УДК 62-787.1

**ОСОБЕННОСТИ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ВЕТРОВЫХ КОГЕРЕНТНЫХ ДОПЛЕРОВСКИХ ЛИДАРОВ**

**А. В. Сахарова, А. А. Никонов**

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова*

Традиционным методом оценивания скорости ветра является использование прямых датчиков или чашечных анемометров, устанавливаемых на метеорологических мачтах. Однако для определения параметров структуры поля скоростей ветра в настоящее время все большее распространение получают системы дистанционного зондирования. Они обладают несравнимо большей оперативностью, информативностью и точностью.

Все дистанционные методы оценивания скорости ветра подразделяются на четыре класса: радиолокационные, акустические, радиоакустические и лидарные. Основные ограничения аппаратуры первых трёх методов заключаются в том, что:

1. Радиолокационные устройства не измеряют параметры ветра при отсутствии осадков или специальных трассеров в атмосфере.

2. Радиоакустическая аппаратура чрезвычайно чувствительна к искажению формы фронта отраженного от акустической волны радиосигнала. Такие искажения возникают в условиях сильной турбулентности в атмосфере.

3. Применение акустических систем достаточно эффективно только в случае низкого уровня акустических шумов. В результате, использование такой аппаратуры при наличии высоких шумовых помех, например, на аэродромах, практически невозможно.

Термин LIDAR (от англ. Light Detection and Ranging) относится к системам радиолокации, работающим в оптическом диапазоне и использующим в качестве источника излучения лазер. Часто в зарубежных источниках можно встретить аналогичные термины – LADAR (Laser Detection and Ranging) и Laser Radar. Контроль скорости и направления ветра и своевременное обнаружение опасных ветровых явлений имеет очень важное значение для обеспечения безопасности полётов летательных аппаратов.

Относительно лидарного метода необходимо отметить следующее. Достаточно высокая частота посылок зондирующего импульса лазера делает возможным отслеживание быстроменяющихся вариаций исследуемых параметров атмосферы. Пространственное разрешение, зависящее от длительности зондирующего импульса, позволяет с высокой степенью детализации определить структуру поля скоростей ветра. Использование волн оптического диапазона позволяет сделать приёмно-передающую аппаратуру лидара малогабаритной по сравнению с аналогичными радиотехническими средствами.

Принципиальные отличия отдельных устройств LIDAR заключаются в реализации функции измерения расстояния. Система LIDAR в общем случае включает в себя три основных блока: лазерный передатчик, приёмное устройство, систему регистрации и обработки информации, в каждый из представленных блоков входит ряд узлов. Важнейший узел – подсистема измерения расстояния – состоит, в свою очередь, из таких внутренних подсистем, как лазерный передатчик и электрооптический приёмник. Лазерный передатчик излучает энергию в виде сфокусированного луча, который до выхода из устройства проходит через ряд преобразовательных компонентов: переключатель приёмопередатчика, расширители луча, выходная телескопическая оптика и другое. Зафиксированные значения моментов передачи и приёма лазерного луча используются для расчёта времени, проведённого светом в пути, и, следовательно, расстояния до объекта, отразившего луч. В системе LIDAR обычно используется один из двух режимов, определяющих метод измерения расстояния: импульсный режим или режим непрерывной волны.

Лидар с импульсным излучением, как правило, позволяет проводить зондирование атмосферы на расстояние от сотни метров до десятков километров. В то же время для обеспечения мер авиационной безопасности в приземном слое атмосферы, особенно в районе взлетно-посадочной полосы аэропорта необходимо проводить оперативный мониторинг ветровых характеристик атмосферы на расстоянии от единиц метров до нескольких сотен метров. Непрерывный ветровой лидар предназначен для оперативного дистанционного измерения скорости и направления ветра на заданных высотах (10 - 300 метров), отображения и передачи полученных данных с помощью средств связи на компьютер оператора для дальнейшего анализа.

