09

Влияние грозового разряда на устойчивость работы когерентной системы связи: быстрое вращение поляризации и скачок разности групповых задержек

© М.А. Сенько[1,2], Т.О. Базаров[1], В.А. Конышев[3], Т.О. Лукиных[3], О.Е. Наний[1,2], И.И. Петренко[3], В.Н. Трещиков[1], Р.Р. Убайдуллаев[3]

[1] ООО „Т8“, Москва, Россия
[2] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[3] ООО „Научно-технический центр Т8“, Москва, Россия
E-mail: senko.ma16@physics.msu.ru

Поступило в Редакцию 5 ноября 2025 г.
В окончательной редакции 2 февраля 2026 г.
Принято к публикации 2 февраля 2026 г.

Установлено, что нарушение устойчивости работы когерентной системы связи, использующей оптический кабель в грозотросе, при ударе молнии вызвано наряду с быстрым вращением состояния поляризации резким изменением разности групповых задержек (РГЗ) поляризационных мод. Впервые установлено, что значительное изменение РГЗ в протяженной волоконно-оптической линии связи, вызванное грозовым разрядом, может возникать даже в условиях, когда величина вариации РГЗ в участке, подвергшемся удару молнии, пренебрежимо мала.

Ключевые слова: вращение поляризации, разность групповых задержек, грозотрос, волоконно-оптические линии связи, цифровая обработка сигнала.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.10.62732.20556

Подвесные волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) с использованием оптического кабеля, встроенного в грозозащитный трос (ОКГТ), нашли широкое применение, поскольку совмещают экономичный способ организации волоконно-оптической связи с функцией защиты линии электропередач от грозовых разрядов. Однако прямой удар молнии в грозотрос может привести к кратковременному сбою в работе высокоскоростных когерентных оптических систем передачи данных [1–6]. Известно, что при ударе молнии в кабель формируется продольное магнитное поле, изменение которого приводит к быстрому вращению состояния поляризации сигнала из-за эффекта Фарадея [1–10]. Быстрое вращение поляризации может приводить к ошибкам в когерентных системах связи, чувствительных к состоянию поляризации (СП), использующих многоуровневые форматы модуляции и поляризационное мультиплексирование. В ряде работ была поставлена и решена задача исследования эффекта Фарадея в оптических телекоммуникационных волокнах и вычисления формы временно́й зависимости скорости изменения СП световых сигналов на выходе многопролетной линии связи [6–9]. В этих работах представлены математическая модель удара молнии и методика расчета временно́го профиля быстрых изменений СП с учетом случайного линейного двулучепреломления волокна и динамических эффектов, связанных с конечными временами распространения электромагнитной и световой волн вдоль оптического кабеля. В работе [5] методом численного моделирования исследуется устойчивость работы алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС) когерентного приемника к быстрому вращению поляризации, вызванному ударом молнии в ОКГТ. Установлено, что скорость изменения СП является наиболее важным параметром, определяющим рост коэффициента ошибок в приемнике. В настоящей работе под разностью групповых задержек (РГЗ) будет подразумеваться текущая задержка между поляризациями, вектором поляризационной модовой дисперсии (ПМД) будем называть вектор, направление которого описывает состояние поляризации сигнала, а модуль — текущую РГЗ. В работах [11,12] показано, что при наличии в линии РГЗ поляризационных мод задача компенсации вращения поляризации при цифровой обработке сигнала усложняется. В этой работе РГЗ считается постоянной величиной. Влияние грозового разряда на вариацию РГЗ поляризационных мод вне участка воздействия грозового разряда ранее не исследовалось. Возможная причина состоит в том, что вариации РГЗ из-за эффекта Фарадея в коротком участке кабеля, на который воздействует грозовой разряд, пренебрежимо малы (значительно меньше десятых долей пикосекунды). В настоящей работе установлено, что вызванные грозовым разрядом вариации РГЗ в длинной линии в общем случае значительно превосходят величину РГЗ, связанную с эффектом Фарадея в коротком участке кабеля, на который непосредственно воздействует грозовой разряд. Установлено, что вариации РГЗ длинной линии, содержащей участок, в котором осуществляется поворот поляризации, могут достигать величин порядка РГЗ всей линии даже при

почти нулевом приращении РГЗ на самом участке, подвергшемся воздействию грозового разряда.

