основанный на дисперсии суммы сигналов изображения, имеет ложный максимум, соответствующий смазу величиной один пиксель в темной зоне. Также при использовании первых двух типов ПДА функция дисперсии $D(\tau_T^{\Pi})$ не является монотонной на участках $\tau_T^{\Pi} < \tau_T^*$ и $\tau_T^{\Pi} > \tau_T^*$. Это, во-первых, противоречит условию поставленной задачи (3.9), во –вторых, означает, что если при реализации разработанной методики в полосу захвата ОЭСС будут попадать участки подстилающей поверхности с различной инфраструктурой, то могут появиться один или нескольких локальных экстремумов, причём, чем больше различия в инфраструктуре смежных участков, тем выше вероятность их появления.



а)



б)



в)

Рисунок 3.10 – Графики дисперсий $D_\alpha^{(j)}$ при различных типах ПДА:а) $\wp_1(\tau_T)$; б) $\wp_2(\tau_T)$; в) $\wp_3(\tau_T)$

В этом случае процедура оптимизации тактового периода опроса матриц ПЗС усложнится и может привести к некорректному результату. В то же время третий тип ПДА, равный нормированной разности сигналов смежных пикселей изображения, обеспечивает наиболее приемлемый результат в части близости вида функции дисперсии к квазипараболическому типу (Рисунок 1.8) и обеспечивает выполнение условий (3.9). Учитывая это, дальнейшие процедуры аппроксимации дисперсий и нахождения оптимального значения периода опроса матриц ПЗС выполнялись только для третьего типа ПДА.

*Аппроксимация выборочных дисперсий и оптимизация значений
тактового периода опроса матриц ПЗС*

Были рассмотрены два варианта количества обрабатываемых выборок изображений: восемь и три. В первом варианте аппроксимация осуществлялась алгебраическим многочленом (3.4) восьмой степени, а во втором – полиномом второй степени. Во втором варианте также исследовались семь вариаций взаимного расположения трёх выборок и степень их влияния на точность аппроксимации.

Вариант 1. Число выборок: 8.

Состав: $j = 1, 2, 3, 4$ в тёмной и $j = 6, 7, 8, 9$ – в светлой зоне.

Геометрия взаимного расположения: симметрия.

Вариант 2. Число выборок: 3.

Вариация 2.1. Состав: $j = 1$ в тёмной и $j = 6, 7$ – в светлой зоне.

Геометрия взаимного расположения: асимметрия.

Вариация 2.2. Состав: $j = 2$ в тёмной и $j = 6, 7$ – в светлой зоне.

Геометрия взаимного расположения: асимметрия.

Вариация 2.3. Состав: $j = 3$ в тёмной и $j = 6, 7$ – в светлой зоне.

Геометрия взаимного расположения: симметрия.

Вариация 2.4. Состав: $j = 4$ в тёмной и $j = 6, 7$ – в светлой зоне.

Геометрия взаимного расположения: асимметрия.

Вариация 2.5. Состав: $j = 1$ в тёмной и $j = 8, 9$ – в светлой зоне.

Геометрия взаимного расположения: симметрия.

Вариация 2.6. Состав: $j = 2$ в тёмной и $j = 8,9$ – в светлой зоне.

Геометрия взаимного расположения: асимметрия.

Вариация 2.7. Состав: $j = 3$ в тёмной и $j = 8,9$ – в светлой зоне.

Геометрия взаимного расположения: асимметрия.

Для каждого варианта числа выборок изображений внутри ИГР были построены графики исходной и аппроксимированной функции дисперсии (Рисунки 3.11 – 3.18), на которых показаны ошибки аппроксимации дисперсии в окрестности точки максимума.