Основными задачами программно-алгоритмического обеспечения импульсного лидара являются:

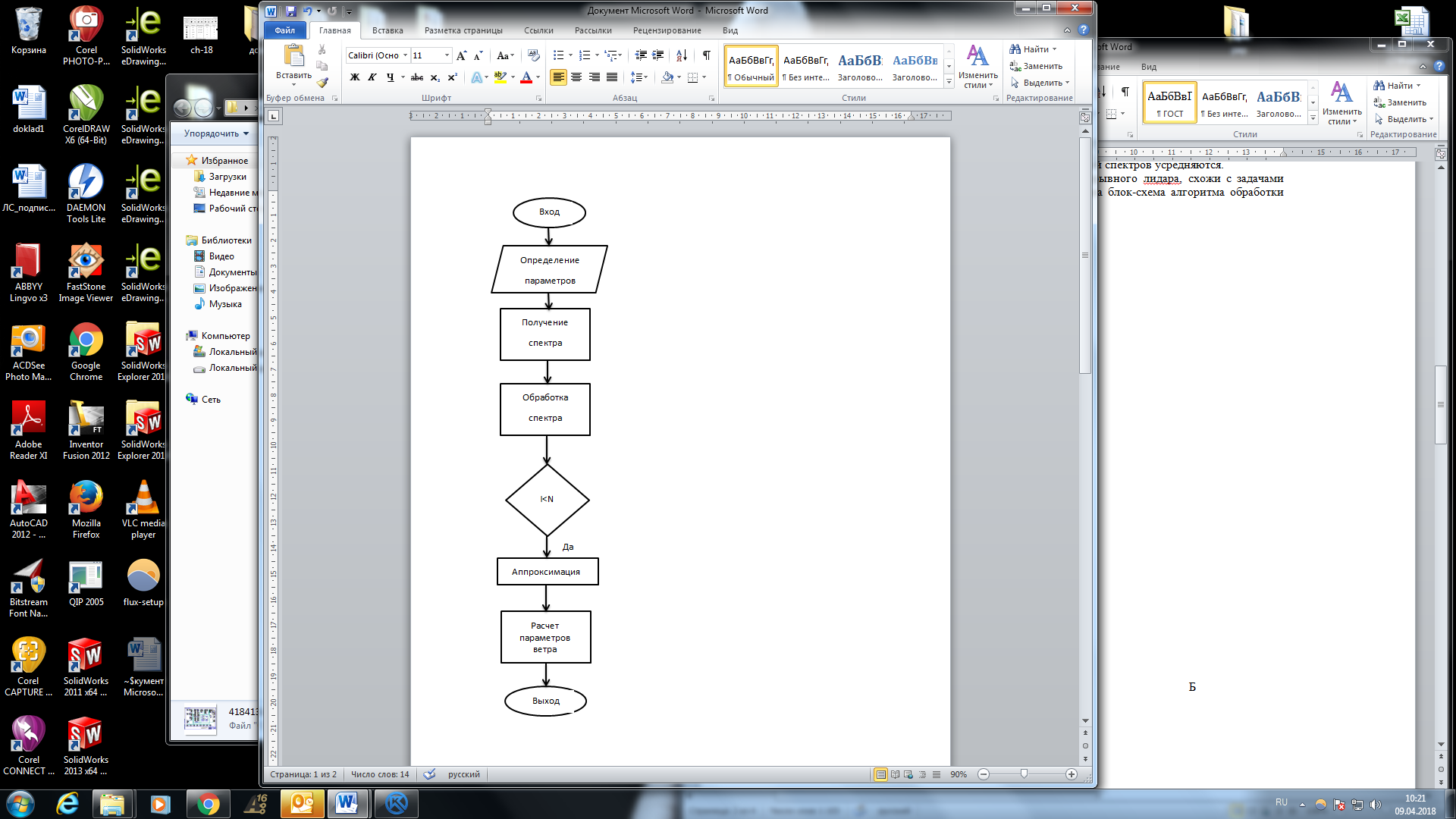
1.     Обнаружение полезного сигнала в спектральных данных и формирование набора частот, характеризующего скоростные параметры воздушных масс.

