

УДК 681.326

*Д.Ю. Музалевский***ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕРИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ  
ИНТЕНСИВНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА**

*Обосновывается целесообразность использования характеристик интенсивности оптических сигналов на входе фотоприемного устройства в качестве контролируемых параметров при решении задачи идентификации состояния линейного тракта волоконно-оптических систем передачи с мультиплексированием по длине волны и волоконно-оптическими усилителями. Исследованы такие свойства, как эффективность и несмещенность оценки интенсивности оптических сигналов на входе фотоприемного устройства.*

**Ключевые слова:** контролируемые параметры, критерий оптимальности, волоконно-оптический линейный тракт, интенсивность оптического сигнала, факторы условий функционирования.

**Введение.** Разработка способов и устройств непрерывного контроля линейного тракта (ЛТ) волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) с мультиплексированием по длине волны (МДВ) и волоконно-оптическими усилителями (ВОУ) является актуальной научной задачей. Перспективным направлением решения такой задачи может стать применение средств параллельной обработки оптической информации [1]. Однако использование инновационных информационно-измерительных систем требует тщательного анализа вопросов измеримости [2] характеристик интенсивности оптического сигнала и обоснования эффективности использования этих контролируемых параметров для идентификации состояния ЛТ ВОСП с МДВ и ВОУ.

**Анализ факторов, определяющих условия функционирования ВОСП с МДВ и ВОУ.** Известно, что к контролируемым параметрам предъявляются требования по необходимой полноте представления изменений состояния объекта контроля. Пусть  $\tau_i$  – некоторый промежуток времени, за которое происходит переход спектрального канала (СК) из рабочего состояния –  $\Omega_1$  в состояние параметрического отказа –  $\Omega_2$ . В связи с этим выделяют две группы факторов условий функционирования линейного тракта ВОСП с МДВ и ВОУ.

К первой группе относятся факторы (необратимые), связанные с процессами старения (износа) элементов ВОСП ( $\tau_i > \Delta_{II}$ ), ко второй – факторы, вызывающие изменения (обратимые и необратимые) параметров линейного тракта

$n_{cr}(t)$  и  $n_{ur}(t)$  на входе фотоприемного устройства ( $\tau_i < \Delta_{II}$ ), где  $n_c(t)$  и  $n_u(t)$  – число фотонов, приходящихся соответственно на один сигнальный и шумовой информационный бит в  $r$  – м спектральном канале, а  $\Delta_{II}$  – интервал времени, через который производятся измерения.

Процессы первой группы отличаются определенным направлением изменения во времени, то есть являются необратимыми. Эти факторы являются причиной незначительного за период  $\Delta_{II}$  увеличения затухания, вносимого элементами СК, и плавного повышения уровня их фоновых шумов. Следовательно, на входе приемного оптического модуля (ПРОМ) процессы первой группы отражаются в соответствующих уменьшении интенсивности оптического излучения сигнала  $J_{cr}(t)$  (или  $n_{cr}(t)$ ) и увеличении интенсивности оптического шума  $J_{ur}(t)$  (или  $n_{ur}(t)$ ). Исследования [1, 3] показывают, что за промежуток времени  $\Delta_{II}$  изменения  $n_{cr}(t)$  и  $n_{ur}(t)$ , обусловленные процессами старения и износа компонентов главного оптического тракта (ГОТ), пренебрежимо малы по сравнению с их абсолютными значениями и практически полностью компенсируются в ходе регламентных работ.

Из проведенного анализа следует, что к процессам второй группы могут быть отнесены следующие факторы.

1. Колебания температуры, являющиеся причиной обратимых изменений центральной частоты и ширины линии источника оптического

излучения, тренда передаточных параметров оптических компонентов ГОТ, а также отклонения частот настройки мультиплексора / демультимплексора от номинальных значений. Данный фактор вызывает одновременные для всех каналов колебания  $n_{cr}(t)$  на входе ФПУ в соответствии со скоростью изменения температуры (разности температур). Характер изменения  $n_{ur}(t)$  в ВОЛТ с усилителями мало зависит от температуры [1], так как определяется в основном мощностью усиленной спонтанной эмиссии ВОУ.

