

УДК 621.372.8.082.5

Е.Г. Шапиро, Д.А. Шапиро

Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН,
Новосибирск, Российская Федерация

СПЕКТРАЛЬНЫЙ ДИЗАЙН СИГНАЛА С КРАТНЫМ НЕЦЕНТРАЛЬНЫМ ЧИРПИРОВАНИЕМ

Предлагается метод, который помогает снизить нелинейные искажения сигналов для амплитудно-фазовой модуляции, используя формат 8-QAM в качестве примера. Нецентральное чирпирование также дает возможность управлять частотными областями и разбивать каналы на несколько частей.

Ключевые слова: волоконно-оптические линии связи, математическое моделирование, нелинейное уравнение Шредингера, фазовая модуляция, нецентральное чирпирование, ортогональные поляризации.

E.G. Shapiro, D.A. Shapiro

Institute of Automation and Electrometry of the Siberia Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

SPECTRAL DESIGN OF THE SIGNAL WITH MULTIPLE NON-CENTRAL CHIRPING

A method is proposed that helps to reduce the nonlinear distortion of signals for amplitude-phase modulation, using the 8-QAM format as an example. Non-central chirping also gives the ability to control the frequency regions and partition the channel into multiple parts.

Keywords: fiber optic links, mathematical modeling, nonlinear Schrödinger equation, phase modulation, non-central chirping, orthogonal polarizations.

Введение

Волоконно-оптические линии связи имеют широкий круг применений благодаря своей способности передавать данные на большие расстояния без ухудшения качества сигнала. Они используются для быстрого доступа в Интернет, передачи данных между компаниями и правительственными учреждениями, где важны безопасность и высокое качество сигнала, и для многих других целей. В связи с этим требования к системам передачи могут сильно различаться в зависимости от их использования. Для решения разнообразных задач применяются такие

ключевые технологии, как когерентное детектирование, новые типы модуляции, мультиплексирование по поляризациям, компенсация дисперсии на приемнике и другие [1–4]. Несмотря на эти преимущества, когерентные системы подвержены нелинейным эффектам, которые могут снизить отношение сигнал/шум и, следовательно, привести к ошибкам при приеме.

Разработка методов подавления нелинейных искажений является важной и актуальной задачей. В данной работе для уменьшения нелинейных искажений при распространении амплитудно-фазового сигнала мы предложили использовать кратное чирпирование, способ формирования, при котором длительность периода чирпирования состоит из нескольких длительностей битового интервала. На примере формата 8-QAM показано, что данный способ эффективно подавляет нелинейный шум. Кроме того, кратное чирпирование позволяет перемещать отдельные группы оптических импульсов в другую частотную область.

Кратное чирпирование

Гауссов оптический импульс с нецентральной чирпом задается формулой

$$f(t) = Qe^{-\frac{1}{2T_0^2}t^2} e^{i\frac{C(t-t_0)^2}{2T_0^2}} = Qe^{iC\frac{t_0^2}{2T_0^2}} e^{-\frac{1-iC}{2T_0^2}t^2} e^{-\frac{iCt_0}{T_0^2}t}, \quad (1)$$

где Q^2 определяет мощность импульса, T_0 – параметр ширины, t_0 – величина сдвига чирпа относительно точки пиковой мощности импульса. Множитель $\exp[-iCt_0t/T_0^2]$ в (1) означает, что Фурье-образ функции $f(t)$ имеет частотный сдвиг на $\Delta\omega = -Ct_0/T_0^2$.

Если у разных импульсов различаются сдвиги чирпа, то различаются и частотные области импульсов. Обозначим T длительность битового интервала, предположим, что длительность интервала чирпирования равна mT и $m > 1$. Тогда у импульсов, находящихся внутри периода чирпирования, сдвиги разные.

На рис. 1 изображены профили мощности импульсов на периоде чирпирования 0–100 пс и график функции чирпа при $C = 1$. В общем случае период чирпирования $0 - mT$ содержит m битовых интервалов и m коэффициентов модуляции. Обозначим $f_1(t), \dots, f_l(t), \dots, f_m(t)$

последовательность импульсов, находящихся на интервале $0 - mT$ пс. Тогда чирп и импульсы на этом временном интервале задаются формулами [5]:

$$\text{Ch}(t) = C \left(t - \frac{m}{2} T \right)^2 / 2T_0^2, \quad (2)$$

$$f_l(t) = c_l Q e^{-\frac{(t-lT+T/2)^2}{2T_0^2}} e^{i \frac{C}{2T_0^2} \left(t - \frac{m}{2} T \right)^2}, \quad t \in [(l-1)T, lT], \quad l = 1, \dots, m,$$