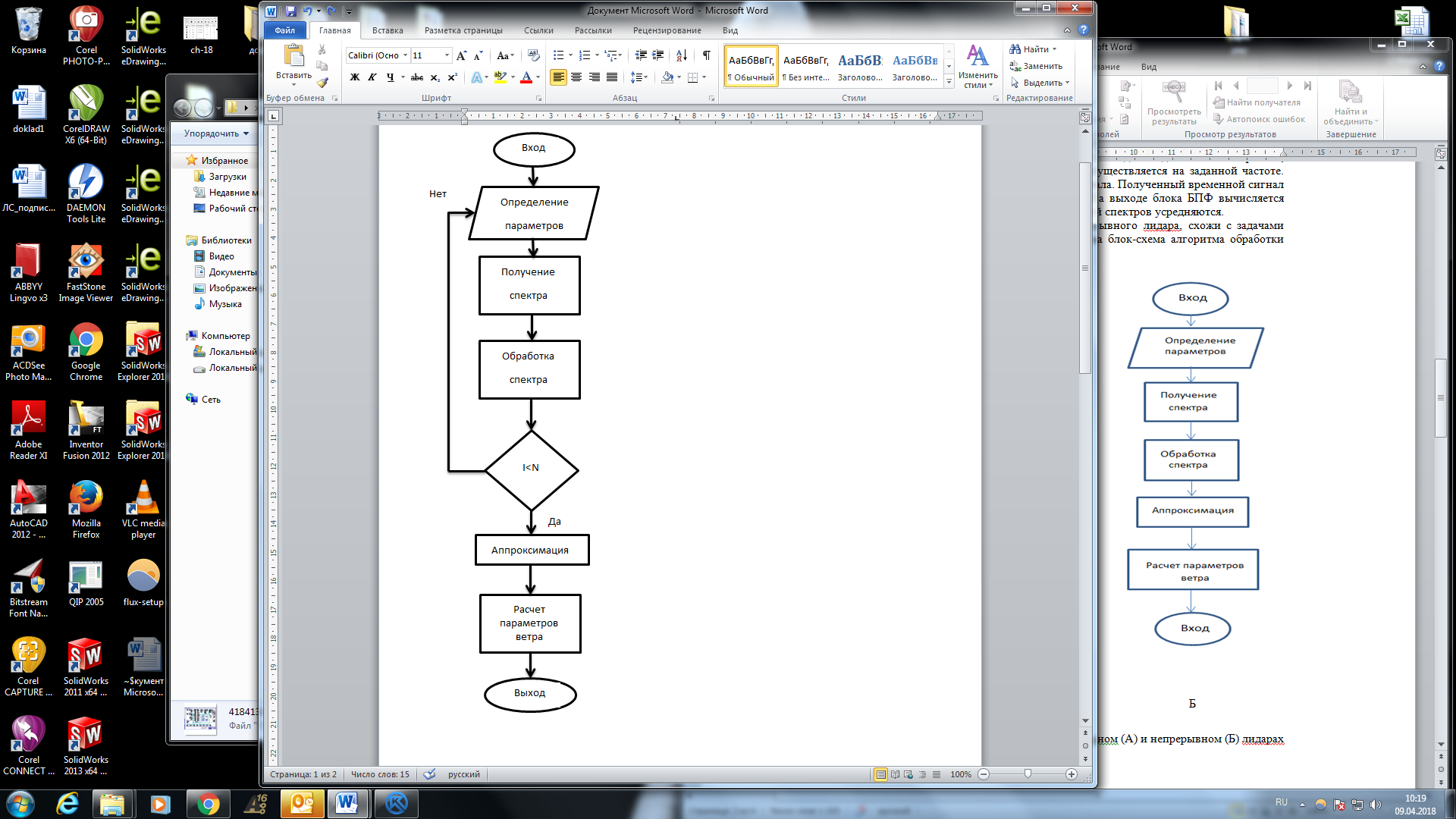
2.     Подготовка спектральных данных для аппроксимации путем удаления выбросов из набора частот с целью уменьшения ошибочных вычислений параметров ветра.

3.     Проведение расчета параметров ветра.

Сигнал с выхода приемника обратно рассеянного излучения содержит переменную составляющую, зависящую от частоты Доплера. Обрабатываемая полоса частот непосредственно задается диапазоном скоростей, определяемых лидаром. Аналого-цифровое преобразование осуществляется на заданной частоте, которая определяется формулой . Объем одиночной выборки содержит отсчеты временного сигнала. Полученный временной сигнал поступает на блок быстрого преобразования Фурье (БПФ). На выходе блока БПФ вычисляется квадрат модуля комплексного Фурье-спектра. Квадраты модулей спектров усредняются.

Задачи программно-алгоритмического обеспечения непрерывного лидара, схожи с задачами обеспечения импульсного лидара. На рисунке 1 представлена блок-схема алгоритма обработки информации в импульсных и непрерывных лидарах.





