

УДК 621.327.8; 621.316.933

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ОТ ОБЛАКА ЗАРЯЖЕННОГО ВОДНОГО АЭРОЗОЛЯ НА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ

О. С. Белова¹, Д. В. Болотов², С. Ю. Казанцев², О. В. Колесников²,
А. Г. Темников¹, Л. Л. Черненский¹, Н. Ю. Лысов¹, Г. П. Паимцев¹

Создан экспериментальный стенд и разработаны методики для исследований воздействий атмосферных разрядов на характеристики волоконно-оптических линий связи. Экспериментально показано, что электрические поля, формируемые заряженным водным аэрозолем, изменяют поляризацию излучения, распространяющегося в оптическом волокне, что снижает предельную скорость передачи данных по волоконно-оптическим линиям связи.

Ключевые слова: молния, электромагнитное поле, оптические телекоммуникационные системы, волоконно-оптические линии связи.

Увеличение скорости передачи данных по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) с применением технологий частотного и поляризационного мультиплексирования каналов выявило значительную чувствительность таких линий к воздействию атмосферных разрядов [1–4]. Эффекты влияния электромагнитных полей от разрядов молний на ВОЛС достаточно хорошо известны и обычно связаны с деформацией кабеля и тепловыми процессами, возникающими при протекании электрического тока в металлических элементах (броне) оптического кабеля [5, 6]. Однако широкое использование технологий поляризационного мультиплексирования каналов связи выявило, что значительное воздействие может оказывать магнитное поле, порожденное сильным токовым импульсом от молнии. Вследствие эффекта Фарадея происходит быстрое вращение состояния поляризации оптического сигнала, что приводит к появлению оши-

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250 Россия, Москва, Красноказарменная ул., 14, стр. 1; e-mail: belovaos@mpei.ru.

² Московский технический университет связи и информатики, 111024 Россия, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а; e-mail: s.i.kazantsev@mtuci.ru.

бок при передаче данных по ВОЛС [2–4]. Поэтому последние 10 лет проводится много как экспериментальных, так и численных исследований быстрых изменений состояния поляризации, вызываемых разрядами молний, при этом предметом исследований являются подземные оптические кабели и навесные линии, в том числе, когда оптический кабель располагается в грозотросе [1]. Проблема перерывов связи по ВОЛС, обусловленная атмосферными разрядами, становится еще более актуальной в связи с развитием квантовых сетей, где применяется технология квантового распределения ключа (КРК). Поскольку практически все коммерческие системы КРК кодируют информацию в квантовых состояниях одиночных фотонов, любые потери этих фотонов сильно ограничивают скорость передачи криптографического ключа, либо делают такую передачу невозможной, как только процент квантовых битовых ошибок (QBER) превысит некоторый порог, определяемый протоколом, реализованным в данном устройстве КРК [7, 8]. Важной и актуальной задачей является комплексное исследование влияния электрофизических процессов, сопровождающих разряды молнии, на характеристики оптической и квантовой связи, осуществляемой по ВОЛС. В связи с этим сотрудниками МЭИ и МТУСИ были инициированы работы по разработке методик и экспериментального стенда для исследования различных воздействий атмосферного электричества и молний на оптические кабели и волокно, по которым осуществляется передача данных, в том числе защищенных по технологии КРК. Целью первого этапа исследований является изучение влияния на ВОЛС электрических полей, предшествующих появлению молний.

Физическое моделирование разрядов молнии осуществлялось с помощью специального экспериментального комплекса “ГРОЗА” [9, 10], дополненного оптическим оборудованием для контроля изменения состояния поляризации. Схема объединенного экспериментально-измерительного комплекса приведена на рис. 1, где показаны: 1 – генератор заряженного аэрозоля; 2 – заземлённые электростатические экраны; 3 – искусственная грозовая ячейка; 4 – искровой разряд; 5 – стержневой электрод со сферической вершиной; 6 – плоская антенна; 7 – малоиндуктивные шунты; 8 – цифровой осциллограф Tektronix DPO 7254; 9 – цифровой фотоаппарат Panasonic Lumix DMC-FZ50; 10 – бухта оптического волокна марки G.652; 11 – лазерный диод Nolatech DFB-1550 nm 14BF-10 mW; 12 – механический контролер поляризации; 13 – поляризационный светоделитель; 14 – измеритель мощности на основе фотоприемника Thorlabs S156C; 15 – портативный компьютер.