Удар молнии в оптический грозотрос приводит к быстрому вращению выходного состояния поляризации оптического излучения. Модель ВОЛС, подвергшейся удару молнии, изображена на рис. 1. Грозовой разряд, как показано в работах [1,5,6], воздействует на небольшой участок линии вблизи места удара молнии между ближайшими опорами. Разделим ВОЛС на три участка: короткий участок 2, подвергшийся удару молнии, первый протяженный участок 1 (от начала линии до участка 2) и конечный протяженный участок 3 (от участка 2 до конца линии).

Каждый из трех участков ВОЛС характеризуется матрицами Мюллера R_1, R_2, R_3 и векторами ПМД $\boldsymbol{\tau}_1$, $\boldsymbol{\tau}_2$, $\boldsymbol{\tau}_3$. Матрицы Мюллера представлены в размерности 3×3, когда одна размерность, отвечающая за мощность сигнала, опущена, так как в рассматриваемом нами случае мощность постоянна. Грозовой разряд вызывает протекание мощного импульса тока только на небольшом участке грозотроса (примерно 300 m) между опорами. Связанное с током магнитное поле вызывает быстрые и довольно значительные изменения во времени матрицы Мюллера $R_2(t)$ короткого участка 2. Матрицы Мюллера двух других участков (R_1 и R_3) и их векторы ПМД $\boldsymbol{\tau}_1$ и $\boldsymbol{\tau}_3$ не изменяются за время порядка длительности грозового разряда ($R_1 = \text{const}$ и $R_3 = \text{const}$), поскольку молния не оказывает на них воздействия.

Изменение во времени матрицы Мюллера короткого участка 2 приводит к изменению во времени матрицы Мюллера всей ВОЛС:

$$R(t) = R_3 R_2(t) R_1. \tag{1a}$$

В силу малой протяженности участка 2 его вектор ПМД пренебрежимо мал, и можно считать, что $\boldsymbol{\tau}_2 = 0$. Возможно, в связи с этим ранее считалось, что изменение вектора ПМД всей линии также пренебрежимо мало, и ему не уделялось внимание. Однако, как показали аналитические оценки и численное моделирование, изменение вектора ПМД длинной линии ($\boldsymbol{\tau}$) в общем случае оказывается значительным даже при выполнении

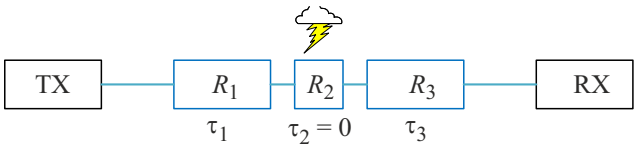

Рис. 1. Оптическая схема волоконно-оптической системы передачи информации (ВОЛП), содержащей участок, в который ударила молния. ВОЛП включает в себя передатчик (TX) и приемник (RX), соединенные многопролетной ВОЛС. Многопролетная ВОЛС содержит участок 2, в который ударила молния, и участки 1 и 3, расположенные соответственно до и после участка 2. Каждый участок характеризуется соответствующими матрицами Мюллера R_1, R_2, R_3 и векторами ПМД $\boldsymbol{\tau}_1$, $\boldsymbol{\tau}_2$, $\boldsymbol{\tau}_3$.

