

Измерение малых и сверхмалых мощностей оптического излучения инфракрасного диапазона.

В технике волоконно-оптической связи часто ставится задача измерения малых уровней оптического излучения: измерение затухания волоконных световодов (ВС) по шлейфу, измерение потерь на отражение при тестировании коннекторов, измерение помех от взаимных влияний ВС и др. При этом возникает задача разработки устройств для измерения сверхмалых оптических сигналов, так как существующие ваттметры и тестеры не всегда обеспечивают необходимую чувствительность.

В связи с тем, что требуемые параметры измерительных приборов в данной задаче находятся на уровне теоретических пределов, проанализируем дрейфовые и шумовые характеристики входного каскада (ВК) ваттметра, определяющие нижний предел измерения. Упрощенная схема ВК, применяемая в большинстве существующих ваттметров, изображена на рис.1,а.

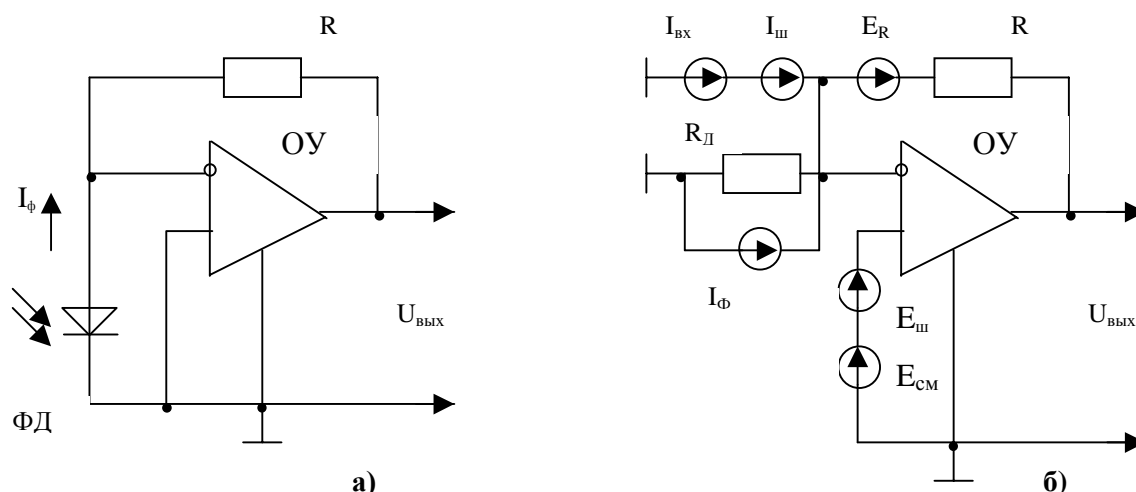


Рис. 1

ВК построен по трансимпедансной схеме на операционном усилителе (ОУ). Для устранения темнового тока фотодиод (ФД) работает без смещения в фотовольтаическом режиме, что обеспечивает наилучшие метрологические характеристики [1]. Эквивалентная схема ВК для анализа погрешности преобразования малых величин фототока I_ϕ в выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ приведена на рис. 1, б. В этой схеме : $R_\text{Д}$ – дифференциальное сопротивление фотодиода (сопротивление p-n перехода переменному току при нулевом смещении); $E_\text{см}$ - напряжение смещения ОУ; $E_\text{ш}$ – шумовая Э.Д.С. ОУ (среднеквадратическое значение); $I_\text{ВХ}$ – входной ток ОУ; $I_\text{ш}$ – шумовой ток ОУ; E_R – шумовая Э.Д.С. резистора R. Согласно анализу влиянием $I_\text{ш}$ и E_R на погрешность преобразования можно пренебречь [2]. $E_\text{см}$ и $I_\text{ВХ}$ приводят к систематической погрешности, которая устраняется при начальной настройке, а также при периодической установке нуля прибора. Таким образом, основными источниками погрешности измерения являются $E_\text{ш}$, $\Delta E_\text{см}$ и $\Delta I_\text{ВХ}$, где $\Delta E_\text{см}$ и $\Delta I_\text{ВХ}$ – температурный дрейф соответственно напряжения смещения и входного тока ОУ.

Для приведенной эквивалентной схемы ВК среднеквадратическое отклонение выходного напряжения:

$$\Delta U_{\text{ВХ}} \approx \pm \sqrt{(\Delta I_{\text{ВХ}} R)^2 + (\Delta E_{\text{см}}^2 + E_{\text{ш}}^2) R^2 / R_\text{Д}^2} . \quad (1)$$

Выражение (1) получено с учетом того, что коэффициент усиления ОУ для $E_{ш}$ и $E_{см}$ равен R/R_d . Известно, что $R_d = 1/\lambda I_T$,

где λ - для p-n перехода имеет значение 30...35 1/В;
 I_T – темновой ток фотодиода.

$$\Delta U_{\text{вых}} \approx \pm R \sqrt{\Delta I_{\text{вх}}^2 + 10^3 (\Delta E_{\text{см}}^2 + E_{ш}^2) I_{\text{ф}}^2}. \quad (2)$$

Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ прямо пропорционально измеряемой входной мощности оптического излучения P .

$$U_{\text{вых}} = PSR, \quad (3)$$

где S – коэффициент передачи ФД, А/Вт.

