

УДК 535.361.22, 550.34.016, 53.082.52

РАЗНОНАПРАВЛЕННАЯ МОДУЛЯЦИЯ СЕЗОННОГО СЖАТИЯ КОРЫ ЗЕМЛИ И СИГНАЛА АЭРОЗОЛЬНОГО ЛИДАРА В ТОННЕЛЕ НАД ОЧАГОМ ВУЛКАНА ЭЛЬБРУС

© 2021 г. С. М. Першин^{1,*}, член-корреспондент РАН А. Л. Собисевич², М. Я. Гришин¹, В. А. Завозин¹, В. С. Макаров³, В. Н. Леднёв¹, А. Н. Фёдоров¹, А. В. Мясников⁴, Д. Г. Артёмова¹

Поступило 18.10.2021 г.

После доработки 18.10.2021 г.

Принято к публикации 27.10.2021 г.

В августе-октябре 2019 г. в тоннелях Баксанской нейтринной обсерватории над очагом вулкана Эльбрус было проведено зондирование аэрозольного рассеяния и деформации коры Земли. Обнаружена разнонаправленная модуляция сезонного сжатия коры с кратным превышением средней скорости (~4 мкм/сут) и сменой знака снижения лидарного сигнала рассеяния на аэрозолях на аномальный рост в “горячем” тоннеле. Установлено, что модуляция индуцирована быстрым охлаждением внешней атмосферы. Измерены задержки ускоренного сжатия плеча деформографа (до 14 мкм/сут) и начала роста лидарного сигнала рассеяния относительно начала снижения температуры (~2 и ~7 сут соответственно). Механизм обнаруженных явлений обсуждается.

Ключевые слова: лидар, аэрозольное рассеяние, деформация земной коры, деформограф, разнонаправленная модуляция

DOI: 10.31857/S2686740021060134

Известно [1–3], что знак и величину сезонной деформации коры Земли солнечно-лунными приливами, сейсмическими волнами измеряют лазерными деформографами-интерферометрами Майкельсона, чувствительность которых зависит от длины измерительного плеча. Так, деформограф с длиной плеча 75 м, установленный в главной штольне подземной Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН (БНО) на расстоянии ~600 м от входа, обеспечивает разрешающую способность $\sim 1.6 \times 10^{-11}$ м [2, 3]. Недавно [4] мы обнаружили, что сезонная деформация коры Земли, измеряемая лазерным деформографом в главной штольне БНО, сопровождается разнонаправленной модуляцией скорости сжатия плеча интерферометра и одновременным переключением коэффициента рассеяния на аэрозолях со снижения на

увеличение в тупиковом “горячем” тоннеле ($43^\circ 14' 57.7''$ N, $42^\circ 43' 19.5''$ E, постоянная температура воздуха $\sim 38^\circ\text{C}$) над очагом вулкана Эльбрус, удаленном от входа БНО на 3900 м. Физический механизм обнаруженной разнонаправленной модуляции остается пока неясным, его изучение является целью данной работы.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

Зондирование вариаций аэрозолей производили с помощью разработанного нами уникального лидара нового типа [4] на базе диодного лазера [5, 6] с безопасным для глаз уровнем излучения (< 1 мкДж \cdot см⁻²) [7] и однофотонного приемника [8]. Общий вид лидара представлен на рис. 1а. В каждом сеансе зондирования с интервалом 30 мин лидар излучал 100 000 импульсов с частотой повторения 10 кГц. Отметим здесь, что сигнал лидара суммирует вклады всех магматических газов и паров воды, которые выносят аэрозоли в объем тоннеля на длине наклонной трассы зондирования, что увеличивает чувствительность лидара к геодинамическим процессам при деформации коры [4]. Лидар был установлен в БНО в “горячем” тоннеле геофизической лаборатории № 2 Института физики Земли РАН (схема тоннелей БНО с научными лабораториями показана на рис. 1б).

