Формирование изображений системой радиовидения в условиях периодических затенений

Д.А. Дворянков [1], В.В. Андросов [2], С.В. Витязев [1], В.В. Витязев [1]

[1] *Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, ул. Гагарина, 59/1, Рязань, 390005, Россия*
[2] *Рязанский государственный приборный завод, ул. Семинарская, 32, Рязань, 390000, Россия*

Аннотация
Выбор варианта расположения радиолокационной станции (РЛС) на борту вертолёта является достаточно важным в контексте стремительного развития бортовых навигационных систем. В последнее время большую популярность получает вариант расположения БРЛС над вращающимся винтом. Такое расположение имеет множество преимуществ, однако влечёт за собой и возникновение новых проблем. Одной из таких проблем является искажение радиолокационного сигнала из-за наличия вращающихся лопастей винта на пути распространения зондирующего сигнала.
В статье решается задача компенсации эффекта негативного влияния вращающихся лопастей на сигналы, поступающие на приёмную антенну бортовой РЛС вертолёта. Эффект влияния лопастей вызывает так называемые затенения (пропадания фрагментов сигнала), вследствие чего возникает проблема точного восстановления исходного отражённого сигнала.
Рассматриваются различные способы решения поставленной задачи, такие как восстановление сигнала при помощи интерполяционных полиномов, аппроксимирующих функций, линейного предсказания и других способов. Рассматриваются различные методы интерполяции. Проводится сравнение разных интерполяционных методов на примере восстановления смоделированного сигнала отражения от подстилающей поверхности, содержащей точечные отражатели. В качестве критериев оценки рассматриваются точность восстановления и время обработки. На основе данных критериев формируется сравнительная таблица методов компенсации негативного влияния лопастей.

Ключевые слова
Радиовидение, малогабаритные мобильные радиолокаторы, радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), интерполяция, кубический сплайн.

Radar System Imaging in Conditions of Periodic Shading

D.A. Dvoryankov [1], V.V. Androsov [2], S.V. Vityazev [1], V.V. Vityazev [1]

[1] *Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, 59/1 Gagarina st., Ryazan, 390005, Russia*
[2] *Ryazan State Instrument-making Enterprise, 32 Seminarskaya st., Ryazan, 390000, Russia*

Abstract
The choice of airborne radar system location on helicopter board is quite important in context of rapid development of onboard navigation systems. Recently, the option of radar location above the rotating helicopter propeller has become very popular. Such location has many advantages, but also entails the emergence of new problems. One of such problems is the radar signal distortion due to the rotating propeller blades in the propagation path of probing signal.
The problem of compensating for the negative effect of rotating blades on the signals arriving at the receiving onboard radar antenna is solved in the article. The effect of the blades causes the

ГрафиКон 2022: 32-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-22 сентября 2022 г., Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия
EMAIL: dvoryankov.d.a@mail.ru (Д.А. Дворянков); vityazev.s.v@tor.rsreu.ru (С.В. Витязев); vityazev.v.v@rsreu.ru (В.В. Витязев)
ORCID: 0000-0002-3412-9094 (Д.А. Дворянков); 0000-0002-9851-5066 (С.В. Витязев); 0000-0003-3558-6008 (В.В. Витязев)

disappearance of signal fragments, which makes it difficult to accurately reconstruct the original reflected signal.
Different ways of solving problem are considered, such as signal recovery using interpolation polynomials, fitting functions, linear prediction and other methods. Various interpolation methods are considered. Using the example of restoring the simulated reflection signal of the underlying surface with point reflectors on it, a comparison of different interpolation methods is carried out. The recovery accuracy and computational costs of the developed algorithm are considered as evaluation criteria. Based on the above criteria, a comparative table of compensation methods for the negative impact of helicopter blades is formed.

Keywords
Radar systems, small mobile radars, synthetic aperture radar (SAR), interpolation, cubic spline.

1. Введение

В настоящее время во всех сферах жизнедеятельности человека основополагающую роль играет информация и её получение. Появление новых сложных задач в разных отраслях науки привело к необходимости сбора и обработки большого объёма информации практически непрерывно, независимо от времени суток и погодных условий. Возникло понятие «глобальный мониторинг», обозначающее получение информации в реальном масштабе времени со всех точек земной поверхности и околоземного пространства.