где c_l – коэффициент модуляции. Сдвиг чирпа t_l функции $f_l(t)$ задается равенством $t_l = \frac{T}{2}(2l - m - 1)$. Пиковая мощность Фурье-образа $f_l(t)$ достигается на частоте

$$\Delta\omega_l = \frac{C}{T_0^2} \frac{T}{2} (m + 1 - 2l). \quad (3)$$

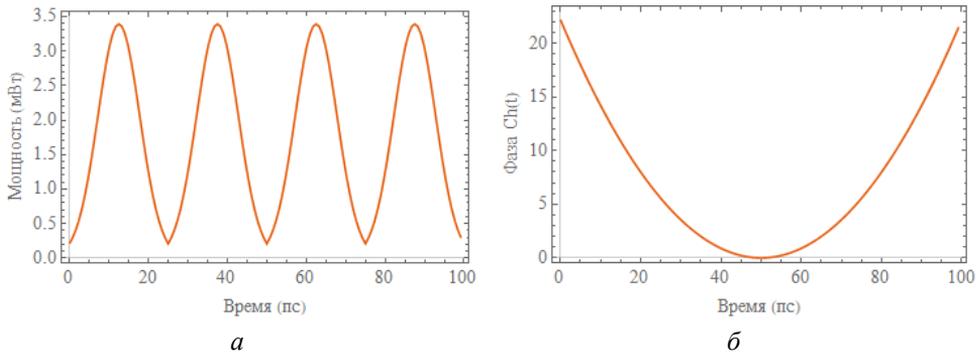


Рис. 1. Профиль мощности импульсов, $m = 4$, $T = 25$ пс, $T_0 = 7,5$ пс (а) и функция чирпа (б)

Рассмотрим последовательность импульсов объемом Mm , которой соответствует случайная последовательность коэффициентов модуляции $c_1, \dots, c_m, c_{m+1}, \dots, c_{Mm}$. Эта последовательность состоит из M участков чирпирования, которым присвоим номера $1, \dots, M$. Период чирпирования с номером k содержит импульсы с коэффициентами $c_{(k-1)m+1}, c_{(k-1)m+2}, \dots, c_{km}$.

Импульсы, расположенные на битовых интервалах с номером $l + (k - 1)m$, $k = 1, \dots, M$, где l фиксированное целое число и $l \leq m$, образуют канал с частотой $\Delta\omega_l$ (3).

На рис. 2, *а* показано, как канал преобразовался в четыре канала (рис. 2, *б*) в результате кратного чирпирования. Таким образом происходит уширение частотной области канала. При многоканальной передаче информации каналы могут перекрываться.

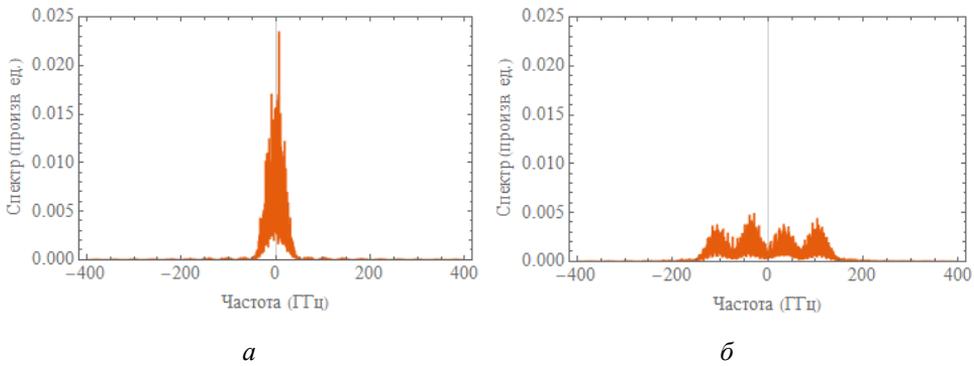


Рис. 2. Профиль мощности импульсов, $m=4$, $T=25$ пс, $T_0=7,5$ пс: $C = 0$ (*а*), $C = 1$ (*б*)

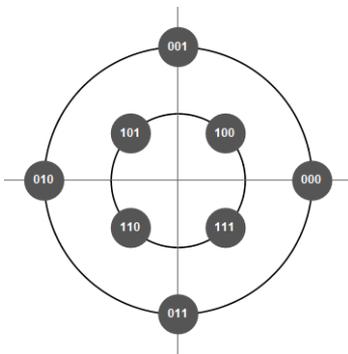


Рис. 3. Схема 8-QAM формата на плоскости комплексной амплитуды; каждая 3-битовая последовательность кодируется значениями амплитуды и фазы, обозначенными кружками

Во временной области импульсы с разным сдвигом чирпа смещаются относительно друг друга при распространении сигнала [6]. Вместе с дисперсионным уширением дрейф импульсов, вызванный кратным чирпированием, способствует перемешиванию сигнала. Таким образом, информация передается на многих частотах без привязки к определенному каналу, а импульсы занимают несколько битовых интервалов. Это сглаживает профиль мощности во временной и частотной областях. Мы численно показали, что использование кратного чирпирования подавляет нелинейный шум и повышает качество сигнала для формата 8-QAM. На рис. 3 приведено схематическое изображение формата 8-QAM.

