

Министерство образования и науки Российской Федерации

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)**

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧ и КР)

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ФОТОПРИЁМНОГО УСТРОЙСТВА
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ МЕТОДОМ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу
«Оптические цифровые телекоммуникационные системы»

Томск 2011

Министерство образования и науки Российской Федерации

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)**

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧ и КР)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. каф. СВЧ и КР

_____ С. Н. Шарангович

___ май 2011 г..

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ФОТОПРИЁМНОГО УСТРОЙСТВА
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ МЕТОДОМ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу
«Оптические цифровые телекоммуникационные системы»

Разработчики
Проф. каф. СВЧ и КР
В.М. Шандаров
студент гр.145-3
А.А. Рыбальченко

Томск

2011

1. ВВЕДЕНИЕ

Целью данной лабораторной работы является теоретические исследования фотоприемных устройств волоконно-оптической системы связи.

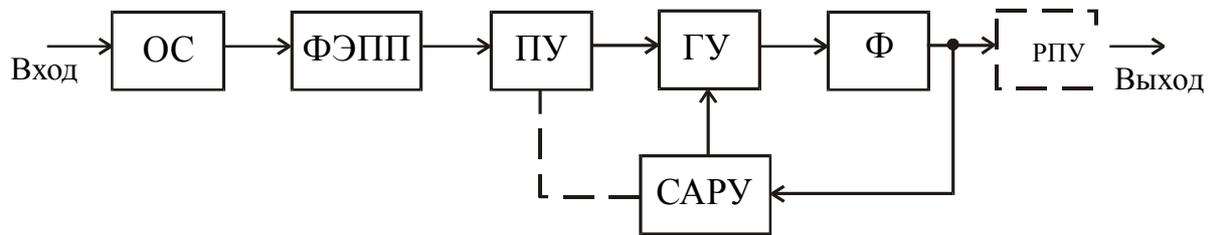
2. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ФОТОПРИЁМНЫХ УСТРОЙСТВ

2.1. Общие сведения

Фотоприёмное устройство (ФПУ) является составной частью линейного тракта ВОСП. В ФПУ происходит преобразование оптического сигнала в электрический, его усиление и обработка. Оптическим сигналом называют оптическое излучение, один или несколько параметров которого изменяется в соответствии с передаваемой информацией. Преобразование оптического сигнала в электрический осуществляется фотоэлектрическим полупроводниковым приемником излучения (ФЭПИ)— принцип действия которого основан на внутреннем фотоэффекте. Усиление необходимо для восстановления уровня сигнала, обеспечения максимально возможного при данных условиях отношения сигнала к шуму. Усиление может осуществляться до, после приемника излучения, а также в самом приемнике. Обработка электрического сигнала позволяет получить параметры сигнала, при которых аппаратура, подключенная к выходу ФПУ, может нормально функционировать.

ФПУ характеризуется системой параметров, важнейшими из которых являются:

- рабочая длина волны, для которой нормированы параметры;
- полоса пропускания, т.е. интервал частот, в котором модуль коэффициента передачи больше или равен половине его максимального значения;
- напряжение шума, т.е. среднеквадратичное значение флуктуаций выходного напряжения в заданной полосе частот в отсутствие оптического сигнала на его входном оптическом полюсе;
- порог чувствительности - минимальная средняя мощность оптического сигнала на входе при заданных характеристиках этого сигнала, при которой обеспечивается заданное отношение сигнал-шум или заданный коэффициент ошибок. На рисунке 1.1 приведена структурная схема ФПУ с прямым детектированием.



ОС— оптический соединитель; ФЭПП— фотоэлектрический полупроводниковый приёмник излучения; ПУ— предварительный усилитель; ГУ— главный усилитель; Ф— фильтр; РПУ— решающее пороговое устройство; САРУ— схема автоматической регулировки усиления.

Рисунок 1.1— Структурная схема ФПУ с прямым детектированием.

Одним из основных параметров, характеризующих помехозащищенность системы передачи (СП) является порог чувствительности ФПУ. В зависимости от порога чувствительности выбирается длина участка связи или максимальная скорость передачи. Уменьшение порога чувствительности позволяет увеличить длину участка связи или увеличить скорость передачи. Порог чувствительности ФПУ ограничен шумами, возникающими в фотодиоде, предварительном усилителе, тепловым шумом эквивалентного входного сопротивления усилителя и др.

