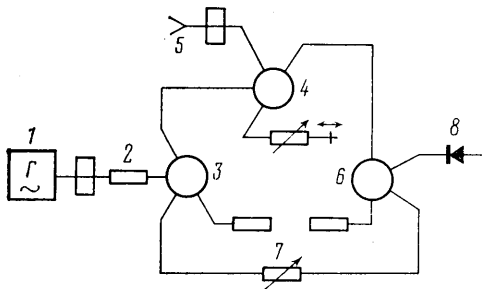


УДК 629.7.018.3

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ СВЧ-СИГНАЛА СФЕРАМИ, ДВИЖУЩИМИСЯ С ГИПЕРЗВУКОВОЙ СКОРОСТЬЮ

БАУЛИН Н. Н., ЗАГИК С. Е., ЛЮТОМСКИЙ В. А.,  
ХАТУЦКИЙ А. М., ЧЕРНЯВСКИЙ С. Ю.

Рассеяние радиоволн метеоритами, движущимися в атмосфере с гиперзвуковой скоростью, существенно изменяется за счет возникновения ионизованного ударного слоя. Течение газа в ударном слое характеризуется уносом массы тела и сложной химической кинетикой, что затрудняет теоретический расчет рассеянного плазмой сигнала и приводит к необходимости экспериментального изучения явления, в частности в аэробаллистических трассах. Наиболее разработаны методы встречного или наклонного зондирования летящих моделей СВЧ-сигналами. Однако в посвященных этому вопросу работах [1-3] указаны весьма ограниченные сведения о применяв-



Фиг. 1

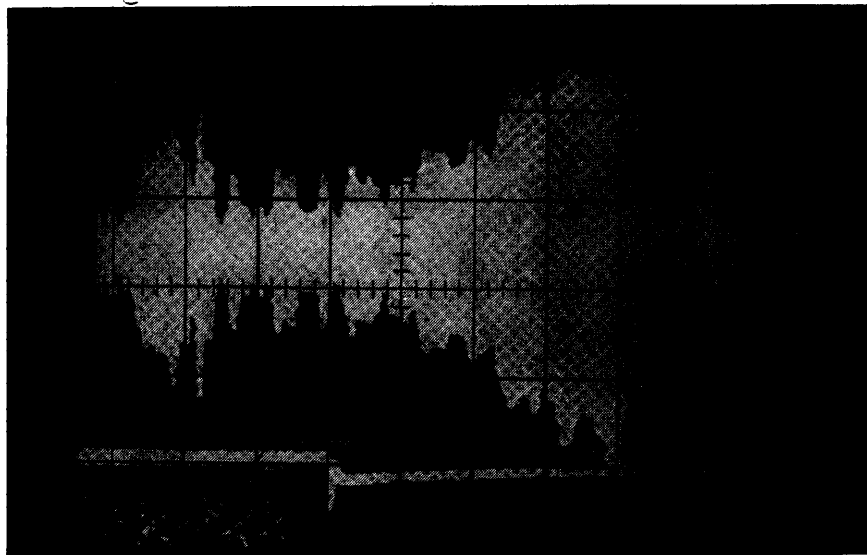
шей методике и результатах эксперимента, что препятствует ее практической реализации.

Настоящая работа посвящена созданию методики измерения обратного рассеяния радиоволн моделями, движущимися с гиперзвуковой скоростью в аэробаллистической трассе. Приведены также результаты исследования влияния ионизованного газа на амплитуду отраженных СВЧ-сигналов.

1. Использовалась аэробаллистическая установка, состоящая из металлического устройства и герметизированной трассы [4]. Метание модели осуществлялось с помощью одноступенчатого порохового ускорителя при скорости около  $v=2$  км/с и двухступенчатой водородной пушки с деформируемым поршнем при  $v \approx 4$  км/с. Модель представляла собой пластмассовую или алюминиевую сферу диаметром  $d = 5,3$  и  $8,5$  мм, покрытую медью. Скорость модели определялась с погрешностью не более  $0,15\%$  с помощью фотоэлектрических систем и измерителей временных интервалов [5]. Измерение концентрации и эффективной частоты соударений электронов в следе за моделью производилось устройством с закрытым цилиндрическим СВЧ-резонатором на волне типа  $E_{010}$ , настроенным на частоту  $500$  мГц [6].