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

³ Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

⁴ Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: pershin@kapella.gpi.ru

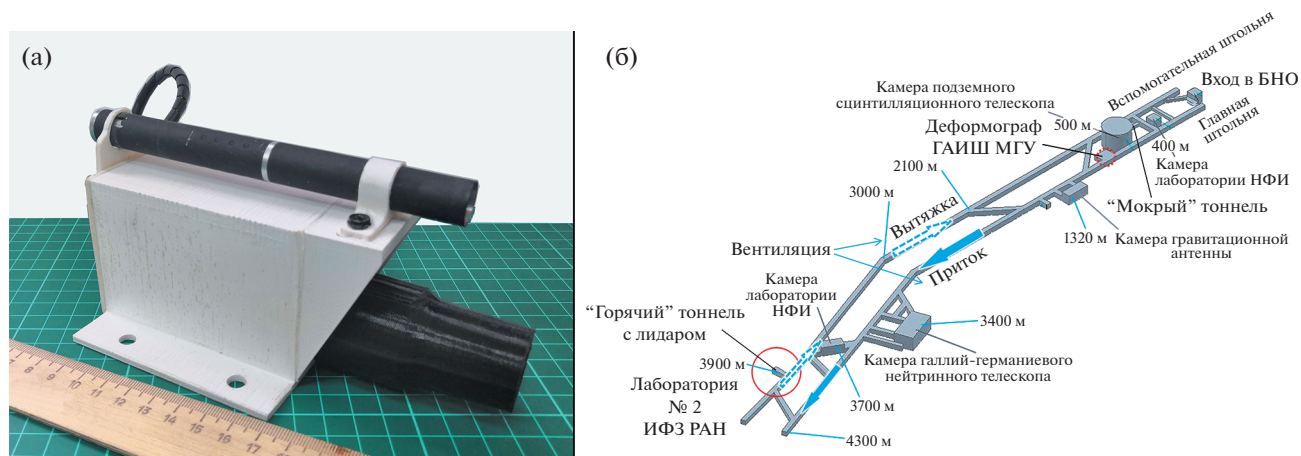


Рис. 1. а – общий вид аэрозольного лидара; б – схема тоннелей БНО с научными лабораториями и оборудованием. Лазерный деформограф Государственного астрономического института им. Штернберга (ГАИШ) и лаборатория Института физики Земли (ИФЗ) с лидаром в “горячем” тоннеле отмечены пунктирным и сплошным кругами соответственно. “Мокрый” тоннель расположен на удалении 450 м от входа БНО. Направление потока принудительной вентиляции тоннелей обозначено стрелками “вытяжка” и “приток”.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

На рис. 2а показаны зависимости от времени сезонной деформации коры Земли по данным лазерного деформографа в штольне БНО (черная линия) и сигнала лидарного зондирования аэрозолей в тупиковом “горячем” тоннеле БНО (серая линия). Для оценки средней скорости (~ 4 мкм/сут) сезонного сжатия коры Земли была методом наименьших квадратов проведена пунктирная линия. Из рис. 2 видно, что на месячном отрезке измерений отчетливо наблюдается разнонаправленная низкочастотная (неделя–две) модуляция сигнала деформографа и аэрозольного лидара относительно среднего значения обеих зависимостей (пунктирная линия). Так, 6, 21 и 27 сентября начинаются фазы сжатия плеча деформографа с большей скоростью (до ~ 14 мкм/сут, тонкие наклонные линии 1, 2, 3 на рис. 2а), которые чередуются с последующим расширением. Особый интерес вызывает смена знака снижения лидарного сигнала аэрозольного рассеяния (рис. 2а, серая линия), обусловленного сезонным сжатием коры [3], на его аномальный рост, что указывает на наполнение тоннеля аэрозолями неясной природы.

При этом известно [2], что основным фактором вариаций длины плеча интерферометра-деформографа является температура внешней атмосферы. Для проверки действия этого фактора в нашем случае удаленного тоннеля мы сравнили (рис. 2б) сезонное сжатие деформографа с данными датчика температуры, размещенного в штольне рядом с деформографом на удалении 600 м от входа в БНО (рис. 1а).

