

УДК 535

DOI: 10.18413/2518-1092-2022-7-2-0-5

**Костин К.В.
Егоров С.Ф.
Чистяков С.В.**

**ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОГО СМЕШЕНИЯ
НА КАЧЕСТВО ПЕРЕДАЧИ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ**

Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение высшего образования «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации»,
ул. Приборостроительная, д. 35, г. Орёл, 302034, Россия
e-mail: kirya.kostin.99@mail.ru

Аннотация

В настоящее время практически каждый человек использует услуги передачи информации. Для удовлетворения всех потребностей, мощности и скорости передачи данных в современных оптических системах связи достигли огромных значений. При высоких передаваемых мощностях в оптическом волокне возникают нежелательные нелинейные эффекты, которые уменьшают эффективность всей оптической системы. Нелинейные эффекты в оптических волокнах накладывают различные ограничения на канал связи, и понимание таких эффектов является практически необходимым. Четырехволновое смешение является доминирующим нелинейным эффектом, присутствующим в сетях оптического мультиплексирования с разделением длин волн. Обоснованы общие положения о механизме проявления четырехволнового смешения в оптическом волокне. В статье приведен вариант классификации нелинейных эффектов. Рассмотрены виды четырехволнового смешения. В работе показана зависимость эффекта ЧВС от количества сигналов в тракте и соотношения фаз между взаимодействующими сигналами. Авторами предлагаются способы повышения достоверности передачи оптических сигналов в волоконно-оптических системах передачи.

Ключевые слова: четырехволновое смешение; волоконно-оптические системы передачи; нелинейные эффекты

Для цитирования: Костин К.В., Егоров С.Ф., Чистяков С.В. Влияние эффекта четырехволнового смешения на качество передачи оптических сигналов // Научный результат. Информационные технологии. – Т.7, №2, 2022. – С. 42-47. DOI: 10.18413/2518-1092-2022-7-2-0-5

**Kostin K.V.
Egorov S.F.
Chistyakov S.V.**

**THE INFLUENCE OF THE FOUR-WAVE MIXING EFFECT
ON THE TRANSMISSION QUALITY OF OPTICAL SIGNALS**

Federal state military educational institution of higher professional education "Academy of the Federal security service of the Russian Federation", 35 Priborostroitelnaya St, Orel, 302034, Russia
e-mail: kirya.kostin.99@mail.ru

Abstract

Currently, almost everyone uses information transmission services. To meet all the needs, the power and data transmission rates in modern optical communication systems have reached enormous values. At high transmitted powers, undesirable nonlinear effects occur in the optical fiber, which reduce the efficiency of the entire optical system. Nonlinear effects in optical fibers impose various limitations on the communication channel, and understanding such effects is practically necessary. Four-wave mixing is the dominant nonlinear effect present in optical networks with wavelength-division multiplexing. The general provisions on the mechanism of manifestation of four-wave mixing in an optical fiber are substantiated. The article presents a variant of the classification of nonlinear effects. The types of four-wave mixing are considered. The paper shows the dependence of the FWM effect on the number of signals in the path and the phase ratio between the interacting signals. The authors propose ways to increase the reliability of optical signal transmission in fiber-optic transmission systems.

Keywords: four-wave mixing; fiber-optic transmission systems; nonlinear effects

For citation: Kostin K.V., Egorov S.F., Chistyakov S.V. The influence of the four-wave mixing effect on the transmission quality of optical signals. – Т.7, №2, 2022. – P. 42-47. DOI: 10.18413/2518-1092-2022-7-2-0-5