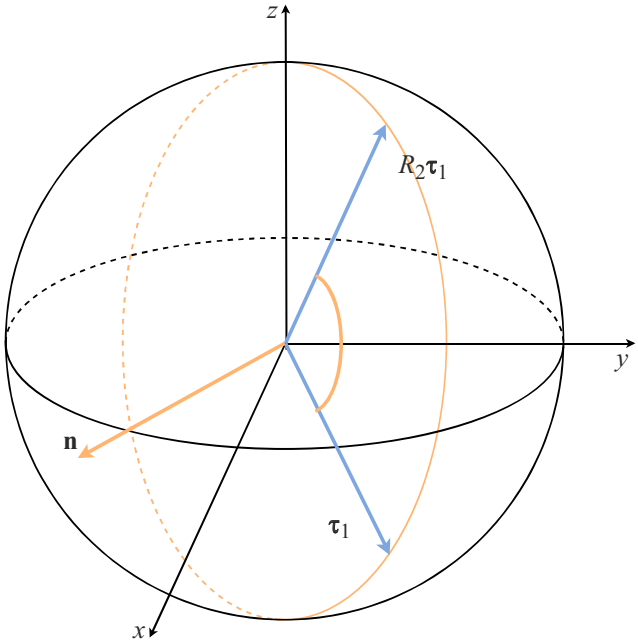

Рис. 2. Изменение матрицы Мюллера R_2 участка волокна, подверженного воздействию грозового разряда, приводящее к изменению вектора ПМД всей линии из-за поворота в пространстве вектора ПМД первого участка ВОЛС ($\boldsymbol{\tau}_1$). Вектор $\mathbf{n}$ является нормалью к плоскости, в которой происходит поворот $\boldsymbol{\tau}_1$.

условий $\boldsymbol{\tau}_2 = 0$ и $R_1 = \text{const}$, $R_3 = \text{const}$ [13]:

$$\boldsymbol{\tau}(t) = \boldsymbol{\tau}_3 + R_3 R_2(t) \boldsymbol{\tau}_1. \tag{1b}$$

Удар молнии в оптический грозотрос приводит к быстрому вращению выходного состояния поляризации оптического излучения в соответствии с уравнением (1a). В соответствии с уравнением (1b) вектор ПМД $\boldsymbol{\tau}$ длинной линии также изменяется во времени при ударе молнии даже при $\boldsymbol{\tau}_2 = 0$ (рис. 2). Физический механизм этого явления связан с вращением эффективного вектора поляризации $\boldsymbol{\tau}_1^{eff}(t) = R_3 R_2(t) \boldsymbol{\tau}_1$, который векторно складывается с вектором $\boldsymbol{\tau}$.

В том случае, когда молния попадает в среднюю часть ВОЛС, векторы $\boldsymbol{\tau}_1$ и $\boldsymbol{\tau}_3$ не равны нулю, и вращение вектора $\boldsymbol{\tau}_1^{eff}(t) = R_3 R_2(t) \boldsymbol{\tau}_1$ приводит к изменению как направления, так и модуля суммарного вектора ПМД $\boldsymbol{\tau}$ линии связи. В частном случае удара молнии в начало ВОЛС, когда модуль вектора ПМД $\boldsymbol{\tau}_1$ равен нулю, полный вектор ПМД линии не изменяется. В другом частном случае, когда молния попадает в конец линии, вектор ПМД поворачивается, но его модуль не изменяется. Наиболее сильные изменения модуля ПМД будет вызывать удар молнии приблизительно в центральную область ВОЛС, когда модули векторов ПМД $\boldsymbol{\tau}_1$ и $\boldsymbol{\tau}_3$ равны.

Поскольку в этом случае быстро изменяется не только состояние поляризации сигнала, но и вектор ПМД,

их компенсация в блоке ЦОС когерентного приемника оказывается более сложной задачей.

Таким образом, величина изменения модуля вектора ПМД под воздействием молнии определяется значениями векторов ПМД $\boldsymbol{\tau}_1$ и $\boldsymbol{\tau}_3$ двух участков ВОЛС, примыкающих к месту удара молнии, а также ориентацией вектора оси вращения $\mathbf{n}$ вектора ПМД $\boldsymbol{\tau}$. Максимальное изменение модуля вектора ПМД всей линии достигается в случае, если вектор $\mathbf{n}$ ортогонален векторам $\boldsymbol{\tau}_1$ и $\boldsymbol{\tau}_3$. В таком случае модуль вектора ПМД $|\boldsymbol{\tau}|$ будет изменяться от минимального значения $||\boldsymbol{\tau}_1| - |\boldsymbol{\tau}_3||$ до максимального значения $|\boldsymbol{\tau}_1| + |\boldsymbol{\tau}_3|$. Во всех остальных случаях диапазон изменения $|\boldsymbol{\tau}|$ будет меньше, а значит, и влияние на сигнал будет меньше.

