

Моделирование передачи данных в симплексном акусто-оптическом канале по двумодовому оптическому волокну

О.Ю. Губарева¹, В.А. Бурдин¹, В.О. Гуреев¹, С.С. Масюк¹

¹Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Льва Толстого 23, Самара, Россия, 443010

Аннотация. В данной статье представлены модель и результаты моделирования передачи данных в симплексном акустооптическом оптоволоконном канале на основе двухмодового оптического волокна с учетом периодического характера изменений коэффициентов связи мод вдоль кабельной линии. Полученные результаты позволяют предположить, что при прочих равных условиях вероятность ошибок в рассматриваемом симплексном акустооптическом канале связи на двухмодовом оптическом волокне может быть значительно снижена благодаря равномерному возбуждению мод на входе волокна и поддержке равномерного распределения мощности между модами по длине кабеля.

1. Введение

Акустооптический эффект успешно используется для создания разнообразных волоконно-оптических устройств различного назначения. Таких как преобразователи частоты, конверторы мод, фильтры и модуляторы, датчики различных физических величин [1]. Еще в конце семидесятых годов прошлого столетия была продемонстрирована возможность обнаружения акустического звука с помощью оптоволоконного датчика [2, 3]. По сравнению с обычным электронным микрофоном волоконно-оптические акустические датчики обладают преимуществами большой полосы пропускания, невосприимчивости к электромагнитным и радиочастотным помехам, возможности дистанционного зондирования, прямого подключения к оптической сети передачи и рядом других достоинств [4]. Было проведено большое количество исследований, способствующих разработке волоконно-оптических акустических датчиков и связанных с ними технологий. Это датчики на интерферометрах Фабри-Перо и интерферометрах Маха-Цандера, датчики на волоконных брэгговских решетках, датчики, датчики на перестраиваемых лазерах и т. д. Однако многоточечные акустические схемы обнаружения на подобных датчиках ограничены в возможностях реализации распределенного зондирования. От этого недостатка свободны получившие широкое распространение в последние три десятилетия распределенные акустические датчики (DAS - Distributed Fiber Sensor) на основе измерений обратного рассеяния в оптических волокнах. В DAS реализуются принципы оптической рефлектометрии. Такие датчики характеризуются малыми поперечными размерами волокон, устойчивостью к электромагнитным помехам, большим охватом периметра и большой полосой пропускания [5, 6]. Распределенные оптоволоконные датчики используются везде, где необходимо выявлять несколько событий в разных точках на больших расстояниях. Такие сенсорные системы используются для контроля состояния и безопасности протяженных объектов в различных областях, включая транспорт, нефтегазовые сооружения, системы

управления технологическим процессом. Рынок DAS неуклонно растет и ожидается, что к 2025 году он превысит 2 млрд долларов [6]. Вместе с тем, необходимо отметить, что реализация распределенных оптоволоконных датчиков на основе рефлектометрических методов недешева и требует применения достаточно сложных схем и устройств.

Вместе с тем, для ряда приложений локализация события на распределенном объекте не требуется, достаточно лишь выявить факт его наличия на протяженном участке и оценить изменения параметров [7, 8]. Для этого достаточно сформировать распределенный акусто-оптоволоконный канал связи (acousto optic fiber communication channel), вибро-акустический передатчик которого может располагаться в произвольной точке на длине волокна [9-11]. Такой распределенный акусто-оптоволоконный канал может быть использован не только для контроля наличия вибро-акустического воздействия и оценивания его параметров, но и для организации симплексной аудиосвязи из взрывоопасных зон. При этом, передатчик звукового сигнала может быть не привязан к определенной точке кабельной линии. Этот же подход используют и для съема аудио информации [12].