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день, в условиях внутренних и внешних угроз государства, стремительно растёт необходимость сетей специального назначения в оперативной и актуальной информации. В связи с этим, к телекоммуникационным системам предъявляются жёсткие требования для качественной, корректной и эффективной отработки задач [8]. С постоянно растущими обрабатываемыми объёмами данных возникает необходимость в увеличении скорости передачи информационных потоков. Однако стремление повысить скорость передачи информации приводит к ухудшению качества передачи. Следовательно, следует учитывать параметры, которые негативным образом влияют на характеристики системы передачи.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Оптические системы связи, работающие при умеренной мощности (несколько милливатт) и скорости передачи данных (примерно до 2,5 Гбит/с) можно считать линейными системами. Однако при более высоких скоростях передачи данных, таких как 10 Гбит/с и выше, и/или при более высоких передаваемых мощностях важно учитывать влияние нелинейности. Нелинейные процессы при передаче сигналов через диэлектрический волновод возникают главным образом из-за превышения пиковой мощностью P_0 оптического сигнала определенного порогового значения $P_{пор}$ свойственного каждому конкретному материалу. В таком сильном электромагнитном поле отклик любого диэлектрика на световое воздействие становится нелинейным, а волноводная структура только усиливает этот эффект. В случае систем WDM нелинейные эффекты могут стать важными даже при умеренных мощностях и скоростях передачи данных.

Диэлектрический световод может играть роль среды, в которой несколько отдельно введенных оптических волн взаимодействуют друг с другом через нелинейный отклик электронов внешних оболочек. В данных условиях суммарное электромагнитное поле может порождать новые частотные компоненты. Такие процессы называются параметрическими, так как генерация новых спектральных компонентов обусловлена светоиндуцированным изменением параметров передачи среды. Основными параметрическими процессами ОВ, проявляющимися в ВОСП, являются четырехволновое смещение и генерация третьей гармоники (ГТГ) (рис. 1) [8].

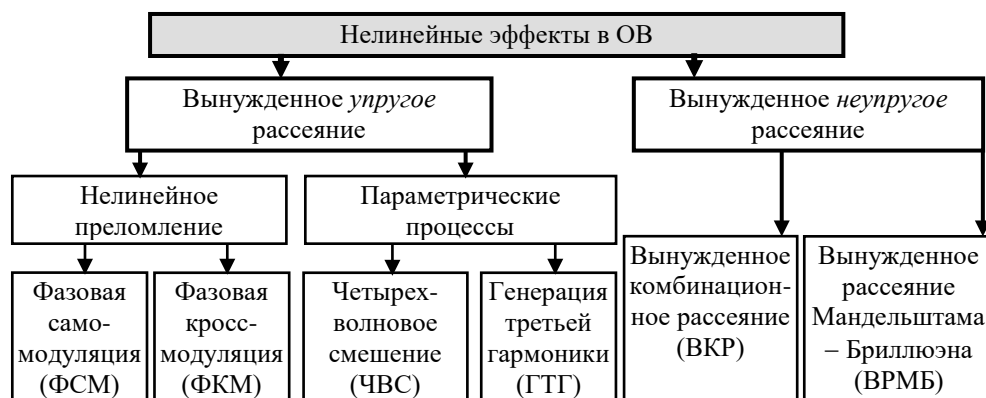


Рис. 1. Вариант классификации нелинейных эффектов в оптическом волокне
Fig. 1. A variant of classification of nonlinear effects in optical fiber

ЧВС – главный источник пересечений и потерь в системах WDM. Взаимное влияние нескольких каналов друг на друга создает новые посторонние сигналы. В худшем случае равного расстояния между каналами большинство новых частот накладываются на существующие и вызывают интерференцию. В лучшем случае наблюдается лишь уменьшение мощности WDM

каналов. В ходе работы будет решаться задача повышения качества передачи оптических сигналов за счёт оптимизации характеристик оптических трансиверов. Для постановки задачи был использован критерий превосходства и сделан акцент на характеристики трансиверов оптического излучения. Постановка задачи представлена формулой 1:

$$Q \geq Q_{\text{дон}}(f(\{X\})), \quad (1)$$

где $\{X\}$ – множество параметров оптических трансиверов.

Четырехволновое смешение является параметрическим процессом третьего порядка, свойства которого обусловлены рассмотрением кубичной поляризованности [1;6;7]. Параметрический процесс в среде, где наименьший порядок ненулевой нелинейной восприимчивости равен трем, предполагает взаимодействие четырех оптических волн.