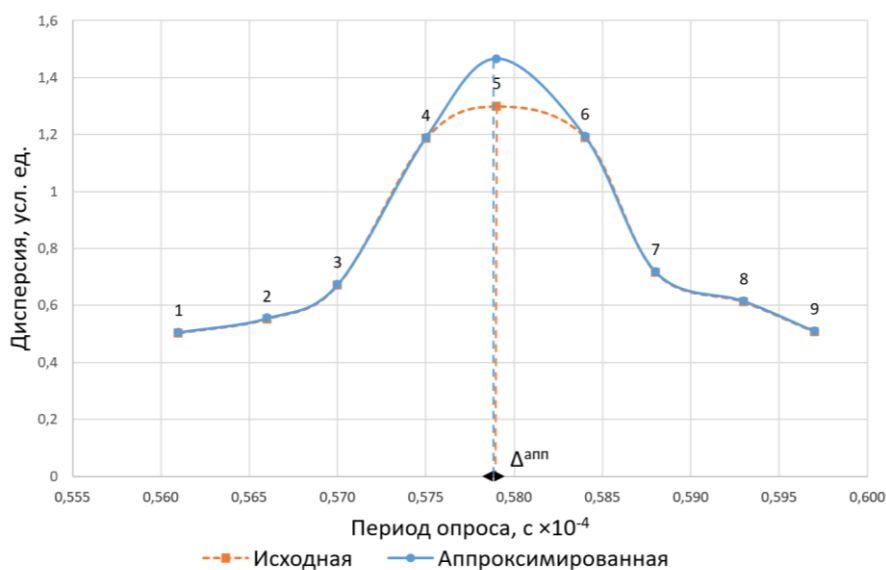


Рисунок 3.11 – Графики дисперсий для первого варианта числа выборок

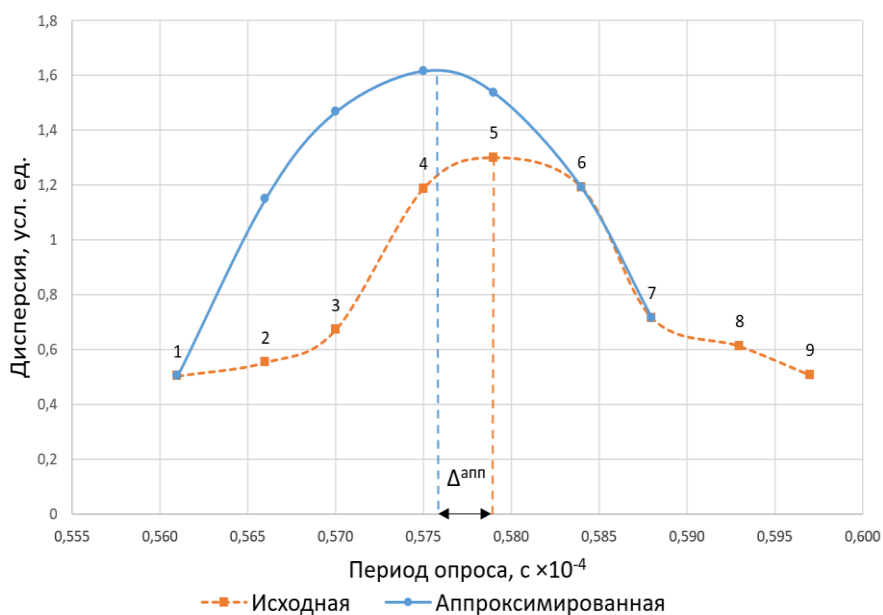


Рисунок 3.12 – Графики дисперсий для вариации 2.1 числа выборок

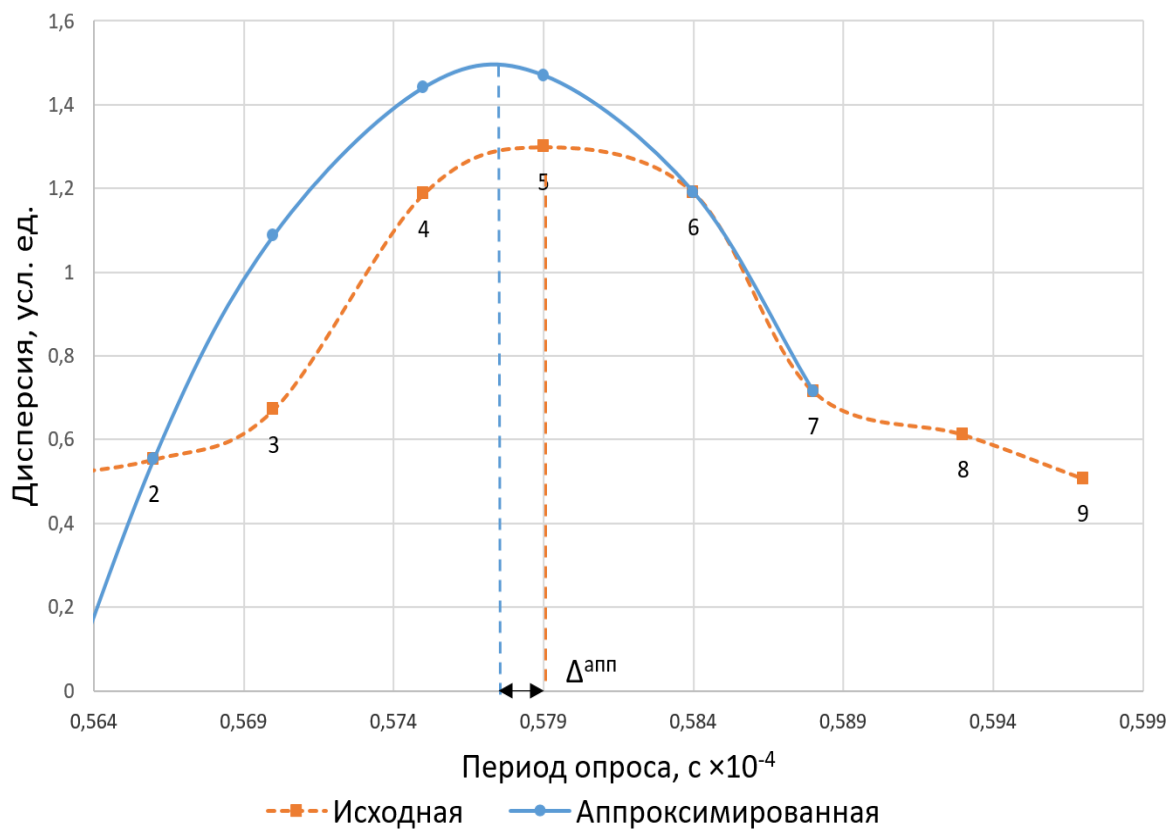


Рисунок 3.13 – Графики дисперсий для вариации 2.2 числа выборок

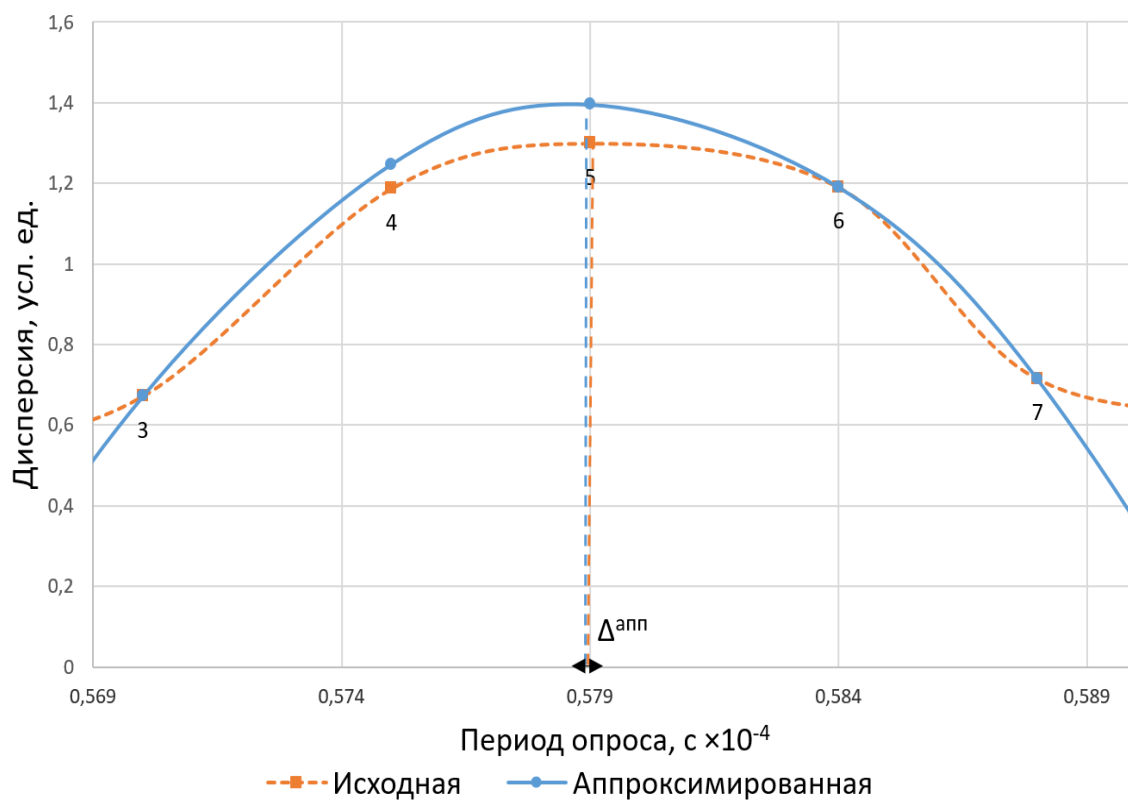


Рисунок 3.14 – Графики дисперсий для вариации 2.3 числа выборок

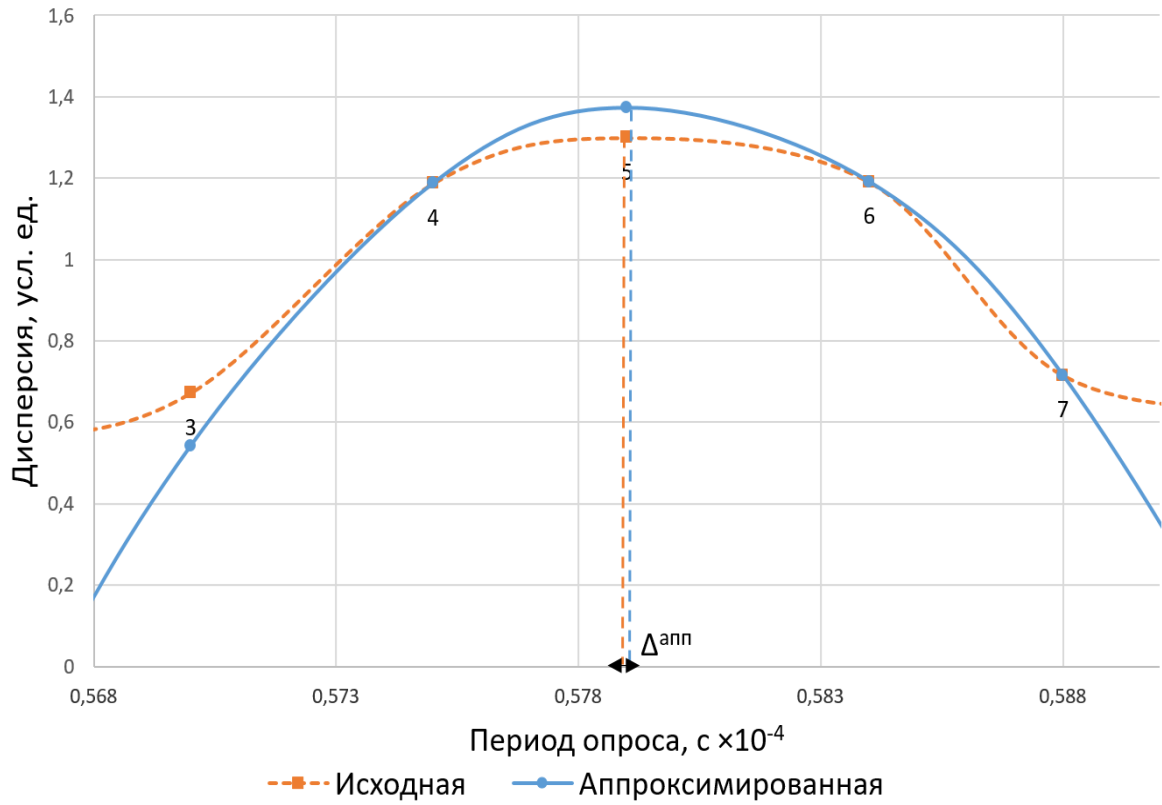


Рисунок 3.15 – Графики дисперсий для вариации 2.4 числа выборок

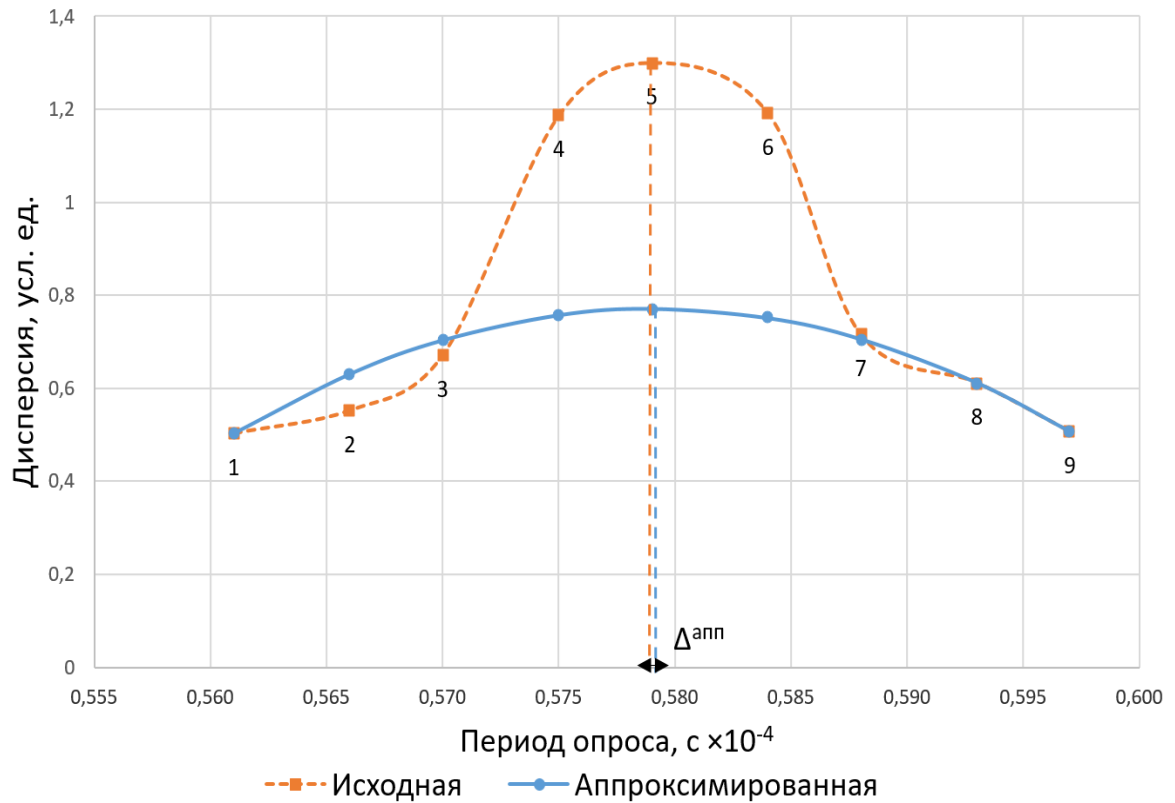


Рисунок 3.16 – Графики дисперсий для вариации 2.5 числа выборок

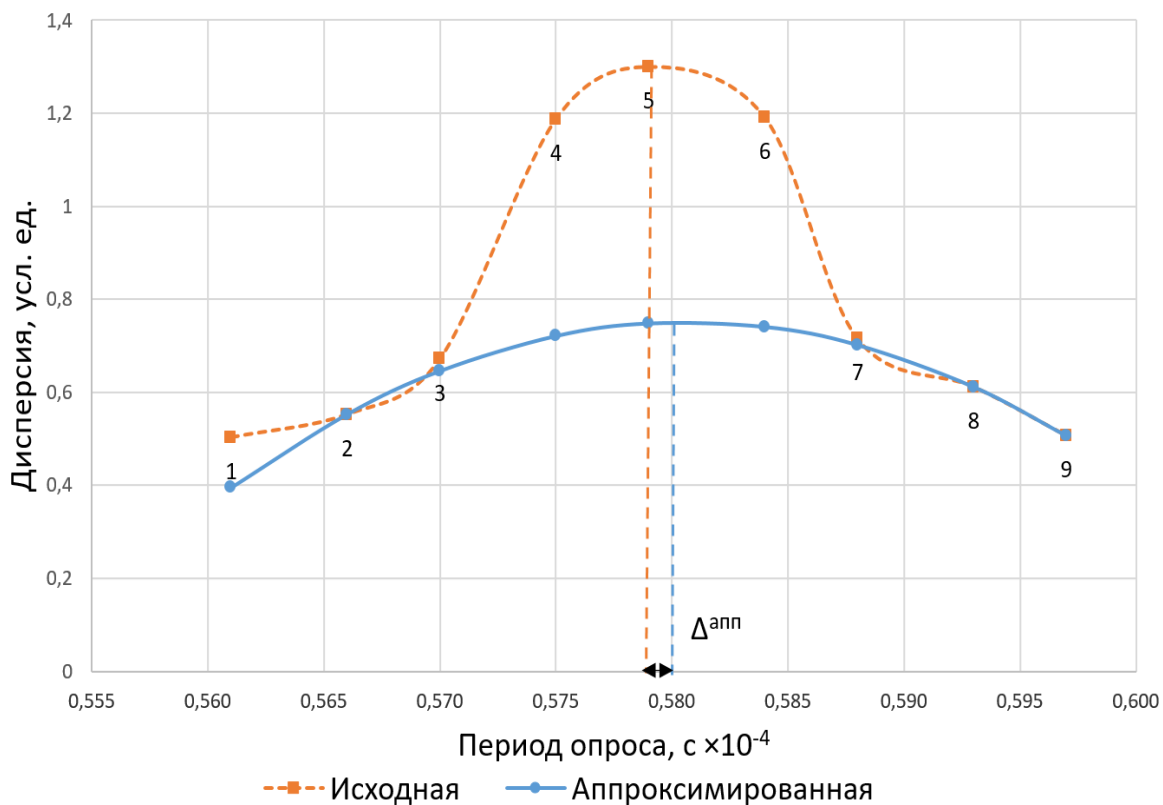


Рисунок 3.17 – Графики дисперсий для вариации 2.6 числа выборок

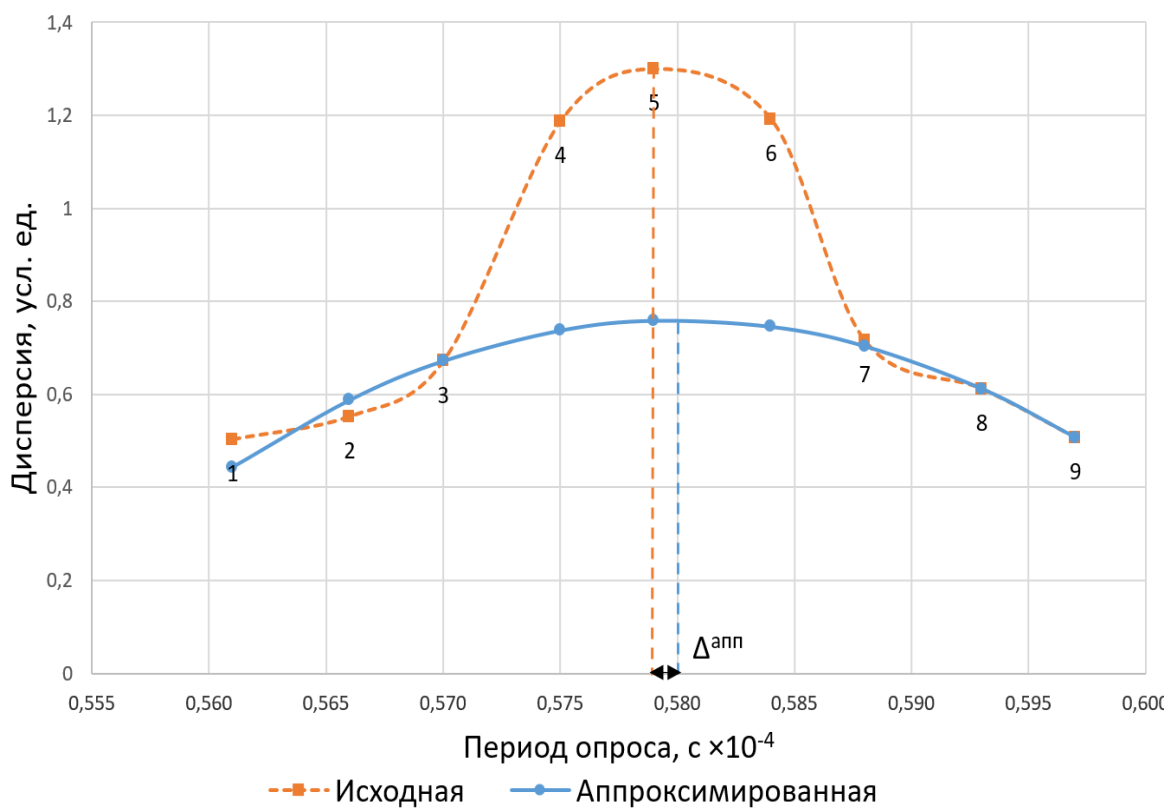


Рисунок 3.18 – Графики дисперсий для вариации 2.7 числа выборок

Далее для каждого варианта числа выборок были найдены оптимальные значения τ_T^{**} и оценки эффективности разработанной методики путём вычисления абсолютных $\Delta_A^{**}(\tau_T)$ и относительных $\Delta_O^{**}(\tau_T)$ отклонений значений τ_T^{**} от контрольного (опорного) значения τ_T^* и уровней остаточного смаза (см. (1.11)).