Как правило, подобные способы также, как и рефлектометрические, базируются на приеме сильно ослабленных обратно-рассеянных и отраженных оптических сигналов [9-10, 12]. Существенно повысить уровень принимаемого сигнала позволяют способы, основанные на приеме оптического излучения, распространяющегося в прямом направлении в многомодовом оптическом волокне. Хорошо известны распределенные акустические датчики на многомодовых оптических волокнах, для которых искомые оценки получают по результатам анализа спеклов [13, 14], что требует применения сложной техники и значительных вычислительных затрат. Значительно более просто реализуются акустические датчики, базирующиеся на измерении продуктов взаимодействия мод на выходе многомодового оптического волокна [15, 16, 17]. Развитием такого подхода является способ формирования симплексного акусто-оптического канала связи на двумодовом оптическом волокне [18]. Предлагаемое решение базируется на том, что двумодовое оптическое волокно фактически является интерферометром Маха-Цандера, который с успехом применяется для построения акустооптических модуляторов и сенсоров [1, 4, 19-20]. В работе [21] представлена модель такого канала связи и приведены результаты моделирования низкоскоростной передачи данных по этому каналу. Предложенная в [21] модель предполагает постоянство связи мод на квазирегулярных участках волоконно-оптической линии. Однако, это справедливо лишь в первом приближении. Как правило коэффициенты связи мод изменяются вдоль кабеля случайным образом и эти изменения могут носить периодический характер [23 - 31]. Вместе с тем их зависимость от вибро-акустического воздействия явно проявляется в диапазоне ультразвуковых частот, а в исследуемом низкочастотном диапазоне ею можно пренебречь. В данной работе представлены результаты моделирования симплексного акусто-оптоволоконного канала на основе двумодового оптического волокна с учетом периодического характера изменений коэффициентов связи мод вдоль кабельной линии.

2. Модель симплексного акусто-оптического канала на двумодовом оптическом волокне

Как и в известном решении, предполагается, что акустооптический канал предназначен для передачи сигналов с низкой скоростью в диапазоне звуковых частот и использует двумодовое оптическое волокно, в котором поддерживаются направляемые моды LP_{01} и LP_{11} . Предполагается, что при моделировании достаточно учитывать только две моды, полагая, что ортогонально-поляризованные моды и моды LP_{11a} и LP_{11b} вырождаются. Каждая из мод переносит полезный сигнал и переходные помехи, обусловленные взаимодействием мод. Поскольку полезный сигнал передается с низкой скоростью хроматической дисперсией и нелинейностью оптического волокна можно пренебречь. Как и в [21] ограничимся анализом для одной строительной длины оптического кабеля, которая в среднем составляет 4-6 км [32], что позволяет исключить из рассмотрения стыковые нерегулярности и пренебречь потерями. Как и в [21] присвоим параметрам моды LP_{01} и LP_{11} и переносимых ими оптическим сигналам индексы 1 и 2, соответственно.

В регулярном оптическом волокне моды разного азимутального порядка не связаны между собой [23-25]. Соответственно для мод LP_{01} и LP_{11} межмодовая связь в регулярном волокне равна нулю. Однако идеала нет и волоконно-оптическая кабельная линия имеет нерегулярности. Их можно разделить на внутренние и стыковые. Стыковые возникают в соединениях волокон строительных длин оптического кабеля. Внутренние нерегулярности, в свою очередь, разделяют на внутриволоконные и внутрикабельные. Внутриволоконные нерегулярности обусловлены флуктуациями параметров профиля показателя преломления оптического волокна и диаметра его сердцевины. Внутрикабельные вызваны, в основном, избыточной длиной волокна в кабеле, что приводит к изгибам волокна. Будем полагать, что уровень переходной помехи достаточно мал, так что обратными переходами можно пренебречь и для описания взаимодействия мод на отдельной локальной нерегулярности оптического волокна можно использовать следующую модель:

$$s_i(y - dy) = s_i(y) \cdot [1 - C_{ij}(y)] + s_j(y) \cdot C_{ji}(y) \quad (1)$$

Здесь i, j – индексы сигналов переносимых соответствующей модой, принимающие значения 1 или 2 так, что если $i=1$, то $j=2$, и наоборот; $s_i(y)$ – сигнал, переносимый i -той модой в точке с координатой y ; $C_{ij}(y)$, $C_{ji}(y)$ – коэффициенты связи между модами i и j в точке с координатой y .