2. Изгибы оптоволокна (ОВ) (обратимые и необратимые), возникшие в результате ошибок обслуживающего персонала или попыток НСД к ОК. Следствием этой ситуации является одновременное и одинаковое уменьшение  $n_{cr}(t)$  на выходе всех СКРС. При изгибе ОВ процесс изменения  $n_{cr}(t)$  на входе ФПУ, как правило, продолжается в течение 2–20 секунд [4]. Характер изменения  $n_{ur}(t)$  зависит от расположения точки изгиба ОВ относительно места включения последнего перед фотоприемником ВОУ.

3. Термофлуктуационный и коррозионный рост микротрещин. Скорость повышения длин микротрещин на первом этапе, до критического значения  $K_{кр1}$ , пропорциональна величине приложенного к ОВ механического напряжения и индивидуальна для каждого ГОТ. Микротрещины повышают затухание ГОТ аналогично для всех СК, то есть способствуют уменьшению  $n_{cr}(t)$  [5, 6].

4. Радиационные замутнения ОВ, вызванные воздействием поражающих факторов ядерного оружия или ударами атмосферного электричества. По этой причине происходит снижение  $n_{cr}(t)$  и  $n_{ur}(t)$  по экспоненциальному закону на выходе всех СК за промежуток времени от 0,1 до 4 с, зависящий от типа и способа прокладки оптического кабеля (ОК); мощности дестабилизирующего фактора (ДФ) и его удаления от ОК [7].

5. Перераспределение мощности между СК, обусловленное вынужденным комбинационным рассеиванием (ВКР). Явления, связанные с ВКР, выражаются в соизмеримом уменьшении  $n_{cr}(t)$  и  $n_{ur}(t)$  в коротковолновых СК и соответствующем увеличении  $n_{ch}(t)$  и  $n_{uh}(t)$  в длинноволновых СК ( $\lambda_h > \lambda_r$ ), где  $r, h = 1, \dots, R$ , номера СК. Процесс может принять лавинообразный характер, достигая максимума за период порядка 100 мс после превышения некоторой пороговой мощности  $P_{порВКР}$  [8].

6. Тренд коэффициента усиления ВОУ при

изменении интенсивности оптического сигнала  $n_{cr}(t)$  на одном из его входов вследствие сбоев, аномалий ИОИ или ошибок обслуживающего персонала при установке уровня на передачу одного из СК. Указанные факторы обуславливают изменение коэффициента усиления  $G_{mr}(t)$  и могут нарушить диаграмму уровней всего ГОТ. Время процессов перераспределения зависит от числа СК, значений  $n_{cr}(t)$ , количества  $M$  последовательно включенных ВОУ, расстояний между ними и сопоставимо с величиной 10-100 мс [8, 9].

Таким образом, флуктуации  $J_{cr}(t)$  и  $J_{ur}(t)$  являются причиной медленных замираний энергетических параметров на выходе СК. То есть состояние элементов ГОТ определяется факторами, воздействие которых можно считать постоянными в течение длительности бита  $T$ .

Для предотвращения опасных последствий выделенных факторов второй группы на параметры ГОТ накладываются следующие ограничения [10]:

1) на максимум оптической мощности на выходе передающего оптического модуля (ПОМ), которая не должна превысить порога ВКР:  $P_{lr}(t) < P_{lr}^+$ . Данное условие определяет физическую возможность организации МДВ, поэтому признаковое пространство СКРС является строго ограниченным сверху;

2) на величину оптической мощности на выходе ПОМ, устанавливаемое для обеспечения ОСШ не ниже заданного, то есть  $P_{lr}(t) \geq P_{lr}^-$ ;

3) на разность оптических мощностей ПОМ  $\Delta P_{lrh}(t) \leq \varepsilon$ ,  $r \neq h$ ,  $\varepsilon > 0$ ,  $\varepsilon \rightarrow 0$  различных СК одного ОВ.