Численное моделирование

Было проведено численное моделирование 8-QAM распространения сигнала для гауссовых импульсов с битовым интервалом $T=25$ пс и chirпом, смещенным от точки пика мощности импульса. Моделирование осуществлялось в рамках нелинейных уравнений Шредингера с учетом поляризации.

Линия связи длиной 500 км состояла из 10 участков вида:

$$\text{SMF}(50 \text{ км}) + \text{EDFA},$$

где SMF – стандартное одномодовое волокно, EDFA – волоконный эрбиевый усилитель с шум-фактором 4,5 дБ, полностью компенсирующий затухание сигнала на участке. В конце линии связи выполнялась компенсация дисперсии.

Для описания шума усилителей ASE (amplified spontaneous emission) была использована модель белого гауссова шума. Искажения, вызванные поляризационной модовой дисперсией, не учитывались. Параметры линии приведены ниже. Для выделения каналов мы использовали супергауссов оптический фильтр восьмой степени с шириной 90 ГГц. Моделирование выполнялось для пяти каналов с частотной разницей 100 ГГц. Мы использовали связанные нелинейные уравнения Шредингера. Длительность периода chirпирования равнялась 200 пс и содержала $m=8$ битовых интервалов $T = 25$ пс.

Параметры стандартного одномодового волокна (SMF).	
Затухание на $\lambda = 1550$ нм (дБ/км)	0,2
Эффективная площадь (мкм ²)	80
Дисперсия (пс/нм/км)	17
Дисперсионный наклон (пс/нм ² /км)	0,07
Нелинейный показатель преломления (10^{-20} м ² /Вт)	2,7

Начальный сигнал центрального канала, состоящий из последовательности $N = 8k$ битов, для поляризаций A_x и A_y задается формулами:

$$A_x(0, t) = \sum_{k=0}^{\frac{N}{8}-1} \sum_{l=1}^8 c_{x(8k+l)} f_l(t - 8kT);$$

$$A_y(0, t) = \sum_{k=0}^{\frac{N}{8}-1} \sum_{l=1}^8 c_{y(8k+l)} f_l(t - 8kT),$$

где c_x и c_y – коэффициенты модуляции формата 8-QAM, пиковая мощность импульсов составляла 3,4 и 13,6 мВт, параметр ширины гауссовых импульсов был равен 7,5 пс. Параметр chirпирования C был равен 1.

Мы сравнили качество сигнала формата 8-QAM для двух вариантов: 1) без chirпирования, $C=0$ и 2) с кратным chirпированием $C=1, m=8$. Применение chirпирования заметно меняет спектр сигнала. На рис. 4 приведен график спектральной мощности центрального канала для одной из поляризаций до chirпирования и после.

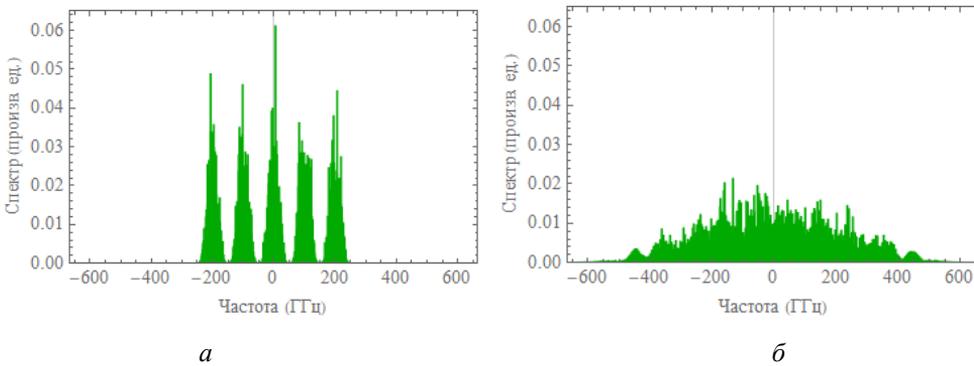


Рис. 4. Спектр мощности до (а) и после chirпирования (б) при $C=1, m=8$

Видно, что chirпирование приводит к стиранию границ между каналами и уменьшению максимальных значений частотных мощностей.