Тогда, на дальнем конце линии переносимые этими модами оптические сигналы могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned} s_i &= s_{0i} + s_{ci} \quad (2) \\ s_{0i} &= A_i \cos(\omega t - \beta_i L + \delta\beta_i \cdot \Delta l), \\ s_{ci} &= -A_i \cdot \int_0^L C_{ij}(y) \cos[\omega t - \beta_i y - \beta_j(L - y) + \delta\varphi_{ij}(y)] dy + A_i \cdot \int_0^L C_{ji}(y) \cos[\omega t - \beta_j y - \beta_i(L - y) + \delta\varphi_{ji}(y)] dy, \\ \delta\varphi_{ij}(y) &= \begin{cases} \delta\beta_i \Delta l & , \quad y < l_a \\ \delta\beta_j(y - l_a) + \delta\beta_i(l_b - y) & , \quad l_a < y < l_b \\ \delta\beta_j \Delta l & , \quad y > l_b \end{cases} \end{aligned}$$

где A_i – амплитуда оптического излучения i -той моды; α_i – коэффициент затухания в оптическом волокне i -той моды; β_i – коэффициент фазы в оптическом волокне i -той моды; $\delta\beta_i$ – изменения коэффициента фаз i -той моды в результате акусто-вибрационного воздействия на оптическое волокно; $\Delta l = l_b - l_a$ – длина участка волокна, на котором оптическое волокно подвергается акусто-вибрационному воздействию; L – длина оптического волокна; ω – круговая частота; t – время.

Будем полагать, что $C_{ij}(y) = C_{ji}(y) = C(y)$. Тогда, после ряда преобразований сумма сигналов, переносимых двумя модами и поступающих на дальнем конце линии на вход фотоприемника, может быть представлена в общем виде как:

$$\begin{aligned} S &= S_0 + S_c \quad (2) \\ S_0 &= A_1 \cos(\omega t - \beta_1 L + \delta\beta_1 \cdot \Delta l) + A_2 \cos(\omega t - \beta_2 L + \delta\beta_2 \cdot \Delta l), \\ S_c &= 2 \cdot \Phi_L \cdot \left\{ \int_0^L C(y) \cos(2\Delta\beta y) dy + \int_{l_a}^{l_b} C(y) \cos[2(\Delta\beta - \delta\beta) y] dy - \int_{l_a}^{l_b} C(y) \cos(2\Delta\beta y) dy \right\}, \\ \Phi_L &= \Delta A \cos[2\omega t - (\beta_1 + \beta_2)L + (\delta\beta_1 + \delta\beta_2) \cdot \Delta l], \\ \Delta A &= A_2 - A_1, \quad \Delta\beta = \beta_2 - \beta_1, \quad \delta\beta = \delta\beta_2 - \delta\beta_1. \end{aligned}$$

Будем полагать, что межмодовая связь изменяется вдоль оси оптического волокна с периодом L_C и амплитудой C_0 , которая, учитывая принятую модель связи на локальной нерегулярности, принимает значения от 0 до 0.5. Тогда:

$$C(y) = C_0 \text{Cos}(2\pi y/L_c).$$

Или, обозначив $\beta_c = 2\pi/L_c$:

$$C(y) = C_0 \text{Cos}(2\pi\beta_c y). \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2) и используя известную формулу для представления произведения косинусов суммой косинусов, приходим к табличным интегралам [Dwait+tabl]. Поскольку сигнал поступает на вход квадратичного приемника, возводим суммарный сигнал на дальнем конце с учетом результатов интегрирования в квадрат. Пренебрегаем членами до второго порядка малости включительно, выделяем низкочастотную составляющую и исключаем постоянную. При этом полагаем, что изменения постоянных распространения из-за вибро-акустического воздействия пропорциональны его интенсивности. В итоге получаем, что мощность сигнала на выходе фильтров фотоприемника, включающего полезный сигнал и переходные межмодовые помехи, может быть описана следующим приближенным выражением:

$$\begin{aligned} P(t) &= P_0(t) + P_{C1}(t) + P_{C2}(t), \quad (4) \\ P_0(t) &= 0,5 \cdot A_1 A_2 \text{Cos}[\Delta\beta L - \delta_\beta(t)\Delta], \\ P_{C1} &= \Phi_L^2 \cdot C_0^2 \frac{\text{Cos}[(\Delta\beta - \beta_c)l_{ab}] \text{Sin}[(2\Delta\beta - \beta_c)L]}{(2\Delta\beta - \beta_c)(\Delta\beta - \beta_c)} \text{Sin}\left[\frac{\delta_\beta(t)\Delta}{2}\right] \\ P_{C2} &= 2\Phi_L^2 \cdot C_0^2 \frac{\cos^2[(\Delta\beta - \beta_c)l_{ab}]}{(\Delta\beta - \beta_c)^2} \sin^2\left[\frac{\delta_\beta(t)\Delta}{2}\right]. \end{aligned}$$

