

ПРОЕКТ ЛАЗЕРНОГО АДАПТИВНОГО ПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА, РАБОТАЮЩЕГО ПО КРИТЕРИЮ НЕЙМАНА-ПИРСОНА

Филатов В.И.¹, Борукаева А.О.², Бердиков П.Г.³

Email: Filatov643@scientifictext.ru

¹Филатов Владимир Иванович – кандидат технических наук, доцент, преподаватель,
кафедра защиты информации, факультет информатики и систем управления,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана;

²Борукаева Александра Олеговна – сотрудник,
региональный учебно-научный центр «Безопасность»,
студент;

³Бердиков Павел Геннадьевич – студент,
кафедра защиты информации, факультет информатики и систем управления,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
г. Москва

Аннотация: стремительное развитие производственных сил, науки и культуры, все возрастающие связи как между отдельными районами внутри государств, так и между государствами, немислимы без интенсификации обмена информацией. Неуклонно растущий объем информации требует высоких скоростей её передачи и, следовательно, требует создания высокоинформативных каналов связи. Успехи последних лет в квантовой электронике привели к возможности использования высокоинформативных оптических каналов связи. Главное достоинство оптики - потенциально неограниченная полоса частот и, соответственно, возможность передачи информации с большой скоростью. В качестве другого достоинства оптических систем называют такую ширину излучаемого лазерами пучка при практически полном отсутствии боковых лепестков. Ещё одним достоинством оптических систем является возможность резкого снижения габаритов приёмнопередаточных устройств. Лазерные приёмопередатчики позволяют осуществлять защищенную от подслушивания связь на территории промышленных комплексов, обеспечивают секретность передачи информации по военным каналам связи.

Однако, имеются серьёзные трудности, препятствующие широкому внедрению лазерных систем. Одной из таких трудностей является проблема нацеливания узких лучей передающих устройств на объекты и слежение лазерным лучом за подвижными объектами. Лазерные системы должны обладать исключительно высокой угловой точностью наведения и высокой стабильностью удержания на заданном направлении.

Ключевые слова: лазерных информационных систем, техника, лазер, информация.

DESIGN OF A LASER ADAPTIVE RECEIVER OPERATING ACCORDING TO THE NEUMANN-PEARSON CRITERION

Filatov V.I.¹, Borukaeva A.O.², Berdikov P.G.³

¹Filatov Vladimir Ivanovich - Candidate of technical Sciences, Associate Professor, Lecturer,
DEPARTMENT OF INFORMATION PROTECTION,
FACULTY OF INFORMATICS AND CONTROL SYSTEMS,
BAUMAN MOSCOW STATE TECHNICAL UNIVERSITY;

²Borukaeva Alexandra Olegovna – Employee,
REGIONAL TRAINING AND RESEARCH CENTER "SECURITY",
Student;

³Berdikov Pavel Gennadevich – Student,
DEPARTMENT OF INFORMATION PROTECTION,
FACULTY OF INFORMATICS AND CONTROL SYSTEMS,
BAUMAN MOSCOW STATE TECHNICAL UNIVERSITY
MOSCOW

Abstract: the rapid development of the productive forces, science and culture, the increasing links both between individual regions within States and between States, are unthinkable without the intensification of information

exchange. The steadily growing volume of information requires high transmission rates and, therefore, requires the creation of highly informative communication channels. The success of recent years in quantum electronics has led to the possibility of using highly informative optical communication channels. The main advantage of optics is a potentially unlimited frequency band and, accordingly, the ability to transmit information at high speed. Another advantage of optical systems is the width of the beam emitted by lasers in the absence of side lobes. Another advantage of optical systems is the possibility of a sharp reduction in the size of the receiving devices. Laser transceivers allow to carry out the communication protected from eavesdropping in the territory of industrial complexes, provide secrecy of information transfer on military communication channels.

However, there are serious difficulties that prevent the widespread introduction of laser systems. One of these difficulties is the problem of targeting narrow beams of transmitting devices at objects and tracking of moving objects by a laser beam. Laser systems must have an exceptionally high angular precision of guidance and a high stability of retention in a given direction.

Keywords: laser information systems, technology, laser, information.