Среди средств глобального мониторинга можно выделить системы радиовидения. Такие системы включают в себя активные радиолокационные станции (РЛС) наземного, воздушного либо космического базирования, обладающие сверхвысокой разрешающей способностью. Радиолокационные изображения наблюдаемых объектов, полученные при помощи таких систем, по детальности сравнимы с фотографическими изображениями.

Системы радиовидения позволяют получать изображения объектов вне зависимости от погодных условий и естественной освещенности на больших расстояниях и одновременно в широкой зоне обзора. При помощи РЛС возможно распознать в том числе те объекты, которые невидимы для оптических систем.

Системы радиовидения могут быть использованы для получения карт местности, составления карт растительности и снежного покрова, проведения инженерной или геологической разведки, определения уровня волнения моря, определения ледовой обстановки, обнаружения нефтяных пятен, загрязнений и следов кораблей на водной поверхности, а также для решения других задач [1].

В большинстве малогабаритных самолётов, а также вертолётов, в качестве датчиков, обеспечивающих получение информации, используются оптико-электронные, инфракрасные (ИК) датчики и РЛС в основном с синтезированием апертуры антенны. Большинство типов этих РЛС работают в сантиметровом и миллиметровом диапазонах и используют непрерывные сигналы с ЛЧМ [2].

РЛС необходима на вертолёте для выполнения следующих задач: обнаружение препятствий по пути полёта (линии электропередачи или неровности рельефа), картографирование местности, а также выявление метеорологических образований, способных помешать движению. По сравнению с оптическими устройствами, радары намного меньше подвержены влиянию погодных условий и способны эффективно работать как в дневное, так и в ночное время. Поэтому, в случае активного круглосуточного использования, необходимо установить на вертолёт бортовую РЛС. Оборудованный таким образом вертолёт способен проводить поиск и сортировку целей, фиксируя и определяя направление движения объектов на земной поверхности при помощи РЛС.

Обычно обзорная РЛС вертолёта обнаруживает цель и определяет её координаты, а затем передаёт их на ограниченные в поле зрения, но зато более точные оптико-электронные и тепловизионные системы управления. Однако в ряде случаев оптические каналы не эффективны – например, при большой дальности до цели в сочетании с плохими метеорологическими условиями: дождём, туманом [3].

Немалое значение имеет расположение антенны РЛС на вертолёте. В том числе, выбор типа расположения может быть связан со способом обзора пространства. Можно выделить следующие типы РЛС: бокового, переднего и кругового обзора. В зависимости от типа, антенна может быть расположена в обтекателе, на фюзеляже либо над винтом вертолёта. В [3] показано, что конфигурация антенны «над несущим винтом» даёт множество преимуществ, в том числе возможность сокращения в несколько раз времени поиска целей и определения их характеристик. Это достигается при помощи постоянного обзора пространства вокруг летательного аппарата. Возможность видеть пространство в 360 градусах от вертолета является важным фактором для бортовых РЛС. Добиться такого при другом расположении антенны РЛС очень сложно, размещение антенны в носовом обтекателе, например, позволяет получить обзор не более чем в 120 градусов по ходу движения.

Однако вышеописанная конфигурация расположения антенны влечёт за собой и некоторые проблемы при использовании. Одна из таких проблем – явление периодических затенений обзора антенны РЛС, связанное с пропаданием фрагментов сигнала из-за влияния вращающихся лопастей. В связи с тем, что данное явление может повлиять на точность работы радиолокационной станции, возникает задача, которую можно сформировать следующим образом. Необходимо разработать алгоритм восстановления формы отражённого сигнала в условиях периодических пропаданий его фрагментов, позволяющий компенсировать эффект влияния лопастей винта вертолёта.

2. Обзор методов решения поставленной задачи

Можно выделить 5 направлений решения проблемы восстановления формы сигнала.

1. Умножение на компенсирующую функцию
2. Интерполяция
3. Аппроксимация
4. Линейное предсказание
5. Compressive sensing

Применяя ***умножение на компенсирующую функцию***, будем считать, что нам известна форма искажающей функции – последовательность прямоугольных импульсов известной длительности и частоты повторения. Следовательно, мы можем умножать сигнал на обратную функцию и восстанавливать исходный сигнал. Однако при наличии аддитивного шума умножение на обратную функцию приводит к резкому возрастанию амплитуды шума в местах усиления сигнала. Фильтрация позволяет избавиться от шума и получить достаточно хорошее восстановление. Такой результат может быть получен на простой модели. При переходе к модели, более близкой к реальному сигналу, отсчетов шума становится очень мало; в целом параметры сигнала становятся такими, что применять фильтрацию оказывается неэффективно. Поэтому данный метод не нашел дальнейшего развития в описываемой работе.

