

УДК 621.371.361

РАССЕЯНИЕ РАДИОВОЛН МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА СТИМУЛИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ РАЗРЯДАХ В ЗАПЫЛЕННОЙ АТМОСФЕРЕ

А. Г. Кисляков, В. А. Канаков, Ю. М. Сорокин, С. Е. Функельштейн

Проведено сравнение интегрального поглощения миллиметровых радиоволн в атмосферных газах на приземной и наклонной, с рассеивателем, трассах. Экспериментально исследованы свойства рассеяния миллиметровых радиоволн плазменного ореола оптического разряда в атмосферной аэрозоли. Показана возможность применения в данном диапазоне оптического разряда в качестве ретранслятора в линиях связи на расстояние до 40 км.

Возможность создания сверхширокополосных устойчивых каналов связи с высокой степенью помехозащищенности и скрытности стимулирует развитие техники миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Одним из факторов, ограничивающих применение таких систем, является сильное поглощение радиоволн атмосферными газами. Так как коэффициент поглощения в газах быстро убывает с высотой, имеет смысл оценить эффективность использования наклонных трасс с искусственными пассивными отражателями.

Одним из вариантов создания искусственных рассеивателей является стимуляция мощным лазерным импульсом в атмосферной аэрозоли коллективного оптического разряда (КОР), имеющего достаточно высокую степень ионизации. Выпускаемые промышленностью лазерные системы позволяют создавать такой разряд в искусственно запыленной атмосфере на высоте порядка ста метров [1,2], что увеличивает дальность радиогоризонта до 40 км. Сравнением энергетического потенциала наклонной и приземной трасс заданной конфигурации можно определить требования к эффективному коэффициенту рассеяния КОР. Ниже приводится сопоставление полученных таким образом оценок с экспериментально измеренными характеристиками рассеяния КОР в миллиметровом диапазоне.

1. Распространение радиоволн на трассе с отражателем при сильном молекулярном поглощении. Молекулярное поглощение атмосферы в области "окон прозрачности" (т. е. интервалах длин волн между линиями резонансного поглощения) существенно зависит от высоты над поверхностью Земли h :

$$\alpha(h) = \sum_i \alpha_{i0} \exp(-h/H_i), \quad (1)$$

где α_{i0} - коэффициент погонного ослабления на уровне моря ($h = 0$), а H_i - эффективная высота для атмосферного газа i . При расчетах поглощения на приземных трассах обычно достаточно учесть ослабление в двух компонентах атмосферы O_2 и H_2O , а вблизи резонансов можно ограничиться рассмотрением одного газа. Тогда (1) примет вид

$$\alpha(h) = \alpha_0 \exp(-h/H). \quad (2)$$

Рассмотрим две трассы в приземном слое воздуха: параллельную поверхности Земли на высоте h_0 и наклонную (с отражателем) при высоте отражателя h (рис. 1). Положим для определенности, что в п. 1 трассы размещается передающая станция и отражатель создается непосредственно над ней. Если мощность сигнала в передающем пункте P_1 , то на конце горизонтальной трассы длиной l она уменьшится вследствие поглощения (геометрические эффекты не учитываем) до величины

$$P'_2 = P_1 \exp\left\{-\alpha_0 l e^{-h_0/H}\right\}. \quad (3)$$

Для наклонной трассы можно записать аналогичное соотношение

$$\begin{aligned} P''_2 &= \alpha P_1 \exp\left\{-\sec \theta \int_{h_0}^h \alpha(h) dh\right\} = \\ &= \alpha P_1 \exp\left\{-\alpha_0 H \sec \theta (e^{-h_0/H} - e^{-h/H})\right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

где коэффициентом $\alpha < 1$ учитывается ослабление радиоволн вследствие рассеяния на отражателе. При выводе (4) пренебрегается поглощением сигнала на вертикальном участке трассы. Исследуя отношение P'_2/P''_2 , можно определить условия, при которых наклонная трасса с отражателем оказывается эффективнее трассы с прямой видимостью. Используя (3) и (4), из неравенства $(P'_2/P''_2) < 1$ получаем выражение

$$\alpha + \operatorname{cosec} \theta (1 - \exp[-(x - x_0)]) / (x - x_0) < 1, \quad (5)$$

где

$$x = h/H, \quad x_0 = h_0/H, \quad \alpha = k \exp(x_0)/\alpha_0 l, \quad k = -\ln \alpha.$$

Анализ неравенства (5) показывает, что наклонная трасса с отражателем действительно может быть эффективнее горизонтальной.