При передаче информационных импульсных последовательностей (при условии фазового согласования) на всех четырех частотах в каждом из случаев наблюдались бы переходные помехи, мешающие функционированию ВОСП. Следовательно, необходимо стремиться снизить проявление четырехволнового смешения (ЧВС). Таким образом, параметрическое четырехволновое смешение есть взаимодействие оптических волн в волокне, которое происходит из-за нелинейной зависимости показателя преломления среды от интенсивности оптического излучения. Это приводит к генерации волны частотой ω_j , полученной через смешивание трех волн частот: $\omega_i, \omega_j, \omega_k$ так, что $\omega_{ijk} = \omega_i + \omega_j + \omega_k$. В некоторых случаях генерируются две волны – ω_p и ω_s , соответствующие равенству $\omega_i + \omega_j = \omega_p + \omega_s$.

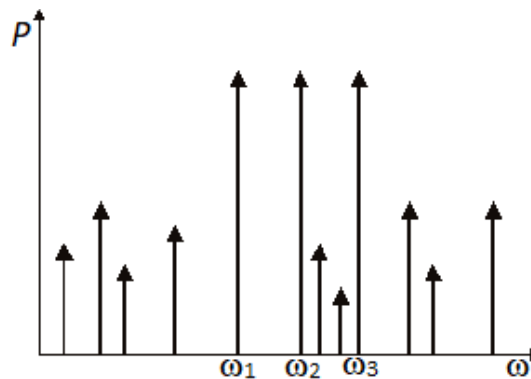


Рис. 2. Генерация новых частотных составляющих с помощью четырехволнового смешения
Fig. 2. Generation of new frequency components using four-wave mixing

В N -канальной системе передачи этот эффект приводит к большому количеству ложных сигналов:

$$N_{\text{лс}} = \frac{N^2(N-1)}{2}, \quad (2)$$

где $N_{\text{лс}}$ – количество ложных сигналов.

Эффект четырехволнового смешения зависит от соотношения фаз между взаимодействующими сигналами [5;8;9]. Если все мешающие сигналы распространяются с одинаковой групповой скоростью, как это было бы в случае отсутствия хроматической дисперсии, эффект усиливается. С другой стороны, при наличии хроматической дисперсии различные сигналы распространяются с разными групповыми скоростями. Различные волны попеременно перекрываются по фазе и не совпадают по фазе, и конечный эффект заключается в снижении эффективности смешивания. Разница скоростей больше, когда каналы расположены на большем расстоянии друг от друга (в системах с хроматической дисперсией). Из-за этого по мере распространения сигналов по ОВ происходит то установление, то нарушение синхронизации между спектральными компонентами. С одной стороны, это уменьшает мощность генерируемых

параметрических помех, с другой нестабильность процессов существенно усложняет общую картину искажений сигналов в ОВ и затрудняет поиск оптимального частотного плана размещения спектральных каналов.

Предположим, что каналы, расположенные на равном расстоянии друг от друга, передаются с одинаковой мощностью, а максимально допустимое затухание из-за четырехволнового смещения составляет 1 дБ. Тогда, если передаваемая мощность в каждом канале равна P , то максимальная мощность ЧВС в любом канале должна быть не более εP , где ε можно рассчитать как 0,034 для затухания в 1 дБ. Поскольку генерируемая ЧВС мощность увеличивается с увеличением длины канала, устанавливается ограничение на мощность передачи на канал в зависимости от длины канала [10].

В приведенном выше объяснении говорилось, что четыре различных частотных компонента взаимодействуют посредством четырехволнового смещения. Это называется невырожденным четырехволновым смещением. Однако существует также возможность вырожденного четырехволнового смещения, когда две из четырех частот совпадают.

Четырехволновое смещение в волокнах связано с фазовой самомодуляцией и фазовой кросс-модуляцией: все эти эффекты происходят из-за одной и той же нелинейности Керра и отличаются только вырождением участвующих волн.

