

Оптимизация частотно-модулированных характеристик выходного излучения лидара с рамановским усилителем

В.И.Григорьевский, Я.А.Тезадов

Проведено исследование, направленное на увеличение мощности передающего тракта лидара с рамановским усилителем для контроля метана на протяженных трассах посредством оптимизации частотно-модулированных характеристик выходного излучения. Ток накачки используемого задающего лазера с распределенной обратной связью модулировался линейно-частотным сигналом с одновременно наложенным несинхронным сигналом высокой частоты. Рамановский усилитель для такого режима модуляции обеспечил среднюю выходную мощность 2.5 Вт на длине волны 1650 нм. Уширение спектра излучения заметно не ухудшало чувствительность лидара на протяженных трассах.

Ключевые слова: лидар, рамановский усилитель, лазер, бриллюэновское рассеяние.

В работе [1] для увеличения порога бриллюэновского рассеяния в волокне было предложено использовать дополнительную частотную модуляцию тока накачки лазера с целью увеличения расстояния уверенного приема по волоконной линии связи. В работе [2] эта идея применялась для увеличения порога бриллюэновского рассеяния в волокне рамановского усилителя, используемого для контроля метана. На выходе такого усилителя получена мощность ~ 1 Вт. Приведены результаты детектирования метана на расстоянии ~ 10 м.

Целью настоящей работы является изучение возможности получения максимальной мощности излучения на выходе рамановского усилителя для увеличения дальности действия лидара посредством оптимизации частотно-модулированных характеристик выходного излучения без

заметного снижения чувствительности лидара к детектированию метана.

Ниже приведены результаты оптимизации передающего тракта с рамановским усилителем путем дополнительной высокочастотной модуляции тока накачки задающего лазерного источника, что позволило получить на выходе усилителя среднюю мощность ~ 2.5 Вт, а в максимуме линейно-частотного сигнала – мощность более 3 Вт без заметного снижения чувствительности лидара. Вначале ширина спектра оптического сигнала на выходе волоконного рамановского усилителя составляла ~ 0.0005 нм (~ 60 МГц), а усилитель использовался в составе установки, схема которой приведена на рис.1. Расстояние до мишени было равно ~ 100 м. Осциллограф регистрировал сигналы с опорного фотоприемника 1 и фотоприемника 2,

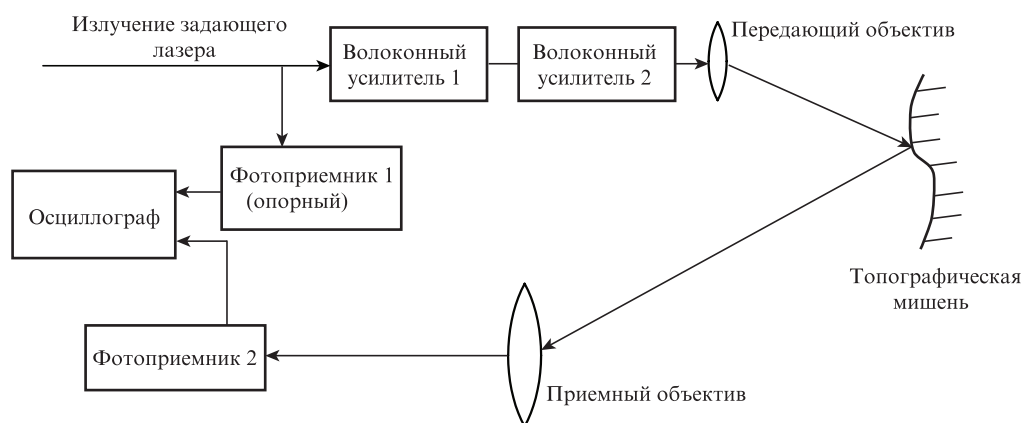


Рис.1. Блок-схема установки по детектированию метана.

В.И.Григорьевский. Филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Акад. Введенского, 1; e-mail: vig248@ire216.msk.su
Я.А.Тезадов. ИРЭ-Полус, Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Акад. Введенского, 1

Поступила в редакцию 16 июня 2015 г., после доработки – 17 ноября 2015 г.

