

## **Повышение разрешающей способности квазинепрерывных лидаров для дистанционных измерений концентрации метана в атмосфере Земли**

В.И.Григорьевский, Я.А.Тезадов

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Российская Федерация, 141190 Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1, e-mail: [vig248@ire216.msk.su](mailto:vig248@ire216.msk.su)

*В работе рассматриваются вопросы разрешающей способности оптического лидара по измерению фоновой концентрации метана в атмосфере как на приземных горизонтальных трассах с отражением оптического сигнала от природных объектов, так и на вертикальных трассах, когда оптический сигнал отражается от облачных слоев. С помощью моделирования было показано, что на горизонтальных трассах разрешающую способность по концентрации метана  $\sim 0.1$  ppm (частей на миллион) или  $\sim 6\%$  от фоновой концентрации, а по ширине линии поглощения  $\sim 0.006$  нм можно получить при соотношении сигнал/шум для принимаемых сигналов  $\sim 200$ . Для описываемого лидара время накопления сигнала для указанного разрешения составляет  $\sim 16$  секунд. В случае измерения с космической орбиты при соответствующих параметрах приемопередатчика лидара для того же самого разрешения, время накопления сигнала может быть снижено до 1 секунды в силу большего ослабления сигнала в центре линии поглощения в атмосферном столбе воздуха. На приземных трассах экспериментальные результаты хорошо согласуются с результатами моделирования. При экстраполяции результатов на космические измерения за время накопления сигнала 1 с горизонтальное разрешение по горизонтальной координате составит  $\sim 8$  км при орбитальной скорости спутника  $\sim 8$  км/с. Разрешение по вертикали при измерениях с космической орбиты может составить  $\sim 1.5$  км, если задаться точностью измерения уширения линии поглощения в  $\sim 0.006$  нм (10%). Уширение линии излучения передатчика лидара в 2-3 раза заметно не снижает разрешающую способность лидара, что позволяет повысить излучаемую мощность на рассматриваемой длине волны  $\sim 1653$  нм и улучшить энергетический потенциал прибора в целом.*

*The work discusses the resolution of the optical lidar for measuring the background concentration of methane in the atmosphere both on surface horizontal paths with reflection of the optical signal from natural objects, and on vertical paths when the optical signal is reflected from cloud layers. Using simulation, it was shown that, on horizontal paths, the resolution in methane concentration is  $\sim 0.1$  ppm (parts per million) or  $\sim 6\%$  of the background concentration, and the absorption line width resolution  $\sim 0.006$  nm can be obtained with a ratio signal to noise is  $\sim 200$ . For the described lidar, the signal accumulation time for the indicated resolution is  $\sim 16$  seconds. In the case of measurements from space orbit with the corresponding parameters of the lidar transceiver for the same resolution, the signal accumulation time can be reduced to 1 second due to the greater attenuation of the signal in the center of the absorption line in the atmospheric column of air. On surface paths, the experimental results are in good agreement with the simulation results. When extrapolating the results to space measurements during a signal accumulation time of 1 s, the horizontal resolution in the horizontal coordinate will be  $\sim 8$  km at a satellite orbital speed of  $\sim 8$  km / s. The vertical resolution for measurements from space orbit can be  $\sim 1.5$  km, given the accuracy of measuring the broadening of the absorption line  $\sim 0.006$  nm (10%). A broadening of the emission line of the lidar transmitter by a factor of 2–3 does not noticeably decrease the resolution of lidar, which makes it possible to increase the radiated power at the considered wavelength of  $\sim 1653$  nm and improve the energy potential of the device as a whole.*

В последние годы проявляется большой интерес к глобальному мониторингу парниковых газов, таких как метан и углекислый газ с космических аппаратов оптическими методами. Особенно перспективным является направление, использующее активные лазерные дистанционные газоанализаторы в силу их

высокой точности определения концентраций парниковых газов. Например, проект *Merlin* по определению глобального распределения метана со спутника, планируют осуществить в 2021 году [1]. Определение вертикального распределения газа в столбе атмосферы в данной миссии невозможно в силу используемого метода. Для такого определения необходим прибор, который определял бы ширину линии поглощения, а также расстояние до отражающей точки на поверхности Земли, чтобы корректно решать обратную задачу [2]. Однако, разрешающая способность такого прибора в вертикальной и горизонтальной плоскостях остается неясной.

