

ОИПИ НАН БЕЛАРУСИ

Государственное научное учреждение  
«Объединенный институт проблем информатики  
Национальной академии наук Беларуси»



## О ЗАЩИТЕ ИНФОРМАЦИИ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ



ОИПИ



Одним из методов полной защиты информации от НСД при ее распространении в ВОЛС являются метод, основанный на использовании лазера, генерирующего импульсы оптического излучения, при этом в пределах каждого импульса должен содержаться только один фотон, находящийся в состоянии линейной или круговой поляризации.

Самый простой и действенный способ защиты информации при ее утечке из ВОЛС – снижение мощности модулированного сигнала. Поскольку оптическое волокно изготовлено из кварцевого стекла, то в качестве носителя информации необходимо использовать излучение полупроводникового лазера или лазерного диода в инфракрасной области на длинах волн 0,85 мкм, 1,3 мкм и 1,55 мкм. Эти длины волн являются окнами прозрачности кварцевого стекла.

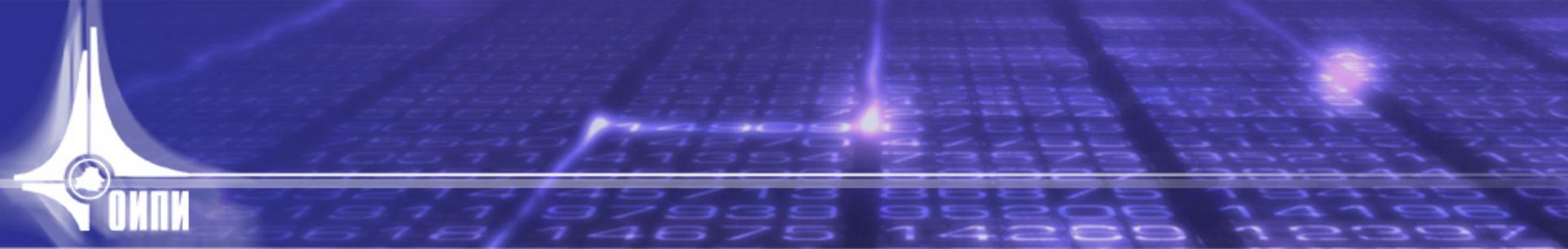
Для передачи информативного сигнала в ВОЛС на большие расстояния используется одномодовое излучение полупроводникового лазера или лазерного диода, которое обладает минимальным затуханием на вышеуказанных длинах волн. Излучение является импульсным.



Оптическое излучение	Статистика	
	Пуассон	Бозе-Эйнштейн
Одномодовое	+	
Многомодовое		+

Для обнаружения слабого модулированного оптического излучения используется метод счета фотонов, который является одним из наиболее чувствительных методов регистрации слабого оптического излучения.

Слабый оптический сигнал на выходе фотоприемника представляет собой последовательность флуктуирующих по амплитуде «одноэлектронных» импульсов, статистическое распределение которых в плоскости чувствительного слоя фотоприемника также подчиняется распределению Пуассона.



При обнаружении информативных сигналов на фоне шумов применяют критерий Неймана-Пирсона. Согласно критерию Неймана-Пирсона фотоприемник является оптимальным в том случае, если при заданной вероятности ложной тревоги, он обеспечивает максимальную вероятность обнаружения информационного сигнала. Для обнаружения слабого модулированного оптического излучения необходимо использовать фотоприемник, работающий в режиме счета фотонов с последующим накоплением. В этом случае критерий Неймана-Пирсона соответствует условию, когда число отсчетов фиксировано. Для обнаружителя Неймана-Пирсона необходимо найти пороговое значение среднего числа фотонов регистрируемых фотоприемником. Порог обнаружения (регистрации) выбирается, исходя из максимально допустимой вероятности ложной тревоги при данном среднем числе фотоэлектронов шума усилителя фотоприемника.



	Высокоимпедансный усилитель (преобладают дробовые шумы с пуассоновской статистикой)	Трансимпедансный усилитель (преобладают тепловые шумы с гауссовской статистикой)
$f \leq 100$ кГц	+	
$f > 100$ кГц		+
$C \leq 500$ Мбит/с	+	
$C > 500$ Мбит/с		+

Полная защита информативных сигналов достигается только в том случае, когда  $P_0 \leq 0,3$ .



Для анализа аналоговых сигналов следует использовать аналоговые фотоприемники.