Для примера рассмотрим ситуацию, когда РГЗ двух участков выбраны равными среднему значению РГЗ (DGD_{avg} — differential group delay) для половины линии длиной 900 km с коэффициентом ПМД α, равным $0.1\,\mathrm{ps}/\sqrt{\mathrm{km}}$, что дает РГЗ, равную 3 ps, в соответствии с формулой

$$\mathrm{DGD}_{avg} = \alpha\sqrt{L}. \tag{2}$$

Скорость вращения поляризации не является постоянной величиной за время удара молнии. Характерный вид временнóго профиля скорости вращения состояния поляризации, вызванного ударом молнии, представлен на рис. 3, его также можно найти в [5]. В настоящей работе модуль скорости вращения был взят в соответствии с характерными модулями, а направление вращения было выбрано постоянным, и при этом $\mathbf{n} \perp \boldsymbol{\tau}_1$ и $\mathbf{n} \perp \boldsymbol{\tau}_3$.

Изменение вектора было проведено по формуле (1b) с профилем, представленным на рис. 3. Результаты приведены на рис. 4. Можно видеть, что различные профили вращения не влияют на максимум модуля вектора, однако влияют на частоту, с которой он изменяется.

Видно, что за время длительности фронта молнии порядка нескольких микросекунд [2] при максимальных значениях скорости вращения состояния поляризации порядка нескольких десятков Mrad/s вектор ПМД совершает несколько полных оборотов, пробегая все возможные для данной конфигурации значения модуля $|\boldsymbol{\tau}|$.

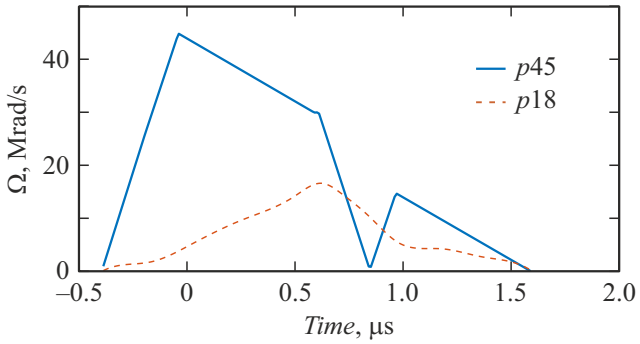

Рис. 3. Временной профиль скорости вращения состояния поляризации, использованный для моделирования вектора по формуле (1b). $p45$ — максимальная скорость вращения 45 Mrad/s, $p18$ — максимальная скорость вращения 18 Mrad/s.

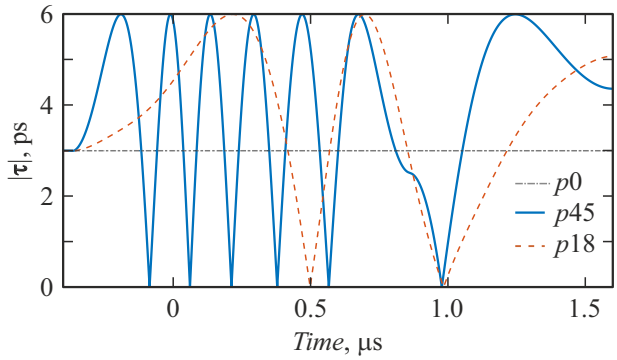

Рис. 4. Изменение модуля вектора ПМД всей линии во время грозового разряда в соответствии с формулой (1b) и профилем, показанным на рис. 3. Молния начинает вращать вектор в момент времени $-0.4\,\mu$s. $p0$ — нет вращения поляризации, $p45$ — максимальная скорость вращения 45 Mrad/s, $p18$ — максимальная скорость вращения 18 Mrad/s.