Интерполяция – наиболее очевидный способ решения проблемы влияния лопастей. Как правило, требуется восстановить всего 12 процентов недостающих значений сигнала в одном периоде повторения. Интерполяция при этом демонстрирует высокую эффективность. Данный подход был выбран в работе как наилучший и будет далее раскрыт более детально.

Под ***аппроксимацией*** понимается метод, состоящий в замена одних объектов другими, в каком-то смысле близкими к исходным, но более простыми. При интерполяции функция проходит строго через узловые точки в силу того, что в таком случае у интерполирующей функции количество коэффициентов равно количеству табличных значений. Аппроксимация (метод приближения) позволяет находить значения, отличные от табличных данных, при этом приближенная функция проходит не через узловые точки, а между ними. При использовании данного метода для аппроксимирующей функции необходимо определить аналитический характер эмпирической формулы и наилучшие параметры эмпирической зависимости. Отсюда следуют некоторые сложности применения данного метода. Во-первых, необходимо вручную подбирать для каждого парциального кадра свой вид аппроксимирующей функции, во-вторых, применение данного метода влечёт за собой увеличение времени моделирования. Решающую роль играет заданный тип сигнала. При этом одним типом нельзя описать сигналы из разных парциальных кадров для разных отражателей. Кроме того, как выяснилось, точечные объекты после восстановления методом аппроксимации хорошо видны, однако отображаются зачастую не на своих позициях, поскольку решающее значение имеет тип сигнала, выбранного в качестве аппроксимирующей функции. От данного метода было решено отказаться.

Суть ***линейного предсказания*** состоит в том, что по имеющимся достоверным данным настраивается адаптивный фильтр – на достоверных данных фильтр учится предсказывать будущие значения. Обучив фильтр, можно предсказать потерянные отсчеты сигнала. Однако при практической реализации оказывается, что для настройки фильтра необходимо достаточно большое количество достоверных данных на один период повторения сигнала. Поэтому данный подход в конкретной поставленной задаче также является неэффективным.

В основу подхода ***«сжатой выборки» (compressive sensing)*** положена следующая идея. Если сигнал является разреженным в какой-либо области, то его можно восстановить, даже если он продискретизирован с гораздо меньшей частотой, чем требует теорема Котельникова. Другими словами, если сигнал обладает определенными свойствами (в первую очередь, разреженностью), то он может быть восстановлен по небольшому числу случайно взятых отсчетов. Однако тот факт, что для применения описанного метода необходимо наличие условия разреженности сигнала, значительно ограничивает применение данного метода к решению проблемы, поставленной в данной работе.

2.1. Обзор методов интерполяции

Интерполяция или интерполирование – это приближённое или точное нахождение какой-либо величины по её отдельным известным значениям или по значениям других величин, связанных с ней [4].

Для задачи интерполирования очень важно определить поведение функции между заданными точками. В силу того, что точки таблицы могут быть интерполированы множеством значений различных функций, нужен определённый критерий выбора. Наиболее часто такие критерии основываются на степени гладкости интерполирующей функции или на простоте вычислений. Например, функция должна быть дважды дифференцируемой, а значения модуля её второй производной не должны превышать заданного значения [5].

Большинство интерполирующих функций можно получить из комбинаций нескольких элементарных функций. Линейные комбинации одночленов образуют алгебраические полиномы, комбинации тригонометрических функций – тригонометрические полиномы и т.д.

Наиболее распространённым классом интерполирующих функций исторически является кольцо алгебраических полиномов (многочленов). Многочлены положительно выделяются тем, что их значения просто вычислять. Более того, значения многочленов легко умножать, складывать, дифференцировать и интегрировать. Есть ещё одно полезное свойство многочленов: если c – постоянная величина, а $P_n(x)$ – многочлен n-го порядка, то многочленами тех же порядков также будут $c \cdot P_n(x)$ и $P_n(x + c)$. Существует достаточное количество классов функций с подобными свойствами, но в то же время не все из них обладают удовлетворительными интерполяционными качествами [5].

