**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования**

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

**(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | |  |  | ДОПУСКАЕТСЯ К ЗАЩИТЕ: | | | | | | | | | | | | | | |
| Факультет | И | |  | Заведующий кафедрой | | | | | |  | | | | И1 | | | | | | |
|  |  | |  |  | | | | |  | | | | | |  | | |
| Выпускающая кафедра | И1 | |  | | Борейшо А.С. | | |  | | | |  | | | | | | | |
|  |  | |  | | Фамилия ИО | |  | | | | подпись | | | | | | | | | | |
| Группа | И1M31 | |  | «\_20\_» | | декабря | | | | | | | | | | 2018 г. | | |
|  |  | |  |  | |  | | | | | | |  | | | |

**отчет**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | о научно-исследовательской работе | | | | | | | | | | | | | | | | |  |
| наименование практики | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Маслова Льва Юрьевича | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Фамилия, имя, отчество обучающегося | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Обучающегося по**  **направлению/специальности** | | | | | | | 12.04.05 | | |  | | Лазерная техника и лазерные | | | | | | | |
| нужное подчеркнуть | | | | | | | код | | | |  | | полное наименование направления/специальности | | | | |
| технологии | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Руководитель :** | | | | | | | | Коняев М. А., д.т.н., доцент кафедры И1 | | | | | | | | | | |
|  | | | Фамилия ИО, ученая степень, ученое звание, должность | | | | | | | | | | | | | | |
| **Срок написания НИР:** | | | | | с | | 01.09.2018 | | | | | | г. |  | по | 21.12.2018 | | г. |
| **В должности:** | | | магистрант | | | | | | | | | | | | | | | |

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Руководитель магистранта:** | | | |  | |  | |
|  | |  | | Коняев М. А. | |  | |
| Подпись | |  | | Фамилия И. О. | |  | |
| «20» | \_\_декабря\_ |  | 2018 г. | |  | |

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2018 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

[ВВЕДЕНИЕ 3](#_Toc535514846)

[РАЗДЕЛ 1 ОСНОВЫ ЛИДАРНОГО ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА 4](#_Toc535514847)

[1.1 Эффект Доплера 4](#_Toc535514848)

[1.2 Принципы работы непрерывного и импульсного КДЛ 7](#_Toc535514849)

[1.3 Принцип конического сканирования атмосферы. 10](#_Toc535514850)

[РАЗДЕЛ 2 СОСТАВЛЕНИЕ ЛИДАРНОГО УРАВНЕНИЯ 14](#_Toc535514851)

[2.1 Исходные данные 14](#_Toc535514852)

[2.2 Лидарное уравнение 15](#_Toc535514853)

[ВЫВОД 17](#_Toc535514854)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ 18](#_Toc535514855)

# ВВЕДЕНИЕ

В самых различных сферах жизнедеятельности человека требуется информация о ветровых характеристиках атмосферы. В настоящее время для измерений ветра в атмосфере используют контактные приборы — анемометры, устанавливаемые на специальные метеорологические вышки или высотные строения; радиолокаторы метрового и других диапазонов длин волн; акустические локаторы — содары и радиоакустические системы; оптические локаторы — лидары. Каждое из указанных средств измерений имеет свои ограничения. Так, применение анемометров серьезно затрудняется при обледенении, сильных ветрах или при штиле, а зона действия анемометров ограничивается высотой вышки, на которой они установлены. Использование акустических средств ветрового зондирования атмосферы обычно ограничено высотами до 700—900 м и затруднено при осадках и высоком уровне естественных шумов. Нижняя граница измерений радиолокаторов, работающих в дециметровом и метровом диапазонах длин волн, начинается от 500—900 м [1]. Благодаря развитию технологической базы и бурному росту вычислительных мощностей компьютерной техники активно развиваются лидарные методы, в основе работы которых лежит эффект Доплера. В соответствии с достигнутым техническим уровнем в нормативных документах ICAO в настоящее время рекомендуется внедрение ветровых когерентных доплеровских лидаров (КДЛ) в систему метеорологического обеспечения авиационной безопасности [2]. В данной работе будут рассмотрены теоретические основы работы когерентных доплеровских лидаров, а также предложен расчёт лидарного уравнения и энергетический расчёт КДЛ по исходным данным.