Из рис. 2б видно, что за два месяца наблюдаемой температура атмосферы (рис. 2б, пунктирная кривая) понизилась на $\sim 4^\circ\text{C}$ с кратковременны-

ми (3–6 дней), но быстрыми (10–15 ч) похолоданиями (на $1\text{--}2^\circ\text{C}$). Существенно, что сокращение длины плеча деформографа совпадает с вариациями температуры [2]. Кроме того, отчетливо проявляется продолжительная (~ 2 сут) задержка начала деформации коры Земли относительно быстрого снижения температуры (рис. 2б, вертикальные стрелки). Вариации длительности задержки при одинаковом градиенте температуры на фронте понижения отражают степень напряженного состояния горных пород в сейсмоактивном регионе [9] Северного Кавказа и допускают его мониторинг.

Отсюда следует, что температура атмосферы является одним из управляющих факторов деформации коры. При этом отметим, что температура основания в удаленном “горячем” тоннеле, где проводилось лидарное зондирование аэрозолей, уменьшилась за два месяца измерений только на $\sim 0.1^\circ\text{C}$, что позволило нам ранее [4] сделать допущение об отсутствии влияния температуры внешней атмосферы на вариации аэрозолей в тоннеле (рис. 2а, серая линия). Однако высокая ($\sim 50\%$) относительная влажность воздуха в тоннеле около лидара варьировалась также немонотонно [4] с заметным (2–4%) увеличением в виде коротких, а также и протяженных импульсов. Для удобства анализа мы совместили графики вариации аэрозолей (линия 1), температуры атмосферы (пунктирная кривая) и относительной влажности (толстая кривая) на одном рисунке (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что, как и следовало ожидать, продолжительные (\sim неделя) интервалы похолодания с коротким фронтом снижения температуры совпадают с аномальной генерацией аэрозолей. При этом задержка между началом разнонаправ-

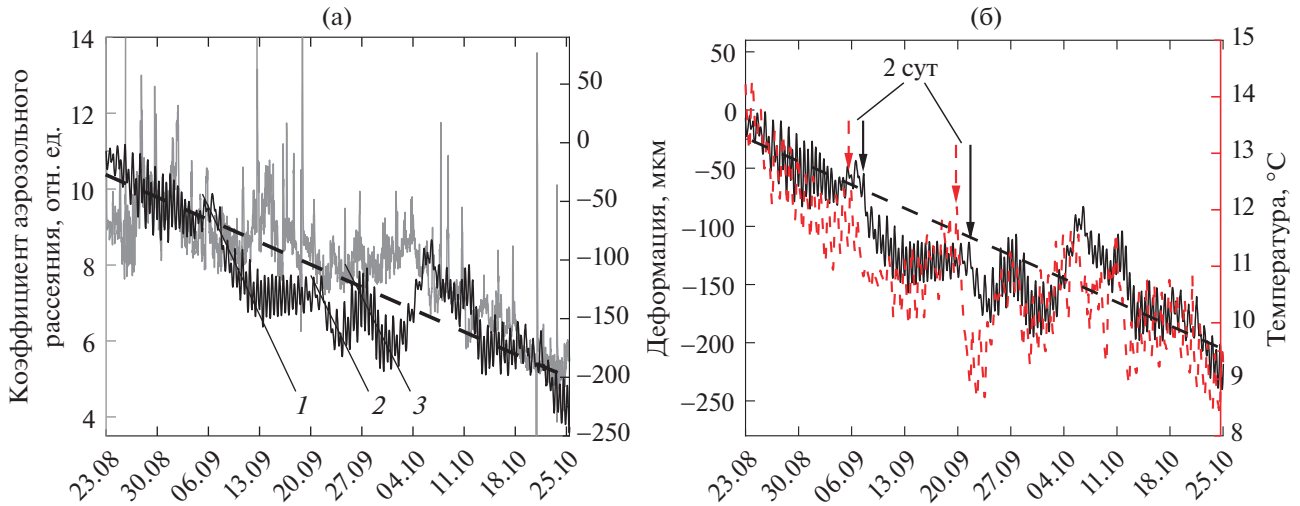


Рис. 2. а – Сезонное сжатие плеча 75-м лазерного деформографа в главной штольне БНО (черная линия) и коэффициент аэрозольного рассеяния (серая линия) по данным лидарного зондирования в тупиковом “горячем” тоннеле БНО, пунктирная прямая – средняя скорость сжатия, ~ 4 мкм/сут; б – модуляция сжатия-расширения плеча деформографа (черная линия), синфазная вариациям температуры внешней атмосферы (пунктирная кривая), вертикальные стрелки иллюстрируют задержку в ~ 2 сут между изменением температуры и деформацией коры. Шкала времени в стандарте UTC (coordinated universal time).

