

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.371.33

РАССЕЯНИЕ МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
В "ЧИСТОЙ" АТМОСФЕРЕ

Ю.В.Быков, Ю.А.Дрлягин, Л.М.Кукин, М.Д.Токман

Экспериментально обнаружено обратное рассеяние микроволн в визуально чистой атмосфере при помощи аппаратного комплекса, включающего в себя мощный генератор — гиротрон и супергетеродинный приемник.

В настоящем сообщении обсуждаются результаты пробного эксперимента по обнаружению рассеяния миллиметрового излучения в визуально чистой атмосфере (в т.ч. обратного рассеяния).

Миллиметровый диапазон представляется весьма перспективным для зондирования широкого класса атмосферных объектов, которые являются оптически толстыми для лазерного излучения, но относительно слабо рассеивают радиоволны традиционного для метеорадаров диапазона (сантиметрового, дециметрового). Достигнутые в последние десятилетия успехи в создании мощных коротковолновых генераторов-гиротронов или гироклистронов позволяют надеяться на успешное решение некоторых задач активного мониторинга атмосферы. Предварительные оценки показывают, что генераторы мощностью 10–100 кВт вместе с приемными системами чувствительностью выше  $10^{-14}$  Вт могут использоваться для зондирования кристаллических и водных облаков, турбулентности ясного неба и различных аэрозольных примесей на расстояниях от нескольких сот метров до нескольких километров, а измерение доплеровского сдвига частоты отраженного сигнала позволило бы оценивать скорость ветра.

В описываемых экспериментах источником излучения являлся гиротрон с выходной мощностью до 10 кВт, работавший в непрерывном режиме на частоте 84 ГГц. Супергетеродинный приемник имел пороговую чувствительность примерно  $5 \cdot 10^{-13}$  Вт при полосе приема 40 МГц и постоянной времени усреднения на выходе  $\sim 10^{-3}$  сек. Такая полоса приема соответствовала предполагаемому уходу частоты генератора от одного включения к другому.

Эксперименты по обнаружению рассеяния и измерению его эффективности проводились по бистатической схеме; расстояние между приемной и излучающей антеннами (база)  $b \approx 50$  м. Излучение генератора выводилось в виде квазиоптического волнового пучка в сверхразмерном волноводе и направлялось практически вертикально вверх. Эффективный размер апертуры излучателя  $D_{\text{пол}} = 60$  мм примерно соответствовал поперечному размеру квазиоптического волнового пучка, что определяет ширину диаграммы направленности излучателя  $\Delta\theta_{\text{пол}} \approx 6 \cdot 10^{-2}$  рад. Ширина диаграммы направленности приемной антенны составляла

$\Delta\theta_{\text{пр}} \approx 1,2 \cdot 10^{-2}$  рад. ( $D_{\text{пр}} = 300$  мм). Отсутствие дифракционного "затекания" сигнала в приемный тракт тщательно контролировалось во время эксперимента.

Вращая по азимуту приемную антенну при произвольном угле места, каждый раз удавалось однозначно обнаруживать положение зондирующего луча в пространстве\*. При пересечении диаграмм под углом  $\theta \approx \pi/2$  сигнал наблюдался в виде "вспышек" с периодом в 1-3 сек. и превышал собственные шумы приемника более, чем на порядок. При квазипараллельном расположении диаграмм (т.е. для обратного рассеяния) частота "вспышек" увеличивалась, сигнал несколько убывал по амплитуде, но становился почти нефлюктуирующим.

Отношение принимаемой мощности  $P_{\text{пр}}$  к излучаемой  $P_{\text{изл}}$  определяется в рассматриваемом случае ( $\Delta\theta_{\text{изл}} \gg \Delta\theta_{\text{пр}}$ ) следующим соотношением (см., например, [1]):

$$\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{изл}}} = \gamma \frac{\pi}{4} \frac{D_{\text{изл}}}{R_{\text{изл}}} \lambda \frac{\delta_v(\theta)}{|\sin \theta|}; \text{ если } \theta > \Delta\theta_{\text{пр}}. \quad (1)$$

Здесь  $\lambda = 3.6$  мм — длина волны,  $\theta$  — угол пересечения осей диаграмм направленности антенн,  $\delta_v(\theta)$  — дифференциальное сечение рассеяния на угол  $\theta$  для единицы объема,  $R_{\text{изл}}$  — расстояние от излучателя до точки пересечения осей диаграмм направленности двух антенн. Близкий к единице численный коэффициент  $\gamma$  определяется формой диаграммы направленности антенн; для гауссовых диаграмм из [1] имеем  $\gamma \approx 1,2 \cdot \pi/4 \approx 0,94$ .

Полагая  $P_{\text{пр}} \approx (1 \div 5) \cdot 10^{-12}$  Вт, из (1) оцениваем величину дифференциального сечения рассеяния на высотах  $50 \div 100$  м как  $\delta_v(\theta) \approx (0,2 \div 1) \cdot 10^{-12}$  см<sup>-1</sup>. Такая отражательная способность соответствует, например, колмогоровской турбулентности атмосферы с внутренним масштабом менее 3 мм и интенсивностью флуктуаций показателя преломления, соответствующей стандартному коэффициенту  $C_n^2$  порядка  $(1 \div 5) \cdot 10^{-12}$  см<sup>-2/3</sup> (см., например, [2, 3]). Аналогичный по интенсивности сигнал могут вызвать аэрозольные образования, например, пылинки радиусом  $\approx 0,1$  мкм и с концентрацией порядка нескольких частиц в кубометре. Достаточно надежная идентификация рассеивающих объектов возможна, по-видимому, лишь при использовании дополнительной априорной информации или при работе на нескольких частотах.

Итак, в результате проведенных экспериментов зарегистрировано рассеяние микроволн в визуально чистой атмосфере и измерено дифференциальное сечение рассеяния на высотах 50-150 м.

Отметим, также, что существует техническая возможность для повышения потенциала зондирующего комплекса по крайней мере на три порядка за счет использования более мощного гиротрона и более чувствительного охлаждаемого приемника, а также путем повышения стабильности частоты генератора и соответствующего сужения полосы приемника.

\* Сигнал наблюдался на экране осциллографа в виде характерного отклика, повторяющего паразитную модуляцию мощности передатчика из-за недостаточно качественной фильтрации питающего напряжения.

Описанные здесь результаты предварительных экспериментов свидетельствуют о перспективности мониторинга атмосферы в миллиметровом диапазоне длин волн как для исследования физики атмосферы, так и применительно к экологическим задачам.

Авторы благодарны О.С.Моченовой за помощь в работе.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. — М.: Мир, 1981. Ч.1. Гл.4.
2. Татарский В.И. Теория флюктуационных явлений при распространении волн в турбулентной атмосфере. — М.: Изд. АН СССР, 1959.
3. Харди К.Р., Кац И. // ТИИЭР. 1969. N 4. с.108.

Институт прикладной физики РАН

Поступила в редакцию  
22 декабря 1992 г.

#### SCATTERING OF MICROWAVES IN CLEAR ATMOSPHERE

*Yu. V. Bykov, Yu. A. Dryagin, L. M. Kukin, M. D. Tokman*

We present the results of the experimental study of microwave back-scattering in clear atmosphere. The experimental set-up included the high-power generator — gyrotron and superheterodyne receiver.