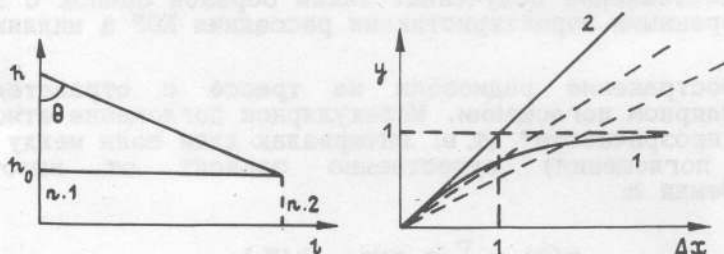


Рис. 1.2.

Рассмотрим частный случай. Допустим, что высота отражателя над линией прямой видимости $\Delta h = (h - h_0) < H$. В этом случае $\operatorname{cosec} \theta \approx 1$ и неравенство (5) дает условие достаточно малого ослабления сигнала при рассеянии на отражателе:

$$k < (\Delta h/2H) \alpha_0 l \exp(-x_0). \quad (6)$$

Формула (6) получена путем разложения в ряд экспоненты в (5) по

малому $\Delta h/H$, при этом оставлены члены со степенью не выше 2. Физический смысл неравенства (6) заключается в том, что коэффициент ослабления сигнала при рассеянии должен быть достаточно мал по сравнению с коэффициентом поглощения на горизонтальной трассе. Фактором малости служит отношение $\Delta h/2H$.

Неравенство (6) сравнительно легко может быть удовлетворено при $x_0 = 0$ (приземная трасса) в субмиллиметровом диапазоне длин волн.

Например, при $\lambda = 0,87$ мм коэффициент поглощения радиоволн в H_2O составляет в летнее время $\alpha_0 \approx 3,6$ Нп/км [3], а величина $H \approx 1,5$ км [4]. Если длина трассы $l = 10$ км, а $\Delta h = 300$ м, то необходимо удовлетворить условию $k < 3,6$, т.е. ослабление из-за рассеяния должно быть меньше 15,6 дБ. Очевидно, что "запас" по коэффициенту k определяет разницу в ослаблениях на наклонной и горизонтальной трассах.

В общем случае неравенство (5) можно преобразовать к виду

$$1 - \exp(-\Delta x) < (1 - \alpha)\Delta x, \quad (7)$$

где $\Delta x = x - x_0$. При выводе (7) учитывалось, что практически интересен случай $l \gg \Delta h$, так как высоту отражателя над линией прямой видимости не имеет смысла делать очень большой по сравнению с величиной $H \approx 1,5$ км. В этом случае можно определить области, где выполняется неравенство (5), по графикам рис. 2. Очевидно, что эта область находится справа от точки пересечения кривой 1 с прямой 2. Чем меньше параметр α , тем ближе точка пересечения к началу координат. Если $\alpha = 0$, то неравенство (7) удовлетворяется при любом Δx .

2. Экспериментальные исследования КОР в миллиметровом диапазоне. Для того чтобы оценить возможность использования плазменного ореола оптического разряда в качестве пассивного ретранслятора, был проведен ряд лабораторных экспериментов по определению максимальных размеров (d_{\max}), коэффициента отражения (r) и времени существования ореола.

Инициирование КОР осуществлялось фокусировкой импульсного излучения ОКГ ГОС 1001 ($\lambda = 1,06$ мкм, $\tau_{\text{и}} = 1$ мс, $W_{\text{и}} \approx 400$ Дж) в плотной струе частиц карбида бора (B_4C). Зондирование объекта проводилось на длинах волн 2,4 и 8 мм. Использовались генераторы модулированного излучения на ЛОВ мощностью до 10 МВт. Для измерения радиояркостной температуры ($T_{\text{я}}$) применялись радиометры компенсационного типа с полосой пропускания выходного каскада 100 кГц и чувствительностью $\Delta T_{\text{min}} = 20 + 30$ К. Эксперименты по двухпозиционному рассеянию проводились с помощью наборов детекторных секций с чувствительностью не хуже 10^{-7} Вт. В качестве антенн использовались пирамидальные рупоры различных сечений от 20×20 до 70×70 мм². В процессе исследований варьировались размеры и концентрация аэрозольных частиц, мощность лазерного импульса и проводилось сопоставление полученных значений электронных концентраций (N_e) и температур с данными ранее проведенных оптическими методами экспериментов: $N_e^{\max} = 10^{17}$ см⁻³, $T_{\text{кин}} = 1,3 \cdot 10^4$ К [5].