В том случае, когда статистики сигнальных фотоэлектронов и шумовых электронов являются пуассоновскими, то вероятность обнаружения и порог обнаружения определяются следующим образом:

$$P_0 = \Phi \left[ \sqrt{\frac{N \cdot \bar{s}_c}{S+1}} - \frac{1}{\sqrt{S+1}} \cdot \Phi^{-1}(1 - P_{лт}) \right], \quad (1)$$

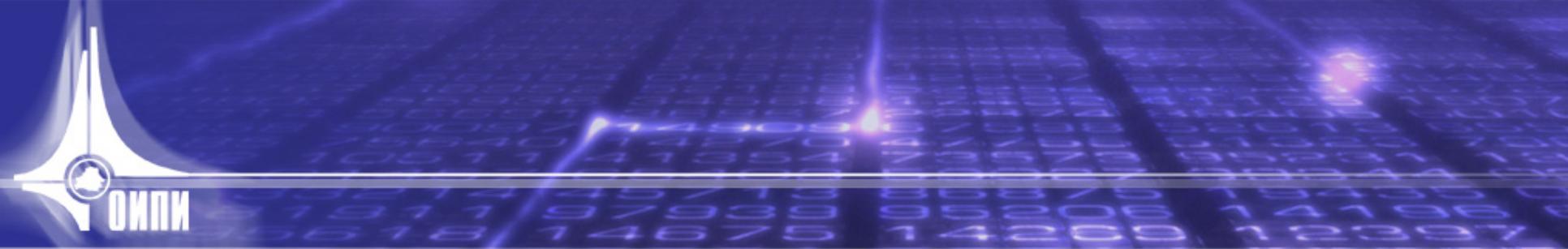
$$n_0 = E \left[ N \cdot \bar{s}_ш + \sqrt{N \cdot \bar{s}_ш} \cdot \Phi^{-1}(1 - P_{лт}) \right], \quad (2)$$

где  $N$  – число фотоотсчетов,

$\bar{s}_c = \bar{I}_c \cdot T$  – среднее число сигнальных фотоэлектронов за время измерения  $T$ ,

$\bar{s}_ш = \bar{I}_ш \cdot T$  – среднее число шумовых электронов за время измерения  $T$ ,

$\bar{I}_c$  – средняя интенсивность потока сигнальных фотоэлектронов за время измерения  $T$ ,



$\bar{I}_{\text{ш}}$  – средняя интенсивность потока шумовых электронов за время измерения  $T$ ,

$S = \frac{\bar{s}_c}{\bar{s}_{\text{ш}}}$  – отношение сигнал/шум,

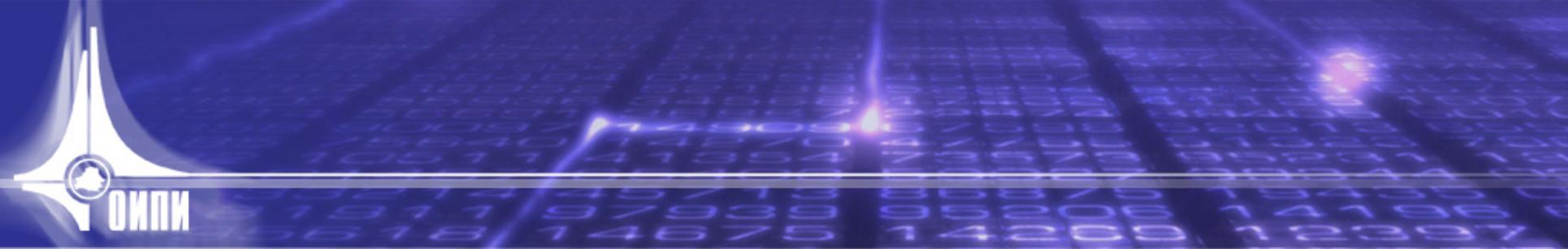
$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$  – интеграл вероятности,

$\Phi^{-1}(t)$  – функция, обратная интегралу вероятности, удовлетворяющая соотношению

$$\Phi^{-1}[\Phi(t)] = t,$$

$E(y)$  – целая часть от  $y$ .

В том же случае, когда статистика сигнальных фотоэлектронов является пуассоновской, а статистика шумовых электронов – гауссовской, то вероятность обнаружения и порог обнаружения определяются следующим образом:



$$P_0 = \Phi \left[ \frac{S \cdot \sqrt{N \cdot \frac{\overline{s_c}}{S + \overline{s_c}}} + \Phi^{-1}(1 - P_{\text{лт}})}{\sqrt{\frac{S^2}{S + \overline{s_c}} + \frac{2 \cdot S \cdot \overline{s_c}}{S + \overline{s_c}} + 1}} \right], \quad (3)$$

$$n_0 = 2 \cdot N \cdot \overline{s_{\text{ш}}} + \sqrt{N \cdot \overline{s_{\text{ш}}} \cdot (\overline{s_{\text{ш}}} + 1)} \cdot \Phi^{-1}(1 - P_{\text{лт}}). \quad (4)$$

Для анализа цифровых информативных сигналов следует использовать цифровые фотоприемники, в которых используются устройства бинарного квантования.