ленного отклонения лидарного сигнала рассеяния на аэрозолях и температуры увеличивается и наблюдается более отчетливо (рис. 3, вертикальные отрезки), чем при сравнении с деформацией коры Земли (рис. 2б).

Особый интерес здесь вызывают характерные особенности сезонной вариации влажности (линия 3) и концентрации аэрозоля (линия 1) в горячем тоннеле, а именно: сезонное снижение сигналов, короткие импульсы сигналов (длительность порядка единиц часов), а также недельные интервалы увеличения амплитуды. В некоторые моменты (отмечены сплошными стрелками) короткие импульсы роста влажности сопровождаются генерацией рассеивающих центров-аэрозолей также импульсами короткой длительности. Иногда генерация аэрозолей наблюдалась без роста влажности (стрелки с пунктирной линией). Заметим, что импульсы повышения влажности не превышают по амплитуде нескольких процентов, тогда как скачки сигнала лидарного рассеяния в два-три раза больше его средней величины. Сильное изменение лидарного сигнала при малом изменении управляющего фактора (относительной влажности воздуха) указывает на то, что лидар является весьма чувствительным инструментом.

Совокупность полученных данных показывает, что одним из факторов эффективной генерации аэрозолей являются пары воды (влажность). Фонтаны горячих магматических газов выносят эти пары в тоннель из трещин над очагом вулкана. Адиабатическое охлаждение при расширении фонтана газового выхода в объеме тоннеля с по-

ниженным давлением (до 600 мм рт. ст. на высоте 1700 м над уровнем моря) повышает вероятность образования тумана (аэрозолей) в воздухе с большой влажностью ($\sim 50\%$). Более того, наличие пыли в тоннеле как центров конденсации Айткена снижает порог образования тумана и повышает скорость этого процесса. Заметим, что гидрорежим

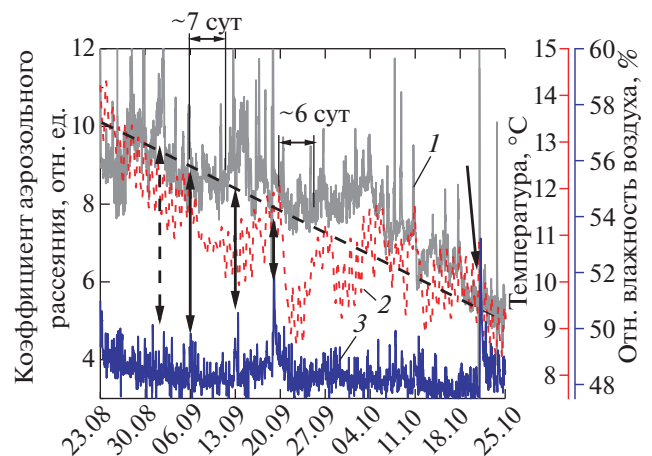


Рис. 3. Временной ряд сигналов рассеяния на аэрозолях (серая линия), температуры атмосферы (пунктирная кривая) и относительной влажности воздуха в тоннеле (синяя линия). Примеры синхронного увеличения лидарного сигнала рассеяния на аэрозолях и влажности отмечены стрелками (сплошные стрелки) и без увеличения влажности (пунктирные стрелки), а задержка смены знака вариаций аэрозолей от начала ускоренного снижения температуры – вертикальными отрезками.