После распространения сигнала необходимо убрать искажения, вызванные хроматической дисперсией, и выделить начальные каналы. Цифровая обработка позволяет компенсировать дисперсию разделить сигнал на каналы. Математически кратное chirпирование означает умножением комплексной амплитуды сигнала на периодическую функцию, которая на периоде $0 - mT$ задается формулой $\exp(iCh(t))$, см. (2). Обратное chirпирование, т.е. умножение на $\exp(-iCh(t))$, восстанавливает сигнал.

На рис. 5, а приведена спектральная мощность в центральном канале в конце линии после компенсации дисперсии и до обратного chirпирования. Видно, что рис. 5, а и 4, б похожи. На рис. 5, б изображена спектральная мощность сигнала после компенсации дисперсии и обратного chirпирования.

Далее приведем сигнальные диаграммы для варианта без chirпирования ($C = 0$) и для chirпирования с параметром $C = 1, m = 8$. На рис. 6, а

показан график для распространения сигнала без чирпирования. Видно, что качество сигнала низкое, а вероятность ошибки 0,1. На рис. 6, б видно, что искажения значительно меньше, если использовать кратное чирпирование. Здесь вероятность ошибки 5×10^{-3} .

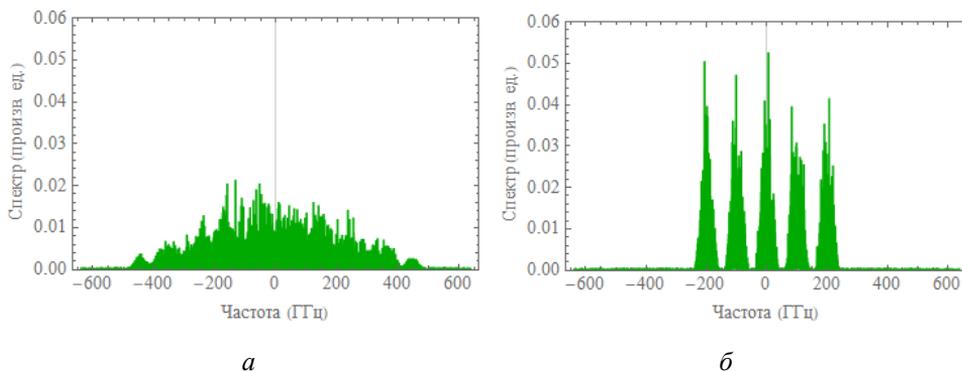


Рис. 5. Спектр мощности до (а) и после (б) обратного чирпирования

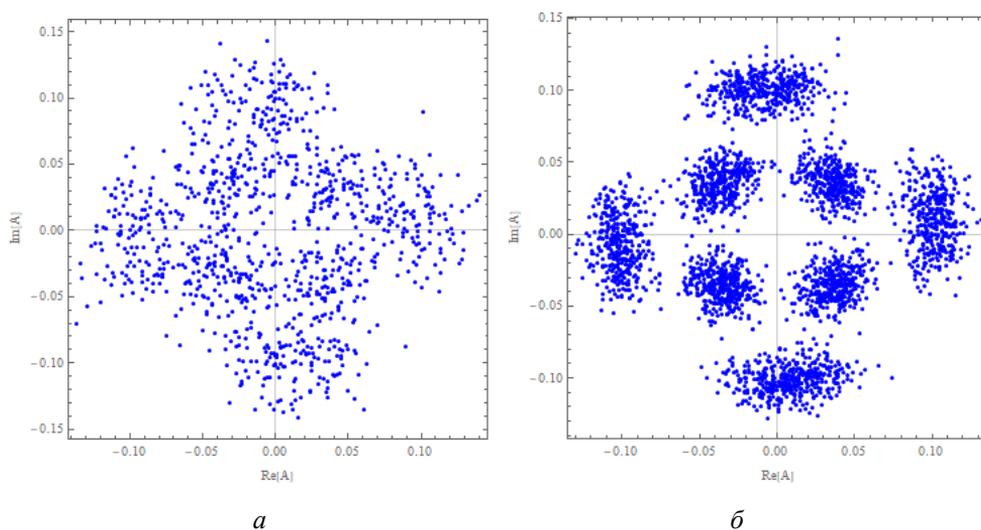


Рис. 6. Сигнальная диаграмма при $C=0$, вероятность ошибки 0,1 (а) и $C=1$, вероятность 5×10^{-3} (б)

Заключение

Предложен способ чирпирования, который уменьшает нелинейные искажения сигнала для амплитудно-фазовой модуляции на примере формата 8-QAM. Нецентральное чирпирование сигнала позволяет управлять частотной областью: сдвигать сигнал, дробить канал на

несколько. Центральное chirпирование обеспечивает управление центральными частотами сигнала, тогда как нецентральное chirпирование предоставляет больше возможностей для контроля всей частотной области, что особенно полезно для управления фазой отдельных компонент.