Условия 2 и 3 могут быть использованы в виде ограничений при решении задач оптимизации параметров достоверности передачи в различных СК.

Здесь следует отметить, что использование ВОУ накладывает дополнительные ограничения на величину коэффициента усиления  $G_{mr}(t)$ , где  $m = 1, \dots, M$ , количество ВОУ:

$$G_m^-(t) \leq G_{mr}(t) \leq G_m^+(t). \quad (1)$$

Чрезмерное усиление может привести к тому, что мощность усиленного сигнала превысит порог ВКР или приведет к перегрузке ФПУ. Слабое же усиление не в состоянии компенсировать затухание, внесенное предыдущей УС, что ухудшает показатели достоверности передачи.

Таким образом, необходимым условием безотказного функционирования ВОЛТ является выполнение обоснованных выше ограничений на

энергетические параметры ПОМ и ВОУ. Для обеспечения адекватности задачам контроля, сформулированные выше ограничения должны быть выражены через соответствующие управляемые параметры – значения токов накачки  $r$  – го ИОИ  $I_{ur}$  и  $m$  – го ВОУ  $I_{ym}$ , то есть могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned} 1) & I_{ur}^- \leq I_{ur}(t) \leq I_{ur}^+; \\ 2) & \Delta I_{urh}(t) \leq \varepsilon, r \neq h; \\ 3) & I_{ym}^- \leq I_{ym}(t) \leq I_{ym}^+. \end{aligned} \quad (2)$$

Заметим, что при условии выполнения указанных ограничений величина  $n_{ur}(t)$  на входе ФПУ будет определяться в основном мощностью усиленного спонтанного излучения (УСИ) ВОУ и мало отклоняться от величины, обусловленной значением  $G_{mr}(t)$ . Тогда из анализа факторов условий функционирования следует, что параметрический отказ СК при фиксированном значении  $G_{mr}$  может наступить при снижении  $n_{ch}(t)$  ниже некоторого значения  $n_{cr}^-$  для требуемого уровня достоверности передачи. Кроме того, на основании величины

$$\Delta n_{cr}(t) = n_{cr}(t) - n_{cr}^- \quad (3)$$

можно судить о надежности связи в данном СК, так как она соответствует параметру  $\Delta P_{зр}$  имеющего смысл некоторого запаса тракта по достоверности. Время до параметрического отказа такого СК можно определить при условии идентификации факта снижения параметра  $\Delta n_{cr}(t)$  в результате того или иного фактора и оценки скорости протекания процесса  $dn_{cr}/dt$ .

Таким образом, энергетические параметры принимаемого сигнала ( $n_{cr}(t)$  и  $n_{ur}(t)$ ) на входе ФПУ отвечают требованиям необходимой полноты отображения изменений состояния СКРС и могут использоваться как контролируемые параметры в системе прогнозирования состояния линейного тракта ВОСП с МДВ и ВОУ.

**Исследование измеримости параметров интенсивности оптического сигнала существующими устройствами контроля.** Для проверки измеримости выделенной совокупности определяющих параметров ниже рассматривается процесс оценки некоторого параметра  $\gamma$  интенсивности контрольного оптического сигнала в отдельном СК. Оценка производится при допущении идеальности синхронизации и наличии фоновых шумов. Определение  $\gamma$  осуществляется по наблюдаемому в течение одного бита  $T$  век-

тору  $\bar{n} = (n_1, \dots, n_j)$  отсчетов фотоэлектронов. Время отсчета  $\tau_u = T/j$  [11].