Целью работы является моделирование и экспериментальное исследование разрешающей способности дистанционного лазерного газоанализатора (лидара), который мог бы с бортового аппарата измерять не только концентрацию метана, но и его ширину линии поглощения, а также расстояние до точки отражения оптического сигнала, тем самым имея возможность определять распределение метана в пространстве.

Для исследований был создан макет лидара с линейно-частотной модуляцией (лчм) задающего лазера с последующим усилением в мощном волоконном рамановском усилителе. Такой прибор был испытан в лаборатории и на приземных трассах. В передатчике лидара был использован рамановский усилитель на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния в кварцевом волокне [3]. Передатчик на выходе усилителя излучал оптическую мощность около 3 Вт на длине волны  $\lambda \sim 1653$  нм (линия поглощения метана  $R_3$ ). Ширину линии поглощения в используемом методе можно измерить достаточно точно, поскольку принимается и оцифровывается вся линия в интервале сканирования лазерного излучения по частоте. Даная информация позволяет уточнять распределение газа в пространстве.

Согласно закону Бугера интенсивность излучения, прошедшего через атмосферный слой, записывается в виде:

$$I / I_0 = \exp(-\alpha CL) \quad (1)$$

где  $I$  - интенсивность прошедшего света,

$I_0$  - интенсивность падающего света;

$\alpha$  - коэффициент поглощения газа,

$C$  - концентрация метана в ppm (частей на миллион),

$L$  - оптическая длина света сквозь газ.

Ширина спектральной линии поглощения газа зависит, в основном, от давления атмосферного воздуха, а коэффициент поглощения  $\alpha$  (форма линии) может быть аппроксимирован контуром Лоренца:

$$\alpha(\nu) = N_0 \sigma(\nu) = N_0 \sigma(\nu_0) / \left(1 + \frac{(\nu - \nu_0)^2}{\gamma^2}\right) \quad (2)$$

где  $N_0$  - количество молекул в единице объема, ( $N_0 = 2,6875 \times 10^{25}$  1/м<sup>3</sup> - число Лошмидта),

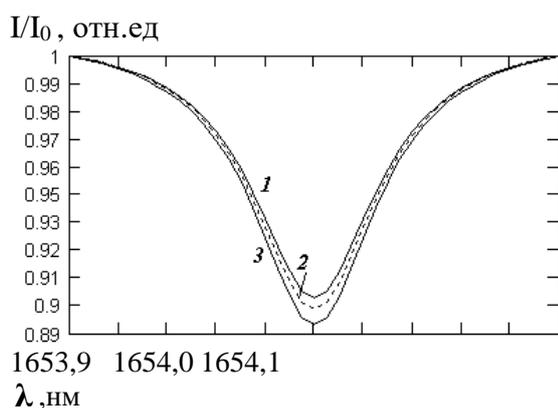
$\sigma(\nu)$  - поперечное сечение поглощения,

$\nu = 2\pi / \lambda$  - волновое число ( $\lambda$  - длина волны излучения),

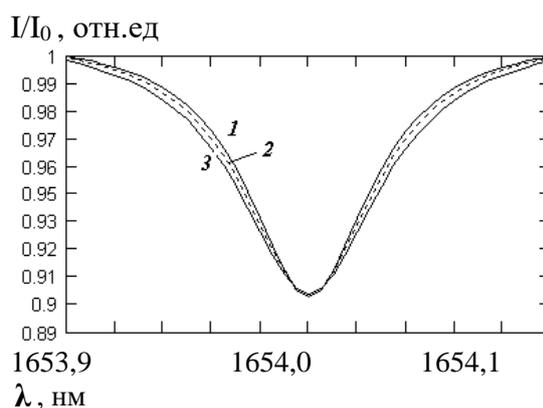
$\nu_0$  - волновое число в максимуме линии поглощения,

$\gamma$  - полуширина линии поглощения на полувысоте ее амплитуды.