# РАЗДЕЛ 1 ОСНОВЫ ЛИДАРНОГО ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА

1.1 Эффект Доплера

Если источник звука и наблюдатель движутся друг относительно друга, то частота звука, воспринимаемого наблюдателем, не совпадает с частотой источника звука. Это явление, открытое в 1842 г., носит название эффекта Доплера. Звуковые волны распространяются в воздухе (или другой однородной среде) с постоянной скоростью, которая зависит только от свойств среды. Однако, длина волны и частота звука могут существенно изменяться при движении источника звука и наблюдателя. Рассмотрим простой случай, когда скорость источника υИ и скорость наблюдателя υН относительно среды направлены вдоль прямой, которая их соединяет. За положительное направление для υИ и υН можно принять направление от наблюдателя к источнику. Скорость звука υ всегда считается положительной. Рисунок 1.1 иллюстрирует эффект Доплера в случае движущегося наблюдателя и неподвижного источника.

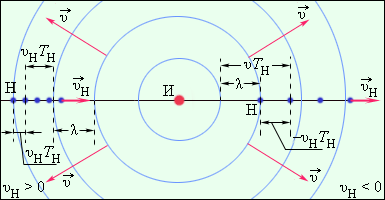


Рис. 1.1- Эффект Доплера. Случай движущегося наблюдателя. Последовательные положения наблюдателя показаны через период TН звука, воспринимаемого наблюдателем.

Рис. 1.1 иллюстрирует эффект Доплера в случае движущегося наблюдателя и неподвижного источника. Период звуковых колебаний, воспринимаемых наблюдателем, обозначен через TН. Из рис. 1.1 следует:

υН*T*Н + υ*T*Н = λ (1)

Принимая во внимание и получим:

(2)

Если наблюдатель движется в направлении источника (υН > 0), то fН > fИ, если наблюдатель движется от источника (υН < 0), то fН < fИ.

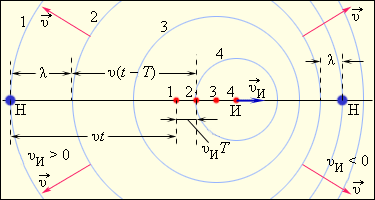


Рис. 1.2- Эффект Доплера. Случай движущегося источника. Последовательные положения источника показаны через период T звука, излучаемого источником.

На рис. 1.2 наблюдатель неподвижен, а источник звука движется с некоторой скоростью υИ. В этом случае согласно рис. 1.2 справедливо соотношение:

υ*t* + υИ*T* = υ(*t* – *T*) + λ  или  (υИ + υ)*T* = λ, (3)

где и

Отсюда следует:

(4)

Если источник удаляется от наблюдателя, то υИ > 0 и, следовательно, fН < fИ. Если источник приближается к наблюдателю, то υИ < 0 и fН > fИ. В общем случае, когда и источник, и наблюдатель движутся со скоростями υИ и υН, формула для эффекта Доплера приобретает вид:

(5)

Это соотношение выражает связь между fН и fИ. Скорости υИ и υН всегда измеряются относительно воздуха или другой среды, в которой распространяются звуковые волны. Это так называемый нерелятивистский Доплер-эффект. В случае электромагнитных волн в пустоте (свет, радиоволны) также наблюдается эффект Доплера. Так как для распространения электромагнитных волн не требуется материальная среда, можно рассматривать только относительную скорость υ источника и наблюдателя. Выражение для релятивистского Доплер-эффекта имеет вид:

(6)

где c – скорость света. Когда υ > 0, источник удаляется от наблюдателя и   
fН < fИ, в случае υ < 0 источник приближается к наблюдателю, и fН > fИ.