который принимал сигнал с дистанции. Осциллограммы сигналов с фотоприемников показаны на рис.2 для случая узкого спектра оптического сигнала. Видно, что сигнал, принимаемый фотоприемником 2, сильно искажен из-за взаимодействия рассеянного бриллюэновского сигнала с полезным сигналом в волокне рамановского усилителя, причем от периода к периоду линейно-частотного модулирующего (ЛЧМ) сигнала хаотические флуктуации

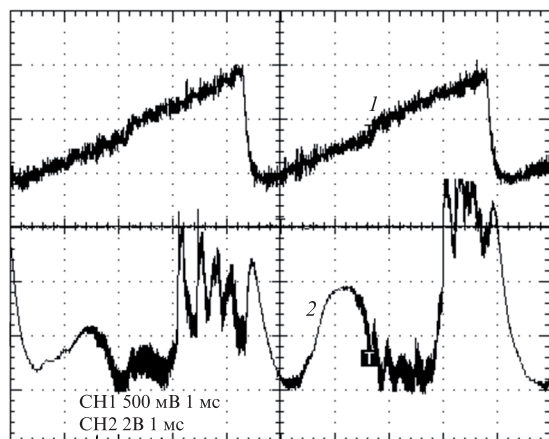


Рис.2. Сигналы с фотоприемников 1 (1) и 2 (2). Сигнал 2 получен при отражении от серого кирпича, расположенного на расстоянии 100 м от лидара. Выходная мощность лидара 2.5 Вт.

сигнала не повторяют друг друга, т. е. наблюдается нестационарный неусредняемый шум.

Для устранения взаимного влияния двух оптических когерентных сигналов (полезного и рассеянного) к модулирующему сигналу тока накачки лазера был подмешан несинхронный дополнительный сигнал с частотой 36 МГц, так что общий сигнал модуляции наряду с ЛЧМ составляющей с частотой ~ 200 Гц имел составляющую с частотой 36 МГц и оптимальной амплитудой. Частота дополнительной модуляции выбиралась из следующих соображений: чем меньше была эта частота, тем большая амплитуда сигнала требовалась для получения максимального неискаженного выходного сигнала лидара. Однако увеличение амплитуды дополнительного модулирующего сигнала приводило к уширению спектра выходного излучения, что снижало чувствительность лидара при детектировании метана. С другой стороны, амплитуда дополнительного сигнала заметно не влияла на временную зависимость интенсивности выходного излучения при частотах выше 36 МГц, поэтому ее можно было выбрать минимально возможной для этой частоты. Ширина оптического спектра сигнала при оптимальной дополнительной модуляции увеличилась до 0.03 нм по уровню 3 дБ. В этом случае сигнал, принимаемый с трассы, стал стабильным (рис.3), с небольшим белым шумом, хорошо поддающимся усреднению.

Как показано в [2], порог бриллюэновского рассеяния увеличивается пропорционально отношению ширин уширенного и исходного спектров источника сигнала, т. е. в нашем случае в $0.03/0.0005 = 60$ раз. В отсутствие дополнительной высокочастотной модуляции порог бриллюэновского рассеяния составляет 20 мВт [2], а при наличии такой модуляции – 1200 мВт. В результате бриллюэновское рассеяние не создает нежелательного шума в принимаемом с трассы сигнале.

Оценим потерю чувствительности лидара из-за дополнительного уширения линии излучения. На рис.4 представлена зависимость относительной чувствительности лидара при детектировании метана (ширина линии поглощения принята равной 0.1 нм) от ширины линии излучения лидара $\Delta\lambda$. Видно, что при уширении линии чувствительность уменьшается незначительно. Так, для $\Delta\lambda = 0.03$ нм снижение чувствительности составляет всего $\sim 6\%$. При этом выходная мощность лидара увеличи-