Лидар измеряет  $L$  и величину  $I / I_0$  в диапазоне длин волн  $\sim 0.5$  нм, оцифровывая принятые сигналы с тактовой частотой около 1 мкс. На рис.1 графически представлены три нормированные на единицу графика зависимости  $I / I_0$  в диапазоне указанного интервала длин волн для расстояния 1200 м, вычисленные по формуле (1) с учетом (2), причем для каждой из трех кривых варьировалась концентрация  $C$ , входящая в (1). Концентрации метана для каждой из трех кривых отличаются на  $0.1$  ppm, то есть для фоновой концентрации метана в атмосфере Земли, равной  $1.7$  ppm это составляет примерно 6%.



**Рис.1. Нормированные линии поглощения для трех значений фона метана. 1-1.7 ppm, 2-1.8 ppm, 3-1.9 ppm**



**Рис.2. Нормированные линии поглощения метана для различных  $2\gamma$ : 1- $2\gamma=0.06$  нм, 2- $2\gamma=0.065$  нм, 3- $2\gamma=0.07$  нм**

Как видно из графика, кривые в точке минимума линии поглощения метана расходятся на величину  $\sim 0.005-0.006$ , поэтому, чтобы они были различимы при измерениях, необходимо обеспечить соотношение сигнал/шум в принятом сигнале  $\sim 170-200$ . На рис.2 построены графики для этого же расстояния зондирования с одинаковой концентрацией  $C=1.7$  ppm, но разными  $2\gamma$ , отличающимися на  $0.005$  нм друг от друга, что составляет тот ширины линии поглощения по половинному уровню примерно 8%. Графики построены также по формуле (1) с учетом (2). На половинном уровне своей амплитуды кривые расходятся на величину  $\sim 0.005-0.004$  отн. ед. по вертикальной оси, поэтому для обеспечения необходимой чувствительности соотношение сигнал/шум должно быть не менее  $250-200$ . То есть, для чувствительности описываемого лидара в 5% по концентрации и 8% по ширине линии поглощения, соотношение сигнал/шум в принятом сигнале должно составлять порядка  $200-250$  единиц и это достаточно высокие требования к “чистоте” принимаемого сигнала. Средняя ширина линии поглощения определялась по барометрической формуле с учетом весовой функции  $f(N)$  как:

$$2\gamma = \frac{1}{N} \int_0^N 2\gamma_0 f(N) \exp(-N/89) dN, \quad (3)$$

где  $2\gamma_0 = 0.0618$  нм – ширина линии поглощения в приземном слое атмосферы,

$N$  – номер слоя атмосферы при вертикальном просвечивании.

Величина  $f(N)$  – это весовая функция относительного распределения фона метана по высоте. Она до высоты  $\sim 10$  км постоянна  $f(N) = \text{const} \sim 1.7$  ppm, поэтому формула (3) упрощается, если высоты зондирования не превышают указанной величины.

При расчете по этой формуле 8%-ое изменение ширины линии поглощения происходит при изменении высоты на ~1.5 км, поэтому можно ожидать, что разрешение описываемого лидара по высоте при измерении концентрации метана составит такую же величину. Когда зондируется вся толща атмосферы с космического аппарата интегральные концентрации метана гораздо больше и “провал” на линии поглощения метана становится также больше. В силу этого, для разрешения по концентрации в ~0.1 ppm ~0.004 нм по ширине линии поглощения, сигнал/шум может составлять величину в 4 раза меньшую, то есть время накопления сигнала может быть снижено соответственно в 16 раз, до 1 секунды. Поэтому, можно ожидать, что разрешающая способность лидара при просвечивании всей толщи атмосферы космического аппарата будет составлять величину ~8 км по горизонтали. Для повышения принимаемого лидаром сигнала и увеличения его энергетического потенциала желательно увеличивать выходную мощность лазерного излучателя, однако при этом в силу нелинейных эффектов в волокне рамановского преобразователя оптического усилителя ширина линии излучения расширяется. Возникает вопрос: как сказывается эффект расширения линии излучения на параметры разрешающей способности лидара в целом. Для моделирования этого эффекта была рассчитана величина  $I / I_0$  в диапазоне длин волн по следующей формуле:

