Московский Государственный Авиационный Институт

кафедра 407

Реферат

на тему

"Влияние среды распространения на точностные характеристики оптических измерительных систем”

Написал: студент гр. 04-501

Лебедев А.Г.

Проверил: Петрухин Г.Д.

Москва 1996



*Рисунок 1*

Схема облучения слоя атмосферы

**Дальность лазерной локации.** Дальность действия лазерного локатора в условиях земной атмосферы ограничивается особенностями распространения оптических сигналов (зондирующих и отраженных) на трассе локации. Обычно атмосфера (особенно тропосфера) имеет локально неоднородную структуру (пыль, тепловые флуктуации ее параметров, загрязнения воздуха и т.п.), что приводит к поглощению и рассеянию, т.е. к ослаблению лазерного излучения при его распространении. В отличие от РЛС[[1]](#footnote-1) при работе ЛЛС[[2]](#footnote-2) в атмосфере поле на оси пучка первичного лазерного излучения при достаточно большом удалении от передатчика лазерного локатора почти полностью определяется рассеянной компонентой излучения. Кроме того, наличие неоднородностей среды вызывает значительную пространственную диффузию энергии лазерного излучения в направлении от оси излучения: лазерный пучок по мере удаления от источника излучения расплывается в пространстве. Это приводит к дополнительному ослаблению лазерного излучения на оси пучка, что, в свою очередь, обусловливает дополнительное уменьшение дальности действия, а также угловой точности и разрешающей способности лазерного локатора.

Для приближенных расчетов оптические среды, в которых распространяется поток монохроматического (лазерного) излучения, считают однородными (изотропными). При этом зависимость ослабления от длины волны излучения в среде может иметь как селективный, так и не селективный характер.

Рассмотрим основные закономерности ослабления лазерного излучения в оптической среде. Пусть пучок параллельных лучей монохроматического потока излучения  на длине волны λ входит в слой однородной среды толщиной (протяженностью) *l* (*Рисунок 1)*. Предполагая, что частицы среды ослабляют поток излучения независимо друг от друга, можно представить изменение (уменьшение) его величины при прохождении слоя среды толщиной *dl* соотношением



Формула

где σλ — коэффициент ослабления потока монохроматического излучения, зависящий в общем случае от свойств среды и длины волны, км-1; dl — толщина элементарного слоя среды, км.

При интегрировании *Формула 1* по *l* для случая однородной оптической среды получим известное выражение закона Бугера:



Формула

где Φlλ — поток монохроматического излучения на выходе слоя среды.

На основании *Формулы 2* можно записать выражение закона Бугера через интенсивность излучения:



Формула

где J0λ, Jlλ — интенсивности монохроматического излучения до и после прохождения слоя среды, Вт/стерад.



*Рисунок 2*

Зависимость спектрального коэффициента пропускания чистой атмосферы от длины волны

Спектральный коэффициент прозрачности среды протяженностью 1 км (удельное пропускание)



Произведение  называют оптической толщиной слоя среды, а экспоненциальный множитель в выражении *Формула 3*

**

—спектральным коэффициентом пропускания (прозрачности) оптической среды. Зависимость *T*aλ=*f*(λ) для атмосферы имеет селективный характер (*Рисунок 2*).

Таким образом, выражение *Формула 3* принимает следующий вид:



Рассмотрим основные факторы, определяющие величину ослабления (затухания) лазерного излучения в атмосфере Земли. Такими факторами являются селективное молекулярное поглощение и рассеяние, а также селективное рассеяние на частицах (аэрозолях). Как известно, атмосфера Земли представляет собой оптическую среду, состоящую из смеси газов и водяного пара со взвешенными в ней посторонними твердыми и жидкими частицами — аэрозолями (капельки воды, появляющиеся при конденсации водяного пара, пылинки, частицы дыма и т. п.), размер которых колеблется от 5-10-6 до 5-10-3см. Азот (78%) и кислород (21%) являются основными постоянными компонентами приземного слоя атмосферы. На долю других газов (углекислый газ, водород, озон, аргон, ксенон и др.) приходится менее одного процента объема. На оптические свойства (прозрачность) атмосферы в основном влияют вода в газовой и жидкой фазах, углекислый газ, озон, а также аэрозоли. Содержание их в атмосфере Земли различно на разных высотах, в разных географических районах и зависит от метеорологических условий. Кроме того, состав атмосферы непрерывно меняется из-за турбулентности, т. е. хаотических вихревых движений слоев атмосферы. Концентрация водяного пара в атмосфере зависит от географического положения района, времени года, высоты слоя атмосферы, местных метеоусловий и колеблется по объему от 0,001 до 4%. Основное количество водяного пара сосредоточено в нижнем пятикилометровом слое и резко уменьшается с дальнейшим увеличением высоты.

