

УДК 004.932

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ПРОГРАММЫ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТ ВЫСОКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Еремеев В.В., д.т.н., профессор, директор НИИ «ФОТОН» Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина, e-mail: foton@rsreu.ru

Егошкин Н.А., д.т.н., в.н.с. НИИ «ФОТОН» Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина, e-mail: foton@rsreu.ru

Москвитин А.Э., д.т.н., доцент, в.н.с. НИИ «ФОТОН» Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина, e-mail: foton@rsreu.ru

Соловьев А.В., инженер РГРТУ им. В.Ф. Уткина.

PECULIARITIES OF THE ARKTIKA-M SPACECRAFT TARGET INFORMATION QUALITY MONITORING MATHEMATICAL MODELS AND PROGRAMS

Eremeev V.V., Egoshkin N.A., Moskvitin A.E., Solovev A.V.

The paper discusses the features of periodic quality control of information coming from the Arktika-M spacecraft. Monitoring is performed by statistical service information analysis and visual images inspection. Based on the monitoring results, the calibration of the software parameters are refined in order to improve the quality of target information processing.

Key words: quality control of information, monitoring, visual images inspection, calibration of the software parameters.

Ключевые слова мониторинг качества, телеметрические данные, дистанционное зондирование Земли, высокоуровневая обработка спутниковых снимков, контроль функционирования программных средств.

Введение

Для успешного функционирования спутников дистанционного зондирования Земли необходимо регулярно проводить анализ качества информационных продуктов, формируемых космической системой. В состав системы ДЗЗ входят космический аппарат (КА) и наземный комплекс приема и обработки спутниковой информации.

Обработку данных с высокоорбитальных КА на Центрах приема спутниковых данных Научно-исследовательского центра «Планета» осуществляет программное обеспечение разработки Рязанского государственного радиотехнического университета. Специалисты РГРТУ регулярно проводят мониторинг качества работы спутниковой аппаратуры и правильности функционирования наземных средств. По результатам этой работы вносятся поправки в модели, алгоритмы и технологии формирования стандартных информационных продуктов, повышающие их качество, например, точность радиометрических измерений, точность геометрических преобразований, точность геодезической привязки.

Постановка задачи

Программное обеспечение наземной обработки данных от высокоорбитальных осуществляет формирование изображений уровней обработки 1.0 и 1.5. Уровень

Рассматриваются особенности систематического контроля качества информации, поступающей с высокоэллиптических и геостационарных космических аппаратов. Мониторинг проводится путем построения моделей и статистического анализа изображений и служебной информации. По результатам мониторинга производится уточнение параметров моделей сканирующих устройств, заложенных в программном обеспечении обработки спутниковых изображений.

обработки 1.0 подразумевает распаковку, декодирование принимаемого потока данных, его разделение на видеoinформацию и служебную информацию, представление данных в нужных форматах.

Уровень обработки 1.5 подразумевает выполнение геопривязки, а также коррекцию возможных искажений, обусловленных конструктивными особенностями космического аппарата и съемочной аппаратуры [1, 2].

Высокоорбитальные гидрометеорологические комплексы осуществляют съемку Земли в трех диапазонах видимого спектра и семи зонах инфракрасного диапазона спектра электромагнитных волн. Результатом обработки каждого сеанса съемки является формирование набора файлов, содержащих выходные продукты уровней 1.0 и 1.5 отдельно. Эти файлы можно открыть только специализированным программным обеспечением. Ставится задача контроля правильности функционирования программных средств обработки данных высокоорбитальных КА путем визуального анализа изображений, контроля полноты и целостности служебных данных и путем анализа работы бортовой аппаратуры спутника по телеметрической информации.