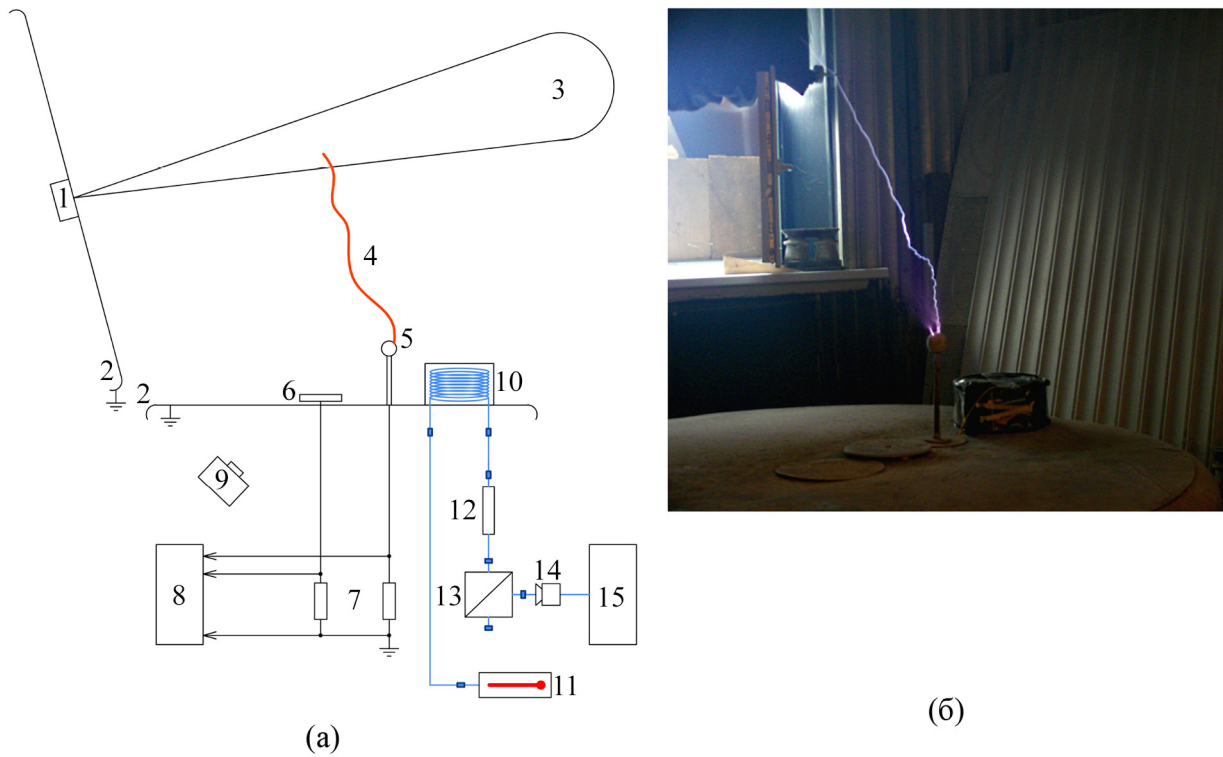


Рис. 1: Экспериментально-измерительный комплекс: (а) схема комплекса; (б) фотография установки в момент инициирования искусственной молнии.

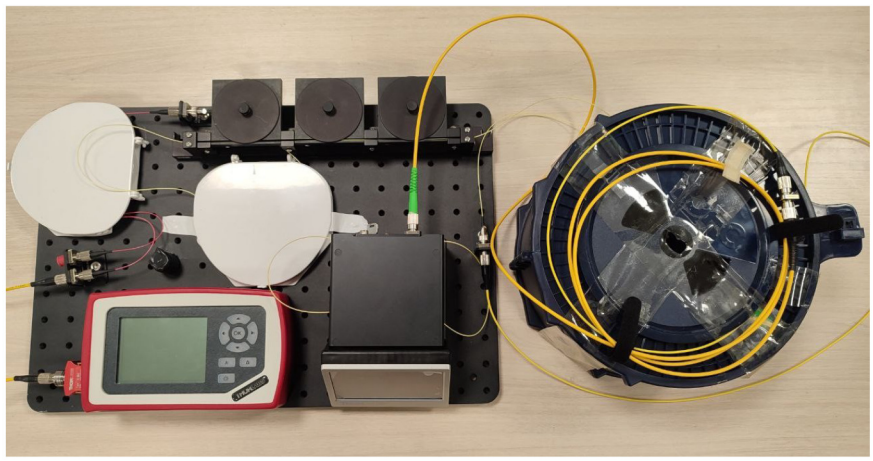


Рис. 2: Оптическое оборудование для контроля изменения поляризации, собранное на оптической плите.