Ниже рассмотрим канонический полином, а также интерполяционные многочлены Ньютона и Лагранжа.

Приведём формулу канонического полинома степени n:

$$P_n(x) = a_0 + a_1x^1 + a_2x^2 + \cdots + a_{n-1}x^{n-1} + a_nx^n. \quad (1)$$

Выбор многочлена степени n основан на том факте, что через $n+1$ точку проходит единственная кривая степени n. Коэффициенты интерполяционного полинома $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ находятся при решении следующей системы уравнений (2).

$$\begin{cases} a_0 + a_1x_0 + a_2x_0^2 + \cdots + a_{n-1}x_0^{n-1} + a_nx_0^n = y_0 \\ a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 + \cdots + a_{n-1}x_1^{n-1} + a_nx_1^n = y_1 \\ a_0 + a_1x_2 + a_2x_2^2 + \cdots + a_{n-1}x_2^{n-1} + a_nx_2^n = y_2 \\ \dots \\ a_0 + a_1x_n + a_2x_n^2 + \cdots + a_{n-1}x_n^{n-1} + a_nx_n^n = y_n \end{cases} \quad (2)$$

Интерполяционный многочлен можно записать при помощи разных формул, каждая из которых может быть более подходящей в той или иной ситуации. Рассмотрим формулы, наиболее часто использующиеся на практике [6].

Одной из самых популярных является интерполяционная формула Лагранжа. Интерполяционный полином Лагранжа имеет следующий вид (3) [7].

$$P_n(x) = \sum_{i=0}^{n} y_i \cdot L_n(x), \tag{3}$$

где $L_n(x)$ – множитель Лагранжа (4).

$$L_n(x) = \frac{(x - x_0)\dots(x - x_{i-1})(x - x_{i+1})\dots(x - x_n)}{(x_i - x_0)\dots(x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i+1})\dots(x_i - x_n)} = \prod_{\substack{k=0\\k\neq i}}^{n} \frac{(x - x_k)}{(x_i - x_k)}. \tag{4}$$

Объединив (3) и (4), получим выражение для интерполяционного полинома Лагранжа (5).

$$P_n(x) = \sum_{i=0}^{n} y_i \left(\prod_{\substack{k=0\\k\neq i}}^{n} \frac{(x - x_k)}{(x_i - x_k)} \right). \tag{5}$$

Числитель и знаменатель не содержат в себе значения $x = x_i$, т.к. в таком случае результат был бы равен нулю. Интерполяционный полином Лагранжа удобен для применения в теоретических исследованиях: в доказательстве теорем, аналитическом решении математических задач и в прочих подобных случаях.

Основным недостатком построения интерполяционного полинома в форме Лагранжа является то, что при добавлении новых результатов измерений в формуле необходимо заново пересчитывать все слагаемые. В подобных случаях удобнее использовать метод Ньютона, в котором появление нового узла ведёт к добавлению только одного слагаемого к исходному полиному [4].

Пусть есть узлы интерполяции, равноотстоящие по величине, так что $x_{i+1} - x = h = const$, где h – шаг интерполяции, т.е. $x_i = x_0 + n \cdot h$. Тогда интерполяционный многочлен можно записать в форме Ньютона. Интерполяционные полиномы, предложенные Ньютоном, обычно используют, если точка интерполирования находится в начале таблицы (первая интерполяционная формула Ньютона) или в конце таблицы (вторая интерполяционная формула Ньютона).

По первой формуле Ньютона полином можно записать в виде (6).

$$P_n(x) = a_0 + a_1(x - x_0) + a_2(x - x_0)(x - x_1) + \dots + a_n(x - x_0)\dots(x - x_{n-1}). \tag{6}$$

Построение полинома Ньютона сводится к нахождению коэффициентов a_i. При записи коэффициентов пользуются конечными разностями. Конечные разности первого порядка можно записать следующим образом (7).

$$\begin{gathered} \Delta y_0 = y_1 - y_0 \\ \Delta y_1 = y_2 - y_1 \\ \dots \\ \Delta y_{n-1} = y_n - y_{n-1} \end{gathered}, \tag{7}$$

где y_i – значения функции при соответствующих значениях x_i.