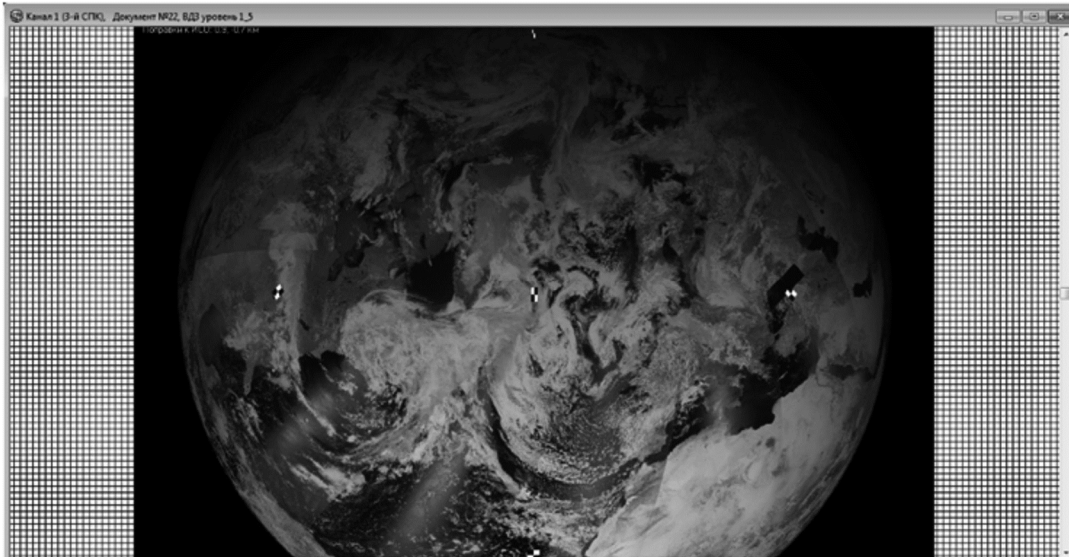


Рис. 1. Пример изображения уровня 1.5

Визуальный контроль спутниковых данных

Осуществляя визуальный контроль сформированных выходных продуктов, можно оперативно сделать вывод о правильности работы программных средств за длительный период.

Для быстрой визуальной оценки содержания выходных продуктов формируются так называемые «квиклуки». «Квиклука» – это копия первоначального продукта с низким разрешением и в распространенном формате, которая сохраняется для быстрого доступа в нужный момент. «Квиклуки» позволяют оператору мгновенно открыть и показать продукты обработки, без необходимости применять специализированные инструменты для просмотра снимков.

Однако часто «квиклуков» недостаточно для адекватной визуальной оценки качества выходных информационных продуктов. Поэтому в инструментарий анализа качества обработки данных ДЗЗ целесообразно включить возможность открытия выходных изображений. Файл, сформированный в результате обработки уровня 1.5, представляет собой черно-белое изображение, каждый пиксель которого занимает 10 бит, что позволяет хранить 1024 градации серого. Пример такого изображения приведен на рис. 1.

Анализ полноты и целостности служебных данных

Полнота информации, полученной в результате приема данных сеанса связи со спутником, анализируется автоматически путем контроля присутствия всех видов информации и ее объема. Для изображений определяются: имя и размер файла, номер канала, число строк в тестовых наборах и в видеоданных, общий размер строки, количество элементов видеоданных в строке, число сканов, число строк телеметрической и служебной информации в скане и другие. Вывод о полноте данных формируется путем сопоставления значений этих параметров с протоколом.

Целостность информации определяется путем оценки вероятности сбоев параметров служебной информа-

ции, значения которых заранее известны, и путем определения среднего значения, СКО и вероятности выхода за допустимый диапазон динамически изменяющихся служебных данных.

Оценка вероятности сбоев выполняется для параметров трех групп:

– первая группа – это параметры, принимающие только одно заранее известное значение (X_{const}). Для таких параметров вероятность сбоев оценивается как

$$v = N_{сбоев} / N,$$

$$\text{где } N_{сбоев} = \sum_{i=1}^N s_i, \quad s_i = \begin{cases} 1, & \text{если } X_i \neq X_{const}; \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases} \quad X_i,$$

$i = \overline{1, N}$, – значения анализируемого параметра;

– вторая группа – это параметры, принимающие несколько заранее известных значений $W = \{w_k; k = \overline{1, K}\}$. Здесь сначала определяется истинное значение параметра как ближайшее к его среднему значению, т.е.

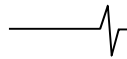
$$X_{const} = \min_k |\bar{X} - w_k|,$$

где $\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$, $i = \overline{1, N}$, $k = \overline{1, K}$. Затем оценивается

вероятность сбоя также, как и для параметра первой группы;

– третья группа – это параметры, для которых заранее известен только закон изменения, например, «Номер строки». При анализе параметра «Номер строки» полагается, что при сбоях возможен как пропуск строк, так и запись ложных значений. Работа алгоритма начинается с поиска индекса j , с которого начинается корректный рост номера строки, т.е. $X_j + N_p = X_{j+1} + N_p - 1 = \dots = X_{j+N}$, где $N_p + 1$ – размер участка с корректным ростом. Затем, начиная с этого места, выполняется подсчет верных значений параметра:

$$N_{кopp} = \sum_{k=1}^j a_k + \sum_{k=j+1}^N b_k,$$



где $a_k = \begin{cases} 1, & \text{если } X_{j-k+1} - X_{j-k+2} = 1; \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$

$b_k = \begin{cases} 1, & \text{если } X_k - X_{k+1} = 1; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$ Искомая вероятность

сбора оценивается как $v = (N - N_{\text{копп}}) / N$.