Экспериментальный комплекс “ГРОЗА” позволяет моделировать электрически-активные грозовые облака благодаря созданию искусственных протяженных структур

заряженного водного аэрозоля (искусственных грозовых ячеек), объемом несколько кубических метров и потенциалом до 2.0 МВ. Напряженность электрического поля под облаком заряженного аэрозоля нарастает медленно, в течение нескольких секунд. Между заряженным облаком и заземленной плоскостью создается сильное электрическое поле напряженностью до 10 кВ/см вблизи заземленной плоскости и до 18 кВ/см на границе облака заряженного аэрозоля. В данном экспериментальном исследовании создавалось искусственное заряженное облако отрицательной полярности. Для “привязки” места удара разряда из облака заряженного аэрозоля и регистрации параметров разряда на заземленной плоскости был установлен стержневой электрод со сферической вершиной. Для регистрации скорости изменения электрического поля (dE/dt) вблизи стержневого электрода была установлена плоская широкополосная антенна. Сигналы с электрода и антенны, с помощью малоиндуктивных шунтов, регистрировались цифровым запоминающим осциллографом Tektronix DPO 7254. Рядом со стержневым электродом была расположена бухта оптического волокна марки G.652 (этот тип волокна использовался и при подключении всех компонентов оптической схемы). Лабораторная установка “ГРОЗА”, с помощью которой формируются искусственные молнии, позволяет создавать высокие электрические поля на достаточно ограниченном участке пространства (диаметр области 1.5 м), во много раз меньше, чем это происходит в природе при формировании природных молний. Поэтому оптический кабель размещался в ограниченной области пространства в виде бухты волокна, где может быть достаточно точно оценена величина электрического и магнитного поля без необходимости учитывать интегральный вклад воздействия электрического поля на линейном участке общей протяженностью 1.5 м с резко неоднородным распределением за его пределами. В экспериментальном исследовании было использовано две бухты оптического волокна: общей длиной волокна в бухте 20 км и 5 км. В качестве источника линейно-поляризованного излучения применялся лазерный диод Nolatech DFB-1550 nm 14BF-10 mW, работающий на длине волны 1546 нм, установленный в контроллер CLD1015 фирмы Thorlabs. С помощью механического контролера поляризации в начале эксперимента настраивалась передача максимума оптической мощности в плечо, подключенное к измерителю мощности на основе фотоприемника Thorlabs S156C (измеритель мощности в спектральном диапазоне 800–1700 нм, $P_{\max} = 20$ мВт). Измеритель мощности был подключен к механическому контроллеру поляризации через поляризационный светоделитель (в нем используется одномодовое оптическое волокно с сохранением поляризации ПМ1550). Сигнал с измерителя мощности регистрировался с помощью портативного компьюте-

ра. Частота сбора данных на персональный компьютер с фотоприемника составляла 10 Гц, фотоприемник не мог прописывать быстрые изменения поляризации, обусловленные короткими (несколько микросекунд) разрядами, зато точно фиксировал изменения поляризации, обусловленные медленными изменениями внешнего электрического поля в области бухты оптического волокна. Все оптическое оборудование было собрано на оптической плите и размещалось в центре управления, находящейся в отдельном от установки “ГРОЗА” помещении. На рис. 2 показана фотография оптического оборудования, собранного на оптической плите, справа от плиты видна бухта оптического волокна, которая в экспериментах располагалась вблизи стержневого электрода, как показано на рис. 1(б).

В ходе эксперимента наблюдалось изменение мощности сигнала лазера в оптическом волокне, регистрируемой в первом плече поляризационного светоделителя во время разрядных процессов между облаком искусственного заряженного аэрозоля и заземленным электродом. Характерный вид изменения мощности сигнала показан на рис. 3.