УДК 331.225.3

1.1. Введение

Стремительное развитие производственных сил, науки и культуры, все возрастающие связи как между отдельными районами внутри государств, так и между государствами, немислимы без интенсификации обмена информацией. Неуклонно растущий объем информации требует высоких скоростей её передачи и, следовательно, требует создания высокоинформативных каналов связи. Успехи последних лет в квантовой электронике привели к возможности использования высокоинформативных оптических каналов связи. Главное достоинство оптики - потенциально неограниченная полоса частот и, соответственно, возможность передачи информации с большой скоростью. В качестве другого достоинства оптических систем называют такую ширину излучаемого лазерами пучка при практически полном отсутствии боковых лепестков. Ещё одним достоинством оптических систем является возможность резкого снижения габаритов приёмнопередающих устройств. Лазерные приёмопередатчики позволяют осуществлять защищенную от подслушивания связь на территории промышленных комплексов, обеспечивают секретность передачи информации по военным каналам связи.

Однако, имеются серьёзные трудности, препятствующие широкому внедрению лазерных систем. Одной из таких трудностей является проблема нацеливания узких лучей передающих устройств на объекты и слежение лазерным лучом за подвижными объектами. Лазерные системы должны обладать исключительно высокой угловой точностью наведения и высокой стабильностью удержания на заданном направлении.

Другой проблемой является ослабление светового луча в облаках и тумане. Атмосферный канал характеризуется сильными турбулентностями, приводящими к флуктуациям коэффициента преломления среды и, следовательно, к искажениям лазерного луча и флуктуациям прихода луча. Проблема обеспечения высоконадежной оптической связи через атмосферу ещё не решена.

Уже на данном этапе развития лазерной техники системы связи оптического диапазона волн могут заменять или удачно дополнять обычные радиосистемы. Дальнейшее развитие квантовой электроники, внедрение оптикоэлектроники, голографии, оптикоинтегральной техники, оптических запоминающих устройств и волоконных световодов, разработка статистической теории связи-всё это открывает качественно новые возможности и перспективы конструирования и применения лазерных информационных систем.

1.2. Лазерное адаптивное приёмное устройство

В лазерных системах связи для принятия решения о наличии сигнала необходимо знание параметров распределения шума. В реальных условиях обнаружения сигналов оптического диапазона волн априорные сведения о параметрах распределения шума нередко бывают неизвестными ил носят случайный характер. Подобная ситуация характерна для работы системы в каналах с рассеянием или при связи с быстродвижущимися объектами: самолётами, ракетами, космическими аппаратами, а также при использовании их в качестве ретрансляторов.

При отслеживании быстродвижущихся объектов происходит постоянное изменение параметров атмосферы и в поле зрения приёмника попадает фоновое излучение от различных источников, интенсивность которых может меняться в значительных пределах случайным образом или быть априорно неизвестным перед началом работы лазерной системы связи.

Для определения наличия или отсутствия сигнала на входе приёмника лазерного излучения вычисляется пороговое значение (η). Порог обнаружения выбирается, исходя из максимально допустимой вероятности ложного обнаружения $P_{лт} = \alpha$ (вероятность ложной тревоги) при данном среднем уровне шума.

Алгоритмы вычисления порога обнаружения, согласно критериям Неймана-Пирсона, основан на решении уравнения:

$$\bar{\alpha} = \int_0^{\infty} \sum_{r=r_n}^{\infty} P(rS_{ш})w(S_{ш}) dS_{ш} \quad (1)$$

Относительно η ;

где: r – число наблюдаемых фотоэлектронов;

$S_{ш}$ – среднее число шумовых фотоэлектронов за интервал наблюдения;

$P(rS_{ш})$, $w(S_{ш})$ соответственно условное и априорное распределение случайных величин r и $S_{ш}$.

Однако в каналах с переменными параметрами или с нестационарными помехами (условия приёма в турбулентной атмосфере или работе с быстродвижущимися объектами.) уравнение (1) не достаточно характеризует качество работы реальной системы, так как в отдельные интервалы времени её работы вероятность ложной тревоги α может становиться намного больше $\alpha_{доп}$. Поэтому для обеспечения нужного качества работы реальной системы в каналах с переменными характеристиками необходимо наряду с условием (1) поддерживать (2) в течение всего времени работы системы.

$$\alpha \leq \alpha_{доп} \quad (2)$$

Реализация системы, работающей по алгоритму (1) с требуемым допущением (2) базируется на построении адаптивного канала формирования оценок неизвестных параметров шума и вычисления порога на каждом интервале времени $\tau < \tau_{шк}$ ($\tau_{шк}$ -интервал корреляции шума), в течение которых параметры шума практически можно считать постоянными. В этом случае алгоритмы вычисления порога обнаружения (1) упрощаются:

Формула:

$$\hat{\alpha} = \sum_{r=r_n}^{\infty} P(rS_{ш}^n) \quad (3)$$

2. Структурная схема лазерного адаптивного приёмного устройства

Одним из возможных вариантов технической и практической реализации адаптивного приёмного устройства является система, структурная схема которой приведена на рис. 1.