На основании (2) и (3) можно определить минимальную мощность $P_{\text{мин}}$, которая может быть зарегистрирована с необходимой погрешностью $\delta = \pm (\Delta U_{\text{вых}}/U_{\text{вых}})$. Примем модуль предельной погрешности измерения $|\delta| = 0,25$, что соответствует $|\delta| = 1$ дБ. Тогда:

$$P_{\text{мин}} \approx 4/S \sqrt{\Delta I_{\text{вх}}^2 + 10^3 (\Delta E_{\text{см}}^2 + E_{ш}^2) I_T^2}. \quad (4)$$

Это выражение для пороговой мощности получено впервые и позволяет анализировать влияние параметров ОУ и ФД на нижний предел измерения.

В современных оптических ваттметрах используются сверхпрецизионные ОУ: AD705, OP97 и др., у которых $|\Delta I_{\text{вх}}| \leq 10^{-11}$ А и $|\Delta E_{\text{см}}| \leq 3 \cdot 10^{-6}$ В (здесь и далее дрейфовые параметры приводятся при изменении температуры окружающей среды в пределах ± 10 °С). Спектральная плотность шумовой Э.Д.С. в инфранизкочастотном диапазоне (< 10 Гц) равна в среднем $S_{ш} \approx 10^{-6}$ В/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Полагая, что полоса частот фотоприемного тракта ваттметра равна примерно 1 Гц (время измерения около 1 с.), получим $E_{ш} \approx 10^{-6}$ В. С учетом этого, а также того, что $S \approx 0,8$ А/Вт (для ФД со структурой InGaAs в оптическом диапазоне 1,3 ... 1,6 мкм).

$$P_{\text{мин}} \approx 5 \sqrt{10^{-22} + 10^{-8} I_T^2} \quad (5)$$

В ваттметрах используются ФД с достаточно большой активной площадкой с тем, чтобы уменьшить потери при вводе излучения. Здесь приходится искать компромисс, так как с увеличением активной площадки ФД растет темновой ток фотодиода. В зависимости от диаметра активной площадки, температуры окружающей среды и технологии изготовления ФД, величина темнового тока может находиться в пределах от единиц до сотен наноампер. Это приводит к тому, что $P_{\text{мин}}$ равна -60 ... -75 дБм. Отсюда видно сильное влияние темнового тока ФД на нижний предел измерения мощности даже в фотовольтаическом режиме работы ФД, что необходимо учитывать разработчикам измерительной аппаратуры.

Влияние внутреннего динамического сопротивления ФД на погрешность измерения можно несколько уменьшить, применив в ВК суперпрецизионный ОУ типа АД8551 с внутренней компенсацией дрейфа и остаточным дрейфом $\Delta E_{\text{см}} < 5$ нВ/°С. Однако большое значение спектральной плотности шума (> 1 мкВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$) в инфранизкочастотном спектре не позволяет существенно снизить $P_{\text{мин}}$. Тем не менее, применение данного ОУ оправдано в ваттметрах, в которых отсутствует периодическая калибровка (запоминание $\Delta U_{\text{вых}}$ при затемненном ФД с последующим вычитанием его из результата измерения), что упрощает конструкцию прибора и процедуру измерения.

Если источник излучения и ваттметр находятся в одном месте, то появляется возможность исключить влияние $\Delta I_{\text{вх}}$ и $\Delta E_{\text{см}}$ на результат измерения путем периодического включения и выключения оптического излучения с синхронной обработкой оптического сигнала в ваттметре. При этом основной составляющей аддитивной погрешности измерения является $E_{ш}$. Авторами получена предельно низкая пороговая мощность при использовании данного метода и ОУ типа АД797 с ультранизким уровнем шума (50 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$), а также ФД с $I_T < 10$ нА. В партии из 10

ваттметров $P_{\text{мин}}$ находилась в пределах от -93 до -96 дБм, что при мощности оптического излучения $+6$ дБм обеспечило измерение затухания вплоть до 100 дБ.