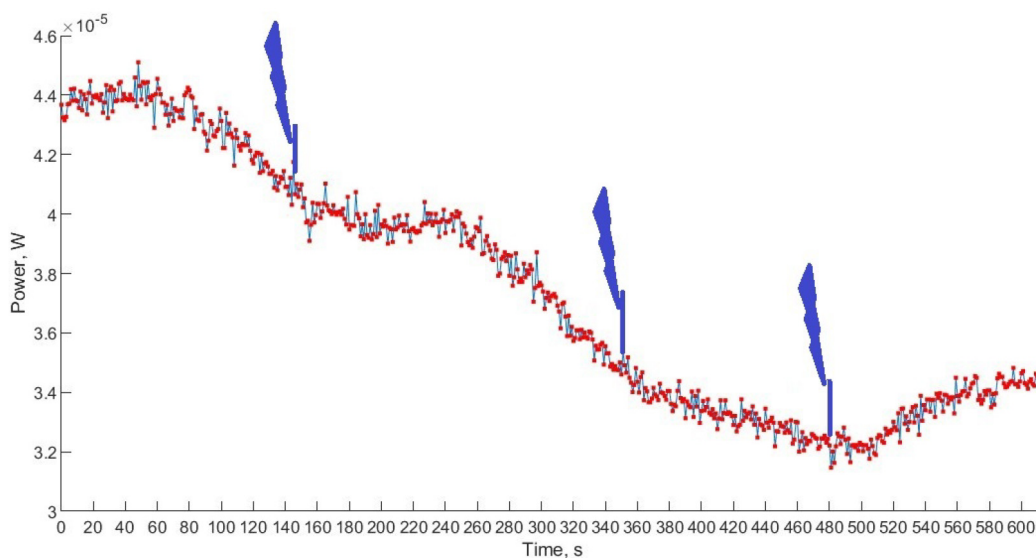


Рис. 3: Изменение мощности лазерного излучения в первом плече поляризационного светоделителя во время разрядных процессов.

Перед включением установки мощность излучения, выходящего в первое плечо светоделителя, выводилась на максимум с помощью механического поляризационного контролера. После того, как начинается выдуваться заряженный аэрозоль и электрическое поле над бухтой оптического волокна увеличивается, наблюдается снижение оптической мощности, измеряемой в первом плече поляризационного светоделителя и рост во вто-

ром плече, при этом общая мощность лазерного излучения, выходящего с обоих плеч, не изменялась (это было видно при измерениях мощности без использования поляризационного светоделителя). Разряды из искусственного грозового облака происходили в случайные моменты времени, периодичность разрядов была обусловлена степенью разрядки облака и составляла от десятка микросекунд (в случае повторных разрядов) до нескольких секунд. При формировании разрядов между облаком и заземленным электродом, наблюдалось замедление снижения мощности сигнала (рис. 3). Моменты времени, когда фиксировались разряды от облака на электрод отмечены вертикальной линией и значком молния. Выявление причины изменения мощности сигнала проводилось благодаря синхронизации по времени цифрового запоминающего осциллографа, регистрирующего сигналы с электрода, и измерителя оптической мощности. Было установлено, что изменение лазерной мощности, проходящей через плечи светоделителя, связано именно с электрическим полем облака аэрозоля. Поскольку, когда высокое напряжение не подавалось на установку, мощность лазера, регистрируемая в разных плечах поляризационного светоделителя, практически не изменялась со временем. При снятии напряжения (U_{out}) с установки “ГРОЗА” наблюдается восстановление мощности сигнала (рис. 4). Длительность этого процесса была обусловлена скоростью восстановления электрического поля от облака. Поскольку при разряде, часть заряда облака нейтрализовывалась – наблюдалось быстрое изменение электрического поля в месте расположения бухты. В этот момент наблюдали небольшой период замедления спада мощности оптического сигнала. Далее, поскольку продолжалась подача напряжения на установку “ГРОЗА”, напряженность поля, создаваемого облаком, начинала нарастать, пока не происходил следующий разряд. По-видимому, одним из наиболее вероятных эффектов, приводящих к такому поведению мощности в плече 1, является эффект Керра, который приводит к вращению плоскости поляризации излучения, распространяющегося в волокне, подвергнутому воздействию сильных электрических полей от облака. Плоскость поляризации поворачивается на угол:

$$\varphi = 2\pi \cdot K \cdot E^2 \cdot l.$$

Здесь φ – угол поворота плоскости поляризации; K – постоянная Керра, $K = 0.402 \times 10^{-13}$ м/В²; E – величина поперечного внешнего поля; l – длина пути, проходимого светом под воздействием поля.

Оценки по этой формуле показывают, что уже при полях 10 кВ/см угол поворота состояния поляризации на длине 100 м уже будет составлять более 8π . Конечно, в экспериментах применялось обычное одномодовое волокно без сохранения поляризации,