Рассмотрим принцип действия данной системы. На антенное устройство поступает электронный сигнал. Информационному символу «0» соответствует пауза длительности T , а символу «1»-излучение с правой (левой) круговой поляризацией той же длительности. После пространственной и частотной селекции принятый сигнал поступает на пространственный разделитель поляризации, который состоит из четверть-волновой пластинки и призмы Волластана. Луч фокусируется на четверть-волновую пластинку, которая увеличивает сдвиг фаз $\Delta\phi$ между обыкновенными и необыкновенными лучами дополнительно на $\pi/2$. В результате этого, после $\pi/4$ пластинки сигнал с круговой поляризацией преобразуется в сигнал с линейной поляризацией. Призма Волластана ориентируется таким образом, что на нижний канал поступает только фоновое излучение, а на верхний - смесь фонового излучения и полезного сигнала. Верхний канал назовём информационным, так как на него поступает полезный сигнал, а нижний - каналом оценки шума и формированием порога. Ввиду того, что фоновое излучение поляризовано хаотически, среднее число принятых фоновых фотоэлектронов в информационном и шумовом каналах одинаково, что важно для принятия решения по вычисленному порогу.

В оценочном канале после детектирования и усиления сигнала происходит оценка параметров шума и формирование порога, который поступает в решающее устройство.

В информационном канале в решающем устройстве происходит сравнение принятого сигнала с пороговым значением и выносится решение о наличии или отсутствии полезного сигнала.

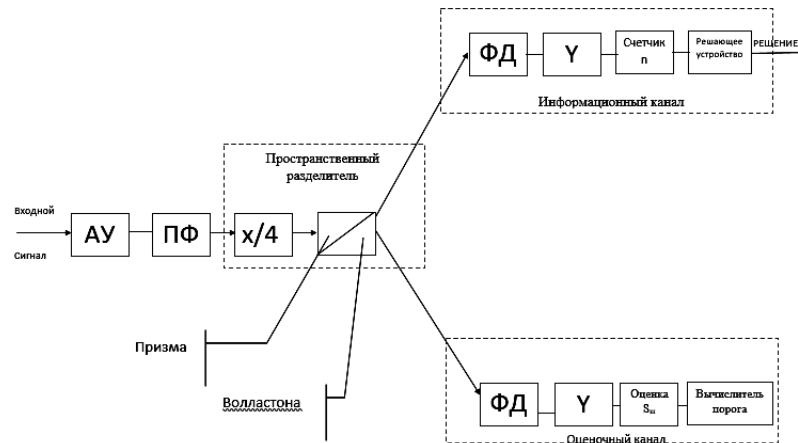


Рис. 1. Структурная схема лазерного адаптивного приемного устройства, работающего по критерию Неймана – Пирсона

3. Структурная схема блока оценки шума $S_{ш}$

В качестве оценки параметра шума примем среднее выборочное значение (4), которое при достаточно большом m (m -размер выборки) имеет нормальное распределение (4а):

$$\hat{S}_{ш} = \frac{1}{m} \sum_{r=1}^m N_{шч} \quad (4)$$

$$\hat{S}_{ш} \in N(S_{ш}; \frac{S_{ш}^2}{m}) \quad (4a)$$

Данная оценка используется в алгоритме (3) для формирования порога обнаружения.