При этом для первого варианта нахождение оптимального значения τ_T^{**} выполнялось итерационным путём в соответствие с методом хорд (см. (3.10 – 3.12)) и начальным приближением $\tau_T^{\Pi} = 0,597 \cdot 10^{-4}$ с. Расчёты показали, что итерационный процесс надёжно сходится за семь-десять итераций (Рисунок 3.19).

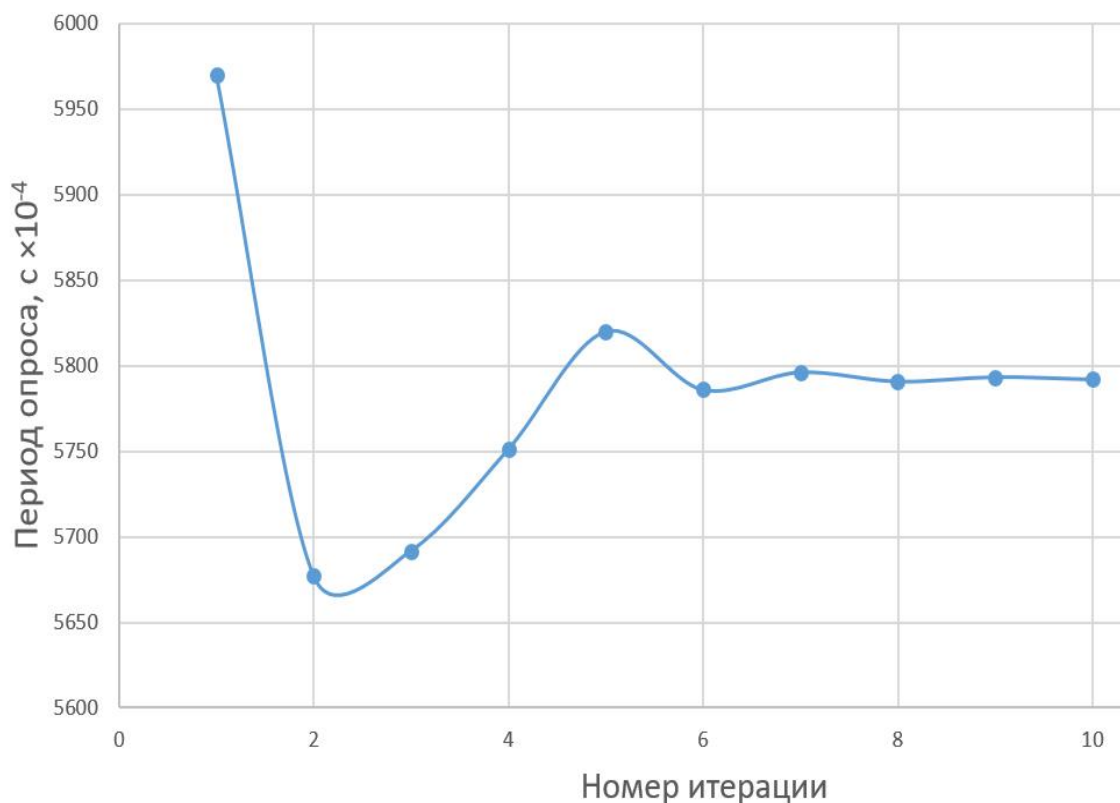


Рисунок 3.19 – График итерационного процесса

Во втором варианте для каждой вариации нахождение оптимального значения τ_T^{**} выполнялось прямым решением по известной формуле

$$\tau_T^{**} = -b/2a,$$

где a, b – найденные ранее коэффициенты полинома $a\tau_T^{**2} + b\tau_T^{**} + c$.

Результаты оценки эффективности разработанной методики представлены в Таблице 4.

Таблица 4 - Оценка эффективности методики коррекции смаза

№ Вар.	τ^{**} , 10^{-4} с	τ_T^* , 10^{-4} с	$\Delta_A^{**}(\tau_T)$, 10^{-4} с	$\Delta_O^{**}(\tau_T)$, %	Начальный уровень смаза, число пикселей	Остаточный уровень смаза, число пикселей
1	0,57969	0,579	0,00069	0,12	4,0	0,15
2.1	0,575212		0,003788	0,66	4,0	0,85
2.2	0,577526		0,001474	0,25	3,0	0,32
2.3	0,579139		0,000139	0,02	2,0	0,03
2.4	0,579524		0,000524	0,09	2,0	0,12
2.5	0,579066		0,000066	0,01	4,0	0,02
2.6	0,580697		0,001697	0,3	4,0	0,4
2.7	0,580011		0,001011	0,17	4,0	0,22

Анализ графиков на Рисунках 3.11 - 3.19 и данных Таблицы 4 позволяет отметить следующее.