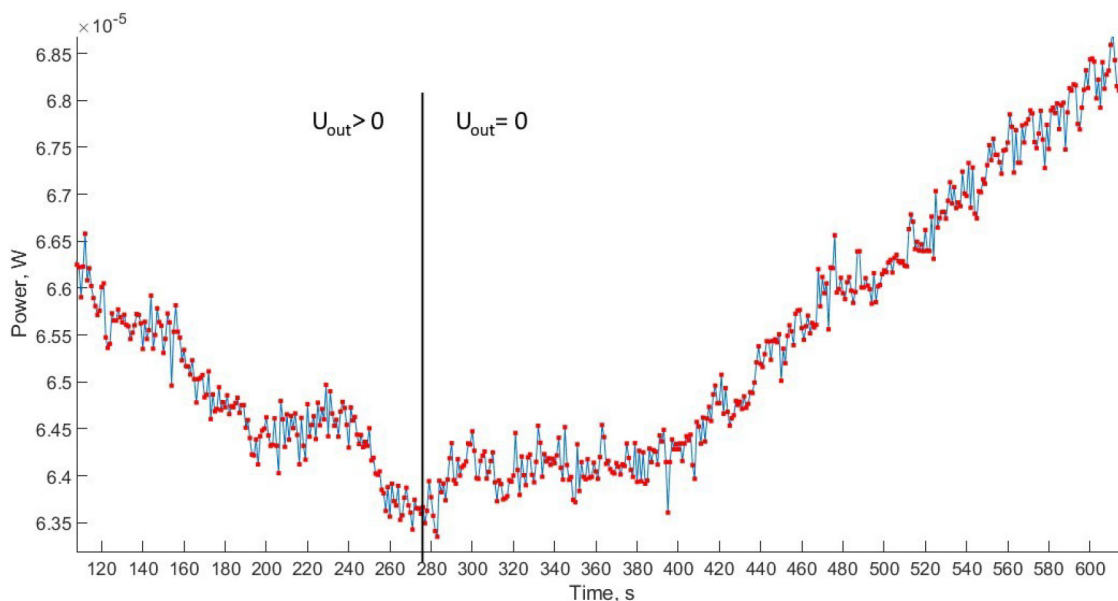


Рис. 4: Изменение мощности лазерного излучения в первом плече поляризационного светоделителя при снятии напряжения с установки “ГРОЗА”.

а в таком волокне дополнительно присутствует наведенное двулучепреломление, обусловленное деформацией, случайными дефектами в волокне, поэтому поляризационные характеристики волокна могут сильно изменяться на разных участках.

Следует заметить, что, обычно, влияние электрических полей на ВОЛС не принимают в расчет и основное внимание уделяется быстрым процессам изменения поляризационного состояния сигналов, возникающих вследствие эффекта Фарадея [1–4]. Однако наши исследования показывают, что воздействие электрических полей, вызванных атмосферным электричеством, могут существенно менять поляризационные состояния сигнала. Таким образом, в прямых экспериментах впервые было показано существенное изменение поляризационного состояния лазерных сигналов, распространяющихся в оптическом волокне при воздействии электрических полей заряженного аэрозоля. Сильные электрические поля, возникающие вблизи волоконно-оптического кабеля перед тем, как зарождается молния, могут быть зарегистрированы по характерному изменению мощности в плечах поляризационного светоделителя, что можно использовать для дистанционного мониторинга молниевых разрядов на трассе, а также предупреждения деструктивных влияний на линии связи, которые возникают, когда происходит разряд молнии.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Д. В. Горбатов, В. А. Коньшев, Т. О. Лукиных и др., Квантовая электроника **52**(1), 87 (2022).
- [2] В. А. Коньшев, Т. О. Лукашова, О. Е. Наний и др., Прикладная фотоника **7**(2), 118 (2020).
- [3] Д. В. Горбатов, А. Н. Дорожкин, А. Ю. Игуменов и др., Квантовая электроника **52**(10), 923 (2022).
- [4] D. Charlton, S. Clarke, D. Doucet, et al., Optics Express **25**(9), 9689 (2017).
- [5] С. А. Соколов, *Воздействие внешних электромагнитных полей на оптические кабели связи и гибридные линии* (М., Горячая линия-Телеком, 2018), 214 с.
- [6] О. В. Колесников, Электросвязь, № 8, 46 (2006).
- [7] Y. Y. Ding et al., Optics Express **25**(22), 27923 (2017).
- [8] V. Martin, J. P. Brito, C. Escribano, et al., EPJ Quantum Technology **8**(1), 19 (2021). DOI: 10.1140/epjqt/s40507-021-00108-9.
- [9] N. Lysov, A. Temnikov, L. Chernensky, et al., Atmosphere **13**, 1339 (2022). DOI: 10.3390/atmos13081339.
- [10] A. Temnikov, L. Chernensky, O. Belova, et al., Journal of Electrostatics **115**, 103661 (2022). DOI: 10.1016/j.elstat.2021.103661.
- [11] В. В. Аполлонов, Л. М. Василяк, И. П. Верещагин и др., Квантовая электроника **32**(6), 523 (2002).

Поступила в редакцию 19 мая 2023 г.

После доработки 23 августа 2023 г.

Принята к публикации 24 августа 2023 г.