Анализ динамики сигналов служебной информации осуществляется путем вычисления:

– среднего значения $M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$, где X_i , $i = \overline{1, N}$,

значение анализируемого сигнала;

– среднеквадратического отклонения

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - M)^2};$$

– вероятности выхода за допустимый диапазон

(X_{\min}, X_{\max}) $v = N_{\text{вых}} / N$, где $N_{\text{вых}} = \sum_{i=1}^N h_i$,

$h_i = \begin{cases} 0, & \text{если } X_i > X_{\max} \text{ и } X_i < X_{\min}; \\ 1, & \text{в противном случае.} \end{cases}$

Контроль работы бортовой спутниковой аппаратуры

Помимо собственно изображений интерес для контроля представляет также информация о параметрах работы спутника и съёмочной аппаратуры. Эта информация по мере наземной обработки извлекается из изображений и другой сопроводительной информации и «бережно» накапливается и архивируется для дальнейшего анализа. Её анализ менее трудоёмок, чем изображений, и зачастую более информативен, поскольку информация содержится в более концентрированном виде.

Обозначим $v(t)$ зависимость вектора поправок, который рассчитывает программа нормализации путем анализа изображений, от времени t (номера сеанса). Компоненты $v(t)$ включают:

– поправки к углам ориентации спутника (к навигационной информации ИСО), которые оцениваются в процессе уточнения геопривязки по опорным ориентирам – контурным точкам диска Земли [3] и электронным картам [4];

– оценки геометрического сдвига одного спектрального канала относительно другого (формируются путём корреляционно-экстремального сопоставления изображений);

– оценки сдвига между собой сканов изображений, в том числе формируемых двумя ПЗС-линейками в модуле видимого диапазона.

Обозначим $s(t)$ – зависимость от t вектора, характеризующего работу бортовой аппаратуры. Компоненты $s(t)$ включают:

– измерения температур в ряде ключевых точек камеры и спутника;

– оценки плавности хода сканирующих зеркал по датчикам углового положения (ибо высокий уровень флуктуаций угла снижает качество изображений и тре-

бует специальной обработки);

– нормы кватернионов ориентации от системы навигации борта (в идеале должно быть 1);

– целостность и полнота исходной информации от станции космической связи как на уровне абстрактных пакетов от бортовой системы сбора и обработки данных, так и по количеству успешно принятых строк изображений и полноте навигационной информации (количество сообщений с борта и их соответствие по времени интервалу съёмки).

Поправки $v(t)$ и измерения $s(t)$ являются исходной информацией для контроля качества функционирования спутника, а также для потенциального улучшения качества геометрической нормализации.

Получение $s(t)$ связано с обработкой измерительной информации с борта КА и не требует высоких вычислительных затрат. Определение $v(t)$ наоборот, требует обработки объёмных изображений и весьма трудоёмко. Чем больше диапазон возможного изменения компонент $v(t)$, тем более высоки затраты (больше зона поиска коррелятора). Поэтому необходимо контролировать значения поправок, не допуская их приближения к границам зоны корреляционного поиска: если $|v_i(t)| > P_i$, где P_i – заданный порог, i – индекс компоненты вектора, то выдаётся предупреждение о необходимости калибровки параметров аппаратуры или о возникшей нештатной ситуации на борту спутника.

Также важная информация может быть извлечена путем совместного анализа $v(t)$ и $s(t)$ для нескольких моментов времени сразу. Для визуального анализа разработан инструментарий для отображения компонент $v(t)$ и $s(t)$ в виде графиков. На графиках одна точка соответствует одному сеансу съёмки (рис. 2).

На графиках можно видеть суточно-периодические изменения, а также «вековые». Можно видеть связь между поправками (т.е. геометрией съёмочной аппаратуры) и температурами, которая особо ярко начинает проявляться после уменьшения периодичности съёмки с 30 на 15 минут, что заметно ухудшает термостабильность спутника. Аномалии на графиках (например, резкие выбросы и нехарактерные изменения) свидетельствуют о необходимости более детально проанализировать изображения.