2.2. Расчет порога чувствительности ФПУ

При исследовании порога чувствительности принята гауссова аппроксимация шумов. Вероятность ошибки при передаче информации определяется вероятностью принятия ложного сигнала о наличии “1” во время передачи ”0” (или наоборот):

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Q \exp(-x^2 / 2) dx; \quad (2.1)$$

где $Q = (D - S_0) / \sigma_0 = (D - S_1) / \sigma_1$ — отношение средней мощности сигнала к среднеквадратической мощности шума;

D — пороговый уровень;

S_1, S_0 — математическое ожидание сигналов при передаче “1” и “0” соответственно,

σ — среднеквадратичное значение шумового тока ФПУ.

При малом уровне освещенности $\sigma_0 = \sigma_1 = \sigma = \sqrt{i_{p-i-n}^2}$,

где $(i_{p-i-n}^2)^{0.5}$ — среднеквадратичное значение шумового тока приёмного модуля с р-і-п фотодиодом.

Мощность P , полученная приемным модулем, соотносится со средней мощностью P , падающей на ФД следующим образом:

$$\eta \cdot \bar{P} = P_1 \cdot p_1 + P_0 \cdot (1 - p_1) \quad (2.2)$$

где η —внутренняя квантовая эффективность,

P_0, P_1 — мощность, принятая при передаче “0” или “1” соответственно;

p_1 — вероятность принятия ”1” в заданном интервале времени.

Для большинства импульсных кодов $p_1=0,5$, поэтому:

$$\eta \cdot \bar{P} = (P_1 + P_2) / 2$$

Важное значение играет коэффициент затухания $\gamma = P_0 / P_1$.

Опуская дальнейший вывод, запишем выражение, которое определяет минимальный уровень детектируемой оптической мощности цифрового ФПУ с p - i - n ФД:

$$\eta \cdot P_{p-i-n} = \frac{1+\gamma}{1-\gamma} \cdot Q \cdot (h \cdot c / e \cdot \lambda) \cdot \sqrt{i_{p-i-n}^2} \quad (2.3)$$

где $h=6.62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка;

$c=3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме;

$e=1.602 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона;

λ — длина волны импульсов излучения.

Учитывая, что чувствительность ФД $S = (\eta \cdot e \cdot \lambda / h \cdot c)$, а так же, если во время передачи “0” мощность затухает полностью ($\gamma = 0$), то

$$P_{p-i-n} = (Q / S) \cdot \sqrt{i_{p-i-n}^2} \quad (2.4)$$

2.3. Интегралы Персона

Для учета влияния формы спектральной характеристики на шумовую полосу вводят интегралы Персона.

$$I_{n1} = \int_0^{\infty} H(y)^2 \cdot H_{in}(y) dy, \quad (2.5)$$

где $H(y)=HF(y) \cdot H_a(y)/H_{in}(y)$ — функция передачи ФПУ;

$HF(y)$ — функция передачи фильтра;

$H_a(y)$ — частотнозависимая часть модуля функции передачи предусилителя и корректора;

$H_{in}(y)$ — спектр входного сигнала, определяемый по формуле (2.6);

$y=f/B$ — нормированная частота;

B — скорость передачи.

$$H_{in}(y) = \exp(-2 \cdot \pi^2 \cdot \alpha^2 \cdot y^2), \quad (2.6)$$

где α — определяет, какую часть периода занимает входной сигнал.

Второй интеграл Персонака I_{n2} зависит от передаточной характеристики ФПУ:

$$I_{n2} = \int_0^{\infty} H(y)^2 dy. \quad (2.7)$$

Третий интеграл Персонака I_{n3} зависит от частотной характеристики линейного тракта ФПУ:

$$I_{n3} = \int H(y)^2 \cdot y^2 dy. \quad (2.8)$$

2.4. ФПУ с лавинным фотодиодом

При выводе уравнения (2.4) предполагалось, что шумовые токи в состояниях “1” и “0” равны, т.е. дробовый шум сигнального фототока не учитывался. Это предположение несправедливо для модуля с ЛФД из-за избыточного шума ЛФД, обусловленного случайной природой процесса умножения. При среднем коэффициенте умножения M среднеквадратическое значение шумовых токов при приеме “1” и “0” равны соответственно:

$$i_1^2 = i_{p-i-n}^2 + 2 \cdot e \cdot (e \cdot \lambda / h \cdot c) \cdot M^2 \cdot F \cdot I_{n1} \cdot B \cdot P_1 \quad (2.9)$$

$$i_0^2 = i_{p-i-n}^2 + 2 \cdot e \cdot (e \cdot \lambda / h \cdot c) \cdot M^2 \cdot F \cdot I_{n1} \cdot B \cdot P_0 \quad (2.10)$$

где B — скорость передачи;

F — шум-фактор умножения;

I_{n1} — интеграл Персонака.