Концентрация СО2 при увеличении высоты от 0 до 25 км меняется незначительно: от 0,03 до 0,05% по объему. Концентрация же озона по высотам неравномерна. Основная его часть находится в слоях атмосферы на высоте 15—40 км с максимумом концентрации на высоте до 25—30 км (более 0,001%); в нижних слоях атмосферы (высота до 20—25 км) концентрация озона не превосходит 10-5%. Оксид углерода имеет полосу поглощения на длине волны 47 мкм; озон — слабую полосу поглощения при 4 мкм и сильную на длинах волн 4,5 и 7,8 мкм.

Ослабление излучения в атмосфере обусловлено не только его поглощением, но и рассеянием. Вследствие оптической неоднородности атмосферы возникают преломление, отражение и дифракция электромагнитных колебаний на этих неоднородностях. Если размеры частиц, взвешенных в атмосфере, малы по сравнению с длиной волны колебаний, то происходит молекулярное рассеяние, которое подчиняется закону Релея. Согласно этому закону интенсивность рассеяния излучения обратно пропорциональна длине волны в четвертой степени. Молекулярное рассеяние значительно в видимой и инфракрасной областях спектра. Ослабление излучения в результате релеевского рассеяния может быть во много раз больше, чем молекулярное поглощение. При размерах частиц, соизмеримых с длиной волны излучения, наблюдается дифракционное рассеяние. Этот вид рассеяния является несимметричным: вперед рассеивается больше энергии излучения, чем назад. Если размеры частиц много больше длины волны, то происходит геометрическое рассеяние, которое проявляется главным образом в инфракрасной области спектра оптических излучений. В реальной атмосфере имеют место все три вида рассеяния, поскольку в ней присутствуют частицы почти всех указанных размеров. Наибольшее рассеяние лучистых потоков наблюдается на небольших высотах (до 1000 м) в городах, где дым промышленных предприятий и пыль сильно замутняют атмосферу.

Селективный характер поглощения и рассеяния лазерного излучения атмосферой обусловливает наличие в ней «окон прозрачности», которые наиболее выражены в диапазонах волн 0,38—0,9 и 9—13 мкм. С увеличением высоты слоя атмосферы ширина этих «окон» увеличивается. Излучению рубинового лазера *(**λ*=0,6943 мкм) соответствует «окно прозрачности» 0,6932—0,6945 мкм при σпλ=0,0023—0,0069 км-1; σpλ=1,19—0,29 км-1, где σпλ и σpλ — коэффициенты ослабления потока монохроматического излучения атмосферой за счет поглощения и рассеяния, км-1.

Следовательно, ослабление лазерного излучения за счет рассеяния примерно на два порядка больше, чем за счет поглощения, что в основном справедливо и для других «окон прозрачности» атмосферы в оптическом диапазоне волн. Поэтому для «окон прозрачности» атмосферы справедливы приближенные равенства: σλ≈σpλ и Таλ≈e-τpλ.

Заметим, что закон Бугера (*Формула 3)* справедлив при σλ≤15—20 км-1. Например, при σλ=25 км-1 отклонение от этого закона составляет примерно 30%.

Очевидно, что в случае активной локации имеет место двукратное прохождение трассы, т. е. общая длина пути, половину которого проходит прямое лазерное излучение ЛЛС, а вторую половину — отраженное от цели лазерное излучение, определяется как *L**=2**1**=**2R.*

При этом мощность оптического сигнала на входе приемника ЛЛС прямо пропорциональна квадрату спектрального коэффициента одностороннего пропускания атмосферы:



где Р20λ — мощность отраженного оптического сигнала на входе приемника ЛЛС при ее работе в свободном пространстве.

Следовательно, в интервале малых дальностей (*R<R*г), т. е. при работе по протяженной цели, дальность действий ЛЛС в атмосфере

*R=R*0*T*aλ

Формула

максимальная дальность действия

*R*max=*R*0max*T*aλ

Формула

где *R*0max определяется в зависимости от вида цели.

В интервале больших дальностей (*R*>*R*г), т. е. при работе по точечной цели, дальность действия ЛЛС в атмосфере



Формула -7

*Формула 4-7* свидетельствуют о том, что ослабление мощности лазерного зондирующего и отраженного оптических сигналов атмосферой приводит к уменьшению отношения сигнал/шум на входе приемника ЛЛС; это, в свою очередь, снижает дальность лазерного обнаружения цели.