Аналогично можно найти конечные разности второго и высших порядков. Общая формула для нахождения всех коэффициентов имеет вид (8).

$$a_i = \frac{\Delta^i y_0}{i!\, h^i}, \tag{8}$$

где $i = 1 \dots n$.

В результате (6) примет вид (9), получим первый полином Ньютона.

$$\begin{gathered} P_n(x) = y_0 + \frac{\Delta y_0}{1! \cdot h}(x - x_0) + \frac{\Delta^2 y_0}{2! \cdot h^2}(x - x_0)(x - x_1) + \dots \\ + \frac{\Delta^n y_0}{n! \cdot h^n}(x - x_0)\dots(x - x_{n-1}). \end{gathered} \tag{9}$$

Для нахождения значений функции в конце интервала интерполирования запишем интерполяционный полином в виде (10).

$$P_n(x) = a_0 + a_1 \cdot (x - x_n) + a_2 \cdot (x - x_n) \cdot (x - x_{n-1}) + \cdots + a_n(x - x_n)(x - x_{n-1}) \dots (x - x_1). \quad (10)$$

Коэффициенты $a_0, a_1, \dots, a_n$ находятся из условия $P_n(x_i) = y_i$. Общая формула для нахождения всех коэффициентов имеет вид (11).

$$a_i = \frac{\Delta^i y_{n-1}}{i!\, h^i}, \quad (11)$$

где $i = 1 \dots n$.

Подставив выражения для нахождения коэффициентов a_i в формулу интерполяционного полинома, получим вторую интерполяционную формулу Ньютона (12).

$$\begin{aligned} P_n(x) = {} & y_n + \frac{\Delta y_{n-1}}{h}(x - x_n) + \frac{\Delta^2 y_{n-2}}{2! \cdot h^2}(x - x_n)(x - x_{n-1}) + \cdots \\ & + \frac{\Delta^3 y_{n-3}}{3! \cdot h^3}(x - x_n)(x - x_{n-1})(x - x_{n-2}) + \cdots \\ & + \frac{\Delta^n y_0}{n! \cdot h^n}(x - x_n)(x - x_{n-1}) \dots (x - x_1). \end{aligned} \quad (12)$$

При интерполировании полиномом Ньютона, в отличие от алгоритма Лагранжа, возможно разделение задачи нахождения коэффициентов и вычисления значений полинома при различных значениях аргумента x [8].

В случае большого объёма данных интерполяционный многочлен имеет достаточно высокую степень. При этом вычисление интерполяционной формулы будет слишком долгим, а погрешность интерполяции на концах интервала будет недопустимо велика из-за накопления ошибок округления, другими словами формула будет неустойчивой. Было бы логично разбить интервал интерполяции с шагом h и на каждом из отрезков строить свой интерполяционный полином. Кусочно-заданная интерполяционная формула, обеспечивающая наиболее высокую для данного класса функций степень гладкости, называется сплайном.

Пусть есть разбиение отрезка [0, 1] на N частей. Длину отрезка $[x_i, x_{i+1}]$ обозначают как h_{i+1}. Сплайном порядка m, соответствующим данной функции $f(x)$ и данным узлам $x_0, \dots, x_n$, называется функция $s_m(x)$, удовлетворяющая следующим условиям:

1. на каждом сегменте $[x_i, x_{i+1}]$ функция $s_m(x)$ является многочленом степени m (m=1 – линейный сплайн, m=2 – квадратичный сплайн, m=3 – кубический сплайн);
2. функция $s^{(k)}(x)$ непрерывна в $x_i, i = 1, \dots, N - 1, k = 1, \dots, m - 1$;
3. $s_m(x_i) = f(x_i)$.

Интерполирующие фрагменты соединяются таким образом, чтобы интерполирующая функция была непрерывна и имела r непрерывных производных. Параметр r называется степенью гладкости сплайна. В частности, если фрагменты интерполирующей функции являются степенными полиномами, говорят о полиномиальной сплайновой интерполяции. Степенью сплайна называется максимальная из степеней многочленов $f_i(x)$. Гладкостью сплайна называется количество непрерывных производных, которые функция имеет на отрезке $[x_0, x_n]$. Разность между степенью и гладкостью сплайна называется дефектом сплайна.