Для автоматизации выявления аномалий применяется критерий 3σ : по группе измерений $v_i(t)$ за сутки находится оценка σ_i и если $|v_i(t)| > 3\sigma_i$, то фиксируется наличие аномалии.

При обработке изображений корреляционно-экстремальным подходом оценивается геометрическое рассогласование между спектральными каналами. Это несколько повышает время обработки, однако даёт крайне важную информацию для изучения суточно-периодического и «векового» изменения рассогласований. Так было обнаружено постепенное расхождение каналов со временем (рис. 3). В настоящее время выход рассогласований за проектные значения является сигналом для перекалибровки параметров совмещения каналов в комплексе нормализации. Для этого помимо

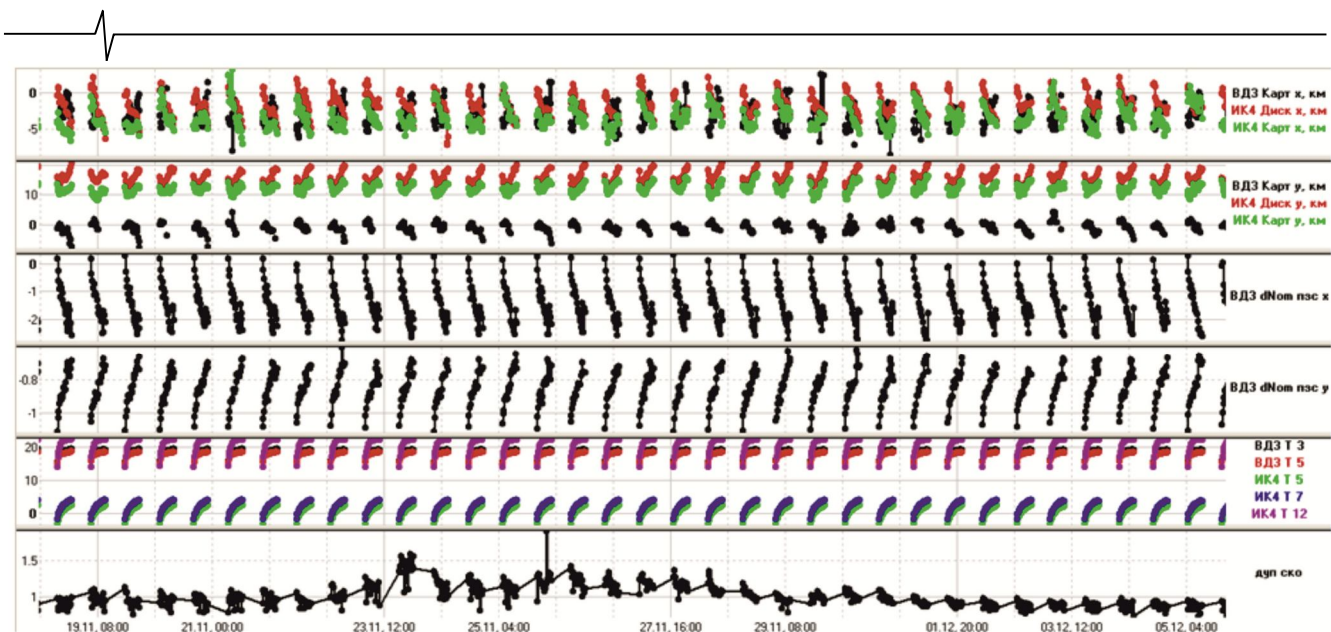


Рис. 2. Эволюция контролируемых параметров во времени

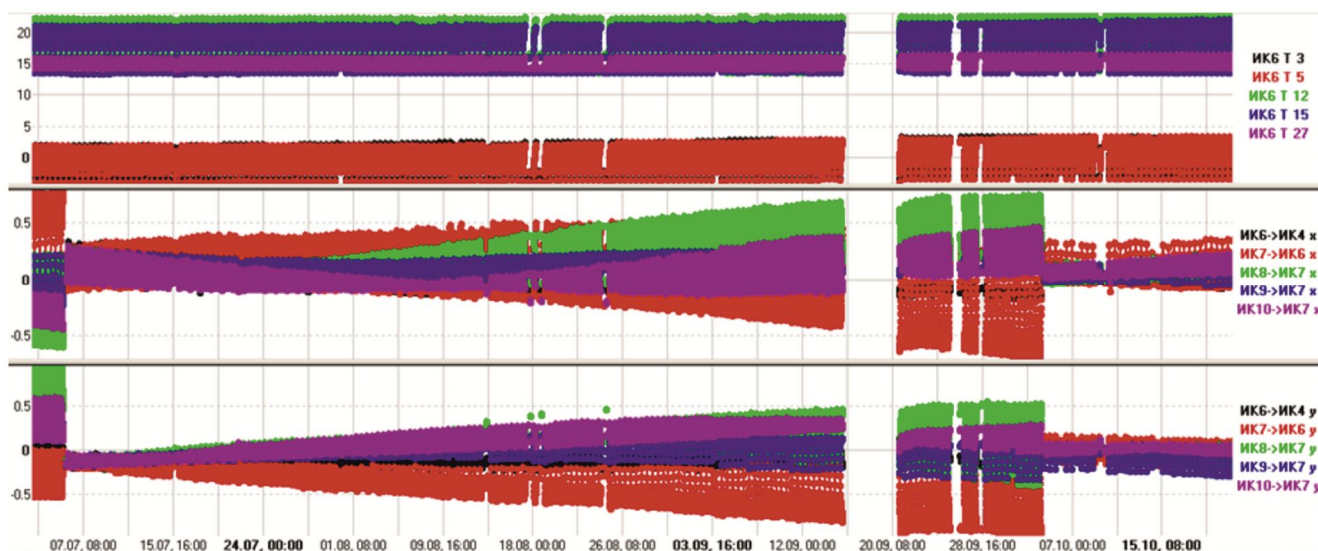


Рис. 3. Эволюция сдвига спектральных каналов во времени

обобщенных оценок точности совмещения накапливаются массивы одноименных точек (появление рассогласования говорит об изменении геометрии съёмки аппаратуры по сравнению с заложенной моделью, но самих интегральных оценок рассогласования может быть недостаточно для уточнения моделей). В результате калибровки погрешность совмещения каналов резко снижается (см. рис. 3).