3. Результаты моделирования

В качестве примера была рассмотрена волоконно-оптическая линия передачи, включающая одну длину оптического кабеля с двумодовыми оптическими волокнами. Длина оптического волокна в кабеле $L=5000$ м. Полагали, что на ближнем конце линии передачи в оптическом волокне когерентным оптическим источником излучения (лазером) возбуждались две моды LP_{01} и LP_{11} . На дальнем конце волоконно-оптической линии передачи обе моды поступают на квадратичный детектор, на выходе которого с помощью фильтров выделяется низкочастотный сигнал и подавляется постоянная составляющая. На оптическое волокно кабеля на участке длиной 10 м оказывается вибро-акустическое воздействие. Расстояние от ближнего конца до начала участка $la=1000$ м. Дифференциальная модовая задержка принималась равной $\Delta\beta = 4,5$ пс/м. Источник вибро-акустического воздействия вырабатывает кодовую последовательность импульсов с периодом 1.0 кГц. Низкочастотный сигнал на выходе квадратичного приемника моделировали, используя описанную выше модель. Вероятность ошибок (BER) оценивали, применяя концепцию Q-фактора с учетом гауссовского шума фотоприемника. На рисунке 1 представлен пример полученной в результате моделирования зависимости вероятности ошибок от перекоса распределения мощности между модами, выраженного в относительных единицах. Для данного примера период изменения нерегулярностей в 10 раз превышал длину биений рассматриваемых мод двумодового оптического волокна, амплитуда нерегулярностей принималась равной 10^{-6} 1/м (кривая 1), 10^{-4} 1/м (кривая 2) и 10^{-2} 1/м (кривая 3). Интенсивность воздействия полагали равной 0,0005 рад/м. Отношение сигнал/шум на выходе фотоприемника принимали равным 30 дБм.

4. Заключение

Как показали расчеты период и амплитуда колебаний межмодовых связей вдоль волокна практически не влияют на качество связи в исследуемом канале. Следует отметить, что вероятность ошибок падает практически до нуля при равенстве периода изменений межмодовых связей и длины биений между модами. Однако при этом отстройка составляет менее 10^{-10} %, что не позволяет говорить о практическом применении данного эффекта. Возможность увеличения связей на локальном участке требует отдельных исследований. Предложенная в данной работе модель не может быть использована для этих целей, поскольку

получена для условий слабой связи. Результаты моделирования наглядно демонстрируют зависимость качества передачи в исследуемом канале от перекоса распределения мощности между модами. Так при равномерном вводе, вероятность ошибок практически полностью определяется гауссовским шумом фотоприемника. Однако с увеличением перекоса более чем на 20-30% уже ощущается существенный вклад переходных помех. Таким образом, анализ полученных в данной работе результатов позволяет предположить, что при прочих равных условиях вероятность ошибок в рассматриваемом симплексном акусто-оптическом канале связи на двумодовом оптическом волокне можно существенно снизить, обеспечивая на входе равномерное возбуждение мод при вводе оптического излучения в волокно и ограничивая перекоп распределения мощности между модами.

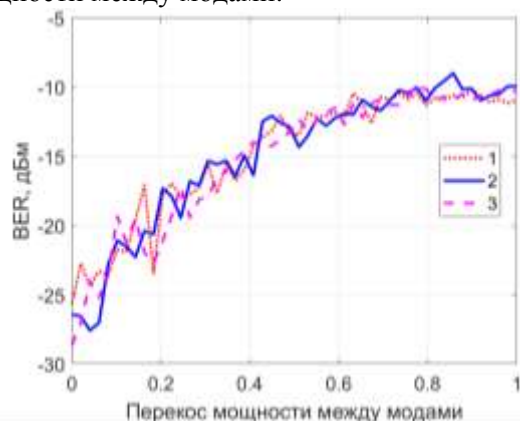


Рисунок 1. Зависимость вероятности ошибки от перекопа мощности.