А Б

Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма обработки сигналов в импульсном (А) и непрерывном (Б) лидарах

В основе цифрового спектрального анализа лежит аппарат дискретного преобразования Фурье (ДПФ), который используется в обработке информации в системе LIDAR. Пусть имеется сигнал который бесконечен во времени. Преобразование Фурье этого сигнала будет представлять собой дельта-импульс . Исходный сигнал указан на рисунке 2 синим цветом. При обработке сигнала мы не можем произвести расчет спектра путем численного интегрирования по всей оси времени, поэтому зафиксируем интервал времени Т на котором будем рассчитывать спектр сигнала.

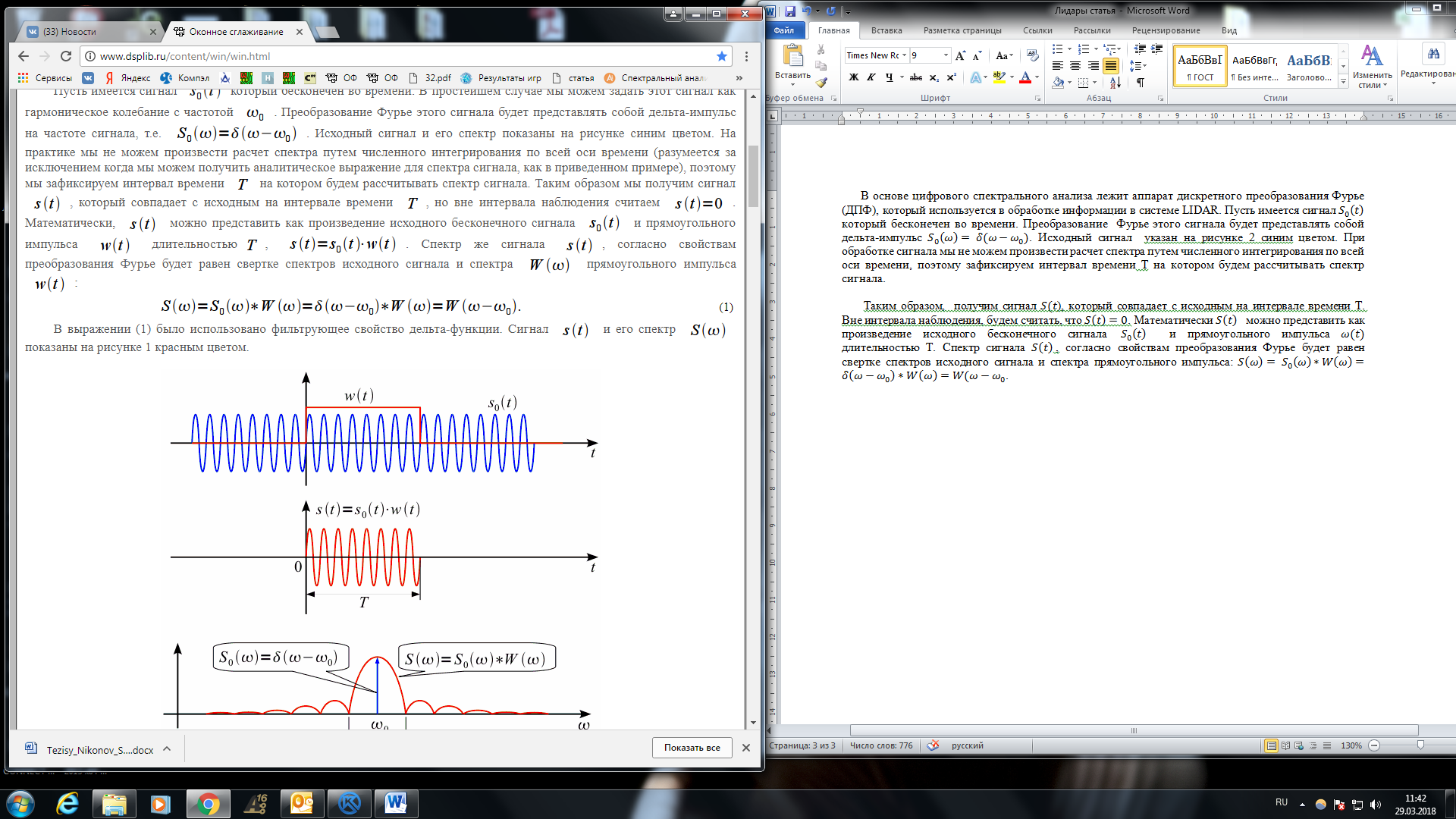


Рисунок 2 – Исходный сигнал и зафиксированный интервал времени