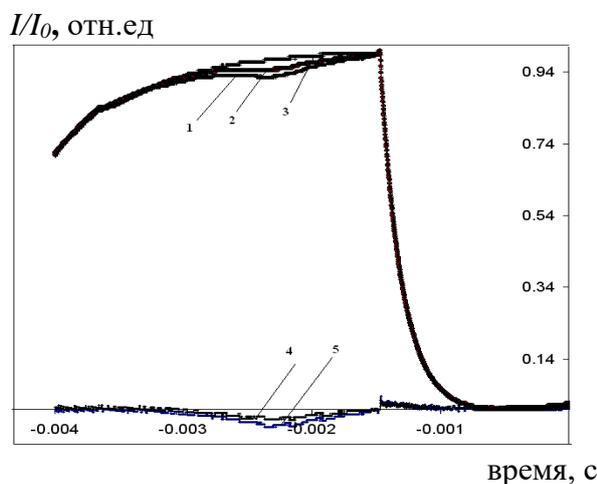
$$I / I_0 = \int_{\lambda-\Delta}^{\lambda} \left( \exp(-N_0 \sigma(v_0) CL / (1 + \frac{(v - v_0)^2}{\gamma})) \right) dv \quad (4)$$

где  $\Delta = 0.08$  нм - ширина излучаемой лазерной линии, остальные обозначения аналогичны обозначениям формул (1) и (2). По результатам расчета для концентрации 1.7 ppm, 1.8 ppm, 1.9 ppm в случае трассы длиной 1200 м на длине волны минимума сигнала величины “провалов” равны соответственно: 0.935, 0.931, 0.927. Линии в точке минимума разойдутся на величину ~ 0.004. То есть, чувствительность к измерению величины концентрации уменьшается на ~10-20% по сравнению со случаем без интегрирования. Как показывает расчет, аналогичная картина наблюдается и в случае зондирования метана с космического аппарата: чувствительность к измерениям уменьшается всего на ~10-20%, мощность же на выходе рамановского усилителя при ширине линии 0.08 нм можно получить в ~3 раза больше, чем в случае линии излучения с шириной 0.03 нм, то есть выигрыш в соотношении сигнал/шум может составить ~3 раза, а, следовательно, примерно такое же улучшение в разрешающей способности.

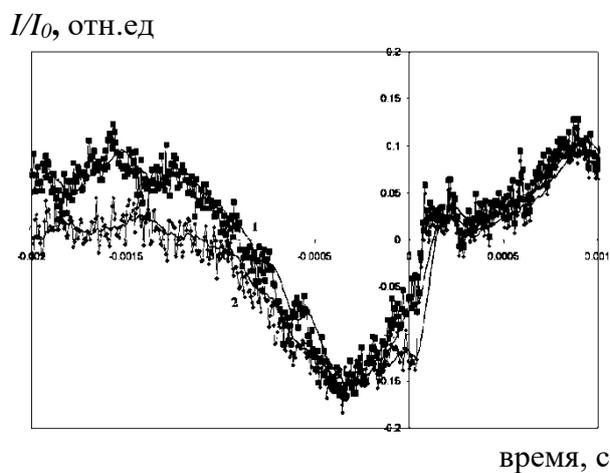
Эксперименты выполнялись на атмосферных трассах. Лидар работал на горизонтальной трассе при отражении света от листвы деревьев и на вертикальной трассе, когда свет отражался от облаков. На графике, рис.3 представлены полученные результаты. Для расстояния 600 м концентрация оказалась равной 1.05 мм осажденного слоя. При фоне 1.7 ppm теоретическое значение на этом расстоянии составляет величину 1.02 мм осажденного слоя метана. Учитывая погрешности в измерениях, можно сказать, что согласие теоретических и экспериментальных значений достаточно хорошее. Для расстояния 300 м. полученный из измерений осажденный слой метана оказался равным 0.53 мм (теоретическое значение 0.51 мм). Разность между полученными величинами осажденного слоя на двух трассах составило величину 0.52 мм, что совпало с точностью 2% с теоретическим значением: 0.51 мм.