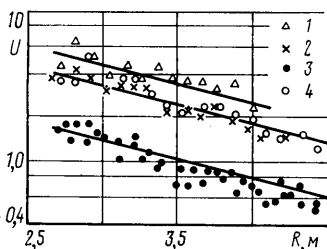
Для измерения амплитуды СВЧ-сигнала, отраженного от движущейся модели, в отсеке трассы диаметром  $0,48$  м и длиной  $7$  м на расстоянии  $0,15$  м от оси была установлена рупорная антенна с линзой размерами  $140 \times 100$  мм<sup>2</sup> и диаграммой направленности шириной  $4^\circ$  по уровню  $3$  дБ. Линия, соответствующая максимуму диаграммы направленности, ориентирована под углом  $2^\circ$  к оси трассы и пересекала ось на расстоянии около  $4$  м от антенны, т. е. заведомо в дальней зоне излучения антенны.

Излучение, прием и измерение отраженного сигнала осуществлялись с помощью устройства, схема которого приведена на фиг. 1. Сигнал СВЧ от генератора 1 непрерывного излучения с частотой около  $36$  ГГц через развязывающий аттенюатор 2 поступал на балансный мост 3, откуда сигнал половинной мощности подавался на передающее плечо балансного моста 4 и далее в приемно-передающую антенну 5. Мощность излучения составляла около  $0,5$  Вт. Отраженный моделью сигнал принимался той же антенной 5 и через плечо моста 4, развязанное более чем на  $30$  дБ от передающего, поступал на мост-смеситель 6. Сюда же поступал через аттенюатор 7 сигнал СВЧ-генератора, в результате чего на детекторе 8 смесителя 6 выделялся сигнал с доплеровской частотой, соответствующей скорости модели. Этот сигнал через резонансный усилитель с коэффициентом усиления  $60$  дБ поступал на запоминающий осциллограф типа С8-11. Усилитель имел две рабочие полосы на частотах  $500$  кГц и  $1$  МГц, соответствующие скоростям модели  $2$  и  $4$  км/с. Для уменьшения уровня отраженного от стенок трассы излучения в ней установлено несколько диафрагм из поглощающего материала.

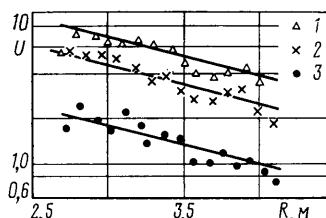


Фиг. 2

В поперечных сечениях трассы, где производились измерения, с помощью волноводного зонда было исследовано распределение напряженности поля антенны. Отмечены перепады уровня напряженности в 3 дБ, что позволило оценить уровень отраженных от стенок трассы сигналов, приходящих к модели, на 15 дБ ниже уровня сигнала антенны.



Фиг. 3



Фиг. 4

2. Обработка результатов измерений производилась с учетом уменьшения скорости полета модели в трассе и соответствующего изменения коэффициента усиления резонансного усилителя. Калибровка измерительной системы выполнялась путем метания модели в трассе, заполненной гелием с давлением  $p=200$  мм рт. ст. Числа Маха полета составляли  $M=2$  и 4, при этом ионизации газа в ударном слое не происходило. Отношение амплитуд отраженных сигналов для сфер с диаметрами 8,5 и 5,3 мм составляло 7,2 дБ, что близко к расчетной величине 7,4 дБ [7]. Разброс результатов измерений не превышал 15%.

Для создания ионизованного ударного слоя, соответствующего числам  $M=11-15$ , трасса заполнялась воздухом при давлении 20 и 32 мм рт. ст. или смесью воздуха (32 мм рт. ст.) с ксеноном (8 мм рт. ст.). На фиг. 2 приведена типичная осциллограмма сигнала, отраженного летящей сферой (верхний луч). На нижнем луче виден импульс одной из станций измерения времени, отмечающий момент начала измерений и соответствующий расстоянию 4,7 м от фазового центра антенны. Отраженный сигнал, наблюдаемый до начального импульса, обусловлен спецификой распределения излученного антенной сигнала в баллистической трассе. По мере приближения модели к антенне амплитуда увеличивается. Резкое падение сигнала

на расстоянии, меньшем 2,7 м от антенны, определяется формой диаграммы направленности антенны и ее ориентацией в трассе.

