

ЭФФЕКТИВНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ МАССОВЫХ КООРДИНАТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ПРИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Егошкин Н.А., в.н.с. НИИ «Фотон» РГРТУ, к.т.н., foton@rsreu.ru;

Ушенкин В.А., с.н.с. НИИ «Фотон» РГРТУ, к.т.н., foton@rsreu.ru.

EFFECTIVE ORGANIZATION OF MASS COORDINATE TRANSFORMATIONS IN THE GEOMETRIC PROCESSING OF SAR IMAGES

Egoshkin N.A., Ushenkin V.A.

The problem of mass coordinate transformations effective organization in the geometric processing of SAR images is considered in order to achieve high processing speed with low RAM costs. The approximate regular grid with piecewise parabolic interpolation between nodes is proposed. Its efficiency in terms of speed and memory is substantiated and confirmed experimentally.

Key words: SAR image, geometric processing, interpolation, geocoding, orthotransformation.

Ключевые слова: радиолокационное изображение, геометрическая обработка, интерполяция, геокодирование, ортотрансформирование.

Введение

Геометрическая обработка радиолокационных изображений (РЛИ) является одним из основных этапов наземной обработки данных космических радиолокационных систем и включает три основные операции:

1) геореференцирование – преобразование РЛИ из геометрии «наклонная дальность – азимут» в геометрию «наземная дальность – азимут» с выравниванием шага дискретизации по дальности и по азимуту;

2) геокодирование – преобразование РЛИ в картографическую проекцию с учетом средней высоты наблюдаемой сцены;

3) ортотрансформирование – преобразование РЛИ в картографическую проекцию с учетом цифровой модели пространственного распределения высот объектов наблюдаемой сцены.

Пересчет планарных координат пикселя на РЛИ в картографические координаты может быть выполнен на основе геодезической привязки изображения. Номер столбца на РЛИ определяет значение наклонной дальности на траверзе R_{\perp} , а номер строки – азимутальное время η_{\perp} максимального сближения радиолокатора с синтезированной апертурой антенны (РСА) и наблюдаемой цели. Для каждой строки РЛИ известны координаты фазового центра антенны РСА $\mathbf{r}_p(\eta_{\perp}) = (x_p, y_p, z_p)$ и вектор линейной скорости его движения $\mathbf{V}_p(\eta_{\perp}) = (V_{px}, V_{py}, V_{pz})$, задаваемые в Гринвичской системе координат (трехмерной прямоугольной геоцентрической системе, ось Z которой направлена по земной оси, а оси X и Y лежат в плоскости экватора и вращаются вместе с Землей). Для каждой пары $(R_{\perp}, \eta_{\perp})$ может быть составлена система уравнений:

Рассматривается проблема эффективной организации массовых координатных преобразований при геометрической обработке изображений от космических радиолокаторов с синтезированной апертурой с целью достижения высокой скорости обработки при небольших затратах оперативной памяти. Предлагается аппроксимационная регулярная сетка с кусочно-параболической интерполяцией между узлами. Обосновывается и экспериментально подтверждается ее эффективность по быстродействию и затратам оперативной памяти.

$$\begin{cases} V_{px}(\eta_{\perp})(x - x_p(\eta_{\perp})) + V_{py}(\eta_{\perp})(y - y_p(\eta_{\perp})) + \\ + V_{pz}(\eta_{\perp})(z - z_p(\eta_{\perp})) = 0, \\ \frac{x^2 + y^2}{(a_3 + h)^2} + \frac{z^2}{(b_3 + h)^2} = 1, \\ (x - x_p(\eta_{\perp}))^2 + (y - y_p(\eta_{\perp}))^2 + (z - z_p(\eta_{\perp}))^2 = R_{\perp}^2, \end{cases} \quad (1)$$

где a_3 и b_3 – полуоси земного эллипсоида, h – априорно известная геодезическая высота наблюдаемой цели, (x, y, z) – координаты наблюдаемой цели в Гринвичской системе координат.

Найденные координаты (x, y, z) могут быть пересчитаны в геодезические широту B и долготу L в соответствии с ГОСТ 32453-2017 [1], а по ним в свою очередь с помощью правил проецирования могут быть найдены картографические координаты (N_k, E_k) .

Решение системы (1) находится итерационно по методу Ньютона и совместно с преобразованиями $(x, y, z) \rightarrow (B, L) \rightarrow (N_k, E_k)$ требует большого количества вычислений в каждом пикселе изображения, что увеличивает временные затраты на геометрическую обработку.

Тем не менее, от пикселя к пикселю результаты преобразований изменяются плавно, практически по линейному закону. Это позволяет строго рассчитать их лишь в узлах некоторой редкой сетки, а между узлами оценивать приближенно на основе интерполяции.

Цель настоящей работы – выбрать структуру сетки и вид интерполяции между ее узлами, обеспечивающие разумный компромисс между вычислительной эффективностью массовых координатных преобразований и затратами оперативной памяти на хранение сетки.

Прямой и обратный законы геометрических преобразований

Геометрическое трансформирование можно выполнять по прямому либо по обратному закону. Если обработка ведется по прямому закону, то для каждого пикселя исходного РЛИ находится соответствующий пиксель на результирующем РЛИ, в который помещается код яркости исходного пикселя. Недостатком обработки по прямому закону является высокая вероятность получить пропуск на результирующем РЛИ, когда выполняется ортотрансформирование для местности со сложным рельефом или когда шаг дискретизации на результате меньше, чем на исходном РЛИ. Кроме того, крайне проблематично учесть субпиксельные эффекты и вычислительно сложно трансформировать опорные высоты в геометрию исходного РЛИ. Трансформация высот в этом случае представляет собой итерационный поиск для каждого пикселя РЛИ высоты h , при которой решение системы (1) даст такие (B, L) , что $h = h(B, L)$, где $h(B, L)$ – интерполированная цифровая модель рельефа в геодезической системе координат. Иначе говоря, объем вычислений для каждого пикселя увеличивается на порядок по сравнению с вычислением геодезической привязки.

Данных недостатков лишена обработка по обратному закону. В этом случае для каждого пикселя результирующего РЛИ находится соответствующий ему пиксель на исходном РЛИ. Если полученные координаты получаются нецелочисленными, выполняется интерполяция исходного РЛИ. Интерполированное значение радиояркости помещается в пиксель результирующего РЛИ.

Тем не менее, обработка по обратному закону порождает две проблемы: во-первых, она не позволяет определить размеры результирующего РЛИ, а во-вторых, геодезическая привязка РЛИ и правила проецирования определяют прямой закон, а не обратный. Первая проблема обычно решается путем выборочного применения прямого закона к пикселям исходного РЛИ (например, к граничным пикселям).

Вторая проблема для радиолокационной съемки решается достаточно просто. Во-первых, для наиболее распространенных картографических проекций (УТМ, проекция Гаусса-Крюгера, стереографическая проекция) имеются аналитические выражения для обратного преобразования картографических координат в геодезические, сопоставимые по объему вычислений с правилами проецирования. Во-вторых, обратная геодезическая привязка РЛИ, в отличие от прямой привязки, является однозначной на интервале съемки и имеет вполне ясный геометрический смысл: опускание перпендикуляра из наблюдаемой точки с координатами (x, y, z) , полученными из (B, L, h) по ГОСТ 32453-2017, на траекторию движения РСА и вычисление длины этого перпендикуляра R_{\perp} , а также момента времени η_{\perp} , когда РСА

оказывается в основании перпендикуляра. Фактически обращение геодезической привязки РЛИ сводится к решению уравнения:

$$V_{px}(\eta_{\perp})(x - x_p(\eta_{\perp})) + V_{py}(\eta_{\perp})(y - y_p(\eta_{\perp})) + V_{pz}(\eta_{\perp})(z - z_p(\eta_{\perp})) = 0. \quad (2)$$

Уравнение (2) может быть решено методом половинного деления или методом хорд после предварительной локализации корня на выбранном временном интервале (например, интервале съемки). После нахождения η_{\perp} наклонная дальность на траверзе выражается следующим образом:

$$R_{\perp} = \sqrt{(x - x_p(\eta_{\perp}))^2 + (y - y_p(\eta_{\perp}))^2 + (z - z_p(\eta_{\perp}))^2}. \quad (3)$$

В то же время при обработке по обратному закону существенно упрощается учет опорной трехмерной модели наблюдаемой сцены $h(B, L)$, изначально представленной в геодезической системе координат. Ее необходимо предварительно трансформировать не в геометрию исходного РЛИ, а в картографическую проекцию, как и результирующее РЛИ. Для этого не требуется сложных итерационных вычислений в каждом пикселе, а достаточно лишь применить правила проецирования к широте и долготе, игнорируя высоту.

Тем не менее, даже при геометрической обработке по обратному закону строгие координатные преобразования требуют достаточно много вычислений, что негативно отражается на скорости геометрической обработки. Поэтому вопрос выбора аппроксимирующих сеток для массовых преобразований координат пикселей остается актуальным.

Выбор аппроксимирующей сетки

В оптике основную проблему составляет обращение геодезической привязки. Оно требует гораздо большего количества вычислений, чем решение уравнения (2) в радиолокации, поскольку там участвует не только линейное, но и угловое движение космического аппарата, а также дисторсия оптики. Из-за этого обратить привязку даже в узлах сетки может быть вычислительно накладно. Поэтому в [2] предлагается сначала построить сетку для прямого закона, для каждой ячейки прямой сетки определить, какие узлы обратной сетки попадают в нее, и вычислить значения в узлах сетки, аппроксимирующей обратный закон. Чтобы было просто определить, какие узлы обратной сетки попадают в ячейку прямой сетки, интерполяция между узлами ограничивается кусочно-аффинной или кусочно-билинейной. Это в свою очередь требует достаточно большого количества узлов в сетке, чтобы обеспечить приемлемую точность аппроксимации. Особенно это касается ортотрансформирования, когда аппроксимирующая сетка становится трехмерной.

Поскольку в радиолокации неизбежен боковой обзор, влияние рельефа оказывается сильным и приводит к большому количеству узлов сетки по третьему измерению. Типичный шаг кусочно-линейной сетки составляет около 50 пикселей по широте и долготе и около 60 м по высоте. В каждом узле сетки хранится пара чисел, которые для больших изображений должны иметь формат с плавающей точкой двойной точности (по 8 байтов на

каждое число). Максимально возможный перепад высот рельефа составляет около 10 км (Гималаи). Следовательно, при ортотрансформирования одноканального 16-битного радиолокационного изображения объем памяти для хранения аппроксимирующей сетки в худшем случае составляет примерно половину объема изображения. Такие накладные расходы оперативной памяти неприемлемы. Поэтому целесообразно рассмотреть интерполяцию между узлами сетки более высокого порядка, отличающуюся большей точностью и соответственно требующую существенно меньшего количества узлов в сетке.

В настоящей работе предлагается использовать в сетке трехмерную кусочную аппроксимацию параболами. По одному измерению кусочно-параболическая сетка, построенная на некотором отрезке, включает $N + 1$ основных и N промежуточных узлов. Основные и промежуточные узлы чередуются друг с другом, причем на краях отрезка располагаются основные узлы. Через каждую пару соседних основных узлов и промежуточный узел между ними (так называемая ячейка сетки) проводится парабола (рис. 1). Одномерные сетки по E_k , построенные для различных значений N_k , образуют двумерную сетку. Одномерные сетки по E_k также разделяются на основные и промежуточные. Через соответствующие точки двух соседних основных одномерных сеток и промежуточной сетки между ними также проводятся параболы. Ячейку двумерной сетки при этом образуют 3×3 соседних узлов. Третье измерение в сетке добавляется аналогичным образом. Под шагом сетки по одному из измерений будем понимать расстояние между двумя соседними основными узлами.

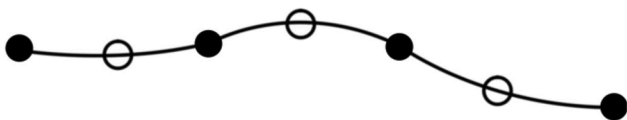


Рис. 1. Кусочно-параболическая сетка в одномерном варианте

При геокодировании РЛИ по обратному закону координатные преобразования записываются в виде $(N_k, E_k) \rightarrow (R_{\perp}, \eta_{\perp})$. Для их описания требуется векторная двумерная сетка. При ортотрансформировании РЛИ координатные преобразования уже имеют вид $(N_k, E_k, h) \rightarrow (R_{\perp}, \eta_{\perp})$ и описываются векторной трехмерной сеткой.

При геометрических преобразованиях РЛИ расстояние между основными узлами кусочно-параболической сетки по горизонтали будет составлять от нескольких сотен до нескольких десятков тысяч пикселей, а по высоте – от одного до нескольких километров (в зависимости от конкретных условий съемки). В среднем можно считать, что шаг сетки по широте и долготе составляет около 1000 пикселей, а по высоте – около 2 км. В итоге объем памяти для хранения сетки составит сотые доли процента от объема изображения, что вполне приемлемо.

Поскольку в радиолокации геодезическая привязка обращается гораздо легче, чем в оптике, сетки для обратного закона могут строиться напрямую. Это снимает ограничение на интерполяцию между узлами и позволя-

ет использовать кусочно-параболическую. Кроме того, более высокий порядок интерполяции позволяет сократить вычислительные расходы на построение сетки за счет уменьшения количества узлов. Основной проблемой интерполяций высокого порядка является увеличение объема вычислений при массовых координатных преобразованиях с использованием сетки. Тем не менее, покажем, что при использовании предлагаемого вида интерполяции это увеличение незначительно в рамках всей геометрической обработки. При этом рассмотрим два случая: двумерный и трехмерный варианты сетки.

В двумерном варианте сетки массовые координатные преобразования последовательно вызываются для параметров $(N_{k0}, E_{k0}), (N_{k0}, E_{k0} + \Delta E_k), (N_{k0}, E_{k0} + 2\Delta E_k), \dots, (N_{k0} + \Delta N_k, E_{k0}), (N_{k0} + \Delta N_k, E_{k0} + \Delta E_k), (N_{k0} + \Delta N_k, E_{k0} + 2\Delta E_k)$ и т.д. То есть фактически для фиксированного N_k последовательно вызываются преобразования для разных E_k с постоянным шагом, и лишь затем изменяется N_k .

Пусть некоторое количество значений вида $E_{k0}, E_{k0} + \Delta E_k, E_{k0} + 2\Delta E_k$ и т.д. попадает в пределы одной ячейки двумерной кусочно-линейной сетки по горизонтали. Поскольку все преобразования ведутся для фиксированного N_k , билинейную интерполяцию можно заменить на одномерную, предварительно линейно интерполировав значения в двух парах соседних узлов сетки по вертикали. Через полученные интерполированные узловые значения проводится прямая вида

$$(R_{\perp}, \eta_{\perp}) = \frac{E_k}{\Delta E_k} (k_{\text{лин}R}, k_{\text{лин}\eta}) + (b_{\text{лин}R}, b_{\text{лин}\eta}).$$

В результате линейную интерполяцию нужно применять напрямую лишь для расчетов в начальной точке E_{k0} , а остальные результаты координатных преобразований можно быстро вычислять по предыдущим значениям:

$$R_{\perp i} = R_{\perp i-1} + k_{\text{лин}R}, \quad \eta_{\perp i} = \eta_{\perp i-1} + k_{\text{лин}\eta}. \quad (4)$$

Таким образом, вычислительная сложность одного координатного преобразования по двумерной сетке с билинейным интерполятором асимптотически стремится к двум сложениям.

Если линейную интерполяцию заменить на параболическую, то последовательные вычисления для регулярно изменяющихся E_k тоже можно свести к сложениям. На самом деле эту задачу можно свести к сложениям для любого полинома, поскольку у него конечно число ненулевых производных, причем старшая ненулевая производная постоянна. Количество сложений при этом будет в два раза больше степени полинома (за счет того, что коэффициенты полинома – векторы из двух

элементов). Для параболы $(R_{\perp}, \eta_{\perp}) = 0,5 \left(\frac{E_k}{\Delta E_k} \right)^2 \times (a_{\text{нар}R}, a_{\text{нар}\eta}) + \frac{E_k}{\Delta E_k} (b_{\text{нар}R}, b_{\text{нар}\eta}) + (c_{\text{нар}R}, c_{\text{нар}\eta})$ последовательные координатные преобразования записываются в виде:

$$k_{\text{лини}R_i} = k_{\text{лини}R_{i-1}} + a_{\text{нап}R}, \quad k_{\text{лини}\eta_i} = k_{\text{лини}\eta_{i-1}} + a_{\text{нап}\eta}, \quad (5)$$

$$R_{\perp i} = R_{\perp i-1} + k_{\text{лини}R_{i-1}}, \quad \eta_{\perp i} = \eta_{\perp i-1} + k_{\text{лини}\eta_{i-1}}, \quad (6)$$

где $(k_{\text{лини}R_i}, k_{\text{лини}\eta_i}) = 0,5(a_{\text{нап}R}, a_{\text{нап}\eta}) + (b_{\text{нап}R}, b_{\text{нап}\eta}) + E_{\kappa 0} \times (a_{\text{нап}R}, a_{\text{нап}\eta})$.

Таким образом, вычислительная сложность одного координатного преобразования по двумерной сетке с бипараболическим интерполятором асимптотически стремится к четырем сложениям. С одной стороны, это в два раза больше, чем при билинейной интерполяции, но с другой стороны, всё равно намного меньше, чем затраты на передискретизацию сигнала при геометрических преобразованиях.

В случае же трехмерной сетки, учитывающей высоту рельефа, объем вычислений существенно возрастает как для трилинейной, так и для трипараболической интерполяции. Это связано с тем, что значения высоты $h(N_{\kappa}, E_{\kappa})$ изменяются произвольным образом при движении вдоль строк и столбцов двумерной проекции сетки, причем разрешение трехмерной модели выше, чем шаги сетки по N_{κ} и E_{κ} . В результате приходится поступать следующим образом. В пределах нескольких последовательных преобразований, приходящихся с учетом вариации высоты на одну ячейку трехмерной сетки, выполняется последовательная двумерная интерполяция в двух (для прямой) или трех (для параболы) сечениях сетки для соседних узловых значений высоты, а затем независимо для каждого преобразования выполняется линейная или параболическая интерполяция по высоте. В результате для трилинейного интерполятора каждое преобразование асимптотически сводится к четырем сложениям и одномерной линейной интерполяции, а для трипараболического интерполятора – к двенадцати сложениям и одномерной интерполяции параболой. Таким образом, применение трипараболического интерполятора увеличивает асимптотическую сложность координатных преобразований по трехмерной сетке примерно в три раза. Однако для горной местности со сложным рельефом проигрыш по скорости оказывается гораздо меньше за счет более крупного размера ячеек сетки и более низкой вероятности, что очередное изменение высоты приведет к переходу в другую ячейку. Кроме того, вычислительные затраты на координатные преобразования все равно остаются примерно в полтора раза меньше, чем на передискретизацию сигнала изображения на основе билинейной интерполяции. С учетом же того, что для РЛИ передискретизацию обычно выполняют с помощью фильтров более высокого порядка (бикубического или на основе sinc-функции), увеличение затрат на координатные преобразования практически не отражается на скорости ортотрансформирования.

Алгоритм построения аппроксимирующей сетки, обеспечивающей заданную точность преобразования координат

Рассмотрим процесс построения сетки, обеспечивающей приемлемую точность координатных преобразований. При этом ограничимся трехмерной кусочно-

параболической сеткой как более общим случаем.

Предельная ошибка координатных преобразований должна составлять не более десятой доли пикселя, чтобы не быть визуально заметной на результате ортотрансформирования. В то же время для автоматического выбора шага сетки нельзя задавать слишком малую предельную ошибку, поскольку расчеты прямой и обратной геодезической привязки выполняются численно, а их результаты содержат вычислительные погрешности. Задаваемая предельная ошибка должна быть больше этих погрешностей.

Выбирать шаг сетки будем независимо для каждого из измерений. Сначала установим величины шагов по измерениям, соответствующие ширине, высоте результирующего РЛИ и диапазону высот. Затем будем уменьшать шаг сетки по отдельным измерениям в 2 раза, до тех пор пока ошибка интерполяции между узлами не снизится до приемлемой.

Наибольшую проблему здесь составляет эффективное оценивание максимальной ошибки интерполяции независимо по каждому из измерений. В общем виде решить эту задачу крайне затруднительно, поэтому будем получать лишь приближенную оценку, основываясь на следующих предположениях:

1) ошибка интерполяции по каждому измерению монотонно изменяется при движении вдоль других измерений;

2) гиперповерхности $R_{\perp}(N_{\kappa}, E_{\kappa}, h)$ и $\eta_{\perp}(N_{\kappa}, E_{\kappa}, h)$ раскладываются по каждому из измерений в ряд Тейлора, в котором коэффициент перед каждым следующим членом оказывается намного меньше предыдущего коэффициента.

В соответствии с первым предположением будем оценивать ошибку интерполяции по каждому измерению лишь для граничных значений двух других параметров. В соответствии со вторым положением ошибка интерполяции параболой близка к кубической функции с двумя точками экстремума посередине между промежуточным и одним из основных узлов. Именно в этих точках для каждой ячейки одномерной сетки и оценивается ошибка интерполяции.

