

---

УДК 621.391

Н.А. Штомпель

Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков

## ВЫБОР МЕТОДА МОДУЛЯЦИИ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

*Сформулирована оптимизационная задача, позволяющая формализовать задачу выбора определенного метода модуляции в зависимости от области применения волоконно-оптической телекоммуникационной системы со спектральным разделением каналов.*

**Ключевые слова:** модуляция, спектральная эффективность, волоконно-оптические телекоммуникационные системы, оптимизация.

### Введение

Современные телекоммуникационные сети строятся на основе принципов конвергенции, интеллектуализации и перехода на IP-технологии для предоставления пользователю набора услуг в рамках единой сети [1]. В свою очередь, тенденцией развития проводных телекоммуникационных сетей является выбор в качестве физической среды передачи сигналов – оптического волокна, обеспечивающего необходимую пропускную способность в условиях постоянного увеличения объема передава-

емой информации. С другой стороны, применение волоконно-оптических телекоммуникационных систем (ВОТС) со спектральным разделением каналов ограничивается сравнительно низкой эффективностью использования рабочего спектра оптического волокна для передачи информации. Для снятия данного ограничения современные ВОТС на транспортных сетях и сетях доступа используют различные методы модуляции и линейного кодирования.

**Постановка проблемы и анализ литературы.** Суммарная скорость передачи ВОТС со спектральным разделением каналов определяется по формуле:

$$V_{\Sigma} = NB, \quad (1)$$

где  $N$  – количество каналов в ВОТС;

$B$  – канальная скорость передачи.

Эффективность ВОТС с высокой суммарной скоростью передачи  $V_{\Sigma}$  зависит от эффективности использования рабочего спектра для передачи информации, так называемой спектральной эффективности

$$\gamma = B/\Delta f, \quad (2)$$

где  $\Delta f$  – расстояние между каналами в ВОТС.

Тогда, с учетом (1) и (2), при фиксированной ширине рабочего спектрального диапазона  $\Delta F$ , используемого для передачи информации, суммарную скорость передачи ВОТС представим как

$$V_{\Sigma} = \gamma \Delta F. \quad (3)$$

Из (3) следует, что увеличить суммарную скорость передачи  $V_{\Sigma}$  можно путем повышения спектральной эффективности  $\gamma$  ВОТС со спектральным разделением каналов при заданной средней вероятности ошибки  $p$ . Согласно (2) сделать это можно двумя способами: уменьшить расстояние между каналами  $\Delta f$  за счет использования более плотного спектрального разделения каналов или увеличить канальную скорость  $B$  путем применения различных методов модуляции оптического сигнала. Второй способ экономически более перспективен, так как увеличение  $B$  приводит к снижению стоимости единицы передаваемой информации [2].

Однако увеличение канальной скорости передачи  $B$  сопровождается ростом искажений передаваемых оптических сигналов. Например, искажения, вызываемые хроматической дисперсией, растут пропорционально квадрату канальной скорости  $B$ , а искажения из-за воздействия поляризационной модовой дисперсии и шумов передатчика и приемника в первом приближении пропорциональны первой степени канальной скорости  $B$ . Также при увеличении канальной скорости передачи  $B$  необходимо учитывать нелинейные эффекты, возникающие в оптическом волокне [2, 3].

Таким образом, разнообразие методов модуляции в современных ВОТС со спектральным разделением каналов обусловлено необходимостью повышения спектральной эффективности  $\gamma$  и снижения чувствительности оптических сигналов к искажениям из-за дисперсии и нелинейных эффектов. Следовательно, возникает актуальная задача выбора определенного метода модуляции в зависимости от области применения ВОТС – на транспортной сети или сети доступа.

**Целью статьи** является формулировка оптимизационной задачи, позволяющей формализовать задачу выбора определенного метода модуляции в

зависимости от области применения ВОТС со спектральным разделением каналов.

## Основная часть

По способу реализации модуляции передатчики ВОТС делятся на передатчики с прямой (непосредственной) и внешней модуляцией.

В оптических передатчиках с прямой модуляцией мощность излучения источника света модулируется внешним электрическим током питания. В качестве источников излучения в данных передатчиках применяются светоизлучающие диоды или лазеры с вертикальным резонатором при канальной скорости передачи  $B \leq 1$  Гбит/с, лазеры с резонатором Фабри-Перо – при  $B \leq 2,5$  Гбит/с, лазеры с распределенной обратной связью (РОС-лазеры) или лазеры с распределенными брэгговскими отражателями (РБО-лазеры) – при  $B < 10$  Гбит/с. Недостатками оптических передатчиков с прямой модуляцией является ограниченное количество поддерживаемых методов модуляции и наличие паразитной частотной модуляции (чирпинг-эффекта), приводящей к расширению спектра излучения и сокращению дальности передачи информации  $L$ .

Для устранения приведенных недостатков применяются оптические передатчики с внешней модуляцией, источниками излучения в которых являются непрерывные одномодовые РОС-лазеры и РБО-лазеры, а в качестве внешних модуляторов применяются электрооптические модуляторы или электроабсорбционные модуляторы. Данные оптические передатчики обеспечивают формирование оптического сигнала с минимальной шириной спектра, что позволяет обеспечить канальную скорость передачи  $B \geq 10$  Гбит/с и увеличить дальность передачи  $L$  [4].

В качестве несущего сигнала в передатчиках ВОТС используется непрерывная монохроматическая электромагнитная волна оптического диапазона частот

$$E(t) = pA \sin(\omega t + \varphi),$$

где  $p$ ,  $A$ ,  $\omega$ ,  $t$ ,  $\varphi$  – ориентация поляризации, амплитуда, частота, время наблюдения и фаза электромагнитной волны соответственно.

При модуляции определенный параметр сигнала  $E(t)$  изменяется в соответствии с цифровым информационным электрическим сигналом  $U(t)$ , в результате чего формируется модулированный оптический сигнал  $S(t)$ . Отличительной особенностью ВОТС по сравнению с другими телекоммуникационными системами является возможность применения большего количества методов модуляции: амплитудной (АМ), фазовой (ФМ), частотной (ЧМ) и поляризационной модуляций (ПМ).

Наиболее простым методом модуляции является разновидность АМ – модуляция интенсивности «включено-выключено», использующая два значения мощности оптического сигнала  $E(t)$ , соответствующих логическим единице или нулю информационного сигнала  $U(t)$ . Данный метод модуляции в основном применяется в передатчиках с прямой модуляцией. Применение методов АМ при постоянном росте количества передаваемой информации препятствует дальнейшему увеличению суммарной скорости передачи  $V_{\Sigma}$ , т.к. при прямой модуляции ограничена максимальная частота модуляции электрического сигнала  $U(t)$ .

Среди известных методов ФМ в настоящее время в ВОТС применяются только методы относительной фазовой модуляции (ОФМ), основанные на преобразовании полученного фазового сдвига в АМ-сигнал с использованием оптических линий задержки и интерференции. Использование методов ОФМ объясняется тем, что большинство современных оптических приемников реализуют прямой метод детектирования принимаемого оптического сигнала, т.к. когерентные приемники, учитывающие значение фазы принимаемого сигнала, обладают сравнительно высокой сложностью технической реализации и стоимостью. ОФМ можно реализовать как в передатчиках с прямой модуляцией, так и в передатчиках с внешней модуляцией, но в основном применяется последний вариант как более эффективный.

Методы ЧМ и ПМ обладают рядом преимуществ по сравнению с методами АМ и ФМ, однако не находят широкого применения в современных ВОТС в связи со сложностью их технической реализации. Преимуществом ЧМ является низкая восприимчивость модулированного сигнала  $S(t)$  к дисперсии и нелинейным эффектам, возникающим в оптическом волокне. Методы ПМ дополнительно характеризуются высокой устойчивостью к фазовым шумам лазера и нечувствительностью к флуктуациям поляризации. Методы ЧМ можно применять в передатчиках с прямой модуляцией, а методы ПМ – в передатчиках с внешней модуляцией.

Совместно с каждым из рассмотренных методов модуляции дополнительно применяются различные методы линейного кодирования для улучшения свойств передаваемого оптического сигнала  $S(t)$ . Примерами применяемых в ВОТС методов линейного кодирования являются код без возвращения к нулю, код с возвращением к нулю, усовершенствованные коды с возвращением к нулю и др. Примеры конкретных вариантов совместного использования методов модуляции и линейного кодирования представлены в [5].

Высокоскоростная двухуровневая модуляция любого вида характеризуется низкой спектральной эффективностью  $\gamma$ , поэтому для увеличения суммарной скорости передачи  $V_{\Sigma}$  целесообразно применять более сложные многоуровневые методы модуляции, например,  $M$ -уровневые АМ и ОФМ, амплитудно-фазовую (квадратурную) модуляцию и т.д. Методы многоуровневой модуляции также должны обладать низкой чувствительностью к искажениям оптического сигнала  $S(t)$  из-за дисперсии и нелинейных эффектов для обеспечения заданной дальности передачи  $L$  и канальной скорости передачи  $V$  [2, 5]. Для снижения средней вероятности ошибки  $p$  в высокоскоростных ВОТС со спектральным разделением каналов дополнительно могут применяться методы помехоустойчивого кодирования с уменьшенной вычислительной сложностью [6 – 8].

Из изложенного следует, что задача выбора метода модуляции в ВОТС существенно отличается от решения данной задачи в других телекоммуникационных системах из-за характера влияющих факторов на качество передаваемого оптического сигнала  $S(t)$ , особенностей технической реализации передатчиков и области применения ВОТС.

Задачу выбора метода модуляции в ВОТС со спектральным разделением каналов определим как оптимизационную задачу, формализованную следующим образом:

$$Q = F(p, B, \gamma, D, NE, \varepsilon, L, \Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Lambda, C), \quad (4)$$

где  $D$  – подверженность оптического сигнала  $S(t)$  дисперсии;

$NE$  – подверженность оптического сигнала  $S(t)$  нелинейным эффектам;

$\varepsilon$  – подверженность шумам оптического передатчика и приемника;

$\Phi_1$  – возможность реализации метода модуляции на основе передатчика с прямой модуляцией;

$\Phi_2$  – возможность реализации метода модуляции на основе передатчика с внешней модуляцией;

$\Phi_3$  – техническая сложность реализации оптического передатчика;

$\Lambda$  – число поддерживаемых методов линейного кодирования;

$C$  – стоимость оптического передатчика.

Основной задачей ВОТС транспортной сети является обеспечение максимальной суммарной скорости передачи  $V_{\Sigma}$  и дальности передачи  $L$ , поэтому оптимизационную задачу (4) представим в виде

$$Q_{TC} = F(\min(p, D, NE, \varepsilon, \Phi_3), \max(B, \gamma, L),$$

$$\Lambda \leq \Lambda_{\text{зад}}, C \leq C_{\text{зад}}, \Phi_2),$$

где  $C_{\text{зад}}$  – заданная стоимость оптического передатчика;

$\Lambda_{\text{зад}}$  – заданное число поддерживаемых методов линейного кодирования.

С другой стороны, при выборе метода модуляции для ВОТС сети доступа наиболее важной задачей является минимизация стоимости оборудования, поэтому (4) запишем как

$$Q_{\text{сд}} = F(\min(p, \Phi_3, \Lambda, C), B \leq B_{\text{зад}}, \gamma \leq \gamma_{\text{зад}}, D \leq D_{\text{зад}}, NE \leq NE_{\text{зад}}, \varepsilon \leq \varepsilon_{\text{зад}}, L \leq L_{\text{зад}}, \Phi_1),$$

где  $B_{\text{зад}}$  – заданная скорость передачи;

$\gamma_{\text{зад}}$  – заданная спектральная эффективность;

$D_{\text{зад}}$  – заданная стоимость оптического передатчика;

$NE_{\text{зад}}$  – заданное число поддерживаемых методов линейного кодирования;

$\varepsilon_{\text{зад}}$  – заданная величина подверженности шумам передатчика и приемника;

$L_{\text{зад}}$  – заданная дальность передачи.

## Выводы

1. Для повышения спектральной эффективности современных ВОТС со спектральным разделением каналов в основном применяются методы АМ и ФМ, а также многоуровневые методы модуляции на их основе.

2. Для формализации задачи выбора определенного метода модуляции в зависимости от области применения ВОТС со спектральным разделением каналов сформулирована соответствующая оптимизационная задача.

3. Перспективным направлением дальнейших исследований является построение имитационной модели ВОТС, позволяющей оценить эффективность различных комбинаций методов модуляции и

линейного кодирования, для использования результатов моделирования при решении поставленной оптимизационной задачи.

## Список литературы

1. Льченко М.Ю. *Сучасні телекомунікаційні системи [Текст] / М.Ю. Льченко, С.О. Кравчук. – К.: НВП «Видавництво «Наукова думка» НАН України», 2008. – 328 с.*
2. Величко М.А. *Новые форматы модуляции в оптических системах связи [Текст] / М.А. Величко, О.Е. Наний, А.А. Сусьян // Lightwave Russian Edition. – 2005. – №4. – С. 21-30.*
3. Листвин А.В. *Оптические волокна для линий связи [Текст] / А.В. Листвин, В.Н. Листвин, Д.В. Швырков. – М.: ВЭЛКОМ, 2002. – 187 с.*
4. Наний О.Е. *Оптические передатчики [Текст] / О.Е. Наний // Lightwave Russian Edition. – 2003. – №2. – С. 48-51.*
5. Winzer P.J. *Advanced optical modulation formats / Peter J. Winzer, Rene-Jean Essiambre // Optical fiber telecommunication V B: Systems and networks / edited by Ivan P. Kaminow, Tingye Li, Alan E. Willner. – Elsevier Inc., 2008. – P. 23-93.*
6. Kumar P.V. *Error-control coding techniques and applications / P. Vijay Kumar, Moe Z. Win, Hsiao-Feng Lu, Costas N. Georghiadis // Optical fiber telecommunication IV B: Systems and impairments / edited by Ivan P. Kaminow, Tingye Li. – Elsevier Science, 2002. – P. 902-964.*
7. Приходько С.И. *Фурье-преобразование сверточных кодов [Текст] / С.И. Приходько, Н.А. Штомпель // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2008. – №4. – С. 66-68.*
8. Приходько С.И. *Алгебраическое представление самоортогональных сверточных кодов в частотной области [Текст] / С.И. Приходько, А.С. Волков // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. – №3. – С. 67-69.*

Поступила в редколлегию 13.12.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.И. Приходько, Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков.

## ВИБІР МЕТОДУ МОДУЛЯЦІЇ У ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

М.А. Штомпель

*Сформульована оптимізаційна задача, що дозволяє формалізувати задачу вибору певного методу модуляції у залежності від галузі застосування волоконно-оптичної телекомунікаційної системи зі спектральним розділенням каналів.*

**Ключові слова:** модуляція, спектральна ефективність, волоконно-оптичні телекомунікаційні системи, оптимізація.

## CHOICE MODULATION METHOD IN FIBER-OPTIC TELECOMMUNICATION SYSTEMS

N.A. Shtompel

*Formulated an optimization problem allowing to formalize the task of selecting a particular modulation method depending on the application fiber-optic telecommunication system with wavelength division multiplexing.*

**Keywords:** modulation, spectral efficiency, fiber-optic telecommunication systems, optimization.