горной выработки определяется естественной эволюцией ледника на вершине горы Андырчи, а также локальными источниками углекислых минеральных вод [10]. Так, просачивание воды ледника на протяжении многих лет регистрировали в тоннелях обсерватории Гран Сассо (Италия) [11]. О присутствии воды в скалах БНО и ее просачивании в объем тоннелей свидетельствуют водяные подтеки на потолке, а также небольшие сталагмиты на полу в “мокром” тоннеле недалеко от входа в БНО (рис. 16), в котором ранее [12] мы зондировали многослойные плотные туманы с перемещением фронта приточной вентиляции. Подобный процесс генерации тумана и скачков сигнала рассеяния происходит в “теплом” (36–38°C) и влажном воздухе горячего тоннеля при втягивании “холодного” (32–33°C) воздуха из потока вентиляции в штольне (рис. 16). При этом формируется температурная инверсия, которую мы обнаружили недавно, слой холодного воздуха над теплым, что указывает на градиент температуры и генерацию тумана.

Отсюда следует, что обнаруженная разнонаправленная модуляция обусловлена образованием тумана на границе теплого влажного воздуха в штольнях БНО и холодного воздуха атмосферы, приток которого в главную штольню БНО обеспечивает принудительная вентиляция. При перемещении по штольне холодный воздух нагревается, а штольня остывает, и зона образования тумана сдвигается от входа в штольню к “горячему” тоннелю (3900 м) (рис. 16). Через двое суток медленного охлаждения и распространения по штольне волны температурной деформации коры Земли лазерный деформограф (рис. 16, 600 м от входа) регистрирует увеличение скорости сжатия (до ~14 мкм/сут) скального основания (см. задержку ~2 сут на рис. 2б). Через 6–7 сут (рис. 3) протяженная зона тумана достигает “горячего” тоннеля-тупика и перемещается далее по вспомогательной штольне. При этом температура воздуха в штольне повысилась от 10–12°C на входе в БНО до 33°C около входа в “горячий” тоннель с температурой скального основания до ~38°C. Медленная циркуляция воздуха в “горячем” тоннеле из-за стекания тяжелых вулканических газов (радон, CO₂) по наклонному основанию от глухой стены к выходу обеспечивает втягивание тумана из штольни в тоннель под потолком. В это время знак сезонного снижения лидарного сигнала (рис. 2, 3) меняется на аномальный рост рассеяния на аэрозолях тумана, часть которого поступила с воздухом из штольни, а другая часть генерируется на границе контакта воздуха штольни с теплым воздухом “горячего” тоннеля.

Заметим, что медленное и продолжительное (неделя) увеличение влажности мы наблюдали дважды в середине интервала мониторинга. Важно, что максимальные значения влажности до-

стигались с задержкой ~6 сут после минимальной температуры воздуха у входа БНО (горизонтальные стрелки вверх рис. 3). Совпадение величины задержек генерации аэрозолей тумана и влажности в “горячем” тоннеле от вариации температуры атмосферы указывает на то, что тупиковый тоннель при непрерывно работающей принудительной вентиляции нельзя рассматривать как изолированный объем, несмотря на удаление 3900 м от входа в штольню БНО.

Таким образом, впервые, насколько нам известно, при лидарном мониторинге снижения выхода аэрозолей в “горячем” тоннеле-тупике над очагом вулкана Эльбрус обнаружены разнонаправленные вариации: аномальный рост сигнала рассеяния на аэрозолях при ускоренном (до 14 мкм/сут) сжатии коры Земли, измеренном деформографом. Выявленные задержки (2–7 сут) указывают на необходимость гармонического анализа сигналов лидара и метеопараметров, а также газового состава, на большей выборке данных, и защиты трассы зондирования от влияния вариаций атмосферы, например, погружением трассы лидарного зондирования в слой тяжелых газов у основания тоннеля.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00712).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мельхиор П.* Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.
2. *Милуков В.К., Мясников А.В.* Метрологические характеристики Баксанского лазерного интерферометра // Измерительная техника. 2005. № 12. С. 26–30.
3. *Milyukov V.K., Myasnikov A.V., Kuzminov V.V. et al.* 75 m laser strainmeter and aerosol lidar for monitoring the compression/expansion of the Earth's crust in the Baksan Neutrino Observatory // Proc. of 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL*2019). Sept. 06–08, 2019. Sozopol, Bulgaria. <https://doi.org/10.1109/CAOL46282.2019.9019472>
4. *Pershin S.M., Sobisevich A.L., Grishin M.Ya. et al.* Volcanic activity monitoring by unique LIDAR based on a diode laser // Laser Physics Letters. 2020. V. 17. № 11. 115607 (7 p). <https://doi.org/10.1088/1612-202X/abbedc>
5. *Pershin S.M., Linkin V.M., Makarov V.S. et al.* Space-born laser altimeter based on the single photon diode receiver and semiconductor laser transmitter // Proc. CLEO. 1991. OSA Technical Digest. V. 10. Paper CF11.
6. *Першин С.М., Гришин М.Я., Завозин В.А. и др.* Диодный лазер, генерирующий импульсы 3 нс, для лидара с высоким пространственным разрешением // Квантовая электроника. 2021. Т. 51. № 5. С. 423–426.