1. Использование в качестве ПДА нормированной разности сигналов изображений обеспечивает аппроксимированной дисперсии квазипараболический вид и единственный максимум при минимуме трёх включённых в обработку выборок изображений независимо от типа инфраструктуры подстилающей поверхности.

2. Наибольшая точность аппроксимации дисперсии и нахождения оптимального значения периода опроса матриц ПЗС достигается при симметричном расположении крайних выборок изображений друг относительно друга внутри интервала гарантированного решения независимо от их количества.

3. Разработанная методика коррекции смаза в ОЭСС на борту КА инвариантна к уровню начального смаза и инфраструктуре подстилающей поверхности, обеспечивая при минимуме трёх включённых в обработку выборок изображений коррекцию смаза до десятых долей пикселя при ассиметричном и до сотых долей пикселя – при симметричном расположении выборок изображений друг относительно друга внутри интервала гарантированного решения.

3.5 Практические рекомендации по реализации разработанной методики коррекции смаза на борту космического аппарата

Анализ сути изложенных выше процедур позволяет выделить два условных контура обработки сигналов изображений, а именно, предварительной и окончательной обработки. Под предварительной обработкой понимаются операции расчёта нормированной разности сигналов изображений строк и вычисление их дисперсий каждой выборки. Окончательная обработка включает в себя процедуры аппроксимации найденных значений дисперсий всех выборок и нахождения оптимального значения периода опроса матриц ПЗС. Учитывая изложенное, под оперативностью предварительной обработки будем понимать длительность \mathfrak{A}_t^P расчёта нормированной разности $\wp_{k,p}^{(j)} = (W_{k+1,p}^{(j)} - W_{k,p}^{(j)}) / (W_{k,p+1}^{(j)} - W_{k,p}^{(j)})$ смежных пар пикселей соседних строк в j -й выборке изображений плюс длительность \mathfrak{A}_t^D вычисления её дисперсии $D^{(j)}(\tau_T^{(j)})$, а на этапе окончательной обработки – быстроедействие $\mathfrak{A}_t^A(j)$ аппроксимации найденных дисперсий всех выборок $\{D^{(j)}(\tau_T^{(j)}) | j = \overline{1, J}\}$ и времени \mathfrak{A}_t^* определения оптимального значения τ_T^{**} внутри ИГР.

Очевидно, что вычисление нормированной разности $\wp_{k,p}^{(j)} = (W_{k+1,p}^{(j)} - W_{k,p}^{(j)}) / (W_{k,p+1}^{(j)} - W_{k,p}^{(j)})$ в строках $k, k + 1$ может происходить в промежутки времени формирования сигналов изображений следующей за ними пары строк. Этот промежуток времени составляет $2 \cdot \tau_T^{(1)}$ с. При этом значение

дисперсии первой выборки рассчитывается в промежуток времен формирования первой пары строк второй выборки, составляющий $2 \cdot \tau_T^{(2)}$ с. Оценки оперативности предварительной обработки восьми условных кадров приведены в Таблице 5.

Таблица 5 - Длительность предварительной обработки сигналов

Порядковые номера условных кадров	\mathcal{U}_t^P одной пары смежных строк, 10^{-4} с	Средняя \mathcal{U}_t^P , 10^{-4} с	Средняя \mathcal{U}_t^D одной выборки, 10^{-4} с	$\mathcal{U}_t^P + \mathcal{U}_t^D$, 10^{-4} с
1	0.0032	0,0033	0,0686	0,0719
2	0.0031			
3	0.0031			
4	0,0031			
6	0,0029			
7	0,0034			
8	0,0048			
9	0,0031			

Сравнение значений $2 \cdot \tau_T^{(j)}$ всех восьми условных кадров в светлой и тёмной зонах (см. Таблицу 2) и представленных в Таблице 5 значений $\mathcal{U}_t^P + \mathcal{U}_t^D$ показывает, что для предварительной обработки одной пары соседних строк изображения требуется среднее время $0,0033 \times 10^{-4}$ с, которое на два порядка меньше значения $2 \cdot \tau_T^{(9)} = 2 \cdot 0,597 \times 10^{-4}$ с, которое соответствует девятой выборке в светлой зоне, имеющей наибольшую величину периода опроса.

Окончательная обработка начинается в момент времени, соответствующий окончанию процесса формирования последней строки последней выборки. Начиная с этого момента из найденных в процессе предварительной обработки восьми значений дисперсий изображений выбирается требуемое число и выполняется их аппроксимация, а затем нахождение оптимального времени τ_T^* .

Окончательная обработка протекает в промежуток времени формирования первой пары смежных строк, следующих за последней строкой последней

выборки, причём эти две строки формируются при значении тактового периода опроса, соответствующего последней выборке. Полученные в результате экспериментальных исследований оценки быстродействия аппроксимации и поиска экстремума представлены в Таблице 6.

Таблица 6 - Длительность окончательной обработки

$\mathfrak{A}_t^A,$ $c \times 10^{-4}$	$\mathfrak{A}_t^*,$ $c \times 10^{-4}$	$\mathfrak{A}_t^A + \mathfrak{A}_t^*,$ $c \times 10^{-4}$
0,47	0,23	0,7

Общее время \mathfrak{A}_t , характеризующее оперативность рассматриваемой методики коррекции смаза на борту КА, включает в себя длительность предварительной и окончательной обработки всех выборок изображений и составляет величину

$$\mathfrak{A}_t = (0,0719 + 0,7) \times 10^{-4}c = 0,7719 \times 10^{-4}c .$$

Сравнение величины \mathfrak{A}_t с удвоенным временем периода опроса матриц ПЗС последней выборки $2 \cdot \tau_T^{(9)} = 1,194 \times 10^{-4}c$ показывает, что она на 30% меньше. Это означает, что на последнем шаге длительность коррекции смаза укладывается в промежуток времени, необходимый для формирования первой пары смежных строк, следующих за последней строкой последней выборки. После все остальные строки маршрута съёмки формируются уже с найденным оптимальным периодом опроса матриц ПЗС.

Таким образом, можно сделать два основных вывода:

- процедуры коррекции смаза могут выполняться на борту КА параллельно процессу съёмки;
- длительность этих процедур определяется общим числом строк, полученных на интервале гарантированного решения выборок изображений, а именно:

$$\mathfrak{A}_t = (M + K_1) \cdot \tau_T^{(1)} + \dots + K_{J-1} \cdot \tau_T^{(J-1)} + K_J \cdot \tau_T^{(J)} + 2 \cdot \tau_T^{(J)} .$$

Учитывая изложенное, можно утверждать, что разработанная методика коррекции смаза на борту КА влияет только на объём калибровочного материала.

В этой связи рассмотрим рекомендации по нахождению оптимальных значений ширины ИГР, числа обрабатываемых выборок и количества строк в этих выборках.

В качестве исходных данных для решения задачи уменьшения ширины ИГР выступает величина программного значения $\tau_T^П$ тактового периода опроса матриц ПЗС, определяемая на момент включения ОЭСС. Если известен прогнозируемый уровень смаза по результатам предыдущих включений, то он также должен использоваться для оптимизации ширины ИГР.

Решение задачи включает в себя определение таких значений τ_T^A и τ_T^B крайних выборок А и Б ИГР, которые находятся соответственно в светлой и тёмной зоне, обеспечивая тем самым гарантированное нахождение оптимального времени τ_T^* тактового периода опроса матриц ПЗС внутри ИГР. И при этом величина ИГР должна быть минимальной. Тогда имеем следующие условия:

$$\begin{cases} \tau_T^B < \tau_T^* < \tau_T^A. \\ |\Delta\tau_T^П(\delta)| = |\tau_T^A - \tau_T^B| \rightarrow \min. \end{cases} \quad (3.16)$$

Пусть имеет место смаз, уровень которого больше допустимого, и значение $\tau_T^П$ находится в светлой зоне. Тогда $\tau_T^A = \tau_T^П$ и необходимо найти такое значение τ_T^B , которое находится в тёмной зоне (Рисунок 3.20) и отвечает условиям (3.16).

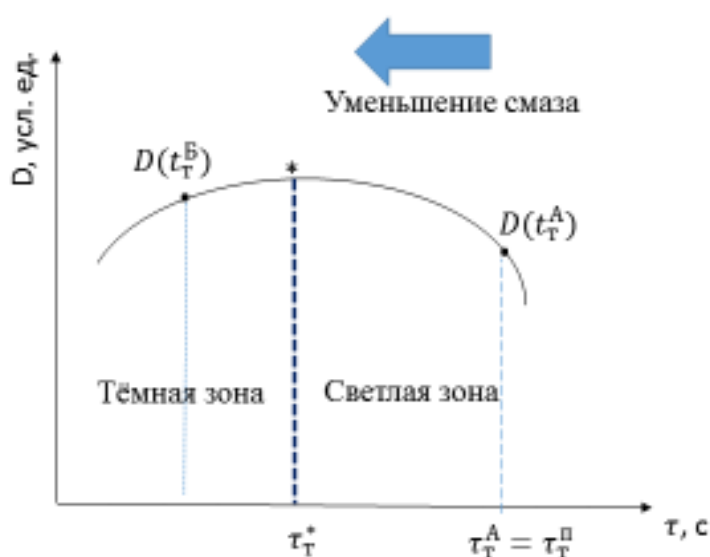


Рисунок 3.20 – Выбор ИГР

Ниже представлены практические рекомендации по формированию числа строк в выборках на ИГР, отвечающие условиям (3.16). Они основаны на параметрических моделях (1.11) – (1.17) и приведенных выше данных экспериментальных исследований.

Модель (1.17) устанавливает, что при изменении уровня смаза величина изменения значения $\tau_T^П(\delta)$ будет равна $M/M \pm \delta$, что при $\delta = 1$ составит 1%.

Данные в Таблице 2-3 подтверждают, что величина ИГР пропорциональна уровню смаза и значению $\tau_T^П(\delta)$.