На длинах волн 2 и 8 мм были проведены синхронные измерения динамики размера области закритической концентрации электронов ($N_{\text{кр}}^{(8)} = 1,74 \cdot 10^{13}$ см⁻³, $N_{\text{кр}}^{(2)} = 2,79 \cdot 10^{14}$ см⁻³) и радиояркостной

температуры, $T_{я}$, КОР [6]. Размеры КОР оценивались по эффекту экранирования части апертуры приемной антенны, находящейся в зоне геомоптики объекта и облучаемой плоской волной удаленным генератором. Величина $T_{я}$ определялась по приращению антенной температуры с учетом площади, занимаемой объектом в апертуре приемной антенны. Двухчастотное зондирование позволило судить о динамике градиента N_e КОР.

На длинах волн 4 и 8 мм проводилось двухпозиционное активное зондирование КОР. Приемные и передающие антенны располагались в зоне геомоптики объекта. Варьировались углы зондирования от 15 до 120°, размеры и взаимное расположение антенн. Был проведен эксперимент по рассеянию сигнала КОР на плоской границе, созданной с помощью тонких диэлектрических пластин.

В результате проведенных измерений удалось получить некоторые сведения о плазменном ореоле КОР.

Максимальные размеры плазменного ореола ($N_e \geq N_{e,кр}$) вдоль лазерного луча определяются протяженностью фокальной области, а в поперечнике в течение первой миллисекунды увеличиваются до 5 - 6 см. На протяжении последующих 6 - 10 мс размеры ореола сохраняются близкими к максимальным, причем градиент N_e очень велик ($d_{max}^{(2)} \approx d_{max}^{(8)}$). Затем наступает стадия релаксации и $grad N_e$ и d_{max} плавно убывают до нуля за 8 - 10 мс.

Радиояростная температура поверхности ореола КОР достигает на $\lambda = 2$ мм $T_{я}^{(2)} = 900$ К, на $\lambda = 8$ мм $T_{я}^{(8)} = 470$ К. По данным работы [5] кинетическая температура газа внутри КОР $T_{кин} = 1,3 \cdot 10^4$ К, т.е. можно полагать, что в начальной стадии коэффициент поглощения поверхности КОР $\alpha \approx 0,1$, и максимальный коэффициент отражения $r = 1 - \alpha \approx 0,9$. В продолжении стабильной стадии развития ореола $T_{я}$ остается постоянной, затем убывает с характерным временем изменения размеров.

Опыты двухпозиционного зондирования показали, что форма и уровень мощности рассеянного сигнала мало меняются в зависимости от угла зондирования. Это говорит об изотропном характере рассеяния миллиметровых волн исследуемым объектом. Уровень рассеиваемой в заданном направлении мощности имеет несколько (обычно два) минимумов глубиной до - 7 дБ в стабильной стадии ореола, а затем плавно убывает синхронно с геометрическими размерами.

3. Использование КОР для загоризонтного распространения радиоволн при слабом атмосферном поглощении. Полученные результаты показывают, что плазменный ореол КОР может быть использован в качестве пассивного ретранслятора в миллиметровой и длинноволновой части субмиллиметрового диапазона.

Рассмотрим трассу, изображенную на рис. 1, предполагая коэффициент поглощения в газах достаточно малым. Размер фокального пятна, создаваемого передающей антенной на высоте рассеивателя h , равен

$$\delta \approx 1,2\lambda h/D, \quad (8)$$

где D - размер апертуры передающей антенны. Протяженность области КОР вдоль лазерного луча обозначим за d' , тогда облучаемая передатчиком площадь рассеивателя равна

$$S_{\text{рас}} = d''d, \quad (9)$$

где $d'' = \min\{d', \delta\}$, d - поперечный размер ореола. Выражение для принимаемой в пункте 2 мощности примет вид

$$P_2 = \frac{P_1(d''d)}{(\pi\delta^2/4)} r \frac{1}{4\pi l^2} \frac{G_{\text{пр}}\lambda^2}{4\pi} \approx 1, \quad (10)$$

где $G_{\text{пр}}$ - коэффициент усиления приемной антенны, r - коэффициент отражения поверхности рассеивателя.