5. Литература

- [1] Pohl, A.A.P. Advances and New Applications Using the Acousto-Optic Effect in Optical Fibers / A.A.P. Pohl, R.A. Oliveira, R.E. Da Silva, C.A.F. Marques, JR. P.de T. Neves, K. Cook, J. Canning, R.N. Nogueira // *Photonic Sensors*. – 2013. – Vol. 3(1). – P. 1-25.
- [2] Cole, J.H. Fiber-optic detection of sound / J.H. Cole, R.L. Johnson, P.G. Bhuta // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1977. – Vol. 62(5). – P. 1136-1138.
- [3] Bucaro, J. A. Measurement of sensitivity of optical fibers for acoustic detection / J.A. Bucaro, T.R. Hickman // *Applied Optics*. – 1973. – Vol. 18(6). – P. 938-940.
- [4] Teixeira, J.G.V. Advanced fiber-optic acoustic sensors / J.G.V. Teixeira, I.T. Leite, S. Silva, O. Frazao // *Photonic Sensors*. – 2014. – Vol. 4(5). – P. 198-208.
- [5] Wu, Y. Distributed Fiber Voice Sensor Based on Phase-Sensitive Optical Time-Domain Reflectometry / Y. Wu, J. Gan, Q. Li, Z. Zhang, X. Heng, Z. Yang // *IEEE Photonics Journal*. – 2015. – Vol. 7(6). – P. 6803810.
- [6] Muanenda, Y. Recent Advances in Distributed Acoustic Sensing Based on Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry // *Hindawi Journal of Sensors*. – 2018. – Vol. 23(3897873). – P. 1-16.
- [7] Важдаев, К.В. Акустооптические устройства и их применение в приборах и информационно-измерительных системах // *Нефтегазовое дело*. – 2012. – Т. 10, № 1. – С. 148-151.
- [8] Bercy, A. In-line extraction of an ultrastable frequency signal over an optical fiber link / A. Bercy, S. Guellati-Khelifa, F. Stefani, G. Santarelli, C. Chardonnet, P.-E. Pottie, O. Lopez, A. Amy-Klein // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2014. – Vol. 31(4). – P. 678-685.
- [9] Single fiber Sagnac sensing system: Patent US 6459486 USA: G01H9/00, (IPC1-7): G01B9/02, G01H9/004 (EP) / Udd E. (USA), Morrell M.M. (USA); – № US52077100A; Application 08.03.2000; Publication 01.10.02, Published as US6459486B1.
- [10] Communicating or reproducing an audible sound: Patent US 8000609 USA: H04B10/00, H04B10/548 (EP), H04R23/008 (EP) / Healey P. (GB), Sicora E.S.R. (GB); –