При этом разницы смежных значений $|\tau_T^П(\delta = 1) - |\tau_T^П(\delta = 2)|, \dots, ||\tau_T^П(\delta = 3) - |\tau_T^П(\delta = 4)|$ тактовых периодов опроса матриц ПЗС и изменения соответствующих им уровней смаза в первом приближении подчиняются следующей закономерности:

уменьшение (увеличение) текущего значения $\tau_T^П(\delta)$ в светлой (тёмной) зоне на 1% приводит к уменьшению (увеличению) уровня смаза в среднем на один пиксель, и, наоборот.

Отсюда вытекают практические рекомендации по выбору диапазона изменения значения $\tau_T^А(\delta)$ для его позиционирования в светлой или тёмной зоне, и по нахождению значения $\tau_T^В(\delta)$, обеспечивающего формирование оптимального значения ИГР.

В первом случае можно утверждать, что оптимальный диапазон изменения значения $\tau_T^А(\delta)$ составляет не более (1-2) % от значения $\tau_T^А(\delta)$, а во втором случае следует руководствоваться следующим правилом:

если программное (первоначальное) значение $\tau_T^П(\delta) = \tau_T^А$ находится в светлой (тёмной) зоне и уровень смаза составляет δ пикселей, то для нахождения значения $\tau_T^В(\delta)$, обеспечивающего создание ИГР, необходимо и достаточно уменьшить (увеличить) значение $\tau_T^А$ на δ %, т.е. справедливо следующее эмпирическое соотношение:

$$\tau_T^B(\delta) = \tau_T^A \cdot \varrho, \quad (3.17)$$

$$\text{где } \varrho = \begin{cases} \varrho_c = 1 - \frac{\delta}{100}, & \text{если } \tau_T^A \text{ находится в светлой зоне;} \\ \varrho_T = 1 + \frac{\delta}{100} & \text{если } \tau_T^A \text{ находится в тёмной зоне.} \end{cases}$$

Например, если $\delta = 5$ в светлой зоне, значит $\varrho = 1 - \frac{\delta}{100} = 0,95$.

Следует отметить, что, несмотря на результаты экспериментальных исследований, теоретически возможно существование инфраструктуры местности, при которой используемый ПДА не сможет обеспечить необходимого уровня связи с возникающим смазом формирующегося изображения. Для исключения из обработки таких участков, на этапе планирования могут быть использованы временные снимки данной местности, на основе которых может быть смоделирован смаз различной величины в диапазоне возможного его возникновения, и затем проанализировано качество работы ПДА. Участки местности, которые имеют инфраструктуру, не позволяющую выявить смаз, исключаются из обработки в процессе работы методики коррекции смаза на борту КА.

Рекомендации по числу и формату обрабатываемых выборок, а также количеству строк в этих выборках при уровне смаза, не превышающим десяти пикселей, заключаются в следующем.

Процедура позиционирования программного значения $\tau_T^H(\delta) = \tau_T^{(1)}(\delta)$ в светлой или тёмной зоне может быть выполнена путём обработки двух выборок с числом строк, равным 50. Пусть $\tau_T^H(\delta)$ находится в светлой зоне. Тогда при уменьшении значения $\tau_T^{(2)}(\delta)$ для второй выборки на 1% относительно значения $\tau_T^{(1)}(\delta) = \tau_T^H(\delta)$ будет выполняться условие $D^{(2)} - D^{(1)} > 0$. В этом случае $\tau_T^A(\delta) = \tau_T^{(1)}(\delta)$, а процедура нахождения края $\tau_T^B(\delta)$ ИГР в тёмной зоне потребует получение ещё двух выборок (третьей и четвёртой) с пятьюдесятью строками. При этом третья формируется со значением $\tau_T^{(3)}(\delta)$, которое на 10% меньше значения $\tau_T^{(2)}(\delta)$, а четвёртая – со значением $\tau_T^{(4)}(\delta) = 1,01 \cdot \tau_T^{(3)}(\delta)$. После этого в обработку включают три выборки сигналов изображений $\tau_T^A(\delta) =$

$\tau_T^{(1)}(\delta)$, $\tau_T^{(2)}(\delta)$ и $\tau_T^B(\delta) = \tau_T^{(4)}(\delta)$ и находят оптимальное значение τ_T^* . Дальнейшая съёмка происходит с этим найденным значением тактового периода опроса матриц ПЗС.

Таким образом, задача коррекции смаза изображений, содержащих различные типы инфраструктуры подстилающей поверхности, достаточно эффективно решается по результатам дисперсионного анализа нормированных разностей сигналов минимум трёх выборок изображений, каждая из которых содержит не более 50 строк. Для реализации разработанной методики коррекции смаза в ОЭСС на борту КА потребуется обработка параллельно процессу съёмки не более 200 первых строк маршрута съёмки. При этом уровень остаточного смаза составит величину, не превышающую десятых долей пикселя.

ВЫВОДЫ

1. Методика коррекции смаза космических изображений в оптико-электронной сканирующей системе на борту КА включает в себя три этапа: формирование выборок строк и дисперсионный анализ сигналов изображений подстилающей поверхности; аппроксимация выборочных дисперсий сигналов изображений и нахождение оптимальных значений тактовых периодов опроса матриц ПЗС.

Сущность первого этапа разработанной методики коррекции смаза на борту КА заключается в формировании выборок изображений подстилающей поверхности, полученных при различных значениях тактовых периодов опроса матриц ПЗС, и дисперсионном анализе ПДА сигналов изображений этих строк. При этом подразумевается, что временной интервал гарантировано содержит оптимальное значение периода опроса матриц ПЗС, при котором уровень смаза минимален, а значения дисперсий достигают максимума.

2. На втором этапе выполняется аппроксимация функции дисперсии по найденным значениям дисперсий выборок. При этом, если число выборок больше трёх, аппроксимация производится алгебраическим многочленом, а если равно трём, то – полиномом второй степени.

На третьем этапе решается задача нахождения таких значений тактового периода опроса матриц ПЗС, при котором функция дисперсии достигает максимума. Эта задача в первом варианте числа обрабатываемых выборок решается итерационным путём в соответствие с методом хорд, а во втором – прямым вычислением по известным формулам нахождения экстремума параболы. При этом в первом случае итерационный процесс надёжно сходится за семь-десять итераций.

3. Для проверки эффективности разработанной методики и вариантов её реализации были проведены экспериментальные исследования с использованием различного числа выборок реальных данных в процессе съёмки и степени аппроксимирующих полиномов, требующейся для получения аналитического вида функций дисперсии. Также была выполнена оценка степени влияния инфраструктуры подстилающей поверхности на получение оптимальных значений тактовых периодов опроса матриц ПЗС и ряда других факторов.

Полученные результаты экспериментальных исследований позволили сделать следующие выводы. Задача коррекции смаза изображений, содержащих различные типы инфраструктуры подстилающей поверхности, достаточно эффективно решается по результатам дисперсионного анализа нормированных разностей сигналов минимум трёх выборок изображений, каждая из которых содержит не более 50 строк.

Для реализации разработанной методики коррекции смаза в ОЭСС на борту КА потребуется обработка параллельно процессу съёмки не более 200 первых строк маршрута съёмки. При этом уровень остаточного смаза составит величину, не превышающую десятых долей пикселя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итогом диссертационной работы является разработка новой методики коррекции смаза в ОЭСС на борту КА, основанной на оптимизации значения тактовой частоты опроса матриц ПЗС в процессе съёмки. В отличие от известных методика не требует доработки существующего бортового оборудования, инвариантна к инфраструктуре подстилающей поверхности, реализуется параллельно процессу съёмки и использует для оптимизации тактовой частоты опроса матриц ПЗС КА не более двухсот начальных строк маршрута съёмки.

В результате выполненных диссертационных исследований получены следующие **результаты**:

1. Разработана новая методика коррекции смаза в ОЭСС на борту КА, основанная на выявленных и неизвестных ранее закономерностях влияния частоты опроса матриц ПЗС на распределение сигналов сканерного изображения, а также проведены экспериментальные исследования на основе реальных данных космической съёмки, которые подтвердили эффективность данной методики;

2. Разработана модель формирования тактовых периодов опроса матриц ПЗС, отличающаяся наиболее полным математическим описанием координатно-временных особенностей формирования многозональной структуры сигналов изображения на интервале съёмки.

3. Впервые разработаны параметрические модели, устанавливающие в ОЭСС функциональные взаимосвязи между уровнем смаза, параметрами съёмки и погрешностями их определения, расширяющие инструментарий прогнозирования, оценки и моделирования уровня смаза в ОЭСС.

Основываясь на результатах проделанной работы, можно сделать следующие выводы:

- новая методика обеспечивает в реальном масштабе времени коррекцию смаза в ОЭСС на борту КА без доработок существующего бортового оборудования и не требует использования мощных вычислительных ресурсов,

что позволяет сделать ещё один технологический шаг к организации полномасштабной фотограмметрической обработки формирующихся изображений на борту КА;

- модель формирования тактовых периодов опроса матриц ПЗС, учитывающая многополосную структуру видеоданных в ОЭСС, обеспечивает более точный расчёт скорости движения изображения на момент включения ОЭСС и может использоваться на этапе планирования съёмки вместо существующих моделей, что даст возможность существенно уменьшить область итерационного определения оптимального значения тактового периода опроса матриц ПЗС при решении задачи коррекции смаза.

Рекомендации и перспективы дальнейшего развития темы.

Основные теоретические и практические результаты работы требуют дальнейшего развития в части натуральных экспериментальных исследований с реальной видеоинформацией, получаемой различными типами космических съёмочных систем на матрицах ПЗС при различных комбинациях инфраструктуры подстилающей поверхности и форматов, используемых видеоданных.

Дальнейшее совершенствование предложенной методики открывает новые направления в части полной автоматизации процессов фотограмметрической обработки формирующихся изображений на борту КА.

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

БВК	бортовой вычислительный комплекс
БПФ	быстрое преобразование Фурье
ВЗН	временная задержка и накопление
ГИС	геоинформационная система
ДЗЗ	дистанционное зондирование Земли
ЗП	зарядовые пакеты
ИГР	интервал гарантированного решения
ИС	информационная система
КА	космический аппарат
КК	космический комплекс
ЛВ	линия визирования
МС	маршрут съёмки
МИ	маршрут изображения
ОЗ	опорное значение
ОЗЭ	общий земной эллипсоид
ОЭП	оптико-электронный преобразователь
ОЭСС	оптико-электронная сканирующая система
ПДА	параметр дисперсионного анализа
ПЗС	приборы с зарядовой связью
ПК	программный комплекс
РЭ	референц – эллипсоид
СДИ	скорость движения изображения
СР	считывающий регистр
СЛАУ	система линейных алгебраических уравнений
ГСНС	спутниковая навигационная система
ФПС	фотоприёмная структура
ФП	фокальная плоскость
ФРТ	функция рассеивания точки

ЦЛВ	центральная линия визирования
ЦМР	цифровая модель рельефа
ЭВО	элементы внешнего ориентирования
ЭМС	электромагнитный спектр
ЭЩ	экспонирующая щель

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Батраков А.С. Прогнозирование скорости сдвига оптического изображения при съёмке земной поверхности / Исследование Земли из космоса. 1984. №1. С. 99-106.
2. Батраков, А.С. Общая модель для расчета и анализа скорости сдвига оптического изображения при съемке земной поверхности / А.С. Батраков // Исследование Земли из космоса. 1989. № 4. С. 54-58.
3. Анатольев А.Ю. Оценка информационных возможностей космических оптико-электронных систем дистанционного зондирования / А.Ю. Анатольев, А.С. Батраков, А.М. Федина // Оптический журнал. 2000. №7. С.12-18.
4. Бутырин С.А. Синтез маршрута космического аппарата наблюдения Земли с выравниванием продольной составляющей скорости движения изображения / Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2005. – Вып. 37. – С. 128-134.
5. Бутырин С.А. Кинематический синтез программного углового движения космического аппарата при оптико-электронной съемке Земли / Известия Самарского научного центра РАН. – 2007. – Т.9.- С.664-670.
6. Бутырин С. А., Бутко А. В. Оптимизация сканирующей оптико-электронной съемки Земли из космоса / Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2008. - № 2. – С. 68-72.
7. Бутырин С.А. Синтез маршрутного движения космического аппарата при оптико-электронной съемке земли с перемещением по геодезической линии / Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. технические науки. - 2007. - № 1. - С.12-16.
8. Петрищев В.Ф. Способ компенсации поперечных методических сдвигов изображения в оптико-электронных системах дистанционного зондирования Земли /Сб. научно-технических статей по ракетно-космической тематике. Самара: ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». 1999. С.157-165.

9. Петрищев В.Ф. Программа сканирования земной поверхности, минимизирующая продольные и поперечные методические сдвиги оптического изображения/Сб. научных трудов ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». Вып.3. Самара: 2004. С.9-19.

10. Петрищев В.Ф. Оптимальная программа сканирования оптико-электронного телескопического комплекса дистанционного зондирования Земли / Труды международной академии информатизации. Отделение микроэлектроники и информатики. М.: Зеленоград. 2003. С 20-38.

11. Петрищев В.Ф. Оптимальная программа сканирования оптико-электронного телескопического комплекса дистанционного зондирования Земли. Случай эллиптической орбиты и сферической вращающейся Земли / Труды международной академии информатизации. Отделение микроэлектроники и информатики. М.: Зеленоград. 2003. С 101-122.

12. Петрищев В.Ф. Оптимальная программа сканирования оптико-электронного телескопического комплекса дистанционного зондирования Земли для общего случая расположения оптико-электронного преобразователя в фокальной плоскости объектива / Сб. трудов XI Всероссийского научно-технического семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов международной академии информатизации. Отделение микроэлектроники и информатики. Самара. 2003. С 149--156.

13. Петрищев В.Ф. Оптимальное сканирование космическим аппаратом поверхности земли: учеб. Пособие / Самара. Гос.аэрокосм.у-т. 2007.96 с.

14. А.Н. Кирилин, Г.П. Аншаков, Р.Н. Ахметов, Д.А. Сторож. Под ред. А.Н. Кирилина. Космическое аппаратостроение: Научно-технические исследования и практические разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» / Под ред. д.т.н. А.Н. Кирилина. – Самара: Издательский дом «АГНИ». 2011. 280с.

15. Андронов, В.Г. Состояние и тенденции развития методов и средств ДЗЗ / В.Г. Андронов, Мордавченко Т.В. //Актуальные проблемы инфокоммуникаций: материалы II Региональной науч.-практ. конф. Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2010. С.47-50.

16. Андронов, В.Г. Моделирование космических сканерных изображений высокого разрешения: методы, модели, технологии. Монография / В.Г. Андронов. – Saarbrücken (Germany): LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2014. – 290 с.

17. Андронов, В.Г. Теоретические основы геоорбитального моделирования космических сканерных изображений высокого разрешения: монография / В.Г. Андронов; Юго-Зап.гос.ун-т, Курск, 2012. 260 с.

18. Андронов, В.Г. Организация процессов разработки и формирования ортогеокодированных данных космической сканерной съёмки обширных территорий / В.Г. Андронов // Фотограмметрия –вчера, сегодня, завтра: тез. докладов Международной науч.-техн. конф. М: МИИГАиК. 2010. С.23-25.

19. Андронов, В.Г. Геокодирование маршрутов космической оптико-электронной съёмки с программным угловым движением КА / В.Г. Андронов, И.А. Клочков // Перспективы развития информационных технологий: сб. материалов III Международной науч.-практ. конф. Новосибирск, ЦРНС. ч.1. 2011. С. 13-18.

20. Андронов В.Г. Ортогеокодирование космических сканерных изображений в заданной картографической проекции /В.Г. Андронов, И.А. Клочков, Е.В. Лазарева // Изв.вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка . №3.-2010. С.47-50.

21. Андронов, В.Г. Формирование угловых параметров космической сканерной съёмки в режимах трёхосного программного управления осью визирования КА / В.Г. Андронов, И.А. Клочков, Т.В. Мордавченко // Изв.вузов. сер. Геодезия и аэрофотосъёмка . 2010. №6. С.43-47.

22. Андронов, В.Г. Общая постановка и решение прямой фотограмметрической задачи для моноскопических космических изображений / В.Г. Андронов, И.А. Клочков, Е.В. Лазарева // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. № 4. Т.7. С.33-36.

23. Горелов, В.А., Лукашевич, Е.Л., Стрельцов, В.А. Космические системы детального наблюдения Земли [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://Ioi.sccc.ru/gis/RS/GOSCENTR.html>.

24. Горелов, В.А., Лукашевич, Е.Л., Стрельцов, В.А. Состояние и тенденции развития космических средств дистанционного зондирования высокого разрешения [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gisa.ru/file/file103.doc>.

25. Горелов, В.А., Лукашевич, Е.Л., Стрельцов, В.А. Состояние и тенденции развития космических средств дистанционного зондирования высокого разрешения // ГИС-Ассоциация, Информационный бюллетень, 2002, № 4(36), с. 6-11.

26. Горелов, В.А., Лукашевич, Е.Л., Стрельцов, В.А. Состояние и тенденции развития космических средств дистанционного зондирования высокого разрешения // ГИС-Ассоциация, Информационный бюллетень, 2002, № 5 (37), с. 7-12, 43-45.

27. Горелов, В.А., Лукашевич, Е.Л., Стрельцов, В.А. Состояние и тенденции развития космических средств дистанционного зондирования высокого разрешения // ГИС-ассоциация, Информационный бюллетень, 2003, № 1(38) — 2 (39), с. 6-10, 44-45.

28. Гречищев, А.В., Лихачев, Ю.А. Космические системы дистанционного зондирования Земли // Ежегодный, обзор. Вып. 4 (1998). М.: ГИС-Ассоциация, 1999. С. 83-92.

29. Гарбук, С.В. Космические системы дистанционного зондирования Земли [Текст] / С.В. Гарбук, В.Е. Гершензон. М.: Издательство «А и Б», 1997. 296 с.

30. Инженерно-технологический центр «СКАНЭКС» [Электронный ресурс] / М.: Инженерно-технологический центр «СКАНЭКС», 2005-2009. [Электронный ресурс] <http://www.scanex.ru/>, свободный доступ.

31. Институт Космических Исследований/ Институт Космических Исследований РАН. Электрон, дан. М.: Институт Космических Исследований

РАН, 2009 [Электронный ресурс] <http://www.iki.rssi.ru/index.htm>, свободный доступ.

32. Кузнецов П. К., Семавин В. И., Солодуха А. А. Методика уменьшения смаза изображения, получаемого при съемке земли из космоса / Труды II Всероссийской научной конференции «Моделирование и оптимизация динамических систем и систем с распределенными параметрами, математические модели в информационных технологиях, математическое моделирование и краевые задачи // Самарский государственный технический университет. 2005. Часть 2. С.153–156.

33. Кузнецов П.К., Семавин В.И. Солодуха А.А. Алгоритм компенсации скорости смаза изображения подстилающей поверхности, получаемого при наблюдении Земли из космоса // Вестник Сам. ГТУ, 2005. №37. С. 150-157.

34. Кузнецов П.К, Семавин В.И. Модели и методы построения нелинейных адаптивных систем идентификации движения яркостных полей / Управление и информационные технологии: Сб. докл. Всерос. науч. конф. С.Петербург, 2003. Т. 2. С. 55-60.

35. Кузнецов П. К. Восстановление статистических характеристик изображения по смазанному изображению / Е. Ю. Чекотило, П. К. Кузнецов // Матем. моделирование и краев. задачи. 2006, часть 4, с. 107–109.

36. Петри, Г. Российский спутник «Ресурс-ДК1»: альтернативный источник данных сверхвысокого разрешения / Г. Петри // Геоматика. 2010. №4. С.38-42.

37. Кирилин, А.Н., Ахметов, Р. Н., Стратилатов, Н.Р. Космический аппарат «Ресурс-П» / А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, Н.Р. Стратилатов // Геоматика. 2010. №4. С.23-27.

38. Егошкин Н.А. Коррекция смаза и расфокусировки спутниковых изображений с учетом геометрических искажений. Цифровая обработка сигналов. №3. 2016. С.37-41.