Таким образом, получим сигнал ), который совпадает с исходным на интервале времени Т. Вне интервала наблюдения, будем считать, что . Математически можно представить как произведение исходного бесконечного сигнала и прямоугольного импульса длительностью Т. Спектр сигнала , согласно свойствам преобразования Фурье будет равен свертке спектров исходного сигнала и спектра прямоугольного импульса: ). В выражении было использовано фильтрующее свойство дельта-функции. Спектр и представлен на рисунке ниже.

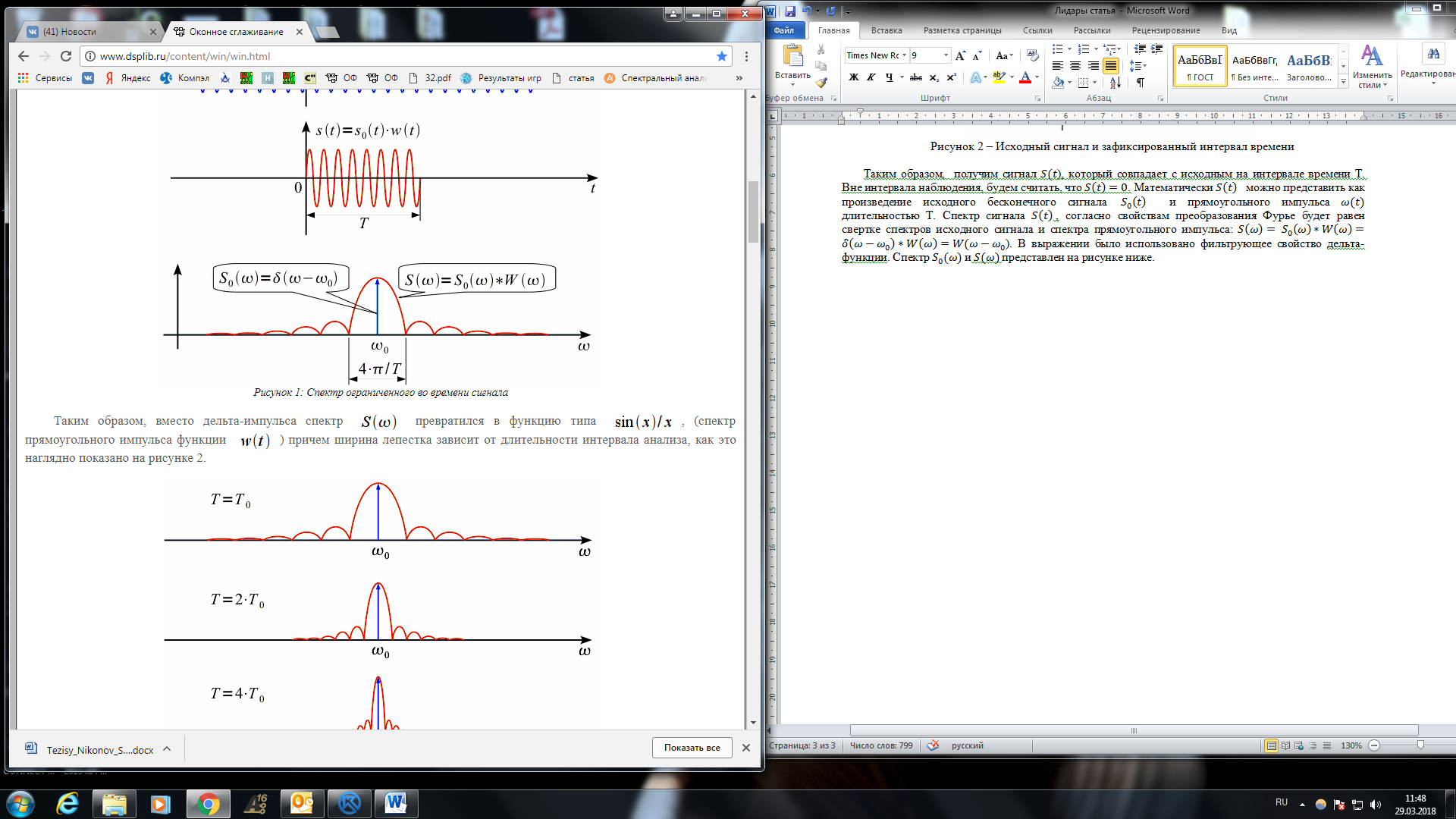


Рисунок 3 – Спектры сигналов и

Если увеличивать интервал анализа Т до бесконечности, то спектр будет сужаться и стремиться к дельта-импульсу. Прямоугольный импульс называется оконной функцией. Оконные функции имеют исключительную важность в обработке сигнала в системе LIDAR. Выражения для часто используемых оконных функций высокого разрешения приведены в таблице 1.