Быстрое вращение поляризации ведет к сильному искажению сигнала и при достаточно больших скоростях вращения приводит к невозможности декодирования сигнала. Искажения, возникающие в процессе передачи сигнала, компенсируются алгоритмами ЦОС [14–21], однако большинство этих искажений изменяется во времени медленно (с частотой порядка kHz). Быстрое же вращение поляризации и соответствующее ему быстрое изменение РГЗ происходят с частотами порядка MHz. Такие искажения требуют отдельной компенсации на приемнике с помощью алгоритма ЦОС, который может с большой скоростью отслеживать состояние поляризации сигнала. Однако наличие в линии большой РГЗ усложняет задачу компенсации вращения поляризации, так как необходимо скомпенсировать поворот поляризации и задержку. Обе эти величины являются быстро меняющимися многопараметрическими и требуют применения алгоритма адаптивной компенсации. Современные цифровые сигнальные процессоры могут компенсировать вращение состояния поляризации вплоть до величин порядка 10 Mrad/s со штрафом в пределах 3 dB для 100G DP-QPSK-сигнала, РГЗ в длинных линиях при этом может составлять величину порядка сотни пикосекунд или нескольких символов. Таким образом, целесообразно изучать алгоритмы компенсации быстрых вращений в присутствии РГЗ.

В настоящей работе было показано, что вследствие грозового разряда происходит не только быстрое (частота изменений порядка MHz) вращение состояния поляризации, но и такое же быстрое изменение РГЗ (частота изменений может быть также порядка MHz, а амплитуда изменений порядка самого начального вектора РГЗ). Быстрое изменение РГЗ в линии может приводить к возникновению дополнительного штрафа, который необходимо исследовать дальше. Штраф возникает, поскольку алгоритмы ЦОС на приеме обладают конечной скоростью подстройки. Предельная частота

изменений компенсируемого вращения поляризации на текущий момент составляет величину порядка 10 Mrad/s. Однако требуется дальнейшее исследование влияния предельных быстрых изменений РГЗ на существующие алгоритмы ЦОС, а также разработка алгоритмов, уменьшающих штраф от этого эффекта.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] С. Акопов, В. Конышев, О. Наний, В. Трещиков, Р. Убайдуллаев, И. Фролов, Первая миля, № 4, 24 (2021). DOI: 10.22184/2070-8963.2021.96.4.24.30

[2] В.А. Конышев, Т.О. Лукашова, О.Е. Наний, А.Г. Новиков, В.Н. Трещиков, Р.Р. Убайдуллаев, Прикладная фотоника, **7** (2), 118 (2020). DOI:10.15593/2411-4367/2020.2.05

[3] M. Kurono, M. Kuribara, K. Isawa, Electr. Eng. Jpn., **128** (4), 55 (1999). DOI: 10.1002/(SICI)1520-6416(199909)128:4<55::AID-EEJ7>3.0.CO;2-8

[4] S.M. Pietralunga, J. Colombelli, A. Fellegara, M. Martinelli, IEEE Photon. Technol. Lett., **16** (11), 2583 (2004). DOI: 10.1109/LPT.2004.835198

[5] Т.О. Базаров, А.Н. Дорожкин, Т.О. Лукиных, О.Е. Наний, М.А. Сенько, В.Н. Трещиков, Первая миля, № 1, 48 (2023). DOI: 10.22184/2070-8963.2023.109.1.48.54

[6] D. Charlton, S. Clarke, D. Doucet, M. O'Sullivan, D.L. Peterson, D. Wilson, G. Wellbrock, M. Bélanger, Opt. Express, **25** (9), 9689 (2017). DOI: 10.1364/OE.25.009689

[7] В.А. Конышев, С.Н. Лукиных, О.Е. Наний, А.Г. Новиков, В.Н. Трещиков, Р.Р. Убайдуллаев, Квантовая электроника, **49** (8), 773 (2019). [V.A. Konyshev, S.N. Lukinykh, O.E. Nanii, A.G. Novikov, V.N. Treshchikov, R.R. Ubaydullaev, Quantum Electron., **49** (8), 773 (2019). DOI: 10.1070/QEL16936].