При высоких интенсивностях оптического сигнала (выше 100 мВт) проявление ЧВС обнаруживается даже при распространении единственного сигнала по оптическому тракту. Например, из-за влияния фазовой самомодуляции имеет место генерация новых спектральных составляющих [20]. В свою очередь, эти спектральные составляющие, взаимодействуя друг с другом посредством ЧВС, порождают новые спектральные составляющие.

Четырехволновое смещение является серьезной проблемой в системах WDM, использующих оптическое волокно со смещенной дисперсией, но обычно оно не представляет серьезной проблемы в волоконно-оптических системах, использующих стандартное волокно. В частности, это послужило стимулом для разработки волокна с нулевым смещением дисперсии (NZ-DSF).

В целом, есть способы повышения достоверности передачи оптических сигналов в волоконно-оптических системах передачи:

1) Различное расстояние между каналами. Это может быть использовано только для систем, имеющих малое число каналов, и требует тщательных и точных вычислений.

2) Увеличение расстояния между каналами. Это увеличивает рассогласование групповой скорости между каналами. Недостатком этого способа является общее увеличение полосы пропускания системы и требует от волоконно-оптических усилителей высокой стабильности в более широкой полосе пропускания, и увеличение затухания из-за вынужденного комбинационного рассеяния.

3) Использование длин волн выше 1560 нм с одномодовым волокном со смещенной дисперсией (DSF). Даже при использовании DSF в этом диапазоне присутствует значительное количество хроматической дисперсии, что снижает эффект четырехволнового смещения. Недавно разработанные оптические усилители L-диапазона могут использоваться для передачи на большие расстояния по DSF.

4) Уменьшение мощности оптических систем связи. Как и в случае с другими нелинейностями, уменьшение мощности передатчика и расстояния между усилителями уменьшит затухание.

5) Введение разностных задержек для каждой длины волны, если длины волн могут быть мультиплексированы и демуплексированы в середине пути передачи. Это перемешивает фазовое соотношение между различными длинами волн, что приводит к меньшему затуханию за счет ЧВС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокие требования, предъявляемые к системам передачи по скорости, качеству и объему предоставляемых услуг, определяют необходимость поиска решения проблемы, связанной с

повышением достоверности передачи оптических сигналов в волоконно-оптических системах передачи в условиях четырехволнового смещения.

Список литературы

1. Гауэр Д. Оптические системы связи // М.: Радио и Связь, 1989. – 501с.
2. Песков С.Н., Зима З.А. Шумы в оптических сетях // Теле-Спутник. 2005. №4.
3. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи // М.: "ЛЕСАРарт". 2003. – 288 с.
4. Скляров О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи // М.: "Солон-Пресс", 2004. – 272 с.
5. Гринфилд Д. Оптические сети // М.: "Тид-Дс". 2002.– 256 с.
6. Наний О.Е., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. Дальность работы и пропускная способность когерентных систем связи // Вестник связи. 2013. № 9
7. Солитоны и нелинейные уравнения // Додд Р., Эйлбек Дж. Гиббон Дж., Моррис Х., изд. «Мир», М., 1988. – 697 с.
8. Сайтов И. А. Теоретические основы построения средств связи оптического диапазона. // Орёл: Академия ФСО России, 2008. – 491 с.
9. Бутусов М.М. Волоконно-оптические системы передачи: учебник для вузов // под ред. В.Н. Гомзина. – Москва: Радио и связь, 1992. – 416 с.
10. Агравал, Г. Нелинейная волоконная оптика // Москва: Мир, 1996. – 234 с.
11. Яременко, Ю.И. Теоретические основы построения и применения средств связи оптического диапазона: монография // Ленинград: ВАС, 1992. – 300 с
12. Скляров, О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи // Москва: СОЛОН-пресс, 2004. – 255 с.
13. Цернике Ф., Мидвинтер Д. Прикладная нелинейная оптика // М.: Мир, 1976. – 262 с.
14. Бломберген Н. Нелинейная оптика // М.: Мир, 1966. – 424 с.
15. Шен И. Принципы нелинейной оптики // М.: Мир, 1989. – 560 с.
16. Дмитриев, С.А. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы. Сборник статей // М.: Техносфера, 2015. – 452 с.
17. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем // М.: Лань, 2016. – 448 с.
18. Янг, М. Оптика и лазеры, включая волоконную оптику и оптические // М.: Мир, 2018. – 544 с.
19. Родина, О. В. Волоконно-оптические линии связи: практическое руководство // Москва: Горячая линия-телеком, 2014. – 400 с.
20. Pocholle J.P., Raffy J., Papuchon M., Desurvire E., Raman and four-photon mixing amplification in single mode fibers // Opt. Eng. 24, 1985
21. Chongjin Xie. Impact of nonlinear and polarization effects on coherent systems // Optics Express. 2011. Vol. 19. Issue 26.