На практике для определения коэффициента *Т*аλ при работе в «окнах прозрачности» атмосферы пользуются эмпирической формулой



Таблица

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Состояние атмосферы (видимость) | Балл по коду | Удельное пропускание τyλ, км-1 | Метеороло­гическая дальность видимости RМ, км |
| Туман:очень сильный сильныйзаметныйслабый | 0123 | Менее 10-3410-34—10-8,510-8,5—10-3,410-3,4—2·10-2 | Менее 0,050,05—0,20,2—0,50,5—1 |
| Дымка:очень сильнаясильнаязаметнаяслабая | 4567 | 0,02—0,14 0,14—0,38 0,38—0,68 0,68—0,82 | 1—22—44—1010—20 |
| Хорошая видимостьОтличная видимость | 89 | 0,82—0,920,92 и более | 20—5050 и более |



*Рисунок 3*

где lp — толщина рассеивающего слоя атмосферы; χλ=σpλ/σpλ0 (Для видимого диапазона волн χλ≈1); λ0=0,5 мкм.

Метеорологическая дальность видимости (м. д. в.)



где Vmin=0,02 — пороговая контрастная чувствительность глаза наблюдателя; λо=0,5 мкм.

Под м. д. в. *R*м принято понимать предельную дальность видимости темных предметов с угловым размером 0,5° стандартным наблюдателем (Vmin=0,02) в дневное время на фоне неба. Для определения RM можно использовать *Таблица 1*.

Графики зависимости коэффициента полного ослабления лазерного излучения в атмосфере от метеорологической дальности видимости при различных значениях длины волны излучения σλ=*f*(RM) для различных λ приведены на *Рисунок 3*.

**Лазерные измерительные системы**. Высокие потенциальные возможности ЛИС[[3]](#footnote-3), обусловленные прежде всего высокими точностными характеристиками, в значительной степени ограничиваются условиями распространения световых волн в реальных материальных средах, в частности в атмосфере (*Рисунок 4*).

Рисунок

Классификация возмущающих полей атмосферы, эффекты их взаимодействия с когерентными оптическими полями и характер возникающих при этом помех.

Наибольшее влияние на оптический измерительный канал оказывает экранирующее действие облачных неоднородностей, которые характеризуются коэффициентами ослабления в десятки и сотни децибел на километр и значительными пространственными и временными масштабами. Внутренний пространственный масштаб — размер облаков и облачных образований колеблется от 10 м до 10 км, а внешний, характеризующий размер поля, достигает сотен и даже тысяч километров. Время жизни полей облачных неоднородностей составляет от нескольких часов до нескольких суток, а отдельных облачных образований — от десятков до сотен минут. Значительно меньшими величинами ослабления, а также пространственных и временных масштабов характеризуются аэрозольные поля.

В условиях прозрачной атмосферы, когда облачные и аэрозольные поля отсутствуют, определяющим становится влияние мультипликативных помех, обусловленных рассеянием оптического сигнала на турбулентных неоднородностях различного масштаба. Внутренний *l*о и внешний *Lо* масштабы турбулентных неоднородностей составляют примерно 1 мм и 1 ...100 м, а время жизни неоднородностей, соизмеримых с *l*о*,* достигает единиц миллисекунд.

Наиболее сильно влияние атмосферы проявляется в протяженных оптических каналах, например, космос — Земля и Земля — космос, которые используются для траекторных и астрономических измерений, локации Луны, решения калибровочных и юстировочных задач. Использование ЛИС в этих каналах требует учета особенностей распространения световых волн, которые обеспечивают оптический контакт с ИСЗ[[4]](#footnote-4) в пределах пространства над горизонтом наблюдателя. Если к этому добавить малую продолжительность сеанса измерений из-за высокой скорости перемещения ИСЗ и низкую точность измерений из одного пункта, то вполне естественным окажется использование совокупности ЛИС, рассредоточенных на обширной территории и образующих измерительный комплекс.

Таким образом, в отличие от радиотехнических космических измерительных комплексов, в которых выбором диапазона длин волн удается существенно снизить мешающее действие атмосферных образований, эффективность применения ЛИС в значительной степени определяется как геометрией их расположения и динамикой движения ИСЗ (что сближает их с радиотехническими измерителями), так и статистическими характеристиками полей атмосферы. Эти характеристики играют основную роль при синтезе структуры измерительных комплексов, используемых при локации медленно перемещающихся объектов (Луна, стационарные ИЗО).

В зависимости от масштабов атмосферных неоднородностей и пространственно-временных характеристик их полей проблема повышения эффективности ЛИС должна решаться на разных иерархических уровнях.