39. Еремеев В.В., Егошкин Н.А. Коррекция смаза изображений в системах космического наблюдения Земли / Цифровая обработка сигналов. 2010. №4. С. 28-33.
40. Пресс Ф. П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. М.: Радио и связь, 1991. 264 с.
41. Грузман И.С., Киричук В.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учебное пособие. - Новосибирск: НГТУ. 2002. 352 с.
42. Еремеев В.В., Злобин В.К. Обработка аэрокосмических изображений. М.: Физматлит. 2006. 406 с.
43. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / Под. ред. В.В. Еремеева. М.: Физматлит. 2015. 460 с.
44. Schowengerdt R.A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. Academic Press. 2007. 558 p.
45. Storey J.C. Landsat 7 on orbit modulation transferfunction estimation // Proceedings of the SPIE, 2001.Vol. 4540. pp. 50-61.
46. Xin M., Shuyan X., Guangxin L. Remote sensing imagerestoration with modulation transfer function compensation technology in-orbit // Proceedings of SPIE, 2013.Vol. 8768.
47. Eunsong O., Ki-Beom A., Seongick C., Joo-Hyung R. A modulation transfer function compensation for the geostationary ocean color imager based on the wiener filter // Journal of Astronomy and Space Sciences, 2013. Vol. 30, issue 4. pp. 321-326.
48. Воронин А.А, Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москатиньев И.В. Геометрическая обработка данных космических систем глобального наблюдения земли // Вестник РГРТУ, 2009. №1. С. 12-17.
49. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э. Комплексирование изображений от линеек фотоприёмников в условиях геометрических искажений // Цифровая обработка сигналов, 2012. №3. – С.40 - 44.
50. Pratt W.K. Digital Image Processing. Hoboken, New Jersey, 2007. 807pp.

51. Jeon B, Kim H., Chang Y. A MTF compensation for satellite image using curve-based modified Wiener filter // *Korean Journal of Remote Sensing*, 2012. Vol 28, pp. 561-571.
52. Mallat S. A. *Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press, 1998. 550p.
53. Donoho D.L. Nonlinear solution of linear inverse problems by Wavelet-Vaguellete Decomposition // *Appl. Comp. Harm. An.*, 1995. Vol. 2, pp. 101-126.
54. Neelamani R., Choi H., Baraniuk R. Wavelet-based deconvolution for ill-conditioned systems // *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999.
55. Ljung L. *System Identification. Theory for the User*. PTR Prentice Hall, Upper Saddle River, 1999. 609 p.
56. Гомозов О.А. Алгоритм и технология обработки информации от КА «Ресурс-ДК» / О.А. Гомозов, В.В. Еремеев, А.Е. Кузнецов и др. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. ИКИ РАН. 2008. Т.1. Выпуск 5. С. 69-76.
57. Блохинов Ю.Б., Чернявский А.С. Алгоритмы и результаты моделирования процессов обнаружения и распознавания трёхмерных сцен / Труды юбилейной всероссийской научно-технической конференции «Моделирование авиационных систем». Москва. С.128-134.
58. Блохинов Ю.Б. Гнилицкий В.В., Инсаров В.В., Чернявский А.С. Алгоритм анализа и принятия решений в задаче селекции объектов на изображениях наземных сцен / Труды научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления наземными объектами». Серия механика, управление и информатика. Под ред. Р.Р. Назирова. Таруса, 2010. С.92-109.
59. Смирнов П.В., Царев М.Г. Выделение по последовательности изображений движущегося объекта с компенсацией эффекта смаза. Тезисы III Всероссийской научно-технической конференции «Теоретические и практические аспекты развития отечественного авиастроения» / Ульяновский гос. техн. ун-т, 2014. С.123-125.

60. Кобер В.И., Карнаухов В.Н. Восстановление мультиспектральных изображений, искаженных пространственно-неоднородным движением камеры / Информационные процессы. 2015. Том 15. № 2. С. 269–277.
61. Jain A.K. Fundamentals of digital image processing, Prentice Hall, NY, USA, 1989.
62. Biemond J., Lagendijk R.L., Mersereau R.M. Iterative methods for image deblurring. Proceedings of the IEEE, 1990, vol. 78, No. 5, pp. 856–883.
63. Banham M., Katsaggelos A. Digital image restoration. IEEE Signal Processing Magazine, 1997, vol. 14, No. 2, pp. 24–41.
64. Sroubek F., Flusser J. Multichannel blind iterative image restoration. Multichannel blind iterative image restoration, 2003, vol. 12, No. 9, pp. 1094–1106.
65. Sawchuk A.A., Huang T. and Xu B. Space-variant image restoration by coordinate transformations. Journal of the Optical Society of America, 1974, vol. 64, No. 2, pp. 138–144.
66. Chakrabarti A., Zickler T., Freeman W.T. Analyzing spatially-varying blur. Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2010, pp. 2512–2519.
67. Levin A., Weiss Y., Durand F., Freeman W.T. Understanding and evaluating blind deconvolution algorithms. Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2009, pp. 1964–1971.
68. Tai Y.-W., Tan P., Brown M.S. Richardson-Lucy deblurring for scenes under a projective motion path. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, vol. 33, No. 8, pp. 1603–1618.
69. Richardson W.H. Bayesian-based iterative method of image restoration. Journal of the Optical Society of America, 1972, vol. 62, No. 1, pp. 55–59.
70. Lucy L.B. An iterative technique for the rectification of observed distributions. Astronomical Journal, 1974, vol. 79, No. 6, pp. 745–754.
71. Yitzhaky Y., Kopeikai N.S. Identification of Blur Parameters from Motion Blurred Images. Graphical Models and Image Processing, 1997, vol. 59, No. 5, pp. 310–320.

72. Fergus R., Singh B., Hertzmann A., Roweis S. T., Freeman W. T. Removing camera shake from a single photograph. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, vol. 25, No. 3, pp. 787–794.
73. Shan Q., Jia J. and Agarwala A. High-quality motion deblurring from a single image. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, vol. 27, No. 3, Article 73, 10 pages.
74. Joshi N., Kang S.B., Zitnick C.L., Szeliski R. Image deblurring using inertial measurement sensors. *ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH*, 2010, vol. 29, No. 4, Article 30, 9 pages.
75. Whyte O., Sivic J., Zisserman A., Ponce J. Non-uniform Deblurring for Shaken Images. *International Journal on Computer Vision*, 2012, vol. 98, pp. 168–186.
76. Kober V., Cristobal G. Fast recursive algorithms for the short-time discrete cosine transform. *Electronics Letters*, 1999, vol. 35, No. 15, pp. 1236–1238.
77. Kober V. Fast algorithms for the computation of sliding discrete sinusoidal transforms. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, vol. 52, No. 6, pp. 1704–1710.
78. Hunt B. R., Kubler O. Karhunen-Loeve multispectral image restoration, Part I: Theory. *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, 1984, vol. ASSP-32, pp. 592–600.
79. Великанова Ю.Ю. Алгоритмы для одной задачи о нахождении максимума унимодальной функции в режиме online / Дискретный анализ и исследование операций. 2013. том 20, № 6. С. 16–29.
80. W. Bocker, W. Rolf, W. Muller, C. Streer. Investigations about autofocus-algorithms for uorescentmicroscopy. 1996. In *SPIE Applications of Digital Image Processing XIX*, volume 2847, pages 445-456, Denver, CO.
81. J. Cairns, K. Dickson, G. Lanza, S. Almeida, D. del Balzo. Coherent optical spatial ltering of diatoms in water pollution monitoring. 1972. *Archiv. Mikrobiol.* 83:141(146).
82. C. Field, M. Behrenfeld, J. Randerson, P. Falkowski. Primary

production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*. 1998. 281:237(240).

83. F. Groen, I. Young, G. Ligthard. A comparison of different focus functions for use in autofocus algorithms. 1985. *Cytometry*, 6:81(91).

84. E. Krotkov. Focusing. 1987. *Int. J. Comp. Vision*, 1:223(237).

85. S. K. Nayar, Y. Nakagawa. Shape from focus. *IEEE Trans. on Patt. Anal. and Machine Intell.* 1994.16(8):824(831).

86. J. Pech-Pacheco, J. Alvarez-Borrego. Opticaldigital system applied to the identve phytoplankton species. 1998. *Mar. Biol.*, 132:357(365).

87. O. Rockinger. Multiresolution-Verfahren zur fusion dynamischer bildfolgen. 1999. PhD thesis, Technischen Universitat Berlin.

88. M. Subarao, A. Nikzad. Focusing techniques. *Opt.Eng.*, 1993. 32 (11):2824(2836).

89. T. Yeo, S. Ong, Jayasooriah, R. Sinniah. Autofocusing for tissue microscopy. *Image and Vision Comp.* 1993.11(10):629(639).

90. Михайлов А.П., Чибуничев А.Г. Фотограмметрия: Учебник для вузов / Под общ. ред. А.Г. Чибуничева. - М.: Изд-во МИИГАиК, 2016. - 294 с.

91. Андронов, В.Г. Особенности формирования космических сканерных изображений линейками матриц ПЗС [Текст] / В.Г. Андронов, С.В. Дегтярёв, И. А. Клочков // Программируемые инфокоммуникационные технологии. Сборник статей / Под ред. В.В. Александрова, В.А. Сарычева. М.: Радиотехника. 2010. С.11-15.

92. Андронов, В.Г. Особенности формирования космических сканерных изображений линейками матриц ПЗС [Текст] / В.Г. Андронов, С.В. Дегтярёв, И. А. Клочков // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2010. Т.8. № 7. С.11-15.

93. Андронов, В.Г. Общая геоорбитальная модель космических сканерных изображений [Текст] / В.Г. Андронов, С.В. Дегтярёв, И.А. Клочков // Геоинформатика. №1. 2010. С.48-52.

94. Андронов, В.Г. Фотограмметрическая модель космических сканерных изображений [Текст] / В.Г. Андронов, И.А. Клочков // Изв. вузов, сер. Геодезия и аэрофотосъёмка. 2010. №2. С.56-63.

95. Андронов В.Г. Априорная оценка качества космической оптико-электронной съёмки / Известия ЮЗГУ, серия «Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение». №1, 2014 г., с.36-40.

96. Андронов В.Г. Технология априорной оценки качества космической оптико-электронной съёмки / Известия ЮЗГУ. №3(54). 2014. С.8-12.

97. Андронов, В.Г. Геокодирование маршрутов космической оптико-электронной съёмки с программным угловым движением КА [Текст] / В.Г. Андронов, И.А. Клочков // Перспективы развития информационных технологий: сб. материалов III Международной науч.-практ.конф. Новосибирск, ЦРНС. ч.1. 2011. С. 13-18.