Преобразовывая выражение (4), получим рекуррентную формулу для вычисления оценки параметра шума на «n»-ом шаге измерения, что необходимо для непрерывного значения параметров фонового излучения (5):

$$\hat{S}_{шn} = S_{ш(n-1)} + \frac{S_{ш(n)} - S_{ш(n-1)}}{n} \quad (5),$$

где $\hat{S}_{ш}(n-1)$ -оценка параметра шума на « n-1» шаге измерения;
 $S_{ш}(n)$ -среднее число шумовых фотоэлектронов на «n»-ом шаге измерения.
 Реализация алгоритма оценки параметра шума приведена на рис.2

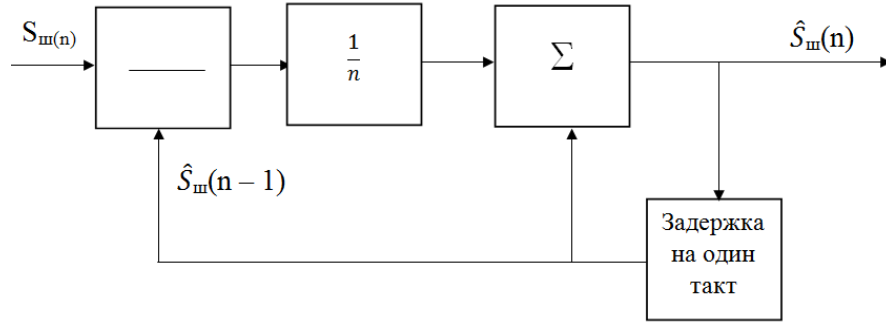


Рис. 2. Структурная схема блока оценки параметров шума

4. Оценка качества данной системы.

Для характеристики качества адаптации примем усредненную дисперсию относительно ошибки $\Delta\alpha = \frac{\hat{\alpha} - \alpha}{\alpha}$ по всем возможным значениям $S_{ш}$ (6).

$$\sigma_{\Delta\alpha}^2 = \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \Delta\alpha^2 w(\Delta\alpha/S_{ш}) w(S_{ш}) d(\Delta\alpha) dS_{ш} \quad (6),$$

где $w(\Delta\alpha/S_{ш})$ – условный закон распределения относительной ошибки $\Delta\alpha$;

$w(S_{ш})$ – априорное распределение среднего числа шумовых фотоэлектронов за интервал наблюдения. Представим $\Delta\alpha$ в виде разложения в ряд Тейлора, ограничиваясь первым членом разложения (7).

$$\Delta\alpha = \frac{\left. \frac{\partial \hat{\alpha}}{\partial S} \right|_{S_{ш}=S_{ш}} (S_{ш} - S_{ш})}{\alpha} = A \Delta S_{ш} \quad (7)$$

Откуда непосредственно следует (8):

$$\Delta\alpha \in N(0; \sigma\Delta\alpha),$$

$$\text{где } \sigma\Delta\alpha = A\sigma_{S_{ш}} \quad (8)$$

Решая уравнение (6) с учетом (4а) и (8) относительно m , получим (9):

$$m = \frac{\int_0^\infty A^2 \sigma_{S_{ш}}^2 w(S_{ш}) dS_{ш}}{\sigma_{\Delta\alpha}^2} \quad (9)$$

Данное выражение позволяет при различных условиях работы системы определить необходимый размер выборки m , на которой достигается требуемое качество адаптации ($\sigma_{\Delta\alpha}^2$).

Как частный пример рассмотрим задачу оценки шумовых фотоэлектронов, подчиняющихся закону распределения Бозе-Энштейна:

$$P(nS_{ш}) = \frac{1}{1 + S_{ш}} \left(\frac{S_{ш}}{1 + S_{ш}} \right)^2$$

Определим вероятность ложной тревоги α :

$$\alpha = \sum_{n=n_0}^{\infty} P(nS_{ш}) = \left(\frac{S_{ш}}{1 + S_{ш}} \right)^{n_0}$$

Оценка вероятностей ложной тревоги $\hat{\alpha}$ производится по следующему алгоритму:

$$\hat{\alpha} = \left(\frac{S_{ш}}{1 + S_{ш}} \right)^{\hat{n}_0}, \text{ где } \hat{n}_0 = \frac{\ln \alpha}{\ln \frac{S_{ш}}{1 + S_{ш}}}$$