7. *Sliney D., Wolbarsht M.* Safety with lasers and other optical sources: a comprehensive handbook. N.Y.: Springer Science & Business Media, 2013. 1035 p.
8. *Prochazka I., Hamal K., Sopko B.* Recent achievements in single photon detectors and their applications // *J. Modern Optics*. 2004. V. 51. № 9–0. P. 1289–1313. <https://doi.org/10.1080/09500340408235273>
9. *Демина Л.И., Копп М.Л., Короновский Н.В. и др.* Большой Кавказ в альпийскую эпоху. М.: ГЕОС, 2007. 368 с.
10. *Лаврушин В.Ю.* Подземные флюиды Большого Кавказа и его обрамления. М.: ГЕОС, 2012. 348 с.
11. *Агафонова Н.Ю., Ашихмин В.В., Добрынина Е.А. и др.* Изучение вариаций низкоэнергетического фона с помощью подземного эксперимента LVD // *Известия РАН. Серия физическая*. 2019. Т. 83. № 5. С. 673–675. <https://doi.org/10.1134/S0367676519050041>
12. *Першин С.М., Гришин М.Я., Завозин В.А. и др.* Лидарное зондирование многослойных туманов в наклонном тоннеле Баксанской нейтринной обсерватории // *Краткие сообщения по физике ФИАН*. 2019. Т. 46. № 10. С. 328–332.
13. *Надеждинский А.И., Понуровский Я.Я.* Спектрометр на основе диодных лазеров для высокоточных измерений // *Квантовая электроника*. 2019. Т. 49. № 7. С. 613–622.

OMNIDIRECTIONAL MODULATION OF THE SEASONAL EARTH'S CRUST COMPRESSION AND AEROSOL LIDAR SIGNAL IN THE TUNNEL ABOVE THE ELBRUS VOLCANO CHAMBER

S. M. Pershin^a, Corresponding Member of RAS A. L. Sobisevich^b, M. Ya. Grishin^a, V. A. Zavozin^a, V. S. Makarov^c, V. N. Lednev^a, A. N. Fedorov^a, A. V. Myasnikov^d, and D. G. Artemova^a

^a *Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b *Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^c *Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^d *Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

A long-term monitoring of the Earth's crust deformation and aerosol backscattering coefficient was carried out in August-October, 2019 by laser strainmeter and compact lidar in the underground facility of Baksan Neutrino Observatory above the Elbrus volcano chamber. An omnidirectional modulation by abrupt crust compression with a multiple excess of the average rate ($\sim 4 \mu\text{m}/\text{day}$) accompanied by aerosol backscattering coefficient switching from seasonal decrease to anomalous growth has been discovered. The observed processes have been attributed to the fast cooling of the external atmosphere. The delays of the accelerated (up to $14 \mu\text{m}/\text{day}$) compression of the strainmeter arm and the lidar signal growth relative to external temperature decrease have been estimated (~ 2 and ~ 7 days, respectively). The mechanism of the detected phenomenon is discussed.

Keywords: lidar, aerosol scattering, deformation of the Earth's crust, strainmeter, omnidirectional modulation