[8] V. Konyshev, T. Lukashova, O. Nanii, A. Novikov, V. Treshchikov, R. Ubaydullaev, Laser Phys. Lett., **18** (11), 115101 (2021). DOI: 10.1088/1612-202X/ac26cc

[9] Д.В. Горбатов, В.А. Конышев, Т.О. Лукиных, О.Е. Наний, А.Г. Новиков, В.Н. Трещиков, Р.Р. Убайдуллаев, Квантовая электроника, **52** (1), 87 (2022). [D.V. Gorbatov, V.A. Konyshev, T.O. Lukinykh, O.E. Nanii, A.G. Novikov, V.N. Treshchikov, R.R. Ubaydullaev, Quantum Electron., **52** (1), 87 (2022). DOI: 10.1070/QEL17970].

[10] W. Lian, X. Su, K. Hu, W. Li, B. Wu, H. Zhao, Y. Huang, S. Zhang, D. Wang, F. Tong, Y. Hu, Laser Phys., **35** (1), 015101 (2024). DOI: 10.1088/1555-6611/ad9150

[11] N. Cui, X. Zhang, Z. Zheng, H. Xu, W. Zhang, X. Tang, L. Xi, Y. Fang, L. Li, Opt. Express, **26** (16), 21170 (2018). DOI: 10.1364/OE.26.021170

[12] Z. Zheng, N. Cui, H. Xu, X. Zhang, W. Zhang, L. Xi, Y. Fang, L. Li, Opt. Express, **26** (6), 7211 (2018). DOI: 10.1364/OE.26.007211

[13] J. Gordon, H. Kogelnik, Proc. Nat. Acad. Sci., **97** (9), 4541 (2000). DOI: 10.1073/pnas.97.9.4541

[14] Т.О. Базаров, М.А. Сенько, Л.А. Самоделкин, И.С. Халько, И.Н. Соломадин, О.Е. Наний, В.Н. Трещиков, ЖТФ, **94** (6), 894 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.06.58131.3-24 [T.O. Bazarov, M.A. Senko, L.A. Samodelkin, I.S. Khalko, I.N. Solomadin, O.E. Naniy, V.N. Treschikov, Tech. Phys., **69** (6), 833 (2024). DOI: 10.61011/TP.2024.06.58826.3-24].

[15] J.G. Proakis, M. Salehi, in *Digital communications* (McGraw-Hill, N.Y., 2008), p. 597–688.

[16] S.J. Savory, Opt. Express, **16** (2), 804 (2008). DOI: 10.1364/OE.16.000804

[17] T. Xu, G. Jacobsen, S. Popov, M. Forzati, J. Mårtensson, M. Mussolin, J. Li, K. Wang, Y. Zhang, A.T. Friberg, J. Opt. Commun., **32** (2), 131 (2011). DOI: 10.1515/joc.2011.022

[18] X. Zhou, X. Chen, Opt. Express, **19** (10), 9282 (2011). DOI: 10.1364/OE.19.009282

[19] M.S. Faruk, K. Kikuchi, in *2014 European Conf. on optical communication (ECOC)* (IEEE, 2014), p. 1–3. DOI: 10.1109/ECOC.2014.6964149

[20] R. Rios-Müller, J. Renaudier, G. Charlet, in *2014 European Conf. on optical communication (ECOC)* (IEEE, 2014), p. 1–3. DOI: 10.1109/ECOC.2014.6963878

[21] M. Magarini, L. Barletta, A. Spalvieri, F. Vacondio, T. Pfau, M. Pepe, M. Bertolini, G. Gavioli, IEEE Photon. Technol. Lett., **24** (9), 739 (2012). DOI: 10.1109/LPT.2012.2187439