Список литературы

1. Тенденции и перспективы развития волоконно-оптических систем передачи информации / В.А. Коньшев [и др.] // Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52, № 12. – С. 1102–1113.
2. Capacity limits of optical fiber networks / R.J. Essiambre [et al.] // *Journal of Lightwave technology*. – 2010. – Т. 28, no. 4. – P. 662–701.
3. Kikuchi, K. Phase-diversity homodyne detection of multilevel optical modulation with digital carrier phase estimation / K. Kikuchi // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2006. – Vol. 12, no. 4. – P. 563–570.
4. Choyon, A.K.M.S.J. Nonlinearity compensation and link margin analysis of 112-Gbps circular-polarization division multiplexed fiber optic communication system using a digital coherent receiver over 800-km SSMF link / A.K.M.S.J. Choyon, R. Chowdhury // *Journal of Optics*. – 2021. – Vol. 50, no. 3. – P. 512–521.
5. Шапиро, Е.Г. Управление спектром высокоскоростного канала с помощью нецентрального chirпирования сигнала / Е.Г. Шапиро, Д.А. Шапиро // Квантовая электроника. – 2024. – Т. 54, № 3. – С. 156–161.
6. Шапиро, Е.Г. Фазово-модулированный формат передачи данных с нецентральным chirпированием по высокоскоростной оптической линии связи без компенсации дисперсии / Е.Г. Шапиро, Д.А. Шапиро // Квантовая электроника. – 2023. – Т. 53, № 6. – С. 510–514.

References

1. Konyshev V. A. et al. Trends of and prospects for the development of fiber-optic communication systems. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2023, vol. 50, no. suppl 4, pp. S435-S450.
2. Essiambre R.J. et al. Capacity limits of optical fiber networks. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, vol. 28, no. 4, pp. 662-701.
3. Kikuchi K. Phase-diversity homodyne detection of multilevel optical modulation with digital carrier phase estimation. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, vol. 12, no. 4, pp. 563-570.
4. Choyon A.K.M.S.J., Chowdhury R. Nonlinearity compensation and link margin analysis of 112-Gbps circular-polarization division multiplexed fiber optic communication system using a digital coherent receiver over 800-km SSMF link. *Journal of Optics*, 2021, vol. 50, no. 3, pp. 512-521.

5. Shapiro E.G., Shapiro D.A. Control of a high-speed channel spectrum using an off-center signal chirp. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2024, vol. 51, no. suppl 6, pp. S458-S466.

6. Shapiro E.G., Shapiro D.A. Phase-modulated format of off-center chirped data transmission over a high-speed optical link without dispersion compensation. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2023, vol. 50, no. suppl 10, pp. S1156-S1162.

Сведения об авторах

About the authors

ШАПИРО Е.Г.

e-mail: elena.shap@gmail.com

E.G. SHAPIRO

e-mail: elena.shap@gmail.com

Старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Senior researcher, PhD in Physics and Mathematics, Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk

ШАПИРО Д.А.

e-mail: shapiro@iae.nsk.su

D.A. SHAPIRO

e-mail: shapiro@iae.nsk.su

Заведующий лабораторией фотоники, доктор физико-математических наук, профессор, Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Head of the Photonics Laboratory, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk

Финансирование. Работа поддержана Министерством высшего образования и науки РФ, тема FWNG-2024-0013.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценный.

Получена: 22.09.2024

Одобрена: 26.09.2024

Принята к публикации: 30.09.2024

Financing. The work was supported by the Ministry of Higher Education and Science of the Russian Federation, topic FWNG-2024-0013.

Conflict of Interest. The authors declare no conflict of interest.

The contribution of the authors is equal.

Received: 22/06/2024

Approved: 26/09/2024

Accepted for publication: 30/09/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Шапиро, Е.Г. Спектральный дизайн сигнала с кратным нецентральным чирпированием /
Е.Г. Шапиро, Д.А. Шапиро // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 3. – С. 75–84.

Please cite this article in English as: Shapiro E.G., Shapiro D.A. Spectral design of the signal
with multiple non-central chirping. *Applied photonics*, 2024, vol. 11, no. 3, pp. 75-84.