Второе слагаемое в правой части представляет собой дробовый шум, обусловленный умножением сигнального фототока. Выражение для определения порога чувствительности ФПУ с ЛФД:

$$\eta \cdot \bar{P}_{лфд} = Q \cdot (h \cdot c / e \cdot \lambda) \cdot \frac{1 + \gamma}{1 - \gamma} \cdot \left(e \cdot Q \cdot F \cdot I_{n1} \cdot B \cdot \frac{1 + \gamma}{1 - \gamma} + \sqrt{(2 \cdot e \cdot Q \cdot F \cdot I_{n1} \cdot B)^2 \cdot \frac{\gamma}{(1 - \gamma)^2} + \frac{i^2}{M^2}} \right) \quad (2.11)$$

При выводе предполагалось, что сигнальный фототок увеличивается в среднем в M раз, темновой ток ЛФД равен нулю и что межсимвольная интерференция отсутствует: “хвосты” сигнального тока предыдущего бита не перекрываются с сигналом передаваемого в данный момент бита.

При идеальном коэффициенте затухания ($\gamma = 0$) формула упрощается:

$$\bar{P}_{лфд} = \frac{Q}{S} \cdot \left[\left(\sqrt{i_{p-i-n}^2} / M \right) + e \cdot Q \cdot F \cdot I_{n1} \cdot B \right] \quad (2.12)$$

При $M=1$ второй член уравнения (2.12) пренебрежимо мал и выражение (2.12) принимает вид уравнения (2.4) для ФПУ с p-i-n ФД.

Шум-фактор лавинного умножения определяется из выражения:

$$F = M \cdot \left[1 - (1 - K) \cdot \left(\frac{M - 1}{M} \right)^2 \right] \quad (2.13)$$

где K — отношение коэффициентов ударной ионизации носителей зарядов, причем $K < 1$.

Так как шум-фактор увеличивается с увеличением M , из (2.12) следует, что порог чувствительности приемного модуля уменьшается обратно пропорционально M только при достаточно малых значениях этого коэффициента. Увеличение M приводит к возрастанию шум-фактора и, соответственно, второго члена в выражении для $P_{лфд}$. Когда $M = M_{опт}$, величина $P_{лфд}$ минимальна и порог чувствительности достигает своего минимального значения для данного отношения K и уровня шума усилителя. При коэффициенте умножения $M > M_{опт}$, второй член в формуле (2.12) становится преобладающим. Значение $M_{опт}$ определяется из уравнения:

$$d\bar{P}_{лфд} / dM = 0.$$

2.5. Шумовой ток ФПУ с p-i-n ФД

Тепловой шум, обусловленный $Rэ$ (входное сопротивление):

$$i_{мен}^2 = \frac{4 \cdot k \cdot T}{R_э} \cdot I_{n2} \cdot B \quad (2.14)$$

где $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана;

T — температура в градусах Кельвина;

B — скорость передачи;

I_{n2} — интеграл Персонака, зависящий от передаточной характеристики цепи.

Дробовый шум за счет темнового тока ФД:

$$i_{др}^2 = 2 \cdot e \cdot I_{ТЕМН} + I_{n2} \cdot B \quad (2.15)$$

где $I_{ТЕМН}$ — темновой ток p-i-n ФД.

2.6. Шумы полевых транзисторов

Дробовый шум утечки затвора:

$$i_{ШУМ}^2 = 2 \cdot e \cdot I_{УТ} \cdot I_{n2} \cdot B \quad (2.16)$$

где $I_{УТ}$ — ток утечки затвора ПТ.

Э.Д.С. шума в единичной полосе:

$$e_{ШУМ}^2 = 4 \cdot k \cdot T \cdot \psi / g \quad (2.17)$$

где ψ — шум-фактор ПТ, зависящий от материала (Si — 0.7, $GaAs$ — 1.1);

g — крутизна ПТ в рабочей точке.

Выражение для генератора входного шумового тока:

$$i_{ПТ}^2 = \frac{4 \cdot k \cdot T \cdot \psi}{g} \cdot \left(\frac{I_{n2} \cdot B}{R_{Э}^2} + (2 \cdot \pi \cdot C_{Э})^2 \cdot I_{n3} \cdot B^3 \right) + 2 \cdot e \cdot I_{УТ} \cdot I_{n2} \cdot B \quad (2.18)$$

где I_{n3} — интеграл Персонака, зависящий от частотной характеристики линейного тракта ФПУ;

$C_{Э}$ — общая входная ёмкость.

