

мостей от параметров РГПВ. Расчетные частоты генерируемых СВЧ колебаний практически совпадают с наблюдаемыми в эксперименте значениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Гайдук В. И., Палатов К. И., Петров Д. М. Физические основы электроники СВЧ. М., 1971. [2] Александров А. Ф., Галузо С. Ю., Канавец В. И., Плетюшкин В. А. // ЖТФ. 1981. 51, № 8. С. 1727—1732. [3] Афонин А. М., Поезд А. Д. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3, Физ. Астрон. 1985. 26, № 2. С. 31—36. [4] Вдовин В. А. Препринт ИРЭ АН СССР № 14 (432). М., 1985. [5] Ельчанинов А. С. и др. // Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии. Новосибирск, 1983, с. 152—155. [6] Смайт В. Электростатика и электродинамика. М., 1954. [7] Люиселл У. Связанные и параметрические колебания в электронике. М., 1963. [8] Вальднер О. А. и др. Справочник по диафрагмированным волноводам. М., 1977.

Поступила в редакцию
23.09.85

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1986. Т. 27, № 6

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 533.6.08

ДИСТАНЦИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ПОТОКОВ С ПОМОЩЬЮ НЕПРЕРЫВНОГО CO₂-ЛАЗЕРА

В. И. Берсенев, В. М. Гордиенко, Н. Н. Курочкин, А. В. Приезжев,
Ю. Я. Путивский

(кафедра общей физики и волновых процессов)

1. В настоящее время в ряде научных областей — физике, аэродинамике, метеорологии, а также в прикладных исследованиях, например по экологии, вулканологии и пр., возникла потребность в методах и системах дистанционного измерения (на расстояниях от сотен метров до десятков километров) скоростных параметров газовых и аэрозольных потоков. Ряд задач успешно решается с помощью метеорологических радаров [1, 2]. Однако в большинстве случаев в качестве существенного ограничения выступает требование минимума веса, объема и потребления энергии, что диктуется необходимостью установки системы на передвижной платформе (автофургоне, борту самолета и т. д.).

С учетом этих требований целесообразно строить измерительные системы на основе лазерных источников излучения. В качестве возможных альтернатив в этом случае выступают системы некогерентного приема и корреляционной обработки сигнала, получаемого при регистрации рассеянного лазерного излучения [3], и системы когерентного приема [4].

Принцип действия последних основан на выделении доплеровского сдвига частоты излучения, имеющего место при рассеянии зондирующего пучка на движущихся в потоке оптических неоднородностях (аэрозоле). К настоящему времени подобные системы (лазерные доплеровские измерители скорости) получили широкое применение главным образом в таких прикладных исследованиях, в которых удаленность

измерительного объема не превышает десятка метров, а в качестве рассеивателей используются искусственно вводимые в поток неоднородности (частички дыма, капельно-масляного аэрозоля и др.) [5].

Как показано в ряде работ (см., например, [6]), лазерные системы измерений скорости потоков природного аэрозоля на расстояниях до нескольких тысяч метров целесообразно строить по гетеродинной схеме на основе мощных одночастотных стабилизированных лазеров непрерывного действия видимого или ИК диапазонов. Наиболее перспективными источниками являются CO_2 -лазеры с длиной волны излучения $\lambda \sim 10$ мкм [7]. В некоторых случаях с CO_2 -лазерами могут успешно конкурировать Nd:YAG-лазеры (длина волны излучения $\lambda = 1,06$ мкм) [8].

Целью предпринятого нами исследования является анализ возможности создания непрерывного доплеровского лидара средней дальности действия ($L \sim 10^3$ м) на базе CO_2 -лазера. В настоящей статье приводятся описание лабораторного макета и первые результаты измерения скорости на модельных объектах (вращающемся диске и струе водного аэрозоля), а также оценки возможности использования такой системы для дистанционных измерений в реальной атмосфере.

2. Для отработки методики атмосферных измерений был собран макет доплеровского лидара с автоматизированной системой обработки информации.

Излучение непрерывного одночастотного CO_2 -лазера (рис. 1) разделяется пластинкой NaCl на опорный и зондирующий пучки. Зондирующий пучок фокусируется линзой (2) с фокусным расстоянием 20 см в исследуемую область с движущимися рассеивателями. Для создания направленного потока аэрозоля использовался покрасочный пульверизатор, подключенный к компрессору с избыточным давлением до 2 атм.