В том случае, когда статистика сигнальных фотоэлектронов является пуассоновской, а статистика шумовых электронов – гауссовской, то вероятность обнаружения и вероятность ложной тревоги определяются следующим образом:

$$P_0 = B_{p_c}(k_0, N - k_0 + 1), \quad (5)$$

$$P_{\text{лт}} = B_{p_{\text{ш}}}(k_0, N - k_0 + 1), \quad (6)$$



$$p_c = \sum_{n=n_0}^{+\infty} \left( \frac{S}{S + \bar{s}_c} \right) \cdot \left( \frac{\bar{s}_c}{S + \bar{s}_c} \right)^n \cdot \exp \left( -\frac{S \cdot \bar{s}_c}{S + \bar{s}_c} \right) \cdot L_n \left[ -\frac{S^2}{S + \bar{s}_c} \right], \quad (7)$$

$$p_{III} = \sum_{n=n_0}^{+\infty} \left( \frac{1}{\bar{s}_{III} + 1} \right) \cdot \left( \frac{\bar{s}_{III}}{\bar{s}_{III} + 1} \right)^n = \left( \frac{\bar{s}_{III}}{\bar{s}_{III} + 1} \right)^{n_0}, \quad (8)$$

$$B_x(a, c) = \int_0^x \frac{\Gamma(a + c)}{\Gamma(a) \cdot \Gamma(c)} \cdot x^{a-1} \cdot (1 - x)^{c-1} dx \quad (9)$$

где  $N$  – число фотоотсчетов,

$k_0 = E(y)$  – пороговое значение уровня ограничения,  $k_0 = [1, N]$ ,  
 $y = f(n_0, \bar{s}_c, \bar{s}_{III})$ ,

$n_0$  – порог обнаружения,



$B_x(a, c)$  – неполная бета-функция (табулирована),

$p_c$  – вероятность превышения уровня ограничения в случае, когда присутствует сигнал и шум,

$p_{ш}$  – вероятность превышения уровня ограничения в случае, когда присутствует только шум,

$L_n(z)$  – полиномы Лагерра,

$\Gamma(a)$  – гамма-функция.

При больших  $N$  вероятность обнаружения и вероятность ложной тревоги определяются следующим образом:

$$P_0 \approx 1 - \Phi \left[ \frac{k_0 - N \cdot p_c}{\sqrt{N \cdot p_c \cdot (1 - p_c)}} \right], \quad (10)$$

$$P_{лт} \approx 1 - \Phi \left[ \frac{k_0 - N \cdot p_{ш}}{\sqrt{N \cdot p_{ш} \cdot (1 - p_{ш})}} \right], \quad (11)$$