Для кубического сплайна главный полином на каждом интервале можно записать в виде (13).

$$f_{3i}(x) = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i. \quad (13)$$

Чтобы замкнуть систему уравнений, построенную на основе описанных выше условий, нам необходимы ещё два граничных условия для узлов интерполяции, которые можно задавать разным образом. Наиболее высокое качество приближения достигается в том случае, когда эти узлы расположены далеко друг от друга, поэтому в качестве дополнительных условий часто берут выражения для $i = 1$ и $i = n - 2$ (для второго и предпоследнего узлов). Для непериодических функций обычно используют так называемые естественные кубические сплайны, в которых дополнительными условиями являются условия равенства вторых производных нулю в конечных точках интервала интерполяции [9].

При помощи сплайнов удобно приближать функции конечной гладкости. Именно на основе алгоритма интерполяции кубическими сплайнами был построен алгоритм компенсации эффекта лопастей, описанный в разделе 3.

3. Разработка алгоритма компенсации затенений

В рамках разработанного алгоритма для каждого канала дальности каждого парциального кадра сигнала происходит следующее. Спектр сигнала сдвигается таким образом, чтобы его максимальное значение находилось на нулевой частоте. Вычисляется кубический сплайн для вектора из 200 точек сигнала в текущем канале дальности по известным значениям сигнала в узлах интерполяции (в точках, где отсутствует искажение сигнала из-за лопастей винта). В процессе вычисления происходит решение системы линейных уравнений. В силу того, что матрица этой системы является трёхдиагональной, удобно применять метод прогонки.

Метод прогонки включает в себя два этапа. На первом этапе, называемом прямым ходом, матрица системы преобразуется к верхнетреугольному двухдиагональному виду, при этом на главной диагонали будут находиться единицы. На втором этапе (обратный ход), вычисляются неизвестные переменные $x_1, \ldots, x_n$.

После интерполирования полученным кубическим сплайном спектр восстановленного сигнала смещается в исходное состояние.

Метод интерполяции кубическими сплайнами был выбран не только на основе теоретических выводов, но также и на основе проведённых экспериментальных исследований, в процессе которых метод интерполяции сплайнами сравнивался с другими способами интерполяции на примере обработки модели реального сигнала. Более подробно результаты этого сравнения описаны в 3.1.

3.1. Моделирование и исследование методов интерполяции применительно к решению проблемы компенсации затенений

Исходный сигнал без помех от лопастей, представляющий собой модель результата зондирования РЛС земной поверхности, приведён на рисунке 1.

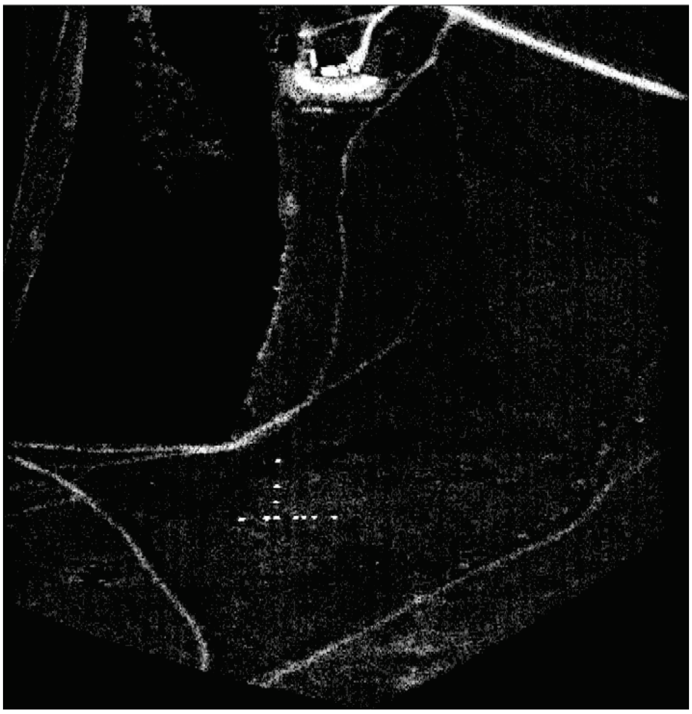

Рисунок 1 – Исходный (эталонный) сигнал

Сигнал, искажённый за счёт действия эффекта затенения лопастями винта, показан на рисунке 2.

Для сравнения степени восстановления сигнала разными интерполяционными методами был выбран наиболее «проблемный» участок сигнала, а именно фрагмент сигнала в 110-м канале дальности 16-го парциального кадра. Степень восстановления оценивалась визуально, по сравнению спектра участка эталонного сигнала со спектром сигнала восстановленного. Также степень восстановления оценивалась по введённому параметру ОСШ, который в данном случае рассчитывается следующим образом: находится отношение максимального «полезного» пика в спектре сигнала к максимальному помеховому пику (см. рисунок 3), полученное значение переводится в децибелы. Также оценивалось время выполнения программы восстановления сигнала.

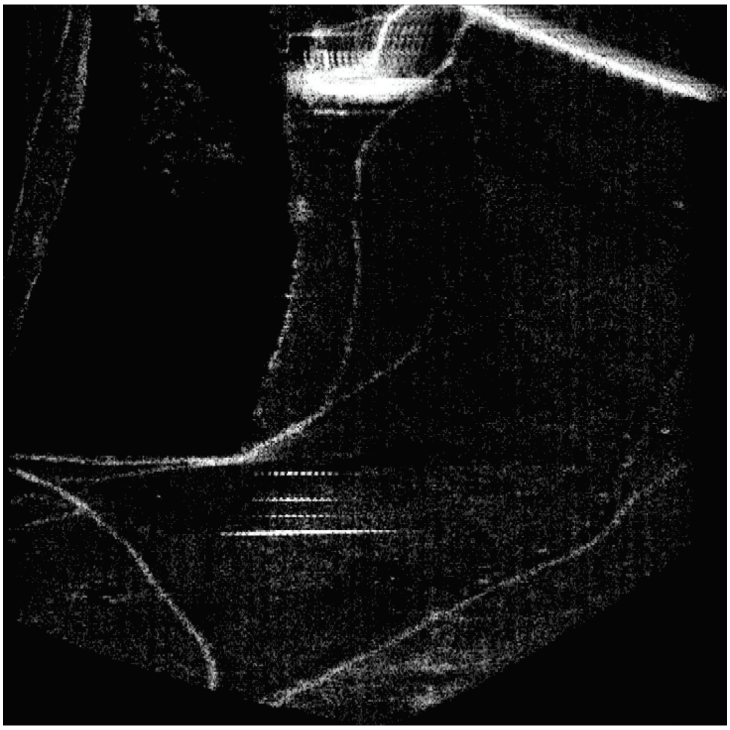

Рисунок 2 – Сигнал с эффектом помех от лопастей

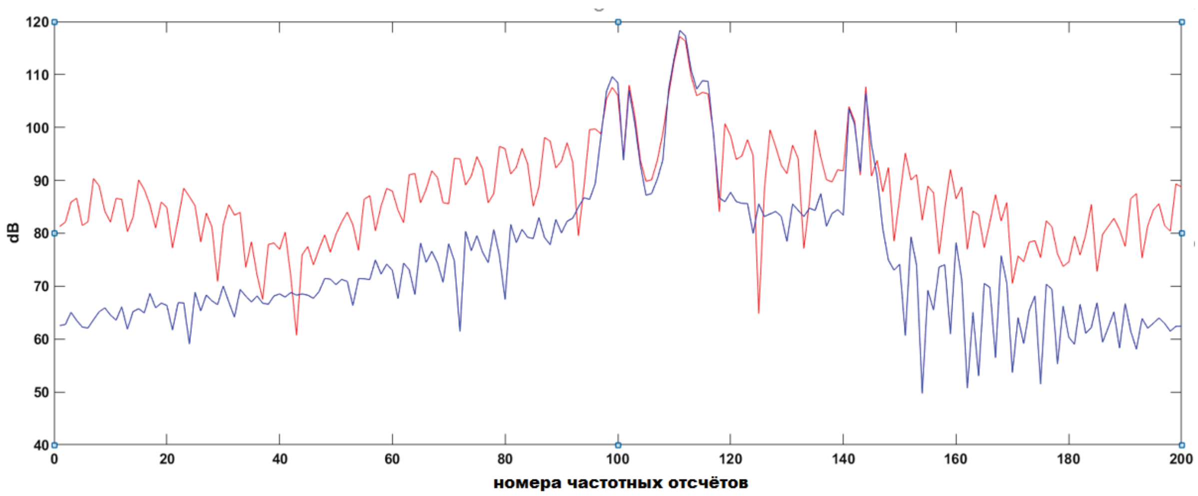

Рисунок 3 – Спектр искажённого фрагмента сигнала (красный цвет) и спектр восстановленного методом сплайн-интерполяции (синий цвет)