Определим по формуле (7) относительную ошибку $\Delta\alpha$:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\delta \hat{\alpha}}{\delta S_{ш}} \right|_{S_{ш} = S_{ш}} &= \left. \ln \alpha \left(\frac{S_{ш}}{1 + S_{ш}} \right)^{\frac{\ln \alpha}{\ln \frac{S_{ш}}{1 + S_{ш}}}} \ln \frac{S_{ш}}{1 + S_{ш}} \times \frac{1}{\hat{S}_{ш}(1 + \hat{S}_{ш}) \ln^2 \frac{\hat{S}_{ш}}{1 + \hat{S}_{ш}}} \right|_{S_{ш} = S_{ш}} \\ &= \frac{\ln \alpha}{\ln \frac{S_{ш}}{1 + S_{ш}}} \left(\frac{S_{ш}}{1 + S_{ш}} \right) \frac{\ln \frac{S_{ш}}{1 + S_{ш}}}{\ln \frac{S_{ш}}{1 + S_{ш}}} \times \frac{1}{S_{ш}(1 + S_{ш})}; \\ \Delta\alpha &= \frac{1}{S_{ш}(1 + S_{ш})} \times \frac{\ln \alpha}{\ln \frac{S_{ш}}{1 + S_{ш}}} \times (S_{ш} - S_{ш}) \end{aligned}$$

Окончательно:

$$\Delta\alpha = A\Delta S_{ш}$$

Подставляя значение A и $\sigma_{S_{ш}}^2$ в выражение (9) получим:

$$m = \frac{1}{\sigma_{\Delta\alpha}^2} \int_0^{\infty} \frac{\ln^2 \alpha}{S_{ш}(1 + S_{ш}) \ln^2 \frac{S_{ш}}{1 + S_{ш}}} w(S_{ш}) dS_{ш}$$

Полагая, что шум $S_{ш}$ не изменяется в течение выборки, выражение для m упрощается [1]:

$$m = \frac{1}{\sigma_{\Delta\alpha}^2} \int_0^{\infty} \frac{\ln^2 \alpha}{S_{ш}(1 + S_{ш}) \ln^2 \frac{S_{ш}}{1 + S_{ш}}}$$

5. Выбор элементов лазерного адаптивного приемного устройства.

5.1 Антенное устройство

Для оптического приёмника с прямым детектированием желательно выбрать диаметр приёмной антенны как можно большим. Это обеспечит максимум энергии сигнала на входе фотодетектора.

Приёмная антенна может быть отражательного и рефракционного типа, зеркальные и линзовые.

Линзовые системы обладают некоторым преимуществом, заключающимся в отсутствии затенения по центру и возможной изоляции (и даже герметизации) приёмопередатчика от окружающей среды за счет использования объектива в качестве защитного «окна». Однако температурная зависимость показателя преломления оптики может послужить причиной ужесточения допусков на колебания температуры в корпусе устройства.

Всякая полностью зеркальная оптическая система не имеет хроматических аберраций.

Рассмотрим приёмную оптическую антенну типа Кассегрена.

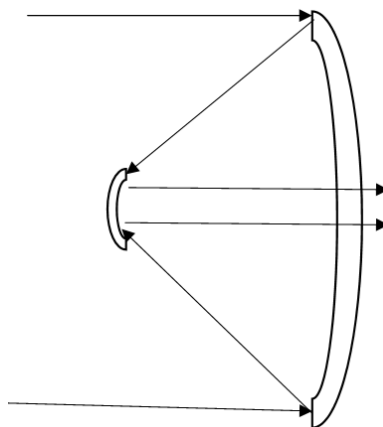


Рис. 3. Оптическая антенна типа Кассегрена

В этой системе первичный рефлектор (3) направляет пучок света 1 на вторичный рефлектор 2, который отражает луч в отверстие в центре первичного рефлектора. Аберрацию можно свести к минимуму, используя параболический первичный и гиперболический вторичный рефлекторы.

Для этой системы характерно то, что часть прямого светового пучка затеняется вторичным рефлектором. В результате этого имеет место потеря полезного сигнала и, следовательно, ухудшение чувствительности системы.

Зеркальные антенны имеют обычно зеркала с наружным отражающим слоем, нанесенным на стеклянные, металлические или пластмассовые основания требуемой формы, что уменьшает потери на отражение и снижает требования к точности изготовления тыльной стороны основания.

Для отражающих покрытий применяют тонкие плёнки золота, хрома, алюминия и серебра. Выбор покрытия зависит от диапазона спектра, в котором должна работать антенна, от её конструкции и технологии изготовления.

Наибольшим коэффициентом отражения в видимой и ближней инфракрасной областях спектра обладает серебро (96%-98%), однако полированная поверхность серебра быстро темнеет.

Более устойчивы покрытия из золота, алюминия и хрома, но коэффициент отражения таких слоёв не более (78%-85%).