В реальности сделанные предположения могут выполняться нестрого, из-за чего реальная максимальная ошибка построенной сетки может оказаться в несколько раз больше, чем оцененная. В связи с этим предельную ошибку координатных преобразований для построения сетки следует задавать с некоторым запасом.

Экспериментальные исследования

Для экспериментального подтверждения полученных теоретических оценок эффективности предложенной аппроксимационной сетки выполним ортотрансформирование РЛИ (рис. 2) с использованием кусочно-линейной и кусочно-параболической сеток для массовых координатных преобразований. Трансформируемое РЛИ выбрано небольшого размера (примерно 11000×6000), поэтому кусочно-линейная сетка, хотя и содержит большое количество узлов, всё же помещается в оперативной памяти.

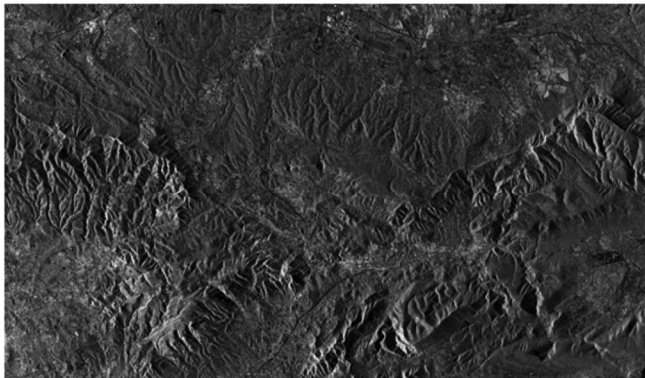


Рис. 2. Исходное (слева) и ортотрансформированное (справа) РЛИ

На персональном компьютере с процессором Intel Core i7-6800K и 32 ГБ оперативной памяти скорость ортотрансформирования составила:

1) с использованием кусочно-линейной сетки – 72,1 МБ/с;

2) с использованием кусочно-параболической сетки – 72,5 МБ/с.

Таким образом, разница в скорости обработки оказалась даже меньше, чем следовало из теоретических оценок. Это можно объяснить тем, что кусочно-линейная сетка занимает существенно больший объем памяти и доступ к ее узлам замедляется из-за более частых кэш-промахов.

Шаги построенных аппроксимационных сеток составили:

1) для кусочно-линейной сетки: по E_k – 61 пиксель, по N_k – 53 пикселя, по высоте – 97 м;

2) для кусочно-параболической сетки: по E_k и N_k – 1031 пиксель, по высоте – 3200 м.

Объем памяти для хранения кусочно-линейной сетки составил 14,5 МБ (12,3 % от объема изображения), а

для кусочно-параболической – 19 кБ (0,02 % от объема изображения). Несколько меньший объем сеток обусловлен тем, что перепад высот для исследуемого изображения в 3 раза меньше предельно возможного и составляет около 3 км.

Заключение

Таким образом, предложенная аппроксимационная сетка для массовых координатных преобразований приводит к ничтожно малому снижению скорости геометрической обработки, но при этом позволяет существенно сократить затраты оперативной памяти по сравнению с кусочно-линейной сеткой.

Литература

1. ГОСТ 32453-2017. Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. М.: Стандартинформ, 2017. 23 с.

2. Злобин В.К., Еремеев В.В. Обработка аэрокосмических изображений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 288 с.

НОВЫЕ КНИГИ



Витязев В.В. Многоскоростная обработка сигналов – М.: Изд-во «Горячая линия-Телеком», 2017 г. – 336 с.: ил.

Рассмотрена эволюция теории и технологий многоскоростной обработки сигналов в период с начала 70-х гг. прошлого столетия до наших дней с позиции вклада, который внесли в их развитие работы российских ученых и специалистов в области цифровых информационных технологий реального времени. Описаны методы и алгоритмы многоступенчатой и многокаскадной реализации цифровых узкополосных фильтров и банков цифровых фильтров на основе эффектов прореживания по времени (децимация во временной области) и по частоте (децимация в частотной области).

Приведена методика оптимизации параметров многоступенчатых и многокаскадных структур цифровых полосовых фильтров. Построение оптимальных структур и расчет параметров фильтров частотной селекции иллюстрируется многочисленными примерами.

Для специалистов, научных работников, преподавателей вузов, аспирантов; будет полезна студентам информационных и инфокоммуникационных направлений подготовки.