Таблица 1

|  |  |
| --- | --- |
| Наименование окна | Выражение в дискретном виде |
| Прямоугольное окно |  |
| Синус-окно | ) |
| Окно Блэкмана (Blackman window) |  |
| Окно Наталла ( Nuttall window) |  |
| Окно Блэкмана-Наталла (Blackman-Nuttall window) |  |

Каждая оконная функция, представленная в таблице 1,обладает свойствами, представленными в таблице 2, где

– нормированная ширина главного лепестка АЧХ по нулевому уровню;

– нормированная ширина главного лепестка АЧХ по уровню 0,5 (-3 дБ) ;

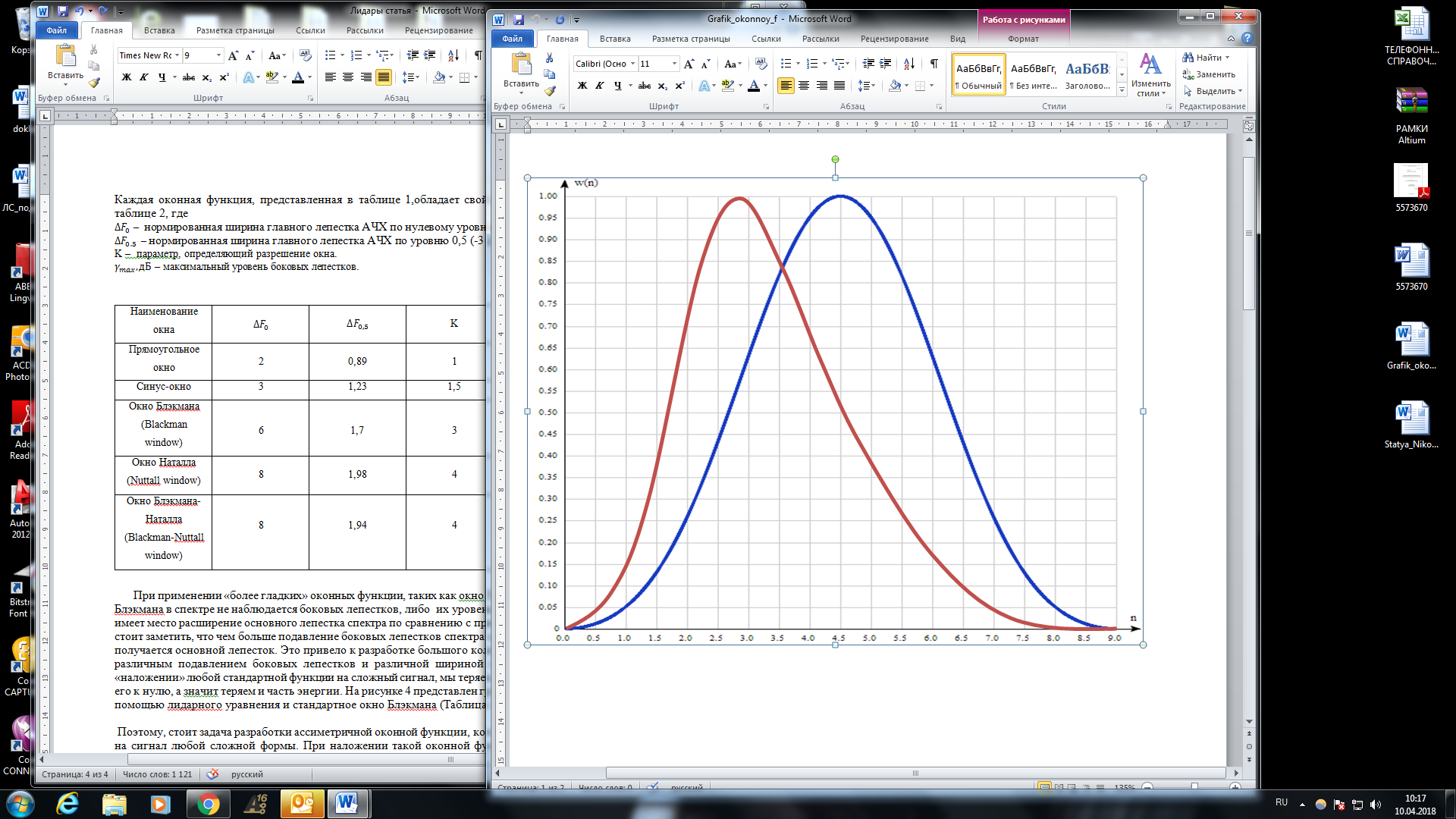
K – параметр, определяющий разрешение окна.