Для проверки моделирования по измерению ширины линии поглощения газа проводились измерения на вертикальной трассе с Земли. Отражение оптического сигнала осуществлялось от сравнительно однородных облачных слоев, располагающихся на высотах около 3.4 км (высокий облачный слой) и 1.5 км (низкий

облачный слой). Было проведено по 25 одноканальных измерений как концентрации газа на данных трассах, так и ширины линии поглощения метана. На рис.4 представлены итоговые результаты по измерениям. Из графика видно, что 16 реализаций одноканальных измерений достаточно, чтобы с нужной точностью измерить ширину линии поглощения. Видно, что ширина линии поглощения метана имеет меньшую величину при работе по высокому облачному слою. Она оказалась равной 0.054 нм, теоретическая величина, рассчитанная по формуле (4) дает значение 0.051 нм. Ширина линии при работе по низкому облачному слою оказалась равной 0.058 нм, а вычисленная по формуле (4) - 0.057 нм. Как видно из полученных данных, теоретическая разница в 0.006 нм в ширине линии поглощения была определена экспериментально как 0.004 нм в течение 16 секунд. Отличие теоретических данных от экспериментальных результатов можно объяснить некоторой неточностью определения высоты точки отражения в облачных слоях и погрешностями измерений.



**Рис.3.** Экспериментальные результаты по измерению концентрации метана на трассах 600 и 300 метров. 1- 600 метров, 2- 300 метров, 3 - 0 метров (калибровка), 4 - разность сигналов 2 и 3, 5 – разность сигналов 1 и 3



**Рис.4.** Экспериментальные результаты по измерению ширины линии поглощения газа на трассах 1500 и 3400 метров с отражением от облачных слоев: 1- усреднение шестнадцати 1-секундных реализаций для облачных слоев на высоте 3.4 км, 2- для облачных слоев на высоте 1.5 км

Таким образом, представленные результаты теоретического моделирования определения разрешающей способности оптического лидара хорошо согласуются с данными экспериментальных исследований. В силу этого можно предположить, что при измерениях с борта космического аппарата можно ожидать также удовлетворительного согласия с результатами моделирования величины разрешающей способности, которая, как ожидается, составит величину  $\sim 8$  км в горизонтальной плоскости и  $\sim 1.5$  км в вертикальной плоскости при просвечивании всей толщи атмосферы. Уширение линии излучения передатчика лидара в  $\sim 3$  раза позволяет увеличить мощность передатчика во столько же раз, что может обеспечить и лучшую разрешающую способность лидара: до 5-10 метров при скорости движения луча лидара, соответствующей скорости перемещения вертолета.

### Литература

1. eoPortal Directory. -Режим доступа: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/m/merlin>
2. G. A. Akimova, V. I. Grigorievsky, Yu. P. Strykh, V. P. Sadovnikov, Y. A. Tezadov, and A. V. Fedenev On a Method for Measuring Methane Concentration on Extended Atmospheric Paths Using a Remote Gas Analyzer with a Powerful Raman Amplifier // Journal of Communications Technology and Electronics, 2019, V. 64, №. 11, -P. 1251–1255.
3. V.I. Grigorievsky, Ya. A. Tezadov, and A.V. Elbakidze. Modeling and investigation of high-power fiber-optical transmitters for lidar applications // Journal of Russian Laser Research, 2017, V 38, № 4, -P.311-315.