1.2 Принципы работы непрерывного и импульсного КДЛ

При отражении излучения лазера от частиц аэрозоля, увлекаемых ветровым потоком, наблюдается допплеровский сдвиг частоты колебаний световой волны. Разница частот зондирующего излучения и регистрируемого сигнала обратного рассеяния соответствует радиальной составляющей скорости ветра:

(7)

где Vr – радиальная составляющая скорости ветра, то  есть проекция мгновенного вектора скорости V = {Vx, Vy, Vz} на  направление зондирования, Δf = fd  – непосредственно измеряемый допплеровский сдвиг частоты лазерного излучения, λ  –  длина волны зондирующего излучения.

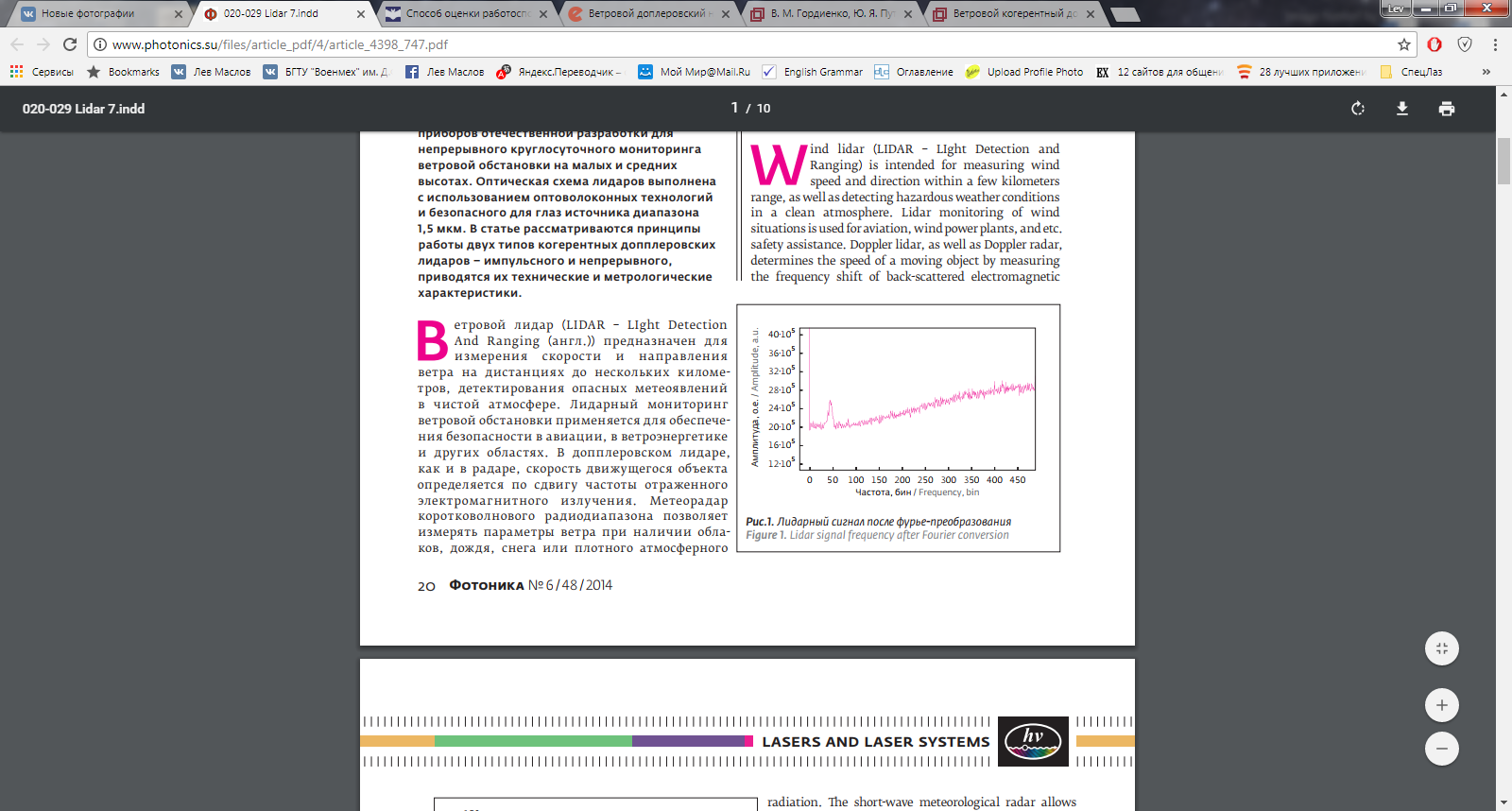
При оптическом смешении принимаемого излучения с опорным в электрической цепи фотоприемника появляется частотная составляющая, соответствующая допплеровскому сдвигу. Положение максимума допплеровского пика фурье-преобразованного сигнала соответствует скорости ветра в измеряемом объеме воздуха (рис.1.3).