Низкочастотный или фликкер-шум:

$$i_{ФШ}^2 = \frac{4 \cdot k \cdot N \cdot \psi}{g} \cdot (2 \cdot \pi \cdot C_{Э})^2 \cdot f_{Ш} \cdot I_{nП} \quad (2.19)$$

где $f_{Ш}$ — граничная частота фликкер-шума;

$I_{nП}=0,1 \dots 0,2$.

Полный шумовой ток равен сумме составляющих:

$$i_{\Sigma}^2 = i_{ПТ}^2 + i_{ФШ}^2 + i_{ДР}^2 + i_{ТЕП}^2 + i_{ПОСЛ}^2 \quad (2.20)$$

$i_{ПОСЛ}^2$ — шумовой ток, обусловленный последующим усилителем и др. элементами.

2.7. Шумы биполярных транзисторов

$$i_{ШУМБ}^2 = 2 \cdot e \cdot I_{Б} = 2 \cdot e \cdot I_{К} / \beta \quad (2.21)$$

где $I_{Б}$, $I_{К}$ — ток базы и коллектора.

$$e_{ШУМБ}^2 = 4 \cdot k \cdot T \cdot (r_{Б} + r_{Э} / 2) \quad (2.22)$$

где $r_{Б}$, $r_{Э}$ — распределённое сопротивление базы и эмиттера.

$$r_{\text{э}} = k \cdot T / e \cdot I_{\text{э}} \quad (2.23)$$

где $I_{\text{э}}$ — ток эмиттера.

Эквивалентный шумовой ток БТ:

$$i_{\text{БТ}}^2 = 4 \cdot k \cdot T \cdot (r_{\text{Б}} + r_{\text{э}} / 2) \cdot \left(\frac{I_{\text{н2}} \cdot B}{R_{\text{э}}^2} + (2 \cdot \pi \cdot C_{\text{э}})^2 \cdot I_{\text{н3}} \cdot B^3 \right) + 2 \cdot e \cdot I_{\text{Б}} \cdot B \cdot I_{\text{н2}} \quad (2.24)$$

Полный шумовой ток:

$$i_{\text{p-i-n}}^2 = i_{\text{БТ}}^2 + i_{\text{ДР}}^2 + i_{\text{Т}}^2 + i_{\text{ПОСЛ}}^2 \quad (2.25)$$

2.8. Шумовой ток ФПУ с ЛФД

Расчет аналогичен ФПУ с p-i-n ФД, но предполагается, что дробовый шум темнового тока, как и фототок, увеличивается за счет лавинного умножения, что приводит к дополнительному источнику избыточного шума.

$$i_{\text{ДР ЛФД}}^2 = i_{\text{p-i-n}}^2 + 2 \cdot e \cdot M^2 \cdot F \cdot I_{\text{ТМ}} \cdot I_{\text{н2}} \cdot B \quad (2.26)$$

На практике можно не учитывать все не умножаемые источники темнового тока. Оптимальный коэффициент лавинного умножения:

$$M_{\text{ОПТ}} = \frac{1}{\sqrt{k}} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{i_{\text{p-i-n}}^2}}{e \cdot Q \cdot I_{\text{н1}} \cdot B} + k - 1} \quad (2.27)$$

Здесь не учтены темновой ток ЛФД и конечное значение коэффициента γ .

Они еще уменьшают $M_{\text{ОПТ}}$.

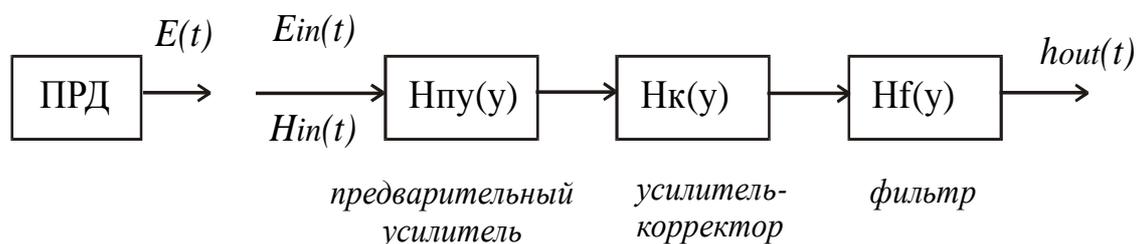
Порог чувствительности ФПУ с ЛФД:

$$\bar{P}_{\text{ЛФД}} = \sqrt{\left(\bar{P}_{\text{p-i-n}} / M^2 \right) + 2 \cdot e \cdot I_{\text{ТМ}} \cdot (1/S)^2 \cdot Q^2 \cdot F \cdot I_{\text{н2}} \cdot B + \frac{e}{S} \cdot Q^2 \cdot F \cdot I_{\text{н1}} \cdot B} \quad (2.28)$$

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1. Описание экспериментальной установки и методики эксперимента

На рисунке 3.1 приведена структурная схема математической модели программы.