- № US91843406A; Applicants 12.04.2006; Publication 12.04.06, Published as CA2604950A1;EP1713301A1;EP1869947A1;EP1869947B1;WO2006109051A1;US2009103928A1;US8000609B2.
- [11] Burdin, V.A. Simulation of simplex acousto-optical data transmission on fiber optic link / V.A. Burdin, O.Yu. Gubareva // SPIE Proceedings. – 2018. – Vol. 10774. – P. 107740B.
- [12] Grishachev, V.V. Detecting Threats of Acoustic Information Leakage through Fiber Optic Communications // Journal of Information Security. – 2012. – Vol. 3. – P. 149-155.
- [13] Ha, W. Acousto-optic control of speckle contrast in multimode fibers with a cylindrical piezoelectric transducer oscillating in the radial direction / W. Ha, S. Lee, Y. Jung, J.K. Kim, K. Oh // Optics Express. – 2009. – Vol. 17(20). – P. 17536-17546.
- [14] Горбачев, О. Интерференционные исследования спекл-структур в оптическом кабеле // Фотоника. – 2012. – Т. 36, № 6. – С. 20-24.
- [15] Engan, H.E. Propagation and optical interaction of guided acoustic waves in two-mode optical fibers / H.E. Engan, B.Y. Kim, J.N. Blake, H.J. Shaw // Journal of Lightwave Technology. – 1988. – Vol. 6(3). – P. 428-436.
- [16] Kim, B.Y. Use of highly elliptical core fibers for two-mode fiber devices / B.Y. Kim, J.N. Blake, S.Y. Huang, H.J. Shaw // Optics Letters. – 1987. – Vol. 12(9). – P. 729-731.
- [17] Sun, A. A Novel Highly Sensitive Optical Fiber Microphone Based on Single mode-multimode-single mode structure / A. Sun, Y. Semenova, G. Farrell // Microwave and Optical Technology Letters. – 2011. – Vol. 53(2). – P. 442-445.
- [18] Бурдин, В.А. Способ симплексной передачи данных по оптическому волокну кабельной линии: пат. 2702983 Рос. Федерация: МПК H04B 10/00 / В.А. Бурдин, О.Ю. Губарева заявитель и патентообладатель Самара. поволж. гос. универ-т телеком. и информатики. - № 2019116781/07; заявл. 30.05.19; опубл. 14.10.2019, Бюл. № 29.
- [19] Bucaro, J.A. Fiber optic hydrophone / J.A. Bucaro, H.D. Dardy, E.F. Carome // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1977. – Vol. 62(5). – P. 1302-1304.
- [20] Hwang, J.-h. Position Estimation of Sound Source Using Three Optical Mach-Zehnder Acoustic Sensor Array / J.-h. Hwang, S. Seon, C.-S. Park // Current Optics and Photonics. – 2017. – Vol. 1(6). – P. 573-578.
- [21] Burdin, V.A. Simulation of Simplex Acousto-Optic Channel on Few-Mode Optical Fiber / V.A. Burdin, O.Y. Gubareva // Lecture Notes in Computer Science. – 2019. – Vol. 11660. – P. 719-726.
- [22] Probst, C.B. Experimental Verification of Microbending Theory Using Mode Coupling to Discrete Cladding Modes / C.B. Probst, A. Bjarklev, S.B. Andreasen // Journal of Lightwave Technology. – 1989. – Vol. 7(1). – P. 55-61.
- [23] Snyder, A.W. Optical waveguide theory / A.W. Snyder, J.D. Love – Moscow: Radio i Svyaz, 1987.
- [24] Black, R.J. Optical waveguide modes / R.J. Black, L. Gagnon – NY: The McGraw-Hill Companies, 2010.
- [25] Kokubun, Y. Rigorous mode theory and analysis of few-mode fibers // Japanese Journal of Applied Physics. – 2018. – Vol. 57. – P. 08PA05.
- [26] Taylor, H. Bending effects in optical fibers // Journal of Lightwave Technology. – 1984. – Vol. 2(5). – P. 617-628.
- [27] Engan, H.E. Propagation and optical interaction of guided acoustic waves in two-mode optical fibers / H.E. Engan, B.Y. Kim, J.N. Blake, H.J. Shaw // Journal of Lightwave Technology. – 1988. – Vol. 6(3). – P. 428-436.
- [28] Zhao, J. Fiber acousto-optic mode coupling between the higher-order modes with adjacent azimuthal numbers / J. Zhao, X. Liu // Optics Letters. – 2006. – Vol. 31(11). – P. 1609-1611.
- [29] Park, H.S. Acousto-optic resonant coupling of three spatial modes in an optical fiber / H.S. Park, K.Y. Song // Optics Express. – 2014. – Vol. 22(2). – P. 1990-1996.
- [30] Alcusa-Saez, E. Accurate and broadband characterization of few-mode optical fibers using acousto-optic coupling / E. Alcusa-Saez, A. Diez, M.V. Andres // European Conference on Optical Communication (ECOC), 2015. – P. 0490.

- [31] Alcusa-Sáez, E. Accurate mode characterization of two-mode optical fibers by in-fiber acousto-optics / E. Alcusa-Saez, A. Diez, M.V. Andres // Optics Express. – 2016. – Vol. 24(5). – P. 4899.
- [32] Mahlke, G. Fiber optic cable / G. Mahlke, P. Gossing // Novosibirsk: Corning Cable System., 2001.

Simulation of data transmission in a simplex acousto-optical channel over a two-mode optical fiber

O.Y. Gubareva¹, V.A. Burdin¹, V.O. Gureev¹, S.S. Masyuk¹

¹Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, L. Tolstoy street 23, Samara, Russia, 443010

Abstract. This article presents the model and simulation results of data transmission in a simplex acousto-optic fiber channel based on a two-mode optical fiber, taking into account the periodic nature of changes in the mode coupling coefficients along the cable line. The results obtained suggest that, ceteris paribus, the probability of errors in the considered simplex acousto-optic communication channel on a two-mode optical fiber can be significantly reduced due to uniform excitation of modes at the fiber input and by supporting an even distribution of power between the modes along the cable length.