Рис. 1.3 –Лидарный сигнал после фурье-преобразования.

Пространственное разрешение измерений определяется режимом работы лазера, оптической схемой лидара и способом обработки данных. Существуют два типа лидаров – с непрерывным и импульсным источниками излучения.

В лидаре непрерывного излучения дистанция по трассе измерения задается областью фокусировки лазерного луча приемо-передающим телескопом с переменным фокусным расстоянием. Пространственное разрешение Fn можно считать по полуширине весовой функции Лоренца, определяющей эффективность рассеяния из фокальной точки:

(8)

где: f  – дистанция фокусировки, r  – дистанция по лучу, Zr – рэлеевская длина перетяжки.

Такая схема обеспечивает аккуратное профилирование ветра по высоте на малых высотах (10–150 метров) с высоким пространственным разрешением (1–20 м) при диаметре апертуры телескопа 100 мм. Зависимость полуширины весовой функции Лоренца от дистанции фокусировки является квадратичной, поэтому пространственное разрешение измерений ухудшается с высотой (рис.1.4).

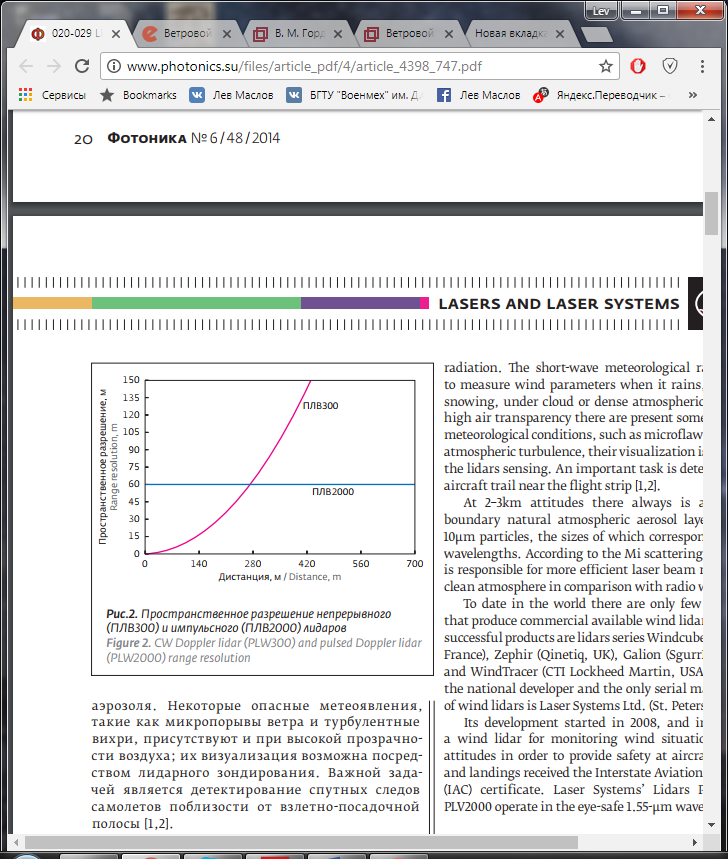


Рис. 1.4 Пространственное разрешение непрерывного (ПЛВ300) и импульсного (ПЛВ2000) лидаров.

Импульсный лидар позволяет проводить измерения на больших высотах. Пространственное разрешение (дискретизация по трассе измерения) такого лидара определяется длительностью импульса излучения и является постоянной на всех высотах зондирования (см. рис.1.4). Для проведения измерений требуются импульсы с длительностью не менее 400 нс, что соответствует пространственному разрешению 60 м. Использовать более короткие импульсы нецелесообразно, так как это привело бы к уменьшению точности измерения скорости ветра: чем меньше длительность оптического импульса, тем шире его частотный спектр, согласно принципу неопределенности Гейзенберга.

На дистанциях измерений менее 300 м непрерывный лидар имеет лучшее пространственное разрешение, что делает его незаменимым инструментом для детектирования низко высотного сдвига ветра и (или) микропорывов на ответственных участках глиссады, которые чрезвычайно опасны при посадке или взлете воздушного судна. В то же время на высотах более 300 метров преимущество оказывается у импульсного лидара ПЛВ2000 благодаря фиксированному пространственному разрешению [3].

1.3 Принцип конического сканирования атмосферы.

Работа КДЛ построена на допущении, что лазерное излучение на частоте f по мере распространения в атмосфере рассеивается на аэрозольных частицах. С учетом скорости движения этих частиц частота обратно рассеянной волны изменяется согласно эффекту Доплера. В рассматриваемом типе когерентных доплеровских ладарах приемник рассеянного аэрозольными частицами сигнала расположен в том же месте, где и передатчик. Следовательно, выражение для частотного сдвига может быть записано следующим образом:

(9)

где Vr – радиальная составляющая скорости ветра или иначе проекция мгновенного вектора скорости V={Vx, Vy, Vz} на направление зондирования. Таким образом:

(10)

где – непосредственно измеряемый доплеровский сдвиг частоты.

Необходимо отметить, что в существующих и разрабатываемых КДЛ может использоваться как импульсное, так и непрерывное лазерное излучение. КДЛ 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 (ВПП) аэропорта необходимо проводить оперативный мониторинг ветровых характеристик атмосферы на расстоянии от единиц метров до нескольких сотен метров[4].

Для получения полной информации о скорости ветра необходимо проводить измерения, как минимум, при трех различных положениях зондирующего пучка в пространстве. Для этого используются различные методы сканирования атмосферы. В соответствии с известными методами КДЛ может работать в таких режимах сканирования, как RHI, PPI, VAD, либо их различная комбинация.

1. Range Height Indicator (RHI) – режим, при котором азимутальный угол остается постоянным, а угол места изменяется в определенном диапазоне.

2. Plan Position Indicator (PPI) – режим, при котором угол места остается фиксированным, как правило менее 10°, а азимутальный угол меняется либо во всем возможном диапазоне, либо в выбранном секторе.

3. Velocity Azimuth Display (VAD) – режим измерения производятся на нескольких азимутальных углах (обычно не менее 3) при фиксированном угле места (обычно 20° - 30° от вертикали).

Как было сказано выше, для получения полной информации о трех компонентах вектора скорости ветра в декартовой системе координат V={Vx, Vy, Vz}={u,v,w} с помощью КДЛ необходимо провести измерения, как минимум, при трех различных положениях зондирующего пучка в пространстве.

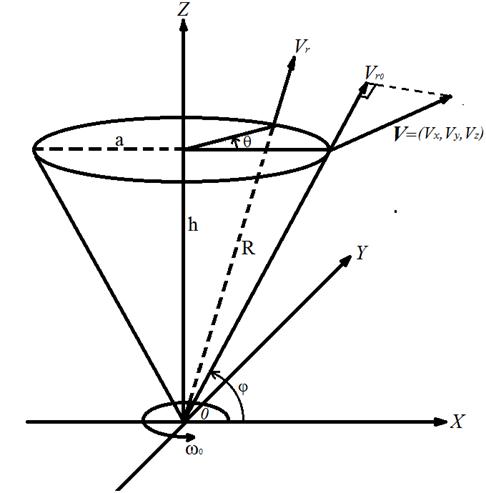


Рис. 1.3- Принцип конического сканирования.

В соответствии с рисунком 1.3, поясняющим принцип конического сканирования атмосферы, на заданной высоте h, определяемой необходимостью измерения, радиальную составляющую скорости ветра можно записать следующим образом:

(11)

где  - угол азимута лазерного луча, который изменяется в интервале [0;2π), а *φ* - угол места лазерного луча, изменяющийся в диапазоне [0; π/2].

Таким образом, при измерении радиальной скорости ветра в одной точке записывается только одно уравнение при трех неизвестных. При измерении радиальной составляющей скорости ветра в трех независимых точках в пространстве на заданной высоте для трех неизвестных параметров записывается система из трех независимых уравнений. Решение данной системы уравнений позволяет определить полный вектор скорости ветра. При непрерывном вращении лазерного луча по углу азимута путем отбора его дискретных положений получается переопределенная система уравнений, которая решается методом наименьших квадратов[5].

Отметим, что измерение полного вектора скорости ветра при коническом сканировании воздушного пространства лазерным лучом на различных высотах достигается путем соответствующего изменения фокусного расстояния оптической системы КДЛ. Ключевым моментом принципа конического сканирования является предположение о “замороженности” ветровых характеристик атмосферы за время сканирования на заданной высоте. Поэтому в разработанном алгоритме измерение на одной высоте происходит в течение одной секунды.

В случае, когда ветровые характеристики атмосферы за период полного сканирования лазерным лучом по углу азимута на заданной высоте остаются постоянными, радиальная составляющая вектора скорости ветра изменяется по синусоидальному закону, как это показано на рисунке 1.4:

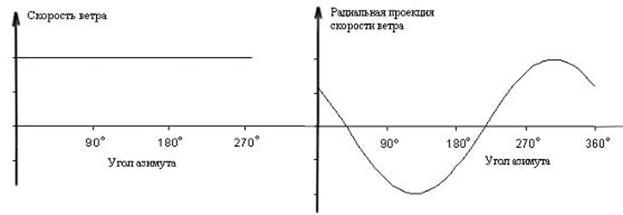


Рис. 1.4- Закон изменения радиальной составляющей скорости ветра при постоянстве ветровых характеристик атмосферы при коническом сканировании.

Так как практически осуществляется измерение абсолютных значений доплеровского сдвига частоты, то и полученные результаты должны аппроксимироваться следующей функцией:

(12)

где a, b– аппроксимирующие коэффициенты.

Направление ветра по азимуту определяется как угол, соответствующий максимальной положительной скорости. Величина горизонтальной составляющей скорости определяется амплитудой гармонической функции. Вертикальным смещением полученного графика определяется величина вертикальной составляющей вектора скорости.

РАЗДЕЛ 2 СОСТАВЛЕНИЕ ЛИДАРНОГО УРАВНЕНИЯ

2.1 Исходные данные

При решении лидарного уравнения были использованы следующие исходные данные, представленные в таблице 1.

Таблица 1

|  |  |
| --- | --- |
| **Параметры приемо- передающей системы:** | |
| Длина волны излучения, нм | 1557,3 |
| Пиковая мощность излучения, Вт | 250 |
| Длительность импульса, нс | 400 |
| Частота повторения импульсов, кГц | 10 |
| Диаметр пучка на выходе, мм | 100 |
| Расходимость излучения, мрад | 0,025 |
| Диаметр апертуры приемной части, мм | 100 |
| Поле зрения приемной части, мрад | 0,15 |
| Пропускание приемной части | 0,6 |
| Приемник | ThorLabs PDB415 |
| NEP,пВт/Гц1/2 | 7 |
| Полоса пропускания приемника, ГГц | 100 |

2.2 Лидарное уравнение

Эффективность работы лидара определяется несколькими факторами, часть которых зависит от атмосферы, например, коэффициент обратного рассеяния β, м-1ср-1 и коэффициент ослабления α, м-1. Они определяют мощность рассеянного зондирующего излучения, которая собирается приемной апертурой лидара. В данной работе делаетются следующие допущения:

1. Рассеяние происходит только на молекулах, т.е. аэрозольные составляющие β и α не учитываются («чистое небо»).
2. Рассеяние однократное.
3. Геометрический фактор лидара постоянен и равен 1.

Тогда уравнение лазерного зондирования атмосферы на длине волны λ описывается уравнением лазерной локации, справедливым в условиях малого вклада многократного рассеяния:

(13)

где P0-пиковая мощность импульса лазера; r- дальность, с которой принимается сигнал; λ- длина волны лазера; ηall- общая эффективность лидарной системы; с- скорость света; τ- длительность лазерного импульса; Ar- площадь приемной антенны; β(λ,r)- коэффициент обратного рассеяния; α(λ,r)- коэффициент ослабления.

Общая эффективность ηall включает в себя эффективность передающей приемной системы, потери, связанные с юстировкой приемника, эффективность фотодетектора и другие факторы.

Коэффициент ослабления в случае только молекулярного ослабления рассчитывается по следующей формуле:

(14)

где n- показатель преломления воздуха; δ-коэффициент деполяризации воздуха; Ns – плотность молекул для стандартных условий у поверхности земли (p0=1013,25 кПа , T0=200 С). Профили температуры и давления были получены на основании стандартной модели атмосферы по следующим формулам:

(15)

Для связи молекулярного ослабления и рассеяния назад используется молекулярное лидарное отношение:

(16)

В результате проведённых расчётов была получена зависимость мощности обратнорассеяного сигнала (Вт) от высоты зондирования (м), представленная на рисунке 2.1:

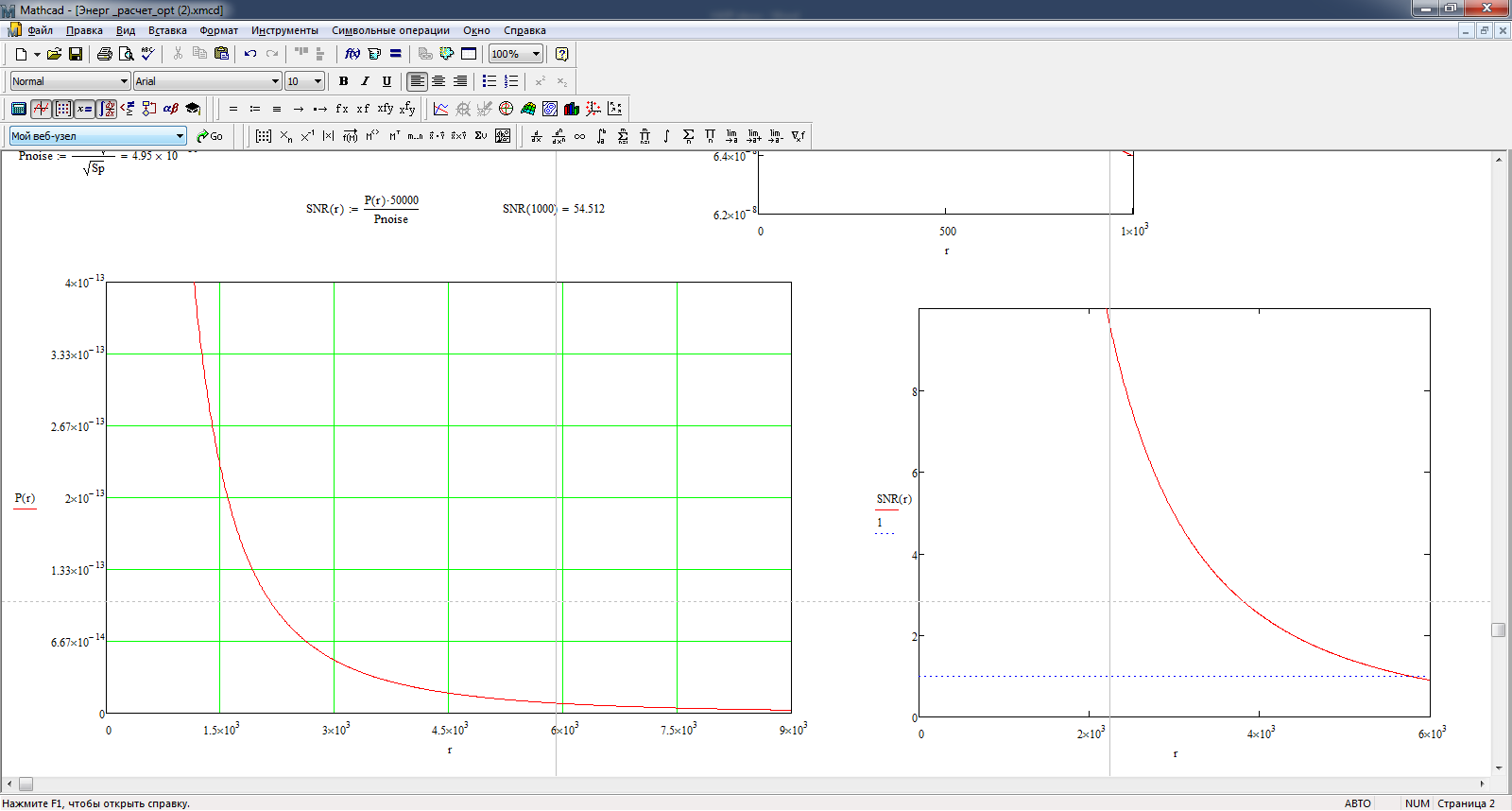


Рис. 2.1 – Результат решения лидарного уравнения.

ВЫВОД

Задача данной исследовательской работы заключалась в изучении устройства работы КДЛ с последующим решением лидарного уравнения. Для этих целей был исследован значительный пласт знаний в области лидарного зондирования, а именно были приведены основные принципы работы лидаров, в частности доплеровских. Было приведено описание эффекта Доплера, а также был рассмотрен конический способ сканирования атмосферы. Было рассмотрено лидарное уравнение с некоторыми допущениями для облегчения процесса первичного расчета. В результате решения данного лидарного уравнения была получена зависимость P(r) для случая молекулярного рассеяния (рис. 2.1). Проанализировав данное решение лидарного уравнения с учетом NEP было установлено, что при данных аппаратных константах в условиях отсутствия аэрозолей мощность шума на несколько порядков превышает мощность обатнорассеяного сигнала для всего интервала высот. Данный факт говорит о том, что при исходных параметрах лидара в условиях отсутствия аэрозоля в атмосфере какое-либо детектирование невозможно. Из этого следует то, что при дальнейших расчётах необходимо переопределить исходные параметры системы так, чтобы SNR полученной системы был по крайней мере не меньше 10. Для полной оценки необходимо учитывать также влияние реально существующих атмосферных аэрозолей, т.к. они очень сильно влияют на мощность обратно рассеянного сигнала.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Банах В.А. Когерентные доплеровские ветровые лидары в турбулентной атмосфере. Томск: Изд-во Ин-та оптики атмосферы СО РАН, 2013. 303 с.
2. Ахметьянов В.Р. Васильев Д.Н. Клочков Д.В. Коняев М.А. и др.  Лидарный доплеровский профилометр для измерения параметров ветра в составе наземного комплекса метеорологического обеспечения аэронавигации.  Авиакосмическое приборостроение. – 2013, №9, С. 41-52.
3. Смалихо И.Н. Ветровое зондирование когерентными доплеровскими лидарами: Дис. … доктора физико-математических наук: 01.04.05. – Томск, 2011. – 315 с.
4. Ахметьянов В.Р., Васильев Д.Н., Клочков Д.В., и др. Доплеровский лидарный профилометр для измерения параметров ветра // Измерительная техника.- 2013. - №6. - С. 35-39.
5. Борейшо А.А., Ахметьянов В.Р., Васильев Д.Н., Заморин И.С., Пенкин М.С., Клочков Д.В. Место и роль лидарного профилометра в системе метеообеспечения аэропорта // МЕТЕОСПЕКТР. – 2012. - №4, - С. 62-67.
6. Борейшо А. С., Коняев М. А., Морозов А. В., и др. Мобильные многоволновые лидарные комплексы. – Квантовая Электроника, 2005. № 12 (35), с.1167–1177.
7. Савин А. В., Коняев М. А.  Допплеровские метеолидары для систем обеспечения вихревой безопасности полетов. – Метеоспектр, 2008, № 1, c. 147–152.
8. Привалов В.Е., Шеманин В.Г. Параметры лидаров для дистанционного зондирования газовых молекул и аэрозоля в атмосфере. – С.-Пб: Изд-во БГТУ, 2001.