ПРД— передающее устройство.

Рисунок 3.1 — Структурная схема математической модели программы.

При запуске файла *Modelup.exe* на экране монитора появляется главная форма, содержащая меню и кнопки, дублирующие меню. В разделе “Сведения” содержится краткая теория и информация о программе. Для моделирования применяется четыре формы:

- длительность импульса на выходе ФПУ;
- расчёт шумов ФПУ;
- расчёт порога чувствительности ФПУ;
- форма импульса на выходе ФПУ.

3.2. Порядок выполнения работы

3.2.1. Ознакомьтесь с теоретической частью работы.

3.2.2. Выберите элементы функциональной схемы (по заданию преподавателя).

3.2.3. Введите необходимые данные для расчета формы импульса на входе ФПУ (скорость передачи информации B , длину участка связи L , удельную дисперсию D , ширину спектральной линии источника излучения).

3.2.4. Пронаблюдайте форму импульса на входе ФПУ и импульсную характеристику входного сигнала при различных значениях B , L , D и ширины спектральной линии источника излучения.

3.2.5. Выберите электрический фильтр, схему усилителя. Пронаблюдайте график частотнозависимой части модуля функции передачи предусилителя и корректора и спектральную характеристику фильтра. Запишите значения интегралов Персонака.

3.2.6. Введите Q —отношение сигнал/шум, отношение коэффициентов ударной ионизации, выберите транзистор.

3.2.7. Пронаблюдайте зависимости спектральной плотности шумов от частоты для $p-i-n$ ФД:

— тепловой шум $ST(f)$;

— фликкер-шум $Sf(f)$.

А также значения теплового шума (St) и дробового шума (Sd).

3.2.9. Пронаблюдайте зависимость порога чувствительности от коэффициента лавинного умножения $Papd(M)$ для ЛФД.

3.2.10. Пронаблюдайте импульсную характеристику фильтра $Hout(t)$ и форму выходной посылки $Hf(t)$.

3.2.11. Провести сравнение полученных результатов и сделать выводы.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1. Что понимается под фотоприёмным устройством с прямым детектированием?

4.2. Напишите назначение отдельных элементов на структурной схеме (рис. 1.1).

4.3. Какие допущения сделаны при выводе формулы (2.1) для вероятности ошибки.

4.4. Раскройте алгоритм расчета порога чувствительности в цифровой системе передачи данных (формула 2.11).

4.5. Почему существует оптимальный коэффициент лавинного умножения для порога чувствительности в ФПУ с ЛФД.

4.6. Перечислите типы шумов в р-і-п и ЛФД.

4.7. Каковы функции распределения шумов различной природы в ФПУ.

4.8. Что характеризуют интегралы Персонака.

4.9. Как меняется форма импульса на входе ФПУ в зависимости от значений B , L , D и ширины спектральной линии излучения.

4.10. Какова должна быть зависимость спектральной плотности шумов различной природы от частоты.

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

Отчёт должен содержать:

5.1. Цель работы и схему математической модели.

5.2. Результаты экспериментов, сведённые в таблицу.

5.3. Выводы по результатам проделанного эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скляров О К. Волоконно-оптические сети и системы связи. Учебное пособие.- С-Пб : Лань, 2010. – 272 с.

2. Фокин В.Г. Оптические системы передачи и транспортные сети. Учебное пособие .- М.: Эко-Трендз, 2008. -288 с.
3. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи (4-е, дополненное издание)- М. : Эко-Тренд. 2007. -512 с..
4. Оптические цифровые телекоммуникационные системы: учебно-методическое пособие по практическим занятиям// Коханенко А.П., Шарангович С.Н. / Под ред. С.Н. Шаранговича – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2007. -78 с.
5. Гауэр Дж. Оптические системы связи.—М.: Радио и связь.— 1989.— 504 с.
6. Волоконно-оптические системы передачи./ Под ред. Гомзина В.Н.— М.: Радио и связь.— 1992.— 416 с.