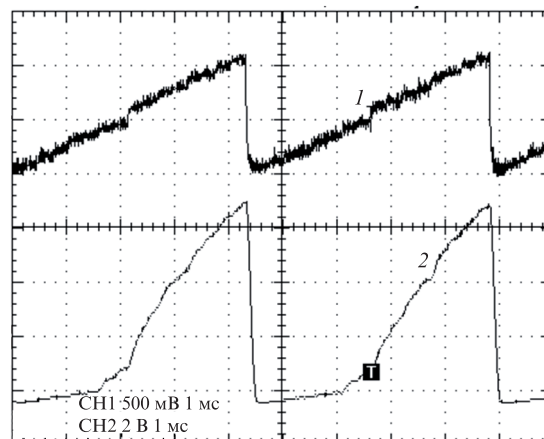


Рис.3. То же, что и на рис.2, но при дополнительной несинхронной модуляции тока накачки лазера с частотой 36 МГц.

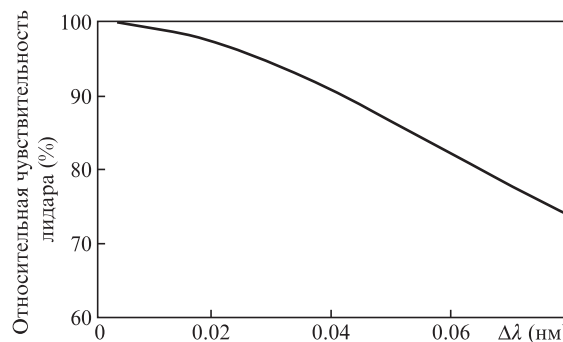


Рис.4. Относительная чувствительность лидара при детектировании метана в зависимости от ширины линии излучения лидара $\Delta\lambda$.

вается в шесть-семь раз, так что потеря чувствительности почти не сказывается на точности измерений, а дальность действия лидара возрастает в два-три раза. Расчеты были проведены с использованием программы Mathcad.

На рис.5 в качестве примера представлены результаты измерения концентрации метана в калиброванной кювете, расположенной на трассе измерений, при отражении света от серого силикатного кирпича. Первые измерения проводились в отсутствие кюветы с метаном на трассе измерений, а затем она устанавливалась перед коллиматором передающего лазера. Приемная и передающая оптические системы были разнесены на расстояние ~ 10 см, поэтому паразитное отражение от кюветы не попадало в приемный тракт и не искажало результатов при регистрации слабых входных оптических сигналов. Полная длина трассы (туда и обратно) составила 2.4 км. Каждая точка на рис.5 соответствует одному измерению в те-

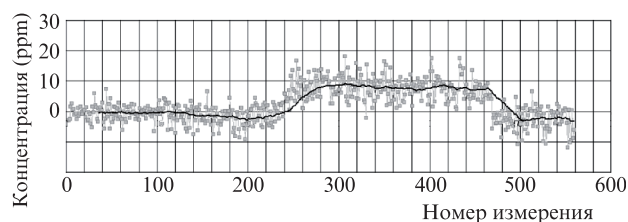


Рис.5. Измеренные концентрации метана в калиброванной кювете (точки) и их аппроксимация (сплошная кривая). Расстояние до измерений составляло 1.2 км.

чение ~ 50 мс. Оптическая плотность метана в кювете равнялась оптической плотности слоя метана толщиной 15 мм при атмосферном давлении, что соответствовало средней концентрации метана на данной трассе ~ 6 ppm. При аппроксимации измеренных концентраций с помощью линейного фильтра (сплошная кривая на рис.5) можно уверенно определять изменение фонового сигнала, эквивалентное концентрации метана на трассе 2–3 ppm.

Таким образом, проведенные исследования позволили увеличить выходную мощность лидара в шесть-семь раз без заметного снижения его чувствительности при де-

тектировании метана. Для используемого рамановского усилителя найдены оптимальные амплитуда и частота сигнала дополнительной модуляции тока накачки лазерного источника, сводящие практически к нулю нежелательное когерентное бриллюэновское рассеяние в выходном волокне лидаров.

1. Fishman D.A., Nagel J.A., Park Yong-Kwan. *Reduction of Stimulated Brillouin Scattering in a Fiber Optic Transmission System*. US Patent 5,329,396 (1994).
2. Mitchell D., Duffin K., Johnstone W. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7503**, 750350 (2009). Doi: 10.1117/12.835810.