Как указывалось выше, на практике реализована фокусировка мощного лазерного импульса на расстоянии порядка ста метров от ОКГ. При этом размеры области КОР составляют $d' \approx 1$ м, $d \approx 0,05$ м. Если лазер, стимулирующий пробой, размещен в непосредственной близости от передающего пункта, высота разряда над уровнем Земли также порядка ста метров. Полагая для передающей антенны $D/\lambda \approx 1000$, получим $\delta \approx 0,1$ м, тогда $d'' = \delta \approx 0,1$ м, $S_{\text{рас}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, $\alpha = S_{\text{рас}}/(\pi\delta^2/4) = -14$ дБ.

Для благоприятных метеоусловий: атмосферное давление 760 мм рт. ст., температура воздуха 20°C и влагосодержание $7,5$ г/см³, коэффициент погонного ослабления в парах воды на длине волны $1,4$ м $\alpha_0 = -1,9$ дБ/км [7]. При этом потери на рассеяние ретранслятором могут быть легко перекрыты за счет резерва энергетического потенциала аппаратуры связи [8] и появляется возможность увеличивать расстояние l в пределах расширившейся зоны прямой видимости.

При неблагоприятных метеоусловиях отсутствует резерв энергетического потенциала аппаратуры, и, несмотря на повышение эффективности наклонной трассы по сравнению с приземной, линии протяженностью более 10 км могут быть реализованы лишь с помощью уникального оборудования.

Таким образом, искусственные плазменные образования, создаваемые в атмосфере воздействием мощного лазерного излучения на аэрозольное облако, имеют достаточную высоту, электронную концентрацию и размеры для использования в качестве пассивных ретрансляторов в линиях связи миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн на расстояния от 10 до 40 км при благоприятных метеоусловиях. Время существования таких объектов порядка 10 мс позволяет применять их в сверхширокополосных системах обмена большими количествами информации, не требующих непрерывной работы.

Для определения метеоусловий, обеспечивающих работоспособность линий связи, необходим дополнительный статистический анализ имеющихся данных о суточных и сезонных вариациях параметров атмосферы, влияющих на распространение радиоволн миллиметровых и субмиллиметровых диапазонов.

Следует отметить, что эффективность плазменного разряда как ретранслятора можно повысить, увеличив его геометрические размеры, высоту расположения и продолжительность существования. Для этого необходимо проведение специальных работ по совершенствованию техники и методов лазерной инициализации атмосферной плазмы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Caressa J.P. et al. //J.Appl.Phys. 1979. V.50. N 11. Pt.1. P.6822.
2. Годлевский А. П., Копытин Ю. Д. //Квантовая электроника. 1982. Т.9. N 6. С.1280.
3. Olich B.L. //Astrophys Lett. 1980. V.91. N 1. P.21.
4. Кисляков А. Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 1966. Т.9. N 3. С.451.
5. Кособурд Т. П., Сорокин Ю. М. //ЖТФ. 1988. Т.58. N 7. С.1318.
6. А. С. 1555654 СССР. Способ измерения параметров излучения нестационарных объектов/В. А. Канаков, А. Г. Кисляков, Ю. М. Сорокин, С. Е. Финкельштейн. - Опубл. в Б.И. 1990. N 13.
7. Калинин А. И. Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиолиний. - М.: Связь, 1979. С. 157.
8. Розанов Б. А. //Тезисы докл. II Всесоюзной школы-симпозиума по распространению мм и субмм волн в атмосфере. Фрунзе, 1986. С. 235.

Нижегородский государственный
университет

Поступила в редакцию
20 февраля 1991 г.

MILLIMETRE RADIO WAVE SCATTERING ON THE LASER INDUCED AIR BREAK-DOWN IN ATMOSPHERIC DUST

A. G. Kislyakov, V. A. Kanakov, Yu. M. Sorokin, S. E. Finkel'shtein

Total atmospheric gas absorption of mm radio waves on the near-ground and oblique, with scatterer, traces is compared. The mm radio wave scattering properties of the plasma nimbus of laser induced air break-down in atmospheric aerosol are studied experimentally. It's shown, that laser induced air breakdown is usable as repeater for mm band communication lines extended down to 40 km.