References

1. Dus Gower. Optical communication systems. — М.: Radio and Communications, 1989. – 501 p.
2. Peskov S.N., Zima Z.A. Noise in optical networks // Tele-Satellite. 2005. No.4.
3. Listvin A.V., Listvin V.N., Shvyrkov D.V. Optical fibers for communication lines, М.: "LESARart". 2003. 288 p.
4. Sklyarov O.K. Fiber-optic networks and communication systems. М.: "Solon-Press", 2004. 272 p.
5. Greenfield D. Optical networks, М.: "Tid-Ds". 2002. 256 p.
6. Naniy O.E., Treschikov V.N., Ubaydullaev R.R. Range of operation and throughput of coherent communication systems // Bulletin of Communications. 2013. No. 9
7. Solitons and nonlinear equations / Dodd R., Eilbeck J. Gibbon J., Morris H., ed. "Mir", Moscow, 1988 – 697 p.
8. Saitov I. A. Theoretical foundations of the construction of optical range communication means. – Orel: Academy of FSO of Russia, 2008. - 491 p
9. Butusov M.M. Fiber-optic transmission systems: textbook for universities / edited by V. N. Gomzin. – Moscow: Radio and Communications, 1992. – 416 p.
10. Agraval, G. Nonlinear fiber optics – Moscow: Mir, 1996. – 234 p.
11. Yaremenko, Yu.I. Theoretical foundations of the construction and application of optical range communications: monograph – Leningrad: VAS, 1992. – 300 p.

12. Sklyarov, O.K. Fiber-optic networks and communication systems. – Moscow: SOLON-press, 2004. – 255 p.
13. Zernike F., Midwinter D. Applied nonlinear optics. – М.: Mir, 1976. – 262 p.
14. Blombergen N. Nonlinear optics. – М.: Mir, 1966. – 424 p.
15. Shen Yi. Principles of nonlinear optics. – М.: Mir, 1989. – 560 p.
16. Dmitriev, S.A. Fiber-optic technology: current state and new prospects. Collection of articles. – Moscow: Technosphere, 2015. – 452 p.
17. Zakaznov N.P., Kiryushin S.I., Kuzichev V.I. Theory of optical systems – М.: Lan, 2016. – 448 p.
18. Yang, M. Optics and lasers, including fiber optics and optical – М.: Mir, 2018. - 544 p.
19. Rodina, O. V. Fiber-optic communication lines: a practical guide – Moscow: Hotline-telecom, 2014. – 400 p.
20. Pocholle J.P., Raffy J., Papuchon M., Desurvire E., Raman and four-photon mixing amplification in single mode fibers // Opt. Eng. 24, 1985
21. Chongjin Xie. Impact of nonlinear and polarization effects on coherent systems // Optics Express. 2011. Vol. 19. Issue 26.

Костин Кирилл Владиславович, студент Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации
Егоров Семён Фёдорович, студент Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации
Чистяков Сергей Владимирович, кандидат технических наук, сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации

Kostin Kirill Vladislavovich, student Academy of the Federal security service of the Russian Federation
Egorov Semyon Fedorovich, student Academy of the Federal security service of the Russian Federation
Chistyakov Sergey Vladimirovich, candidate of technical sciences, Academy of the Federal security service of the Russian Federation