В качестве отражающего покрытия выберем внешнее алюминирование с оксидированием фосфорнокислым алюминием и нанесении серебряного цинка коэффициент отражения на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм равен $0,93 \div 0,96$ и температурная прочность такой зеркальной антенны находится в пределах $[-60^\circ\text{C} \div +300^\circ\text{C}]$.

5.2 Отклоняющая оптика

Четвертьволновая пластинка

Пластинка применяется для преобразования круговой поляризации в линейную и наоборот. Она изготавливается из одноосных кристаллов.

В результате эффекта двулучепреломления ортогональные составляющие волны распространяются с различными скоростями и между ними возникает фазовый сдвиг. Кристаллографическая ось, ортогональная оптической оси, обеспечивающая минимальную задержку распространяющейся через кристалл волны, называется «быстрой» осью, другая ось называется «медленной» осью.

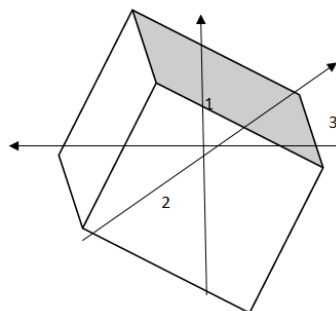


Рис. 4. Четвертьволновая пластинка: 1 - «медленная» ось, 2 - «быстрая» ось, 3 - направление распространения волны

Призма Волластона

Призма Волластона применяется для выделения модулированного по поляризации полезного сигнала. Эта призма состоит из двух призм, изготовленных из биаксиальных кристаллов, которые соединены вместе, причем их оптические оси ориентированы, как показано на рисунке.

При падении на призму вертикально-поляризованный луч отклоняется в одном направлении, горизонтально поляризованный луч отклоняется на тот же угол в противоположном направлении. Угол расхождения лучей зависит от конструкции призмы и составляет величину от нескольких градусов до 30°

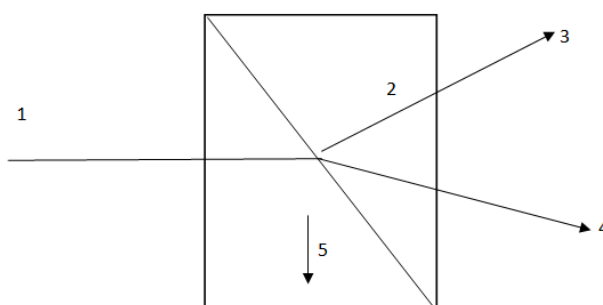


Рис. 5. Призма Волластона: 1 - входное излучение, 2, 5 - оптическая ось, 3 - вертикально поляризованный луч, 4 - горизонтально поляризованный луч

Электрический расчет блока усилителя приемного устройства

Исходные данные:

1. Номинальное выходное напряжение $U_{\text{вых.ном}} = 60\text{В}$.
2. Номинальное входное напряжение $U_{\text{вх.ном}} = 9\text{В}$.
3. Номинальное отношение сигнал/шум на выходе усилителя $y_{U_{\text{ном,к}}} = 300$.
4. Выходное сопротивление несимметричного источника сигнала $R_{OC} = 150\text{ОМ}$.
5. Сопротивление несимметричной нагрузки $R_{oh} = 150\text{ОМ}$.
6. Верхняя граничная частота $f_g = 100\text{МГц}$.
7. Полоса пропускания усилителя $\Delta f = 100\text{МГц}$.
8. Полоса пропускания канала $\Delta f_k = 8\text{МГц}$.

Расчет:

Коэффициент усиления данной схемы рассчитывается по формуле:

$$K_{ov} = \frac{U_{\text{вых.ном}}}{U_{\text{вх.ном}}} = 15$$

Учитывая, что на входе усилителя обеспечивается условия согласования, входные напряжения шума и усилителя следующие:

$$U_{\text{ш вых. к}} = \frac{1}{16} \sqrt{R_{OC} \Delta f_k} = 2,2 \text{ мкВ эфф}$$

$$U_{\text{ш вых. у}} = \frac{1}{16} \sqrt{R_{OC} \Delta f} = 7,8 \text{ мкВ эфф}$$

Максимально допустимый коэффициент шума:

$$F_{\text{к ср макс}} = \left[\frac{U_{\text{вх.мин}}}{U_{\text{ш вых. к}} \sqrt{U_{\text{ном.к}}}} \right]^2 = 2,5 \times 10^{12}$$

Так как усилитель предназначен для промышленного выпуска, его каскада следует выполнить по идентичным схемам. Поскольку полоса пропускания усилителя 100 МГц, каскады следует выполнить по распределенной схеме. Межкаскадная связь непосредственная, для исключения сложных согласующих трансформаторов.