– максимальный уровень боковых лепестков.

Таблица 2

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование окна |  |  | K |  |
| Прямоугольное окно | 2 | 0,89 | 1 | -13 |
| Синус-окно | 3 | 1,23 | 1,5 | -23 |
| Окно Блэкмана (Blackman window) | 6 | 1,7 | 3 | -58 |
| Окно Наталла (Nuttall window) | 8 | 1,98 | 4 | -93 |
| Окно Блэкмана-Наталла (Blackman-Nuttall window) | 8 | 1,94 | 4 | -98 |

При применении «более гладких» оконных функции, таких как окно Ханна, окно Хэмминга, окно Блэкмана в спектре не наблюдается боковых лепестков, либо их уровень заметно снижается, однако имеет место расширение основного лепестка спектра по сравнению с прямоугольным окном. Так же, стоит заметить, что чем больше подавление боковых лепестков спектра оконной функции, тем шире получается основной лепесток. Это привело к разработке большого количества оконных функций с различным подавлением боковых лепестков и различной шириной главного лепестка. На рисунке 4 представлен график огибающей сигнала, построенный с помощью лидарного уравнения и стандартное окно Блэкмана (Таблица 1).

  
Рисунок 4 – Огибающая сигнала и оконная функция

Как видно из рисунка при «наложении» любой стандартной функции на сложный сигнал, мы теряем часть сигнала, приравнивая его к нулю, а значит теряем и часть энергии.

Поэтому, стоит задача разработки ассиметричной оконной функции, которую можно «накладывать» на сигнал любой сложной формы. При наложении такой оконной функции, не терялась бы часть энергии, уровень боковых лепестков в спектре не наблюдался или их уровень был бы существенно мал, а увеличение основного лепестка было бы несущественным, по сравнению с существующими стандартными функциями.

**Библиографический список**

1. А. С. Борейшо, М. А. Коняев, А. В. Морозов, А. В. Пикулик, А .В. Савин, А. В. Трилис, С. Я. Чакчир, Н. И. Бойко, Ю. Н. Власов, С. П. Никитаев, А. В. Рожнов. Мобильные многоволновые лидарные комплексы. Квантовая электроника, 35, №12, 2005.
2. Д. Н. Васильев, М. А. Коняев, М. С. Пенкин, В. Р. Ахметьянов, Я. А. Тезадов, И. В. Шаталов, И. Ф. Ширяевю. Методы и алгоритмы обработки данных ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра с коническим сканированием. Журнал радиоэлектроники №10, 2013
3. Васильев Д.Н., Ахметьянов В.Р., Клочков Д.В., и др. Доплеровский лидарный профилометр для измерения параметров ветра // Измерительная техника.- 2013. - №6. - С. 35-39.
4. Банах В.А., Рам С., Смалихо И.Н., Фалиц A.B. Измерение параметров атмосферной турбулентности сканирующим в вертикальной плоскости импульсным когерентным ветровым лидаром. Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 12. С. 1115-1120
5. Банах В.А., Смалихо И.Н. Когерентные доплеровские ветровые лидары в турбулентной атмосфере. Томск: изд–во Института оптики атмосферы СО РАН, 2013. – 304 с.
6. Плотников А.Д., Сучкова Л.И. Сравнительный анализ приборов и методов измерения скорости и направления ветра/АГТУ им. И. И. Ползунова [Электронный ресурс]. URL: http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pa2010\_2/pdf/119plotnikov.pdf (дата обращения: 3.04.2018)