Накопление поправок $\mathbf{v}(t)$ и измерений $\mathbf{s}(t)$ позволяет не только проводить контроль, но и улучшить обработку. Наиболее фундаментально это может быть сформулировано в терминах предсказателей: поставим задачу предсказать $\mathbf{v}(t_0)$, т.е. найти некоторое $\mathbf{v}^*(t_0)$, зная только поправки $\mathbf{v}(t)$ для $t < t_0$ и $\mathbf{s}(t)$ для $t \leq t_0$. Критерием построения предсказателя может служить условие качества предсказания $\varepsilon = \|\mathbf{v}(t_0) - \mathbf{v}^*(t_0)\|_2^2 = \min$.

Знание прогноза позволяет, во-первых, упростить анализ изображения за счет сужения области корреля-

ционного поиска, центром которого естественно выбрать предсказанное значение. Во-вторых, упрощается выявление аномалий в функционировании системы: высокие значения $|\mathbf{v}(t_0) - \mathbf{v}^*(t_0)|$ говорят о непрогнозируемом изменении в функционировании спутника и съёмочной аппаратуры.

В-третьих, наличие предсказанного значения может позволить улучшить точность геометрической нормализации: для этого в программе нормализации вместо оценки поправки по изображению $\mathbf{v}(t_0)$ используется оптимальная комбинация с предсказанным значением $(1 - \alpha)\mathbf{v}(t_0) + \alpha\mathbf{v}^*(t_0)$, где α – некий весовой коэффициент. Дело в том, что сама поправка $\mathbf{v}(t_0)$ является зашумленной оценкой некоторого истинного значения $\mathbf{v}_{\text{ист}}(t_0)$. Если значения $\mathbf{v}_{\text{ист}}(t)$ коррелированы между сеансами, то для оптимального уменьшения ошибок в геометрии (например, в геодезической привязке) следует использовать ненулевой вес α .