В ходе эксперимента сравнивались следующие виды интерполяции: интерполяция полиномами Лагранжа и Ньютона, линейная интерполяция, интерполяция полиномом Эрмита, интерполяция методом Акимы и интерполяция кубическими сплайнами. Результат проведённого сравнения представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение методов интерполяции

	Эталон	Полином Лагранжа	Полином Ньютона	Линейная интерполяция	Полином Эрмита	Метод Акимы	Интерполяция кубическими сплайнами
ОСШ, дБ	31.85	22.77	14.62	25.58	26.86	27.22	30.60
Время, с	5.2	9.8	24.7	11.9	11.9	12.0	12.0

Сигнал, восстановленный при помощи интерполяции кубическими сплайнами, показан на рисунке 4.

Рисунок 4 – Восстановленный сигнал (интерполяция кубическим сплайном)

Как видно из приведённой таблицы 1 и рисунка 4 оптимальным с точки зрения точности восстановления является метод интерполяции кубическими сплайнами. Стоит отметить, что при значениях ОСШ ниже 25 дБ итоговая картинка восстановления изображения является размытой, что говорит о невозможности использования соответствующих алгоритмов (например, полинома Лагранжа, несмотря на выигрыш во времени) для решения поставленной задачи.

4. Заключение

Была поставлена задача компенсации негативного влияния лопастей винта вертолёта. Эффект влияния лопастей вызывает так называемые затенения (пропадания фрагментов сигнала), вследствие чего возникает проблема точного восстановления исходного отражённого сигнала.

Были рассмотрены различные способы решения поставленной задачи. Наиболее подходящим оказался метод интерполяции кубическим сплайном. Данный метод был проанализирован в контексте сравнения с другими интерполяционными методами на примере восстановления смоделированного сигнала отражения подстилающей поверхности, содержащей точечные отражатели.

Была проведена оценка точности восстановления сигнала при помощи сплайн-интерполяции, оценена точность восстановления, а также время выполнения алгоритма на ЭВМ. На основе данных критериев была построена сравнительная таблица методов интерполяции.

Таким образом, поставленная задача была успешно решена. В качестве метода компенсации эффекта затенения сигнала был выбран метод интерполяции кубическими сплайнами. Выбранный метод был применён к модели отражённого сигнала. Полученный результат удовлетворяет требованиям к точности восстановления и временным затратам.

5. Список источников

[1] Кондратенков Г.С. От радиолокации к радиовидению // Радиотехника. 2010. № 7. С. 6–13.
[2] Авиационные системы радиовидения / Г.С. Кондратенков [и др.]. М.: Радиотехника, 2015. 648 с.
[3] Авиационные мобильные малогабаритные радиолокаторы с синтезированной апертурой семейства «Компакт» (принципы реализации и опыт применения) [Электронный ресурс] / С.Л. Внотченко [и др.] // Журнал радиоэлектроники. 2009. № 10. URL: http://jre.cplire.ru/jre/oct09/5/text.html (дата обращения 12.05.2022).
[4] Беклемишев Д.В. Дополнительные главы линейной алгебры. М.: Наука, 1983. 336 с.
[5] Ильин М.Е. Аппроксимация и интерполяция. Методы и приложения: Учеб. пособие. Рязань: РГРТА, 2003. 56 с.
[6] Данилов А.М., Гарькина И.А. Интерполяция, аппроксимация, оптимизация: анализ и синтез сложных систем. Пенза: ПГУАС, 2014. 168 с.
[7] Мойзес Б.Б., Плотникова И.В., Редько Л.А. Статистические методы контроля качества и обработка экспериментальных данных: учебное пособие для среднего профессионального образования. М.: Юрайт, 2019. 118 с.
[8] Гареева Р.Г. Методы обработки информации. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2018. 63 с.
[9] Авхадиев Ф.Г., Губайдуллина Р.К., Насибуллин Р.Г. Учебно-методическое пособие по численным методам анализа. Казань: Казанский федеральный университет, 2019. 113 с.