На фиг. 3 представлены в относительных единицах результаты измерения амплитуды  $U$  напряжения отраженного сигнала в зависимости от расстояния  $R$  антенны до модели диаметром 5,3 мм. Точки на фигуре приведены для следующих случаев: 1 — гелий,  $p=200$  мм рт. ст.,  $M=4$ ; 2 — воздух,  $p=20$  мм рт. ст.,  $M=12,5$ ; 3 — воздух,  $p=32$  мм рт. ст.,  $M=11,2-12$ ; 4 — смесь воздуха с ксеноном,  $M=15$ . Усредняющая линия для каждого случая соответствует обратно пропорциональной зависимости  $U$  от  $R^2$ , а отношение амплитуд сигналов для различных случаев не зависит от  $R$ . При условиях эксперимента наблюдается уменьшение амплитуды отраженного сигнала с увеличением давления воздуха в трассе. При  $p=20$  и 32 мм рт. ст. уменьшение составляет соответственно 3 и 11 дБ. Это явление можно объяснить тем, что часть энергии зондирующего СВЧ-сигнала поглощается или отклоняется плазмой в области ударного слоя. Добавление к воздуху при  $p=32$  мм рт. ст. ксенона с парциальным давлением 8 мм рт. ст. приводит к росту  $U$  на 8 дБ.

На фиг. 4 приведены экспериментальные результаты, полученные для сферы диаметром 8,5 мм. Точки на фигуре соответствуют случаям: 1 — гелий,  $p=200$  мм рт. ст.,  $M=4$ ; 2 — воздух,  $p=20$  мм рт. ст.,  $M=12$ ; 3 — воздух,  $p=32$  мм рт. ст.,  $M=11$ . Как и в случае сферы диаметром 5,3 мм, наблюдается обратно пропорциональная зависимость  $U$  от  $R^2$ . Отношение амплитуд сигналов для  $d=8,5$  и 5,3 мм сохраняется практически постоянным при аналогичных условиях полета моделей и составляет около 7,2 дБ.

Авторы выражают благодарность В. В. Бродскому за полезные советы при обсуждении постановки эксперимента и Г. В. Глыбину за помощь в разработке СВЧ-аппаратуры и оборудовании ею баллистической трассы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Gravel M., Heckman D., Tremblay R. Mikrowave studies.— In: Ballistic-Range Technology, AGARD-AG-138-70, 1970.
2. Musal H. M., Primich R. I., Blore W. E., Robillard P. E. Millimeter radar instrumentation.—IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, 1965, vol. AES-1, No. 3.
3. Zivanovic S., Robillard P. E., Primich R. I. Radar investigation of the wakes of blunt and slender hypersonic velocity projectiles in the ballistic range.— In: Fluid Physics of Hypersonic Wakes, vol. 2. AGARD conf. proc., 1967, No. 19.
4. Черняевский С. Ю. Аэробаллистическая установка — инструмент современной экспериментальной гиперзвуковой аэродинамики.— В кн. Теорет. и эксперимент. исслед. гиперзвуковых течений при обтекании тел и в следах. М.: Изд. Моск. ун-та, 1979.
5. Черняевский С. Ю. Аппаратура, применяемая в баллистической трассе для измерения скорости летящих моделей и синхронизации.— Приборы и техника эксперимента, 1976, № 3.
6. Баулин Н. Н., Дмитриев А. К., Загик С. Е., Лопатин В. Е., Лютомский В. А., Пилюгин Н. Н., Черняевский С. Ю. Исследование радиофизических параметров ионизованного газа методами радиодиагностики.— Сб. докл. II Всесоюз. конф. по методам аэрофиз. исследований. Новосибирск, 1979.
7. Кинг Р., У Тайцзунь. Рассеяние и дифракция электромагнитных волн. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.

Москва

Поступила в редакцию  
16.X.1979