Если нет возможности синхронной работы источника излучения и ваттметра, то можно для снижения $P_{\text{мин}}$ использовать способ, проиллюстрированный на рис. 2, где изображена упрощенная схема ВК. В этой схеме коммутатор S поочередно подключает вход ОУ либо к измерительному фотодиоду ФД1, либо к затемненному фотодиоду ФД2. В дальнейшем после обработки разностного сигнала удастся довести нижний предел измерения до -85 дБм при использовании в качестве ОУ микросхемы AD797. Очевидно, что темновые токи ФД1 и ФД2 должны быть одинаковыми.

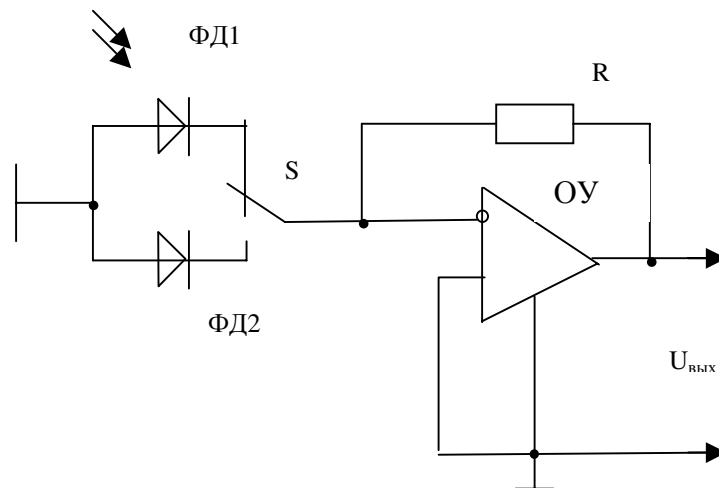


Рис. 2.

Дальнейшее уменьшение $P_{\text{мин}}$ связано с модуляцией оптического излучения частотой более 100 Гц (где фликер-шум более чем в 30 раз меньше в сравнении с инфранизким частотным диапазоном) с последующей фильтрацией первой гармоники оптического сигнала. При времени усреднения около 1 секунды нами была получена сверхнизкая пороговая мощность около 10^{-14} Вт (-110 дБм).

Сверхчувствительный фотоприемный тракт позволяет решить задачу поиска места перехода излучения из одного ВС в другой. Этот переход излучения оценивается переходным затуханием

$$A_{12} = 10 \lg(P_{x1}/P_{x2}), \quad (6)$$

Где: P_{x1} – мощность излучения во влияющем световоде ВС1 в точке X ;

P_{x2} – мощность излучения, наводимая в точке X в световоде ВС2 подверженном влиянию.

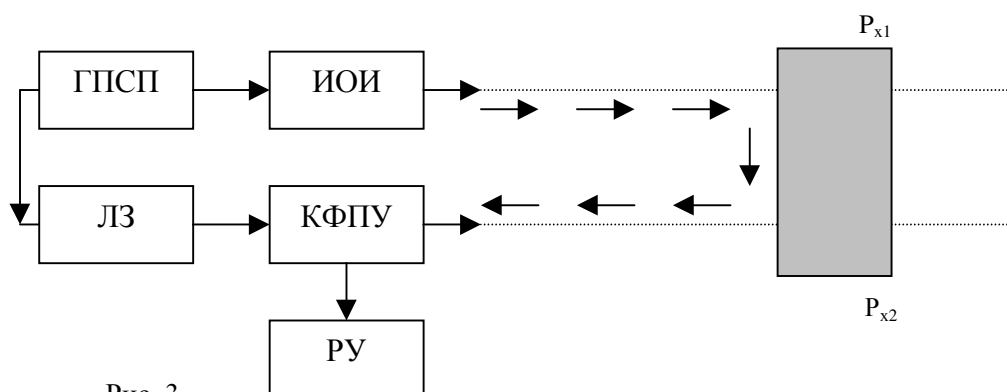


Рис. 3.

Такая задача, в частности, может возникнуть при деформации ВС, ухудшении защитного покрытия ВС, изгибе ВС с целью несанкционированного доступа к передаваемой информации и т.д. Упрощенная структурная схема устройства локализации места взаимного влияния ВС изображена на рис. 3, где ГПСП – генератор псевдослучайной последовательности; ИОИ – источник оптического излучения; КФПУ – корреляционное фотоприемное устройство; РУ – регистрирующее устройство; ЛЗ – линия задержки.

Испытания опытного образца показали, что при $A_{12} \leq 70$ дБ, место перехода излучения локализуется с погрешностью $\Delta l = \pm 100$ м на расстоянии до 75 км от начала линии при длине волны излучения 1,55 мкм и времени накопления около 3 мин.

Литература

1. Аксененко М.Д. и др. Микроэлектронные фотоприемные устройства. М.: Энергоатомиздат, 1984.- 209 с.
2. А. Ван дер Зил . Шумы при измерениях. М.: Мир, 1979. – 292 с.