Устройства оценки могут использовать различные критерии оптимальности. Так, например, критерий максимума апостериорной вероятности подразумевает нахождение максимума плотности вероятностей  $\varpi(\theta|\bar{n})$ , и оценка параметра интенсивности оптического сигнала может иметь вид:

$$\hat{\gamma} = \max[\log p(\bar{n}|\gamma) + \log \varpi(\gamma)]. \quad (4)$$

Число фотоэлектронов  $\bar{n}$  на выходе ФПУ является пуассоновской случайной величиной, следовательно:

$$\begin{aligned} p(\bar{n}|\gamma) &= \prod_{k=1}^j p(n_k, \gamma) = \\ &= \prod_{k=1}^j \frac{(\varphi_k(\gamma) + \varphi_{ш})^{n_k}}{n_k!} \exp\{-(\varphi_k(\gamma) + \varphi_{ш})\}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\varphi_u = TJ_{шu}/j$  – интенсивность шума за интервал  $\tau_u$ , а  $\varphi_k(\gamma) = \int_{t_k - \tau_u}^{t_k} J_{n_k}(t, \gamma) dt$ .

Искажение характеристик детерминированной интенсивности импульса сигнала можно представить в виде  $J_{nc}(t, \gamma) = \gamma J_{nc}$ ,  $t \leq T$ . Если  $\gamma$  имеет, например, экспоненциальную [1] плотность вероятности  $\varpi(\gamma) = (1/2\sigma_\gamma^2) \exp(-\gamma/2\sigma_\gamma^2)$ , то производная логарифма плотности вероятности существует и равна  $(-1/2\sigma_\gamma^2)$ . Производная от (4) с учетом (5) принимает вид:

$$-\frac{1}{2\sigma_\gamma^2} + \frac{J_{n1}\tau}{\hat{\gamma}J_{n1}\tau + J_{шu}\tau} \cdot \sum_{k=1}^j n_k - J_{n1}T = 0. \quad (6)$$

Решением данного уравнения по  $\hat{\gamma}$  с учетом  $n_c = J_{n1}T$ ,  $n_{ш} = J_{шu}T$  является:

$$\hat{\gamma} = \left( \frac{1}{n_c + 1/2\sigma_\gamma^2} \right) \cdot \sum_{k=1}^j n_k - \frac{n_{ш}}{n_c}. \quad (7)$$

Из выражения видно, что устройство оценки, оптимальное по критерию максимума апостериорной вероятности, как и ФПУ, суммирует энергию оптического сигнала на интервале  $(0, T)$  и осуществляет вычисления по (7).

Оптимальность получаемых оценок будем рассматривать исходя из их несмещенности и возможности достижения границы Крамера–Рао [3, 12].

Среднее значение оценки по наблюдаемому вектору  $\bar{n}$  можно вычислить по формуле:

$$M(\hat{\gamma}) = \left\{ M \left[ \frac{\sum n_k}{n_c + 1/2\sigma_\gamma^2} \right] - \frac{n_u}{n_c} \right\} = \quad (8)$$

$$= \frac{M(\gamma)n_c + n_u}{n_c + 1/2\sigma_\gamma^2} - \frac{n_u}{n_c}.$$

Из выражения (8) следует, что оценка  $\hat{\gamma}$  в общем случае не является несмещенной. Оценка приближается к несмещенной при условии  $n_c \gg 1/2\sigma_\gamma^2$ , что эквивалентно увеличению времени наблюдения ( $\tau_n \gg T$ ).

Дисперсия оценки  $\hat{\gamma}$  будет определяться выражением

$$D(\hat{\gamma}) = \frac{M(\gamma)n_c + n_u}{(n_c + 1/2\sigma_\gamma^2)^2} = \frac{2\sigma_\gamma^2 n_c + n_u}{(n_c + 1/2\sigma_\gamma^2)^2}. \quad (9)$$

Граница Крамера–Рао для рассматриваемого устройства оценки составит

$$D_{KR} = \left[ M \left( -\frac{\partial^2 \log \varpi(\gamma)}{\partial \gamma^2} + \sum_k \frac{\varphi'_k(\gamma)}{\varphi_k(\gamma) + n_u} \right) \right]^{-1} \approx \quad (10)$$

$$\approx 2\sigma_\gamma^2 / n_c.$$

Заметим, что с увеличением времени наблюдения  $\tau_n$ , что эквивалентно увеличению  $n_c$ , дисперсия оценки  $\hat{\gamma}$  стремится к выражению

$$D_n(\hat{\gamma}) \approx 2\sigma_\gamma^2 / n_c. \quad (11)$$

Следовательно, дисперсия такой оценки прямо пропорциональна величине априорной «неопределенности» интенсивности и с ростом  $n_c$  стремится к границе Крамера–Рао. То есть способность оценивать интенсивность оптического поля может быть улучшена обработкой максимально возможной энергии сигнала, а сама оценка по (7) является асимптотически эффективной.

Если устройство оценки функционирует по критерию условного среднего, минимизируя среднеквадратическое отклонение  $M\left((\theta - \hat{\theta})^2\right)$ , то для сигнала с пассивной паузой алгоритм оценки параметра интенсивности оптического поля примет вид [11]:

$$\hat{\gamma} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \gamma (J_{nc}\tau + n_u)^n \exp(-\gamma n_c) \varpi(\gamma) d\gamma}{\int_{-\infty}^{\infty} (J_{nc}\tau + n_u)^n \exp(-\gamma n_c) \varpi(\gamma) d\gamma}. \quad (12)$$

Из выражения следует, что оценка  $\hat{\gamma}$  также зависит от общего количества принятых фотоэлектронов  $\tau_n n_c$  за интервал наблюдения и пол-

ной энергии  $n_c = J_{nl}T$ .

**Выводы.** На основе вышеизложенного и с учетом результатов исследований [1, 2, 11, 13] можно сделать вывод о том, что при наблюдении оптических сигналов с пассивной паузой, вне зависимости от закона распределения  $\varpi(\gamma)$ , точность оценки будет определяться количеством принятых фотоэлектронов  $n_k(t)$  в течение бита и временем наблюдения  $\tau_n$ . Так как число фотонов на входе ФПУ пропорционально числу фотоэлектронов на его выходе, аналогично можно утверждать, что при использовании средств голографической обработки сигналов в режиме счета фотонов точность оценки имеет аналогичную зависимость от числа принятых фотонов и времени наблюдения.

### Библиографический список

1. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Компания Сайрус Системс, 1999. – 671 с.
2. Музалевский Д.Ю., Саитов С.И. Использование методов голографии и Фурье-оптики для организации непрерывного контроля волоконно-оптических линейных трактов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2008. – № 4. – С. 24–26.
3. Гальярди Р.М., Карп Ш. Оптическая связь. – М.: Связь, 1978. – 424 с.
4. Свинцов А.Г. ВОСП и защита информации // Фотон-экспресс. – 2000. – № 2. – С. 32–37.
5. Мальке Г., Гессинг П. Волоконно-оптические кабели. Основы. Проектирование кабелей. Планирование систем: пер. с нем. – Новосибирск: Издатель, 2001. – 345 с.
6. Шарле Д.Л. Оптические кабели российского производства // Вестник связи. – 2000. – № 9. – С. 68–77.
7. Портнов Э.Л. Оптические кабели связи и пассивные компоненты волоконно-оптических линий связи. – Горячая линия – Телеком, 2007. – 464 с.
8. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика – М.: Мир, 1996. – 234 с.
9. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. – М.: ЭкоТрендз, 1998. – 272 с.
10. Скляр О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи. – М.: СОЛОН-пресс, 2004. – 255 с.
11. Коржик В.И. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений: справочник. – М.: Радио и связь, 1981. – 232 с.
12. Боровков А.А. Математическая статистика. – М.: Наука, 1984. – 345 с.
13. Парыгин В.Н., Балакиев В.И. Оптическая обработка информации. – М.: Изд. МГУ, 1987. – 141 с.