Критическая частота каскадов определяется из выражения:

$$f'_{\text{кр}} = \frac{f_{\text{в}}}{0,9} = 110 \text{ МГц}$$

Выбор типа лампы

Исходя из рабочего диапазона частот, требований экономичности, долговечности и габаритности, предварительно выберем лампу (6 Ж I П).

Для учета ограничивающего влияния индуктивности сеточного ввода лампы и соединительного проводника, определим значение критической частоты по формуле:

$$f_{\text{кр}} = \frac{f_{\text{кр}'}}{\sqrt{1 - 4\pi^2 L_{\text{вх}}' C_{\text{вх}} (f_{\text{кр}'})^2}} = 115 \text{ МГц},$$

Где $L'_{\text{вх}} = 0,029 \text{ мкчн}$, $C_{\text{вх}} = 7 \text{ пф}$

Необходимое число ламп выходного каскада найдем по формуле:

$$n_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых.ном}} f_{\text{кр}}}{m D_{\text{в}}}} = 3,$$

Где $D_{\text{в}} = 2157 \text{ МГц}$

Проверка линий на заданное волновое сопротивление. Для сеточной линии:

$$\rho_{\text{ог}} = \frac{m D_{\text{г}}}{f_{\text{кр}}} = 165 \text{ Ом}$$

Где $D_{\text{г}} = 15,8 \cdot 10^3 \text{ (Ом МГц)}$

Для анодной линии:

$$\rho_{\text{оа макс}} = \frac{m D_{\text{а}}}{f_{\text{кр}}} = 640 \text{ Ом}$$

Где $D_{\text{а}} = 58 \cdot 10^3 \text{ (Ом МГц)}$

Из расчетов видно, что число ламп выходного каскада следует увеличить, так как волновое сопротивление выбрано равным $\rho_{\text{оа}} = 150 \text{ Ом}$.

$$n'_{\text{вых}} = n_{\text{вых}} \frac{\rho_{\text{оа макс}}}{\rho_{\text{оа}}} = 12$$

Определение коэффициента усиления каскада:

$$K_{\text{овi}} = \frac{1}{2} n \cdot S \cdot \rho_{\text{ог}} = 23,5$$

Где $n = 12$, $S = 12 \cdot 10^{-3} \text{ а/в}$

Выходной уровень сигнала:

$$\vartheta_{\text{о вых}} = K_{\text{овi}} \cdot \Delta v_{\text{г макс}} = 23,5 \times 2,8 = 66 \text{ (в)}$$

Определяем число каскадов:

$$N = \frac{\lg(K_{\text{ов}})x}{\ln(K_{\text{ов}})i} = \frac{\lg 15}{\lg 23,5} = 1$$

Выбор НЧ коррекции.

$$R_1 = R_2 = \rho_{\text{оа}} = 150 \text{ Ом}$$

$$L = 5 \text{ мкчн С} = \frac{L}{(\rho_{\text{ов}})^2} = 910 \text{ пф}$$

$$C_0 = \frac{\rho_{\text{оа}}}{\rho_{\text{ог}}} c_{\text{г}} = c_{\text{г}} = 7500 \text{ пф}$$

$E_{\text{г}}$ -смещение выбираем по анодносеточной характеристике лампы:

$$E_{\text{г}} = -20 \text{ в}$$

Анодное напряжение $E_{\text{а}}$:

$$E_{\text{а}} = e_{\text{а мин}} + \vartheta_{\text{вых}} = 100 + 60 = 160 \text{ в}$$

Список литературы / References

1. Богенс К.К., Ерохин Г.А., Шорин О.А. Прогнозирование теневых зон при расчете поля УКВ в системах подвижной радиосвязи // Электросвязь, 2000. № 7.
2. Шабунин С.Н., Лесная Л.Л. Распространение радиоволн в мобильной связи. Методические указания по курсу «Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства в системах мобильной связи» для студентов всех форм обучения радиотехнических специальностей. Екатеринбург. УГТУ, 2000. 38 с.
3. Ивоботенко В.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в электромеханике. М.:

Энергия, 1975. 184 с.