Излучение, рассеянное назад движущимися со скоростью V частицами, проходит в обратном направлении тот же оптический путь, что и зондирующий пучок, и смешивается на фотоприемнике (1) с предварительно ослабленным опорным пучком. В результате смешения на квадратичном фотоприемнике происходит оптическое гетеродинирование с выделением сигнала разностной (доплеровской) частоты $f_d = 2V_{\parallel}/\lambda$, где V_{\parallel} — проекция скорости частиц аэрозоля на направление зондирования. Скорости $V_{\parallel} = 1$ м/с соответствует $f_d = 0,2$ МГц (для $\lambda = 10,6$ мкм). Полезный ток i_n на выходе фотоприемника при когерентном приеме описывается выражением [5, 9]:

$$i_n = \frac{ce\eta_{\text{кв}}}{4\pi h\nu} \operatorname{Re} \int_s \mathbf{E}_r \mathbf{E}_s^* ds,$$

где c — скорость света, e — заряд электрона, $h\nu$ — энергия фотона лазерного излучения, $\eta_{\text{кв}}$ — квантовая эффективность приемника, \mathbf{E}_r — напряженность поля гетеродина, \mathbf{E}_s — поле сигнала, s — площадь приемной апертуры.

Спектр мощности такого сигнала будет представлять собой сумму спектров мощности сигналов частиц аэрозоля, рассеивающих назад лазерное излучение. Спектр мощности тока фотодетектора с точностью до аппаратного уширения дает представление о распределении частиц аэрозоля по скоростям в измерительном объеме. В атмосфере скорость частиц аэрозоля совпадает с локальной скоростью ветра [10], поэтому спектр мощности фототока отражает в то же время распределение скорости ветра в измерительном объеме.

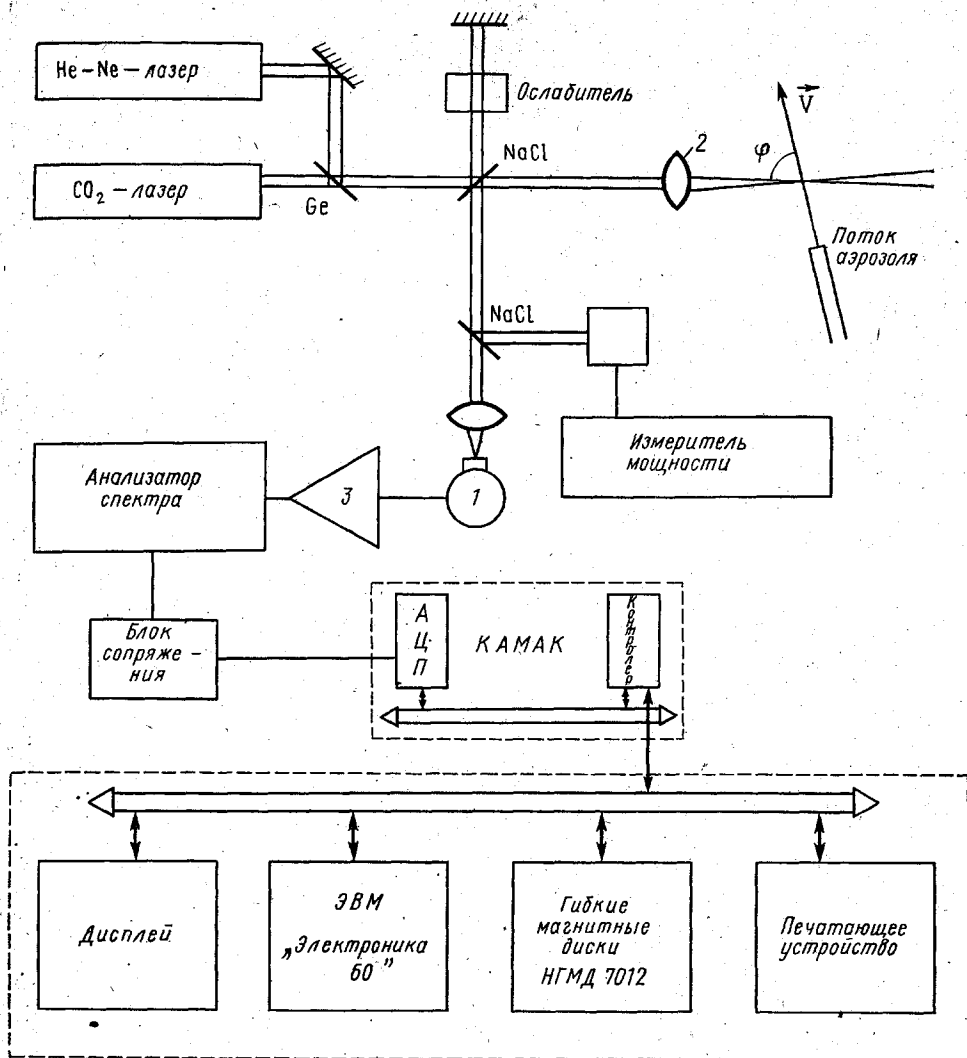


Рис. 1. Схема лабораторного макета доплеровского лидара

Для юстировки системы использовали He — Ne-лазер, а для контроля мощности опорного излучения — измеритель мощности. Сигнал доплеровской частоты после широкополосного усилителя (3) поступает на анализатор спектра, который с частотой 20 Гц выдает его спектр.

Вследствие невысокой величины отношения сигнал/шум не всегда можно по форме спектра сигнала, наблюдаемого на экране анализатора, определить скорость потока аэрозоля. Для повышения достоверности количественных характеристик сигнала, построения профилей скорости, длительного хранения информации использовалась цифровая обработка аналогового сигнала, поступающего с анализатора спектра.

Спектры сигнала доплеровской частоты подаются на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), выполненный в стандарте КАМАК, с которого происходит считывание в микро-ЭВМ «Электроника-60». Время усреднения 1000 спектров равно 1 мин. Информация выдается на

печатающее устройство или экран дисплея в виде графиков, таблиц или численных значений скорости. Данные, необходимые для последующих измерений, а также библиотека рабочих программ и программы

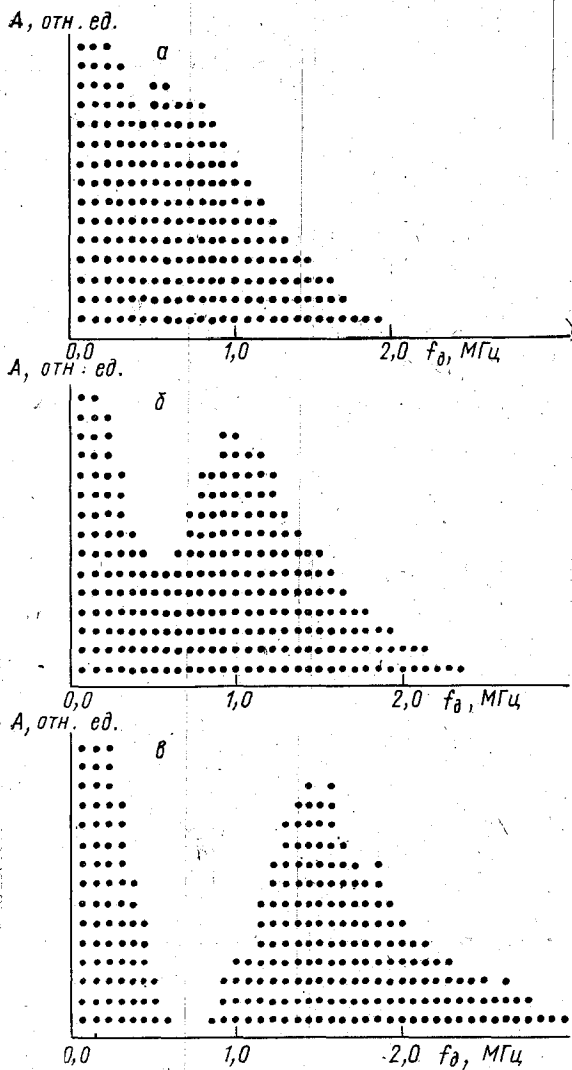


Рис. 2. Характерные спектры доплеровского сигнала, полученного от струи водного аэрозоля. Угол между направлением зондирования и вектором скорости аэрозоля $\varphi = 30^\circ$ (а), 50° (б) и 80° (в)

ном приеме, выражение для отношения сигнал/шум можно записать следующим образом [11]:

$$\frac{с}{ш} = \frac{\eta_{кв} P_0 \beta(\pi) \lambda}{2h\nu \Delta\nu_{\phi}} \left[\frac{\pi}{2} + \arctg \frac{\pi R^2}{\lambda L} \right],$$

где P_0 — мощность зондирующего излучения, $\beta(\pi)$ — коэффициент обратного рассеяния, λ — длина волны зондирующего излучения, $\Delta\nu_{\phi}$ — полоса пропускания фильтра, L — дальность измерения, R — радиус приемо-передающего телескопа.

операционной системы хранятся в накопителе на магнитных дисках НГМД 7012.

Первоначально были проведены калибровочные измерения скорости вращающегося диска в диапазоне от 0,15 до 15 м/с ($f_d = 0,03 \div 3$ МГц). Относительная погрешность спектра составила $\sim 4 \div 6\%$, что хорошо согласуется с теоретическими расчетами [9]. Минимальная регистрируемая мощность на единицу частоты P_{\min} при использовании в качестве детектора фотосопротивления GeAu составляет $P_{\min} \approx 10^{-15}$ Вт/Гц, для фото диода HgCdTe $P_{\min} \approx 10^{-19}$ Вт/Гц.

При рассеянии от аэрозоля были получены спектры доплеровского сигнала $A(f_d)$, изображенные на рис. 2. Большое относительное уширение спектров нельзя объяснить ни градиентным уширением, ни временем пролета частиц через измерительный объем. Оно связано с наличием в потоке аэрозоля частиц, движущихся с различной скоростью.

В режиме ограничения дробовыми шумами излучения гетеродина, что практически всегда реализуется при когерент-

Оценочные расчеты показывают, что для дальности $L=0,3$ км при следующих параметрах установки и характеристиках атмосферы [12]: $\eta_{\text{нв}}=1$, $P_0=2$ Вт, $\Delta\nu_{\text{ф}}=200$ кГц, $\beta(\pi)=10^{-8}$ м $^{-1}$ ·ср $^{-1}$, $\lambda=10$ мкм, $R=5$ см отношение с/ш равно ~ 50 .

3. Заключение. На лабораторном макете доплеровского лидара отлажена методика дистанционного определения скорости потока аэрозоля в воздухе. Получен набор спектров доплеровского сигнала при различных проекциях вектора скорости потока на направление зондирования. Разработана автоматизированная система обработки информации. Данная система при использовании вместо фокусирующей линзы отражательного телескопа с диаметром апертуры $2R=10$ см, согласно оценкам, может быть использована для дистанционного определения скорости ветра в атмосфере на расстояниях нескольких сотен метров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Портнягин Ю. И. и др. Измерение ветра на высотах 90—100 км наземными методами. Л., 1976. [2] Radio Science. Special Issue: Radar Investigations of the Clear Air. 1980. 15, N 2. [3] Применение корреляционных методов в атмосферной оптике/Ред. В. Е. Зуев. Новосибирск, 1983. [4] Устинов Н. Д., Матвеев И. Н., Протопопов В. В. Методы обработки оптических полей в лазерной локации. М., 1983. [5] Дубнищев Ю. Н., Ринкевичус Б. С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. М., 1982. [6] Bilbro J. W. //Opt. Eng. 1980. 19. P. 533—542. [7] Hufaker R. M. //Appl. Opt. 1970. 9. P. 1026—1039. [8] Kane T. J., Thou B., Byer R. L. //Appl. Opt. 1984. 23. P. 2477—2481. [9] Тейч М. С. //ТИИЭР. 1968. 56, № 1. С. 46—57. [10] Гродзовский Г. Л. //Ученые записки ЦАГИ. 1974. 5, № 2. С. 80—89. [11] Lawrence T. R., Wilson D. J., Craven C. E. et al. //Rev. Sci. Instrum. 1972. 43. P. 512—518. [12] Steinvall O., Bolander G., Claesson T. //Appl. Opt. 1983. 22. P. 1628—1635.

Поступила в редакцию
14.08.85

АКУСТИКА

УДК 534.232

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМООПТИЧЕСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ЗВУКА В МЕТАЛЛАХ

В. В. Крылов, Е. П. Пономарев, Т. В. Штенцель

(кафедра акустики)

В последнее время в литературе отмечается повышенный интерес к проблеме возбуждения акустических волн в твердых телах при поглощении в них модулированного по интенсивности лазерного излучения [1—11]. При не слишком высоких мощностях падающего света такое возбуждение реализуется вследствие теплового расширения облучаемого участка тела. По этой причине соответствующий механизм возбуждения принято называть термооптическим. Благодаря ряду своих достоинств — прежде всего отсутствию механического контакта с твердой средой и возможности широкой перестройки частоты возбуждаемого звука — данный метод возбуждения оказался весьма перспективным для техники неразрушающих испытаний и экспериментальной физики твердого тела.