Например, для оценки скоростей ветра по серии

изображений они должны иметь хорошую относительную геопривязку. Обычно это обеспечивается автоматически, поскольку ошибки в навигационной информации изменяются медленно. Однако без использования опорных ориентиров геопривязка оказывается не удовлетворительной. Если же для каждого сеанса вносить поправку к ориентации КА независимо по контурным точкам диска и электронным картам, то оказывается, что не смотря на проектную точность геопривязки каждого снимка, точность относительной привязки сеансов оказывается не достаточной для определения скоростей ветров. Эту проблему позволяет решить выбор $\alpha > 0$ даже при простейшем предсказателе вида $\mathbf{v}^*(t) = \mathbf{v}(t-1)$, где для простоты выбор масштаба t предполагается таким, что $t-1$ соответствует предыдущему сеансу.

В тех случаях, когда поправка $\mathbf{v}_{\text{ист}}(t_0)$ однозначно определяется по температурам (например, для сдвига линеек ПЗС1 и ПЗС2 в видимом диапазоне), то вместо зашумленной оценки поправки выгоднее использовать чистый прогноз, т.е. принять $\alpha = 1$.

На практике достаточное хорошее качество обеспечивает линейный предсказатель вида:

$$\mathbf{v}_i^*(t_0) = \sum_{j=1}^{N_i} A_{ij} \mathbf{v}_i(t_0 - j) + \sum_j B_{ij} s_j(t_0),$$

где N_i – количество используемых предыдущих поправок; A_{ij} , B_{ij} – некоторые коэффициенты; суммирование идет по тем индексам, для которых переменные определены. Найти коэффициенты A_{ij} , B_{ij} можно по МНК из условия $\varepsilon = \min$. При этом каждое N_i выбирается минимально возможным, при котором наблюдается значимое уменьшение ошибки ε . За счет накопления больших объемов данных (за несколько дней и недель) определение коэффициентов можно выполнить с высокой надежностью. На практике обучаются два предсказателя: один для поиска аномальных ситуаций, а второй – для повышения геометрического качества при штатной обработке [5].

Следует отметить, что знание коэффициентов A_{ij} , B_{ij} позволяет также упростить выбор оптимального значения параметра α [6], хотя на практике хорошие результаты даёт даже эмпирический подбор.

Заключение

Предложенные в работе подходы по мониторингу качества целевой информации прошли апробация на космических аппаратах «Электро-Л» и «Арктика-М». Они позволяют эффективно проводить авторский надзор правильности функционирования наземных средств обработки спутниковых изображений, а так же постоянно удерживать на должном уровне и повышать качество выходных информационных продуктов.

Литература

1. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / под ред. В.В. Еремеева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 460 с.
2. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Обработка информации от современных космических систем радиолокационного наблюдения Земли – Москва: Издательство ФИЗМАТЛИТ, 2019.
3. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э. Координатная привязка изображений от геостационарных спутников по контурным точкам диска Земли. Вестник РГРТУ. 2007. № 22. С. 10-16.
4. Воронин А.А., Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москатиньев И.В. Геометрическая обработка данных космических систем глобального наблюдения Земли. Вестник РГРТУ. 2009. № 1 (выпуск 27). С. 12-17.
5. Егошкин Н.А., Москвитин А.Э. Повышение точности коррекции изображений на основе фильтрации измерений углового положения сканирующего зеркала. Вестник РГРТУ. 2010. № 3 (выпуск 33). С. 7-11.
6. Егошкин Н.А. Динамические модели геометрической обработки изображений в системах дистанционного зондирования Земли. Цифровая обработка сигналов. 2017. № 1. С. 3-7.

НОВЫЕ КНИГИ

Поборчая Н.Е.

Методы и алгоритмы оценивания параметров канала связи в условиях априорной неопределенности в системах с приемником прямого преобразования: Учебное издание для вузов, М.: Изд-во «Горячая линия-Телеком», 2023 г. 240 с.: ил.

Изложены методы и алгоритмы совместного оценивания параметров сигнала (канала связи) в условиях априорной неопределенности относительно статистических характеристик канала связи и законов распределения шумов. Особое внимание уделено системам с приемником прямого преобразования. Рассмотрены вопросы синтеза и анализа процедур оценивания для систем связи с одной передающей и приемной антенной (SISO), с несколькими передающими и приемными антеннами (MIMO), а также для систем с ортогональным частотным мультиплексированием (OFDM).

Предложенные алгоритмы способствуют повышению помехоустойчивости приема информации или понижению вычислительной сложности процедур обработки сигнала.

Для научных работников, инженеров и аспирантов. Может быть полезна студентам старших курсов и магистрантам, обучающимся по направлению подготовки «Радиотехника» и «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