98. Андронов, В.Г. Модель компенсации смаза космических сканерных изображений [Текст] / Оптическое изображение и регистрирующие среды: тез. докл. Всесоюз. конф. // В.Г. Андронов, А.Г. Погорянский, В.В. Позументчиков. Л.: ГОИ им. Вавилова, т.1. 1990. С. 118-123.

99. Андронов, В.Г. Модель формирования макетных сканерных изображений при поступательном и угловом движении съёмочной системы [Текст] / Оптическое изображение и регистрирующие среды: тез. докл. Всесоюз. конф. // В.Г. Андронов, А.Г. Погорянский, В.В. Позументчиков. Л.: ГОИ им. Вавилова, т.1. 1990. С. 112-117.

100. Андронов В.Г. Построение макетных снимков местности для оптико-электронных сканирующих систем / Изв. Вузов, сер. Геодезия и аэрофотосъёмка. №5. 2013. С.56-62.

101. Беллман Р. Введение в теорию матриц / Пер. С англ.; Под ред. В.Б. Лидского. - М.: Наука, 1976.

102. Кулешов С.В., Аксёнов А.Ю., Зайцева А.А. Подход к построению программно-определяемой камеры (обзор) / Научное приборостроение. 2016.Т.3.С.44-49.

103. Гладков А. П., Кузнецова Е. Г., Гладилин С. А., Грачева М. А. Адаптивная стабилизация яркости изображения в технической системе распознавания крупных движущихся объектов / Сенсорные системы. 2017. Т. 31. № 3. С. 247–260.

104. Статистические методы обработки результатов наблюдений. Учебник для вузов / Под редакцией Юсупова Р.М. // Министерство обороны СССР. 1984. 563 С.

105. Погорелов В.В., Шавук В.С. Анализ математических моделей при фотограмметрической обработке космических снимков. М. «Геодезия и картография», № 3, 2009.

106. Чекалин В.Ф., Некрасов В.В., Головин Ю.В. Orthospace 1.1 - новое программное обеспечение для обработки материалов дистанционного зондирования // Третья учебно-практическая конференция Проблемы ввода и обновления пространственной информации: Тез. докладов. - М., 1998. - с. 139-141.

107. Некрасов В.В. Повышение точности внешнего ориентирования стереомодели // Геодезия и картография. - 2001. - №11. - с.32-34.

108. Некрасов В.В. Совместное использование снимков различного разрешения для повышения точности внешнего ориентирования стереомодели // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. Московский государственный университет геодезии и картографии. - 2001. - №4. - с.98-102.

109. Шавук В.С. Теоретическое обоснование цифровой фотограмметрической системы обработки космических снимков высокого разрешения. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Москва. МИИГАиК.2008. 130 С.

110. Андронов, В.Г. Координатно-временная модель формирования космических сканерных изображений линейками матриц ПЗС [Текст] / В.Г. Андронов, С.В. Дегтярёв, Ю.Н. Волобуев // Изв. Вузов. Сер. Приборостроение. 2011. №.9. С. 83-85.

111. Андронов, В.Г. Формирование связки проектирующих лучей в космической оптико-электронной сканирующей системе [Текст] / В.Г. Андронов, Ю.Н. Волобуев, В.А. Заичко // Известия ЮЗГУ, серия «Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение», №1. 2013. С.15-20.

112. Андронов, В.Г. Геометрическая модель построения связки проектирующих лучей в оптико-электронной сканирующей системе [Текст] / Известия ЮЗГУ, серия «Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение». №1, 2013 г., с.242-245.

113. Волобуев, Ю.Н. Модель дрейфа связки проектирующих лучей в фокальной плоскости оптико-электронной сканирующей системы [Текст] / В.Г. Андронов, Ю.Н. Волобуев, В.А. Заичко // Известия ЮЗГУ, серия «Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение», №1, 2013 г., с.166-170.

114. Волобуев Ю. Н. Кинематическая модель углового движения связки проектирующих лучей в оптико-электронной сканирующей системе / В.Г. Андронов, Ю.Н. Волобуев // Известия ЮЗГУ. Сер. «Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение». 2012. Ч.3. №2. С.218-222.

115. Андронов, В.Г. Модель компенсации смаза космических сканерных изображений [Текст] / Оптическое изображение и регистрирующие среды: тез. докл. Всесоюз. конф. // В.Г. Андронов, А.Г. Погорянский, В.В. Позументчиков. Л.: ГОИ им. Вавилова, т.1. 1990. С. 118-123.

116. Андронов, В.Г. Общая модель скорости движения космических сканерных изображений в инерциальном пространстве /В.Г. Андронов, И.А. Клочков, Е.В. Лазарева [Текст] // Изв. вузов, сер. Геодезия и аэрофотосъемка. 2010. №4. С.58-61.

117. Волобуев Ю. Н. Методика определения расчётных значений скорости движения изображения в фокальной плоскости космических оптико-электронных телескопических комплексов / В.Г Андронов, Ю. Н. Волобуев //

Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы, тенденции развития; сб. науч. ст. по материалам I Всероссийской науч.-практ. конф. Курск, ЮЗГУ. 2017. Ч.1.С. 341-346.

118. Волобуев Ю.Н. Методика планирования и априорной оценки качества космической маршрутной оптико-электронной съёмки / В.Г. Андронов, Ю.Н. Волобуев // Современные концепции научных исследований; сб. научных работ IX Международной научно-практической конференции. Москва, 27-30. 12. 2014: Евразийский Союз Учёных (ЕСУ). – №9 (17). – Ч.11, 2014. – С.92 – 96.

119. Бахшиян Б. Ц., Федяев К. С. Основы космической баллистики и навигации: Курс лекций. М.: ИКИ РАН. Серия «Механика, управление и информатика». 2013. 119 с.

120. Бровкин А.Г., Бурдыгов Б.Г., Гордийко С.В. и др. Бортовые системы управления космическими аппаратами: Учебное пособие / Под редакцией А.С. Сырова – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. – 304с.

121. Матвеев В.В. Инерциальные навигационные системы: Учебное пособие. Изд-во ТулГУ. 2012.199 с.

122. Лебедев В.В., Гансвинд И.Н. Проектирование систем космического мониторинга/ Науч. геоинформ. центр РАН. – М.: Наука. 2010. 388 с.

123. Волобуев Ю. Н. Основные технические проблемы глобальной навигационной системы ГЛОНАСС / В.Г Андронов, Ю. Н. Волобуев, А.С. Шутяев // Защита информации и телекоммуникации: состояние, проблемы, тенденции развития; сб. науч. ст. по материалам II Всероссийской науч.-практ. конф. Курск, ЮЗГУ. 2015. С. 155-159.

124. Попов, В.М. Системы ориентации и стабилизации космических аппаратов [Текст] /В.М. Попов. М.: Машиностроение, 1986.

125. Каргу, А.И. Измерительные устройства летательных аппаратов [Текст] / А.И. Каргу. М.: Машиностроение, 1988. 255 с.

126. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор». 2009.

127. Соколов С.В., Погорелов В.А., Основы синтеза многоструктурных бесплатформенных инерциальных навигационных систем, М.: Физматлит, 2009.

128. Мелешко В.В., Нестеренко О.И., Бесплатформенные инерциальные навигационные системы, Кировоград: Полимед-Сервис. 2011.

129. Волобуев Ю.Н. Методика автоматической локализации объектов наблюдения на маршруте космической сканерной съёмки и алгоритм построения макетных сканерных снимков / В.Г. Андронов, Ю.Н. Волобуев // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2017. – №2(71). – С.60-71.

130. Пешехонов В.Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. 2011. N1 - С.3-16.

131. Волобуев Ю. Н. Построение замещающих моделей элементов внешнего ориентирования космических сканерных снимков в режиме с фиксированным азимутом съёмки [Текст] / Ю.Н. Волобуев, В.Г. Андронов // Инфокоммуникации и информационная безопасность: состояние, проблемы и пути решения; сб. науч. ст. по материалам III Всесоюзной науч.-практ. конф. Курск, ЮЗГУ. 2016. Ч.2. С.219-225.

132. Волобуев Ю. Н. Построение замещающих моделей элементов внешнего ориентирования космических сканерных снимков в режиме с изменяющимся азимутом съёмки [Текст] / Ю.Н. Волобуев, В.Г. Андронов // Инфокоммуникации и информационная безопасность: состояние, проблемы и пути решения; сб. науч. ст. по материалам III Всесоюзной науч.-практ. конференции. Курск, ЮЗГУ. 2016. Ч.2. С.206-213.

133. Волобуев Ю. Н. Коррекция смаза космических оптико-электронных изображений / В.Г Андронов, Ю. Н. Волобуев // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы, тенденции развития; сб. науч. ст. по материалам II Всероссийской науч.-практ. конф. Курск, ЮЗГУ. 2018. С. 350-353.

134. Ю.Н. Волобуев. Коррекция смаза в оптико-электронных сканирующих системах на борту космического аппарата /Андронов В.Г.,

Волобуев Ю.Н., Чуев А.А. // Геодезия и картография. – 2020. – Т. 81. – № 5. – С. 26–34. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-959-5-26-34.

135. Андронов В.Г., Волобуев Ю.Н., Чуев А.А. Программа для моделирования смаза в оптико-электронных сканирующих системах/ Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020613800 от 23.03.2020.

136. Волобуев Ю.Н. Программа коррекции скоростного смаза аэрокосмических изображений на борту летательного аппарата/ Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021610054 от 11.01.2021.

137. Литова Г.Г., Ханукаева Д.Ю. Основы векторной алгебры. Учебно-методическое пособие для самостоятельной работы студентов. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2009. 90с.

138. Копчёнова Н.В., Мирон А.А. Вычислительная математика в примерах и задачах: учебное пособие - 4 изд. / СПб.: издательство «Лань». 2017. 368 С.

139. Беклемишев Д.В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры: учебник – 16 изд./ СПб.: издательство «Лань». 2019. 448 С.

140. Кузнецов П.К., Мартемьянов Б.В. Математическая модель формирования видеоданных, получаемых с использованием сканирующей съемки / Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. - Т. 16. - №6. – С.292 – 299.