Первый уровень предусматривает адаптацию структуры ЛИС к возмущениям атмосферы или целенаправленное изменение возмущений, выбор оптимальных параметров измерительной системы, комплексирование оптических и радиотехнических измерителей. Этот уровень несет в значительной степени отпечаток индивидуальных свойств ЛИС.

Второй уровень, являющийся определяющим, связан с синтезом, пространственно-временной структуры комплекса ЛИС, оптимально согласованной со стохастической структурой облачных полей и динамикой движения ИСЗ. Комплекс ЛИС обладает всеми признаками больших систем: целенаправленностью и вероятностным характером функционирования, иерархичностью структуры, сложными переплетающимися связями и возможностью адаптации к внешним условиям.

Эффективность применения ЛИС в реальных условиях в значительной степени определяется свойствами тех случайно-неоднородных сред, которые, как правило, разделяют измерительную систему и исследуемый материальный объект. Примером случайно-неоднородной, или турбулентной, среды является прозрачная атмосфера Земли, диэлектрическая проницаемость которой случайным образом изменяется в пространстве и во времени.

Турбулентные флуктуации показателя преломления существенно ухудшают тактико-технические характеристики ЛИС (дальность действия, точность измерений и др.) как из-за искажения непосредственно измеряемых параметров световой волны (например, угла прихода), так и за счет действия значительной мультипликативной помехи.

Одним из эффективных путей уменьшения возмущающего действия полей турбулентных неоднородностей на качество функционирования ЛИС является применение быстро развивающихся в последние годы адаптивных методов компенсации искажений оптического сигнала. Сущность адаптивных методов заключается в автоматической коррекции амплитуды и фазы поля волны в плоскости передающей (приемной) апертуры лазерной системы на основании данных о турбулентных искажениях оптической волны с целью получения максимальной интенсивности излучения в плоскости исследуемого материального объекта (получения наилучшего изображения объекта).

Технические трудности реализации амплитудно-фазовой коррекции, а также то, что в ряде случаев основные ограничения на работу лазерных систем накладывают фазовые флуктуации, привели к преимущественному развитию методов фазовой компенсации. Впервые возможность преддетекторной компенсации атмосферных искажений волнового фронта в астрономических телескопах рассмотрел в 1953 г. Бэбкок. В начале 70-х годов с созданием широкополосных устройств управления волновым фронтом оптических полей (активной оптики) были созданы когерентные оптические системы с адаптацией к атмосферным искажениям сигнала. В ЛИС эти методы целесообразно использовать в системах с гетеродинными приемниками или с дифракционно-ограниченными приемниками прямого фотодетектирования.

Наибольшее распространение в измерительных системах получили методы адаптации, которые предполагают управление фазовым фронтом излучаемой волны с целью максимизации мощности лазерного излучения, распространяющегося через турбулентную среду, в плоскости исследуемого объекта. Когерентные адаптивные оптические системы с управлением волновым фронтом излучаемого поля получили название систем СОАТ (от английских слов Coherent Optical Adaptive Techniques).



*Рисунок 5*

Фазовый фронт оп­тической волны до и после прохождения турбулентной среды

Адаптивные методы компенсации с управляющим воздействием на волновой фронт излучаемого поля основываются на свойствах линейности, взаимности и квазистационарности атмосферы. Для выполнения условия квазистационарности необходимо, чтобы временной отклик адаптивной системы и время распространения сигнала не превышали времени «замороженности» турбулентной среды, которое составляет 10-3...10-2с*.* Принципы адаптивной компенсации фазовых искажений волнового фронта можно проиллюстрировать с помощью *Рисунок 5*, где в плоскости *а-а* изображен фронт зондирующей волны до входа в случайно-неоднородную среду, а в плоскости *б-б —* искаженный фазовый фронт после прохождения турбулентного участка среды. Если теперь измерить распределение фаз в плоскости *б-б,* сформировать фазосопряженный принятому фронт волны и излучить его с помощью апертуры, расположенной в плоскости *б*‑*б,* то в плоскости *а-а* благодаря взаимности атмосферы будет принята плоская волна. Информацию о турбулентных искажениях волнового фронта в плоскости *б-б* можно получить и с помощью косвенных измерений, например, путем анализа интенсивности излученного сигнала в плоскости *а-а*

Существенное влияние на точность измерения дальности оказывают условия распространения излучения, связанные с влиянием регулярных неоднородностей тропосферы. Групповой показатель преломления в атмосфере может быть рассчитан с относительной погрешностью порядка 10-8, если известны длина волны, давление, температура и влажность. Для учета условий распространения используют модель слоистой атмосферы с постоянным групповым показателем *n* в каждом слое. Первое приближение получают, используя параметры стандартной атмосферы. В этом случае ошибка измерения дальности вследствие отличия реальной атмосферы от стандартной не превышает 2... 3 м.

Анализ погрешностей измерения дальности показывает, что при одиночном измерении среднеквадратическая погрешность 5 ... 10 м может быть обеспечена типовой структурной схемой лазерного дальномера, если лазерный источник излучения позволяет получить на заданном расстоянии отношение сигнал-помеха около 10. Такую типовую структурную схему имеют дальномеры тактического назначения.

Для прецизионных лазерных дальномерных систем среднеквадратическая погрешность может быть снижена до единиц сантиметров. Это достигается повышением точности прогноза условий распространения излучения, применением методов статистической обработки серии измерений, совершенствованием аппаратуры.

Для формирования модели атмосферы, более близкой к реальной, используют данные наземных и радиозондовых измерений давления, температуры и влажности. Еще более точная модель может быть получена по данным нескольких метеостанций, образующих сетку в районе размещения ОЛС[[5]](#footnote-5). Эти меры позволяют довести атмосферную среднеквадратическую погрешность до единиц сантиметров при малых зенитных углах. Погрешность снижается до 0,5 см при работе в зенит.

Повышение временнуго разрешения счетчика дальности до 0,1 нс, достигнутое в настоящее время, обеспечивает погрешность цифрового измерителя дальности менее 1 см.

Технически наиболее сложной является проблема уменьшения погрешностей, обусловленных неопределенностью структуры поля на выходе лазера и флуктуациями интенсивности при отражении. Рассмотрим детальнее погрешности измерения, обусловленные этими причинами, и пути их уменьшения.

В типовой структуре дальномера моментом прихода отраженного импульса считается момент срабатывания порогового устройства, когда отношение правдоподобия достигнет порогового значения. Измеренный таким образом временной интервал не является оценкой максимального правдоподобия. Имеет место некоторая систематическая погрешность, значение которой зависит от уровня отраженного сигнала. Флуктуации интенсивности в импульсе вызывают появление случайной ошибки, которая ограничивает точность всей системы.

Первой причиной возникновения флуктуаций являет­ся неупорядоченное изменение модового состава излуче­ния лазера в течение импульса и от импульса к импуль­су. Фактически поле на выходе лазера и у объекта явля­ется неопределенным. Вторая причина — интерференция излучения отраженного различными участками объекта (в частности, несколькими уголковыми отражателями по ИСЗ). В результате поле в раскрыве приемной антенны имеет зернистую структуру (specle). Третья причина флуктуаций - статистический характер потока фотоэлектронов. Расчеты показывают, что при большом количестве фотоэлектронов флуктуации сигнала на выходе фотоприемника невелики. С уменьшением числа фотоэлектронов флуктуации сильно возрастают.

Кардинальным методом повышения точности является уменьшение длительности импульса. В частности, при длительности импульса менее 1 нс ошибка, обусловленная наличием помех и флуктуациями отраженного импульса, при одиночном измерении не будет превышать 10 см.

Использование статистических методов обработки серии измерений позволяет обеспечить дальнейшее повышение точности измерения.

В качестве итога проведенного анализа отметим, что такие меры, как применение центрированного приема, укорочение длительности зондирующего импульса непосредственно отражаются на структуре приемной и передающей частей ОЛС. Повышение точности считывания временного интервала связано со структурными изменениями в блоке дальности. Более точный учет условий распространения излучения в импульсных системах обычно не отражается на структуре системы, а влияет лишь на процесс вторичной обработки данных.

Рассмотренные методы повышения точности не исключают, конечно, такого фактора, как увеличение энергетического потенциала ОЛС, который обеспечивается рациональным выбором типа и режима лазерного источника излучения.

**Список литературы:**

1. “Лазерные измерительные системы” Батраков А.С., Бутусов М.М. и др. под ред. Лукьянова Д.П. - Радио и связь, 1981
2. “Основы проектирования лазерных локационных систем” Малашин М.С., Каминский Р.П., Борисов Ю.Б. - Высшая школа, 1983
1. Радиолокационная станция [↑](#footnote-ref-1)
2. Лазерная локационная система [↑](#footnote-ref-2)
3. лазерная измерительная система [↑](#footnote-ref-3)
4. Искусственный спутник Земли [↑](#footnote-ref-4)
5. Оптическая локационная система [↑](#footnote-ref-5)