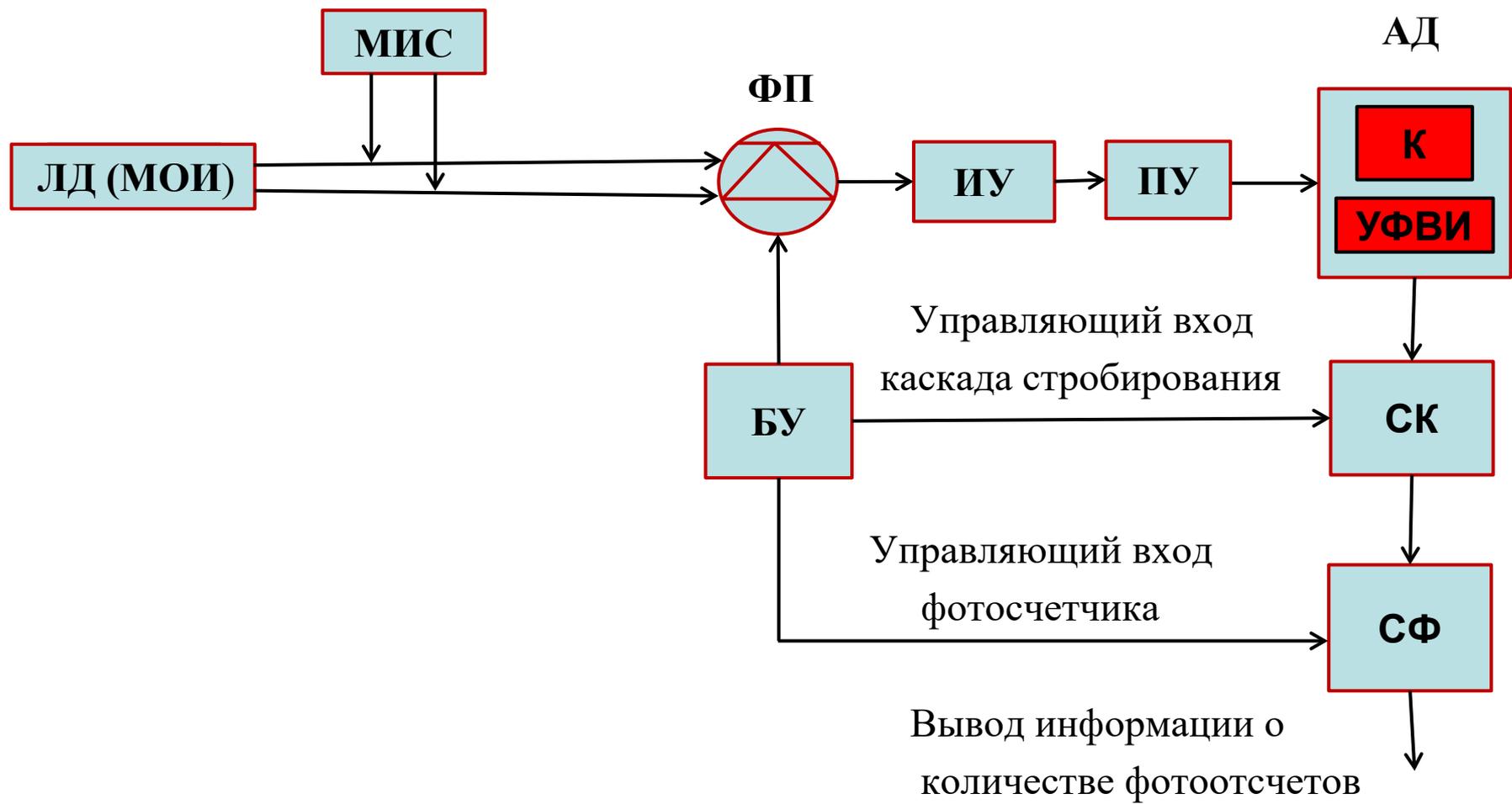
Наименьшая вероятность ложной тревоги  $P_{ЛТ}$  достигается в том случае, когда  $k_0 = N$ . При малых отношениях сигнал/шум вероятность обнаружения и порог обнаружения определяются следующим образом:

$$P_0 = \{1 - [A + S \cdot [A \cdot (1 - B) - n_0 \cdot B(1 - A)]] \cdot \exp[-(1 - B) \cdot S]\}^N, \quad (12)$$

$$A = 1 - P_{ЛТ}^{1/N}, \quad (13)$$

$$B = 1 - P_{ЛТ}^{1/N \cdot n_0}, \quad (14)$$

$$n_0 = \frac{\ln P_{ЛТ}}{N \cdot \ln\left(\frac{S_{Ш}}{S_{Ш} + 1}\right)}. \quad (15)$$





ЛД – лазерный диод (моделируемое оптическое излучение)

МИС – модулирующий информативный сигнал

ФП – фотоприемник (лавинный фотодиод)

ИУ – импульсный усилитель

ПУ – пороговое устройство

АД – амплитудный дискриминатор

К – компаратор

УФВИ – устройство формирования выходного импульса

СК – стробируемый каскад

БУ – блок управления

СФ – счетчик фотонов



Амплитудный дискриминатор - устройство, автоматически выделяющее электрические сигналы, амплитуда которых превышает пороговое значение. Амплитудные дискриминаторы применяют для выделения полезного сигнала из шумов.

Компаратор срабатывает, когда напряжение или ток превышает пороговое значение. Вероятность ложной тревоги может быть определена следующим образом:

$$P_{лт} = [1 - \exp(-\overline{s_{ш.след.}})] \cdot [1 - \exp(-\overline{s_{ш.строб.}})], \quad (16)$$

где  $\overline{s_{ш.след.}} = \overline{I_{1ш}} \cdot T_{след.}$  - среднее число шумовых электронов, генерируемых за период следования импульсов оптического излучения

$T_{след.}$ ,

$\overline{s_{ш.строб.}} = \overline{I_{2ш}} \cdot \tau_{строб.}$  - среднее число шумовых электронов, генерируемых за длительность импульса стробирования  $\tau_{строб.}$



$\overline{I_{1ш}}$  – средняя интенсивность потока шумовых электронов, генерируемых за период следования импульсов оптического излучения  $T_{след.}$ ,

$\overline{I_{2ш}}$  – средняя интенсивность потока шумовых электронов, генерируемых за длительность импульса стробирования  $\tau_{строб.}$

$$\tau_{строб.имп.} \geq \tau_{опт.имп.}$$

Из формулы (16) видно, что для снижения вероятности ложных тревог следует генерировать оптические импульсы наносекундной и пикосекундной длительности.



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !**